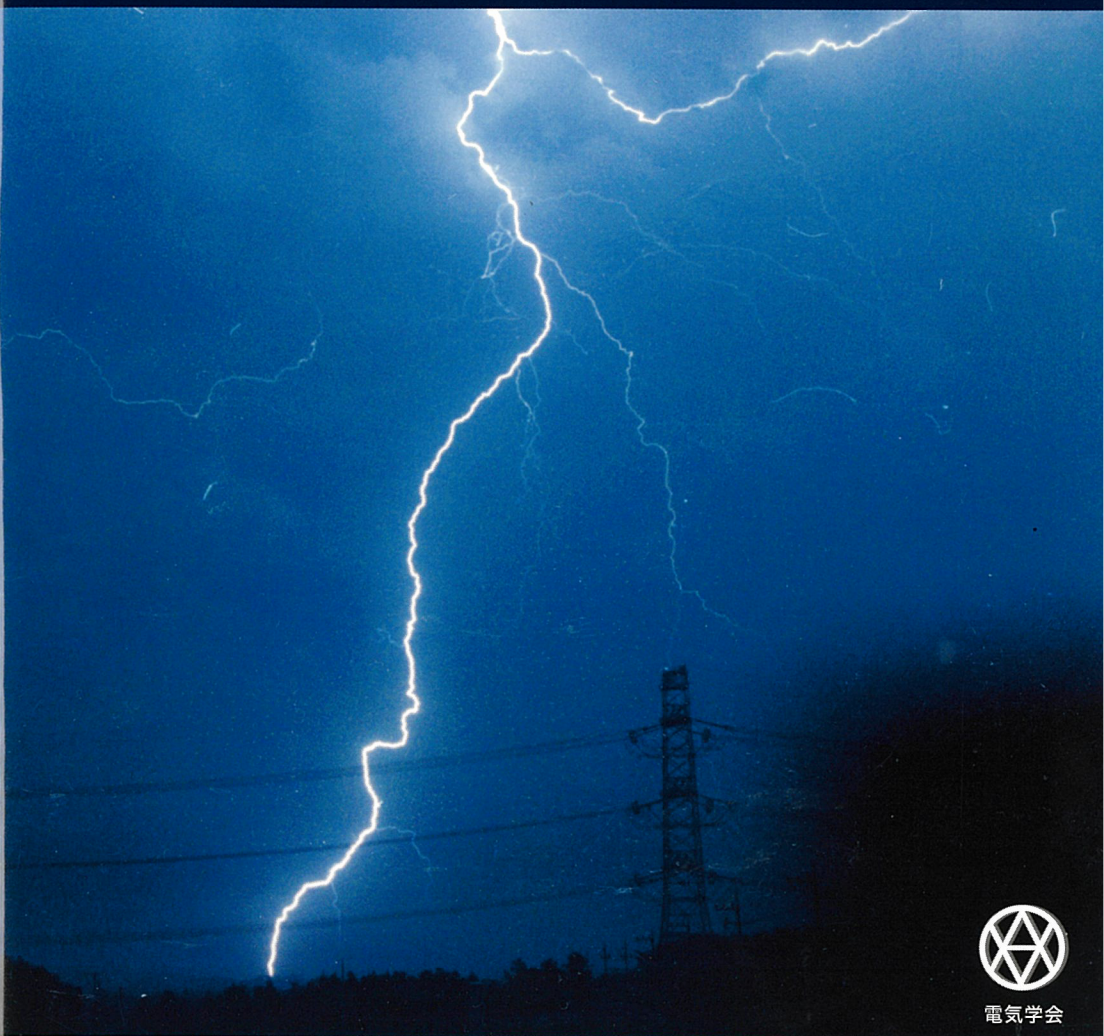


雷をひもとけば

神話から最新の避雷対策まで

新藤孝敏



電気学会

目次

序章 雷とは

第1章 雷：荒ぶる神

世界の雷神	8
日本の雷神	9
雷神と化した菅原道真	11
雷神社	14
風神雷神像	17
雷除けのお札	19
〈コラム〉 雷獣の話	20

第2章 神話から科学へ：雷を電気と考えた人々

静電気と雷	24
静電気を貯める	28
雷の実験とフランクリン	29
フランクリンの実験	31
日本における電気の研究	35
日本における雷の研究	37
〈コラム〉 アメリカの独立には雷が関係している?!	40

第3章 雷と伝承：雷の言い伝えを現代科学の目で見ると

民俗学からみた雷	42
----------	----

雷の多い年は豊年	42
雷がなったら臍(へそ)を隠せ	44
雷がなったら蚊帳(かや)の中に入るとよい	45
三 束 雷	46
カラ雷は怖い	46
雷 三 日	47
くわばら、くわばら	47
〈コラム〉 俳句と雷	49

