配電線誘導雷現象に大地導電率が及ぼす影響のモデル実験 — 雷道が傾いている場合 —

正員 道下 幸志 (静岡大学)

正員 石井 勝 (東京大学)

正員 本郷 保二 (東北電力)

Experiment on Lightning-Induced Voltage on Distribution Line by Inclined Return-Stroke Channel Influenced by Ground Conductivity

Koji Michishita, Member(Shizuoka University), Masaru Ishii, Member(University of Tokyo),

Yasuji Hongo, Member(Tohoku Electric Power Co.)

The effect of the ground conductivity on lightning-induced voltage waveforms on an overhead wire influenced by inclined return-stroke channels is studied based on an outdoor experiment with a reduced-scale model. It turns out that the ground conductivity affects the induced voltage waveforms associated with inclined return-stroke channels, and the effect is dependent on the three-dimensional configuration of the channel relative to the line.

Moreover, experiments verified induced voltage waveforms calculated by solving the Telegraphers' equations in combination with the numerical calculation of electric fields.

キーワード：大地導電率、縮小モデル、雷放電、雷放電路モデル、誘導雷電圧

1. はじめに

配電線、通信線等に生じる誘導雷現象への効率的な対策を構じるためには、誘導雷電圧に及ぼす要因を正確に把握する必要がある。近年では、大地導電率⁽¹⁻⁶⁾や雷放電路の傾き⁽⁷⁻⁸⁾が誘導雷現象に及ぼす影響が注目を集めている。

大地導電率は、水平方向の電界（以下、水平電界と表記する）に大きく影響を及ぼすために、水平電界を起誘導源とする誘導雷現象も大地導電率の影響を大きく受けることが明らかにされている⁽¹⁻⁶⁾。大地導電率が有限な場合には、誘導雷電圧の雷撃点方位への依存性が大地が完全導体の場合とは大きく異なり、有限長線路の一端の誘導雷電圧は、雷撃点までの距離が等しい場合、線路の延長線上に雷撃があった場合に最も大きくなることが示されている⁽³⁾。

雷放電路の傾きも誘導雷現象に大きく影響を及ぼすことが明らかにされている⁽⁷⁻⁸⁾。この場合には、水平電界のみならず垂直電界も大きく影響を受け、雷道が線路に近づく向きに傾いているほど、線路に生じる誘導雷電圧の波高値が大きくなることが示されている⁽⁸⁾。なお、現在までに検討が行われているのは、大地が完全導体の場合のみであり、傾いた雷放電路により生じる誘導雷電圧に大地導電率が及ぼす影響については検討されていない。

我が国の日本海沿岸で顕著な冬期雷の観測結果によれば、かなり傾いた雷放電路の例が数多く報告されている⁽⁹⁾。また、自然雷により生じた誘導雷現象の観測結果では、大地

導電率の影響が明かな例も報告されている⁽²⁾⁽⁵⁾。しかし実用上重要な、雷撃点までの距離が数km以内の近傍への落雷により生じる誘導雷現象に、大地導電率や雷放電路の傾きが及ぼす影響を論じる場合には、実測で確かめるのが困難な雷放電路モデルを仮定することを余儀なくされる。

模擬雷道を用いた実験では、雷放電路の不確実性が減少していることや、繰返し実験が可能であるなどの利点のため、誘導雷電圧に影響を及ぼす要因や、計算結果の妥当性についての、より詳細な検討が可能である。これまでも、大地が完全導体の場合については、雷道が大地に垂直な場合⁽¹⁰⁾のみならず、傾いている場合⁽⁷⁾についても、縮小モデルを用いた実験によって計算結果の妥当性の検討が行われてきた。また、最近では、雷道が大地に垂直な場合に、大地導電率が誘導雷現象に及ぼす影響を明らかにするために、屋外でのモデル実験も行われている^(4,5)。

本論文では、屋外で行ったモデル実験結果に基づいて、雷道が傾斜している場合に生じる誘導雷現象に大地導電率が及ぼす影響について論じ、水平方向電界を考慮した誘導雷電圧解析手法による計算結果の妥当性について検討する。

2. 実験

実験は、東北電力技術研究所内野球場で行った。

模擬雷道は、直径0.5mmの銅線を螺旋状に直径1.5cm、長さ2mのベーク棒に巻き付けたものを連結して構成している。模擬雷道は全長約18mであり、一端は大地面から2cm程度浮

