

雷対策研究のシナリオ検討

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1993年1月

(株) テクノバ

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒708-06 岡山県苫田郡上齊原村1550

動力炉・核燃料開発事業団

人形峠事業所 (Ningyo Toge Works)

ウラン濃縮工場・技術課 (Engineering Section)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical
Evaluation and Patent Office Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan (注)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1993

雷対策研究のシナリオ検討

※

小奈勝也

要 旨

人形峠事業所では現在雷雲の発生状況を地上電界値の測定により行い、落雷の予測、防雷につながる基礎データの取得を行っている。これは新技術開発の一環として精密機器やソフトなどを雷のサージから保護することを狙いとしたものであり、今後の効果的な研究のために取得データの有効な整理、解析をはじめ研究シナリオの検討が課題となる。一方雷をエネルギーという観点からみれば単に雷を地中に逃がすだけでなく、積極的な利用（利雷）が考えられるが、これの可能性について検討することは意義がある。

検討の成果を要約すれば、はじめに人形峠事業所の雷研究のフィールドとしての評価を行った。その結果、夏、冬の観測地としては適当な実験地といえるものである。しかしながら、ロケット誘雷実験などによる積極的な研究を進める場合、安全上広さが不十分であると見られる。これはロケット以外の例えば電磁力利用装置を用いる場合も飛行体と誘雷用ワイヤの打ち上げを考えるならば同様の問題は避けられない。しかし現状検討段階の水誘雷やレーザ誘雷など新しい技術を適用出来るならば実験地の可能性はある。雷エネルギーは計算上は巨大なエネルギーとなるが、その直接利用については現状アイデア段階であり、実用化にはまだ遠いと言わねばならない。雷に伴う電磁界の生物への影響も情報整理から進める必要がある。

本報告書は、株式会社テクノバが動力炉・核燃料開発事業団人形峠事業所の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：04C1070

事業団担当者：音村圭一郎（環境資源開発部 環境資源開発課課長）

※：株式会社テクノバ取締役研究企画部長

目次

はじめに	
1. 人形峠事業所の雷対策研究	
1.1 雷対策研究へのアプローチ	1
1.2 研究フィールドとしての人形峠事業所の評価	4
1.3 雷対策研究の基本的考え方	
1.3.1 実験フィールドにおける、雷のパターンの把握	7
1.3.2 具体的な調査方法	7
2. 誘雷・消雷研究に向けて	
2.1 誘雷方法	
2.1.1 ロケット誘雷	11
2.1.2 ロケット以外の飛行体による誘雷	15
2.1.3 水誘雷	16
2.1.4 レーザー誘雷	16
2.2 誘雷研究の進め方	
2.2.1 襲雷予測の研究－3 定点による地上電界の測定	21
2.2.2 誘雷技術開発	21
2.2.3 誘雷による実験例－避雷設備の比較実験－	23
2.3 消雷技術について	25
3. 雷エネルギーについて	
3.1 雷エネルギーの評価	27
3.2 雷エネルギーの直接利用の途	28
3.3 まとめ	30
添付資料 雷エネルギーの環境利用について	32

はじめに

近年電子情報機器の飛躍的發展に伴い、これらの機器への突発性高電圧パルスによる被害が急速に広がってきた。

この理由のほとんどは、パーソナルコンピュータに代表される高性能チップ、I C、L S I、V L S Iなどの幾何級数的な性能の向上に対して、これらのチップの耐電圧マージン、耐ノイズ性能の向上が構造寸法等の制約もあり、遅々として追いつけないという現状があるからである。特に貴重なデータ（ソフト）の欠損、消滅は大規模K o m b i n a t や原子力関係施設、原子力発電所、核燃料処理施設、核融合研究施設等におけるコントロール・システムの暴走への危険性をはらんでいると考えねばならない。

被害をもたらす第一の要因は「サージ電圧」である。サージ電圧には「雷」の他に人為的な高電圧パルス、いわゆる「開閉サージ」があるがこれは実験において実規模のものを発生させることは、それほど困難ではなくその意味では対策の研究も進んでいる。

しかし「雷」については研究はされているとは言え、実験室規模では世界最大の設備でも自然雷の数十分の一程度に過ぎないのが実状である。即ちこと「雷」および「雷対策」の研究については、実験室では手の届かない場合が多く、自然雷を対象とせざるをえないのである。

近年、わが国はじめ、フランス、アメリカにおいてロケット誘雷実験が盛んに行われ、雷放電の物理に対する研究と共に、制御された雷を利用した雷撃実験により、送電線や電気設備などの被害の実態調査と、雷害対策の研究が進められている。

わが国のロケット誘雷実験は、北陸の冬季雷を対象として主に、電力施設の雷害防止の目的で実施されている。人形峠事業所は、冬季雷の研究に適した地点にあるが、ロケット誘雷実験を含む各種の雷研究を実施するための適用条件についてこれまで北陸地方で行われてきた研究実績を参考にしながら、以下に検討を加える。

1. 人形峠事業所の雷対策研究

1. 1 雷対策研究へのアプローチ

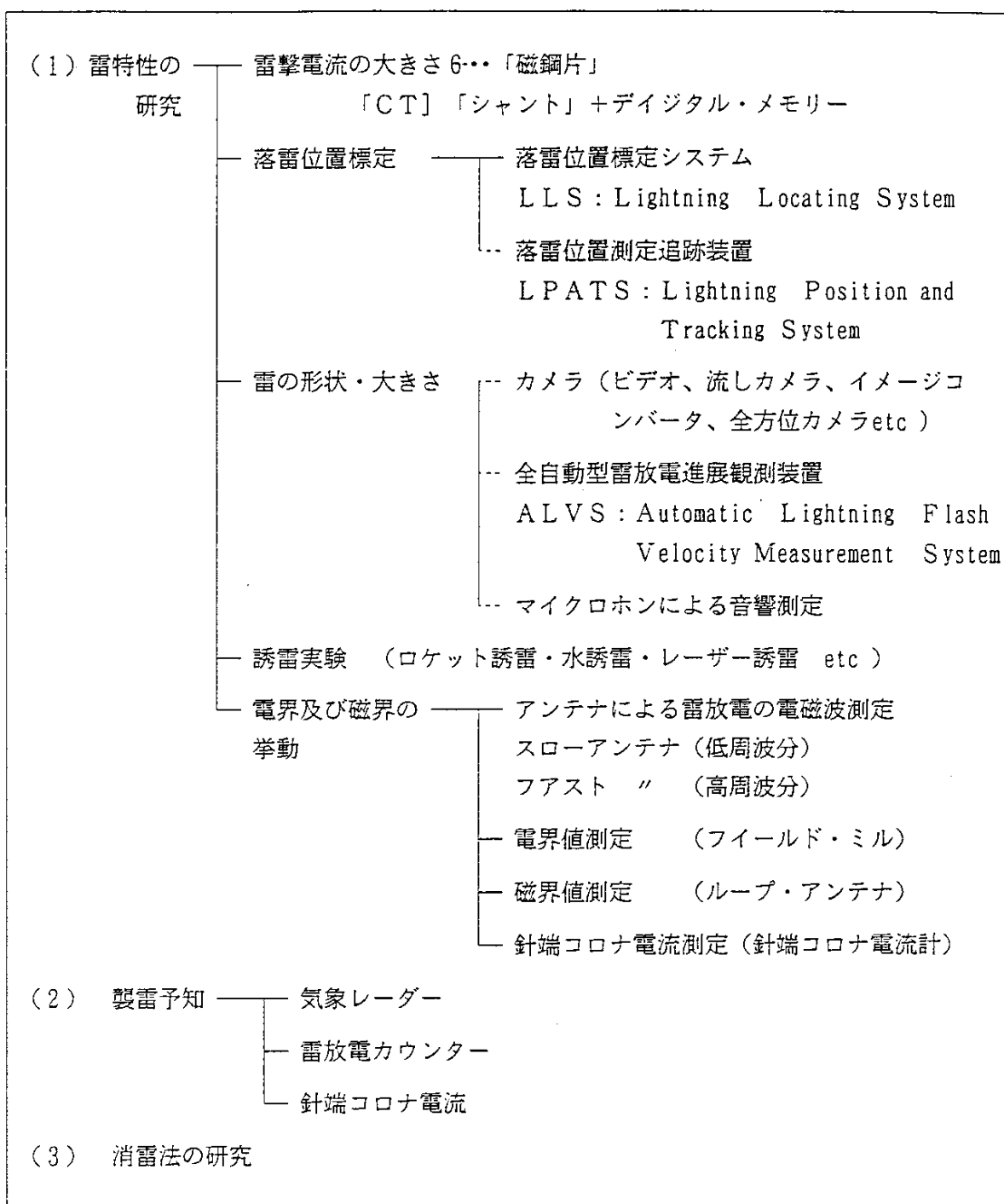
「雷」そのものの本質については、多くの科学者の研究成果が発表されているにもかかわらず、まだ不明の点が多い。現時点においてもその本質に関する研究、観測が世界的になされておりわが国では、大学、電力会社、電力中央研究所などにより大きなプロジェクトとして実施されている。例えば日本海沿岸、北陸の「奥獅子吼高原」において行われている、冬季雷のロケット誘雷実験もその一つである。

しかし「自然雷」を対象として、そのもたらす被害に対し組織的な研究が行われているプロジェクトは電力システムを対象とする研究以外は、現時点に於いては見られない。もちろん避雷針、避雷器、変圧器等についてはこれらのメーカーにおいて個々についてそれなりに研究され論じられているが、殆ど実験室におけるテストでフィールドで検証された例は一二に過ぎない。

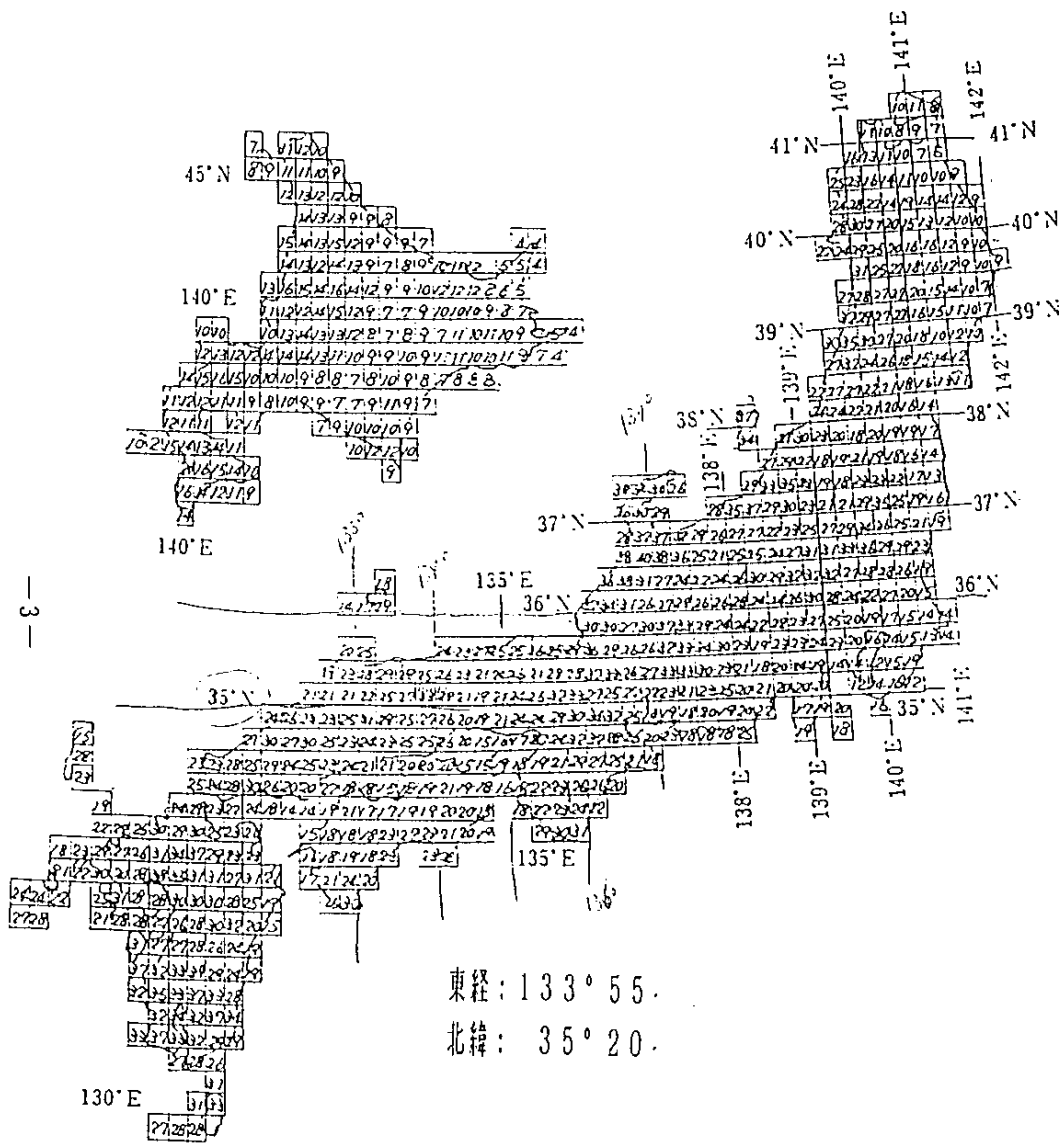
現在「雷」の研究－調査・観測－と言う見地から、大学・電力会社などで採用されているシステムを纏めると表・1（次頁）のようになる。

