

# 雷波形パラメータの決定法

## A method to decide the parameters of lightning wave form

### 内容梗概

電力系統の絶縁協調設計に際して、雷サージの影響を調べることは重要な項目である。近年は、Bergeron法を用いたEMTPによる過渡現象計算が、これらを調べる有力な道具の一つになっている。計算の入力の一つに雷波形があるが、この波形の数式的表現法(例えば、 $A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ )と、規約波頭長、規約波尾長の定義との間には厳密な意味でのコンセンサスが得られているとはいえない。

雷波形の波頭しゅん度によって、電力線上を伝搬する雷サージ電圧は大きく変化するので、この入力波形の数式表現は極めて重要である。

本稿では、Bewleyの示した波形表現法をレビューし、現在主に用いられている表現法での波形のパラメータ( $A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ ならば、 $A, \alpha, \beta$ )の決定が、Newton-Raphson法を用いることによって可能であることを示し、更に、より現実的な波形表現法を作ることが重要であることを示唆している。

広瀬 英雄\* Hideo Hirose

### 1. まえがき

電力系統の絶縁協調設計に際して、雷サージおよび開閉サージの系統に及ぼす影響を的確に把握することは、保安上からも経済性の点からも極めて重要である。特に、近年の超々高圧(1,000kV)送電に対しては、長距離送電が予想されるので、この影響を正確に知ることがいっそう要求される。

サージに関する調査は、電気学会でも精力的に行なわれている(例えば、電力系統のサージ解析調査専門委員会)が、最近での中心的な解析手法は、Bergeron法を用いたデジタル計算であろう。BPAから提供されるEMTP (Electromagnetic Transients Program)は、非常に機能性に富んでいるため、最も適用されているソフトウェアである。そのため、上記委員会でもこのEMTPを用いた解析結果による検計が行なわれている。EMTPでは、複雑な系統でも入力データさえ周到に準備できれば、比較的正確な計算結果が期待できる。このことは、今までの直観的な現象把握から漏れていた事象をも我々に発見させてくれる効果をもつ。<sup>(1)</sup>しかしながら、あたりまえのことであるが、与えられた入力条件に対する計算結

果を出力するにすぎず、入力条件が非現実的なものであるとき、その結果も非現実的なものとなる。したがって、入力条件整備は重要な事柄である。

本稿では、EMTPの入力条件のうち、雷電流入力波形について若干の説明を行う。また、題材となるのは雷電流であるが、Newton-Raphson法を用いた非線形方程式の解法の解説を兼ねている。

### 2. 雷波形表現 (Bewley)

Bewley<sup>(2)</sup>による雷波形の決め方は、次のようなものである。

まず、サージ伝搬波形は図1のように、波高値(crest)、波頭(front)あるいは規約波頭(effective front)、波尾(tail)、極性(polarity)の4つの値で決めることができる。これは、文献(3)にも記載されている。普通波尾は波高値の50%になる点までの時間をもって規約波尾長(length)と決めている。例えば、正極性1,000kVの波頭長 $2\mu\text{s}$ 、波尾長 $70\mu\text{s}$ のときは、 $+1000/2/70$ のように表現することができる。

この波形の数学的表現については、最も取り扱いが簡単で、実波形に近いものとして(1)式があげられる。

\*研究所

$$F = A(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \dots\dots\dots(1)$$

そこで、このA,  $\alpha$ ,  $\beta$ と先のcrest, front, lengthとの対応が求められるが、これは3つの未知数に対して、3つの条件が与えられているので決定可能である。図1(a)で、crest値をE, crestをとる時刻を $t_1$ , length (tail)の時刻を $t_2$ とすると、次の連立の方程式を作ることができる。

$$\frac{dF}{dt} = A(-\alpha \exp(-\alpha t_1) + \beta \exp(-\beta t_1)) = 0 \dots\dots(2)$$

$$A(\exp(-\alpha t_1) - \exp(-\beta t_1)) = E \dots\dots\dots(3)$$

$$A(\exp(-\alpha t_2) - \exp(-\beta t_2)) = E/2 \dots\dots\dots(4)$$

(2)式より、

$$t_1 = \frac{\log \beta/\alpha}{\beta - \alpha} = \frac{1}{\alpha} \frac{\log \beta/\alpha}{\beta/\alpha - 1} = \frac{B}{\alpha} \dots\dots\dots(5)$$

$$\left( B = \frac{\log \beta/\alpha}{\beta/\alpha - 1} \right)$$

(3)式より、

$$E = A(\exp(-B) - \exp(-B\beta/\alpha)) \dots\dots\dots(6)$$

(4)式より、

$$E/2 = A(\exp(-B(t_2/t_1)) - \exp(-(\beta/\alpha)B(t_2/t_1))) \dots\dots\dots(7)$$

