

雷は雷雲中で発生した電気の放電現象です（巻頭カラー口絵 1～6）。まず初めに電気と放電について理解しましょう。目にする全ての物質は原子の集まりです（図 1-1）。この原子は原子核と電子で成り立っていて、さらに原子核内部には陽子と中性子が存在しています。陽子と電子には電荷と呼ばれる電気の性質があり、それぞれプラス（正）電荷、マイナス（負）電荷を持っています。中性子は電氣的には中性（プラスでもマイナスでもなく電荷がない）なので、陽子と中性子で作られている原子核はプラスの電気をもっています。自然界ではプラスの電荷は陽イオン（原子ないしは複数の原子が集まった分子から電子の一部がなくなったもの）、マイナスの電荷は、電子ないしは陰イオン（原子ないしは分子に電子がいくつかついていたもの）で存在します。これらのプラスとマイナスの電荷はお互いに引き合い（引力）、同じもの同士では反発する力（斥力^{せきりょく}）が働きます（クーロン力、図 1-2）。電荷量（電気の量）が大きいほど、引力や斥力は大きくなります。

身の回りのものの多くはプラスとマイナスの電荷が等量で、全体としては電氣的には中性です。これに手を加えることにより、物質を電氣的にプラスやマイナスの状態にできます。簡単な例では、下敷きをセーターに擦ることでセーターの電子の一部が下敷きに移動し、下敷きは電子が陽子より多くなるためマイナスの電気を運び、セーターは電子が陽子より少なくなるのでプラスの電気を運びます。この電気を持つことを帯電と言います。さらにプラスとマイナスに帯電した物質が十分近づいた時に、空气中を電子がプラスの電荷に飛び移ることがあり、ブ

雷にはどんな種類があるの？

Question 5

Answer

吉田 智

雷は大きく分けて、雷雲と地面の間の放電（落雷など）で4種類と雷雲内部だけの放電（雲放電^{くもほうでん}）があり、全部で5種類あります。まずは落雷に代表される、雷雲と地面の間の放電からご紹介します。このタイプは雷雲内の電荷領域と地面の間が放電路でつながり、雷雲内電荷が中和される雷です（図 5-1）。落雷の場合、雷雲内でリーダが発生し、下向きにリーダが伸び、最終的に地上に達します。リターンストローク（Q8）で中和される雷雲内の電荷の極性で、落雷はさらに二つに分けられます。それぞれ雷雲内のマイナス（負）電荷を中和する負極性落雷、プラス（正）電荷を中和する正極性落雷です（図 5-1a, 1b）。巻頭カラー口絵 1 は負極性落雷の例で、口絵 1 のように雷雲から大きく離れた地点に落雷する場合があります。落雷地点付近に立っている人にとっては、上空には雷雲がなく晴れているのに落雷が発生したように感じます。このような落雷を晴天の霹靂^{せいれき}と呼ぶことがあります。（霹靂は雷のこと。滅多に起こらないことの例え。Q54）。

雷雲と地面の間の放電には、地上の尖った場所（鉄塔や樹木の先端）でリーダが発生し、雷雲に向かって上向きに伸びていき、雷雲内の電荷を中和する雷があります（Q10）。この雷は上昇する様から、上向き雷放電^{うわむらいほうでん}と呼びます（図 5-2c, 2d）。（「上向き雷」や「上向き落雷」と呼ぶこともあります。）上向き雷放電も落雷と同様に、雷雲内の中和した電荷の極性で2種類に分けられ、雷雲のマイナス（負）電荷を中和するものは上向き負極性雷放電、プラス（正）電荷を中和するものは上向き正極性雷放電です。

雷はなぜジグザグになるの？

Question 9

Answer 吉田 智

雷は枝分かれをしながらジグザグに進みます。これも雷の特徴の一つです。落雷や雲放電くもほうでんの写真（巻頭カラー口絵 1~3）でもその様子がはっきりとわかります。図 9-1 はステップトリーダが地上に到達する直前を高速ビデオカメラで捉えた画像です。ステップトリーダが複雑に枝分かれし、ジグザグに地面付近まで近づいています。