表・1のうち前述した大学・電力会社等で採用されている方法、即ちロケット誘雷実験やLLS, LPATSによる落雷位置標定等はいずれも大規模なものであり、また雷電流波形の観測に用いられるデジタル・オシログラフや放電進展観測装置なども分解能数ナノ・Sと言う超高性能のもので「学術的探究」や「電力安定供給」の目的の色彩が濃く、このたび当事業所で目指そうとしている、具体的な雷による電子情報機器への障害の把握・解析・対策等の研究からは離れたものと言うことが出来る。

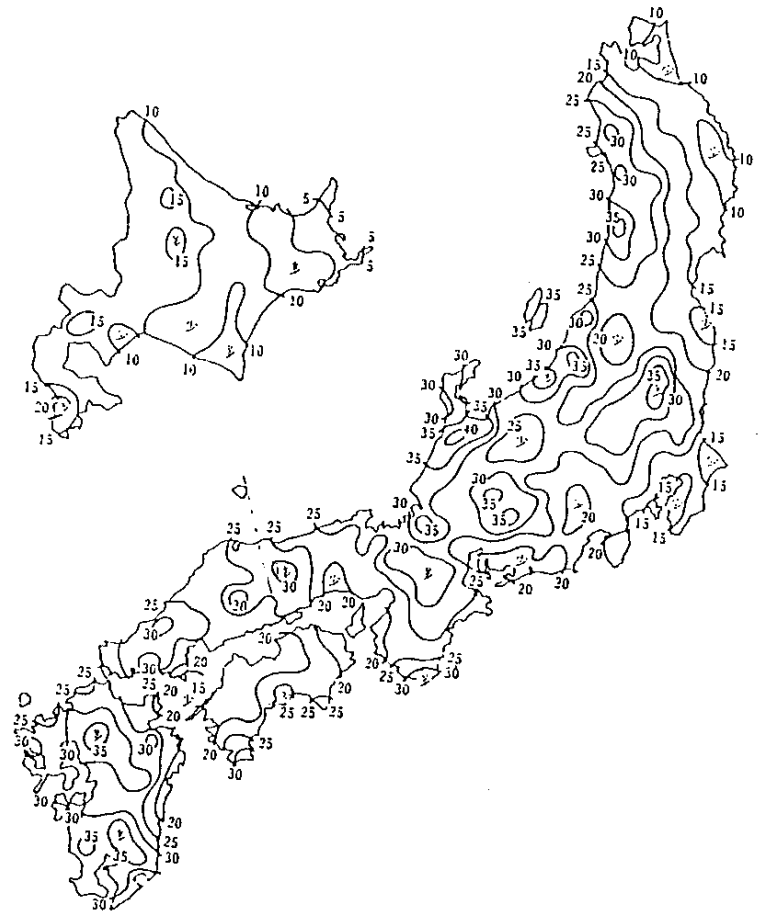
表・1 雷研究システム



又(3)の「消雷」については学界等において、外国(主として中国)の文献の紹介が1, 2散見される程度で、国内において取り上げているところはまだ無い様である。さらに「雷の利用」については、世界的に全く問題とされていないと言える。



年間雷雨日数分布図 (IKLます目) (10年平均)



年間雷雨日数分布図 (IKL等日数線) (10年平均)

注) 多: 周囲の等位線に示されたIKLより大きいIKLであることを示す。
少: 周囲の等位線に示されたIKLより小さいIKLであることを示す。

今回人形峠事業所で行おうとする雷対策の研究は、前述の学術的調査研究の成果を受け入れながら、主として電力使用場所に於ける対策、宇宙科学研究所、ロケット発射基地等を意識した、諸事業所の電子制御施設におけるハード面、およびソフト面の雷サージ対策の基礎、基盤となるシナリオを求めようとするものである。

1. 2 研究フィールドとしての人形峠事業所の評価

前述の北陸地方、奥獅子吼高原での誘雷実験は、この場所が雷の多発地帯であるとともに、冬季雷の特徴である雲底が低いことが大きな理由であると考えられる。さらに電力会社の休止送電鉄塔（送電線付き）があったこと、高原で見とうしがよくロケット誘雷実験等を行っても他へ危害を及ぼす恐れのないこと、などの好条件が揃って採用されたものと思われる。

ただし、この研究成果は電気学会、高電圧・放電研究会等において発表されているが、その内容は前述のように学術的な雷観測の結果等のレポートで占められ、その解析・応用については今後の課題となっているものが多いと言うのが現状である。

今回の人形峠における研究は雷の本質を追跡するのではなく、襲雷を予測すること、予測から誘雷を行いその「自然雷」による被害の観測、対策の試行と成果、とくに地上ばかりでなく地中に設置された電子機器への影響と対策も対象としたいので、他のフィールド実験（奥獅子吼高原の実験等）とは一線が画されるものと言える。

以上の観点から人形峠事業所の立地を考える。

(1) I・K・L（年間雷雨日数統計）

この事業地（東経：133°55′、北緯35°20′付近）のI・K・Lをみると、中国山地では最も多い33以上の区域に入っている。平地では大体15～20である。ちなみに奥獅子吼高原は35以上で更に多発地帯であるがこれは冬季雷がその殆どを占めている。夏期雷が多い群馬、栃木の山間部も35以上となっている。即ちI・K・Lから言ってみれば人形峠は雷実験の適地と考えられる。（次頁図参照）

(2) 襲雷頻度

人形峠事業所における襲雷頻度を後述の複合型襲雷警報器を用いて調査した結果を表2に示す。表中の第1注意報、第2注意報、落雷警報の内容は1. 3. 2を参照のこと。

7、8月に夏雷が多いが、それよりも12月から2月にかけての冬雷の方が多く発生している。冬雷は日本海の沿岸部を北上する対馬暖流にシベリアから吹き込む北西風が、水蒸気を多量に含む上昇気流を生じて、海上で発雷する。これが北西風によって時速40～60kmで上陸し、雲底は1000mm以下にも低下するので、上陸後は、送電線や山岳部に盛んに落雷する。上陸後は雷雲は弱まり、数十km内陸に入った山岳部で雷雲は消える。人形峠は海岸から16kmとやや内陸に入っているため、冬雷としては弱まっている可能性があるが、襲雷頻度の面からは年間を通じて適当な実験地といえる。

表2 平成4年度の襲雷日数

月	第1注意報の日数	第2注意報の日数	落雷警報の日数
5	7	2	4
6	4	2	1
7	6	4	4
8	8	1	3
11	4	0	0
12	14	2	0
1	14	6	2
2	15	8	6

注) 第1注意報の回数が5回未満の日は除く。

(3) 実験予定地の広さと場所

誘雷実験は、他に災害を及ぼすおそれのない場所を選び、安全上の十分な配慮が必要である。ロケットなどの打上物体は放物線を描いて落下するので500mほどの高さを考えると半径200mほどの立入り禁止域が必要である。又、誘雷時にワイヤーに沿わない異常放電が10%ほどの確率で起こり、半径500mほどの内に放電するおそれがある。更に、極めて稀ではあるが、誘雷放電により周囲1kmほどの内側に、別の雷放電が誘発さ

れる場合がある。これらのことから、誘雷実験の周囲1 km以内には送電線、通信アンテナその他の重要施設がない場所が望ましい。

人形峠事業所は、東西に約1.5 km、南北に約1 kmの敷地内の西半分には施設が配置されており、北から東へ境界に沿って66 kVの架空送電線が通っている。敷地の中央の南寄りにある旧鉱道の付近を実験地として想定する場合、安全距離は施設と送電線の両方に対して400 mほどしかとれない。安全のためには南側の境界外に広がる谷間の土地を借用する必要があるが、この場合は又、南側の国道に接近する恐れがある。

ロケットなどの飛行体を高度500 mほど打ち上げる場合は航空機に対する安全の注意が必要であり、空港管制部門との協議が必要である。事業所の北7 kmには大阪・米子間の定期航空路G-597ルートがあり、その両側5マイル(8 km)の空路幅があるので、この内部に事業所が入っている。又、誘雷した場合は、雷放電は周囲数km、上空数kmの範囲に及ぶので、航空機の飛行高度8000フィート(2.4 km)以上の範囲に危険が及ぶおそれがある。又、航空路以外を飛行する小型機に対しても注意が必要である。このため、予め空港管制部門を通して注意(ノータム)を関係方面に発すると共に実験の際には空港管制部門と協議し打ち上げ許可を得るなどの手続きが必要である。

(4) 雷撃が地下施設に及ぼす影響の調査

これは、後日の問題であるが、地表に落雷した雷電流は、接地電極を通過して地中に入り拡散すると言われている。

この時地下に設置された産業施設、坑道などの電子制御装置はどのような影響を受けるのか。また電流の拡散経路に深層にわたり空間(孔)があった場合、電磁的影響はどのようになるか。問題の提起はなされているのであるが、実験は非常に困難で文献等もなく現在までこの命題に取り組むべき何の手がかりも得られていない。

人形峠事業所に於いては、採鉱坑道における多くの技術の蓄積があり、これらの技術を応用することにより、もし地中に先端技術の実験設備を構築する機会があれば、前述の目的に沿う研究を進めることが出来る。

1・3 雷対策研究の基本的考え方

1・3・1 実験フィールドにおける、雷のパターンの把握

雷現象については全国大にわたって研究が進められているが、人形峠事業所が指向する研究は、前述のように先行者の成果を踏まえながら更に一步進んだものと考えられる。またフィールドに於ける実験を100%利用しようとするもの（実験室での実験は付帯的なものとする）であるから、まずこのフィールドにおける雷の傾向を把握する必要がある。雷そのものの性質については、優れた研究によりかなり明らかにされており、例えば襲雷頻度、雷のサージ波形（強度）等にも地域的特徴があることが発表されている。

このため当フィールドに於いても、まず当地方に襲来する雷のパターンを把握する必要がある。

1・3・2 具体的な調査方法

雷のパターンを知る方法としては、1・1 に述べたように多くの手法があるが、これらのうち電力会社や気象庁、防衛庁等で実施しているグローバルなものはあまり必要はなく、当フィールド一帯の状況が分かればよい。