(6), (7)から、

$$\frac{1}{2} (\exp(-B) - \exp(-B(\beta/\alpha))) = \exp(-B(t_2/t_1) - \exp(-B(\beta/\alpha)(t_2/t_1))) \dots\dots\dots(8)$$

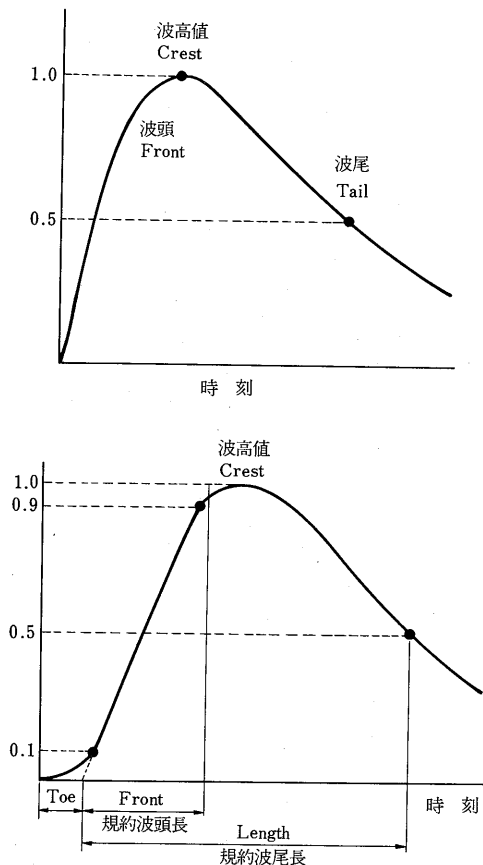


図1 サージ電圧波形

が導かれる。(5), (6), (8)式より、 $\alpha t_1$ ,  $E/A$ ,  $t_2/t_1$  は  $\beta/\alpha$  の関数として表わされ、この関係をプロットしたのが図2である。例えば、+1000/3/21の波形では、 $t_2/t_1 = 7$ より $\beta/\alpha = 28.5$ ,  $\alpha t_1 = 0.122$ ,  $E/A = 0.852$ , したがって、

$$\alpha = 0.041, \beta = 1.15, A = 1175$$

となる。以上が Bewley の示した方法である。

同様に、グラフを用いてのパラメータの決定法が、文献(3)にも記載されている。

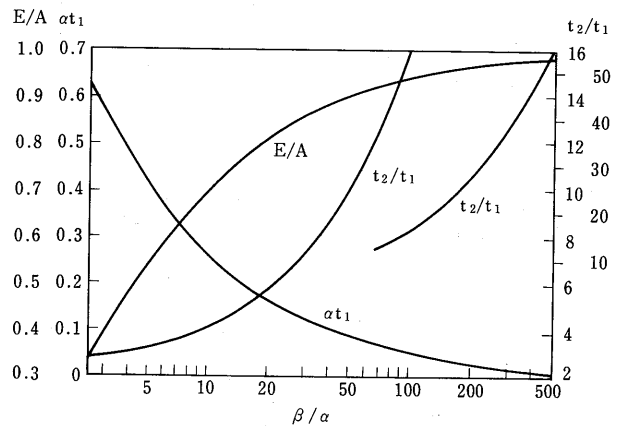


図2 Bewleyの方法

### 3. Newton-Raphson法

図1(a)の波形が

$$F(t) = A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \dots\dots\dots(9)$$

で表わされるとき、方程式

$$\left\{ \begin{aligned} F(t_1) &= A(e^{-\alpha t_1} - e^{-\beta t_1}) = E \\ F(t_2) &= A(e^{-\alpha t_2} - e^{-\beta t_2}) = E/2 \\ F'(t_1) &= A(-\alpha e^{-\alpha t_1} + \beta e^{-\beta t_1}) = 0 \end{aligned} \right. \dots\dots\dots(10)$$

