

雷放電と積乱雲の科学

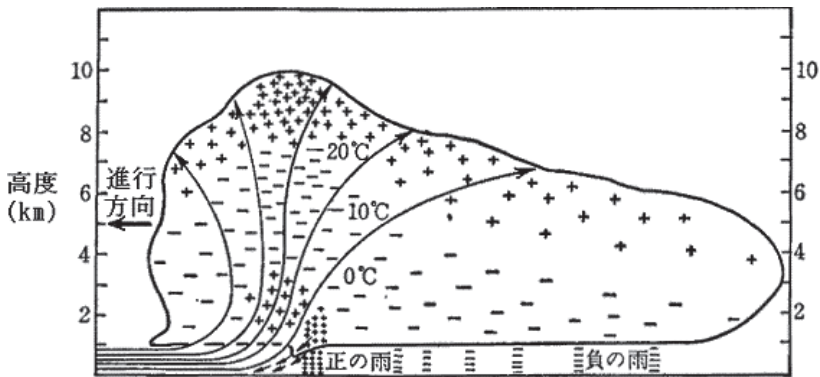
大阪大学大学院工学研究科 牛尾 知雄

1. はじめに

太陽からの光によって地表面が暖められると、対流が生じて積乱雲が発達する。この積乱雲は、発生、発達、消滅といった特有のライフステージを持ち、発達期の霰(あられ)の生成と共に雲内でプラスとマイナスの電荷に分離し、雷放電を生ずる。この一連の現象を雷放電現象という。そして、このような積乱雲は、時として竜巻や豪雨を伴い、我々に被害をもたらす。ここでは、このような雷放電現象と積乱雲について、その発生や仕組みなど基本的な点について書いてみたい。

2. 雷放電と積乱雲

上述のように積乱雲が発達するにつれて、雲内で電荷分離が生じ、雷放電を結果として生む。何故、雲内で電荷が分離するのだろうか？これに関しては、現在においても、その仕組みが解明されているわけではない。現在、最も信頼されている説を提唱したのが、高橋劭(つとむ)博士であり、その説は着氷電荷分離仮説と呼ばれている。これは、雲内でマイナス10度C近辺の高度(概ね夏季においては6km前後)において、霰と氷晶(小さな氷の結晶)が衝突する際に、霰がマイナスに、氷晶がプラスに帯電するというのが基本的な考え方である。その結果、積乱雲の上部にプラス、中部にマイナスの電荷が分布するような構造になる(図1参照)。図1をよく見ると、実は最下部にも小さなプラスの電荷領域も存在するが(これをポケット正電荷領域という)、その仕組みについては、ここでは紙面の都合上、割愛する。



雷雲の電荷分布と気流を示すSimpsonのモデル
(Simpson and Scrase, 1937)

図1 積乱雲の電荷構造

以上のような仕組みによって積乱雲内で電荷分離が進み、蓄積されていくと放電という形によってプラスとマイナスの電荷が中和される。これを雷放電という。この雷放電は、大別して雲内で放電が完結する雲放電と地面に放電する落雷の2種がある。さらに、雲内のプラスが地面に放電する場合とマイナスの電荷が放電する場合の2種に落雷は分類され、それぞれ、正極性落雷、負極性落雷と呼ばれている。いわゆる雷として皆に良く知られているのは、このような落雷のことであり、負極性落雷が落雷の中で大多数を占めている。

