UDC 621.315.211.4: 621.3.015.34

論文

56-B58

ガス絶縁ケーブルにおけるサージ伝搬特性

正員 雨谷 昭 弘 (同志社大)

1. ま え が き

最近ガス絶縁ケーブルが多数実用に供されるようになり、これらにおけるサージ現象の解明が重要な課題となっている。またガス絶縁変電所などにおけるガス絶縁母線および機器などに近似的に一種のガス絶縁ケーブルと見なすことができ、この観点からもガス絶縁ケーブルのサージ現象の解明は価値があると考えられる。これまで従来形のケーブルにおけるサージ現象の解析に関しては数多くの成果が発表されているが、ガス絶縁ケーブルに関してはほとんど研究が行われていないと見受けられる⁽¹⁾。

ガス絶縁ケーブルは絶縁媒体として SF_6 ガスを用いており、その比誘電率がほぼ1であることから、従来の油浸紙、ポリエチレンあるいは油絶縁のケーブルとはかなり異なったサージ伝搬特性を示すものと推測される。これは従来のケーブルのサージ伝搬特性がその絶縁媒体の比誘電率の大きさに強く影響されていることを考えれば当然のことであろう。

本稿では、アメリカ政府エネルギー省ボンネビル電力局 (BPA) 500 kV 三相ガス絶縁ケーブルにおいてサージ実測を行なったのでその結果について述べ⁽²⁾、また計算結果との比較検討を行なう。なおサージ現象の数値計算には、ケーブルの場合特に有効な計算法である周波数変換法を採用する⁽³⁾。また、ガス絶縁ケーブルと通常のケーブルとにおけるサージ伝搬特性について述べると共にスペーサの影響についても検討を行なう。

2. 波形伝搬特性

〈2・1〉 実測結果⁽¹⁾ 実測を行なったガス絶縁ケーブルはアメリカエネルギー省ボンネビル電力局 (BPA) の 500 kV 幹線の一部に用いられるもので、図1(a)に示されるような三相地中ケーブルである。

図 1 500 kV 三相ガス絶縁ケーブル

Fig. 1. A 500 kV 3-phase gas-insulated cable.

表 1 ケーブル定数

Table 1. Cable constants.

$r_1 = 8.89 \text{ cm}$	$r_2 = 26.67$
$r_3 = 27.94$	$r_4 = 28.092$
$\rho_1 = 2.8984 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$	$\mu_1 = 1$
$\rho_2 = 3.2539 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$	$\mu_2 = 2$
$\epsilon_1 = 1.009$	$\epsilon_2 = 2.3$
大地抵抗率 $100 \Omega \text{ m}$	
ケーブル長 207.875 m	

表 2 実測結果

Table 2. Measured results.

減衰定数	$\alpha = 1.784 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$
伝搬速度	$v = 296.96 \text{ m}/\mu\text{s}$
特性インピーダンス	$z_0 = 62.62 \Omega$

その構造を(b)図に、また各定数を表1に示す。ケーブルが布設されている地域の大地抵抗率は $100 \Omega \text{ m}$ 程度であったので計算に際しては $100 \Omega \text{ m}$ を採用する。

表2に減衰定数、伝搬速度および特性インピーダンスの実測結果を示す。この実測結果はケーブル始端心線シース間にパルス幅 $30 \mu\text{s}$ のパルス波を印加し、始端および終端での電圧、電流波形を観測し、これらより求めたものである。実測は時間領域で行なわれたものであり、従って、上記実測結果は厳密には時間関数として与えられるべきものである。すなわち大地帰路をも含めたケーブルインピーダンスは周波数に依存するものであり、このため減衰定数、伝搬速度および特

Surge Propagation Characteristics on Gas-Insulated Cables.
By Akihiro Ametani, Member (Department of Electrical Engineering, Doshisha University)
雨谷昭弘: 正員, 同志社大学工学部電気工学科

