雷研究の動向と近い将来への期待

名誉員 上之園 親 佐 (京都大学名誉教授)

1. はしがき

「雷」という思い出すのは、夏の夜、生駒山頂を縦走する送電線への落雷の壮絶さが暗夜の中に見事に描き出す情景である。そのつぎに思うことは、あの落雷で、停電が起ころなかつただろうか、生物は無事であつたろうか、ということである。

雷は大気中に発生する自然現象であることは、周知のことである。この分野は、かつては、日々の天気の変化、主として時間的に変化する現象として扱う気象学、長年月にわたって平均した大気の統計的な性質を研究対象とする気候学で取扱ってきたが、近年は両者間の区別が次第になくなり、総合化して大気科学⁽¹⁾という学問に一本化して今日に至っている。この大気科学は地球物理の一つを占めるものであるが、これを日常扱っているのは気象庁であらう。

一方、電気事業は、架空送電線、屋外変電所、架空配電線など多数の屋外電力施設を所有しているために、雷の襲来によってこれら施設に落雷が発生して需要家への電力供給が断たれると、需要家は停電を受けることになる。このことを供給支障と称しているが、電力会社は供給支障を少なくすることに努力を払っている。そのため、電気事業は古くから雷に対しては極めて関心が高い。技術文明が発達したと思う今日でさえ、雷に対しては、外部の方からみれば異常と思われるほど関心を払っている。それは、屋外施設の事故原因は主として「雷」となるからである。特に、雷害事故件数が多いのは架空配電線である。

その他、無線アンテナや航空機、更には登山者やゴルフ場のプレーヤーが落雷を受けたことについては周知のことと思う。

そこで、雷の研究がどのように進んできたかにつ

いて概説し、今後の雷の研究の進め方について私見を述べて、皆様のご批判に供したい。

2. 雷研究の動向について

我が国における雷の研究に関する業績は、主に雷撃を受けた被害状況に関する調査報告であつたが、大正後期に入つて、先進諸国からの雷に関する研究の資料が導入されるようになって、人工雷発生装置による放電や進行波の研究が行なわれ、雷に関する研究が大学などで進められるようになった。

我が国の雷の研究が大きく成長するのに貢献したのは、日本学術振興会が第4(理学)および第10(電気)常置委員会の決議により、雷災防止を研究目標とする第9特別委員会を昭和14年10月に設置し、我が国の中央气象台、通信省電気試験所と電波管理局、文部省電波物理研究所、運輸省、商工省、名古屋大学、東京大学、九州大学、京都大学、北海道大学、東北大学、日本放送電(株)、関東配電(株)、日本放送協会、東京芝浦電気(株)、(株)日立製作所、三菱電機(株)、豊田理化学研究所などの協力のもとに、第1分科会(気象学的研究)、第2分科会(建造物に対するものの研究)、第3分科会(無線通信に対する研究)が設置された。更に昭和17年4月から航空機に対する雷撃防止の目的で第4分科会が設けられたが、この分科会は終戦とともに解消した。更に昭和21年3月から電波による雷雨観測の分科会が生まれ、また九州地区には全期間を通じて九州分会が設けられていた。この第9特別委員会は9か年にわたる雷観測と解析および雷雨に関する基礎的研究や観測および計測に必要な計測装置の開発を行ってきたが、これらをまとめて報告書を作成し、「雷の研究」⁽²⁾という表題で発表したのが昭和24年8月、これを図書として発行したのが昭和25年10月10日である。

この「雷の研究」の「序」に、日本学術振興会第9特別委員会委員長藤原咲平氏が述べておられる文章の中で、注目したいことが2箇所ある。その一つは次のとおりである。すなわち、

The Movements of the Study on the Thunder and it's Hopes in the Near Future. By Chikasa Uenosono(Kyoto University).