第4章 雷の気象学的考察：雷はなぜ落ちる

雲はなぜできる	52
〈コラム〉 湯気と水蒸気	54
夏 の 雷	55
冬 の 雷	58
世界の雷の発生状況	62
日本の雷を記録する	64
落雷の数と位置を測る	65
落雷のプロセス	68
〈コラム〉 なぜ、氷と氷がこすりあっただけでプラスとマイナスの電気に分かれるのか	72
〈コラム〉 摩擦帯電の話	72
〈コラム〉 氷の衝突帯電現象	73

第5章 雷の脅威：雷から建物や身を守るには

建物への雷撃による被害	76
雷による人身事故	78
〈コラム〉 雷による死者の数	82

目 次

雷が機器を壊すのを防ぐ避雷器	129
配電線の雷対策	131
新たな雷害問題	133
SPDによる保護	134

第7章 あれも雷, これも雷

ロケット誘雷	140
雲放電	144
スプライト・ブルージェット・エルプズ	145
火山雷	147
竜巻に伴う雷	147
球雷	147

第8章 さらに詳しく知りたい人のための 覚書

書籍	152
雷に関連する JIS 規格	154
索引	157

高鉄塔や樹木などへの雷撃	84
雷のエネルギー	86
〈コラム〉 雷のエネルギーは使えないか？	88
〈コラム〉 映画の中で使われている雷	89
5.1 雷によって、どのように人身被害が生じるか	91
直 撃 雷	91
側 撃	93
歩幅電圧	95
雷によるその他の被害	97
5.2 雷から身を守るには	97
雷の発生や接近を知る	97
安全な場所に避難する	99
安全そうにみえて実は危険な場所	100
結 論	104
〈コラム〉 雷とプロゴルファー	104
5.3 雷から建物を守るには	105
避雷針の役割	105
避雷針はフランクリンが発明した	109
ヨーロッパにおける避雷針の普及	109
〈コラム〉 避雷針付傘	112
日本における避雷針	114
飛行機に雷が落ちたら	116
船に雷が落ちたら	119

第6章 安全・安心な社会と雷

停電と現代社会	122
送電線の雷対策	126

20xx 年，夏，その日は朝から太陽が照りつけ，暑い日だった。昼下がり，夏休みだった翔一はマンションの自室でネットサーフィンをしていたが，あたりが急に暗くなると雨が降り出した。遠くで雷が鳴っているのも聞こえてくる。

「雷が落ちたらいやだなあ」

翔一は雷が嫌いなのである。しかし，悪い予感当たるもので，突然，強い閃光とともに耳を聳するような雷鳴が轟いた。と同時に，パソコンの画面が消えた。

「停電？」

いつまでたっても，コンピュータの画面は暗いままである。

「今の雷でパソコンが壊れちゃった？」

パソコンは再起動しようとしても，うんともすんともいわない。どこかで，火災報知機が鳴っている音もする。この前，雷が近くに落ちたときも，火災報知機が誤動作したので，翔一は気に留めなかったが，天気予報を見ようと TV の電源を入れても，TV は点かない。

「TV も壊れた？」

確かに雷で TV は壊れていたのではあるが，仮に TV が壊れていなくても TV は映らなかった。TV 局の放送システムも雷でダウンしていたのである。



外では、相変わらず雷が鳴っている。気のせいか、雷の激しさも増しているようにも思える。翔一は知らなかったが、このとき、街は集中的に発生した落雷でパニック状態になっていたのである。

ほとんどの踏切で、信号システムが雷のノイズで誤動作し、電車が通っていないにもかかわらず遮断機が下がり、大渋滞を引き起こしていた。また、新幹線の指令所でも、運行状態を示す表示板には異常状態を示す赤ランプが多数点灯し、警戒ブザーが鳴っている。

空港でも、雷によって管制塔の制御システムがダウンした。その結果、すべての便が離発着不能となり、その対応に追われていた。

銀行では窓口の人が殺到し、大混乱となっていた。雷のノイズでATMがすべて動作不能になったためであるが、窓口でも顧客のデータを照合しようにも、肝心のコンピュータが動作不能となっており、手の打ちようがないのである。

多くの企業でも雷によるコンピュータの故障が相次ぎ、まともな仕事はできない状態であった。また生産ラインを制御するコンピュータの誤動作により、生産が停止もしくは製品が不良品となった工場も多数発生した。

病院でも大きな問題が生じていた。

「先生、人工透析装置が動きません！」

「先生、患者さんの心電図モニターが見えません！」

「先生、救急救命システムが止まってしまったのですが、どうすればいいんですか！ このままでは、患者さんが危険です！」

この病院も近くに落ちた雷で停電した。幸い停電は自家用発電機が稼働して、すぐに復旧したものの、雷によるノイズにより、電子回路で測定・制御している医療機器がすべて動作しなくなってしまったのである。

各官庁でも、次々入る情報で、都心に集中的に落ちた雷によって都市機能がマヒし、社会が混乱状態になってことはわかっていた。

雷には多くの言い伝えがあります。また、地方によって独特の言い伝えがある場合もあります。第3章では、そのような言い伝えをいくつか取り上げて、その意味を現代科学の目から考えてみましょう。

