電磁界変化と UHF 放射からみたロケット誘雷

准員 金 尾 忠 (大 阪 大)
 正員 河 崎 善一郎 (大 阪 大)
 正員 松 浦 虔 士 (大 阪 大)
 正員 山 本 賢 司 (大 阪 大)
 正員 堀 井 憲 爾 (名 古 屋 大)
 正員 仲 野 賛 (豊 田 高 専)
 正員 中 村 光 一 (名 古 屋 工 大)
 正員 竹 内 利 雄 (愛 知 技 術 短 大)

On Electric Field Changes, Magnetic Field Changes and UHF Radiation
 due to Triggered Lightning by the Rocket

Tadashi Kanao, Associate Zen-Ichiro Kawasaki, Member, Kenji Matsuura, Member, Kenji Yamamoto, Member (Osaka University) Kenji Horii, Member (Nagoya University), Minoru Nakano, Member (Toyota College of Technology) Kohichi Nakamura, Member (Nagoya Institute of Technology), Tosio Takeuti, Member (Aichi College of Technology)

The electric field changes, the magnetic field changes, and UHF radiations were observed during the rocket-triggered lightning experiment using the 4 channels transient memory of its sampling frequency of 1 MHz. The sensors were a flat disk antenna, a loop antenna, and a disk corn antenna respectively. Concerning the initiation of the electric and magnetic field changes, a remarkable discrepancy between the rocket-triggered lightning to the tower and the one to the ground is noticed. That is, the former is initiated by a bipolar pulse of a large amplitude. On the other hand, the amplitude of the latter increases gradually. Preceding such kind of changes, UHF isolated pulses were also recorded. The statistics of the UHF isolated pulses are presented.

キーワード：ロケット誘雷，落雷電磁界，UHF 放射波，電界変化，冬季雷

1. はじめに

ロケット誘雷実験には、雷防護にとって重要なパラメータである雷撃電流を、直接に測定できるという利点のみならず、各種電気電子機器・避雷機器の試験が、実際の雷撃電流を用いて試行できるという利点もあり、国の内外で活発に行われ成果を挙げている。ところでこの種の実験において注目される雷パラメータは、上記の雷撃電流のほかに、雷撃進展速度、放電路形状、針端コロナ電流など、直接雷に関係するパラメータが多く、通常比較的近距离において測定される場合が多い。一方、雷撃電流とこれに伴う電磁界量は、理

論的にはマクスウェルの方程式で結ばれており、自然雷の場合同様雷パラメータとして、電磁界量は重要な間接的測定対象パラメータである、と考えることができる。加えてフランスの ONERA グループによる SAFIR⁽¹⁾ の成功に見られるように、UHF 放射波も、干渉計方式の放電点推定システム実現のため、注目すべき測定パラメータの一つである。すなわち、UHF 放射を利用すれば、放電進展の様子を高い空間および時間分解能で知ることができるのみならず⁽¹⁾、落雷開始直前の様子をいち早く知ることができる。従って、従来より広く行われている電磁界観測と UHF 放射の観測を組合すことにより、例えば電力系統への防雷対

策の手がかりを見いだし得る可能性が高い。

このような観点から、平成元年度ロケット誘雷実験（於：奥獅子吼高原）において、ロケット発射点より直線距離で 2.5 km 離れたいわゆるベース基地において、誘雷に伴う電磁界変化および UHF 放射強度を、スローアンテナ、ファーストアンテナ、ループアンテナおよびディスコーンアンテナを用いて測定した。本論文では、その観測結果を示しつつ、電磁界変化と UHF 放射の立場からロケット誘雷を議論することにする。

2. 観測システム

平成元年度ロケット誘雷実験において、使用した観測システムの概要を、センサ部と記録部に分けて説明する。

（1）地上電界変化の測定 雷放電の様相を把握するために電界変化を 2 台の円板アンテナを用いて測定した。円板アンテナとは地上数十 cm の位置に水平に置いた直径数十 cm の金属円板を静電アンテナとし、これに増幅器を組合せたもので 1 台は時定数 1 ms、周波数帯域が数百 Hz から 2 MHz のファーストアンテナで、落雷時の帰還雷撃に伴う速い電界変化を対象とする。もう 1 台は時定数 5 s、周波数帯域が 0.1 Hz から 1 kHz のスローアンテナで、雷放電前後の比較的緩やかな電界変化を対象とする⁽²⁾。