落雷の場合、雷雲内で最初の放電が発生した後、数mから数十m進んで数 μ 秒の停止を繰り返すステップトリーダが、大気をプラズマ化しながら進みます（Q7）。ステップトリーダがジグザグに進むので、結果的に雷はジグザグに進む様に見えます。では、ステップトリーダはなぜジグザグに進むのでしょうか。この極めて基本的な問いはかなり昔から研究されていましたが、現在でも完全には解明していません。ここでは、高速ビデオカメラ撮影による最新観測結果から考えられる、ステップトリーダがジグザグに進む理由の一つを紹介します。

図 9-2 はステップトリーダが雷雲から大地に向かっていく途中の模式図で、その右側にステップトリーダの先端部分を拡大しています。図 9-2a ではステップトリーダが停止している状態です。停止と言っても数 μ 秒程度の非常に短時間です。ステップトリーダの先端（下側）には大量の電子が存在しマイナスに帯電しています（Q7）。この先端のマイナスの電荷に伴う強い電界により、数m離れた場所に、スペースリーダと呼ばれるプラズマ状態が発生することが観測からわかっています（スペースリーダ発生前にストリーマという状態が発生していますが、ここでは省略します）。この例では α 、 β 、 γ の三つのス

地面から雷雲にむかって進む 雷があるって本当？

Question 10

Answer

吉田 智

1

「雷」の正体

発生数は少ないですが、地上から雲に向けて昇っていく雷が存在します。これを上向き雷放電うわむらいほうでんと言います（Q5）。巻頭カラー口絵2は上向き雷放電です。図10-1は冬の日本海沿岸で発生した上向き雷放電をビデオ撮影した動画から5コマを抜き出したものです。矢印で示す鉄塔の先端から放電が始まり、枝分かれしながら上向きに進んでいきます。上向き雷放電は、鉄塔の先端など高く尖った場所から発生し、上向きにリーダが伸びていく雷です。上向き雷放電のリーダは最終的には雷雲の電荷領域に到達し雷雲内電荷を中和します。ご興味ある方は、是非ともインターネットで上向き雷放電の英訳の“upward lightning”で動画検索してください。より詳細な上向き雷放電の動画をご覧ください。

写真から落雷と上向き雷放電の判定が可能です。巻頭カラー

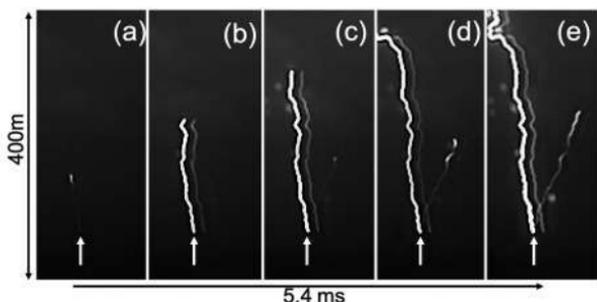


図10-1 鉄塔の先端から発生した上向き雷放電（提供 岐阜大学 王教授）
高速ビデオカメラ撮影した動画から5コマ（5.4m秒）、上向き雷放電の下部400mのみを表示。矢印は鉄塔の先端を示す。明るく白く見えるリーダが上向きに進んでいく。窓ガラスに反射したリーダが薄く右側に写りこんでいる。

雷は全地球で1秒間に約50回発生していることが、雷の発光を観測できるNASAの人工衛星OrbView-1(Microlab)とJAXA/NASAによって打ち上げられた熱帯降雨観測衛星TRMMによってわかりました(Q47)。また、雷の9割が海上ではなく陸の上空で発生し、赤道付近は特に多くの雷が発生することがわかっています(巻頭カラー口絵7)。その理由は、陸は水に比べて比熱(1gあたりの物質の温度を1℃上げるのに必要な熱量)が小さいので、太陽光によって温められやすく、雷雲の発生に適した大気的不安定な状態を起こしやすいからです。

