大地導電率の配電線誘導雷電圧波形への影響

正員 道下 幸志 (静岡大)

正員 石井 勝 (東京大)

正員 河村 達雄 (芝浦工大)

Lightning-Induced Voltage Waveform on an Overhead Wire over Finitely Conducting Ground

Koji Michishita, Member (Shizuoka University), Masaru Ishii, Member (University of Tokyo),
Tatsuo Kawamura, Member (Shibaura Institute of Technology)

Lightning-induced voltage waveforms at the end of an overhead wire over lossy ground are calculated with respect to the conductivity of the ground and lightning striking points. By numerical calculation, it is pointed out that the crest value of the lightning-induced voltage waveforms is greatly affected by the lightning striking points. It is confirmed that the disagreement of the polarity of the induced voltage at both ends does occur at an incident of a lightning stroke within about 3km. Accuracy of these results is evidenced by the experimental results.

キーワード：誘導雷電圧，大地導電率，水平電界，垂直電界，雷放電

1. はじめに

配電線，通信線などの事故原因となる誘導雷に対する効率的な対策を施すためには，その発生メカニズムの正確な把握が不可欠となる。

最近の誘導雷サージに関する理論は，帰還雷撃に伴う大地に垂直な電界成分に基づいてサージ電圧を予測するもの^{(1)~(3)}と，大地に水平な電界を直接計算しサージ電圧を予測するもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾に大別される。

大地に垂直な電界を重視する理論^{(1)~(3)}においては，大地は完全導体として扱われており，Rusckの示した考え⁽¹⁾に基づいて誘導電圧の計算が行われ，誘導電圧波形の極性は線路上どこでも同じで，垂直方向の電界変化と誘導電圧の極性は一致するという結果を与える。

Rusckの基本式による誘導雷電圧の計算結果は，電磁界に関する境界条件を考慮して求めた誘導雷電圧の計算結果⁽⁶⁾と，配電線高さが小さくなくかつ完全導体と仮定された大地上の無限長線路については一致することも示された⁽⁷⁾。しかし，Rusckの示した有限長線路の終端部分における誘導電圧の計算手法では，

この部分で発生する進行波電流が考慮されていないために，落雷位置によっては誤差を生じることも報告した⁽⁷⁾。これは文献(2)~(4)でも同様である。

主として，遠方の雷撃に伴って発生する誘導電圧を求める場合に多く用いられる，水平方向電界を直接計算しサージ電圧を予測する理論⁽⁴⁾⁽⁵⁾では，大地の導電率が有限であることにより発生する水平電界が，誘導電圧の主たる発生原因であるとしている。この機構で発生する水平電界については，水平方向に伝搬する平面波の電磁界に関連するものが，これまでに主として検討されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。落雷点と配電線の位置関係によっては，有限な長さの配電線の両端で，互いに逆極性の誘導電圧を生じ，雷撃点までの距離が同じでも，その方位によって誘導電圧の大きさは大幅に変わるという結果を与える。

本論文では，厳密解に対する近似の精度が文献(8)により明らかにされている電界計算手法を用い，文献(7)に示された誘導電圧計算のための等価回路に基づいて，大地導電率および落雷位置をパラメータとして単導線路の誘導電圧の波高値を求めた。また，従来の手法との相違について理論および数値計算を基に論

じ、計算結果を文献(9)の誘導雷電圧と垂直電界の同時観測結果と比較検討する。

2. 電界計算

〈2・1〉 電界計算手法 電界の計算にあたっては、雷放電路を多数の双極子に分割し、はじめに雷放電路モデルに基づいて、周波数領域において各双極子の複素振幅を計算し、次に双極子によって放射される電界をNorton解⁽¹⁰⁾に基づいて求め、各双極子による電界を合成して、空間の任意の点における電界を周波数領域で求め、更にそれを逆フーリエ変換して時間領域の解を得た⁽⁸⁾。この計算手法の厳密解に対する計算の精度は、文献(8)で明らかにされており、落雷点と観測点との距離が100 mで観測点の地上高が10 mの地点で、周波数が1 kHz~10 MHzでは、厳密解との誤差は、たかだか5%であることに示されるように、近距離の落雷に伴って発生する電界に対する計算の精度が良いことに特徴がある。計算の精度の検討は、文献(8)の結果と比較することによって行い、電界の波頭のピーク値とその時間および電界の極性が反転するまでの時間の計算結果が一致したため、文献(8)と同等の計算精度を有するものと判断した。