（2）磁界変化の測定 雷放電時の磁界変化を単一のループアンテナで測定した。このアンテナ出力は、後述する記録部（4 ch デジタルメモリー）のトリガ信号としても用いられている。

（3）UHF 放射の測定 絶縁破壊の初期に放射される UHF 帯電磁放射波をアンテナ利得 10.8 dB のディスコーンアンテナで受信、利得 30 dB の高周波広帯域アンプで増幅の後、中心周波数 327 MHz、帯域幅 300 kHz で包絡線検波を行った。なお、受信機としてはスペクトラムアナライザ（安立 MS-62）を使用した。このスペクトラムアナライザの S/N 比は -122 dB 以下であり、-100 ~ +20 dBm の範囲の入出力直線性は保証されている。UHF 帯電磁放射の受信にディスコーンアンテナ⁽⁴⁾を使用した理由は、（i）広帯域であるため、測定時に放送波などのバックグラウンドノイズの少ない周波数を選定するのに都合がよい、（ii）無指向性であるため、どの方向からの空電も受信できる、（iii）強電界下でも先端放電を起こさないなどの利点があるからである。

（4）記録部 ファーストアンテナ、スローアンテナ、ディスコーンアンテナの出力は、広いダイナミ

図 1 システム構成図

Fig. 1. A schematic of the system.

ックレンジを得るべく、1 ワードを 12 ビットで構成した 4 ch のデジタルメモリー（システム 1）により記録した。サンプリング周波数は 1 MHz で一時記憶部の総容量は各チャネル 64 k ワード、実質記録長は 64 ms である。また文献（5）に示す長時間波形記録装置による電界変化の測定も同時に行っている。詳しい説明は省くが、ここではシステム 2 として表されている。システムの構成図を図 1 に示す。

3. 電磁界変化とロケット誘雷

ロケット誘雷とは直径 0.2 mm のスチールワイヤを接続した長さ 20 cm 程度の小形ロケットを雷雲下で打上げると、ロケット上昇中にその先端に電界が集中し、そこから雷雲に向かってリーダが進展し、この前駆放電電流により誘雷を行う方法である。通常ロケット誘雷実験においては、各々地上誘雷、鉄塔誘雷と呼ばれる条件の異なる二種類の誘雷実験を行っている。地上誘雷とはロケットに接続されたワイヤを地上まで導いた誘雷方式である。一方、鉄塔誘雷方式はロケットでボビンを引上げ、まず地上 100 m まではナイロン糸が繰出され、更に 200 m スチールワイヤが繰出されるもので、地上 100 m までは絶縁されているため、誘雷によってワイヤの下端から自然雷と同様に下向きの放電を高さ 60 m の鉄塔へ進展させることが可能となる⁽³⁾⁽⁶⁾。

平成元年度ロケット誘雷実験は、石川県奥獅子吼山頂（標高 930 m）試験送電線、鉄塔を利用して平成元年 11 月 6 日から 12 月 5 日の間実施された。各ロケット誘雷実験番号と、今回の観測結果を表 1 にまとめる。ここに ○, ×, - の記号は各々、観測データが得られたこと、観測データが得られなかったこと、および

表 1 平成元年度ロケット誘雷実験観測結果
Table 1. The results of the measurement.

実験 番号	システム1				システム2
	UHF	FAST	SLOW	磁界	SLOW
89-04	○	○	○	○	○
89-05	○	○	○	○	○
89-06	○	○	○	○	○
89-07	○	○	○	○	○
89-08	○	○	○	○	○
89-09	○	○	○	○	×
89-10	○	○	○	○	○
89-11	○	○	○	○	○
89-12	○	-	-	○	×
89-14	○	-	-	○	○
89-16	○	-	-	○	○
89-18	○	-	-	○	○
89-19	×	×	×	×	×
89-20	×	×	×	×	×
89-21	×	×	×	×	○
89-22	○	-	-	○	○

観測を行わなかったことを示している。

また、具体的な観測波形を鉄塔誘雷と地上誘雷の場合について、それぞれ一例ずつ示す。ここに、各図中の E_z , B_ϕ はそれぞれ地上における垂直電界強度および鎖交磁束密度を示し、その強度は相対的である。