落雷は、目で見ると一瞬の現象であり、その細かな構造を見ることは難しいが、様々な研究機器を用いることによって特徴的な過程を有していることがわかっている。例えば、負極性の落雷を例にとると、まず雲内で放電が開始する。その後、放電は進んでは止まり、進んでは止まりといったステップ状に枝分かれしながら地面に向かう。図2に雷放電の写真を示す。放電が下向きに枝分かれしている様子が捉えられている。これをステップトリーダと呼んでいる。そして、地面近くになると今度は逆に、地面からお迎えのリーダが進んで、雲内から伸びてきたステップトリーダの一つと結合して、大きな電流が流れる。このとき、強い発光が地面から雲内に向けて、光の速度の3分の1程度の速さで上昇する。これを帰還雷撃と呼んでいる。流れる電流の平均は、30キロアンペア程度という報告がある。我々に実際の被害をもたらすのは、この瞬間である。その後、再度、雲内から先述のステップトリーダに類似した、しかし、連続的にもっと速く進むダートリーダと呼ばれる放電が進み、再度地面に到達した後、再び帰還雷撃を生ずる。これを後続帰還雷撃と呼んでいる。このように、落雷は、帰還雷撃過程を何度も繰り返すことによって終了する。何回繰り返すのかについては、平均3回から4回程度という報告がある。

さらに、このような落雷が雲内から始まらずに、地面から雷雲に向けて進展する場合がある。これ



図2 雷放電の写真(Wikipediaより引用)

を上向き雷といい、特に冬季日本海側の雷放電において良く見られる。この冬季日本海側の雷放電は、その他に、単発の一回の放電のみで雷活動が終わる一発雷があったり、夏季に見られる落雷に比して何桁も大きな電流値や中和電荷量があること、多地点へ落雷することなど数多くの特徴を持っている。なぜ冬季だけこのような特徴を持っているのか、未だ良く分かっていない。

一方、このような落雷を人為的に発生される実験も行われている。ロケット誘雷実験と呼ばれるが、長さ数十cm程度の小さなロケットにワイヤーが接続されており、雷雲に向けて発射することによって雷放電を誘発させるものである。普通、雷放電の起こるタイミングと場所は自然が決めるものであり、その予測は極めて難しい。それに比して、ロケット誘雷実験の場合は、ロケット発射のタイミング、場所共に人間側が決めることができるため、色々な実験や雷放電の測定を行い易いという大きな利点がある。

ところで、このような雷放電の内、大きな中和電荷量を有する正極性の落雷に伴って、積乱雲の上空で発光する現象が1990年代に報告された。この宇宙へ向けて放電する現象は、高高度発光現象と呼ばれ、その発見以来、様々な専門家の注目を世界的に集めた。図3は、高高度発光現象を模式的に示したものである。これは積乱雲を横から水平に見たときの図であり、横軸は地平線を縦軸は高度と考えて頂きたい。積乱雲の雲頂は十数km程度以下であり、その中で落雷は地面(この図の場合、横軸

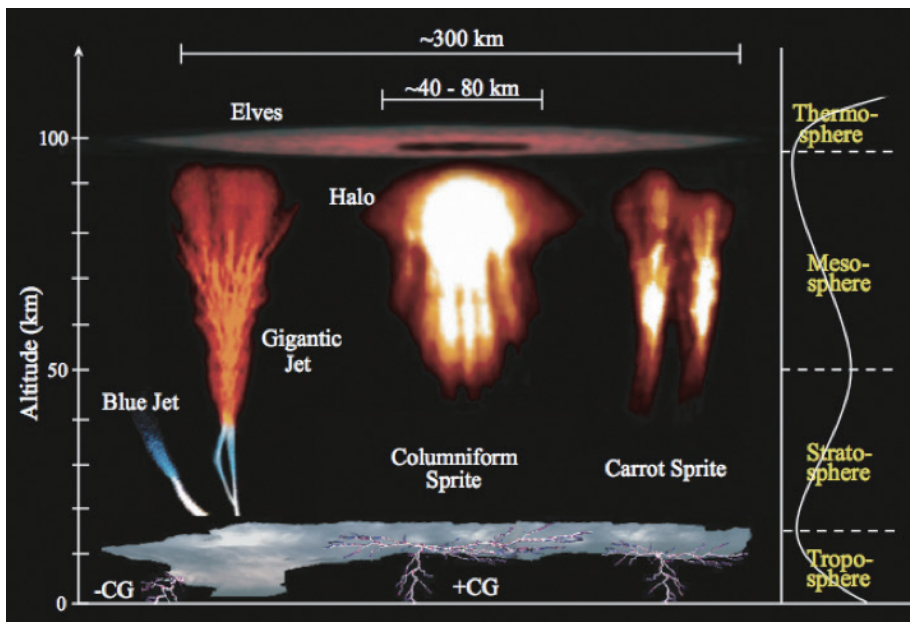


図3 高高度発光現象(佐藤)