かせて固定し、もう一端は柱に固定されている。実験に用いた模擬雷道の形状と、実験装置の構成の概念図を図1に示す。パルス電流は、大地面に近い一端からもう一端に向かって進行するように設定されている。模擬雷道の上端は、開放となっており、雷道を進展した電流は、ここで反射される。模擬雷道の電流波形は、8.5kHz-100MHzの周波数帯域をもつCTにより、模擬雷道の下端で測定されている。

モデル配電線の縮小率は1/20とし、単導線路の地上高は実物換算で10m、線路直径10mm相当、実高、実径は、各々0.5m、0.5mmである。モデル配電線路の実長は17.5mと15mであり、木製のモデル配電柱を2.5m毎に配置した。線路の両端は任意のインピーダンスでの終端が可能であり、400Ω(線路のサージインピーダンスに近い値)の抵抗で終端、あるいは開放端の場合について実験を行った。また、40Hzで測定した線路終端点の接地抵抗は40Ωであった。誘導雷電圧波形の測定は、DC-100MHzの周波数帯域をもつ高入力インピーダンスの電圧プローブを用いて行った。電圧プローブの入力抵抗は約1MΩ、入力容量は約10pFである。

得られた電流及び電圧信号は、DC-30MHzの周波数帯域をもつオプトリックにより測定端まで伝送され、分解能8ビットのディジタル化により5nsの時間間隔で記録される。

(a) 側面から見た模擬雷道の形状

(b) 実験構成の概念図

図1 模擬雷道の形状と実験構成の概念図

Fig.1 Side view of the simulated lightning channel(a) and concept of the experimental setup(b).

3. 誘導雷電圧計算手法

<3.1> 誘導雷電圧計算手法 誘導雷電圧波形の計算には、(1)-(5)式を用いた⁽¹¹⁾。大地に水平な線路には水平電界が進行波電流を誘起し、分圧器接続点など大地に垂直な導体には垂直電界が進行波電流を誘起する。従って、計算では全線路にわたっての線路の接線方向の電界の計算が

必要となり、さらに誘導雷電圧を求める際には大地に水平な線路であっても垂直電界の計算が必要となる。

$$RI + (L + L_g) \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial V_s}{\partial x} = E_x^i \quad (1)$$

$$-\frac{\partial I}{\partial x} = C \frac{\partial V_s}{\partial t} \quad (2)$$

$$V = V_s + \int_0^h E_z^i(x, z) dz \quad (3)$$

$$V_0 = -Z_L I \quad (4)$$

$$V_\ell = Z_R I \quad (5)$$

ここに、 E_z^i : 雷放電に伴って発生する垂直電界、 E_x^i : 雷放電に伴って発生する線路方向の水平電界、 V_s : 外部電界の影響を線路方程式に反映させるために導入されたポテンシャル、 C : 線路導体の単位長さ当りの対地容量、 L : 線路導体の単位長さ当りのインダクタンス、 L_g : 単位長さ当りの大地帰路のインダクタンス、 R : 線路の単位長さ当りの損失、 I : 線路電流、 Z_L : 線路左端($x=0$)のインピーダンス、 Z_R : 線路右端($x=\ell$)のインピーダンス、 x : 線路に平行な座標、 z : 大地に垂直な座標、 V : 誘導雷電圧、 V_0 : 線路左端($x=0$)の誘導雷電圧、 V_ℓ : 線路右端($x=\ell$)の誘導雷電圧、 h : 線路の地上高

(1)式の L および(2)式の C は、大地が完全導体の場合の値を用いた。

(1)式の R は、実質的には大地帰路の抵抗分に相当し、周波数依存性をもつ。この成分の影響は、(6)式を用いて計算を行った⁽¹²⁾。また、大地帰路インダクタンスも考慮して計算を行ったが、計算結果にはほとんど影響を与えない。

$$Z_g = -\frac{j\gamma_s}{2\pi h\sigma} \frac{H_0^{(1)}(j\gamma_s h)}{H_1^{(1)}(j\gamma_s h)} = R + j\omega L_g \quad (6)$$

$$\gamma_s = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (7)$$

ここに、 Z_g : 大地帰路インピーダンス、 μ_0 : 空気の透磁率、 ϵ : 大地の誘電率、 $H_0^{(1)}(j\gamma_s h)$: 0次の第1種ハンケル関数、 $H_1^{(1)}$: 1次の第1種ハンケル関数、 σ : 大地導電率、 ω : 角周波数