を直接解くことを考える。ここでcrest値はE, crest時刻は $t_1$ , length時刻は $t_2$ である。非線形方程式なので、Newton-Raphson法を用いる。数値計算を行うときのマトリックスのオーダーをそろえるため、次の変換を行ってやると、

$$\left. \begin{aligned} e^{-\alpha \times 10^{-6}} &= x \\ e^{-\beta \times 10^{-6}} &= y \\ E/A &= z \\ t &= 10^{-6} \times s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

$\alpha, \beta$ は

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= -10^6 \times \log x \\ \beta &= -10^6 \times \log y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

となり、(11)式は、次式に書き換えられる。

$$\left\{ \begin{aligned} f(x, y, z) &= x^{s_1} - y^{s_1} - z = 0 \\ g(x, y, z) &= x^{s_2} - y^{s_2} - z/2 = 0 \\ h(x, y, z) &= x^{s_1} \log x - y^{s_1} \log y = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

今、 $f, g, h$ を $x_0, y_0, z_0$ の近傍でTaylor展開すると

$$\left\{ \begin{aligned} f(x, y, z) &\doteq f(x_0, y_0, z_0) + (x-x_0) \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x_0, y_0, z_0} \\ &\quad + (y-y_0) \left[ \frac{\partial f}{\partial y} \right]_{x_0, y_0, z_0} + (z-z_0) \left[ \frac{\partial f}{\partial z} \right]_{x_0, y_0, z_0} \\ g(x, y, z) &\doteq g(x_0, y_0, z_0) + (x-x_0) \left[ \frac{\partial g}{\partial x} \right]_{x_0, y_0, z_0} \\ &\quad + (y-y_0) \left[ \frac{\partial g}{\partial y} \right]_{x_0, y_0, z_0} + (z-z_0) \left[ \frac{\partial g}{\partial z} \right]_{x_0, y_0, z_0} \\ h(x, y, z) &\doteq h(x_0, y_0, z_0) + (x-x_0) \left[ \frac{\partial h}{\partial x} \right]_{x_0, y_0, z_0} \\ &\quad + (y-y_0) \left[ \frac{\partial h}{\partial y} \right]_{x_0, y_0, z_0} + (z-z_0) \left[ \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{x_0, y_0, z_0} \end{aligned} \right. \dots\dots\dots(14)$$

$f(x, y, z) = g(x, y, z) = h(x, y, z) = 0$ と仮定すれば、そのときの  $(x, y, z)$  は、次の線形方程式を解いて求めることができる。

$$\left[ \begin{array}{ccc} \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x_0, y_0, z_0} & \left[ \frac{\partial f}{\partial y} \right]_{x_0, y_0, z_0} & \left[ \frac{\partial f}{\partial z} \right]_{x_0, y_0, z_0} \\ \left[ \frac{\partial g}{\partial x} \right]_{x_0, y_0, z_0} & \left[ \frac{\partial g}{\partial y} \right]_{x_0, y_0, z_0} & \left[ \frac{\partial g}{\partial z} \right]_{x_0, y_0, z_0} \\ \left[ \frac{\partial h}{\partial x} \right]_{x_0, y_0, z_0} & \left[ \frac{\partial h}{\partial y} \right]_{x_0, y_0, z_0} & \left[ \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{x_0, y_0, z_0} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} (x-x_0) \\ (y-y_0) \\ (z-z_0) \end{array} \right] = - \left[ \begin{array}{c} f(x_0, y_0, z_0) \\ g(x_0, y_0, z_0) \\ h(x_0, y_0, z_0) \end{array} \right] \dots\dots\dots(15)$$