キーワード：雷災、雷害、事故率、雷撃電流、落雷、地上電界、雷観測、供給支障、雷サージ電圧、雷撃頻度、LLS、二重偏波ドップラレーダ

「雷災防止上是非知っておき度の雷雲内の電場、電気量、また落雷瞬間のその電撃点の電場の強さ、直撃波形電流の強さ、電気量等は何れも観測しにくいものである。気球に取り付けた測定装置が仲々雷雲の中にうまく這入って呉れない。また、こちらの計器を装置した所に旨く落雷すると云うことも極めて困難である。そのために雷雲中の観測も、直撃雷の電流の観測測定も全期間を通じて得られたのは各一回宛に過ぎない。只一回ではあるが、日本はもとより外国でもかつて得られたことのない記録であって、貴重なものであることは云うまでもない。吾等の方法を根気よく続けたならば、将来も同様な観測が数十数百回も得られよう。その時に至って始めて雷撃の詳細な性質を知ることが出来るのであろう。本委員会は臨時性のものであるから、最早この研究をこれ以上続行することは出来ないから観測は一応打ち切られるが、観測を日常業務とする官庁において、上記重要観測を定業化して続行することは極めて望ましいことである。」

いま一つは次のことである。すなわち、

「雷雨現象に関する現代の知識の概要は、本委員会委員の一人である中谷博士が、かつて著わされた岩波新書の『雷』⁽⁴⁾にある以上には大して進んでいない。然して本委員会の一々の業績はそれ等世界的知識を継ぐものであって、本要録本文によってその概要を知ることが出来る。」

私は、雷災防止第9特別委員会が設置されたことによって、雷放電に関する観測用装置の開発が進み、成果が上げられたと思っている。私の関心をひいた、開発された観測装置は以下のものである。

① 坂山大三・秋篠雄三：（豊田理化学研究所）の高速度回転カメラ

② 藤高周平教授、他によるそれぞれのブラウン管オシログラフの試作開発。

③ 本多侃士教授の回転形電界測定器

雷災防止第9特別委員会が閉会后、日本発送電(株)は、電気協同研究会に依託して発送電雷害防止委員会を発足させた。この委員会は昭和30年9月に閉会したので、この委員会の主旨を引き継いで、(財)電力中央研究所内に耐雷設計基準委員会を発足させた。その結果、昭和38年11月に配電線耐雷設計基準要綱、39年9月には発変電所耐雷設計基準要綱、更に43年7月に線路引込口用保護ギャップ設置要綱を、46年9月に送電線耐雷設計基準要綱を発表して、各基準要綱については作業が完了したので、それら要綱の内容をわかりやすくするために、送電線、発変電所および配電線の耐雷設計ガイドブックを51年3月に発表し、

各分科会は休会に入った。なお、上記の耐雷設計基準委員会と併行して進めていた雷害事故調査委員会は、56年11月に業務が一応終了したことに伴って閉会とした。

昭和61年9月に発足した「耐雷技術委員会」は、送電分科会、発変電分科会、耐電分科会、雷観測分科会の四つの分科会でそれぞれ作業を進めてきたが、平成3年3月で作業が終了する予定であり、目下その後の対応について検討中とのことである。

上述のような委員会形式による今日的、更には将来的な課題について勉強しておくことは重要であり、技術の進歩を促すうえにおいても大切なことである。特に、電力会社は自社の電力施設を雷の襲来から安価で効果的防護対策で守り、供給信頼の向上を図ることは事業体としての責務である。このことを忘却すること自体は市場の自由化を忘却したことにもつながるし、社会の発展のための一つの要件でもあると思っている。どうか、良いテーマのもとに電力会社の各層の方々が集って論議していただくようであって欲しいと願っている。

私は、昭和57年4月以降、(財)電力中央研究所泊江研究所にご厄介になることになった。そのためか、雷撃特性調査専門委員会（昭和58年10月～昭和61年9月）の委員として参加して欲しいということであり、勉強させていただくということで承諾したところ委員長ということで、サボれないことになり、勉強をさせていただいている。この委員会は、昭和63年8月に、委員会で3年間討議した内容をとりまとめ、「最近における雷研究の動向と問題点」と題して電気学会技術報告⁽⁴⁾（II部、第278号）として電気学会より出版されている。

この技術報告の内容を要約すると以下のとおりである。

(1) 昭和41年度から昭和57年度までの500kV送電線の雷事故統計として雷事故率(件/100km・年)を、2回線送電線、1回線送電線について絶縁方式別に述べている。また、昭和55年度から昭和59年度送電線雷事故統計として、187～500kV送電線の雷事故統計を事故率、事故様相、154kV以下の送電線の雷事故統計および再閉路実績、送電線雷事故と供給支障についての考察、今後の課題について述べている。ここで注目されることは、全送電線の供給支障に対する一次原因としての雷は約50%の高率を占めているため、雷事故実態を詳細に把握することが送電線耐雷設計法を評価することにつながり、線路設計面、再閉路面、系統運用面での各種の耐雷対策を生み出すこと