性インピーダンスは周波数依存効果を示す。このことは時間領域において時間依存効果として現われてくる⁽⁴⁾。さて上記実測では $30\ \mu\text{s}$ のパルス波を用いており、その基本周波数は $f_1=1/T=1/30\ \mu\text{s}\approx 33\ \text{kHz}$ となる。従って、実測結果に対応する周波数は f_1 より大である。また、このケーブルにおける過渡現象の固有振動周波数はケーブルの伝搬時間 τ より $f_2=1/2\tau\approx 1/1.5\ \mu\text{s}\approx 660\ \text{kHz}$ となり、これより大なる周波数成分は発生しない。実測は時間領域で行なわれており、これを特定の周波数に対応させることはできないが、少なくとも上記 f_1 と f_2 で定まる領域、すなわち $660\ \text{kHz}>f>33\ \text{kHz}$ の領域の周波数に対応していると考えられる。あるいは時間 t と周波数 f の間には $f\propto 1/t$ なる関係があることより、測定値が $t=10\ \mu\text{s}$ 程度の時刻に関するものとすれば、これに対応する周波数は $f=100\ \text{kHz}$ 程度であると考えられる。

本ケーブルは三相であり、かつ一相は心線、シースの2導体よりなることから、実際には6種の伝搬モード成分が存在する。これらのうち3種は各相のケーブルにおける心線-シース間の同軸モードと呼称される成分で⁽⁵⁾、 $100\ \text{kHz}$ 程度の高い周波数領域ではケーブル外部媒質の影響を受けることがなく全く同一の特性となる。本実測では心線-シース間に電圧を印加しており、従って実測結果はこの同軸モード成分に関するものである。

〈2・2〉 計算結果および検討

(1) 周波数依存特性 図1のケーブルにおける同軸モード成分の減衰定数、伝搬速度および特性インピーダンスの計算結果を周波数の関数として表3に示す。計算に際してはケーブルのインピーダンスおよびアドミタンスとして文献(6)の結果を用い、モード理論⁽⁷⁾を採用している。

上記実測および計算結果より明らかなように、ガス絶縁ケーブルの波形伝搬特性は通常の油浸紙、ポリエ

表 3 計算結果

Table 3. Calculated results.

周波数 (kHz)	減衰定数 (dB/m)	伝搬速度 (m/ μs)	特性インピーダンス (Ω)
0.05	4.1449×10^{-7}	290.13	67.458
0.1	5.0520×10^{-7}	290.87	67.286
0.5	1.2188×10^{-6}	294.54	66.448
1	1.7171×10^{-6}	295.68	66.192
5	3.8387×10^{-6}	297.21	65.852
10	5.4280×10^{-6}	297.57	65.771
50	1.2136×10^{-5}	298.06	65.664
100	1.7163×10^{-5}	298.17	65.638
500	3.8379×10^{-5}	298.33	65.604
1,000	5.4259×10^{-5}	298.36	65.596

(a) 減衰定数 α

(b) 伝搬速度 v

(c) 特性インピーダンス Z_0

図 2 各種ケーブル波形伝搬特性の比較

Fig. 2. Comparison of wave propagation characteristics of various cables.

チレンあるいは油絶縁のケーブルとはいささか異なっている。すなわち、伝搬速度は通常のケーブルに比して極めて大でむしろ架空線に近く真空中の光速に漸近している。また特性インピーダンスは通常のケーブルより $1.5\sim 2$ 倍程度大であり、逆に減衰は小となっている。この様子を図2に示す。図は図1のケーブルが単相で存在しているものとして、ガス絶縁、CV および OF ケーブルの3種を考え、心線シース間の同軸モード(モード1)成分およびシース大地間の大地帰路モード(モード0)成分の減衰定数、伝搬速度および特性インピーダンスを計算により求めたものである。図より同軸モードの場合、心線-シース間絶縁体の比誘

図3 三相ケーブルにおける減衰定数 α

Fig. 3. Attenuation constants α for a three-phase cable.

電率 ϵ_1 が大となるほど減衰定数は大、伝搬速度および特性インピーダンスは小となることが明らかである。これは減衰定数が $\sqrt{\epsilon_1}$ 、伝搬速度および特性インピーダンスは $1/\sqrt{\epsilon_1}$ に比例することから当然であろう。大地帰路モードに関しては各種ケーブル間にほとんど差異は見い出されない。本計算は単相ケーブルに関するものであるが、多相の場合でもガス絶縁ケーブルと従来のケーブルで波形伝搬特性に差異が見い出されるのは同軸モード成分のみで、相間および大地帰路モード成分にはほとんど差異がない。この様子を図3に示す。図は図1の三相ケーブルにおける減衰定数の計算結果である。図において3種の比誘電率に対する大地帰路および相間モード成分（モード0～2）の計算結果は重なってしまっておりほとんど差異が見い出されない。また注目すべきは、3種の同軸モード成分（モード3～5）が全く同一減衰を示しており、かつ図2に示される単相ケーブルの場合の同軸モード成分（モード1）と同一の結果となっていることであろう。これは、同軸モード成分の特性がシース内部の媒質の物理定数によってのみ定まることに起因する。すなわち、シース外部媒質の影響を受けないため、単相あるいは多相に拘わりなく同一の特性となる。但し、ある周波数以下になると同軸モード成分であっても外部媒質の影響を受けるため、単相ケーブルと多相ケーブルでは差異が生じてくる。この臨界周波数はシースの材質に大きく影響される。その詳細については後で述べる。