(15)より  $x, y, z$  が求まると、それらをあらためて  $x_0, y_0, z_0$  と置き換えて、上の操作を  $\max\{|x-x_0|, |y-y_0|, |z-z_0|\} < \epsilon$  となるまで繰り返せば、そのときの  $x, y, z$  が(13)式の解である。ここに、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= s_1 x^{s_1-1} & \frac{\partial f}{\partial y} &= -s_1 y^{s_1-1} & \frac{\partial f}{\partial z} &= -1 \\ \frac{\partial g}{\partial x} &= s_2 x^{s_2-1} & \frac{\partial g}{\partial y} &= -s_2 y^{s_2-1} & \frac{\partial g}{\partial z} &= -\frac{1}{2} \\ \frac{\partial h}{\partial x} &= s_1 x^{s_1-1} \log x + x^{s_1} \frac{1}{x} = x^{s_1-1} (s_1 \log x + 1) \\ \frac{\partial h}{\partial y} &= -\left( s_1 y^{s_1-1} \log y + y^{s_1} \frac{1}{y} \right) = -y^{s_1-1} (s_1 \log y + 1) \\ \frac{\partial h}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(16)$$

である。

例えば、 $2/70$  ( $s_1=2, s_2=70$ ) の初期値を

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \exp(\log(0.5)/s_2) \\ y_0 &= 0.05 \\ z_0 &= 0.97 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(17)$$

と選べば、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0.10247 \times 10^5 \\ \beta &= 0.28189 \times 10^7 \\ A &= 0.10244 \times 10^1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

を得る。

次に、図1(b)のような波形を想定して、やはり(9)式で表現する場合を考える(ここでは、この適用法の妥当性については述べない)。このとき、 $t_1 \sim t_4$ ,  $T_1$  (effective front),  $T_2$  (length),  $E$  (crest)を図3のように定義するとき、未知数は  $t_1 \sim t_4, A, \alpha, \beta$  の7つであるから、次の7つの方程式が必要である。ここで、規約波頭長は波高値の30%, 90%点から求めた値とする。

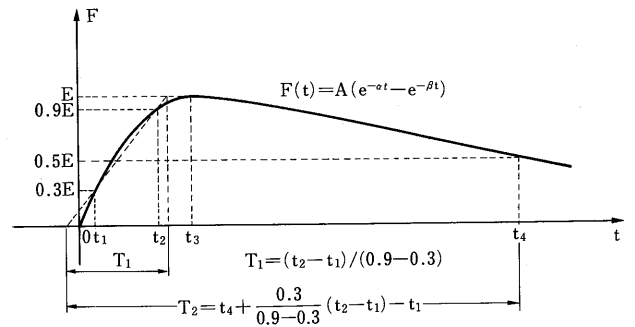


図3 雷波形の定義

$$\left. \begin{aligned} F(t_1) &= A(e^{-\alpha t_1} - e^{-\beta t_1}) = 0.3E \\ F(t_2) &= A(e^{-\alpha t_2} - e^{-\beta t_2}) = 0.9E \\ F(t_3) &= A(e^{-\alpha t_3} - e^{-\beta t_3}) = E \\ F(t_4) &= A(e^{-\alpha t_4} - e^{-\beta t_4}) = 0.5E \\ F'(t_3) &= A(-\alpha e^{-\alpha t_3} + \beta e^{-\beta t_3}) = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(19)$$

$$T_1 = \frac{t_2 - t_1}{0.9 - 0.3}$$

$$T_2 = t_4 + \frac{0.3}{0.9 - 0.3} (t_2 - t_1) - t_1$$

また、変数変換を行うと、

$$\left. \begin{aligned} e^{-\alpha \times 10^{-6}} &= x \\ e^{-\beta \times 10^{-6}} &= y \\ E/A &= z \\ t_1 \times 10^6 &= u \\ t_2 \times 10^6 &= v \\ t_3 \times 10^6 &= w \\ t_4 \times 10^6 &= r \\ T_1 \times 10^6 &= s_1, \quad T_2 \times 10^6 = s_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(20)$$

このとき、(9)式は、

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= x^u - y^u - 0.3z = 0 \\ f_2 &= x^v - y^v - 0.9z = 0 \\ f_3 &= x^w - y^w - z = 0 \\ f_4 &= x^r - y^r - 0.5z = 0 \\ f_5 &= x^w \log x - y^w \log y = 0 \\ f_6 &= v - u - 0.6s_1 = 0 \\ f_7 &= s_2 - r - 0.5v + 1.5u = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

