



1 . 雷放電とは - 雷放電の物理 -

河崎 善一郎

(大阪大学大学院工学研究科)

Lightning Discharges and Their Physics

KAWASAKI Zen

Osaka University, Suita 565-0781, Japan

(Received 24 May 2004)

Investigation of lightning discharges has about 250 years history. During these 250 years we have accumulated the knowledge, and the understanding of lightning physics has been done qualitatively. According to the author's understanding our interpretation and understanding about lightning physics is not sufficient. Moreover still we have newly discovered phenomena related with lightning discharge, like discharges from thundercloud top to the ionosphere named Red Sprite. The investigation on lightning physics can be concluded as one of the attractive subjects, though it has long history.

Keywords:

lightning discharge, stepped leader, return stroke, multi stroke, red sprite

1.1 初めに

中国の古文書に、確か荀子と記憶しているが、「雷」をして「陰陽合い和し天地轟く」という記述があると聞く。紀元前に活躍した中国の思想家である荀子が、「雷活動は雲内の電氣的活動である」といった科学的な理解をなし得ていたとは考えられないものの、偶然とはいえ「陰陽合い和し」のフレーズが「雷放電」の真の姿を言い当てているようで小気味良い。そもそも雷放電は、自然の織り成すひととき印象的な現象で、映画やテレビはたまたマスメディア等で、インパクトのある小道具として頻りに登場する。実際、一昔前にヒットしたアメリカ映画「Back to the Future」では、タイムマシンのエネルギー源として塔への落雷の電流が利用されていたはずで、映画等の小道具の一例としてあげるに十分でなかろうか。

時には神々しく、時にはおどろおどろしくもある雷放電は、古来より洋の東西を問わず信仰の対象でもあったようで、すでにギリシャ神話に、万能神ゼウスの武器として「雷矢」が登場している。そしてわが国の仏像が持つ金剛杵も「雷矢」の変形であるといわれており、仏具の鉈も、稲妻を象徴していると聞く。さらに大宰府に左遷された菅原道真の祟りが藤原一族に災いをもたらしたというエピソード、江戸時代の相撲取り四股名「雷電」の命名に至るエピソード等々と、数え上げれば雷にまつわる話はきりがなく、「雷」と関連のある神社は関東地方だけでも数百はあるとのことである。

そんな雷放電が科学という舞台の役者として登場するにいたる経緯は、なんとと言っても1750年代のベンジャミン・

author's e-mail: zen@comm.eng.osaka-u.ac.jp

フランクリンの実験に負うところが大きい。いまさら本稿で彼の嵐の実験を取り上げることはしないが、以後科学の対象として250年余の歴史を有しているというのが筆者の理解である。そして250年余を経た今日においても、現象論的にはわかっているが、定量的には未解明な点も多く、依然として科学の対象となっている。そこで本稿では、雷放電現象を大きく三つの範疇に分けて説明することとしたい。すなわち、「雷雲の発生」、「雷放電の種別」、そして「雷放電の素過程」がそれら三項目であり、加えて最後に最近の話題である電離層へ向かう放電についても若干の説明を加えたい。

1.2 雷雲の発生

本節では雷雲の発生を取り扱う。雷雲の発生といっても、雷雲の元たる積乱雲の発生と、雲が雷雲と呼ぶに相応しい電氣的性質を有する狭い意味での発生の、二つを考えることができる。両者を完全に分けて取り扱うことは不可能であろうが、前者は気象学に軸足を置いた観点であり、後者は大気電気学のそれということになる。本稿では紙面の都合と、本稿の大多数の読者の専門を考慮して、後者の意味として捉えたい。

通常、雲が雷雲たるには、その雲が電荷を蓄えていなければならない。一般には「雷雲は大きなコンデンサ」との認識があり、かかる意味で「雷雲の発生」は「電荷の蓄えられる過程」と理解されそうであるが、今日の専門家の理解ではこの表現はいささか不正確であり、正確には「電荷分離の過程」と記述すべきであろう。すなわち、本来電気

的に中性である雲の構成要素たる水が、水蒸気、水、氷晶、あられ等々と相変化しながら、ある過程を経て「正負の電荷領域に分かれる」というのが正確な表現で、「着氷電荷分離機構」と呼ばれている[1].「着氷電荷分離機構」という共通認識に至るまで、専門家の理解にも歴史的変遷があり、それはそれで興味深く、時代を追って考えてみたい。