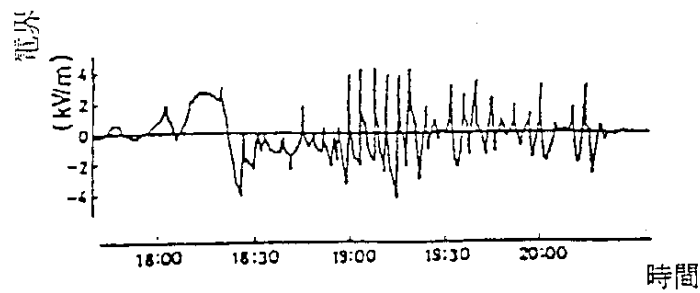
このためには表・1の中から適切なものとして

- 1 電界測定
- 2 針端コロナ電流測定
- 3 レーダーによる解析
- 4 雷放電カウンタ

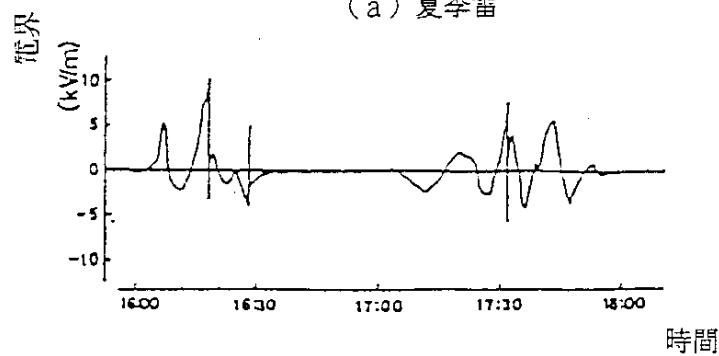
の方法が考えられる。

晴天時の地上の電界は100V/m程度であるが、雷雲下の地上電界は10kV/mを越えることも珍しくない。地上電界は図1に示すように夏季では落雷が頻発するのにつれてはげしく変化するのに対し、冬季では数分で正から負、負から正へと変換することが多く、落雷頻度も少ない。

電界測定は回転形電界形、いわゆるフィールドミルで行われるのが基本である。降雨中でも測定できる装置も開発されているが、冬季の降雪中、しかも夜間の凍結というきびしい



(a) 夏季雷



(b) 冬季雷

図1. 地上電界の変化、夏季と冬季の比較

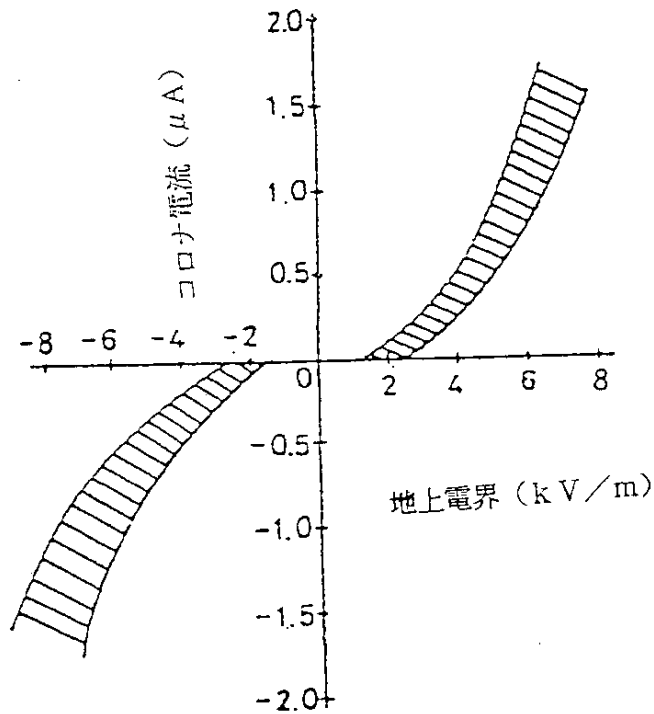


図2. 地上電界（フィールドミル）と針端コロナ電流の関係

環境下では故障が多い。これに対し、地上4～5mの高さに立てた針端コロナ電流から電界を推定する方法が、ロケット誘雷における襲雷警報器として利用されている。(1)

1 μ Aを超えれば誘雷の確率は高い。コロナ電流が風雨により影響を受けるとの説は誤りで、実験室での結果は、0.1 μ A以下の微弱なコロナ電流を除けば影響は小さい。地上のフィールドミルの電界値とコロナ電流との関係は、図2に示すようにある範囲に分散する曲線となるのは地上の草木の先などから発生するコロナ放電が作る空間電荷の電界遮蔽作用が状況により変化するためと推定される。現地観測によれば、2 kV/mを超えれば草木の先から0.1 μ A以上のコロナ放電が無数に発生し、このため地上50mほど上空までは空間電荷層におおわれており、この上空では地上の数倍にも達する強電界が観測される。

3のレーダについては広範囲の地域を調査するには適しているが、局地的なケースには適当とは思われない。また気象庁、電力会社等のデータを入手することも可能である。

以上のように具体的ないくつかの手法があるが、これを集約すると襲雷予測手法として、

- 1) 地上電界値の変化を、常時記録する。
- 2) 針端コロナ電流の大きさを捉える。
- 3) 針端コロナ電流の極性急反転を捉える。

の3点が効果的と考えられる。

これを具体化した機器として、中央防雷(株)の複合型襲雷警報器があげられる。(1)(2) 当人形峠事業所においても後記するように1組を設置し試用している。

「複合型襲雷警報器」の仕様の概要を転載すると

- a. 電界値の変化を捉えるセンサを持ち、しきい値を超える電界値の変化が、単位時間(1, 3, 5分間)以内に数回変化したとき「第1注意報」を発信する。
- b. コロナ電流採取用として、30本の針センサを持ちコロナ電流のしきい値(数 μ A～10数 μ A)を超過した時、上と同様「第1注意報」を発信する。

この2つは確率的に雷雲が30～50 km程度に接近したとき発信となっている、但しkmは目安的なものである。

c. a, b 2つの信号がANDとなったとき、即ち電界値の変化が設定数を超え、同時にコロナ電流が設定値を超えたとき「第2注意報」を発信する。

この時は雷雲が10～30 kmに近ずいた場合となっている。

d. コロナ電流の極性が反転したとき

「落雷警報」を発信する。

このときは確率的に雷雲が10 km以内に迫った場合となっている。

なお、ショーケー株式会社においても同様の針端コロナ電流による雷警報器を市販している。

この特性については電気学会論文誌に詳細な報告がある。(3) この装置は、襲雷警報器としてわが国初のロケット誘雷による研究の成果を基に開発されたものである。

2. 誘雷・消雷研究に向けて

2. 1 誘雷方法 (5)

誘雷方法の基本は、雷雲めがけて地上から、導電性の通路を作り、この先端から上向きに前駆放電（リーダ）を雷雲にむかって発進させ、雷放電を誘発させることである。現在では未だ実施されていないが、雷雲から降下する前駆放電を検出し、直ちに地上から導電性の通路を作り、この先端に雷放電を誘導する方法も考えられる。

導電性通路としては、ロケットにより金属性ワイヤを引き上げる方法（ロケット誘雷）、ロケット以外の飛行体、例えば電磁力打ち上げ物体や弾性力打ち上げ物体などにより金属性ワイヤを引き上げる方法（飛行物体誘雷）、高圧力で噴水流を吹き上げる方法（水誘雷）、レーザー光線により空気中に導電性のプラズマを作る方法（レーザー誘雷）などがある。ロケット誘雷については、わが国はじめ各国で実験が進められているが、その他の方法は研究乃至検討段階である。以下各方法について説明する。

2. 1. 1 ロケット誘雷 (6)

推力20～30kgで1～2秒燃焼する小型ロケットに金属ワイヤをつけて打ち上げる。ロケットは、わが国では船舶から救命索を発射する長さ17cmの金属製ロケットを利用している。図3にロケットの詳細を示す。ロケットは弾道を描いて落下するので、発射の角度を調整して安全圏へ落下させる。欧米では、長さ約80cmのプラスチック製胴体に、紙製の推進エンジンを装填したひょう害防止ロケットを利用している。弾頭にヨー化銀を混ぜた爆薬を詰めてあり、上空で爆発させて弾体を飛散させると同時に、ヨー化銀を雷雲中に散布して、ひょうが降る前に雨を降らせる。紙製エンジンなどの破片が落下するが危険は少ない。ただし、弾頭の爆薬が保管の際危険を伴う。

ロケットはほぼ直上に加速しながら秒速100mほどで上昇し、数秒後に弾道を描いて高度500mほどに上昇する。ワイヤはこの上昇時の引張り力に耐える高強度スチールで通称ピアノ線（直径約0.2mm）を使う。ワイヤにねじりを入れながら、ポビンにランダムに巻き付けて、ポビンの端から引き出すと、ねじりが戻って真っ直ぐになる。ピアノ線はホルマール皮膜絶縁が施されている。欧米では高強度プラスチックのケブラー糸に銅線を撚り込んだワイヤも使用されている。

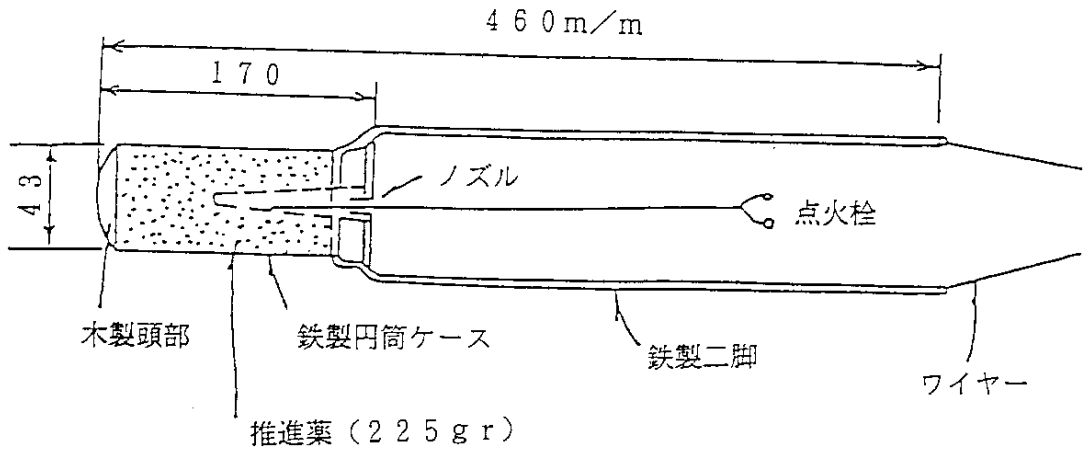


図3. わが国の誘雷ロケット (二脚を除く重量 625 gr)

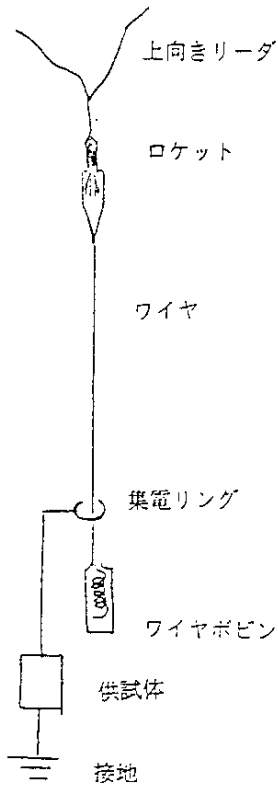


図4. 地上ボビンから集電リングを経て接地へ至る方法

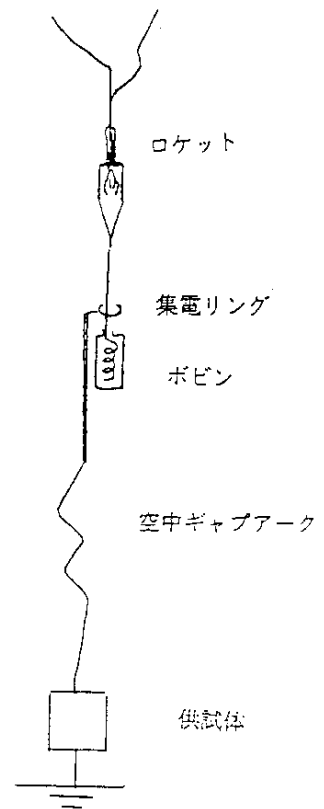


図5. 空中吊り下げボビンから集電リングを経空中ギャップ放電をさせる方法

地上のボビンからワイヤを引き上げる方法と、ロケットが吊り下げたボビンからワイヤを繰り出していく方法とがある。前者では地上のボビンまでワイヤを伝って雷電流が流れ込むので、図4に示すように途中で集電リングに電流を移し、接地導体へ流入させる。接地導体へ至る途中に供試体を挿入すれば、これに対する雷撃実験を行うこともできる。図5に示すように、ボビンを空中に置き、大地とのギャップに放電を発生させることも出来る。この方法で雷電流アークによる電線などの耐アーク、耐熱テストを行っている。

