

## 「LEMP—雷放電に伴う電磁界インパルス」

石井 勝 (東京大学生産技術研究所 教授)

ただいまご紹介いただきました人間社会大部門の石井です。電力工学関係の研究を主にやっています。

(OHP 1)

電力工学関係のなかでも、私が主に研究しているのは雷に関係した事項です。今日の講演会のキーワードが「環境」ということなのですが、環境で電気電子ということに絞り込むと、EMCという単語があります。これはどのぐらい市民権を得ている単語なのか私はよく知らないのですが、あまりいい日本語訳がありません。学問分野としては確立しているのですが、学問らしい名前がついていない。直訳しますと、電磁両立性ということになりますが、強いて学を付けると、環境電磁工学というような名がついております。この分野で実際にやっていることは、アンテナ工学における色々な計算などとほとんど同じなのですが、違うところは、あつては困るような有害な電磁界、それを扱うということです。計算手法としてはまったく無線通信屋さんがやっているのと同じで、ただその電磁波を発生するものも受けるものも、まともに設計されたアンテナではなくて、そんじょそこらにある100Vの屋内配線ですとか、プリント基板などであるという、そこがちょっと違うところです。ですから対策のキーとしては、そういう有害な電磁波の放射を抑えるように設計をする。それから、そういう放射がどうしてもなく出てきているような環境の中では、どういう対策を受け側で施すか、そういうことに尽きるわけです。

EMC、電磁両立性あるいは環境電磁工学の学問分野でやられていることはそういうことですが、そのなかの一つに雷による電磁界というのがあります。LEMPとかLightning EMPという代物です。

(OHP 2)

雷は、これは有り難いといって使う応用分野は少なく、大抵は、余計ものというだけではなくて、あまりそばでこれが発生すると、色んな機器等が壊れてしまうということがあります。雷は発生側で抑えるというのはなかなか難しく、そういう環境が否応なく生じてしまう。従って工学

屋としては、できるだけ少ない費用で、なるべく雷なんぞでいろんなものが壊れたり障害を起こしたりしないようにしたいというのが昔からやってきたことです。

ただ、LEMPという単語はそれほど昔にできた単語ではありません。もともとEMPという、Lを取ってしまった単語が先にありました。これは何かといいますと、これもEMC分野で非常に人気のあった研究テーマだったのですが、核爆発が起こりますと、強烈な電磁界のパルスが発生します。これが軍で問題になりましたのは1960年頃です。この強烈な電磁界パルスのことをEMPとっていました。

冷戦が終結したのと、大気圏内とか大気圏外の核実験というのは現在ほとんど実施できなくなってしまったことから、それによる脅威は最近では薄れたということで、それに関わっていた学者も、予算も減りますし、リストラもけっこうありまして、皆さん続々とほかの分野に転向してきて、その人たちの一部が流れ込んできたのが雷の電磁界の分野です。そういうことがありまして、いろんな毛色の変った人がこの研究を始めました。LEMPと区別するため、もともとの核爆発による電磁界パルスはNuclear EMPとかNEMPと呼ばれるようになっていきます。

IECという電気関係の国際規格のなかで、雷害防止関係のところでも、このEMPという単語は使われています。狭い意味でのEMC分野の話ですと電磁界だけを扱うんですが、実際に物が壊れたりするには、電磁界だけではなく、雷の電流も関与していることが少なくありません。そこで雷の電磁界に限らず、雷の電流も含めて対策を論じています。そんな訳で、今日のお話も、電磁界、電流を全部ひっくるめて話をさせていただきます。

(OHP 3)

雷の電流が直接入ってくるのを直撃といいます。雷の電流が分流して入ってきても、大抵はただでは済みません。例えば配電線があまりちゃんと対策を施されていない国では、雷が鳴ると停電がよく起こります。日本はかなり対策が進んでいますので、最近は滅多に雷による停電は起こらないのですが、たしか一昨年でしたか、交通機関等に大き