上)に放電する。その一方、高度50kmから上空に図中主に赤色で表されているような形状を示す現象が高高度発光現象であり、この高高度発光現象もさらに、レッドスプライトやエルプスなど、形などによって、幾つかの種類に分類されている。しかしながら、どうしてこのような特徴的な形状を持っているのか、なぜこのような現象が生ずるのか等、基本的な性質も中々分かっていないのが現状である。今後の研究の進展を待ちたい。



図4 雷放電観測用のアンテナ

3. 雷放電と積乱雲の観測

以上見てきたように、光の観測によって数多くの雷放電に関する特徴が明らかになっている。一方で、雷放電は電流が流れる現象であるため、電波が放射される。夏季の夕方などにAMラジオをつけると時折ジャリジャリといったノイズを聞くことがある。これは雷放電によって放射される電波を受信したものであり、この電波を詳しく調べることによって光では見ることの出来ない雲内の活動を調べることが出来る。このような雷放電観測の様子を示す写真を図4に示す。図4に示されているようなアンテナを、例えば、多地点に配置し、GPSと同様な原理によって雷放電の進展様相を可視化した例を図5に示す。横軸は方位角であり、縦軸は仰角に対応する。上空で起こっている雷放電を観測点から見たように再現していると考えて頂きたい。図中白い点が放電点(正確には雷放電に伴って放射される電磁波の源)に対応しており、本来、光の観測では見ることのできない雲内の放電進展様相が再現されている。アニメーションでご紹介出来ないのが残念であるが、電波を用いることによって、詳細な放電像を再現することが可能になってきた。

また一方、より広い領域にわたって雷放電の観測を行うには、人工衛星による宇宙からの雷観測が有効である。このような観測はアメリカ航空宇宙局(NASA)によ

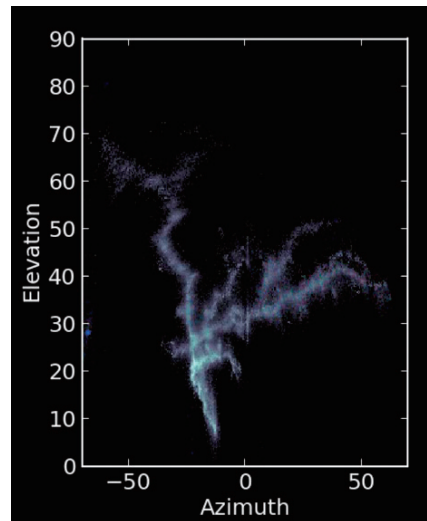


図5 電波による放電の可視化例 (M. Stock)

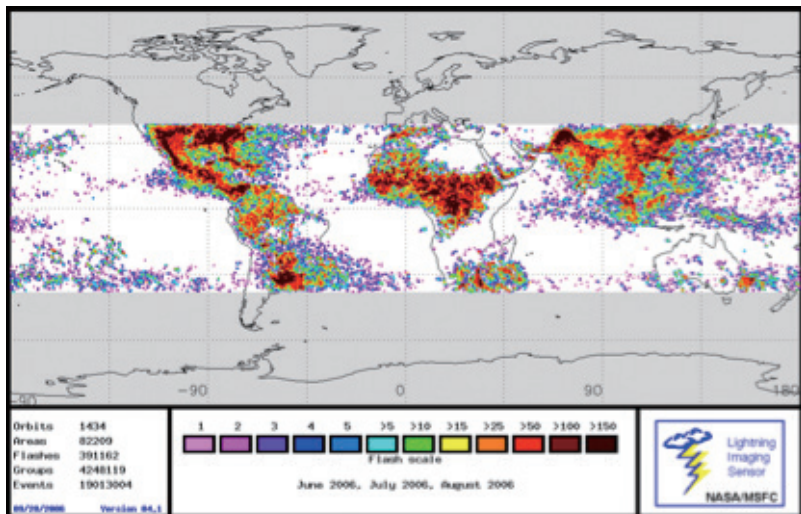


図6 雷放電の全球分布(NASA/MSFCのwebより引用)