後者のボビンをロケットで吊り下げの方法では、図6に示すように地上からある長さをナイロンとかケブラーの絶縁系にし、その上を金属ワイヤにすれば、このワイヤの下端から大地へ長ギャップ放電をさせることができる。この方法で送電線鉄塔や大形ロケットモデルなどへの雷撃を誘発させることができる。

ロケット発射台は、長さ4 mほどのスチールアングル材で組み立てられる。ロケットの点火は、制御室から電位的に絶縁した状態で操作するため、プラスチック製のひもを引っ張ってロケット点火の電源スイッチを入れる。あるいは加圧空気をビニールパイプで送ってスイッチを入れる方法も行われる。無線で遠隔スイッチを入れる方法もあるが、故障とか雷撃時の電磁ノイズに弱い欠点がある。

ロケット発射のタイミングは、地上電界の強さから決められる。雷雲下の地上電界は容易に5 kV/mを超え、10 kV/mを超えることも珍しくない。5 kV/mを超えれば、誘雷成功の確率は高く、わが国の例では60%に達する。図7に示すように電界が高いほどロケットの上昇高度が低い点で誘雷し、20 mほどで誘雷することもある。誘雷の確率は、雷雲の電荷の正・負極性には余り左右されない。ただし、夏雷では負極性の雷雲が多いが、冬雷では正・負がほぼ半々の割合で発生する。1.3節で述べたようにロケットはこの地上付近に形成される空間電荷層を突き抜けて上昇したとき、地上の電界の数倍にも達する強電界により先端から上向きリーダ（前駆放電）が発進するものと考えられる。

上向きリーダは、正の雷雲下では $10^5 \sim 10^6$ m/s、負の雷雲下では $10^4 \sim 10^5$ m/sで上昇する。特に前者は数mのステップで上昇するのが特徴である。リーダは枝分かかれしながら広範囲に雷雲内を推進する。リーダ電流は正の雷雲下では1 kAを超えてステップ状進展に伴うパルスの繰り返し電流となり、負の雷雲下では10~100 Aの連続性電流となる。この電流のため、金属ワイヤは加熱され、爆発的に蒸発する。この蒸気プラズマ中を電流は流れ続け、リーダも前進を続けるが、やがて雷雲内電荷に達する頃に、

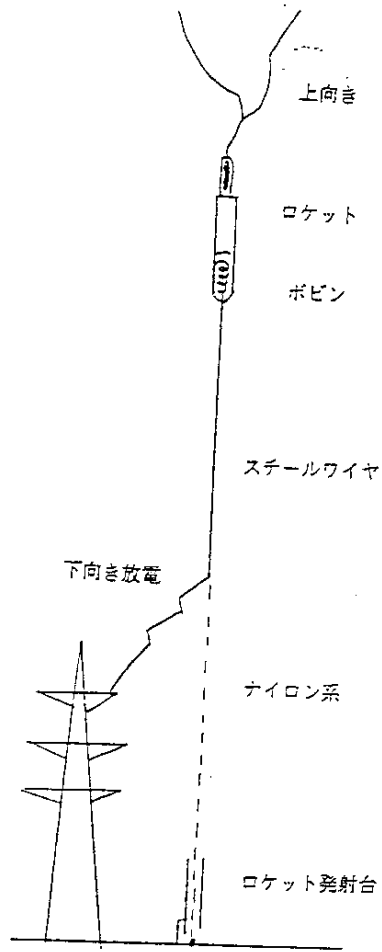


図6. ロケット吊り下げボビンからのナイロン・スチールワイヤによる長ギャップ放電方法

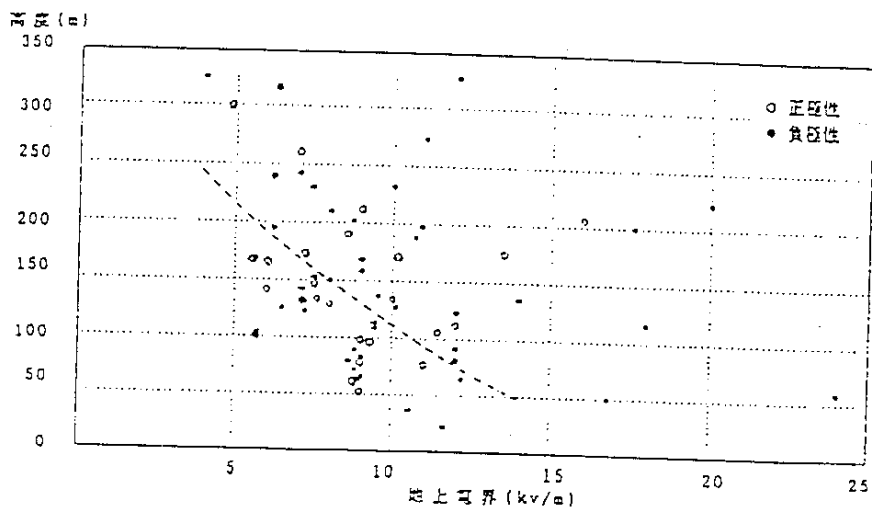


図7. ロケット発射時の地上電界と誘雷高度

大電流による雷放電が発生する。

ロケット誘雷はわが国では昭和52年冬からはじまり、冬雷を対象に昭和60年迄は石川県河北郡河北潟干拓地で実施され、昭和61年以降は石川県奥獅子吼山頂（標高約1000m）にて実施されており、現在までに130回余りの誘雷結果を納めている。(6) 夏雷は昭和52年から55年まで続けられたが成功しなかった。夏雷の襲来チャンスが少ないこと、雷雲が高くロケット高度が不足したことなどが原因と考えられる。平成元年からは、インドネシアのジャカルタ郊外のプンチャ峠（標高1400m）で、インドネシアとの共同実験が進められており、夏雷に対してこれまでに13回の誘雷に成功している。(7)

冬雷は夏雷に比して襲来頻度が高く、その上、日本海上空で発雷して西北西の風に乗って一定の速度で上陸して来るので、レーダにより襲来予測ができ、しかも雷雲の高度が1000mほどに低いので、ロケット誘雷には極めて適している。海岸からの最初の山脈である奥獅子吼の山頂は、雷雲の中に包まれる状態ともなる。

ロケット誘雷は火薬を使うが、小形で簡単な装置で強力な上昇飛行体を、悪天候下でも飛ばすことができる特長があるが、取扱いには細心の注意が必要である。特に火薬取締りの厳しいわが国ではロケットの消費・運搬・貯蔵などに法規上多くの制約があり、又打ち上げ時の航空機安全のための制約や周囲への立入り禁止など、実施上多くの問題がある。

ロケット自体は1個2～3万円で、ワイヤその他を含めても1回の費用は5万円以下であるが、実験準備、待機と片付け費用などを含めると1回の誘雷にかかる費用は、1シーズン10回ほどの誘雷回数で割れば数十万円に達する。しかし自然雷を観測する場合はチャンスが少なく、これに比べれば実験の効率はロケット誘雷がはるかに高いと言えよう。又、特定の点にしかもタイミングを計って落雷させることは、雷の研究のために極めて有効である。

2. 1. 2 ロケット以外の飛行体による誘雷

ロケットは小形で強力な飛行体であるが、火薬を使う点で取扱いに問題があり、ロケットに代わる飛行体の利用が望まれる。例えば電磁力を利用する方法や衝撃機械力、圧縮空気力、弾性体ひずみ力などの利用が考えられる。特にリニアモータ式の打上機による方法は、衝撃機械力に比して加速度が小さくできるのでワイヤの切断のおそれが少なく、又パラシュートによる回収をすれば再使用の可能性もある。飛行高度は500mほどで十分で

あり、荷重としては飛行体の自重の他にワイヤの引出し荷重と空気抵抗を考えればよい。圧縮空気力、弾性体ひずみ力では打ち上げ高度が不足し、かなり大形の装置となろう。

2. 1. 3 水誘雷

水は導電性があり、かつてアメリカ海軍が爆雷演習中に噴出した海水の頂部へ落雷したことがある。小規模の室内実験でも火花の誘導効果が認められている。噴水流は上空では水滴群に変化するので、連続した水流の状態を上空まで保持する技術が必要である。実験では未確認であるが、実際の雷雲下では水滴状態の集団でも、水滴を縫って放電が進展し、誘雷する可能性もある。

水誘雷は、圧縮空気を利用すれば、小形の装置で短時間の噴流水を100mほど形成でき、しかもワイヤなどの危険な落下物がなく、安全な誘雷方法として、変電所などの雷害防止には好適であると考えられる。変電所には汚損碍子の洗浄用に注水装置があるが、これを雷撃遮蔽のための噴水装置として利用することも考えられる。

2. 1. 4 レーザ誘雷(7)

誘雷に利用できる大出力レーザーには、ルビー、ガラスなどの固体レーザーと炭酸ガスやエキシマガスなどの気体レーザーがある。前者は棒状のルビーやガラスの両面を光学研磨し、側面からフラッシュランプで光照射により励起し、棒状体中を光が反復通過する反射共振器により波長 $1\mu\text{m}$ の強力な、赤外光ビームを発射する。瞬間的に反射共振器を構成して、いわゆるQスイッチにより光ピーク値GW、数Jの強力光パルスを発射できる。

炭酸ガスレーザーは、炭酸ガス・窒素・ヘリウムの混合ガス中でパルス性の火花放電を発生させたり、電子ビームを照射して炭酸ガスを励起し、光共振器でパルス状の波長 $10.6\mu\text{m}$ の赤外線ビームを発射する。光ピーク値GW級、エネルギーKJ級を発生させることが出来、その大出力を利用して、レーザー加工、レーザー加熱などに広く利用されている。

エキシマガスレーザーは、ヘリウム、クセノンなどの不活性ガスに塩素、フッ素ガスを混ぜて、気中放電により励起ガスを生成し、光共振器によりパルス状の紫外光ビームを発射する。エネルギーは大形の研究開発品もあるが一般に炭酸ガスレーザーより小さく、市販品では1J以下に過ぎないが、急峻でピーク値の高い強力ビームを発射できる。またkHz

の高繰り返しレーザも開発され、用途拡大を目指している。

指向性のよいレーザ光ビームをレンズや凹面鏡でゆるやかに集光すると、そのエネルギーによって空気が破壊され、プラズマ柱が光ビームに沿って形成される。炭酸ガスレーザの場合、 $10.6\ \mu\text{m}$ の赤外光線では直接空気分子を電離するに足る光子エネルギーはないので、空気中に浮遊する微少粒子（ゴミ）が光エネルギーで加熱され爆発的に蒸発し、プラズマ化すると見られる。光のエネルギー密度が $10^8\ \text{W}/\text{m}^2$ を超えると、ビームに沿って点々と数珠玉状に火球が連なって見える。火球はここに光が吸収されるため、その先へビームが届かない。誘雷のためには $100\ \text{m}$ 級の長いプラズマ柱が必要であるから、光ビームを分割し、焦点距離の異なる凹面鏡でプラズマ柱を分割生成して、これをつないで長くする。合成法として同心円状の多焦点凹面鏡とか、反射鏡で分割する方法がある。後者による実験例を図9に示す。ここでは、3つの分割ビームがZ字状にプラズマ柱を合成し、Z字状の放電が誘発されている。（図8）