雷雲内の電荷分布に関する研究の黎明期は1920年代で、この時代に活躍したシンプソンとウイルソンの研究が良く知られている。シンプソンは彼自身の経験から、雷雲の上部が負に帯電し下部は正に帯電していると考え、レナードの水滴分離説で説明しようと考えた[2].すなわち、落下する大粒の水滴は分裂し小水滴となり正に帯電、大気中には対応する負イオンが発生するという説である。さらに負イオンは上昇気流で雷雲の上部に運ばれ、雷雲を上向きの電気双極子(以後ダイポールと呼ぶ)構造と結論したのである。一方ウイルソンは多くの地上観測結果に基づき、シンプソンとはまったく逆の電荷分布、雷雲の上部は正に帯電し、下部は負に帯電しているという説をとった[3].それまでも晴天時には大地付近で地面に垂直な大気電界(100 V/m ~ 200 V/m)の存在することが知られており、この大気電界が落下する雨滴を上部負、下部正と分極するため、雨滴は空間に漂う正負両イオンのうち正イオンを反発し、負イオンを吸収して負に帯電、正イオンは上昇気流で雷雲上部に運ばれると結論した。このように二人の説は電気的には正反対で、1928年9月グラスゴーで開催された学会で彼等の論争は山場を迎えることとなる。そしてこの学会で多くの指示を得たのはウイルソンで、その後シンプソンは10年にわたる観測を通じて自説の不完全さを認め、ウイルソン説に近いFig. 1に示す雷雲モデルを発表している[4]. Fig. 1は雷雲内における電荷分布と気流を示しているものである。ただ特筆すべきは、電荷構造を雷雲上部から、正負正の三重極構造としている点、下部の正電荷総量が少ないことからポケット正電荷(pocket positive charge)と名付け、これがウイルソンとの論争の矛盾点の因であると解明した点であろうか。シンプソンの時代には「雷雲のセル」といった意識がまったくなかったにもかかわらず、Fig. 1で与えられている雷雲モデルは電荷分布という観点からは、今日的にも十分に利用可能なモデルとなっている点は、特筆すべきもう一点であろう。とはいえ、電荷分離のシナリオが明らかになるには、さらに半世紀近くの時の流

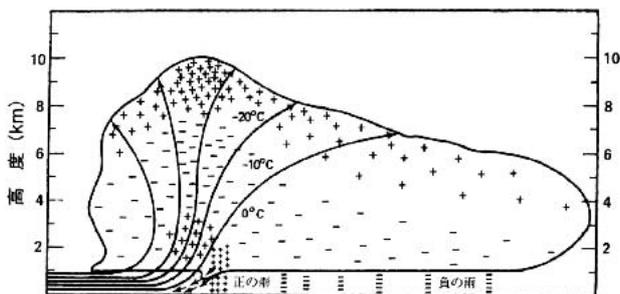


Fig. 1 Charge distribution and wind flow inside a thundercloud proposed by Simpson after ten years investigation.

れを待たねばならない。

1950年代になってボンネガットは、雷雲内部の上昇気流と雷雲周辺の下向き気流がイオンを輸送して雷雲の電荷分布を形成するという「対流説」を提唱した[5].すなわち、晴天時の大気電界は、電離層および大地がそれぞれ正負に帯電していることに因っている。大気電界の存在は、地表付近に正イオンの卓越の要因であり、積乱雲を引き起こす上昇気流が地表付近の正イオンを輸送するため雲内には正電荷が蓄えられる。そしてこの正電荷が、電離層から負イオンを大地に向かって引き付け、周辺部の下降流が負イオンを雲底付近に運ぶため、積乱雲内では結果として、上部に正電荷、下部に負電荷という電荷分離が起こり、雷雲が形成されるというものである。ボンネガットは、後述する「着氷電荷分離機構」が広く認知されるようになった、1980年代になっても自説を曲げようとしないうちに典型的なYankeeであった。実際筆者がボンネガット氏と出会った1985年の国際会議の晩餐会で「誰も俺の言うことを認めないので、今年の夏も野外実験で証明するのだ!」と、当時駆け出しであった筆者に、熱っぽく語りかけてきたことを覚えている。彼の実験は沢山の針をつけたスチールワイヤ数キロメートルを渓谷にかけ、針端からコロナ放電で電荷を発生させて雷雲を作ろうという途方もない実験であったようである。このように記述すると、ボンネガット氏が、まるでmad scientistであるかのような印象を読者に与えてしまいそうであるが、彼の大気電気学への貢献は大きくこの分野の多くの研究者に大いに尊敬されていたことを書き添えておきたい。