民俗学からみた雷

第1章では雷を雷神という観点から紹介しました。そこでも述べたように、雷神は怖い神ですが、その一方で、農業に必要な雨をもたらす豊穰の神でもあります。この二面性が神としての雷の特徴であり、多くの言い伝えがある理由の一つでしょう。また、雷の発生やその特性は地域によっても異なることから、地域独特の言い伝えも数多くあります。それらは、民俗学的にみても興味あるもので、多くの研究がなされています。

この章では、代表的な言い伝えをいくつか取り上げて、その意味を現代の雷に関する知見から考えてみましょう。

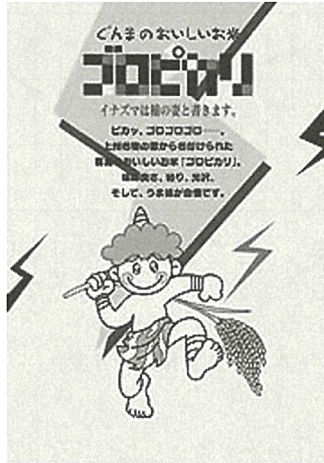
雷の多い年は豊年

これは多くの地方でいわれている言い伝えです。米と雷といえば、群馬県は、雷が多いことと合わせて「コシヒカリ」と「月の光」を人工交配させて作った品種を、「ゴロピカリ」と命名しています。

イナヅマという言葉自体、雷が稲に実をもたらす、もしくは雷が稲を孕ませるという意味で稲つるみ¹や稲妻(稲夫²)に由来するとされています。この言い伝えは十分な科学的根拠があるといえます。なぜなら、雷が多い年は、夏が暑く、また夕立などもあり、稲の生育に必要な十分な

1 「つるむ」という言葉を知らない人は辞書で確認してください。

2 古語では「夫」も「つま」と読みます。

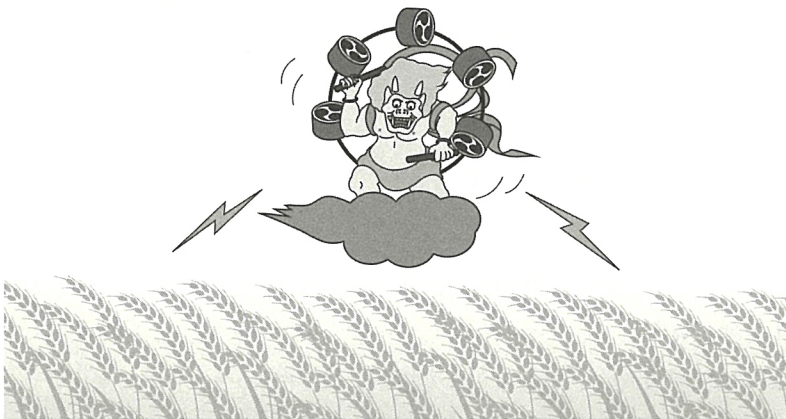


ゴロピカリ

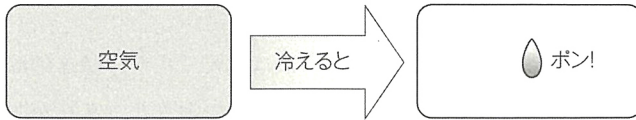
(出典：全農 群馬県本部 HP)

日射と水が与えられるからです。

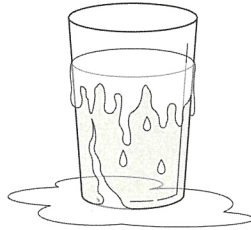
46 ページの図は米の作況指数を年ごとに示したものですが、特に作況指数の低かった 2003 年と 2009 年における我が国の年間落雷数は、その前後の年に比べて約半分程度に減少しており¹、統計上からも、雷の発生数と稲の生育とは明確な関係があることがわかります。最近では稲の品



¹ 第 4 章に出てくる落雷の発生数のグラフをみてください。



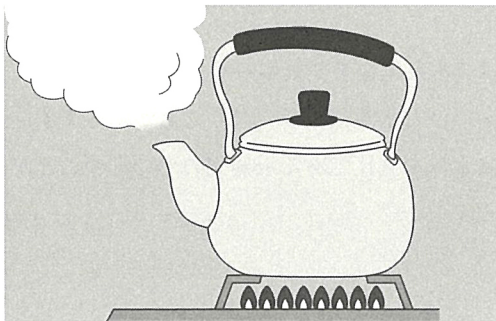
夏に冷たいコップの外側に水滴が付くのも、空気が冷たいコップに触れて冷やされたので、それまで含んでいた水蒸気を水滴の形で出さざるを得なくなったということです。