になると述べていることである。

(2) 雷観測の現状

(2.1) 我が国における雷観測

ここでは、雷現象解明のための雷観測、系統運用のための雷観測、各観測機関の雷観測手段および雷観測装置の設置場所について述べている。

(2.1.1) 雷観測装置

(2.2) ロケット誘雷による雷観測

(2.3) 諸外国における雷観測

我が国の雷観測では、①雷撃電流測定は精度の高いものが採用されている、②その他も大体同様である、③近年はLLP社製のLLS (Lighting Location System) が多く使用されているほか、ASC社製のLPATS (Lighting Positioning and Tracking System) も使用されていて、落雷位置標定に関心が集まっている、④我が国では、系統運用のための雷観測として気象レーダが使用されているが(使用台数は極めて少ない)、雷現象解明のための雷観測に気象レーダが使用されているのは、宇都宮大学、防衛庁(小松空港)である。昨年12月12日に千葉県茂原市周辺で発生した竜巻には驚かされたが、地球上の気候変動のために我が国の緯度あたりでも竜巻が発生する可能性があるとするれば、これに伴って雷も発生することもあるので、将来は対応策を検討し、勉強しておくことが肝要なことであろう。

雷放電、雷電荷などの研究では、ニューヨーク州立大学(Orvilleら)、フロリダ大学(Prof. Uman)、ニューメキシコ工業大学(Brook, Krehbielら)、アリゾナ大学(Krider)が中心となっていて、彼らは、人工衛星、ミサイル、航空機への雷害防止を目的とするNASA、NOAAとも協力して総合的な研究を進めている。また、アメリカでは、高建造物への落雷観測には、ケネディ宇宙センターのスペースシャトル発射台(地上高400フィート)を用いて行われ、これには、上記のProf. Uman, Prof. Kriderらも参加している。かかる状況であるアメリカは、大気中の電磁界観測では世界的に一步先を行っているといえる。

(3) 雷撃特性に関する現在の知見

この課題は委員会委員の方々を知りたいことであるので、会員の方において寄稿していただいた。以下それらを要約して述べる。

(3.1) 気象と雷雲の生成⁽⁵⁾

ここでは、雷雲の構造について、H. R. Bayers & R. R. Brahamによる雷雲のセル構造とそのライフサイクルをモデル化した図で示し、成熟期のセルの電荷分布、夏の成熟期のセル構造として、高橋先生(九州

大学)のモデルを示している。

次に、雷雲中の電荷分布や電荷生成機構について述べられている。

(3.2) リターンストローク⁽⁶⁾

ここでは、雷放電の最終段階になるリターンストロークについて、そのことの研究の必要性について述べ、リターンストロークの概要を述べた後、上向き正リーダとリターンストローク、上向き負リーダとリターンストロークに触れ、リターンストローク速度とその直径、リターンストロークの発生する電磁界について述べている。

(3.3) 雷に関する諸パラメータ⁽⁷⁾

はじめに、パラメータの必要性について述べ、主なパラメータとして、年間雷雨日数、雷撃電流波高値の頻度分布、雷撃電流波形の実測結果の表現上の問題および耐雷設計に使用する雷撃電流波形についてアメリカ電気学会で用いている波形上の違いからくる問題点などに触れている。

最後の章(第5章)では、雷観測に関する考察と課題のもとに、(3.4) 雷雲の観測について⁽⁸⁾、はじめに雷雲のもつ性質について概説し、雲の気象学的観測について、地上からのレーダによる観測として、気象用レーダ、ミリ波レーダ、ドップラレーダについて述べ、次は、レーウインゾンデによる観測、航空機からの観測、気象衛星による観測について記述し、従来から雲の電気的活動度の観測としては、雷放射電磁界測定による雷活動の観測、地上静電界多点測定による雷雲の観測、雷鳴多点測定による雷放電路の推定に触れ、今後の課題に触れている。

(3.5) 雷放電に伴う電磁界観測⁽⁹⁾

表記に関しては

- ① 電磁界観測の意義と期待する効果
- ② 雷雲の電荷分布と極性配置に関する観測
- ③ 冬季雷対地雷撃における前駆放電の性状把握に関する観測
- ④ 落雷位置の標定
- ⑤ 雷撃電流の磁界による推定
- ⑥ VHF電磁波による雷放電経路の観測

