

## 雷・雷雲から放出される放射線

大阪大学 大学院工学研究科 和田 有希

### 1. はじめに

雷はよく知られている気象現象で、一瞬の光と、けたたましく鳴り響く轟音に恐怖を感じた方も多いのではないのでしょうか。また雷が発生したときにAMラジオにノイズが入ることからわかるように、雷は電波も出しています。一方で近年の研究により、雷あるいは雷雲から放射線が出ているということもわかってきました。本稿では雷や雷雲の基本的な性質に触れながら、雷・雷雲から放出される放射線について解説します。

### 2. 雷雲の形成と帯電のメカニズム

空を見上げると、快晴の日でなければ雲が目に入ります。実は雲は10種類(十種雲形と呼ばれる)に分類されますが、その中で雷と関係するのは主に積乱雲(図1)と呼ばれる雲です。積乱雲は地表近くから高度10km以上まで発達する背の高い雨雲で、雷だけでなく豪雨や竜巻、雹(ひょう)の原因にもなったりします。



図1. 積乱雲と雲放電



図2. あられの一例

積乱雲の中では激しい上昇気流が発生し、降水粒子が生成して激しくぶつかりあっています。降水粒子というと雨を思い浮かべますが、大気は高度が高くなるほど気温が低くなるため、積乱雲が発達するような高度3-5km以上では雨粒よりも霰(あられ: 図2)や雹(ひょう)、氷の結晶(氷晶)といった凍結した粒子が多く存在します。地上では降ってくる間に融けて雨として観測されることが多いですが、融けきらずに降ると「ひょう」や「あられ」として観測され、車や建物に被害が出る場合があります。

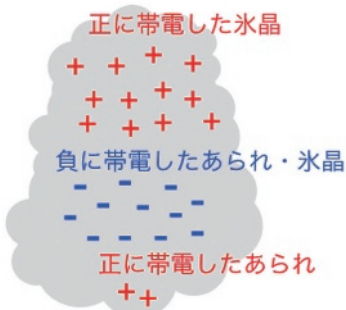


図3. 雷雲内の電荷構造

あられや氷晶が積乱雲の中で激しくぶつかり、下敷きで髪を擦ったときと同じように静電気が発生します。周囲の気温が低い積乱雲上部では、あられが負の電荷を、氷晶が正の電荷を帯びます。あられは数ミリくらいの氷の粒で、氷晶は雪やあられに成長する前の、より細かい氷の結晶です。すなわち氷晶よりもあられのほうが重いのので、ぶつかりあったあとは正に帯電した氷晶が上へ、負に帯電したあられが下へと分かれていきます。こうして積乱雲の上層に正の電荷が、中層に負の電荷がたまり、電荷分離がおきます。さらに

周囲の気温が高い積乱雲下部では、あられが正の電荷を、氷晶が負の電荷を帯びることがあります。そのため、積乱雲は上層に正の電荷をもつ氷晶による正電荷層、中層に負の電荷をもつあられと氷晶による負電荷層、下層に正の電荷をもつあられによる正電荷層、という3層構造をもつと考えられています(図3)。

### 3. 雷放電の種類と開始のメカニズム

積乱雲の中で電荷分離が進むと、いよいよ雷が発生します。雷にもいくつかの種類が存在します。まず大きく「雲放電」と「対地雷」の2つに分かれます。雲放電は雲の中で完結する、地面に落ちない雷です。稲妻が雲だけで完結せず、地面まで到達すると対地雷となります。一般に落雷と呼ばれているのは対地雷のことです。対地雷の方が流れる電流や発生するエネルギー、光や音が雲放電よりも大きい傾向にあります。

対地雷の中でも「下向き放電」と「上向き放電」があります(図4)。落雷と呼ばれるように、対地雷の多くは積乱雲から地面に向かって落ちる下向き放電です。一方でビルや鉄塔など高い建物から雲に向かって稲妻が延びることがあり、上向き放電と呼ばれます。上向き放電は稀ですが、北陸で発生する冬の雷においては上向き放電が多発することがあります。



図4. 下向き放電と上向き放電



図5. 圧電素子による火花放電

雷雲の中で雷はどのようにして開始するのでしょうか。意外に思われるかもしれませんが、雷が開始するきっかけは実はよくわかっていません。冬に静電気が溜まって発生する、あるいはライターやガスコンロなどの着火時に発生する火花は「絶縁破壊」と呼ばれます(図5)。絶縁破壊には非常に強い電場が必要です。電場は1cmあたりにかかっ

ている電圧のことを指します。例えば地上の大気中では1cmあたりおよそ3万ボルトが必要です。コンセントに來ている電圧は100Vですから、数cmであっても絶縁破壊を起こすためには遥かに高い電圧が必要であることがわかります。