数珠玉状に連なる火球プラズマ柱に棒状高圧電極から高電圧を追加すると、高電圧電極から出発する前駆放電（リーダ）が火玉を縫うようにビームに沿って進展し火花に至る。この現象は、ロケット誘雷実験において、前駆放電で金属ワイヤが蒸発してプラズマ柱が出来た後、これを通して更にリーダ放電と主放電（落雷放電）が起こると類似している。生成されたプラズマは、電子とイオンの再結合により時間と共に導電性は低下し、数msを経ては放電を誘導する効果はなくなる。したがって、発射のタイミングを選ぶ必要があり、特に雷雲から降下するリーダを捕らえて誘導するためにはタイミングが大切である。

エキシマガスレーザの場合は、波長 λ が短く、光子エネルギー hc/λ （ h はプランクの定数、 c は光速度）が高いので、炭酸ガスレーザの赤外線より2桁以上弱い光強度（ $10^6\ \text{W}/\text{m}^2$ ）でも空気を光電離し、光ビームに沿ってプラズマ柱を形成できる。このプラズマ柱は、炭酸ガスレーザの火玉プラズマより弱く、透明であり、極くゆるやかに光ビームを絞ることにより長い距離にわたり放電誘導に有効なプラズマ柱を形成できる。そのためのレーザ出力も炭酸ガスレーザより2桁程度少なくできる特徴がある。このプラズマもやはり数msの短時間で再結合により減衰するが、エキシマガスレーザは数kHzの高繰り返しパルス発射が可能であるから、 $1\ \text{ms}$ 以下の繰り返し発射による3プラズマの累積効果により、個々のパルスの出力を小さくして、装置の小型化をはかれる可能性もある。

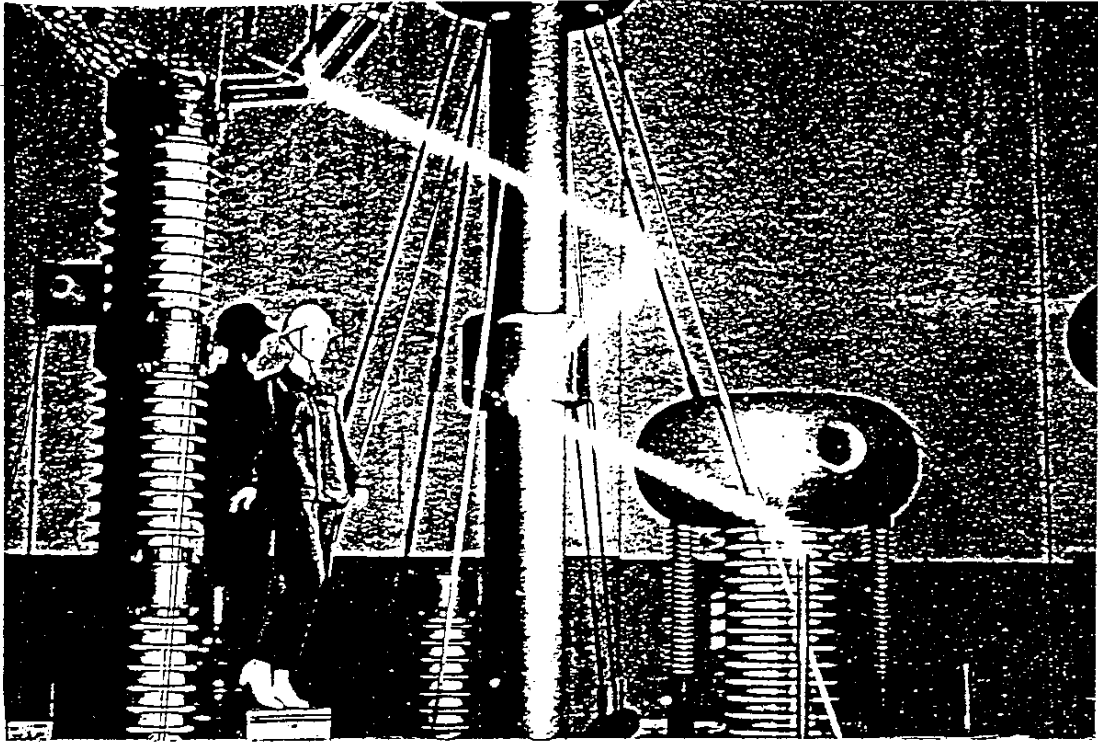


図8 レーザ誘雷のモデル実験（大阪大学、河崎善一郎助教授提供）

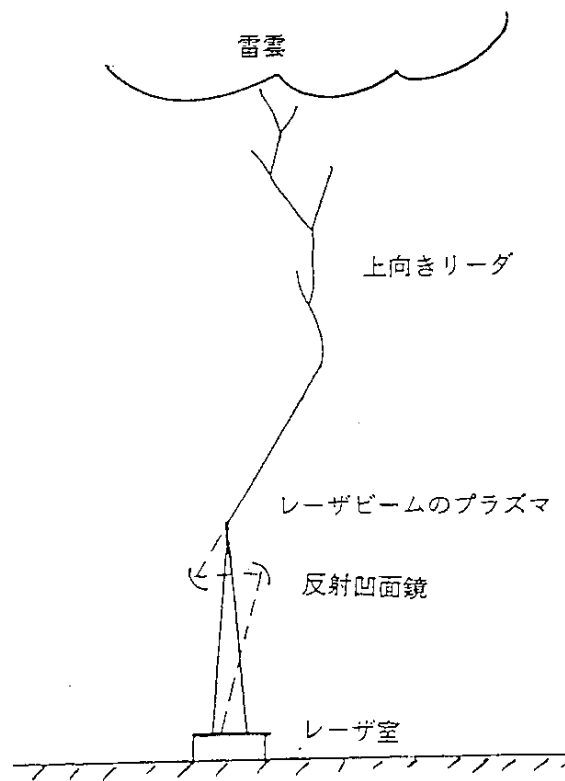


図9. レーザ誘雷の方法（上向きリーダを鉄塔に発進する方法）

以上の他に、空中にプラズマを作るために複数の光ビームを交叉させて、交点にプラズマを作り、これを複数個連結する方法や、炭酸ガスレーザーとエキシマガスレーザーを組み合わせ、その重畳効果を利用する方法なども検討されている。

実際の雷に適用する場合は、図9のように、鉄塔上空にプラズマ柱を形成し、これから上向きリーダを発進させて、ここへ誘雷させる方法が考えられる。冬季雷のように、鉄塔などから上向き自然雷が発生しやすい条件下では有効であろう。これによって、他の施設や装置への雷撃を防止できる。夏季雷のように雷雲が高く、上向き放電が発生しにくい場合は、図10に示すように雷雲から下向きリーダが接近したとき、鉄塔上あるいはその上空にプラズマ柱を形成して、ここへ雷放電を誘導する方法もある。これについては次節において更に検討する。レーザー装置は大形となるので、図11に示すように特定の点に設置し、ここから数kmの範囲を光ビームで誘雷塔に送る方式が考えられる。

レーザー誘雷の場合の問題点は、雨、雷などによる光ビームの減衰である。光は水微粒子によって散乱・吸収され、爆発的に蒸発してプラズマとなる。これが対策としては、別の連続発射ガスレーザーにより、水微粒子を加熱蒸発させて、ビームの通路を予め透明化する必要がある。又、レーザー装置自体は勿論、反射鏡などの光学系の耐雨、耐水対策も必要である。

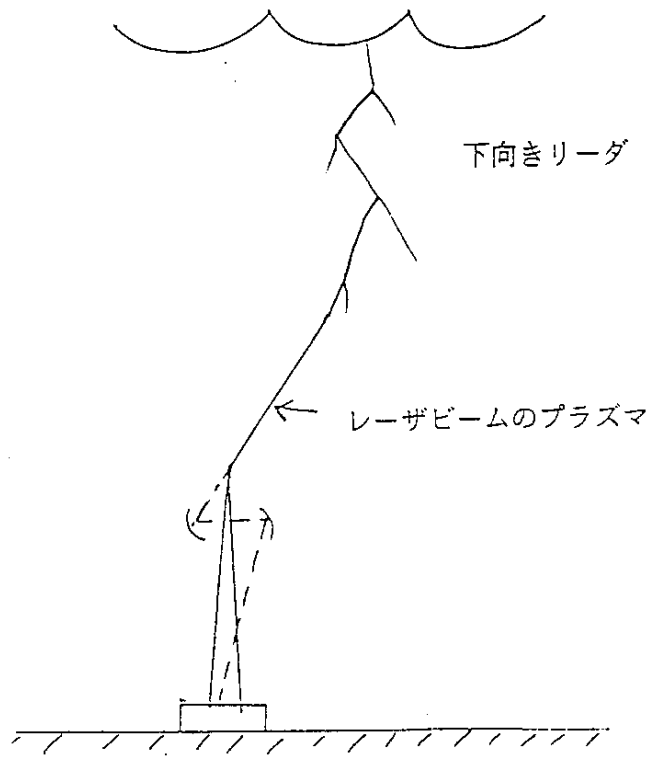


図10. レーザ誘雷の方法（下向きリーダを鉄塔から誘導する方法）

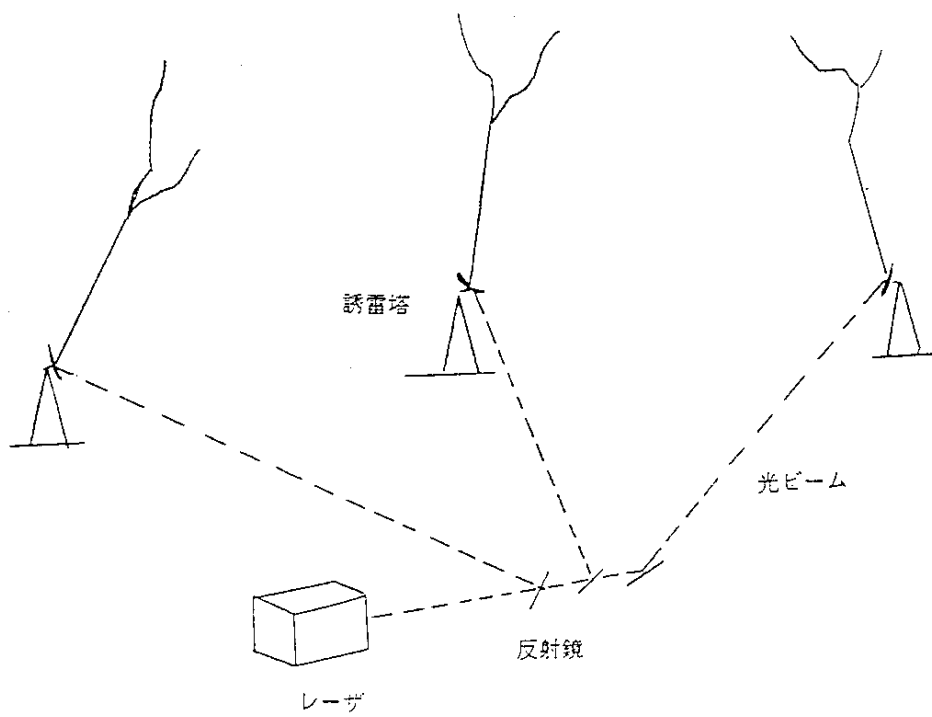


図11. 特定点のレーザーから光ビームを誘雷等にする方法

2・2 誘雷研究の進め方

2. 2. 1 襲雷予測の研究－3 定点による地上電界の測定

当事業所の立地は前述のように、平地に比し海拔が高く、雲底もそれだけ低い。また夏期雷も冬季雷も襲来するという好条件にあるが、誘雷実験にはそれなりの準備が必要であり、襲雷の予測が必要である。1時間以上前に襲雷を予測するには、レーダによる監視及びLST、LPATなどの落雷位置標定システムなどが有効であり、これらの設備をもつところとの情報交換が望ましい。更に雷雲の接近を事業所内で検知するために当事業所を正三角形の1頂点として、他の2頂点へも「複合型襲雷警報器」、「フィールドミル」、「コロナ電流記録計」等を設置し、データをリアルタイムで集め、それらの差異から雷雲の方向と速度を判定する。

各センサ間の連絡は、有線、無線、電話回線の利用などが考えられるが、これも研究のステップが進んだ段階で検討することとし、当面は3点の設定地点において各々独自に稼働させ、各々のデータの比較検討を行う。