さて着氷電荷分離機構である。1980年代定説として認知度の高まるまでには、多くの研究者による室内外の実験が寄与しているものの、高橋勲氏の力作 Fig. 2 がなんと言っても特筆されるべきであろう。同図は、「あられと氷晶の接触が電荷分離に寄与する」という定性的理解を、接触時の温度および雲水量(大雑把な理解には周囲の湿度)と正負電荷分離の関係を定量的理解にまで高めるものとなっている。これを現実の雷雲に適用して理解するならば、以下のようなことになる。

地表付近の湿潤な大気は上昇気流により上空に輸送され、高度とともに大気温度が下がるため、やがて水蒸気の飽和状態となる。周囲条件により結露して水滴から氷晶へと相変化する場合と、過飽和状態を経て昇華により氷晶と相変化する場合の二つの過程が考えられるものの、氷晶は上昇気流により上空へと運ばれ、あられにまで成長する。あられは上昇気流では支えきれないためやがて落下し、上昇してくる氷晶と接触することとなる。そして Fig. 2は、接触の際の温度と雲水量があられの正負を決定することを示している。すなわち摂氏-10度で接触するとき、落下するあられが上昇する氷晶の負電荷を集めることとなるため、あられが負に帯電し、氷晶が正に帯電することとなる。「摂氏-10度での接触」という条件は、かなり厳しい制約条件であるため、負に帯電しているあられの存在する位置、言い換えれば雷雲内の負電荷の位置は、比較的うすっぺらな、いわばホットケーキ状であると信じられてお

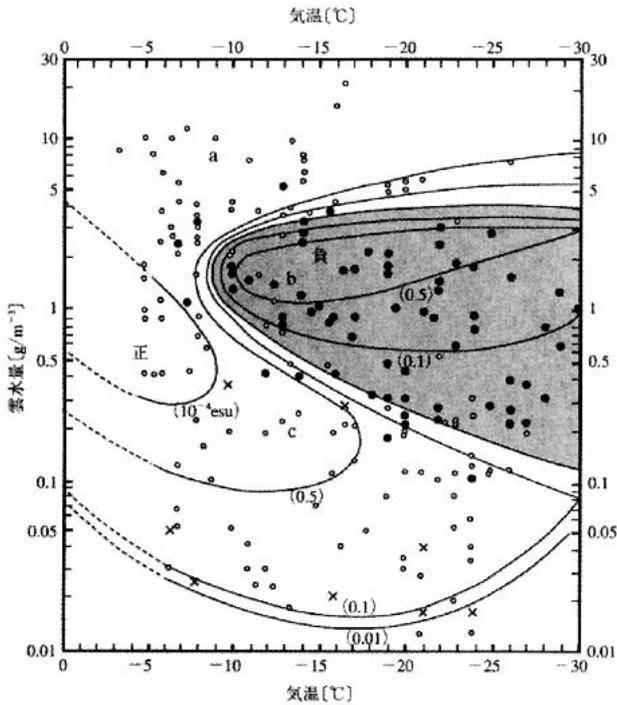


Fig. 2 Laboratory experiment's result for riming electrification as a charge separation mechanism in thunderclouds. Polarity of precipitation particle is revealed to depend on the atmosphere temperature and cloud water content.