な影響があった年もありますし、発展途上国なんかに行きますと、ホテルの部屋にロウソクが置いてあったりしますよね。日本ではそういう風景は全然お目にかかりませんが。

日本でも実は、雷による大きな被害は発生してしまっていて、例えば石油タンクが燃えるとか大型変圧器が壊れてしまうとかの事故がありました。ただ幸いなことに、そういった事故による死傷者は日本では出ていませんので、あまり報道はされません。そういった大事事故が派手な例としてありますが、小さいものと、例えば皆さんのお宅のパソコンが壊れるとかがあります。最近、損害保険の請求がけっこう増えているらしいのですが、なかなか保険屋さんはその辺の情報開示をして下さいません。アメリカの統計ですと、数百万ドルオーダで毎年そういう請求がきているという話があります。大小取り混ぜると、金銭面で見た社会的な損失は、かなりのものになると思います。

極端な例としては亡くなる方もけっこういらっしゃる。日本でお亡くなりになる方は平均で毎年10名ぐらいです。日本はあまり雷が多くなく、また雷に関する知識が行き渡ってきていることが寄与しているのかも知れません。アメリカ辺りだと、一桁増えて100名とかそのくらい。雷が多いのと、外でよく遊ぶということもあるのでしょう。発展途上国ではあまり統計がちゃんとしてないのですが、遊んでいるときではなくて働いているときに亡くなる方が多いようです。

派手な事故は雷の直撃によることが多いのですが、もう一つの誘導雷というのが、先ほどお話ししました狭い意味での EMC による障害関連ということになります。雷が落ちたところとは、線などで直接つながってはいないのですが、ちょっと離れたところで被害を被る。雷の電流というのは時間的に早く変化するものですから、電磁波としてエネルギーが伝送されてしまう。直接雷が落ちて入ってくるようなところ、例えば通信や放送用のアンテナですとか、送電線、配電線などではそれなりの対策はするのですが、直接つながってないところには嚴重な対策は施されません。よくある例は電子装置です。直接壊れないまでも寿命等に影響するというお話もございます。情報がもうちょっと欲しいところです。

(OHP 4)

障害のもとになるのは雷放電ですが、合理的な対策を施すためには、その環境をまず把握しなくてははいけません。これは地球上の雷放電の分布を人工衛星が観測した結果です。25年ほど前の古い観測ですが、残念ながら世界中の雷の発生状況を常時観測する人工衛星はまだ上がっていません。すぐおわかりになるように、海洋上ではほとんど雷が発生していません。多いのは赤道の周辺。とりわけアフリカが多くて、あと南北アメリカ、そしてインドネシア周

辺の大きな島が沢山ある領域です。こういったことからすぐ想像がつくのですが、太陽のエネルギーが積乱雲の発生を通じて雷のエネルギーに変換されているわけです。その変換効率がいいのは陸上で、赤道の近くということになります。この図で見ますと日本は世界的に見ると雷が少ないほうですが、それにもかかわらず2000年はけっこう異常な年でした。熱帯の半分くらいに活発な雷が夏に、とりわけ栃木県、群馬県あたりで発生していたということがわかりました。

(OHP 5)

落雷を光で見ますと、雲の底から現れますが、その上は雲にさえぎられてしまってなかなか見えないわけです。この写真に示した放電路には下向きの枝分かれが出てますから、これは上から来てるんだということがわかります。

(OHP 6)

この図は、雷放電路がどんなふうにして下りてくるかという様子を時間分解をして、絵で描いたと思っていただければいいのですが、上からずるずるとなやら下りて来ますが、この段階ではまだ電流は流れていないのです。ずるずると下りてきたものが地上のものにくっきますと、ここでやっと電流が流れる回路が形成されて、雲の電荷が中和するといいますか、大電流がここに流れます。マイナスの電荷が落ちてくる雷ですと、これが一番多いのですが、それを1秒以内に数回繰り返すということもよくあります。注意してご覧になっていると、雷が一回ぱっと光るのではなくて、チラチラッと数回点滅したりということが肉眼でも見えますが、その場合にはこんな現象が起きているわけです。

(OHP 7)

下から上がっていくタイプもあります。夏には数百mの高さの建造物からを除き、まず観測されません。今ご覧にしているのは冬の例です。さっきと逆に上方に向かって放電路が枝分かれしている様子がわかります。これは送電線の鉄塔から発生しています。冬にはこのタイプのものが日本海側でよく発生します。冬は当然、雷の数は夏に比べて非常に少なく、同じ1日雷が鳴ったところで、せいぜい数としては5分の1とかそんなものかもしれませんが、その代わりこういう高いところに集中して落ちるといえるか、発生しますから、電力設備の被害は夏とくらべてあまり変わらないという地域もあります。

(OHP 8)