抵抗分の周波数依存性を計算結果に反映させるために、周波数毎に差分法を用いて線路上の電圧、電流の計算を行い、それらを逆フーリエ変換して誘導雷電圧波形を求めた。

大地が完全導体の場合に本手法により計算される誘導雷電圧波形の妥当性に関しては、雷道が大地に対して垂直な場合には横山氏の実験結果⁽¹⁰⁾と比較することにより⁽⁵⁾、また雷道が傾いている場合には榊原氏の実験結果⁽⁷⁾との比較により⁽⁸⁾確かめられている。雷放電路が大地に垂直で、大地導電率が有限な場合に、本手法により計算される誘導雷電圧波形の妥当性についても、屋外で縮小モデルを用いて行った実験結果との比較により示した⁽⁵⁾。さらに、本計算手法を多導線系に拡張した解析手法による誘導雷電圧波形の計算結果についても、雷道が大地に垂直な場合には、大地導電率にかかわらず妥当であることが縮小モデルを用いた実験結果との比較により示されている⁽⁴⁾。

<3.2> 電界計算手法 電界の計算に当たっては、雷

放電路を微小な双極子に分割し、各双極子の複素振幅を雷放電路モデルに従って計算する。次に各双極子の生じる電界の和をとる事により空間の任意の点における電界を周波数領域で求め⁽³⁾、さらにそれらを逆フーリエ変換して時間領域の解を得た。

大地に対して傾いた双極子の生じる電界は、大地に垂直な双極子が生じる電界と水平な双極子が生じる電界の和として与えられる⁽¹³⁾。大地に垂直な双極子は、垂直電界、及び電磁波の進行方向の水平電界を生じる。また、大地に水平な双極子は垂直電界、及び一般に電磁波の進行方向と一致しない向きの水平電界を生じる。従って、これらの電界成分を合成して得られる水平電界の向きは時々刻々変化し、観測する電界の基線方向によって水平電界波形は大きく異なることとなる⁽⁸⁾。また、雷放電路と観測点間の距離が短いほど、水平な双極子の生じる水平電界成分の割合は大きくなる⁽⁸⁾。

大地導電率が有限である場合に、各双極子の生じる水平電界は、大地が完全導体の場合にも生じる水平電界成分と、有限な導電率により生じる水平電界成分に分類される。垂直な双極子の生じる水平電界のうち、大地が完全導体の場合にも生じる水平電界成分は、その強度が観測点地上高にほぼ比例し、この成分と、大地導電率が有限であるために生じる水平電界成分の向きは反対である⁽³⁾。これに対して、水平な双極子の生じる水平電界では、両者の向きは同じである。また、水平な双極子が生じる水平電界と垂直な双極子が生じる水平電界に、大地導電率が及ぼす影響が異なるため、これらを合成して得られる電界に大地導電率が及ぼす影響は、雷放電路の傾きや、観測点と雷放電路の位置関係により異なることとなる⁽¹⁴⁾。

大地導電率が有限な場合に双極子が生じる電界の厳密解には、開領域積分となるSommerfeld積分⁽¹⁵⁾が含まれており、この数値計算には膨大な時間を必要とする。そこで計算時間を大幅に短縮するために、垂直な双極子が生じる電界の計算には、数100m程度の近傍への雷撃により生じる電界の計算精度が良いことが明らかにされている⁽⁶⁾Norton解⁽¹³⁾を用いることとした。一方、水平な双極子の生じる電界について、Norton解の厳密解に対する精度を検討した結果、双極子と電界計算を行う点の距離が1波長よりも短くなると、(8)式のSommerfeld積分に対するNorton解の近似の誤差が大きくなったため⁽¹⁶⁾、この場合には、(8)式を直接数値計算⁽¹⁷⁾して電界を求め、これ以外の場合については水平な双極子の生じる電界の計算にもNorton解を用いた。

$$H = \int_0^{\infty} \frac{2}{l+m} J_0(\lambda r) e^{-(a+z)\lambda} \lambda d\lambda \quad (8)$$

ここに、 H :Sommerfeld積分、 $l = \sqrt{\lambda^2 - k^2}$ 、 $m = \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}$ 、 $k_2 = k/u$ 、 $u = 1/\sqrt{\epsilon_r + (1/j\omega\sigma)}$ 、 k :波数、 a :双極子地上高、 z :電界観測点地上高、 r :双極子と観測点の平面距離、 ϵ_r :大地の比誘電率、 J_0 :0次のベッセル関数