〈コラム〉 湯気と水蒸気

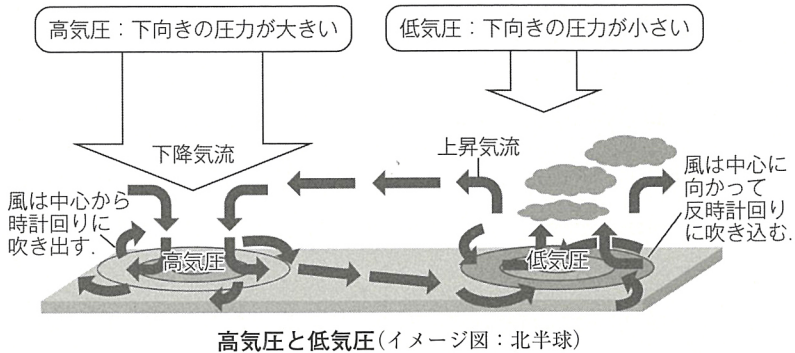
物質は固体、液体、気体の三つの姿をとります。低い温度では固体であり、温度が上がると液体、気体と姿を変えていきます。水も温度が低いと固体の水であり、温度が上がると液体の水になり、さらに温度が上がると気体の水蒸気になります。

下の図でやかんの口から立ち登る白い部分が水蒸気と思う人が多いのですが、これは湯気であって水蒸気ではありません。水蒸気はやかんの口の近く



の透明に見えるところで、それが空気に冷やされて、ごく小さい水滴となつて眼に見えるようになってるのが湯気なのです。

地上付近では水分を水蒸気の形でもっていた空気が何らかの理由で上昇すると、温度が低くなるため、空気中の水蒸気が水滴になります。これが雲です。何らかの理由で上昇と書きましたが、山があるなど、地形条件により上昇することもあれば、高気圧のところで押さえつけられた空気が、低気圧のところで上へ逃げ出して、上向きの空気の流れができることもあります。



要するに、雲ができるためには、上向きの空の流れ、すなわち上昇気流が必要なのです。

夏 の 雷

雲ができるために必要な上昇気流ですが、高気圧の広がった真夏の晴天ではどうしたら生じるのでしょうか。この場合には、まず太陽の日射に地面が温められます。それと同時に地面の付近の空気も暖められます。暖まった空気の塊は膨張しますから、密度が小さく、つまり軽くなり上昇していきます。ある程度上昇しますと気温が下がりますので、空気中の水蒸気は水滴となり雲ができるということです。

地上から 10 km 程度までは、高度の上昇とともに温度が下がります

雷のエネルギー

雷が建物や樹木、あるいは人間に落ちると、大きな被害が出る場合があります。それでは、雷のエネルギーは実際どのくらいのものなのでしょうか。

単位時間あたりの電気のエネルギーを表わす電力は、電圧の大きさと流れる電流の大きさの積で表わされます。すなわち、電圧の単位をボルト[V]、電流の単位をアンペア[A]とすると、電力は(電圧)×(電流)で、1秒間当たりのエネルギーとなり、単位はワット[W]になります。同じ電圧と電流でも、1秒間続くのと100秒間続くのでは、後者の方が大きなエネルギーとなることは当然です。そのため、総エネルギーとしては、(電圧)×(電流)×(時間)で表わし、単位はジュール[J]になります。

これをもとに、雷のエネルギーを推定してみましょう。

まず雷の電圧です。雷の電圧を直接測った人はこれまでいませんが、雷の研究者の間では、1億ボルト程度が妥当なところではないかという意見が多いようです。通常、家庭に来ている電圧は100ボルトですので、1億ボルトはその100万倍です。

次に、雷の電流については、国内外に多くの観測例があり、小さいものでは数千アンペアから、大きいものでは10万アンペアを超えるようなものまで観測されています。地域や条件によっても若干異なりますが、電流値は平均的には2万アンペアから3万アンペア程度です。

また雷の電流の流れている時間は、通常、1万分の1秒以下です。

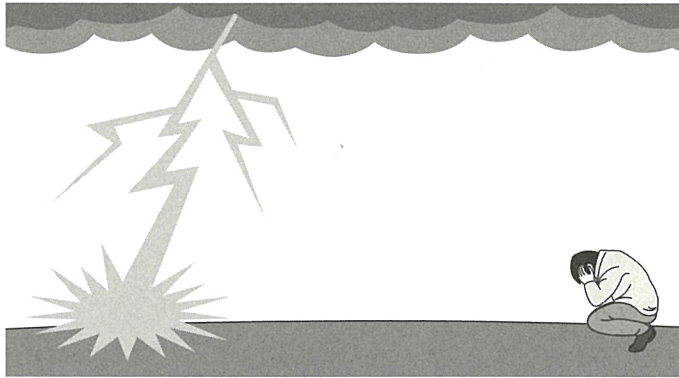
これらをもとにエネルギーを計算すると、

$$\begin{aligned} & \text{電圧(1億ボルト)} \times \text{電流(3万アンペア)} \times \text{時間(1万分の1秒)} \\ & 100\,000\,000 \quad \times 30\,000 \quad \times 0.0001 \\ & = 300\,000\,000 \text{ [Ws: ワット秒]} \\ & = 300\,000\,000 \text{ [J: ジュール]} = 3 \text{ 億ジュール} \end{aligned}$$