先ほどの写真では雲の下だけ見えていたのですが、この写真だと上まで見えています。普通見えるところは2kmぐらいの高さまで。その上が実はありまして、それが雷放電の性質に関係するわけです。

(OHP 9)

これは雷雲の中の電荷分布の有名な想像図です。積乱雲

の底が 2 km ぐらいのところであり、上は、夏の背の高い雲だと 14 ~ 5 km に達します。電荷の位置はわりあい集中してしまっていて、6 km 程度のところにマイナスが集まっています、上のほうにプラスの電荷が沢山ある。そういったことがわかっています。

(OHP 10)

季節によって場所によって雷の性質はいろいろ違ってきますので、それに応じた対策を考えなければいけません。夏によく落ちてくるのはマイナスの電荷ですが、高原地帯ではちょっと雷の性質が変わってきます。夏と冬の中間型になってくる。冬になりますとかなり違った性質を示します。例えば落ちてくる雷の電荷の極性が、半分くらいはプラスになります。

物理的には、雷雲中の電荷分布は温度で見ると、ほとんど似たような構造になっているのではないかと。そういったことを 20 年ほど前に提唱した人がいました。これは冬の雷雲中の電荷分布の想像図です。高さがせいぜい 5 km ぐらいしかないのですが、基本的には夏の雷雲と同様に、マイナスの電荷が下にあるのが当時観測された。それでもプラスの電荷が冬によく落ちてくる原因がよくわからなくて、冬の雷雲は傾いているのではないかと言われたりしていました。

直接雲の中を写真に撮るのは非常に難しいのですが、最近になって、雲の中から出てくる電磁波を観測して、その発生源の位置を推定するテクニックが発達してきました。そうすると雲の中の放電路が電波で見えてくる。これは LEMP を逆に利用している例です。

(OHP 11)

この図は雲中の雷放電路の構造の典型例です。横方向の投影図に工という字に似た構造が見えます。高さ 6 km ぐらいのところまで横に広がってしまっていて、10 km ぐらいのところにも水平な構造があり、縦の細い放電路が間をつないでいる。実は 6 km ぐらいの高さの領域はマイナスの電荷が集まっているところで、上のほうがプラスの電荷があるところです。

上から見た図には二つの固まりがあります。状況としては、一度雷放電が起こった 6 秒後に少し離れた場所でまた放電が起こった。つまり、雲が二つありまして、その中で雲の中だけの雷放電が間をおいて 2 回起こったという状況です。これは北米の研究者の報告です。

(OHP 12)

これは 2000 年 8 月に福井県で行った、電波による雷放電路観測の例です。横軸は時間、縦軸が高さです。高さ 4 km ぐらいの辺で最初に放電が起こり、高さ 10 km ぐらいまで放電が伸びています。プラスの電荷の領域とマイナスの電荷の領域が、分かれて見えています。こんな観測がここ 1,2 年の間にできるようになりました。先ほど漫画で

描いていた、放電路が上から地上に向けて伸びてくる様子、それは電波ではこんなふうに見えたりします。

(OHP 13)

放電路が 10 ms ほどの間に 5000 m ぐらいの高さから下まで下りてきているのがわかります。光による写真ですと、ほんの 2 km から下ぐらいしか見えないのですが、これですと、どのぐらいの速さで伸びているか、どのぐらいの長さなのかがわかります。夏は 5000 ~ 6000 m ぐらいの高さのところから延々と下りてきているわけですが、けっこう速いものですから、10 ms くらいで来ます。

(OHP 14)

これは冬の落雷の例で、プラスの電荷が落ちています。冬は、なぜプラスの落雷がたくさん生じるのかよくわからなかったのですが、この例では下のマイナスの電荷領域と上のプラスの電荷領域との間に最初放電が起こりまして、電荷が中和しきれずに、プラスの電荷が余って下まで落ちてきた。このような経過をたどる落雷が、プラスの電荷が落ちる雷の半分近くを占めていました。こんなことも最近ではわかってきました。

(OHP 15)