表3の計算結果を表2の実測値と比較すると、周波数 100 kHz のときの計算結果が実測値を良好な一致を示しており、減衰定数で -3.8% 、伝搬速度で $+0.4\%$ 、特性インピーダンスで $+4.8\%$ 以下の誤差となっている。これは先にも述べたように、実測結果が 100 kHz 程度の周波数領域に対応することから当然であ

表4 電圧変換行列 A^{-1}

Table 4. Voltage transformation matrix.

周波数 (Hz)	a_1	a_2
10	-0.000	-0.999
50	-0.000	-1.003
$f \geq 100$	-0.	-1.

らう。

ケーブルにおいて周波数依存特性を示すもう一つの重要な要素として、モード変換を行なう際の変換行列がある。すなわち電圧の場合、モード電圧 (v) は実回路電圧 (V) より次式で与えられる。

$$(v) = [A]^{-1} \cdot (V)$$

心線、シースよりなる単相ケーブルの場合、上式は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 1 \\ 1 & a_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_c \\ V_s \end{pmatrix}$$

ここに、 v_0 =モード0電圧、 v_1 =モード1電圧、

V_c =心線対地電圧、 V_s =シース対地電圧

上式は例えばモード0電圧が $v_0 = a_1 \cdot V_c + V_s$ として与えられることを示している。

この変換行列の計算結果を表4に示す。表より周波数 $f \geq 10$ Hz において変換行列はほとんど一定で完全な同軸モードが存在していることが知られる。通常のCVケーブルなどでは変換行列の周波数依存性は極めて大で、低周波領域と高周波領域とは全く異なった値となる⁽⁵⁾⁽⁸⁾。これは心線往路とするモード1成分が低周波領域ではシースおよび大地の双方を帰路とするのに対し、高周波領域においてはシースのみを帰路とする完全な同軸モード成分となることに起因している。このときの臨界周波数 f_c はシースにおけるペネトレーションデプスがシースの肉厚より小となる周波数として近似的に与えることができる⁽⁹⁾。

$$f_c = \rho / \pi \mu d^2$$

ここに、 ρ =シース抵抗率、 μ =シース透磁率、 d =シース厚さ

本ケーブルの臨界周波数は $f_c = 51.1$ Hz となる。本ケーブルはガス絶縁であるため、通常の油浸紙あるいはポリエチレン絶縁のケーブルに比してシース肉圧が極めて大である。例えば文献(5)で取り上げられているケーブルではシース厚さは $d = 2.6$ mm であり、このときの臨界周波数は $f_c = 12.8$ kHz と極めて高い値になっている。この臨界周波数より大なる周波数領域では変換行列はほぼ定数となる。

進行波法、数値積分法などの時間領域過渡現象計算法が変換行列は定数と見なす仮定の下に成り立っている。従って、これら時間領域計算法によるケーブル過

渡現象計算は、対表とする過渡現象の基本周波数が上記臨界周波数より高い場合のみ可能であると言える。ガス絶縁ケーブルの場合には、一般にシース厚さが大なることより臨界周波数はかなり低く、従って過渡現象計算に際して変換行列を定数と仮定しても差つかえないと言える。

(2) 時間依存特性 サージ波形の伝搬特性を測定するような場合、その測定結果は印加波形に対する応答波形を時間の関数として求めるのが通例である。本稿における実測例でも測定結果は時間応答であり、従ってこれらとの比較を行なう計算結果も厳密には時間応答であらねばならない。

図4に伝搬定数(減衰定数および伝搬速度)の周波数依存効果に対応する単位関数変わいの時間応答計算結果を示す⁽⁴⁾。図中実線が本稿で取り上げたガス絶縁ケーブルに対応するものであり、他は通常のポリエチレン(CV)ケーブルあるいは油絶縁(OF)ケーブルに対応するものである。大地帰路モード(モード0)成分の単位関数変わい応答は3種のケーブルともほとんど差異がなく、図では三者の結果が重なってしまっている。同軸モード(モード1)成分に関しては、 ϵ_1 が大なるほど遅延、減衰ともに大なることが明らかであろう。これらの結果は前節における減衰定数、伝搬速度の検討結果からして当然であろう。