(3.6) 雷放電経路の光学的音響的観測⁽¹⁰⁾

- ① はじめに
- ② 光学的観測
- ③ 音響的観測

(3.7) 雷撃電流の観測⁽¹¹⁾

- ① はじめに
- ② 冬季雷の電流波形
- ③ 観測装置

次に、電気学会高電圧技術委員会の承認によって、上記の専門委員会に続いて、昭和62年1月から平成元年12月までの3か年の間「雷観測調査専門委員会」が開催されることになった。この委員会では、雷観測において視界の利かない風雨、風雪を伴う気象条件下で行っているため、かかる条件下でも雷観測を行うことができるため、レーダによる観測、雷放電に伴う電磁界計測による雷撃点の標定、精度の高い雷撃電流やがい間電圧の測定などに力を入れることにした。なお、ロケット誘雷による雷観測をも強力に進めたいと思っている。

当委員会は、ただいままとめが終了して、編集委員の各位によって最後の仕上げにかかっているため、近く発表されることと思う。お待たせして申し訳ない次第である。表題は、「最近の雷観測技術と今後の課題」である。

3. 今後の進め方への提案

上記の「雷観測調査専門委員会」が予定の終了時期に達したので終了させて、まとめにかかった。まとめの途中で、今後の雷研究の進め方について検討した結果、雷害は「社会の新たな進歩に対して新たな雷災をもたらしているため、社会の発展のためには、雷害対策を更に強力に進める必要があることが力説されている。従って、工学的雷観測調査専門委員会を設置することにした。高電圧技術委員会の承諾を得て、平成2年10月から委員会を発足させた。この委員会は、参加を希望する企業が多く、今回の参加企業数は50社である。委員会開催会場として35人以上を収容できる会場は少ないこと、会場の借用料には上限があるため、自ずから会場には制限されること、会場としては東京の環状線内であることが会員としては便利であるため、新宿にある工学院大学が空いた会議室を、心よく借用させていただきという事で、そのご好意によって、我々の委員会は大変助かっている。

「はしがき」で述べたように、電力会社などでは電力施設への雷害防止対策へ全力を注ぎ込んでいるので、電力施設に直接関連する事項、例えば雷撃電流に重点を置いていたので、雷放電の機構には、あまり重点を置くことは少なかったのではないかと思います。ところが、雷に関する科学技術が進歩するにつれて、雷放電の正体が明らかとなるにつれて、それへの対応は自然と生まれてくるものである。それは、近い将来には、雷放電の予測、更には予報も可能となり、やがては必要によっては大地放電を抑制することが可能になるかもしれない。そのためには、雷放電の機構につい

図1 LLSの概要説明図

- ・世界主要国の設置に引き続き、我が国でも昭和57年度から導入された落雷位置標定システムは、今、全国的に張りめぐらされている。
- ・年間雷雨日数 (IKL) に代わる落雷頻度マップや雷撃電流波高値累積頻度分布の作成など、全国ネットでの観測体制がとられて注目を浴びている。

図2 我が国で設置されている LLS の配置図の概要

て解明することが肝要である。

3.1 LLSについて

これは落雷位置をリアルタイムで標定する画期的な観測装置であり、図1に示すように複数の方向探知局 (DF; Direction Finder) と1台の位置解析器 (PA; Position Analyzer) から成り、半径200 km 地域内の落雷位置を標定、雷の電流と極性などを実時間で計測し、表示する。

LLSの機能は下記の通りである。

(1) 方向探知局 (DF) の役割 対地放電雷 (落雷) により発生する電磁界を、磁界成分については二つの直交した広帯域ループアンテナで検出し、電界成分は平行平板アンテナで検出する。これらアンテナで検出された落雷点の方位、雷の極性、雷信号の大きさ、および落雷の多重度のデータを通信回線にの

せ、PA に転送する。

(2) 位置解析器 (PA) の役割 DF から送られてきた信号により、三角法の原理で実際の落雷点の位置を計算し、併せて雷の極性、雷電流値、多重度を表示装置や記録装置などの付属装置にリアルタイムで送る。