図2は実験番号89-07（鉄塔誘雷）に対応する電磁界波形である。(a), (b)図は各々電界変化, 磁界変化の全記録長64 msのうち、誘雷開始時に相当すると考えられる部分を拡大して512 μ s 分だけ表示したものである。更に(c)図は、長時間波形記録装置で得られたこの誘雷全体の電界変化を、262 ms 分表示したものである。一方、図3は実験番号89-11（地上誘雷）に対応する誘雷開始時に相当すると考えられる部分および誘雷全体の電磁界変化である。ここでは紙面の都合であえて示さないこととするが、他のすべての観測結果も図2、図3と類似しており、すべてのロ

(a) 89-07 (鉄塔誘雷) の電界変化
(a) An electric field change of the rocket-triggered lightning to the tower.

(b) 89-07 (鉄塔誘雷) の磁界変化
(b) A magnetic field change of the rocket-triggered lightning to the tower.

(c) 89-07 (鉄塔誘雷) 全体の電界変化
(c) An electric field change of the rocket-triggered lightning to the tower.

図 2
Fig. 2.

(a) 89-11 (地上誘雷) の電界変化
(a) An electric field change of the rocket-triggered lightning to the ground.

(b) 89-11 (地上誘雷) の磁界変化
(b) A magnetic field change of the rocket-triggered lightning to the ground.

(c) 89-11 (地上誘雷) 全体の電界変化
(c) An electric field change of the rocket-triggered lightning to the ground.

図 3
Fig. 3.

ケット誘雷の電磁界変化には自然雷の帰還雷撃に相当する速い変化が存在しない。更に、図のような比較的ゆっくりとした変化にインパルス状の波形が重畳している。多数のインパルスが重畳するという現象は、雷撃電流の直接測定で依田ら⁽⁷⁾の得ている結果と類似している。

次に、鉄塔誘雷および地上誘雷という誘雷方式の相違という観点から、双方の電磁界波形を比較する。図2(a), (b)のように鉄塔誘雷においては誘雷開始時と考えられる部分に比較的振幅の大きな両極性のパルスが見られる。これに対し、図3(a), (b)に示されているように、地上誘雷の誘雷開始時には鉄塔誘雷に見られる比較的振幅の大きな両極性のパルスが存在せず、インパルスの振幅が次第に大きくなっていく傾向を示す。このような両誘雷方式による電磁界波形の相違は、ここに示した例のみでなく、他のすべての観測結果に共通した現象である。

これまでのロケット誘雷実験観測結果から、鉄塔誘雷ではロケットとそれにつながれたワイヤが地上から絶縁されているため、ロケットの誘雷針とワイヤの下端から極性の異なるリーダがそれぞれ上、下方向に進展し誘雷に至るのに対し、地上誘雷ではロケットがワイヤによって接地されているので、リーダはロケットの誘雷針から上方向にのみ進展することがわかっている⁽⁸⁾。今回の測定結果に見られた、鉄塔および地上誘雷の誘雷開始時の電磁界波形の相違、大振幅両極性インパルスの存在は、上に述べたような両者の誘雷機構の差異によると考えられる。詳しい原因については現在検討中である。

4. 先行する UHF パルス

本章では、ロケット誘雷の電磁界変化と、それに伴う UHF 電磁放射の関係を議論する。

図4は実験番号 89-04 (鉄塔誘雷) の誘雷開始前後の磁界変化と、UHF 電磁放射の様子を示している。磁界波形にはその開始時に、前章で述べたように鉄塔誘雷特有の両極性のパルスが見られる。一方、UHF 電磁放射はこの図からもわかるように、放電開始時に相当する磁界変化の両極性パルスに先行しており、その様子は磁界の両極性パルス以前では孤立パルス状であるのに対し、両極性パルス以後は放射強度が急激に強まり放射状態もバースト状となっている。このような UHF 放射強度の急激な変化は、図5に示す自然雷の帰還雷撃前後の UHF 放射の様子と類似している。

自然雷の UHF 放射のバースト状の変化は、帰還雷撃電流が雲底に達した後、雲内を網目状に進展するこ

図4 89-04 (鉄塔誘雷) の磁界の両極性パルスに先行する UHF 孤立パルス

Fig. 4. The UHF isolated pulses preceding the magnetic field change of the rocket-triggered lightning to the tower.