となります。

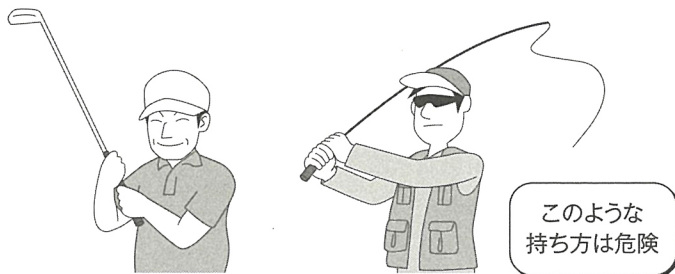
3億ジュールを、電力分野でよく使われるキロワット時[kWh]という単位に換算すると、約83(kWh:キロワット時)になりますが¹。この83kWhという値は、家庭で使う電気量の約1月分²です。それが一瞬で放出されるのですから、その破壊力がすさまじいことは当然でしょう。

破壊力といえば、稲妻の強い光もさることながら、むしろゴロゴロやバリバリという雷鳴に恐怖を感じる人も多いのではないのでしょうか。雷は電気ですから、光が出るのはなんとなくわかるような気もしますが、なぜあのような大きな音がするのでしょう。



アリストテレスらの時代には、雷鳴は雲の衝突するときに生じる音であり、稲妻とは関係ないものとされてきました³。しかし、現在では、雷鳴は、何万アンペアという雷電流で雷の放電路が数万度まで暖められ、空気が爆発的に膨張し、この急激な膨張で衝撃波が生じ、それが空気中を伝わっていく間に音波に変わって聞こえるものということがわかって

-
- 1 300 000 000 Jは300 000 000 Wsなので、これを3600秒(=1時間)で割って、さらに1000で割ると、キロワット時になります。
 - 2 もちろん電気の使用量は個々の家庭によって異なるので、おおよその値です。自分の家の電気の使用量が気になる方は、ぜひ電力会社から毎月送られてくる料金表をみてください。
 - 3 17世紀の哲学者、デカルトも、雷鳴は雲のぶつかる音と考えていました。



通常ハイキングなどで使われるテントの中なども、高い木の傍に張った場合には木からテントへの側撃が生じる可能性があります。また、開けた場所にテントを張った場合には、テントへの直撃の可能性もあります。テントの中に入れば外が見えないので安全のように感じるかもしれませんが、雷にとっては、テントはないも同様なのです。

陸上ばかりではなく、海や海岸の砂浜にも雷は落ちます。海の中になると、雷が直接人体に落ちなくても、海水を通じて流れる電流で感電し、そのショックでそのまま溺れてしまうこともあります。落雷の恐れがある場合には直ちに岸が上がって、安全な場所に避難するようにしてください。

雷の人体被害について、金属製の眼鏡やネックレス、腕時計など、金属のものを身に着けていると危険であると思われるかもしれませんが、そのようなことはまったくなく、雷の落ちやすさと身に着けた金属



身につけた金属物は外す必要はない



とは無関係です。

ゴムの長靴やレインコートなどは電気を通常は通しませんが、雷のような大きなエネルギーに対してはまったく無力であり、落雷を防ぐ効果は期待できません。ただ、落雷は防げなくても雨を防ぐ効果はあるので、あえて脱ぐ必要はありません。

もし、落雷で倒れた人が出たら、脈拍や呼吸を調べ、それらが停止状況であれば、ただちに人工呼吸や心臓マッサージなどの応急措置を行う必要があります。これらの措置で、数分以内に心拍が回復すればかなりの確率で助かります。呼吸・脈拍はあるが意識はない状態のときには、仰向きに寝かせ、肩の下に10 cm くらいの枕を当て、アゴを上げて気道を確保し救急車を待つようにしましょう。なお、これらの救急救命法について詳しく知りたい方は、最寄りの消防署などに問い合わせる

ビニールのカッパやゴムの長靴などは、雷には無力





程度の時間とどまると、その箇所が溶融し雷撃痕となって残ります。

1986年から1997年の10年間にわたるわが国のキャプテン・レポートをとりまとめた例では、当時の日本の主要3航空会社だけでも10年間に1291件の被雷報告がありました。これはパイロットが気づいたものだけであり、飛行した後の点検整備で機体に雷撃の痕跡が見つかる場合も多いので、実際の被雷数はこれよりも多いものと思われます。被雷の痕跡の多くは機首部分にあり、レーダを格納しているレドームと呼ばれる箇所が約2割、その他の機首部分が約5割、胴体と翼部分が約1割ずつということです。しかし、このような痕跡が残っても、飛行機の安全運航に影響を与えることはあまりありません。