(3) 表示装置の役割 PA から送られてきたデータを整理してわかりやすくディスプレイ (テレビ画面) にマップにして表示する。

(4) 記憶装置の役割 PA からのデータをディスクなどに記憶させて記憶ファイルよりデータ再生、解析を行うことができる。

LLS は、LLP 社で製造されているが、我が国では、(株)サンコーシャが LLP 社の代理店となっている。

なお、我が国の LLS の設置状態を図示したのが、図 2 である。

3.2 我が国における冬季雷観測の目的とそのシステムの概要

上述したように、電力技術者の雷観測は落雷から生ずる電力施設の雷災をなくし、電力供給支障が生じないことを目的として、雷撃電流、雷サージ電圧⁽¹²⁾、雷撃頻度、雷撃経路、地上ならびに空間の電磁界強度、襲来状況について、測定を行っている。これらの測定は、次第に自動計測に依存する方向に向かうと共に測定精度を高めているので、計測はシステム化されてきている。雷撃頻度の測定には、3.1 節の落雷位置標定システム (LLS) や、そのほか、我が国では、九州電力が使用している落雷位置測定追跡装置 (LPATS: Lightning Position and Tracking System) がある。

雷撃経路の測定には光学法、音響法⁽¹²⁾、放射電磁界法がある。光学法として雷撃現象自動撮影装置⁽¹³⁾は雷撃の進入角やその状況を直接把握するのに有効な方法として広く評価され、使用されている。この装置には、テレビ残像方式カメラ、多重雷用カメラ、簡易形ストリークカメラ、光学積分方式カメラがある。

3.3 二重偏波ドップラレーダによる雷観測

レーダ (RADAR, Radio Detecting And Ranging) は、電磁波を用いて物質の濃淡、物体を遠隔から検知すると共に、その場所までの距離を同時に測定する装置であり、分解能をよくするために、一般にマイクロ波が用いられている。

これまでの我が国におけるレーダの使用状況は次のとおりである。最初、一般気象観測用のレーダは、電波の発射と反射により雷雲の雲頂高度 (エコー頂) と水

結高度の平均値でのレーダエコー強度から判断していた。これは、雷雲がより高く発達するほど雷が起こりやすいこと、氷結高度でのエコー強度が強いほど雷発生のもととなる電荷が生成しやすいことからである。しかし、同じ高さまで雲が発達しても、エコーだけで雷雲かどうか判断することはできないこと、氷結高度も雲により様々に変化するので、正確ではない。従って、エコーだけで雷の予測は確実なものとはならない。

ドップラ効果を利用したドップラレーダとドップラ効果を利用し、更に二重偏波機能を付加した二重偏波ドップラレーダとでは雷観測・警報用レーダとしていづれが性能が優れているかについて考案する。すなわち、雲内に雷が発生するには、そのために必要な量の電荷が雲内に生成されなければならない。電荷が生成されるための正確な機構はまだ明らかになっていないが、雷を発生させる雲の特性については、これまでの観測や基礎的研究によって多くの事項が知られてきた。主な特性に関する事項として次のものがある。すなわち、

(1) 雲内の氷結層は、電荷の発生に大きく関係し、雷を発生させる雲は、ほとんどが氷結層を越えるほどの高さに発達していく。

(2) 氷晶と過冷却水滴とが共存する層は、電荷の生成に大きく関係している。この状態は、雲の中に活発な上昇気流 (1~10 m/s) があって、対流性の雲が成長している。このような雲は、あられやひょうのような氷晶粒子を作る。

(3) 雷が発生する気象状態では、しばしば激しい降雨がみられる。

(4) Illingworth と Geophys 両氏は、雲物理学的研究からあられと氷晶の衝突で、あられは負に、氷晶は正に帯電することを明らかにしている⁽¹⁴⁾。また、高橋氏は気温 -10°C 以上では帯電の極性が反転し、あられが正に、氷晶が負に帯電することを見だし、これらの結果に基づき数値計算を行って、雷雲の観測結果と合致するモデルを導いている⁽¹⁵⁾。

上記の特性のうち (1)、(2)、(3) の特性は、二重導波ドップラレーダによって検知することができる。このレーダのソフトウェアを IRIS⁽¹⁶⁾ (Interactive Radar Information System) と呼んでいる。この IRIS は更に 3.1 節の LLS との相関も考えられた構造のソフトウェアであるので、レーダ雷画面上に LLS のデータを併せて表示できる。

更に、IRIS は⁽¹⁶⁾、研究を目的とした各種の解析データの表示が可能であり、操作者の設定により現在の

データや記録されている過去のデータについて、より専門的な解析処理をいつでも行うことができる。また、直接または通信回線を通じて、他のコンピュータに接続できるので、データ記録と並行してより高度な解析処理を行うことも可能である。