となる。先と同様に線形方程式を作り、同じ手続きをとれば良い。具体的な  $f_i$  の微分は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial x} &= ux^{u-1}, \quad \frac{\partial f_1}{\partial y} = -uy^{u-1}, \quad \frac{\partial f_1}{\partial z} = -0.3 \\ \frac{\partial f_1}{\partial u} &= x^u \log x - y^u \log y, \quad \frac{\partial f_1}{\partial v} = \frac{\partial f_1}{\partial w} = \frac{\partial f_1}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} &= vx^{v-1}, \quad \frac{\partial f_2}{\partial y} = -vy^{v-1}, \quad \frac{\partial f_2}{\partial z} = -0.9 \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} &= 0, \quad \frac{\partial f_2}{\partial v} = x^v \log x - y^v \log y, \quad \frac{\partial f_2}{\partial w} = \frac{\partial f_2}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} &= wx^{w-1}, \quad \frac{\partial f_3}{\partial y} = -wy^{w-1}, \quad \frac{\partial f_3}{\partial z} = -1 \\ \frac{\partial f_3}{\partial u} &= \frac{\partial f_3}{\partial v} = 0, \quad \frac{\partial f_3}{\partial w} = x^w \log x - y^w \log y, \quad \frac{\partial f_3}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial f_4}{\partial x} &= rx^{r-1}, \quad \frac{\partial f_4}{\partial y} = -rx^{r-1}, \quad \frac{\partial f_4}{\partial z} = -0.5 \\ \frac{\partial f_4}{\partial x} &= rx^{r-1}, \quad \frac{\partial f_4}{\partial y} = -rx^{r-1}, \quad \frac{\partial f_4}{\partial z} = -0.5 \\ \frac{\partial f_4}{\partial u} &= \frac{\partial f_4}{\partial v} = \frac{\partial f_4}{\partial w} = 0, \quad \frac{\partial f_4}{\partial r} = x^r \log x - y^r \log y, \\ \frac{\partial f_5}{\partial x} &= wx^{w-1} \log x + x^{w-1} = x^{w-1} (w \log x + 1), \\ \frac{\partial f_5}{\partial y} &= -y^{w-1} (w \log y + 1), \\ \frac{\partial f_5}{\partial z} &= \frac{\partial f_5}{\partial u} = \frac{\partial f_5}{\partial v} = 0, \quad \frac{\partial f_5}{\partial w} = x^w (\log x)^2 - y^w (\log y)^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_5}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial f_6}{\partial x} = \frac{\partial f_6}{\partial y} = \frac{\partial f_6}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial f_6}{\partial u} = -1, \quad \frac{\partial f_6}{\partial v} = 1, \\ \frac{\partial f_6}{\partial w} &= \frac{\partial f_6}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial f_7}{\partial x} = \frac{\partial f_7}{\partial y} = \frac{\partial f_7}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial f_7}{\partial u} = 1.5, \\ \frac{\partial f_7}{\partial v} &= -0.5, \quad \frac{\partial f_7}{\partial w} = 0, \quad \frac{\partial f_7}{\partial r} = -1 \dots \dots \dots (23) \end{aligned}$$

で与えられる。

例えば、 $T_1=2\mu s$ ,  $T_2=70\mu s$  のときは、初期値を

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \exp(\log(0.5)/S_2) \\ y_0 &= 0.2 \\ z_0 &= 0.97 \\ u_0 &= 0.5 \\ v_0 &= 2.0 \\ w_0 &= 4.0 \\ r_0 &= 70.0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (24)$$

とすると、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0.10574 \times 10^5 \\ \beta &= 0.14612 \times 10^7 \\ A &= 0.10441 \times 10^1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (25)$$

を得る。

規約波頭長を10%, 90%波高値から求めると、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0.10636 \times 10^5 \\ \beta &= 0.12303 \times 10^7 \\ A &= 0.10514 \times 10^1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (26)$$