図5 正極性自然落雷の電界変化と UHF 放射

Fig. 5. The electric field and UHF radiations of a positive natural lightning.

とによるものと考えられており⁽⁹⁾、ロケット誘雷に見られる UHF 放射の変化も、自然雷のそれと同じ原因に基づくものであるとすれば、図4に見られる UHF の孤立パルスは、ロケットから上向きに、あるいはワイヤ下端から下向きに進展するリーダによるものではないかと推察される。ここに、図4の孤立パルスの平均間隔は $27 \mu\text{s}$ 程度であり、ステップリーダ間隔の統計量 $29 \sim 52 \mu\text{s}$ ⁽¹⁰⁾ に近い値となっている。

また、実験番号 89-04, 07 (鉄塔誘雷) の UHF 孤立パルスについて、パルスの時間間隔の分布を図6に、そのパルス間隔の時間的な推移を図7に示す。図7におけるパルス番号とは、第一パルスから順に孤立パルスに対して付けた番号で、図7はパルスの時間間隔が時間の経過と共に次第に短くなることを示しており、これは自然落雷のステップリーダに見られる特徴⁽¹¹⁾と類似している。

これまで鉄塔誘雷の磁界変化と UHF 放射について説明してきたが、地上誘雷においても、多少の相違はあるものの同様の現象が観測されている。図8は実験

図 6 89-04, 07 (鉄塔誘雷) の UHF 孤立パルス間隔

Fig. 6. The time intervals between UHF isolated pulses.

図 7 89-04, 07 (鉄塔誘雷) の UHF 孤立パルス間隔の時間的推移

Fig. 7. The transition of time intervals between UHF isolated pulses with time.

図 8 89-11 (地上誘雷) の磁界変化に先行する UHF 孤立パルス

Fig. 8. The UHF isolated pulses preceding the magnetic field change of the rocket-triggered lightning to the ground.

番号89-11 (地上誘雷) の磁界変化とUHF電磁放射で、UHF放射には磁界の最初の変化に先行して孤立パルスが見られるが、孤立パルスからバースト状のパルスへの変化は鉄塔誘雷に見られるほど急激ではない。

表 2 ロケット誘雷の UHF 孤立パルスの統計
Table 2. The statistics of the UHF isolated pulses of the rocket triggered lightning.

	実験番号	パルス個数	パルス間隔の平均と標準偏差 (μs)	パルス継続時間 (μs)	極性
鉄塔誘雷	89-04	46	21.2 13.8	951	- (-)
	89-05	63	26.7 39.8	1695	(0)
	89-07	47	22.1 15.2	1036	(0)
	89-09	8	28.1 10.0	221	(+)
	89-10	10	29.2 34.5	197	(+)
	89-16	34	31.6 20.8	1075	- (+)
地上誘雷	89-06	13	41.5 61.8	557	- (-)
	89-11	17	22.1 13.3	385	- (-)
	89-14	2	312 -	312	(-)
	89-18	0	- -	-	+ (+)
	89-22	1	- -	53	- (-)

ここで、鉄塔および地上誘雷で観測された磁界変化に先行する UHF 孤立パルスについてパルス個数、パルス間隔、先行する時間間隔についての統計を表 2 に示す。この表中の極性の欄には、ロケット打上げ点で測定された雷撃電流の極性⁽¹²⁾と、ロケット打上げ時の針端コロナ電流の極性⁽¹³⁾を併せて表示し、両者の区別のために、針端コロナ電流の極性には、() を付記した。なお、雷撃電流の測定が行われなかった実験については針端コロナ電流の極性のみを記述し、(0) は地上電界強度が零に近い状態でロケットを打上げたことを意味している。更に、これらの極性は平成元年度の実験においては、必ずしも誘雷の極性そのものとは一致していない。この統計において、鉄塔誘雷についてそのパルス個数と表 2 の針端コロナ電流の極性とを比較してみると、実験番号 89-16 を除き、針端コロナ電流の極性が正の場合は他のものに比べパルス個数が少ない傾向がある。一方、地上誘雷においては、パルス個数と表 2 の極性の関係は鉄塔誘雷ほど明確となっていない。更に、パルス個数とロケット打上げから誘雷に至るまでの時間⁽¹³⁾を比較すると、鉄塔誘雷、地上誘雷ともに誘雷に至るまでの時間が長いものはパルス個数が多い傾向を示している。