もう一つの LEMP の利用例についてお話しします。雲の中の放電路を電波で見ると VHF 帯の電磁波を観測しますが、雷放電の大きな電流によって発生する電波が効率よく出ているのは数十 kHz という低い周波数です。数十 kHz 帯を中心に広い周波数帯域をそのまま観測しますと、雷電流波形に関係した情報が得られます。図に示した 2 種類の電磁波の波形の一方は、落雷によって発生する波形、もう一方は雲の中の放電に伴って観測される波形です。落雷によって発生する電磁波の波形は、立ち上がり時間にして数マイクロ秒、継続時間が 50 マイクロ秒から 100 マイクロ秒の特徴的なパルスとして観測されます。遠方で弱くなってしまうと悪さはしないので、これはもう信号扱いですが、それを観測することにより、雷放電がどこで発生したか、あるいは電流がどのぐらいの大きさだったか、そういったことが現在はわかるようになっています。

(OHP 16)

これはある民間の気象会社が持っている、日本全国を観測するための雷観測ネットワークですが、電波を受信するステーションを全国に二十いくつ配置していて、それらが全部通信回線につながっています。同時に 2 ヶ所以上で、あるいは到達時間差方式ですと、同時に 3 ヶ所以上のステーションで、同じ発生源からの電波を受信すると、電磁波発生源の位置、強さがリアルタイムで計算されます。

(OHP 17)

位置標定の精度は地図上に一面にある楕円の大きさと示され、30 ~ 40 % の確率で落雷がこの中で発生したことを意味します。日本の本土の上だと 1 km 以内ぐらいの精度

になっています。

(OHP 18)

これは落雷のうちのどの位の割合が観測されるかを示す図です。場所によって異なり、日本本土上では北海道から九州までの90%ぐらいの雷はつかまる。残念ながら海の上にはステーションが配置できないので、日本列島から離れるに従って、捕捉率と呼ばれるこの数値は落ちてきますが、朝鮮半島や沿海州の雷の1~2割は観測できています。

(OHP 19)

これは雷が多かった2000年夏の落雷の状況です。あの年はこの辺(栃木、群馬)がものすごく多かった。1km<sup>2</sup>当たり年にどのぐらい落ちるかということで、その激しさを勘定するのですが、日本ではいままで、1つとか2つだろうといわれていたのが、この年に限りまして、10を超えるようなところがありました。だからあの辺は本当に多いのだなと。

(OHP 20)

冬になりますと様相が変わってきます。陸上はほとんどなくなって、逆に海の上にはたくさん落ちてるのがわかります。しかし夏にくらべて数は1桁少ないです。一番多いところでせいぜい1km<sup>2</sup>当たり1シーズンに1個とか、そんなものでしょうか。今までわずかに八丈島辺りで冬に雷がけっこう多いというのは知られていたのですが、実は島のない日本の東海上に多いところがあった。ここは、ちょうど黒潮の上に当たります。

あと、冬に雷が多いといわれていた日本海側ですが、確かに海岸にちょうどひっかかるぐらいのところではけっこう多くなっています。海上で多いところは対馬海流と関係があると考えられます。

(OHP 21)

電磁波だけでは、雷電流波形に関するすべての情報はわからないのです。電磁波にほとんどならない非常に周波数成分の低い成分は、高い構造物に観測装置を設けて、雷がそこに落ちてくるのを気長に待つしかない。冬の雷の特徴の一つに、このような装置でなければ観測が難しい、数ms以上にわたる継続時間の長い電流波形が多いということがあります。

(OHP 22)

実は夏の雷でも、雷電流波形とLEMPを同時に観測した例は、そう多くありません。電力会社が関東地方北部の高い送電線鉄塔に雷電流の観測装置をたくさん取り付けて、観測を行っています。私もどれぐらいとれるものかあまり見当がつかなかったのです。それが結構データがとれることがわかりました。2000年夏の関東北部の落雷数を見て、納得しました。

これは振幅を全部1に規格化した雷電流波形です。大きさはまちまちですが、いろんな波形が入ってきています。

立ち上がりが速いのは1マイクロ秒かからないでピークに達していますし、10マイクロ秒くらいかかる波形もあります。世界的にも送電線で測定したこのようなデータはないのですよ。いままで世界で唯一、スイスの山の上の鉄塔で40年ぐらい前にとれたデータを世界中で使っていたのですが、日本もこうした基礎的な面で、世界に貢献しつつあるというわけです。

(OHP 23)

こんな具合にLEMPの発生側のことは、かなりわかって参りました。次は、それが入ってくる側の話です。送電線とか大きなものについてはかなり研究が進んでいますが、あとでお見せしますが、いろいろ仮説を裏付けるような証拠もあがってきています。

(OHP 24)