となる。

以上の計算で初期値設定が困難なときは、減速 Newton 法<sup>(4)</sup>が用いられる。

表 1 雷波形パラメータ値

	波頭長 $\mu s$	波尾長 $\mu s$	x	初期値	初期値	初期値	初期値	初期値	初期値	初期値	$\alpha$	$\beta$	A
				収束値	収束値	収束値	収束値	収束値	収束値	収束値			
Bewley	1.0	70.0	0.99015E+00	0.50000E-02	0.97000E+00						0.10068E+05	0.64767E+07	0.10117E+01
			0.98998E+00	0.15390E-02	0.98844E+00								
	2.0	70.0	0.99015E+00	0.50000E-01	0.97000E+00						0.10247E+05	0.28188E+07	0.10244E+01
			0.98981E+00	0.59679E-01	0.97615E+00								
	4.0	70.0	0.99015E+00	0.20000E+00	0.97000E+00						0.10638E+05	0.11899E+07	0.10529E+01
			0.98942E+00	0.30424E+00	0.94977E+00								
30% 90% 波高値	1.0	40.0	0.98282E+00	0.10000E-01	0.97000E+00						0.17852E+05	0.58016E+07	0.10212E+01
			0.98231E+00	0.30226E-02	0.97928E+00								
	1.2	50.0	0.98623E+00	0.10000E-01	0.97000E+00						0.14264E+05	0.48763E+07	0.10202E+01
			0.98584E+00	0.76254E-02	0.98015E+00								
	1.0	70.0	0.99015E+00	0.50000E-01	0.97000E+00	0.20000E+00	0.10000E+01	0.20000E+01	0.70000E+02		0.10251E+05	0.30561E+07	0.10228E+01
			0.98980E+00	0.47071E-01	0.97772E+00	0.11414E+00	0.71414E+00	0.18706E+01	0.69814E+02				
90% 波高値	2.0	70.0	0.99015E+00	0.20000E+00	0.97000E+00	0.50000E+00	0.20000E+01	0.40000E+01	0.70000E+02		0.10574E+05	0.14612E+07	0.10441E+01
			0.98948E+00	0.23196E+00	0.95773E+00	0.23419E+00	0.14342E+01	0.33976E+01	0.69634E+02				
	4.0	70.0	0.99015E+00	0.50000E+00	0.97000E+00	0.40000E+00	0.40000E+01	0.80000E+01	0.70000E+02		0.11248E+05	0.67496E+06	0.10900E+01
			0.98882E+00	0.50918E+00	0.91742E+00	0.48814E+00	0.28881E+01	0.61690E+01	0.69288E+02				
	1.0	40.0	0.98282E+00	0.10000E+00	0.97000E+00	0.10000E+00	0.10000E+01	0.20000E+01	0.40000E+02		0.18363E+05	0.29537E+07	0.10388E+01
			0.98180E+00	0.52145E-01	0.96269E+00	0.11640E+00	0.71640E+00	0.17308E+01	0.39816E+02				
10% 90% 波高値	1.2	50.0	0.98623E+00	0.10000E+00	0.97000E+00	0.10000E+00	0.10000E+01	0.20000E+01	0.50000E+02		0.14659E+05	0.24689E+07	0.10373E+01
			0.98545E+00	0.84676E-01	0.96409E+00	0.13944E+00	0.85944E+00	0.20888E+01	0.49779E+02				
	1.0	70.0	0.99015E+00	0.50000E-01	0.97000E+00	0.20000E+00	0.10000E+01	0.20000E+01	0.70000E+02		0.10284E+05	0.25792E+07	0.10265E+01
			0.98977E+00	0.75832E-01	0.97423E+00	0.39917E-01	0.83992E+00	0.21506E+01	0.69940E+02				
	2.0	70.0	0.99015E+00	0.20000E+00	0.97000E+00	0.50000E+00	0.20000E+01	0.40000E+01	0.70000E+02		0.10636E+05	0.12303E+07	0.10514E+01
			0.98942E+00	0.29220E+00	0.95112E+00	0.82018E-01	0.16820E+01	0.38951E+01	0.69882E+02				
90% 波高値	4.0	70.0	0.99015E+00	0.50000E+00	0.97000E+00	0.40000E+00	0.40000E+01	0.80000E+01	0.70000E+02		0.11374E+05	0.56594E+06	0.11057E+01
			0.98869E+00	0.56782E+00	0.90444E+00	0.17129E+00	0.33713E+01	0.70454E+01	0.69771E+02				
	1.0	40.0	0.98282E+00	0.10000E+00	0.97000E+00	0.10000E+00	0.10000E+01	0.20000E+01	0.40000E+02		0.18458E+05	0.24884E+07	0.10451E+01
			0.98171E+00	0.83041E-01	0.95687E+00	0.40753E-01	0.84075E+00	0.19854E+01	0.39941E+02				
	1.2	50.0	0.98623E+00	0.10000E+00	0.97000E+00	0.10000E+00	0.10000E+01	0.20000E+01	0.50000E+02		0.14732E+05	0.20803E+07	0.10433E+01
			0.98538E+00	0.12489E+00	0.95847E+00	0.48816E-01	0.10083E+01	0.23965E+01	0.49929E+02				