アメリカでは、1980年代にF106戦闘機を雷雲の中に飛び込ませて、飛行機への雷撃を研究するというプロジェクトが行われました¹。そのとき飛行機に搭載した高速度カメラには、飛行機の先端部と後部から放電が発生するとともに、先端部の放電点が機体後部に移動していく状況が撮影されています。

最新の飛行機では、機体の軽量化のため、強化プラスチックを機体に使うようになってきていますが、強化プラスチックは一般に金属よりも

1 NASA Storm Hazard Research Program

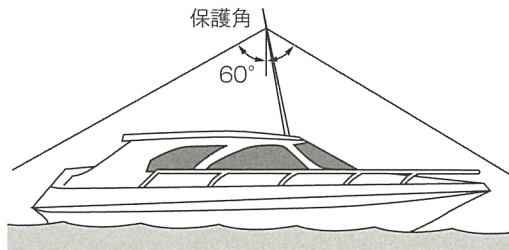
電気は通しにくいので、なにか問題が生じないか懸念されています。また、各種の制御に電子機器が多用されるようになり、雷撃時に流れる電流で生じる電磁界による影響が出る可能性もあります。最新の飛行機的设计には、これらの要素も検討されています。

船に雷が落ちたら

通常的大型船舶は金属でできており、その周りは電気を通しやすい水に囲まれているので、接地の条件は通常の陸上の建築物よりはるかによいので、耐雷対策的にはあまり問題はありません。しかし、小形船舶では木船や強化プラスチック船もあり、これらの材料は電気を通しにくいので、耐雷上問題が生じる可能性があります。

事実、1988年5月に福島県の猪苗代湖では、強化プラスチック船の「はくちょう丸」が落雷による火災発生で上部を全焼するという被害が生じています。

これ以降、このような船舶に対する避雷設備の設置規定が作られました。その内容は、建物などと同じく、避雷設備を船舶の最も高い場所(たいていマストになるでしょうが)に取り付けるとともに、雷撃時の電流を流す引き下げ導線を水中まで届くように設置するというものである。そのほか、細かい規定は建物の避雷設備の規定と同様です¹。



避雷設備を付けた船

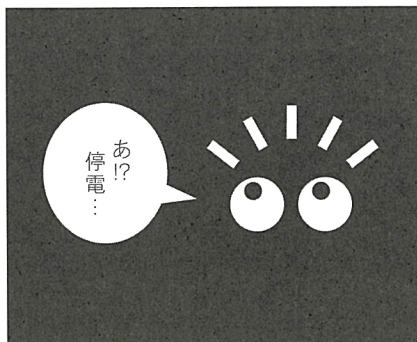
1 詳細な規定は JIS F 0303-1999「舟艇—電気装置—避雷」で定められています。

現代社会において、電気は必要不可欠のものであり、一瞬の停電でも社会システムに大きな影響を及ぼします。停電の原因で最も多いのが雷です。停電しなくても雷によって電子機器などに被害が起こることもあります。第6章では、雷が社会システムに引き起こす被害の発生するメカニズムやその対策について説明します。

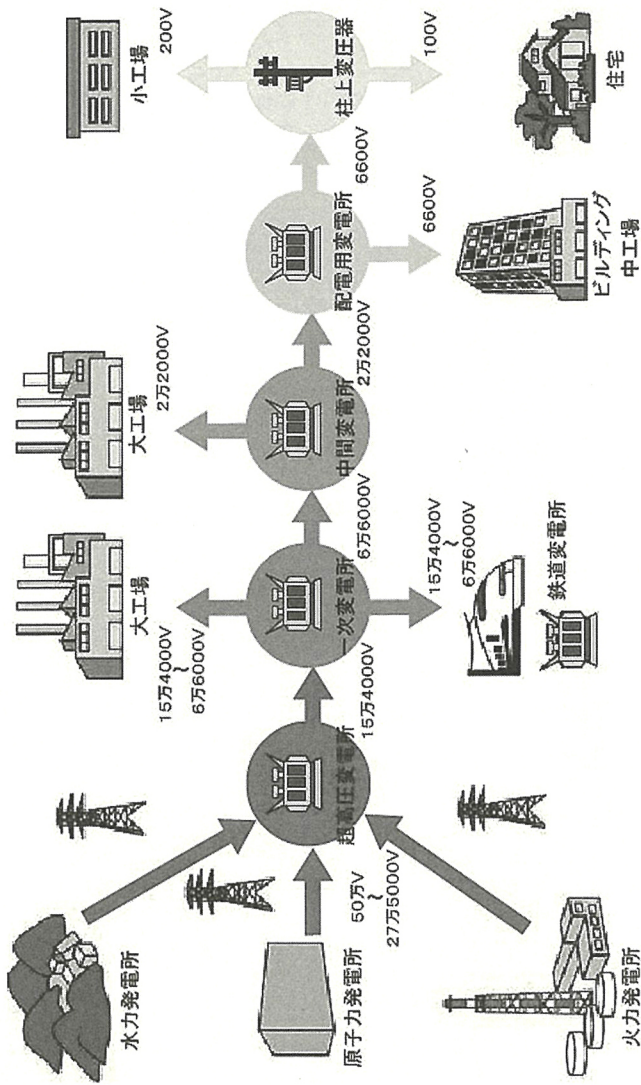
停電と現代社会

電気は、発電所で起こされ、それが送電線や配電線¹を通して、一般の家庭や工場、ビルなど、電気を使う需要家に届けられています。送電線や配電線のどこかが何かの理由で遮断されれば、そこで電気の流れが途絶えるので、その先にある家庭や工場などは停電となります。