2. 2. 2 誘雷技術開発

ロケット誘雷技術はほぼ完成しているが、火薬を使う点及び誘雷失敗時に金属ワイヤが落下する点で実用上問題がある。ロケットに代わる電磁式高速飛行体の打ち上げ誘雷方式や水誘雷方式の開発がこの点で期待される。

ワイヤについては、落下前に電流による加熱・燃焼ができれば、安全性向上に有効である。金属線として現在はピアノ線（特殊鋼線 $13 \Omega/m$ ）を用いているが、数100mのワイヤ燃焼には数Aの電流源として数10kVを要する。これに対し欧米で用いられているケブラー撚り銅線の場合は、抵抗値が2桁ほど低く低温で燃焼するので、地上の電池により往復撚り線を数100m燃焼することも容易である。ケブラーはそのまま落下するが、変電所内の電線路上に落下しても短絡事故には至らず、安全性はある。

打ち上げタイミングは、現在では地上電界とレーダの雷雲観測結果から決められているが、誘雷を確実にするためには、雷雲内電荷中心の観測・確認が望ましい。雷雲内の電荷中心、いわゆるセル付近では、落雷前に高周波パルスを伴う前駆放電の発生があり、これを高周波信号の方向探知器あるいは電波源標定装置で検出する技術が研究開発されている。(8)

電波の方向探知器は、直交コイルで電波の到来方向を検出し、2点から求めた方向の交点から発生源を標定するものである。落雷時の強力なパルス電波を検出し、落雷点を標定するシステム（Lightning Location System, LLS）は、既にわが国の電力会社によって全国規模の施設展開がされている。落雷前のリーダ放電からの微弱電波の検出は、100MHz級の高周波パルス信号の多点アンテナへの伝搬時間差から標定する技術が最近開発されており、これが落雷予知に発展する可能性がある。

雷雲中の電荷中心が検出されれば、ここに向かってロケットなどを打ち上げるが、更に進んでロケットにより図12のように雷雲内にワイヤを張りめぐらすことも考えられる。現在でも2段式ロケットで親ロケットからワイヤを引き出す子ロケットを打ち上げて、空中にワイヤを張り誘雷する実験に成功している。この技術によれば落雷が起こる前に雷雲内で正・負の電荷の間に放電を誘発させて、電荷を中和消滅させることもできよう。一種の消雷技術ともいえる。無人の高速飛行体を雷雲中に自在に飛行させることができれば、同様に消雷技術となり得るが、乱流の起こる雷雲内の無線操縦はむずかしく、多くの危険を伴うと見られる。

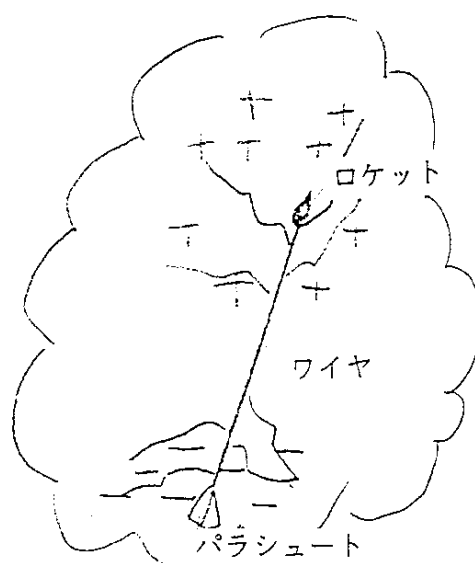


図12. 雷雲内にパラシュート付きワイヤをロケットで張り雲内放電を誘発する方法

ロケットあるいは高速飛行体誘雷方式では、ロケットや飛行体が落下する点で安全上問題がある。一方、水誘雷では打ち上げスピードの点で、即応性に問題がある。これに対しレーザー誘雷は即応性に秀でており、図10にて説明したように降下するリーダ（前駆放電）を迎撃するのに適している。

雷雲から降下するリーダは、 10^5 m/s オーダの高速で、数msで地上に到着し、地上から上向きのリーダと結合すると落雷放電となる。この降下リーダをいち早く検出し、鉄塔の先からレーザー光線により上向きリーダを発進させれば、ここへ誘雷させることができる。レーザーは発振用電源を充電さえしておけば、パルストリガーによって1ms以内に発射できる。このための降下するリーダの光学的あるいは電磁的検出器の制作は現在でも可能であり、又レーザー光ビームは瞬時にプラズマを形成する能力がある。これに比して、ロケットや高速飛行体では1ms以内の迎撃は難しい。また、レーザー誘雷では図13に示すように雷雲内にプラズマを自在に形成し、雷雲内で正・負の電荷間に中和放電を発生させることも可能であり、これにより究極の消雷技術を開発することも夢ではない。

2. 2. 3 誘雷による実験例－避雷設備の比較実験－

現在建築基準法に於いて、高さ20m超過の建築物には避雷針の設置が義務づけられている。そして具体的な避雷設備（避雷針とむねあげ導体）については、JIS-A-4201によって、その仕様が細部にわたって規定されている。又最近では新型の避雷針が研究されており、これらの効果を誘雷実験により確認するのは意義がある。

新型避雷針として例えば

- a. フランス圧電素子型避雷針
- b. オーストラリア. ボール型受雷部避雷針
- c. 中国式消雷針（次節参照）
- d. JIS型避雷針

などを一定の等間隔をおいて並立させ、中心位置に誘雷させ避雷機能を比較することが考えられる。避雷針に代わるむねあげ導体の導体感覚を現JIS通り、及び変更した設備を作成し、間隔の中心に誘雷させ、間隔の下限を求める。

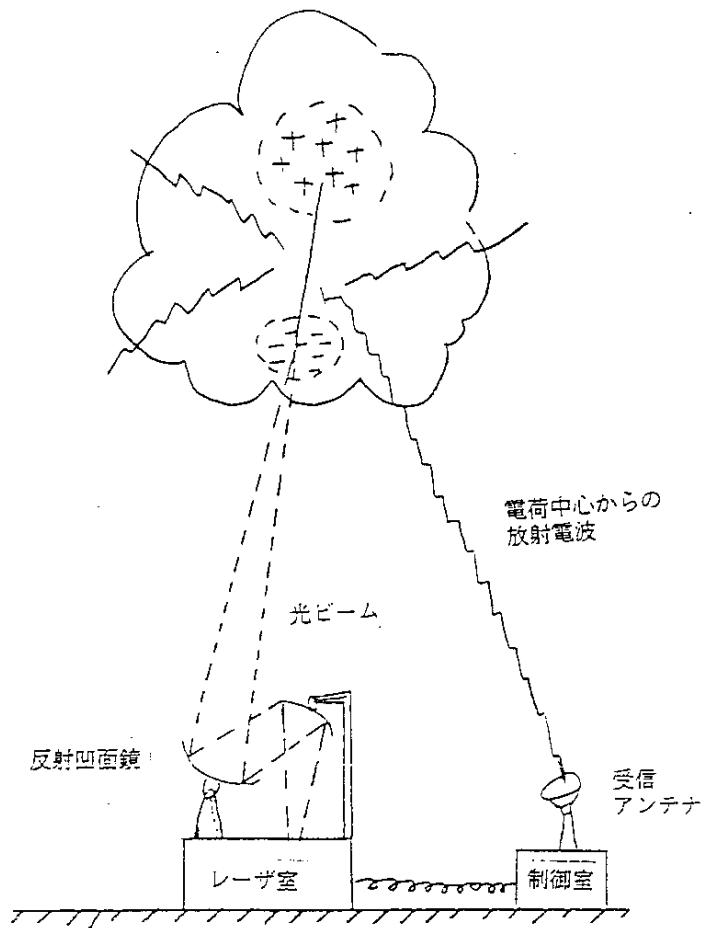
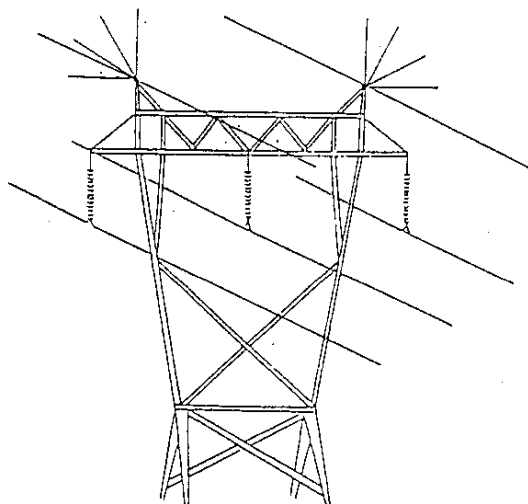
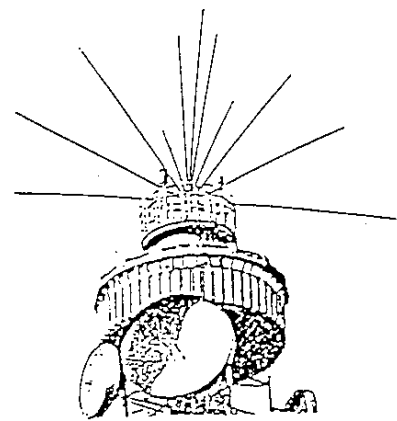


図13. レーザ誘雷による消雷システム
(雷雲の中で正・負電気の中和放電)



送電線铁塔



無線中継塔

図14. 中国式消雷針の適用例

2. 3 消雷技術について

前説において、雷雲内の正・負の電荷を中和放電により消雷する技術について触れた。ここでは、避雷針状の突針から発生する空間電荷により空間電荷を中和したり、雷撃を弱体化するという消雷技術の最近の研究について述べる。(5)

避雷針が発明された当初から、突針から放出されるイオンが雷雲電荷を中和し、雷を弱めたりあるいは消雷するという説があった。十数年程前にも米国において、この種の消雷装置が発明され、一部のわが国の施設に試用されたことがある。この装置は、高い塔頂などに有刺鉄線を張りめぐらして、針先からmAを超えるコロナ電流を発生させ、この空間電荷により雷撃を防止するというものであった。しかし、コロナ電流は予想ほど流れず、又電撃防止の効果も確認できず、その適用は立ち消えとなった。

最近中国において、新しい考えの消雷針が開発され、通信施設や送電線などに多く適用されている。(図14参照)この消雷針は、長さ5mほどの長い突針を、5本から10数本、塔頂に放射状に設置するものでmA級のコロナ電流を突針から空中に放出する。この突針は数十K Ω の抵抗体となっており、この電流制限効果(限流効果)により雷撃を防止し、雷撃を受けた場合もその損傷効果を減らすことを目指している。

わが国の冬季雷に対してこの消雷針を試験した結果、突針からのコロナ電流は1本の突針当たり50~300 μ Aで、十数体を放射状にすれば、雷雲下の強電界中で最大数mAが流れることが期待できる。しかし、ピークの持続時間は2~3分で、総電荷量としては1C以下と見られる。しかも雷雲下の強風により吹き流されるので、雷雲まで電界によって上昇し、数Cに及ぶ雷雲電荷を中和消滅させる効果はほとんど期待できない。

突針の周りの空間に放出される電荷がそこに滞留する場合、雷雲から降下するリーダがこの空間電荷層で中和され、リーダが途中で消滅する効果も考えられているが、放電写真などによるその確認は未だ行なわれていない。ただしロケット誘雷実験で、上空に滞留するとみられる空間電荷と雷雲との間に放電が発生し、大地には至らない一種の雲放電形式が起きることが、写真で観測されている。

突針がもつ数十k Ω の抵抗体は、突針から上向きに延びるリーダの発生を抑制する効果が考えられる。いま、地上電界Eによって高さHの塔頂の突針(接地電位)が周囲の空間に対してもつ電位差はEHとなり、この電界集中により上向きリーダが発生する。ここでリーダ電流jが流れると、突針抵抗RによってRjの電圧降下が起こり、これがEHと等