4. 電流パラメータ

地上面で測定された模擬雷道電流波形を図2に示す。電流が模擬雷道を進展する速度は、電流波が終端開放の約18mの模擬雷道を往復する時間から求めた。図2の電流波形に基づいて、この方法により評価された進展速度は、120m/ μ sであった。これらの測定結果を基に、測定された波形を折れ線近似し、この電流波形が雷放電路に沿って120m/ μ sで減衰なく進展すると仮定して電界及び誘導電圧の計算を行った。計算時間は模擬雷道下端での電流印加から最長230nsまでとし、それまでの電流波形に見られる細かな振動は、折れ線近似を行う上では無視した。この振動は、測定に際してのノイズである可能性が強い。

図2 模擬雷道下端で測定された電流波形

Fig.2 Measured current waveform at the bottom of the simulated lightning channel.

5. 大地導電率の誘導雷電圧への影響

今回実験を行った地点近傍では、誘導雷現象に影響を及ぼす周波数帯域の大地導電率が明らかになっていない。そこで、線路と模擬雷道の3通りの位置関係のもとで実測された誘導雷電圧波形と、計算される波形がよく一致する大地導電率の値を、大地の比誘電率を10として求めた。この手法により推定された大地導電率は、0.03S/mであった。計算結果は、 σ が0.01S/m、0.03S/m、 ∞ （大地が完全導体の場合）、の3例を各々のケースについて示す。計算に当たっては、接地抵抗や電圧プローブのインピーダンスを考慮して計算を行い、計算結果と実測結果の比較を容易にするために、測定器の周波数帯域を考慮して、計算結果に補正を施している。接地抵抗値も一般に周波数依存性をもつが、今回解析対象とした回路では400 Ω の終端抵抗に直列に入るため、その変動の影響は小さいと考え、40Hzでの測定値をそのまま用いた。

〈5.1〉 模擬雷撃点が線路中間点近傍にある場合 図3(a)のように、模擬雷撃点が線路の中間点付近に位置し、雷道が線路に近づくような傾きをもつ場合に、線路中間点と線路の一端での誘導電圧の実測結果と計算結果を、図3(b)、(c)に示す。線路の両端は、400 Ω で終端されている。

図3(a)の模擬雷撃点と線路の位置関係では、大地導電率が変化しても図3(b)、(c)の誘導電圧の計算結果が5%程

度しか相違を生じないことに示されるように、誘導雷電圧波形に対して大地導電率が及ぼす影響は比較的小さい。この場合は、誘導雷発生に水平電界が及ぼす影響が比較的小さい上に、模擬雷道と模擬線路との最短距離が約2.2mと短く、大地が完全導体の場合にも発生する水平電界成分が支配的なためである。

線路中間点(A点)の誘導電圧の計算結果は、 $\sigma=0.03\text{S/m}$ の場合が、 $\sigma=0.01\text{S/m}$ の場合や、 $\sigma=\infty$ の場合よりも大きくなった。これは、垂直な双極子が生じる水平電界と水平な双極子の生じる水平電界に大地導電率が及ぼす影響が各々異なるために、これらを合成して得られる線路方向の水平電界成分に大地導電率が及ぼす影響が、雷放電路と線路上の点との相対的な位置関係により変化するためである。

この場合に、大地導電率を 0.03S/m として計算された線路の中間点、及び線路の一端での誘導雷電圧は、それぞれ実測結果と5%程度の精度で一致している。

<5.2> 模擬雷撃点が線路終端点近傍にある場合

図4に、模擬雷撃点が線路終端点近傍に位置し、雷放電路が図3の場合と同様に線路に近づくような傾きをもつ場合の、線路両端の誘導電圧の実測結果と計算結果を示す。模擬雷撃点に近い線路終端点(B点)は電圧プローブで、もう一端(C点)は 400Ω で終端されている。

図4(a)の線路と模擬雷道の位置関係でも、模擬雷撃点に近い線路終端点の誘導電圧の計算結果は、 $\sigma=0.03\text{S/m}$ の場合に最も大きくなっており、図3(b)の線路中間点の場合と同様の傾向を示している。