5. 検討とむすび

平成元年度ロケット誘雷実験において、ロケット誘雷に伴う電磁界変化および UHF 電磁放射の観測を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 平成元年度、ロケット誘雷に伴う電界変化には、通常の自然落雷の帰還雷撃に相当する速い変化は認められないが、連続電流に伴う変化は存在する。

(2) 鉄塔誘雷の誘雷開始時と考えられる部分の電

磁界変化には、比較的振幅の大きな両極性パルスが存在するのに対し、地上誘雷にはこのパルスが存在しない。

(3) ロケット誘雷に伴う UHF 放射は、電磁界の最初の変化と考えられる波形より先行しており、特に鉄塔誘雷の場合、UHF 放射は電磁界の比較的振幅の大きな両極性パルスを境に、孤立パルスから振幅の大きなバースト状のパルスに変化する。

(4) UHF 放射に見られる孤立パルスの数は、ロケット発射から誘雷に至るまでの経過時間と相関があり、孤立パルスの時間間隔は自然雷のステップトリードと同様に、時間の経過と共に短くなる傾向がある。

ところで、今回の実験を通じて得られた上記特徴の物理的解釈は、今後の検討課題であるが、日本の冬季雷を理解するうえで大きく貢献する可能性がある。

すなわち、(1)の特徴は、文献(14)に示されているインドネシアにおけるロケット誘雷実験による電界変化に、帰還雷撃に相当する速い変化が認められる点において異なっている。これは、今回の実験が山岳地で行われており、平成元年度の誘雷実験では、実験場全体が帯電した雲の中に包み込まれるという状況に起因するものと推定される。実際、同年の誘雷のストル写真は、おおむね明りょうに撮影されていないことから判断できる。一方、実験場が山岳地帯であるという条件が類似のインドネシアのロケット誘雷実験では、帰還雷撃が明りょうに撮影されており、実験場が雷雲の雲底より下にあったことがわかる⁽¹⁴⁾。つまり、アメリカやインドネシアの実験は雲底の十分に高い通常の落雷に近い条件であるのに対し、今回の実験は、まさに雷雲内で行われており、誘雷の条件が雲間放電に類似しているためであると考えられる。また北陸地方山岳部に建設されている送電鉄塔が、冬季には雷雲内に含まれてしまう可能性が高く、その環境が本実験と同じであることより、第3章に示した比較的ゆっくりとした変化に多くのパルスが重畳しているという電磁界変化の測定結果は、負極性のリーダがロケット先端より雲内に向かって進展する現象と関連するものと考えられ、送電鉄塔から上向きリーダで開始する、いわゆる「トリガード雷」のメカニズムの理解に、役立つものと考えられる。

次に、(2)の原因の可能性として、電流の反射などを考えることもできるが、今回の実験のみでは断言することは難しい。ただ文献(15)に示されているように、著者らの電磁界変化の測定結果と中部電力の電流の直接測定結果とは、鉄塔誘雷の誘雷開始に相当すると考

えられる部分に、特徴的な振動性パルスが見られるという点において明らかに一致しており、今後直接測定できない送電鉄塔への落雷事故にも、著者らの観測法が適用できることを示唆している。

(3)、(4)については文献(1)のほかにも、文献(16)などにも、VHF 放射波が干渉計方式を用いて放電開始メカニズムの理解に利用されていることが示されているものの、国内ではこの種の研究は皆無であり、今回得られた結果を、今後の UHF ないし VHF による雷雲内測定の技術開発に役立てていきたい。

最後に地上誘雷と鉄塔誘雷の放電開始部分の顕著な差異は、著者らの知る限りかつて報告されたことがなく、今後実験を重ね理論的考察を遂行することにより、「放電開始機構」発見の糸口になるものと考えることができる。更に、それらに先行する UHF 孤立パルスは、短時間とはいえ落雷予知を可能にすることを示唆している。