ではそのような強い電場が雷雲内に存在するのでしょうか。1990年代にアメリカ・オクラホマ州で気球を用いた観測が精力的に行われ、雷雲内の電場の計測も行われたところ、最大でも絶縁破壊に必要な電場の10分の1ほどしか観測されませんでした。このことから、雷発生のかっけは我々が想像しているような絶縁破壊とは異なるメカニズムではないか、と考えられるようになりました。絶縁破壊以外でどのように雷が発生するのかについて、いくつかの仮説が打ち立てられていますが、その1つである「相対論的逃走電子なだれ増幅モデル」について、次の章で説明します。

## 4. 雷・雷雲から放出される放射線

ここまで雷や雷雲の一般的な性質を述べましたが、ここから放射線の話に移ります。そもそも放射線とは高いエネルギー、すなわち高速で移動する粒子のことです。放射線には様々な種類がありますが、ここで登場するのは高速で移動する電子と、高いエネルギーをもつ光であるX線・ガンマ線です。

皆さんの中には胸部レントゲン検査や、骨折していないか調べるためのレントゲン検査を受けたことがある人があると思います。レントゲン検査はX線を利用していますが、このときX線は加速器を用いて作られます。加速器とは、高い電圧を印加して電子などを加速させる装置です。加速された電子はターゲットと呼ばれる金属に衝突することで、制動放射線と呼ばれるX線を放出します(図6)。

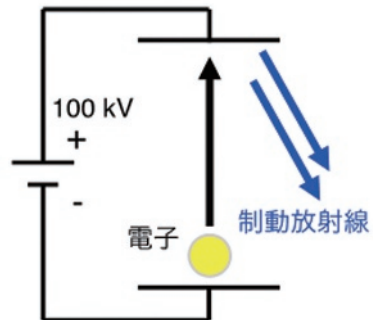


図6. レントゲン装置の原理

実は雷や雷雲においても、同様に電子を高いエネルギーまで加速して、放射線を出しているということが1980年代からわかってきました。ただしレントゲンと違うのは、雷雲の周りには大気が存在するという事です。大気中に存在する窒素や酸素といった原子は、電子とぶつかることで電子を止めようとします。レントゲン装置を含む加速器は、電子の通り道を真空にして、エネルギーの損失を防ぎます。

では原子に満ちあふれた大気中ではどのように電子が加速されるのでしょうか。実は最初の説「相対論的逃走電子モデル」を提案したのはおよそ100年前の1925年、霧箱の発明でも有名なC.T.R.ウィルソンです。図7に示すように、大気中において電子にかかる抵抗力が一時的に小さくなるエネルギーがあります。このとき、絶縁破壊電場のおよそ10分の1以上がかかっているならば、電子が受ける抵抗よりも加速する力が勝り、電子は大気中であっても加速することができます。

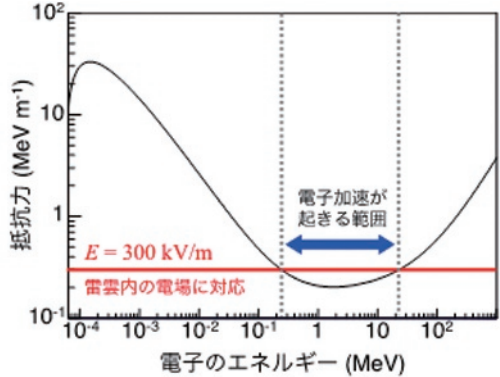


図7. 大気中で電子が受ける抵抗力

ここで注意が必要なのは、加速力が勝るのは一部のエネルギーだけであり、電子が加速されるには最初からある程度のエネルギーをもつ必要があります。このような加速の「種」となる電子は、例えば宇宙から到来する高エネルギー粒子である宇宙線が大気中で作り出す電子が担っているのではないかと、という仮説もあります。また一度加速が始まると、加速された電子が大気中の原子にぶつかって他の電子を叩き出し、その電子も加速され他の電子を叩き出し、というサイクルが生まれます。こうして高エネルギー電子が次々と生成される仕組みを、雪山で些細なきっかけで「なだれ」が発生することに例えて、「相対論的逃走電子なだれ増幅」と呼ばれます。

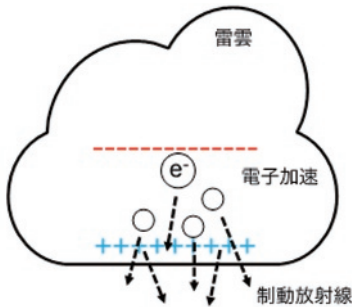


図8. ガンマ線グローの模式図

相対論的逃走電子なだれ増幅が実際に観測されたのは、1980年です。アメリカで航空機に放射線検出器を載せて雷雲内を飛行したところ、数秒にわたって放射線量の増大が観測されました。現在ではガンマ線グローと呼ばれるこの現象は、雷雲内の強い電場によって電子が加速され、大気中の原子にぶつかることで制動放射線を出していると考えられています(図8)。

ガンマ線グローは日本でも観測されています。

そのきっかけとなったのは福井県敦賀市にある高速増殖炉「もんじゅ」でした。原子力発電所の周囲には、放射能漏れを監視するモニタリングポストが設置されています。1997年1月、もんじゅを取り囲むモニタリングポストが数分にわたる放射線量の増大を検知し、アラートが発報されました。当初、周囲で雷が発生していたことから、電氣的ノイズではないかと考えられていましたが、もんじゅの職員であった鳥居建男氏が詳細に調査したところ、上空を雷雲が通過しており、雷雲内で加速された電子に由来する放射線ではないか、と結論付けました。