図4(b)の誘導電圧の計算結果では、図3(b)の場合よりも、大地導電率の相違による誘導雷電圧波形の相違が大きくなっており、雷道が線路に近づく方向に傾斜している場合には、雷撃点が線路終端点付近にある場合の方が、線路中間点近傍にある場合よりも大地導電率が誘導電圧に与える影響が大きくなることを示している。この傾向は、雷道が大地に垂直な場合⁽³⁾と同様である。

図4(b)、(c)においても、 $\sigma=0.03\text{S/m}$ として計算された誘導電圧は、実測結果と10%程度の精度で一致している。

図5には、図4の場合と比べて模擬雷道と線路の距離がやや増えた場合の線路両端における誘導雷電圧の測定結果と計算結果を示す。

この場合には、模擬雷撃点に近い線路終端点における誘導電圧の計算結果は、大地導電率が小さくなるほど、大きくなっている。また、模擬雷撃点から遠い線路終端点では、大地導電率が有限であるために発生する水平電界の誘起する電圧の極性が、この点では負となるために、大地導電率が有限である場合の計算結果は、波頭の一部を除いて負となっている。この様に模擬雷道と配電線の距離が増大すると、傾いた雷道により生じる誘導電圧に大地導電率が及ぼす影響は、雷道が大地に垂直な場合⁽³⁾と同様に増大する。その理由は、雷道と線路の距離が大きくなると、垂直な双極子の生じる電界成分が誘導電圧発生に果たす役割が大きくなるためと考えられる。

(a) 模擬雷道と模擬配電線の相対的な位置関係

(b) 線路中間点((a)のA点)の誘導雷電圧波形

(c) 線路終端点((a)のC点)の誘導雷電圧波形

線路両端は 400Ω で終端

図3 模擬配電線と模擬雷道の配置(a)及び線路中間点(b)と線路の一端(c)で測定された誘導電圧波形と計算結果の比較

Fig.3 Configuration of the simulated lightning channel and the simulated overhead wire, terminated with 400 ohms at both ends(a), and comparison of measured and calculated voltages at points A(b) and C(c).

図5の場合には、大地導電率を0.03S/mとして計算された誘導雷電圧波形は、模擬雷撃点に近い線路終端点においては5%程度の精度で実測波形と一致し、線路のもう一端においても、双方はほぼ同様の変化を示している。

図3から図5に示される実測結果と計算結果の差は、文

献(18)と同程度であり、大地導電率が場所により異なることがこれらの相違の主な原因と考えられる⁽¹⁸⁾。以上の3例の実測結果と計算結果との比較により、本手法による誘導雷電圧の計算結果の妥当性が示されたと考える。

(a) 模擬雷道と模擬配電線の相対的な位置関係

(a) 模擬雷道と模擬配電線の相対的な位置関係

(b) 模擬雷撃点に近い線路終端点(B点)の誘導雷電圧波形

(b) 模擬雷撃点に近い線路終端点(B点)の誘導雷電圧波形

(c) 模擬雷撃点から遠い線路終端点(C点)の誘導雷電圧波形

B点は電圧プローブにて終端、C点は400Ωで終端

図4 模擬配電線と模擬雷道の配置(a)及び模擬雷撃点に近い線路終端点(b)と模擬雷撃点から遠い線路終端点(c)の誘導電圧の実測結果と計算結果の比較

Fig.4 Configuration of the simulated lightning channel and the simulated overhead wire (a), and comparison of measured and calculated voltages at point B, open-circuited, (b) and at point C, terminated with 400 ohms (c).

(c) 模擬雷撃点から遠い線路終端点(C点)の誘導雷電圧波形

線路両端は400Ωで終端

図5 模擬配電線と模擬雷道の配置(a)及び模擬雷撃点に近い線路終端点(b)と模擬雷撃点から遠い線路終端点(c)の誘導電圧の実測結果と計算結果の比較

Fig.5 Configuration of the simulated lightning channel and the simulated overhead wire, terminated with 400 ohms at both ends(a), and comparison of measured and calculated voltages at points B(b) and C(c).