〈2・2〉 電界計算結果 雷放電流は、伝送線路モデル(transmission-line model)に従って、大地面から時間と共に大地に対して垂直方向に光速の1/3の速さ⁽¹¹⁾で、減衰なく伝搬するものとする。雷放電流波形は、図1に示したものをを用いる。図2に雷撃点と観測点の距離が500 mで、観測点地上高が10 mの場合の、大地に垂直および水平な電界の計算結果を示す。垂直電界は慣習に従って下向きを、水平電界に関しては電磁界の進行方向を正の方向とした。大地導電率が相違しても垂直電界はほとんど影響を受けないので、垂直電界は大地が完全導体の場合のみを示す。一方、大地に水平な電界は、大地導電率の影響を大きく受ける。大地が完全導体の場合に発生する電界は高さ依存性を持ち、その強度が観測点の地上高にほぼ比例

図1 計算に用いた雷放電流波形
Fig. 1. Lightning current waveform.

して大きくなる。大地が有限な導電率をもつ場合の水平電界は、大地が完全導体の場合にも発生する高さ依存性をもつ水平電界と、大地導電率が有限であることによって発生する水平電界成分との和となる。大地導電率が有限であることによって発生する水平電界成分は、高さ依存性をもつ水平電界成分と互いに逆極性である。このために、大地導電率が有限である場合の水平電界は、図2(c)に示されるように波頭と波尾で極性が異なる場合が存在する。一般に、雷撃点と観測点の水平距離が短いほど、また観測点地上高が高いほど、水平電界波形において高さ依存性をもつ水平電界成分の占める割合は大きくなる⁽⁷⁾。

(a) 垂直電界 (大地導電率: ∞)

(b) 水平電界 (大地導電率: ∞)

(c) 水平電界 (大地導電率: 0.001 S/m)

図2 計算された地上高10 mの垂直電界と水平電界波形雷撃点までの距離: 500 m
Fig. 2. Electric field waveforms at 10 m above ground, associated with lightning striking at 500 m away.

3. 誘導電圧の数値計算

〈3・1〉 誘導電圧計算手法 水平電界成分は水平な線路に対して進行波を誘起し、同様に大地に垂直な電界成分が、誘導電圧測定のための分圧器など大地に対して垂直な部分に進行波を誘起する⁽⁷⁾。誘導電圧に関する線路方程式は(1)～(5)式で与えられる。この線路方程式は、Agrawalら⁽⁶⁾によって提案され、Umanらによってこれらが用いられたが⁽⁹⁾、その数値計算結果には誤りがあることも最近報告された⁽¹²⁾。これらの式に基づいた等価回路は図3で与えられ、この等価回路では大地に垂直および水平な電界のみが誘導雷電圧の起誘導源となっているため、任意の雷放電モデルおよび大地導電率に対して等価回路の変更なく計算が行えるという特徴がある⁽⁷⁾。

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

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

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

$$V_1 = -IZ_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$V_2 = IZ_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 x ：線路に平行な座標、 z ：大地に垂直な座標、 E_z^i ：雷放電に伴う大地に垂直な電界（下向きを正）、 E_z^i ：雷放電に伴う線路に平行な電界（ x 軸方向を正）、 h ：線路の地上高、 R ：線路の単位長さあたりの損失、 C ：線路導体の単位長さあたりの対地容量、 L ：線路導体の単位長さあたりのインダクタンス、 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、 V ：誘導雷サージ電圧、 I ：線路電流、 Z_1 ：線路左端($x=0$)のインピーダンス、 Z_2 ：線路右端($x=l$)のインピーダンス、 V_1 ：線路左端($x=0$)の誘導雷サージ電圧、 V_2 ：線路右端($x=l$)の誘導雷サージ電圧