このような停電の原因はいくつかあります。124ページの図は高圧配電線および送電線における原因別の電気事故件数ですが、この中で少ない比率を占めているのが雷です。

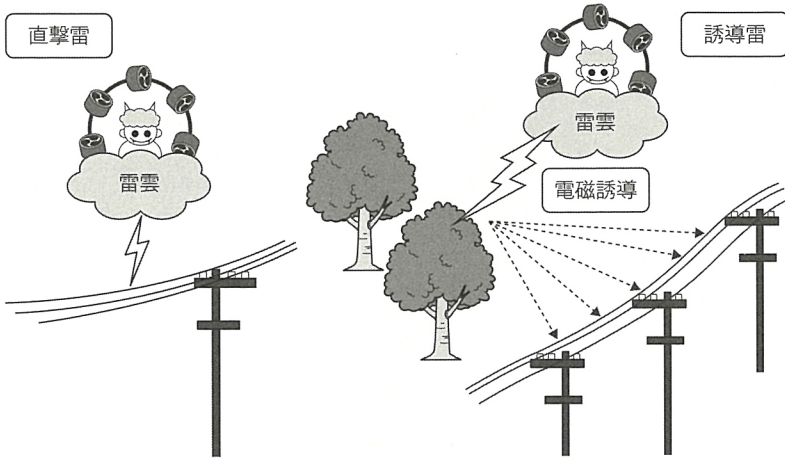


- 1 送電線とは鉄塔に電線が張られているもので、数万ボルト以上の高電圧で電気を送っています。配電線とは、いわゆる街中にある電柱にある電線で、送電線から変圧器で電圧を下げた低い電圧(通常数千ボルト)で電気を送っています。一般の家庭には、さらに電柱に取り付けられた変圧器で100ボルトもしくは200ボルトに電圧を下げて、電気が送られています。



電気が家庭に届くまで

(出典：電気事業連合会 HP「INFO BASE」)



直撃雷と誘導雷



誘導雷により配電線に火花放電が発生した例

(写真提供：一般財団法人電力中央研究所)

電線に発生して¹、事故になる場合もあり、これを誘導雷と呼んでいます。

配電線の雷に対する対応策は、基本的に送電線の場合と同じです。すなわち、(1) 架空地線で雷の直撃を防止する、(2) 生じた放電を避雷器を用いて速やかに消去する、(3) 遮断器によって回路を切り、電気の

1 雷の電流が流れることで周囲に電磁界が発生しますが、配電線全体が一つのアンテナのように働き、そこに電圧が発生するというのが、誘導雷のごく簡単な発生メカニズムです。

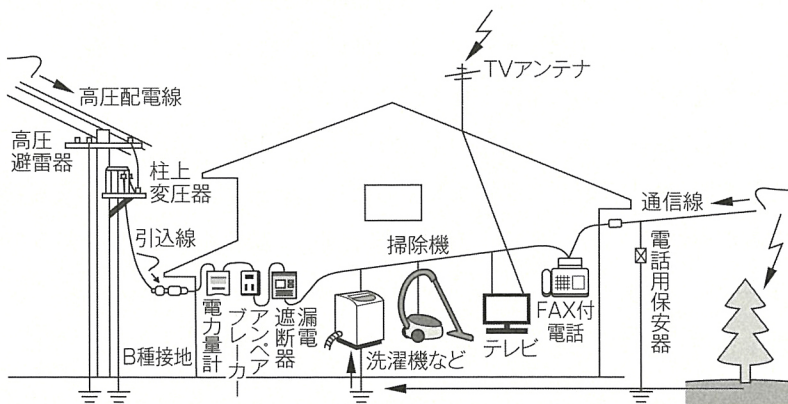
流れを一旦止めて放電を消す，です。

新たな雷害問題

はじめにも述べたように，近年はコンピュータなどの電子機器を用いて，社会の情報ネットワーク化が進むとともに，さまざまな機器の制御も電子化が進んでいます。その結果，利便性，効率性は向上したものの，雷などで生じる外部ノイズに対しては著しく脆弱になっているのが現状です。

機器に使われている電子回路は通常動作している電圧が低いため，外部から侵入する過電圧に弱い上に，雷によるノイズが入ると，それが機器の破壊にいたらないわずかなものであっても，機器の誤動作を引き起こし，システム全体に影響を与えるおそれがあるのです。さらに，大きなオフィスや工場では，全体がネットワーク化されており，一部の建物に侵入した雷のノイズが会社全体に広がりかねません。