衛星のデータで世界の雷を詳細にみていくと、ホットスポットと呼ばれる局所的に雷活動が活発な地域があります。世界で雷活動が最も活発なのは、南米ベネズエラ北西部のマラカイボ湖(Q22)とその周辺(コロンビアも含む)、アフリカ・コンゴ民主共和国の東側ということがわかります。いずれも、1km²あたり年に100回以上の雷が発生するところです。コンゴ民主共和国では、大西洋からの局地的な対流と湿気を含んだ気団がアフリカ大陸に移動して山岳にぶつかるため、年間を通じて雷雲が頻繁に発生します(Q11)。南米ではボリビアのアンデス山脈近傍、ヒマラヤ山脈に近いパキスタンやインド・バングラデシュ国境など、山岳地帯で雷の発生頻度が高い地域があります。海からの暖かく湿った風と山岳などからやってくる冷氣などで大気の状態が不安定になり(Q11)、雷が多く発生する地域もあります。マラッカ海峡(マレー半島とインドネシア・スマトラ島の間の海域)、オーストラリアの北西部、サウジアラビア・イエメンなどでは、海・陸と大気が相互作用す

落雷は雷雲と電気を流す性質のある地表との間で起きる放電現象です。一方、電気が流れる領域は、地表だけでなく上空にもあります。高度約 80km 以上に存在する電離圏（100km 以上は宇宙）ではごく薄い大気がプラズマ化（Q6）して、電気が流れやすくなっています。それならば、雷雲の下だけではなく、上にも放電が発生するのでは？と期待が高まります。その予想を発表したのは、放射線の経路を目で見ることができ「霧箱」の発明でノーベル物理学賞を授賞したウィルソン（Q53）でした。

彼は、1924 年の論文で「雷雲から地表への雷によって雷雲内の電気がアンバランスになると、雷雲から上空の密度の小さい空気中で放電も発生する」予想を発表しました。その放電が確認されるのは半世紀以上後になります。1989 年、超高層探査ロケット搭載用の高感度ビデオカメラのテスト撮影を地上で行っていた時に、雷雲の上空に発光現象が映っていたのです。この上空の発光現象は、飛行機のパイロットや船乗りなどの間では知られていましたが、写真などの確たる証拠がなかったのです。映像の取得に成功した後も、しばらくはその性質がよくわからなかったため、不思議な小さな生きもの、妖精を表す文学的な表現“スプライト (sprite)”と呼ばれるようになりました。

後は、このスプライト（巻頭カラー口絵 11）のような雷雲上空の放電現象が次々と見つかりました。エルブス（図 32-1）と呼ばれる発光現象は、落雷によって発生する電波が宇宙へ向かう時に、空気の密度が小さい電離圏中の電子を振動させ、そ

電力，通信，鉄道などインフラの雷対策は，大きく，雷を受けないための対策と，雷を受けても障害が発生しないための対策の二つに分けることができます。

雷を受けないための対策として，避雷針（Q42）の他，雷多発地域の送配電線に施されている架空地線をご紹介します。鉄塔や電柱によって，空中に架設された送配電線を架空線と呼びます。架空地線とは，図 44-1 のように送配電用の架空線よりもさらに高いところに架設されている接地（アース）された線，つまり架空接地線のことです。架空地線は，鉄塔や電柱の最上部で上空からやってくる落雷を送配電線よりも先に受け，接地されていることによって雷電流を効率良く大地へ逃がす役割を担っています。送配電線は接地してしまうと電力が送れないので，碍子と呼ばれる絶縁物によって鉄塔や電柱と絶縁されています。一方，架空地線はその両端や，鉄塔・電柱を通じて大地に接地されています。架空地線に落雷することで，送配電線への落雷を避け，架空地線に生じる直撃雷サージ（Q43）を大地へ逃がします。架空地線または鉄塔に落雷が発生した場合には架空地線に直接雷サージが流れます。鉄塔で送電線を支える碍子の両端には，送電電圧と接地電位がかかるので，落雷時には瞬間的に大きな電圧が加わります。この電圧に耐え切れずに碍子が絶縁破壊する現象を，逆フラッシュオーバーと呼んでいます（図 44-1）。絶縁破壊が瞬間的で絶縁を回復できた場合には電力線への雷サージが発生し，絶縁破壊が永久的な場合は送電不可となります。鉄道用の送電線にも，地域によって架空地線が設けられており，架空地線の有無を見ることでその地域が雷