(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⁽¹³⁾。(6)式で示される侵入長(skin depth) δ と線路地上高 h との関係により、(7)、(8)式のように近似できることが示されている⁽¹³⁾。大地導電率(σ)が0.01 S/mの場合には(7)式を、大地導電率が0.001 S/mの場合には(8)式を用いて計算を行う⁽⁶⁾。

(7)、(8)式の成立条件を満たさない領域では、両式から計算される値の差は本論文の計算条件では小さく、誘導雷電圧波形にほとんど影響を与えない。

$$\delta = 1/(\pi f \mu_0 \sigma)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R = 1/4\pi h \sigma \delta \quad (\delta \ll 2h, \sigma \gg \varepsilon \omega) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$R = \omega \mu_0 / 8 \quad (\delta \gg 2h) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 μ_0 ：空気の透磁率、 ε ：大地の誘電率

大地帰路の抵抗分の周波数依存性を計算に反映させるために、〈2・1〉節に示した計算手法によって時間領域で求められた電界成分を周波数領域に変換し、周波数ごとに差分法を用いて(1)～(5)式から誘導電圧を計算し、それをフーリエ逆変換して誘導電圧波形を求めた。

大地が完全導体の場合のこのプログラムの妥当性については、モデル実験結果との比較により確かめられている⁽⁷⁾。

図3 配電線誘導雷電圧計算のための等価回路
Fig. 3. Equivalent circuit of an overhead wire.

〈3・2〉 計算に用いたパラメータ 雷放電電流波形は図1に示したものを、雷放電の進展速度に関するパラメータは〈2・2〉節で用いたものと同様とする。

図4 雷撃点と線路の平面的な位置関係
Fig. 4 Arrangement of an overhead line and lightning striking points (A-M).

落雷位置、大地導電率、地上高 10 m で長さ 500 m の単導線路の終端条件をパラメータとして、誘導雷電圧の計算を行う。本論文では、落雷位置と線路の位置関係を表記するのに、図4に示す位置の表記方法を用いる。図4の雷撃点は、線路との距離(d)が同一であり、A, B, C, D および J, K, L, M は、同一円周上の点であって、各々隣合う点との距離は等しい。配電線長を l とすると、D, E および I, J 間は $l/10$ であって、EF, FG, GH, HI 間は、 $l/5$ である。

〈3・3〉 計算結果とその検討 数値計算の結果得られた図4の線路の左端(図4のP)の誘導電圧のピーク値への大地導電率、落雷位置の影響を図5、図6に示す。線路終端抵抗の 500Ω は、線路終端部分で反

(a) $d=100$ m

(b) $d=500$ m

(c) $d=2$ km

終端条件 左端: 500Ω , 右端 500Ω
大地導電率: ∞
 ——大地導電率: 0.01 S/m
 -.-.-大地導電率: 0.001 S/m

図5 地上高 10 m の 500 m 線路の左端誘導電圧のピーク値の雷撃点位置および導電率による変化
Fig. 5. Crest values of lightning-induced voltages at the left end (P_1 in Fig. 2) of a 500 m line.

(a) $d=100$ m

(b) $d=500$ m

(c) $d=2$ km

終端条件 左端: 開放, 右端: 500Ω
大地導電率: ∞
 ——大地導電率: 0.01 S/m
 -.-.-大地導電率: 0.001 S/m

図6 地上高 10 m の 500 m 線路の左端誘導電圧のピーク値の雷撃点位置および導電率による変化
Fig. 6. Crest values of lightning-induced voltages at the left end of a 500 m line.