$\epsilon_1=1.009$ の場合、すなわち実測に対応する計算結果では時間遅れは $\tau \approx 0.7 \mu\text{s}$ となっており、これより伝搬速度を逆算すると $v=296.96 \text{ m}/\mu\text{s}$ となり実測結果と極めて良好な一致を示している。

図4 単位関数変わい応答

Fig. 4. Step responses of wave deformation.

表5 特性インピーダンス時間応答

Table 5. Time responses of characteristic impedance.

時間 (μs)	$Z_0 (\Omega)$
0.1	59.23
0.5	65.58
1	65.62
5	65.64
10	65.65
20	65.68
30	65.69
50	65.71

表5に同軸モードの特性インピーダンス時間応答の計算結果を示す。表より $t=10 \mu\text{s}$ のときの特性インピーダンスは 65.65Ω であり、実測結果と比して約4.8%の誤差にすぎず良好な一致を示していると言える。

3. サージ波形

実測を行なったケーブルの回路構成を図5に示す。図において電圧源 V はパルス発振器であり、モード0において図6で与えられる波形 V_0 となる。また各種抵抗は波形調整および電圧、電流波形測定のためのものである。ケーブルシースは両端および中央部で接地されている。ケーブル構造は図1、その各定数は表1に示してある。

図7電圧印加相ケーブル始端電圧 V_1 および終端電圧 V_2 の実測結果を示す。図8に図7の実測波形に対応する計算結果を示す。なお、実測結果図7(b)では、シンクロスコープの同期を進行波が終端に到達した時点に合わせているため、始端より終端までの波形の遅延が現われていない。これに対して図8の計算結果は時間の原点を $t=0$ に取っているため、終端波

図5 実測回路

Fig. 5. A field test circuit.

図6 電源波形

Fig. 6. Waveshape of source voltage.

図 7 実測結果

Fig. 7. Field test results.

図 8 計算結果

Fig. 8. Calculated results.

(b)において始端より終端までの時間遅れを含んでいる。従って、両者の比較に際してはこの点に注意を払う必要がある。計算法としては、対象とする現象の周波数領域での定常解を求め、これを数値的にラプラス逆変換することにより時間領域での過渡現象解を求める周波数変換法を採用している⁽³⁾。

図 7, 8 より計算結果は実測値に比して極めて良好な一致を示していることが明らかである。実測では $t = 30 \mu\text{s}$ における終端電圧値は 184.8 V であったが、計算結果は 182.78 V であり、また進行波の一往復に要する時間は、実測では $1.4 \mu\text{s}$ であるのに対し計算でも $1.4 \mu\text{s}$ となっている。以上より周波数変換法によるサージ計算の精度が極めて高いことが明らかである

図 9 各種ケーブル過渡電圧波形の比較

Fig. 9. Comparison of transient voltage waveforms of various cables.

う。

図 9 に本ケーブルを CV あるいは OF などの通常のケーブルと仮定した場合、ケーブル始端および終端電圧の計算結果をガス絶縁の場合と比較して示す。図よりガス絶縁ケーブルの場合、波形の減衰、遅延が通常のケーブルに比してかなり小であり、特性インピーダンスは大となっていることが明らかであろう。例えば遅延に関しては、ガス絶縁ケーブルの場合 $0.7 \mu\text{s}$ であるのに対し $\epsilon_1 = 3.5$ のケーブルでは $1.3 \mu\text{s}$ となっている。また特性インピーダンスについては、 $t = 0$ での始端電圧が近似的に電源側の抵抗とケーブルの特性インピーダンスの比で決定されるとすれば、 $\epsilon_1 = 1.009$ の場合 $Z_0/R_s = V_1/V_0 = 0.1026$ であり、従って $Z_0 = 58.91 \Omega$ となる。これに対して $\epsilon_1 = 2.3$ では $Z_0 = 39.48 \Omega$ 、 $\epsilon_1 = 3.5$ では $Z_0 = 29.74 \Omega$ となっている。減衰については、ケーブル両端の第 1 波の波高値の比と、上記特性インピーダンスと終端抵抗で定まる透過係数 σ とにより $\alpha = V_2/\sigma V_1$ として求めることができる。 $\epsilon_1 = 1.009$ のとき $\alpha = 0.994$ 、 $\epsilon_1 = 2.3$ では $\alpha = 0.993$ 、 $\epsilon_1 = 3.5$ では $\alpha = 0.990$ となり、ガス絶縁ケーブルの方が通常のケーブルよりも減衰は小であることが知られる。