しくなると突針先端の電位は周囲の空間電位と等しくなり、電界集中は消えてリーダの進展は停止すると考えられる。リーダが維持される臨界電流 j_c は 20 A 程度とみられるので、 $E = 20 \text{ kV/m}$ 、 $H = 50 \text{ m}$ とすれば、 $R = 50 \text{ k}\Omega$ となる。

わが国で冬季雷に中国製品を試用した結果は、k A 級の雷撃があって抵抗体が焼損したため、雷撃防止効果は未確認である。わが国の冬季雷は鉄塔などから、上向きリーダが発生しやすく、このため抵抗体が損傷した可能性もある。室内実験によれば突針抵抗体は約 1 MV のインパルス電圧でフラシオーバして焼損するので、抵抗体の耐電圧性と耐熱性に問題がある。

突針に雷撃を受ければ、10 MV 級のインパルス電圧が印加されるので、突針はこれに耐えねばならない。もし抵抗体表面にフラシオーバがなければ、50 k Ω (実際の中国製は 36 k Ω) の抵抗があれば、 $10 \text{ MV} / 50 \text{ k}\Omega = 200 \text{ A}$ に電流が制限される可能性がある。前述のように、雷雲の電圧は 100 MV にも達するが、雷道における電圧降下を考えれば、突針に雷撃時の電圧は 10 MV 程度と考えられる。もし雷電流が 200 A 程度に限流されれば、雷道のプラズマ生成も不十分となり、その抵抗値も高くなり、発光、雷鳴も小さく弱体化した雷放電となることが予測される。その代わりに、雷雲電荷を中和するための放電持続時間は長引くが、雷雲内をすべて放電するに至らず放電電荷量も小さい値に収まることが考えられる。中国式消雷針の最大の効果は、このような雷放電の弱体化による雷害防止効果であろうと考えられる。

一方において、突針抵抗体には莫大な発熱量が予想される。いま 200 A が 10 ms 持続して 2 クーロンが 50 k Ω の抵抗体を通れると $2 \times 10^7 \text{ J}$ の発熱となる。雷放電のエネルギーがほとんどすべて抵抗体の中で熱に消費されることになる。1 ton 近い水が沸騰するカロリーである。この発熱に耐えるためには、1 ton ほどの水抵抗あるいは高温発熱に耐えるセラミック抵抗体が必要となる。技術的には制作可能と考えられるが、その効果の実証及び経済性も含めた現場適用性の検討が必要である。

3. 雷エネルギーについて

3. 1 雷エネルギーの評価

雷エネルギーは、雷雲内の巨大な上昇気流エネルギーによって、正・負極性電荷の分離が起こり雷雲内に蓄積されることによる。雷雲内では上昇気流によって、主に上層に正極性、下層に負極性の電荷が蓄積される。一回の雷放電によって中和される電荷は通常は数C以下であるが、冬季雷では特に正極性の放電では、時に1000Cを超える巨大電荷の雷雲も見られる。

この電荷が地上に及ぼす電界は10kV/mを超える。この強電界下で地上の草木などの突起物の先端からは、コロナ放電が発生し、雷雲の電荷と反対極性のイオンが放出され、電界で上昇して100m以下の低空に空間電荷層を形成する。この空間電荷層の逆電界のために地上の電界は10kV/mほどに抑えられるが、空間電荷層の上空では地上の数倍の強電界が発生している。

いま、30kV/mの電界が雷雲下の空間にあるとすれば、雷雲の高度を夏季で4km、冬季で1kmとすれば、雷雲の対地電圧Vはそれぞれ 1.2×10^8 V、及び 3×10^7 Vと見積もられる。これに雷雲の電荷Qとして夏季2C、冬季5Cを掛けて、1/2倍すれば、エネルギー($U = VQ/2$)は約 1×10^8 Jと見積もられる。実際の雷雲内には、電荷の中心がいくつかあり、又、対地エネルギーの他に雷雲内正・負電荷間のエネルギーもあるので、雷雲内に蓄積されているエネルギーはこの数倍はあるものと推定される。

さて、雷放電によってこのエネルギーが光・音(圧力波)および放電路の熱に変わり、その一部が雷撃点に破壊力及び熱エネルギーとなって作用する。このときの電力は、雷雲電圧Vと雷電流Iとから $P = VI$ で求められる。いまVとして 3×10^7 V、Iとして30kAとすれば、Pは、 10^{12} Wほどになる。10億キロワットといえば日本全体の発電電力を超えるが、これは瞬発力であって、 10^{-6} 秒でピークを過ぎて低下する。その半値減衰時間 5×10^{-5} 秒を掛ければ 5×10^7 Jとなり、前述の雷雲内エネルギーに相当する値となる。ただし、冬季の正極性雷に見られる1000Cに達する放電の場合は、10kAオーダの電流が10ms以上継続するので、この場合のエネルギーは 3×10^7 V \times 10kA \times 10ms $= 3 \times 10^9$ Jという巨大なエネルギーとなる。

雷放電は夏季の激しい雷の場合、10秒程の間隔で頻発し、1時間ほどの間に数百回の

雷放電が起こる。冬季雷では、発生頻度ははるかに少ないが、一発が巨大雷となることがある。いま 5×10^7 の雷放電が 10 秒間隔で発生すれば、時間平均して 5×10^6 W の発電能力があることになる。小形の水力発電所に匹敵する。

3. 2 雷エネルギーの直接利用の途

雷雲の内部で発電され、蓄積されているエネルギーは前述のようになんかの量ではあるが、これを雷放電の形で取り出すとすれば、その大部分は雷放電路、いわゆる雷道の内部で光・熱などの形で失われ、地上に達するエネルギーはほんの一部にすぎない。雷雲内のエネルギーをそっくり利用するためには、雷雲に達する導体を架ける必要がある。その一つの方法として、ロケットなどによりワイヤを雷雲まで到達させるならば可能であるが、ワイヤが初期電流により加熱蒸発すれば、そのプラズマ中を電流が流れる際やはりエネルギーの損失があり、地上に達するエネルギーは減少する。相当な太さ（直径数 mm）の銅線を引き上げるならば溶融は避けられようが、打ち上げの荷重は数 km の長さの線材で 1 ton ほどになり、かなり大形のロケットあるいは飛行体が必要となろう。それでもなお、上昇する飛行体の先から雷雲内部にむかって放電路が伸びて雷雲内の電荷を集めるのであるから、その部分でのエネルギー消費は避けられない。

さて、雷雲からワイヤを伝って鉄塔に流れた電流 I は、負荷、例えば抵抗体 R の中で電圧降下 $V = RI$ を生じ、それが VI の電力となり、 R に発熱を生じる。発熱としての利用以外にも、爆発力を利用することも考えられる。例えば水中放電による圧力波は、金属板の圧縮成形などに利用できる。ロケット誘雷では、砂を詰めた容器内に雷電流を流して、砂を加熱・溶融・爆発・圧縮によりガラス状の石（雷管石）を生成することに成功している。中心部が中空の直径 10 mm ほどのパイプ状で、自然雷の跡にも発見されることがある。ガス中の大電流放電によるプラズマピンチ作用で、核反応が起こる可能性があるとして、フランスではこれに類する研究もかつて行なわれた。

雷雲下の電界を利用して高電圧を発生させ、これを利用することも考えられる。高い鉄塔に対地絶縁した導体板を支持し、これに誘導される電圧と電荷を利用する。単純に計算すれば、地上 100 m の塔頂と大地間には 10 kV/m の電界下で 1 MV が発生し得る。雷雲下では静電誘導電荷によって電極の電位は大地電位と同じになるが、雷放電により電界が急変してゼロになった瞬間に、電極と大地間に高電圧が発生する。（図 15 参照）

雷エネルギーを平均電力として利用するのは、その値が1万キロワットに満たず、しかも発電時間がせいぜい1時間ほどで、しかも移動する点で技術的に難しいと考えられる。経済的にもとうてい引き合うとは考えられない。結局は上述のように、巨大な瞬発力の利用とか、インパルス性高電圧の利用とかに限られるであろう。ロケット誘雷では、実際の送電線や配電線、および避雷針や避雷器などの雷保護装置、あるいは変圧器、碍子や自動車などの供試体への雷撃テストを行なうのに利用している。実験室では困難な、実規模エネルギーのテストとして価値がある。

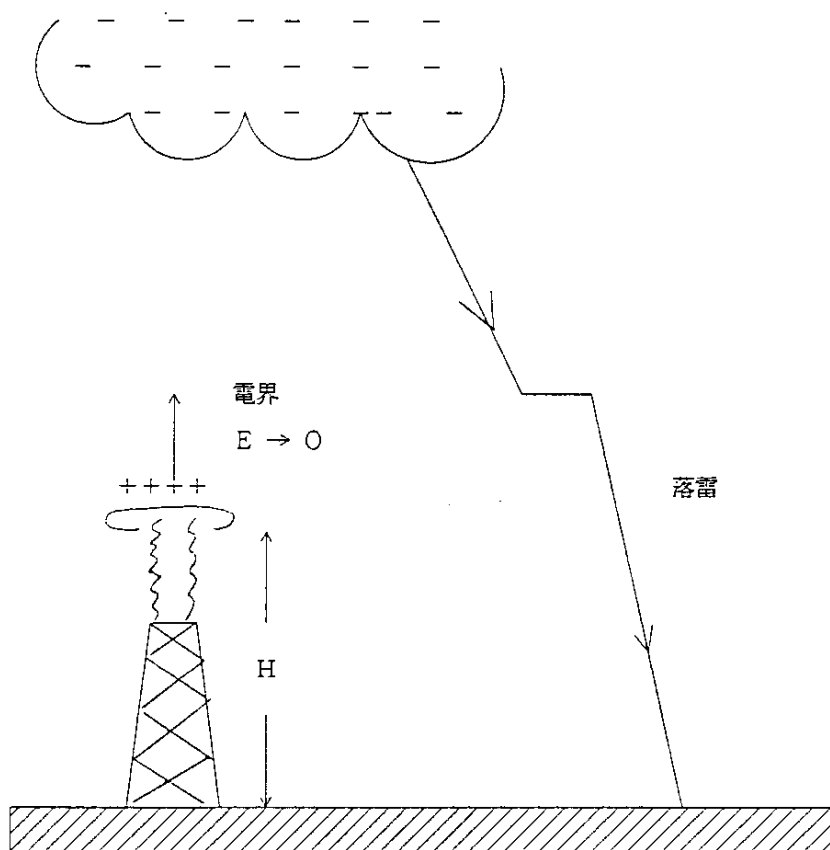


図15. 雷雲下の誘導電圧の発生

3. 3 まとめ

人形峠における雷観測と誘雷実験の適用条件について検討を加えた結果、当地は夏と冬の自然雷の観測地としては適当であるが、積極的にロケットその他の手法による誘雷実験を実施するには、実験地の安全上の広さが不十分であるとみられる。ロケット以外の例えば、電磁力利用装置を用いる場合も、飛行物体と誘雷用ワイヤの打ち上げを考えるならば、同様の問題は避けられない。しかし将来、ロケットに代わるより安全性の高い誘雷方法、例えば水誘雷とか、レーザー誘雷などの新しい技術が適用できるならば実験実施の可能性はある。

雷放電の利用については、現状ではアイディアの域を出るものはなく、その実用化にはほど遠いといわねばならない。雷に伴う電磁界の生物などへの影響についても、確たる学問的根拠のない情報が多く、これを正面から取り上げる前にかかなりの情報整理が必要であろう。