まだよく研究されていないのが、電圧が低く、LEMPに対して弱いシステムです。これは一般家屋を想定しているのですが、金属で外とつながっているような経路が大抵二つか三つあるはずですが、例えば一戸建ての家だとテレビのアンテナが出ている。それから、大抵通信線が入ってきています。これは地下ケーブルから入ってくるとまだ危険は少ないのですが、普通の日本の家ですと、電柱から通信線が入ってきて、また配電線が入ってきている。LEMPの代表的な侵入経路としては、これらアンテナ、配電線、通信線、場合によってはアース系ということになります。いずれも、直接雷が落ちればもちろんそこから入ってきますし、それ以外では、先ほど申し上げました誘導という現象を通じて入ってきます。結局、金属はアンテナになります。長ければ長いほどいいアンテナになります。というのは、LEMPは周波数の低いところにエネルギーのピークがありますから。

面白いことに、こういったものがつながっていても、出口がないと意外に被害がないものなんです。電流が通過するところでもないことが起こるのですが、行き止まりだと割に被害がない。そういう意味で、一番危ないのが二系統以上の外部導体がつながっている機器です。代表的な例でいくと、例えば電話のシステム、あれは通信線と、最近のは100VのACを必要とします。そこではLEMPが通り抜ける通路ができていますから、被害を受けやすい。テレビなどもそうです。アンテナと電源が必ずつながっていますから、そこに通路ができてしまう。あとはアースなんです。アースがつながってますとそこに通路ができて、ときどき電気温水器が壊れたりいたします。

これらの外部につながる導体は、つながないですますというわけにはいかない。アースにしたところで安全性の面から、ぜひともつないでいただきたいと思いますから、そういったところは逆にどんな対策を施せばいいか。この図に示したのは、LEMPが入ってきたときに、それを機器に

入れずにバイパスさせてやるようなデバイスなんですが、最近の家電機器にはかなりこれを取り付けられるようになりました。コストを上昇させるので家電にとっては厳しいのですが、それでも最近はこのような対策が施されるようになっていきます。ただし、入ってくる LEMP の大きさ、波形がどのようなものか、その辺は未だにあまりよくわかっておりません。

## (OHP 25)

最近ではどんどんこういった LSI などの動作電圧が小さくなってきました。こうなると誘導だけでも軽くそういうレベルの電圧が出てきてしまいますし、物が小さいですから小さなエネルギーでもダメージを受けやすい。雷の多い熱帯では LSI が、予想された寿命より速く壊れてしまうという話があり、エイジングが生じているのではないかと聞いておられます。

## (OHP 26)

一方、送電線のように大きなものは、最近では事故の起こる過程に関する仮説が、観測により証明されるようになってきました。次に示す 2 例がそうです。

これは日本で冬に撮影された 50 万 V の送電線への落雷です。以前から、こんなことが起こってるんじゃないかということでは言われていたのですが、証拠写真が撮れたのはここ 10 年ぐらいのことです。雷が送電鉄塔に落ちると、3 m 以上あいている送電線と鉄塔アームの間に放電がぼんと飛んで、それが三箇所が生じている。これだと間違いなく事故になっているわけです。実は送電線というのは電気を送る線に直接雷が落ちないように、上にちゃんと遮蔽線と称するものが張ってありまして、これはそのシステムに落ちたにもかかわらず事故が防ぎきれなかった例です。

## (OHP 27)

これは遮蔽線をかいくぐり、電気を送る線に直接飛び込んできた落雷です。こんなふうに横から入ってきて遮蔽失敗を起こした雷が撮影されたのも世界で初めてなんですが、現実にはこういうことが、特異な雷が少ないと思われている日本の夏に起こっているという例です。

## (OHP 28)

最近、研究が進んできたのが、配電線の雷害事故についてです。

この写真は冬に撮られたのですが、30 m ぐらいの高さの無線塔に雷が落ちた例です。離れた電柱の上に光が見えたり、下の方の街路灯への配線の途中にも光が見えたりしています。これは誘導雷で高い電圧の LEMP が生じた証拠です。このときには事故には至りませんでした。

## (OHP 29)

これは一般家庭に落ちた例で、これも冬です。明らかに上向きの雷ですが、非常に低い高さのところから発生しています。20 ~ 30 m 離れた配電線上に光が二つ見えます