波高値 (crest) = 1.0 のときの図 1 (a), 図 1 (b) (10%, 90% および 30%, 90% 波高値を effective front) の 3 つの場合について, A,  $\alpha$ ,  $\beta$  を求めた結果が表 1 である。表 1 には, Newton-Raphson 法に用いた初期値と収束値を併記した。また, 図 4 に上記 3 方法の  $2/70\mu\text{s}$  のときの波頭部を示す。図 4 から, 波形の立上がりの部分での  $dF/dt$  が 3 方法で大きく異なることがわかる。

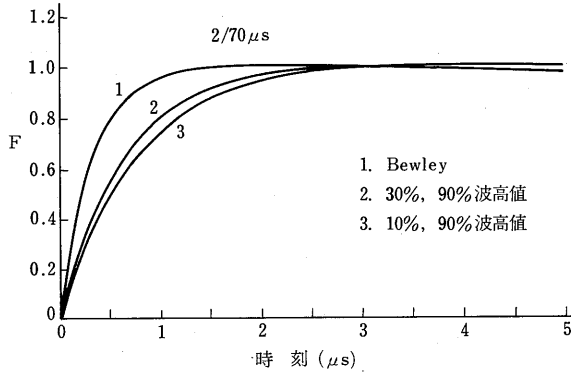
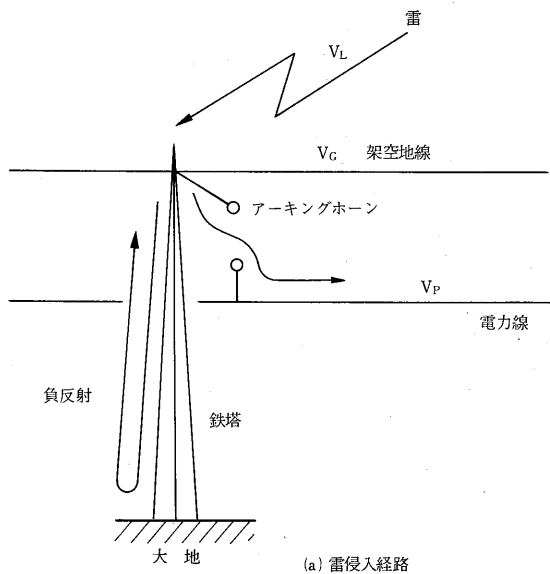
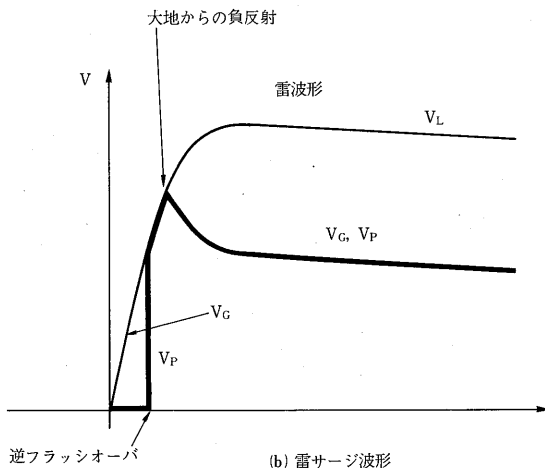


図 4 雷波形  $2/70\mu\text{s}$  の波頭部



(a) 雷侵入経路



(b) 雷サージ波形

図 5

この  $dF/dt$  (波頭しゅん度) は, 雷サージ計算で大きく計算結果に影響する。雷サージ波形の波頭部での典型的な様相を示したのが図 5 であるが, 図 5 (b) で電力線の電圧  $V_P$  のピーク値は, 雷電流が鉄塔を通り大地より負の反射を受け, それが電力線へ到達するまでの時刻で決定されている。したがって, このピーク電圧を決定するものは, 大きく, (1)鉄塔のサージ伝搬速度, (2)鉄塔の高さ, (3)波頭しゅん度である。特に, 図 4 のように波頭しゅん度が大きく異なるとその影響は大きいので, この雷電流波形の取り扱いは慎重にする必要がある。