射をほとんど生じない値である。本論文では、落雷点に最も近い線路上の点が、線路の終端点以外で与えられる場合を正面落雷(図4のD-J)と呼び、これ以外の場合を側方落雷(図4のA-C, K-M)と呼ぶ。図5, 図6で特徴的なことは、大地が完全導体の場合と比較すると、 $d=100\text{ m}$ でも、大地導電率が 0.001 S/m の場合には、正面落雷よりも側方落雷のほうが、雷撃点に近い線路終端点における誘導電圧(図4のA-C)が大きくなることである。垂直電界は大地導電率の影響をほとんど受けないので、線路終端部分の大地に垂直な導体部分で垂直電界によって発生する成分に関しては相違がない。しかし、水平電界波形は大きく異なるため、大地に水平な線路に、水平電界によって誘起される進行波は大きく異なる。先に検討したように、有限な導電率をもつ大地上の水平電界は、大地導電率が有限であることによって発生する水平電界成分と、大地を完全導体とした場合にも発生する高さ依存性をもつ水平電界に、その発生機構から分類され、それらは互いに逆極性である。このため、これらの水平電界は、誘導電圧発生において相反する役割を果たすこととなる。図3の等価回路に従えば、大地導電率が有限であることによって発生する水平電界成分は、側方落雷の場合には落雷点に近い線路終端点の垂直電界による起電力と同じ極性の起電力を誘起するために、この部分での誘導電圧を更に大きくすることとなる。この結果として、落雷点に近い線路終端点においては、完全導体の場合と比較すると誘導電圧が大きくなる。

逆に、有限な導電率によって発生する水平電界が落雷点から遠いほうの端点において誘起する起電力は、この点で垂直電界により誘起される起電力と逆向きになるために、この部分での誘導電圧は、進行波の影響を受けて極性が反転する場合もあり得る。図5, 図6において、側方落雷の場合に、落雷点から遠いほうの線路終端部分と、落雷点に近い線路終端部分の誘導電圧の極性が互いに反転することは、以上の考察に基づいて容易に理解できる。

また、線路終端点の大地に垂直な導体部分で、垂直電界によって誘起される電流は、線路のもう一方の終端点において、垂直電界によって誘起される誘導雷電圧と逆極性の誘導電圧を誘起する⁽⁷⁾。従って、この成分も、図5, 図6の側方落雷の場合に、落雷点から遠いほうの誘導電圧の極性が反転することを促進する役割を果たしている。

線路両端が $500\ \Omega$ で終端されている場合(図5)には、 $d=100\text{ m}$ あるいは $d=500\text{ m}$ の場合のほうが、 $d=2\text{ km}$ の場合よりも極性反転が起こる範囲が広い。

落雷方位が同一で、雷撃点と線路の距離が大きくなると、雷撃点に近い終端点に垂直電界によって誘起される電流が、雷撃点から遠い終端点に誘起する起電力と、その点で垂直電界が誘起する起電力との差は小さくなる。また、水平電界に関しては、文献(14)に示されるように雷撃点と観測点の距離が 500 m よりも大きくなると、水平電界波形の波頭では、有限な導電率のために発生する成分が支配的になり、波頭における強度は、ほぼ距離に逆比例することが示されている。正面落雷の場合には、水平電界の影響は落雷点までの距離が増すと減少する。これらの理由で、落雷点までの距離が大きくなると極性反転が起こりにくくなる。

有限な導電率を考慮した場合のみ、線路の両端において誘導電圧波形の極性が反転するケースが存在する。多くの場合は、側方落雷の場合に、雷撃点から遠いほうの端点において垂直電界の極性と逆の極性をもった誘導電圧が観測されるが、正面落雷でも図5, 図6の(a), (b)のI, Jの例などのように極性反転が起こる場合もある。

また、雷撃点と線路までの距離が 500 m となると、 100 m の場合と比較して、大地導電率が 0.01 S/m の場合の誘導電圧のピーク値は、側方落雷のほうが大きい値を示すようになる。このことは、雷撃点と電界観測点の距離が増すと、大地導電率が有限であるために発生する水平電界の、高さ依存性をもつ水平電界に対する比率が大きくなることによりもたらされる現象である⁽¹⁴⁾。

文献(9)の角海浜の試験配電線誘導電圧の測定結果との比較を行ってみる。電流波形との同時計測および落雷位置の標定が正確に行われている例が少ないこと、および架空地線の影響があるために、定量的な比較を行うことはできないが、文献(9)によると垂直電界と配電線誘導電圧の同時計測の結果、配電線誘導電圧の極性と垂直電界の極性が反転しているものが2例あった。文献(9)の試験配電線の終端条件は、左端(P_1)開放、右端 $400\ \Omega$ で終端されており、左端の誘導電圧が測定されている。垂直電界と誘導電圧波形のピーク値の時間差から到来方位を判定すると、極性反転を起こしている2ケースについては、図4の P_1 点の反対側のK, L, M方向から電磁波が到来していることがわかった⁽⁹⁾。文献(9)のデータに関しては、落雷点までの距離は、 3 km 以内であることが報告されている。また、角海浜の等価的な大地導電率は、水平電界の測定結果から 0.005 S/m 程度と推定されている⁽¹⁵⁾。図6(c)でK, L, Mに落雷した場合がこれらの条件に等しい。計算された開放端の誘導電圧の極性