文献

- (1) 東山, 武藤, 堀井: 「雷雲下の針端コロナ電流特性とそれによる雷雲接近の検知」
電気学会論文誌, 99-A, 411, (昭和54-9)
- (2) 加藤, 野間: 「複合型襲雷警報器について」
昭和63年電気設備学会研究発表会, C-3(1988)
- (3) 加藤, 北川, 横田: 「複合型襲雷警報器の研究, 第2報」
平成3年電気設備学会研究発表会C-6, (1991)
- (4) 中村, 武藤, 東山, 堀井: 「針端コロナ電流特性を利用する警報器の開発」
電気学会論文誌, 101-B, 93(昭和56-2)
- (5) 堀井: 「雷は制御できるか?—ロケット誘雷など」
電気学会雑誌, 小特集 110, 21, (1990)
- (6) 堀井: 「ロケットによる雷雲内電荷の観測と誘雷放電の手法による電力系統の雷害防止技術の研究」
平成2年度科学研究費補助金, 試験研究(B) (1)研究成果報告書, (1991.3)
- (7) 堀井: 「雷を落とす物理」パリティ Vol.08.No.02. (1993)
- (8) 電気学会技術報告, 「最近における雷研究の動向と問題点」
雷撃特性調査専門委員会, (昭和63.8)
- (9) 堀井, 張: 「中国式消雷針の検討」電気学会高電圧研究会資料, HV-91-77(1991)
堀井, 中村, 池田: 「限流式避雷針」電気学会高電圧研究会資料, HV-92-59(1992)

雷エネルギーの環境利用について

1 環境利用の方途

現在、雷について述べた印刷物は図書館の書架をかなりな部分にわたり占めている。

しかし、雷とは何であり、どのようにして利用するのかという設問に対しては、まだかなりの部分が謎として残されている。

所謂電気（電磁波）の成分についてはまだ十分に明らかにされていないが、ただしラジオ、テレビ、レーダーなどに利用されていることはよく知られている。

ところが、生命に及ぼす電磁気の効果を深く調べようとするアプローチは殆どないことに気付くのである。たとえば、晴天日には大地はマイナス、大気はプラスの電荷をもつ。電子は、植物から大気へと流れる。荒天日には、大地はプラス、大気中の雲座はマイナスに荷電している。

地表は常に3000～4000ボルトの電気嵐が猛威をふるっている。晴天日に大地から失われる電荷は、このような荒天日に復元されることになる。すなわち、この事は電氣的勾配の交互変動は平衡を保持するということにある。もし、電気の一方向への流れが保持されると、電圧はかなり増大することになる。例えば、ヒト（1.8メートル身長）の頭と足の電圧は200ボルトとなる。電離雲座と地球表面との間では36万ボルトになると計算される。

この莫大なエネルギーを利用することが出来ない主な原因は、この電流がどのようにいくのか、その法則がどのようなものなのかについての正確な知見が欠如しているからに過ぎない。

2 電気利用による植物栽培

ベンジャミン・フランクリンの時代から、尖った先端が大気中の電気をとくに誘引することが知られている。この観察から避雷針が発明されている。

地球の北方圏におけるモミの森林で、モミの年輪が研究されている。この研究により、モミの年輪の成長はオーロラと太陽黒点とが活発な時期と完全に相関関係にあることが明らかにされている。さらにその影響は北極へ近づくほど顕著なことも認められている。

つまり、高緯度地域で、植物が成長できるのは、夏季の太陽日照が長いためであるというのは通説であるということになる。

ポット・テスト、金属ポットに植物の種子を播種し、一部のポットには、その上40センチの高さに針金ネットを置く。一本の柱を地中に立て、ネットを静電発電機に繋いでおく。

なお、他のポットはそのままにしておく。8週間後、通電した植物は、通電しない植物より50パーセントも重量を増加させた。

フィールド・テスト、同様のテスト圃場ではイチゴの収量は100パーセント、糖度も増加した。オオムギの収量は30パーセントの増収効果を示した。

フィールド・テストは野菜、果物、穀物ばかりでなく、温度、湿度、土壌、その他施肥などによりさまざまに変化する結果を示している。植物の成長にしたがって、針金ネットを高く上げていく方式をあらため、帯電したフィールドの中を自由に動けるように、格子状ネットを高い柱にとりつけた絶縁体に吊り下げた。

植物の生育期間でみると、コムギの収量は40パーセントの増加、ジャガイモで20パーセント、サトウダイコンでは糖度が多くなる。こうしたテストは、物理学・生物学・農学にわたる三分野に関連しているので、それぞれの専門家にとっては「とくに魅力のあるもの」とは認められて来なかった。

しかし、こうしたテストは科学研究者よりも工業技術者により追求されることが多くなっている。技術者は問題がどのように難しく見えようとも、実際の解決に迫る傾向にある。従って研究者と異なり、何かが働くのはどのようにしてか、何故かといったことよりも、それが働くかどうかということに関心を持つことが多い。

このような姿勢は、理論にこだわることから解放されてはいるが、その新発明、新発見は、理論的根拠のないとの理由から、科学技術の歴史においては無視されることになる。電磁エネルギーを植物栽培に適用することの可能性と重要性は、創造的考え方と利用可能な物的資源によりいかようにも拡大することができる。

電磁エネルギー、これに関連するものが、すべてのエネルギーとすべての物質の基本であり、すべての動植物の本質的構造をなしている。

電気利用による植物栽培に多くの援助が与えられるようになれば、思わぬ発展と成果が得られることが期待される。

つぎに、通電処理テストについて見る。毎時2トンの種子を通電処理することにより、トウモロコシ収量を20パーセント、コムギ、オオムギ収量を15パーセント、エンバク、ソバ収量を10パーセント増大させている。日産5トンの種子を通電処理する方式も開発されている。

平行にした板状コンデンサーの間を毎秒5メートルの速さで種子を流して通過させる。

この処理種子からのトマト収量は30パーセントの増加を示した。

3 人工システムによる植物栽培

雷雨、雨天の電氣的諸条件を実験室で人工的なモデルシステム・テストが行われている。

人工モデル、クリマトロンでのテストで、植物の成長の増大を確認している。

ルーサイト・ポットの植物をアルミ板電極上におき、絶縁柱から吊るしたアルミ線のネットをもう一方の電極として、植物上の電圧場の強さを調整している。

適当な電圧場で植物の生長は増大する。

作物ベルト上に人工的な電場を保持して、畑の収量を増大させることができるか否かは、まだ推測の域を脱していない。しかも、増収を保持するための屋外施設の費用は、増収分より高いが、採算のとれるものとなろう。

オレンジ苗木での通電テストでは、一方向に電流を流すと、苗木の発育が増大する。

電流の向きを反対にすると、苗木の生長は抑制された。1株のオレンジの6本の枝に、58ボルトの電流を流し、他の6本の枝に流さないでおく。18時間以内で、電流を流した6本の枝では、樹液が多量に循環しているが、電流を通さない6本の枝の方は、樹液はごくわずかしか流れないことが認められた。オレンジの収量時には、果実が全部、同時に成熟しないので、果実を随時手で摘まねばならない。オレンジに電気パルスを与えて、成熟した果実を摘果出来れば、摘果コストがきりつめられる。オレンジに電気パルスを与えて、成熟した果実を落とし、未熟な果実を枝に残すことに成功している。

人工システムによる植物栽培にとって必要な磁化可能物質として、鉄鉱石（磁鉄鉱）がある。鉱石粉末をある強さの磁場にかけて磁化し、フィールド・テストを行った。

ところが、ポット・テストでは、この鉱石粉末の効果は発現しない。つまり地球と触れているときにのみ、その力が認められる。

このダイコンのフィールド・テストの例では、対照標準区のダイコンの重量の2倍、主根長は3～4倍との結果が得られている。

ダイコンの他にも、カブ、ニンジンといった根菜類、レタス、ブロッコリといった葉菜類でも効果が認められている。

その他、病虫害の被害を受けた植物体と、豊作で健全な植物体のもつ電磁シグナルがまったく異なっているとの赤外写真が人工衛星スキャンで検出されている。

ローマの博物学者プリニウムは土の中にキノコをつくるトリックについて述べている。そこでは、このキノコは雷が大地を打ったときのみ出現するというのである。

地中海の半乾燥地域では、雨が降らないとキノコは出現しない。雨は天の神の小水であり、大地がそれを受けて、生物が生まれるという想像が伝承されている。

雷は神の力の表れである。

中国では、土の中にできるキノコを雷丸といって薬として珍重している。

何れにしてもキノコは雷の落とし子といわれてきた。

しかし、雷エネルギーを環境利用して、キノコはじめいろいろの植物を栽培する実用化技術については、まだまだ解決しなければならぬ多くの技術的問題が残されている。

4 雷の放電と窒素の循環利用

窒素元素は、ヒトはじめ全ての生物にとり生体を構成するために欠くことの出来ない重要な元素である。

地球の岩石圏、大気圏、生物圏での窒素の分配について見る。

陸上の生物圏で生物、土壤に含まれる窒素は約 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、これは大気に含まれる窒素の千分の一である。なお、岩石圏に含まれる窒素は大気圏の約5倍である。

窒素は大気の主成分ガスとして、大気の70パーセントを占める。全生物に含まれる窒素130億トンの30万倍に達する。

窒素ガスは化学的に不活性であり、生物はこの大気中の窒素を直接利用することはできない。

窒素ガスを動植物に利用できるような窒素化合物にする働きは、微生物によるところが大きい（生物的窒素固定）。これは、年間陸上で4400万トン、海中で1000万トン、合計で5400万トンと推定される。

大気中では、雷の放電により760万トンが生成され、火山から20万トンが供給される。これらは、雨水に溶けこんで陸上、海中に供給される。

生物にとりこまれた窒素は、有機態窒素に形を変え、生物から排出される。あるいは、その生物が死滅したのち、ふたたび微生物により無機態窒素に分解される。

なお、ある種の微生物は、酸素ガスが欠乏する嫌気環境下で、窒素化合物を分解して窒素ガスを放出する（脱窒作用）。

ヒトによる工業的窒素固定による窒素は相当大きな量となっている。ヒトが地下から取り出す石炭、石油、天然ガスは、窒素に換算すると、それぞれ年間、3000万トン、1000万トン、2000万トンに達する。その合計は、6000万トンである。これら化石燃料の供給は、大気圏、生物圏に存在する窒素総量を増加させている。大気中の窒素ガスをヒトが工業的に固定する量は、3000万トンに達している。

これは、陸上生物による生物的窒素固定4400万トンにほぼ等しい。工業的に窒素固定された窒素化合物の多くは、化学肥料として農地に施与される。

ヒトが食料バイオマスとして、陸上生物圏から得る窒素は、それぞれ1000万トン、500万トン、合計年間1500万トン、海中からは年間200万トンが魚介類として水揚げされる。これらは、ヒトに利用されたのち、ふたたび生物圏へ放出される。

木材バイオマスは、焼却されたのち大気へ移動する部分も多い。魚介類の50パーセントは飼料、肥料として利用される。降水にふくまれて陸上と海中に供給される窒素は2500万トン（陸上1500万トン、海中1000万トン）と推定される。窒素の大部分は、微生物の脱窒作用により大気へ回収される。窒素収支が陸上と海中でつりあうために必要な脱窒作用量は、陸上6200万トン、海中4800万トンとなる。しかし、どのくらいの量の脱窒作用が実際に存在しているのかを見積もることは困難である。

大気からの窒素供給は、降水と微生物とが貢献している。降水に含まれる窒素はアンモニア、硝酸がそれぞれ $\frac{2}{3}$ と $\frac{1}{3}$ であり、合計年間15万トンとなる。

単位面積当りに換算すると、年平均 $0.4 \text{ Ng} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ となる。

マメ科植物の根粒菌、水田のランソウなどの生物的窒素固定量は、年間6万トンである。土壌と水体の窒素化合物を分解して、窒素ガスとして大気中へ放出する微生物の存在が知られているが、この脱窒作用量を見積もることが困難であることは、前にも述べたとおりである。

環境に供給された窒素の大部分は、河川により運ばれ、海中へ流入する（有機態窒素と硝酸）。河川を経て海に移動する窒素は100万トンである。

微生物の脱窒作用により窒素収支のバランスをとるには、130万トンが大気中へ放出される必要がある。生物的窒素固定20万トンと比べると、大量の脱窒作用が微生物によるものとは考えにくい。ヒトの活動による窒素過剰供給の環境への窒素の蓄積、河川、湖沼の

窒素濃度の増加が進行しているものと考えられる。

地球の窒素循環における雷の放電による 760万トンが、生物的窒素固定5400万トンにくらべて約1/10ということは、雷エネルギーの環境利用の総量として評価できる。