で行われており、衛星から観測された全球の雷放電分布を図6示す。この図から明らかのように、雷放電が主に陸上に分布していること、最も雷活動が活発な地域が中央アフリカや北米大陸に見られることなどが示されている。

このような雷放電を生み出す親は積乱雲である。冒頭に述べたように、積乱雲は雷放電のみならず、竜巻や豪雨など我々の日常生活に甚大な被害をもたらす種々の現象を生み出す。こうした積乱雲を観測する手段は、電波を用いたレーダ観測が主な手段となる。図7に時々刻々と変化する積乱雲の構造を短時間に観測することが可能なフェーズドアレイレーダの写真を示す。このようなレーダを用いることによ

って、雷放電の親となる積乱雲のどの場所で、どのようにして雷放電が開始するのか観測が出来るようになってきた。図8に実際の積乱雲の構造のレーダによる観測例を示す。図の赤い色が降雨量の強い領域を示している。これは大阪北部から京都にかけて形成さ



図7 大阪大に設置されているフェーズドアレイレーダ

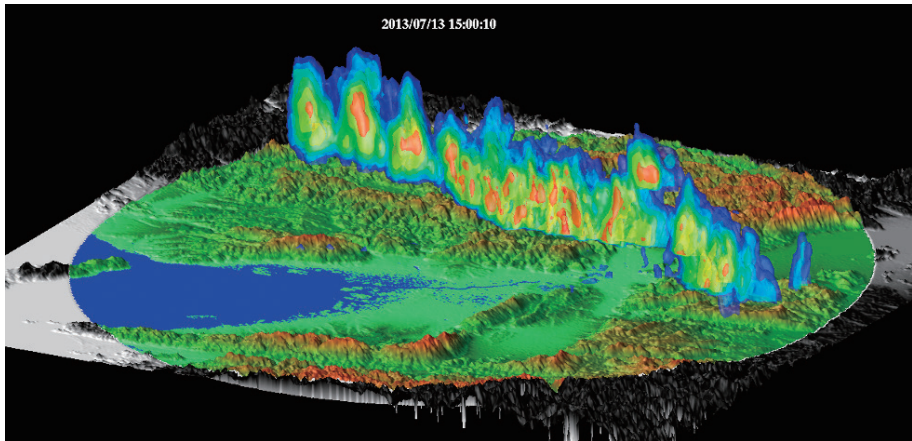


図8 フェーズドアレイレーダによって観測された降雨の構造

れた降水帯であり、その中で降水の強い領域や弱い領域などがどのように形成されて、また地表面に強い降水をもたらすのが可視化されている。今後こうした高分解能のレーダと雷放電の位置標定システムを併用することにより、雷予知の糸口をつかむことが出来るようになることが期待される。

4. まとめ

以上見てきたように、本稿では、雷放電と積乱雲の生成と過程、そしてそれらを観測するための手段について記述した。分かり易さ、平易さを優先したため、正確さに欠ける箇所があったかもしれない。今後、このような様々な観測技術が併用されて、雷放電や豪雨、竜巻などの予測技術が進むであろう。

著者紹介 牛尾 知雄(うしお ともお)



大阪大学大学院工学研究科 准教授。

電磁波を用いたリモートセンシング技術、雷放電、レーダ、宇宙からの地球環境計測などに関する研究に従事。国際宇宙ステーションからの雷放電とスプライトの観測研究プロジェクトやフェーズドアレイ気象レーダの研究開発などを行っている。平成26年NASA表彰、文部科学大臣表彰など受賞。