(a) Norton解を用いた計算結果

(b) Zenneckの式を用いた計算結果

左端 ($x=0$), 右端 ($x=500$ m)とも 500Ω で終端
 $d=100$ m, 大地導電率: 0.001 S/m

図7 図4のD点に雷撃した場合の左端誘導電圧波形

Fig. 7. Lightning-induced voltages, associated with a lightning stroke at point D in Fig. 4.

は、垂直電界の極性と反転しており、実測結果とよい一致を見せている。

4. 従来の手法との比較

(9)式で表される Zenneck の式⁽¹⁶⁾から求められる、大地の有限な導電率に伴って発生する水平電界と、大地を完全導体とみなした場合の地上高 10 m の水平電界⁽¹⁷⁾の和を、地上高 10 m の水平電界と近似して計算した場合の線路両端の誘導電圧波形との比較を行う。雷撃位置が図4のD点であり、 $d=100$ m の場合の検討を行う。両端が 500Ω で終端された線路についての計算結果を図7に示す。Zenneck の式を用いた計算結果は、Norton 解を用いて水平電界を計算した結果と誘導電圧の値が異なる。その理由は、文献(14)に示されたように、Norton 解と比較すると、Zenneck の式で計算される水平電界は、過大に評価されているためである。Norton 解が球面波についてよい近似となっているのに対し、Zenneck の近似は平面波が対称である。波形からみても、本手法で得られる波頭長と Zenneck の式を用いた誘導電圧波形の波頭長は異なっている。垂直電界の立上り時間と本手法によって求められた誘導電圧の立上り時間は、ほぼ等しくなっており、文献(9)の計測結果とこの点でも極めてよく一致している。

$$E_h^i(\omega) = -E_z^i(\omega) \frac{1}{\{\epsilon_r + \sigma/j\omega\epsilon_0\}^{1/2}} \dots\dots (9)$$

ここに、 E_h^i : 大地導電率が有限であること
 によって発生する水平電界成分、 ϵ_r : 大地の
 比誘電率、 ϵ_0 : 空気の誘電率

5. 結 言

厳密解に対する近似の精度が明らかになっている電界計算手法⁽⁸⁾と、電磁界の境界条件を満たす等価回路⁽⁷⁾とを組合せ、線路誘導電圧波形の解析を行った。電界は、雷放電路を双極子に分割し、各双極子から放射される電界波形を Norton 解を基にして求め、それを放電路に沿って積分することによって求められる。大地導電率、および落雷位置をパラメータとして、誘導電圧の解析を行った結果、以下のような知見が得られた。

(1) 大地の導電率が 0.001 S/m 程度と小さい場合には、線路と雷撃点との距離が 100 m 程度と短くとも、線路の長さ方向に落雷点があるときのほうが、直角方向に落雷点があるときよりも、一方の線路終端点での誘導電圧は大きくなる。このようなケースは大地が完全導体の場合には決して生じない。

(2) 大地導電率が0.01 S/mと大きい場合には、線路と落雷点の距離が短いときには、誘導電圧の大きさの落雷点の方向への依存性は大地が完全導体のときと同様だが、距離が500 m程度に増大すると、導電率が小さいときと同じく、線路の長さ方向に落雷点があるときのほうが、一方の線路終端点の電圧は大きい。雷撃点との距離が大きくなると、有限な導電率に伴って発生する水平電界が支配的になってくるためこのような傾向になる。