6. 結言

1/20スケール・モデルを用いて、雷撃点までの距離が数100m程度の近傍で、線路に近づく方向に傾いた雷放電路により生じる配電線誘導雷現象の模擬実験を屋外で行った。水平方向電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析手法による計算結果と比較することによって、以下の知見が得られた。

傾いた雷道により生じる誘導雷電圧も大地導電率により影響を受けることが判明した。検討を行ったケースについては、模擬雷撃点が線路終端点近傍にある場合の方が、大地導電率が誘導雷電圧波形に及ぼす影響が大きかった。また、雷道と線路の距離が短い場合には、垂直、水平の各双極子が生じる水平電界に対する大地導電率の影響が異なるために、傾いた雷道によって生じる誘導雷電圧への大地導電率の影響の様相が、雷道が大地に垂直な場合とは異なる場合があることが明らかとなった。

大地導電率が有限な場合に、傾いた雷放電路により生じる誘導雷電圧の計算結果も、3例の実測結果とほぼ一致し、水平電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析手法による誘導雷電圧の計算結果の妥当性が示された。本論文の成果とこれまでの研究成果⁽⁵⁾⁽⁸⁾をあわせると、本解析手法により、大地導電率や雷放電路の傾きにかかわらず、誘導雷電圧の解析が可能であることが明らかとなった。

(平成6年10月20日受付、平成7年1月31日再受付)

文 献

- (1) H. Koga, T. Motomitsu, M. Taguchi, "Lightning surge waves induced on overhead lines", Trans. IECE of Japan, **E62**, 216(1980)
- (2) M. J. Master and M. A. Uman, "Lightning induced voltages on power lines: Theory", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., **PAS-103**, 2502(1984)
- (3) 道下幸志、石井勝、河村達雄:「大地導電率の配電線誘導雷電圧波形への影響」、電学論B、**112**、245(1992)
- (4) 今井康友、道下幸志、石井勝、河村達雄:「有限な大地導電率を考慮した多導体系配電線の誘導雷現象解析」、電学論B、**113**、499(1993)
- (5) M. Ishii, K. Michishita, Y. Hongo, S. Oguma, "Lightning-induced voltage on an overhead wire dependent on ground conductivity", IEEE Trans. Power Delivery, **PWRD-9**, 109(1994)
- (6) A. Zeddani & P. Degauque, "Current and voltage induced on telecommunication cables by a lightning stroke", Electromagnetics, **7**, 541(1987)
- (7) A. Sakakibara, "Calculation of induced voltages on overhead lines caused by inclined lightning strokes", IEEE Trans. Power Delivery, **PWRD-4**, 683(1989)
- (8) 道下幸志、石井勝:「配電線誘導雷電圧への雷放電路の傾きの影響—大地が完全導体の場合—」、電学論B、**112**、500(1992)
- (9) 多田雀、藤波秀雄:「雷撃現象自動撮影装置の開発と観測結果」、電学論B、**104**、85(1984)
- (10) S. Yokoyama, "Calculation of lightning-induced voltages on overhead multiconductor systems", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., **PAS-103**, 100(1984)
- (11) A. K. Agrawal, H. J. Price, S. H. Gurbaxiani, "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, **EMC-22**, 119(1980)
- (12) E. F. Vance, "Coupling to shielded cables", Krieger Publishing Pub. Co. (1987)
- (13) K. A. Norton, "The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere Part II", Proc. IRE, **25**, 1203(1937)
- (14) 道下幸志、石井勝:「雷道の傾斜と大地導電率が誘導雷電圧に及ぼす影響の解析」、電気学会高電圧研資、HV-94-172(平6)
- (15) J. Stratton, "Electromagnetic theory", McGraw-Hill(1941)
- (16) 道下幸志、石井勝:「Norton解による水平電界の計算精度」、平6電気学会電力・エネルギー部門大(論文Ⅱ)、No. 450
- (17) R. J. Lytle, D. L. Lager, "Numerical evaluation of Sommerfeld integrals", UCRL-51688, Lawrence Livermore Lab. (1974)
- (18) 道下幸志、石井勝、本郷保二:「単導線路に生じる誘導雷の縮小モデル実験」、電学論B、**114**、859(1994)

道下 幸志 (正員) 1962年9月24日生。1991年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。同年4月静岡大学助手、1994年4月同助教、現在に至る。主として、電力工学、環境電磁工学に関する研究に従事。IEEE Member.

石井 勝 (正員) 1949年3月11日生。1976年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年4月東京大学助教授、生産技術研究所勤務、1992年同教授、現在に至る。主として系統絶縁、自然雷、高電圧現象の測定に関する研究に従事。1989、1990年度電気学会東京支部評議員。IEEE Senior Member.

本郷 保二 (正員) 1957年6月22日生。1981年横浜国立大学工学部電気工学科卒業。同年4月東北電力に入社。現在、同社電力技術研究所に勤務。主として、配電線雷過電圧発生現象に関する研究に従事。