が、これは配電線の上の機器が壊れて、派手に光が出たところなんです。これは誘導というよりも、家屋に落ちた雷の電流が、地面の中か、あるいは低圧配電線を伝わって逆に高圧の配電線に侵入した。そういう種類の LEMP による障害です。

こういった直接的な証拠が配電線の雷害事故についても収集されつつあり、研究の進展に役立っています。

## (OHP 30)

これは群馬県、栃木県あたりの試験配電線での 5 年間の観測結果をまとめたもので、30 例ほどの雷害事故が記録されましたが、直撃雷に起因するものが圧倒的に多かったということです。これは誘導雷が配電線では大きな脅威となるという世界的な常識を覆す証拠です。

## (OHP 31)

海外では未だに誘導雷による被害が重要視されていたのですが、日本では誘導雷への対策として設備されてきた雷害防止用の機器が、直撃雷に対してもかなり効果があるということが、こういう直接観測で明らかになってきて、雷害対策をもっと合理化できるのではないかということが検討されています。

## (OHP 32)

雷の電流は、数万アンペアぐらいです。我々は電流が流れやすいところにこのような電流を流すことはできますが、電流が流れにくいところに流すことはできません。雷はそういうところにも平気で大電流を流してしまいますので、雷の大電流の影響を直接再現するのは容易ではありません。この装置は日本にある最大の電圧発生装置なのですが、これを使いますとやっとのことで、一番小さな雷ぐらいの電流を実物と同じシステムに流すことができます。これを使って配電線の機器に関する実スケールでの実験が日本では色々行われております。このような研究には特殊な設備が必要で、我々のところではできません。

## (OHP 33)

我々の研究の一端をご紹介しますと、雷放電路の近くで、先ほどご説明しました電磁界は、どのような性質のものが発生するか。これを一々実測しているのでは能率が非常に悪いので、ある程度予測できないかという研究がその一つです。数少ない高構造物周辺での実測データとの比較により、モデルがどこまで正しいかという検討を行っています。

## (OHP 34)

これはその一例で、550 m のカナダの CN タワーにおける実測との比較です。送電鉄塔で測定された電流波形と違って複雑な電流波形が測定されていますが、これには実は構造物の影響が現れています。500 m といいますが、電磁波が往復するのにも、3 マイクロ秒ちょっとかかりますから、鉄塔の中で反射とか何か起こりまして、測定される雷

電流波形が影響を受ける。電磁界の数値解析によって、この現象の再現を試みました。

(OHP 35)

これは本物の雷放電による誘導雷現象の実測結果と解析の比較をやっている例です。

(OHP 36)

これは縮小モデルですが、屋外に設置したけっこう大きなモデルです。雷の放電路に相当する伝送線路を垂直に立てまして、そこにパルス電流を流し、周囲に LEMP に相当するパルス電磁界を発生させます。

(OHP 37)

ここに配電線の 20 分の 1 のモデルをつくりまして、どんな誘導電圧が出てくるかというのを実測して、それと解析とがどのくらい合うか、そんな研究です。

(OHP 38)

誘導雷現象は非常に解析が難しかった問題ですが、やっところ 10 年くらいで、実測と解析がきれいに一致するような理論あるいは数値的なモデルができるようになりました。

せっかく誘導雷の計算が精密にできるようになったのですが、エネルギー的にはあまりこわくないというのがわ

かってきまして、配電線レベルのわりに低い電圧の電力線でも、直撃雷への対策を考えるようにシフトしていったいいのではないかとこの機運が高まって来つつあります。

今後の問題ですが、自然の雷現象は人工的に 100% は再現できないものですから、待ってデータを収集する必要がありますが、先ほどご紹介したように、雲の中から放射される電磁波の解析により、その中での放電路の状況がわかってきました。この研究を発展させると、雷電流の統計的な性質を、電磁波による観測を通じて知ることができるようになるかも知れません。また、今日はあまり詳しくお話ししませんが、LEMP に関する雷放電路モデルの研究があります。放電路の中で何が起きているのか、直接測定することはできないわけですが、周辺で測定される電磁界を再現できるような放電路モデルを逆につくれば、色々な状況のもとで発生する電界・磁界が、どんなものかが推定できます。

以上のように、雷放電によって放射される電磁波の研究を通じて、雷放電のもたらす電磁界環境に関する知識は、近年になって大きく増大しました。対策についても合理化が進むことが期待されます。

(了)