家庭の中を見ると，機器につながっているものには，アンテナ，電源線，通信線，接地線があります。このうち，アンテナを除く箇所は，そこに雷が直撃しなくても，周辺に落ちた雷による誘導雷が侵入してくる可能性があります。このような誘導雷による機器の損傷もしばしば発生



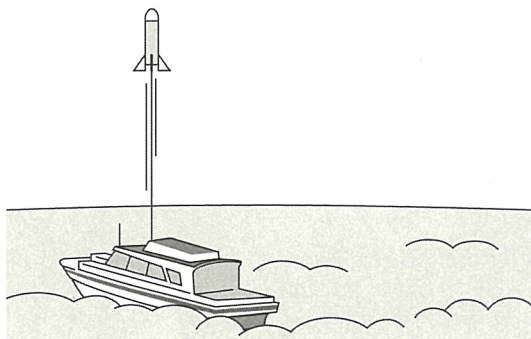
一般家庭への雷の侵入経路

自然現象である雷を人為的にコントロールしようとする試みもされています。また、地上に落ちない雷もあり、雷雲がなくても発生する雷もあります。第7章では、そのような変わった雷現象について、紹介します。

ロケット誘雷

雷を研究する立場からいえば、落雷する位置とその時間が予測できると、詳細な観測が可能となり、現象の解明が大きく進められます。しかし、雷は自然現象であり、いつどこに落ちるかを正確に予測するのは困難です。現在、落雷が高頻度で発生する高い鉄塔での雷観測が世界各地で行われていますが、これらの鉄塔にしても、雷が落ちるかどうかは天任せです。

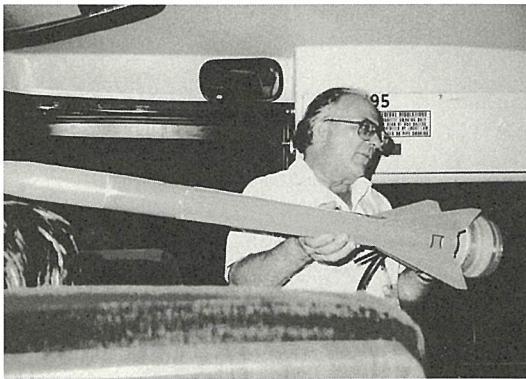
そのため、雷を所定の位置に人工的に落雷させます、誘雷による研究も行われています。その方法はいくつか考えられていますが、代表的なものはワイヤ付きのロケットを打ち上げて、そこに落雷させようとするものです。話だけ聞くと荒唐無稽(こうとうむけい)のように思えるかもしれませんが、この方式による誘雷(以下、ロケット誘雷と記述)は世界各地で多数成功しています。最初にロケット誘雷が成功したのは1960



年です。このときにはロケットはフロリダ沖合の船上から打ち上げられました。

1973年にはフランスで陸上でのロケット誘雷が成功しました。わが国でも、1970年代から90年代にかけて名古屋大学のグループにより、石川県の河北潟や奥獅子吼でロケット誘雷実験が盛んに行われました。アメリカでは、フロリダ大学がロケット誘雷の実験を長年にわたり行っています。

雷雲がきたときにワイヤ付きロケットを打ち上げると、ロケットが数百mの高さまで上昇したところで、ロケット先端から雷雲に向かって上向きの雷放電が発生し、これが雷雲に届くと雷放電となります。ロケットといっても、宇宙に打ち上げるような大型のものではなく、写真にあるような手にもてるほどの大きさです。



ロケット誘雷に使用するロケット

142ページの写真はフロリダ大学のロケット誘雷実験場です。写真中央にあるのがロケットランチャー(発射台)で、その上部には落ちてきた雷を確実に捕捉するための金属リングが設置されています。このランチャーは地上に置かれていますが、奥のほうには台の上に置かれたランチャーもあります。実際に誘雷した状況が142ページの下の写真です。雷

著者略歴

新藤 孝敏(しんどう・たかとし)

- 1978年 東京大学大学院工学研究科電気工学
専攻修士課程修了, 同年, 電力中央
研究所に入所。以来, 電力設備の外
部絶縁設計, 長ギャップ放電, 雷の
研究に従事
- 1991年 博士(工学)(東京大学)
- 1998年 電力中央研究所狛江研究所電気絶縁
部部長
- 2001年 IEEE Fellow
- 2015年 電力中央研究所 研究アドバイザー

雷をひもとけば—神話から最新の避雷対策まで—

2018年4月10日 初版 1刷発行

発行者 藤 原 昇

発行所 一般社団法人 電 気 学 会
〒102-0076 東京都千代田区五番町6-2
電話(03)3221-7275
<http://www.iee.or.jp>

発売元 株式会社 オーム社
〒101-0054 東京都千代田区神田錦町3-1
電話(03)3233-0641

印刷所 株式会社 三秀舎
製本所