(3) 大地導電率が有限な場合にのみ配電線の両端の誘導電圧の極性が互いに反転する場合が存在する。これは落雷点と線路の距離が短いほど生じやすい。

(4) 本論文の手法から求められる誘導雷電圧波形の立上り時間は、垂直電界の立上り時間と大きな差はなかった。この結果は文献(9)の測定結果とよく一致する。

(5) 誘導電圧を計算するのに必要な水平電界を求めるのに、大地導電率が有限なときに従来よく使用されてきたZenneckの式、またはそれに代わり本論文の手法を用いて得られた誘導電圧波形を比較したところ、落雷点までの距離が100 mのとき、前者による波形は波尾長がより長く、波高値も25%程度過大に評価されることがわかった。Zenneckの式は平面波に対する近似であるため、落雷点までの距離が小さくなると、誤差は増大することになる。

(平成3年6月3日受付)

文 献

- (1) R. H. Golde (ed.): *Lightning*, Vol. 2, Ch. 23 (1977) Academic Press, London
- (2) 山本, 他: 「架空配電線の近傍落雷時の誘導サージ解析」, 電学論 B, **103**, 735 (1983)
- (3) S. Yokoyama: "Calculation of lightning-induced voltages on overhead multiconductor systems", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-103**, 100 (1984)
- (4) H. Koga, et al.: "Lightning surge waves induced on overhead lines", *Trans. IECE of Japan*, **E62**, 216 (1979)
- (5) M. J. Master & M. A. Uman: "Lightning induced voltages on power lines: theory", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-103**, 2502 (1984)
- (6) A. K. Agrawal, et al.: "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field", *IEEE Trans. EMC*, **EMC-22**, 119 (1980)
- (7) 道下, 他: 「水平方向電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析法」, 電学論 B, **111**, 628 (平3-6)
- (8) A. Zeddam & P. Degauque: "Current and voltage induced on telecommunication cables by a lightning stroke", *Electromagnetics*, **7**, 541 (1987)
- (9) M. Ishii, et al.: "Correlated measurement of vertical electric field and lightning induced voltage on a test distribution line", 電学論 B, **110**, 368 (平2-4)
- (10) K. A. Norton: "The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere", *Proc. IRE*, **25**, 1203 (1937)
- (11) 北篠, 他: 「落雷に伴う電磁界変化波形の特性と評価法」, 電学論 B, **108**, 165 (昭63-4)
- (12) M. Rubinstein, et al.: "An experimental test of lightning-induced voltages on an overhead wire", *IEEE Trans. EMC*, **EMC-31**, 376 (1989)
- (13) E. F. Vance: *Coupling to Shielded Cables* (1978) John Wiley
- (14) 道下・石井・河村: 「帰還雷撃に伴って発生する電界波形」, 電気学会放電・高電圧合同研資, ED-90-158; HV-90-45 (1990)
- (15) 道下, 他: 「対地雷撃に伴う水平電界波形」, 電学論 B, **110**, 986 (平2-11)
- (16) 例えば, 虫明: アンテナ・電波伝搬, 電子通信学会大学講座 18 (1961) コロナ社
- (17) M. A. Uman, et al.: "The electromagnetic radiation from a finite antenna", *American J. Phys.*, **43**, 33 (1975)

道 下 幸 志 (正員)

昭和37年9月24日生。平成3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。同年4月静岡大学助手、現在に至る。工学博士。主として、電力工学、電気機器学に関する研究に従事。

石 井 勝 (正員)

昭和24年3月11日生。51年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年4月東京大学助教授、生産技術研究所勤務、現在に至る。工学博士。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。平成元、2年度電気学会東京支部評議員。IEEE Senior Member。

河 村 達 雄 (正員)

昭和5年8月16日生。34年3月東京大学大学院数物系研究科博士課程修了。同年4月同大学生産技術研究所勤務、37年1月同助教授、44年4月同教授、平成3年4月芝浦工業大学教授、現在に至る。東京大学名誉教授。工学博士。電力工学、高電圧工学に関する研究に従事。46、48年および59年電気学会進歩賞、46年IEEE Power Engineering Society Prize Paper Award、51年度電気学会論文賞および電力賞を各受賞。43、44年度電気学会東京支部評議員、53、54年度編修理事、60、61年度副会長。電気設備学会会長。電子情報通信学会、応用物理学会、電気設備学会、IEEE Fellow、CIGRE 会員。