4. スペースの影響

以上までの章においてガス絶縁ケーブルのサージ伝搬特性について実測および理論計算の両面から検討を

図 10 ガス絶縁管路構造

Fig. 10. Configuration of a gas-insulated pipe.

行ない、ガス絶縁ケーブルでは波形伝搬速度はほぼ光速に近いことを述べた。しかるに文献(1)において、ガス絶縁管路(ケーブルと見做してよい)での過渡現象の実験に際して伝搬速度として $200 \text{ m}/\mu\text{s}$ なる実測結果が与えられている。これは前章までに述べた結果と著しく異なる。この差異の原因について検討を行ったところ、ガス絶縁ケーブルあるいは管路ではスペーサに用いている素材の誘電率がその波形伝搬特性に極めて大なる影響を及ぼすことのあることが明らかとなったのでこの点について説明する。

文献(1)のガス絶縁管路の構造を図10に示す。この管路には(b)図に示されるように比誘電率6程度で幅70 cm程度のスペーサが1~2 m間隔でそう入されている。因に先の500 kVケーブルのスペーサは両端を絶縁した金属でその占有体積は SF_6 ガス部分の体積に比して無視し得る程度であり、心線-シース間の誘電率にはほとんど影響しない。しかしながら本管路の内部導体(アルミ)-シース(鉄)間の比誘電率は SF_6 ガスのみでは定まらず、スペーサとして使用している絶縁体の比誘電率も影響する。 SF_6 ガス部分とスペーサ部分の体積を考慮して近似的な等価比誘電率を次式で与える。

$$\epsilon_r = (l_1 \cdot \epsilon_1 + l_2 \cdot \epsilon_2) / (l_1 + l_2)$$

ここに、 l_1 =ガス部分の長さ

$$\epsilon_1 = \text{SF}_6 \text{ ガス比誘電率} \approx 1.0$$

$$l_2 = \text{スペーサの幅}$$

$$\epsilon_2 = \text{スペーサの比誘電率}$$

$$l_2 = 70 \text{ cm}, \epsilon_2 = 6.0 \text{ として等価比誘電率は}$$

$$(i) \text{ スペーサ間隔 } 2 \text{ m } (l_1 = 2 \text{ m}): \epsilon_r \approx 2.3$$

$$(ii) \text{ スペーサ間隔 } 1 \text{ m } (l_1 = 1 \text{ m}): \epsilon_r \approx 3.0$$

となる。

なお、誘電率は一般に周波数に依存し、その周波数依存効果はコール・コールの円弧則を用いることにより考慮できるが、実際にはコール・コール円弧則を用いるに必要な定数が不明な場合が多い。またケーブルに用いる誘電体の周波数依存性は一般に小であり、その影響は無視し得ると考えられる⁽¹⁰⁾。以上の理由に

図 11 実験回路

Fig. 11. An experimental circuit.

より本稿では誘電率の周波数依存性は考慮しない。

さて、上記比誘電率および SF_6 ガスのみで定まる比誘電率 $\epsilon_r = 1.0$ の3種の場合について伝搬速度を計算すると、周波数1 MHzにおいて次のような結果となる。

$$\epsilon_r = 1.0: v = 297.2 \text{ m}/\mu\text{s}$$

$$\epsilon_r = 2.3: v = 197.0 \text{ m}/\mu\text{s}$$

$$\epsilon_r = 3.0: v = 172.5 \text{ m}/\mu\text{s}$$

この結果より文献(1)における伝搬速度 $200 \text{ m}/\mu\text{s}$ は $\epsilon_r = 2.3$ の場合にほぼ対応していることが明らかであろう。