#### 4. その他の雷波形の数式的表現法

雷波形の数式的表現法については, 前章までに 3 つの方法を示した。しかしながら, Bewley の示した方法についてはともかく, 波高値の 30%, 90% あるいは 10%, 90% 点から, Bewley の指数関数表現へ置き換える手続きにはどんな意味があるのだろうか。もともと, 実際の雷波形あるいは雷インパルス試験設備から出力される波形は, front の部分が図 1 (b) のようになっているため, 波頭しゅん度を表わすとすれば,  $dF/dt$  の代表的部分をとって残りの部分を捨てようというのが最初の発想ではなかろうか。とすれば, 上の 30%, 90% 波高値からの波頭部分表現は, Bewley の指数関数表現ではなくて, もっと図 1 (b) に近い波形の数式的表現が適切ではないかと考える。

例えば, 波頭しゅん度を最も簡潔に表現する方法は,  $T_1/T_2\mu\text{s}$  波形のとき,  $0 \sim T_1\mu\text{s}$  まで直線的に上昇し, その後直線的に下降する波形であり,

$$F(t) = Et/T_1 \quad (t \leq T_1)$$

$$= E \{ -0.5(t - T_1)/(T_2 - T_1) + 1 \} \quad (t > T_1)$$

.....(27)

となる。

あるいは, 波頭部の立上がりの部分を緩和する意味で,

$$F(t) = A(1 - e^{-\gamma t})(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad \text{.....(28)}$$

も考えられる。

更に, 波頭部の立上がりの微分係数を 0 にする意味で

$$F(t) = A(e^{-\alpha t^2} - e^{-\beta t^2}) \quad \text{.....(29)}$$

も考えられる。

いずれの表現法も, 波頭しゅん度を定義の意味を曲げずに, 表現することが可能である。ただし, (29) 式については波尾の形は Bewley の方法 ((1) 式) と異っている。これらの式は, 先の Newton-Raphson 法を用いれば, パラメータの決定は可能であるので, より現実的な波形でしかも数学的な定義が十分満足できるものが望まれる。

一方において, 実測波形から, 雷波形を表現しようとする動きもある。例えば, CIGRE<sup>(5)</sup> によれば, 波頭部は図 6 のように表わされ, これは図 1 の波形とは大きく異っている。しかしながら, この波形も, 波頭, 波尾の部分を適当に数式化することができれば, その数式に用いられるパラメータは, Newton-Raphson 法により決定することができる。

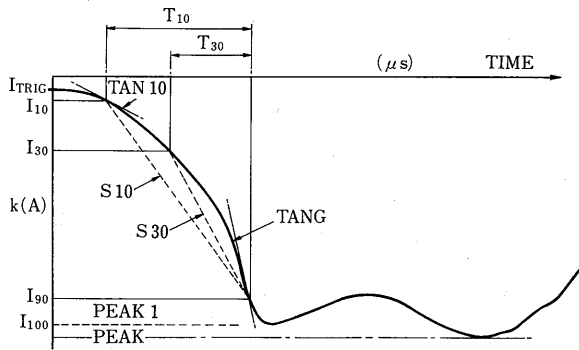


図6 実測値に基づく雷電流波形例

#### 参考文献

- (1) J. Ozawa et, al. "Lightning surge analysis in a multi-conductor system for substation insulation design", IEEE Winter Meeting 1985 WM 161-5
- (2) L. V. Bewley, "Travelling Waves on Transmission Systems", pp.21 Wiley & Sons, 1933
- (3) JEC-212 1981, pp.11
- (4) 伊理正夫：数値計算，P.71 (1981)，朝倉書店
- (5) R. B. Anderson & A. J. Eriksson, "Lightning Parameters for Engineering Application", CIGRE ELECTRA No. 69, pp. 65 (1980)

#### 5. むすび

電力系統の雷サージ計算で決定的な入力条件となる、雷波形について、Bewleyの方法、30%、90% (10%、90%) 波高値から波頭を決める方法をレビューし、そのときの波形の数式的表現に用いるパラメータ決定法を示した。また、この決定法を用いることで新しい表現法での数式も決定可能であることを示唆し、より現実的な表現が可能であることについて言及した。

本解説が、電力系統の絶縁協調設計者にとっていささかでも役に立てば幸いである。