上述の IRIS は、C バンド(波長 5.4 cm)二重偏波ドップラレーダに、雷の危険予測のための特別のアルゴリズムを組み込んだソフトウェアおよびコンピュータを含んでいる。このレーダ本体は、レドーム、空中線装置、空中線制御装置、偏波切換器、送信装置、受信装置、レーダ画像処理装置から構成されている。制御やデータ処理用のコンピュータは、DEC 社のマイクロ VAX 3400、カラー操作表示装置、操作端末装置、カラープリンタから構成されている。

4. む す び

我が国における雷の研究が本格的に進められたのは、日本学術振興会が昭和 14 年 10 月に雷災防止を研究の志目標とする第 9 特別委員会を発足させ、約 9 年間にわたる研究成果を「雷の研究」の報告書にまとめて、昭和 24 年 8 月に当該委員会を閉会した。この特別委員会の主旨を体して、日本放送電(株)は放送電雷害防止委員会を設置し、その終了後、(財)電力中央研究所は耐雷設計基準委員会を設置し、今日に至っている。また、電気学会においても近年高電圧委員会に「雷に関する専門委員会」を 3 年ごとの期間で開催しているが、極めて盛会である。

近い将来への期待としては、雷害事故の軽減のためには測定精度を上げることと、電波の利用による雷観測の充実のために、雷撃地点の標定と雷撃電流の測定精度の向上、および二重偏波ドップラレーダなどの雷観測の精度を向上させると共に、更に新しい観測手法を開発して、雲内における電荷生成の機構を把握し、その次には雲内の放電を自由に制御しうる手法を開発していただきたいと願っている。

(平成 2 年 12 月 22 日受付)

- (1) 小倉義光：一般気象学(昭 60-6) 東京大学出版会
- (2) 日本学術振興会雷災防止第 9 特別委員会編：雷の研究(昭 25-10) 電気書院
- (3) 中谷宇吉郎：雷(昭 14-9) 岩波新書(赤版)
- (4) 雷撃特性調査専門委員会編：「最近における雷研究の動向と問題点」, 電気学会技術報告, II 部, No. 278(昭 63-8)
- (5) 北川信一郎：「気象と雷雲の生成」, 同上, II 部, No. 278, 60(昭 63-8)
- (6) 井上敦之：「リターンストローク」, 同上, p.62(昭 63-8)
- (7) 村野 稔：「雷に関する諸パラメータ」, 同上, p.65(昭 63-8)
- (8) 後藤幸弘：同上, p.65(昭 63-8)
- (9) 木下仁志：同上, p.71(昭 63-10)
- (10) 堀井・井上：同上, p.74(昭 63-10)
- (11) 後藤・井上：同上, p.75(昭 63-10)
- (12) 上之園 監修：雷 その被害と対策(昭 63-11)(株)教育社
- (13) 多田・藤波：「雷撃現象自動撮影装置の開発と観測結果」, 電学論 B, 104, 85(昭 59-2)
- 上之園 監修：「雷その被害と対策」, p.66(昭 63-11)
- (14) A. J. Illingworth: *J. Geophys. Res.*, 90, D 4, 6025(1985)
- (15) 高橋：「雷の電気」, 気象研究ノート, No. 154, p. 1(昭 61)
- (16) (株)サンコーシャ：雷観測・警報用ドップラレーダ(IRIS) [二重偏波方式]

[注]この資料は、(株)サンコーシャがアメリカの EEC 社(Enterprise Electronics Coporation)と 1986 年に技術開発協約を結び、開発を進めてきたレーダの資料である。

上之園 親 佐(正員)

大正 8 年 3 月 27 日生。昭和 18 年 9 月京都帝国大学工学部電気工学科卒業。同年 10 月満洲電業(株)入社。22 年 7 月東京商工局, 同年 12 月日本放送電(株)入社。電力再編成で(財)電力中央研究所技術研究所勤務。39 年 4 月同所電力第 2 部長兼塩原試験場長。42 年 1 月京都大学工学部教授。57 年 4 月京都大学名誉教授, 摂南大学教授, 現在に至る。その間電力系統の計画, 運用, 系統絶縁設計, 同期機の定常および動的特性, 高電圧工学などに関する研究に従事。工学博士。56 年 2 月日本学術会議会員(第 5 部)54 年度電気学会会長。31, 51 年電気学会論文賞, 37, 43 年同進歩賞, 39 年同電力賞, 56 年同功績賞, 平成元年同著作賞, 46 年科学技術庁長官賞受賞。