ガンマ線グロー、すなわち雷雲内における相対論的逃走電子なだれ増幅が雷の発生に関わっているのではないかと、という説があります。ガンマ線グローは雷の発生前に高エネルギー電子という形で微弱な電流を流す現象、とも言い換えることができ、この微弱な電流が雷の開始に影響を与えている可能性があります。前述のとおり、電子加速の種となる電子は宇宙線から供給されている可能性があり、雷の発生は宇宙とも関係しているのかもしれませんが。

雷雲だけではなく、雷と同時に発生する放射線も見つかっています。1991年、ブ

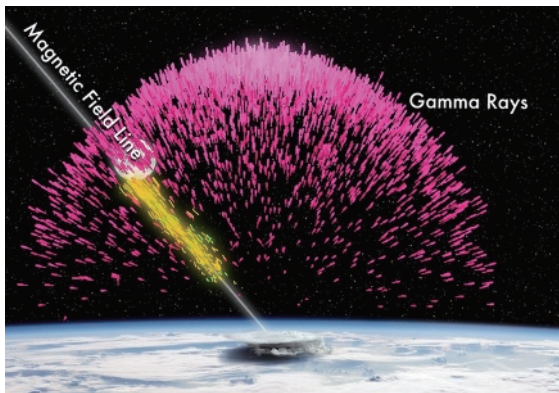


図9. 地球ガンマ線フラッシュの模式図  
(NASA/GSFC/J.Dwyer/FIT)

ラックホールなど宇宙からの放射線を観測するNASAの人工衛星が、偶然にも地球から到来する放射線を捉え、地球ガンマ線フラッシュと名付けられました(図9)。当初は雷との関連は明らかではなかったものの、その後の観測で地球ガンマ線フラッシュと雷から放出される電波が同時に観測され、地球ガンマ線フラッシュは雷によって発生する放射線だとわかってきました。

## 5. 北陸で発生する冬季雷での放射線観測

筆者らは石川県金沢市を中心に冬の雷・雷雲からの放射線の観測を行っています。雷は夏のイメージですが、日本海沿岸部では冬に雷が多発します。中国大陸から吹き付ける乾燥した寒気が、日本海を北上する対馬暖流の上を通過することで雷雲を発生させ、ときに雷雲となって押し寄せるためです。

冬は気温が低いので、雷雲が形成される高度も低くなります。実は放射線は大気に吸収されてしまうため、大気中を1kmくらいしか通り抜けることができません。夏の



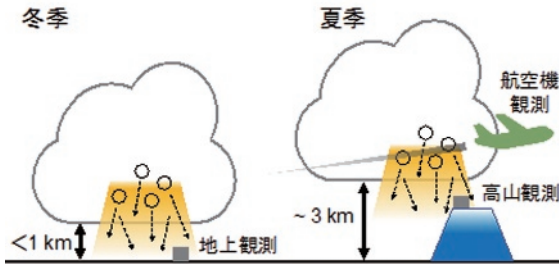


図10. 冬と夏の雷雲の違い

場合、電荷が溜まっているのは高度3km以上のため、放射線が発生しても地上まで到達することができず、海外では航空機に検出器を載せたり、あるいは3,000m級の高山に観測施設を建設したりしています。一方で冬の雷雲だと高度1km以下まで垂れ込めてくるため、放射線を地上で観測できます(図10)。この利点を活かして、筆者らは金沢市周辺の大学や高校、公共施設などの屋上に、自ら開発した小型の放射線検出器を設置して観測を行っています。航空機や高山の観測と比べると、必要なコストや手間が少なく、高品質な観測データを得られます。

2016年10月に本格的な観測を開始して以降、4年間で合計70例のガンマ線グローを観測することに成功しています。2018年1月にはガンマ線グローが発生している領域の周辺で落雷の検出にも成功しました。ガンマ線グローが雷を引き起こしているか、この一例だけではまだ判断できませんが、今後の観測で放射線と雷の関係が詳細に解明できると期待しています。

## 6. おわりに

雷は身近でありながら、意外にもまだ謎が多い現象です。特に雷・雷雲から放出される放射線は比較的新しく発見された現象であり、様々な分野の研究者を巻き込んだ新しい学問分野「高エネルギー大気物理学」として発展している最中です。北陸における観測が今後も雷の謎を数多く解き明かせるよう、筆者も尽力していく予定です。

### 著者紹介 和田 有希(わだ ゆうき)



大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻 助教。気象予報士。2020年に東京大学大学院理学系研究科物理学専攻を修了、博士(理学)を取得。雷・雷雲からの放射線観測やフェーズドアレイ気象レーダーの開発と降水現象の観測など、観測装置を自ら開発して気象現象の解明に取り組んでいる。