次に、図11の実験回路において $\pm 45 \text{ V}$ に充電されている左右の管路をA-B間で短絡したときの過渡現象について考える。絶縁体比誘電率として上記3種の値を用いたときの測定点Cでの過渡電圧の計算結果を図12に示す。またこれに対応する実験結果を図13に示す。図12より計算結果はいずれも定性的にはほぼ同様の波形となっているが、 $\epsilon_r = 1.0$ の場合第1波の零点間の幅(振動周期の約半分)が $0.18 \mu\text{s}$ であるのに対し、 $\epsilon_r = 2.3$ では $0.26 \mu\text{s}$ 、 $\epsilon_r = 3.0$ では $0.32 \mu\text{s}$ となっている。また、過電圧最大値はいずれも第3ピークで発生し、 $\epsilon_r = 1.0$ の場合75 V、 $\epsilon_r = 2.3$ および3.0では79 Vとなっている。実験結果では第1波の零点間の幅は約 $0.23 \mu\text{s}$ であり、過電圧最大値は第3ピークで78 Vとなっている。これらの比較より $\epsilon_r = 2.3$ のときの計算結果が実験結果に最も近いと言える。

以上より、ガス絶縁管路(ケーブル)で比誘電率が1より大なるスペーサが用いられ、かつその占有体積がかなり大なる場合には、これら無視してサージ計算などを行なうことは不適当であると言えるであろう。このような場合、スペーサの比誘電率と体積を考慮した等価比誘電率を用いて計算を進めればよいと考えられる。また、このときのサージ伝搬特性は油浸

図 12 計算結果

Fig. 12. Calculated results.

図 13 実験結果

Fig. 13. Experimental results.

紙, ポリエチレンあるいは油絶縁などのケーブルに近いものとなる。

5. む す び

本稿ではガス絶縁ケーブルにおけるサージ伝搬特性について実測および理論計算の両面から検討を行なった。ガス絶縁ケーブルでは絶縁媒体として SF_6 ガスが用いられており, その比誘電率はほぼ 1 である。このため, 従来の油浸紙, ポリエチレンあるいは油絶縁などのケーブルに比して減衰はかなり小さく, かつ波形伝搬速度は極めて大でほぼ真空中の光速に近い。また特性インピーダンスは 1.5~2 倍程度大である。しかしながらスペーサとして比誘電率の大なる素材が用いられ, かつその占有体積が大なる場合には等価な比誘電率は 1 よりかなり大となり, その波形伝搬特性は上記とは異なり通常の油浸紙, ポリエチレンあるいは油絶縁などのケーブルと同様の特性となる。

ケーブルでは一般に電圧および電流変換行列の周波数依存性が極めて大なる点に特徴があるが, ガス絶縁ケーブルの場合低周波領域以外では, 周波数依存性は

かなり小さくこれを定数と見なしてさしつかえない場合が多い。

なお, 波形伝搬特性およびサージ波形の計算結果は実測値と良好な一致を示しており, 本稿で採用したケーブルインピーダンスおよびアドミタンスの妥当性およびサージ計算法の精度が極めて高いことが明らかとなった。

終りに実測を施行して頂いた BPA High Voltage Sec. の諸氏に謝意を表する。なお数値計算は, BPA, 京都大学および同志社大学計算センターにて行なった。(昭和 55 年 10 月 6 日受付)

文 献

- (1) 西脇, 他: 「 SF_6 ガス絶縁管路の過渡現象測定」昭 54 電気学会会大 No. 931
- (2) 雨谷, 他: 「ガス絶縁ケーブルにおけるサージ伝搬特性」昭 55 電気学会会大 No. 1139, 1140
- (3) 雨谷: 「周波数変換法によるサージ計算」電気評論 61, 10, 906 (昭 51-10)
- (4) 雨谷・尾野: 「非燃架水平配列線路におけるサージ伝搬特性」電学論 B, 95, 591 (昭 50-12)
- (5) L. Wedepohl & D. Wilcox: "Transient analysis of underground power-transmission systems" *Proc. Inst. Elect. Engrs* 120, 253 (1973-2)
- (6) A. Ametani: "A general formulation of impedance and admittance of cables" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-99, 3, 902 (1980-5/6)
- (7) L. Wedepohl: "Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena" *Proc. Inst. Elect. Engrs* 110, 2200 (1963-12)
- (8) A. Ametani: "Wave propagation characteristics of cables" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* 99, 2, 499 (1980-3/4)
- (9) A. Ametani: "Cable transients calculations by EMTP" *BPA Contract Report DE-AP-79 BP 12282* (1979-10)
- (10) 雨谷・長岡・富永: 「ケーブル過渡現象における誘電体の影響」昭 56 電気学会会大 No. 1219