本研究は文部省科学研究費（試験研究：63850055）の助成を受けていることを附記する。

（平成2年5月25日受付、同年12月25日再受付）

文 献

- (1) P. Richard & G. Auffray: VHF - UHF interferometric measurements application to lightning discharge mapping", *Radio Science*, **20**, 171 (1985)
- (2) 雷撃調査専門委員会: 「最近における雷研究の動向と問題点」, 電気学会技報(II部), No. 278, 41 (昭63)
- (3) 同上: 49 (昭63)
- (4) 無線工学ハンドブック編纂委員会: 無線工学ハンドブック, p. 17 (昭59) オーム社
- (5) 河崎, 他: 「落雷波形長時間記録装置の開発と観測結果」, 電学論 B, **111**, 521 (平3-5)
- (6) 和田・堀井: 「冬季ロケット誘雷実験データの検討(1977-1988)」, 電気学会放電高電圧合同研究, ED-89-135; HV-89-78 (1989)
- (7) 依田: 「ロケット誘雷電流の二測定領域同時記録」, 平2 電気学会全大, 1133
- (8) 角・池田・堀井: 「試験鉄塔への誘雷の流し写真観測」, 電気学会放電高電圧合同研究, ED-88-102; HV-88-63 (昭63)
- (9) P. Richard, et al.: "Results of spatial and temporal characterization of VHF-UHF radiation of lightning", *J. Geophys. Res.*, **90**, No. D1, 1248 (1986)
- (10) M. Uman: *The Lightning Discharge* p. 84, 1987, Academic Press
- (11) 同上, p. 84 (1987)
- (12) 和田: 「二段式ロケットによる鉄塔誘雷と空中雷電流測定」, 平2 電気学会全大, 1138
- (13) 堀井: 「平成元年度冬季ロケット誘雷実験」, 平2 同上, 1140
- (14) 堀井, 他: 「インドネシアにおけるロケット誘雷実験」, 電学論 B, **110**, 1068 (平2-12)
- (15) 葛城, 他: 「ロケット誘雷時の電流波形と磁界波形の関係」, 電気学会放電高電圧合同研究, ED-90-136; HV-90-23 (平2)
- (16) C. Rhodes, et al.: "Interferometric observations of a single stroke cloud-to-ground flash", *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 1169 (1989)

金 尾 忠 (准員)

昭和42年8月1日生。平成2年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。同年3月同大学院博士課程進学。雷放電物理に関する研究に従事。

堀 井 憲 爾 (正員)

昭和5年1月7日生。27年3月名古屋大学工学部卒業。同年4月工業技術院電気試験所勤務。46年4月名古屋大学工学部教授。現在、豊田高専校長。高電圧工学、放電現象、ロケット誘雷、超電導電力応用などの研究に従事。工学博士。

河 崎 善一郎 (正員)

昭和24年1月17日生。53年3月大阪大学大学院博士課程修了。工学博士。54年4月～平成元年7月名古屋大学空電研究所勤務。平成元年7月大阪大学講師、現在、同助教授。環境電磁工学、雷放電物理に関する研究に従事。

仲 野 賛 (正員)

昭和14年11月6日生。44年3月京都大学大学院博士課程修了。同5月名古屋大学空電研究所勤務。平成元年11月名古屋大学工学部助教授。平成2年4月豊田高専教授。雷放電物理、放電工学の研究に従事。理学博士。

松 浦 虔 士 (正員)

昭和13年1月1日生。37年3月大阪大学大学院修士課程修了。同4月住友電気工業(株)入社。52年1月大阪大学工学部助教授。63年3月同教授。電気エネルギーの発生・伝送・制御に関する研究に従事。工学博士。

中 村 光 一 (正員)

昭和41年3月名古屋工業大学電気工学科卒業。同年4月厚生省東海北陸地方医務局勤務。42年4月名古屋工業大学電気工学科助手。61年同大学助教授。主として、電力系統の安定度制御、自己同期法、電力ユニットの信頼度解析、ロケット誘雷実験に従事。工学博士。

山 本 賢 司 (正員)

昭和17年7月24日生。43年3月大阪工業大学電子工学科卒業。同年4月大阪大学工学部電気工学教室勤務。主として、送配電線路の耐雷設計に関する研究に従事。工学博士。

竹 内 利 雄 (正員)

昭和6年3月30日生。昭和28年3月名古屋大学理学部卒業。同年4月同大学空電研究所勤務。平成2年4月愛知技術短期大学教授。一貫して雷放電物理に関する研究に従事。理学博士。