り、一説によれば高々500 m程度の厚さとも言われている。一方上空に運ばれる氷晶は、前述のように正電荷の担い手となり、雷雲の上部は比較的低密度な、しかし領域的には広い範囲で正電荷が分布する。さらに摂氏-10度の高度よりあられが落下するにつれ、融解した表面の水がOH⁻負イオンとともに飛散するため、雷雲最下層のあられは正に帯電することになる。上記を要約するなら、雷雲は下層より、正・負・正の電気三重極子構造となっており、これがシンプソンの提案したモデルと類似している。

最近のゾンデを用いた *in situ* 観測結果によれば、三重極子はおろか、四重極、五重極、六重極といったさらに複雑な雷雲電荷の構造や、シンプソンの最初に提案した上向きのダイポールモーメントと同様の、正負位置逆転型の雷雲電荷構造が見出されており、雷雲内の電荷分布については依然として論争の種はつきそうにない。しかしながら、高橋氏の労作である着氷電荷分離機構は、半世紀にわたる電荷分離の謎を解いた研究であると、筆者は固く信じている。

1.3 雷放電の種類

雷放電をより厳密に定義するなら、雷雲内に蓄えられている電荷群が、大気の大絶縁を破壊して導電性の高い道（放電路）を形成し、その結果正負電荷を短絡して起こる中和現象とでも表現すべきであろう。そしてその中和が雷雲・大地間で起こる場合を対地放電（または落雷）、一つの雷雲内で起こる場合を雲内放電、異なる雷雲間で起こる場合を雲間放電と呼んでおり、これら雲内放電および雲間放電は一まとめにして雲放電と呼ぶのが通常である。なお放電の

開始から、色々な過程を経て中和を完了する雷放電の諸過程は次節に詳解の予定である。いずれにしても短絡後1ミリ秒程度で中和が完了し、その間放電路には、キロアンペア相当の電流が流れるため、強力な発光（電光）と大音響（雷鳴）を伴うのが普通である。一方かなりの頻度で「Air discharge」と呼ばれていて、大気放電とでも表現されるべき雲放電が存在する。この現象は、雷雲内の電荷群内で始まった放電が雲底に沿って比較的長時間進展し、異なる極性の電荷群に到達することなく終わってしまう放電で、中和を以って完結するという雷放電の本来の定義には当てはまらない。そして今日であっても、Air discharge となる必要十分条件が明らかとなっているわけではなく、その進展がゆっくりとしてまるで蜘蛛の子を散らす風情であることから「Spider Lightning」と呼称されている[6]。厄介なことに Spider Lightning のなかにも、放電開始点の電気的極性と異なる極性の電荷群に到着して、定義どおりの中和を以って完了、通常の雷放電となる場合もあるため、読者のみならず筆者自身も混乱しそうになる。

ここで落雷の極性について考えてみたい。すなわち雷雲内の正電荷が中和する場合と、負電荷が中和する場合の二つの可能性がある。中和は、雷雲電荷とその電気影像として誘導された大地表面の電荷によるというのが、物理的に正しい理解である。それゆえ落雷は、中和される雷雲内電荷の正負により、それぞれ正極性、および負極性落雷と定義されている。通常の落雷は負極性落雷であり、自然に発生する正極性落雷の存在は、1970年代名古屋大学の旧空電研究所の仲野・竹内により初めて見出された[7]。彼らは石川県に「躰起こし」と呼ばれる雷放電が冬季（それも初冬）にしばしば発生するという風聞をたよりに、内灘・宇ノ気で野外観測を実施したそうである。その後「北陸冬季の正極性落雷」は、世界的に有名となり、米国から大気電気関連の研究者が来日して共同研究を実施している[8]。

次に放電の開始位置について考えてみたい。落雷は通常雷雲内で開始し、誘導電荷のある大地に向かう。だからこそ落雷と定義されるのであるが、大地上の高構造物の先端から、雷雲に向かって開始することもある。高構造物では雷雲電荷による電界が、数学的には特異点に限りなく近くなり、非常に強められることになるため、空気の絶縁破壊強度 3×10^6 V/m を容易に越してしまうことから起こると考えられている。なお雷雲内で開始する放電を、下向き放電で開始する雷放電、大地上高構造物の先端等で開始する放電を上向き放電で開始する雷放電と呼ぶのが普通である[9]。前述の落雷の極性を勘案して、落雷は Fig. 3 に示すような四種類に分類できることとなる[10]。

一方上向き放電で開始する落雷は、一般に「Triggered 落雷」と呼称されることが多く、雷雲の高度の低い冬季に多く、わが国の北陸地方が世界的に良く知られており、Triggered 落雷の多発地帯となっている。この結果、冬季の雷放電を上向き放電で開始する落雷との誤解が一人歩きしているが、「多い」ことは事実として上げることはできたとしても、決して全てというわけでないことを注意しておきたい。さらに Triggered 落雷には、地上に接地し

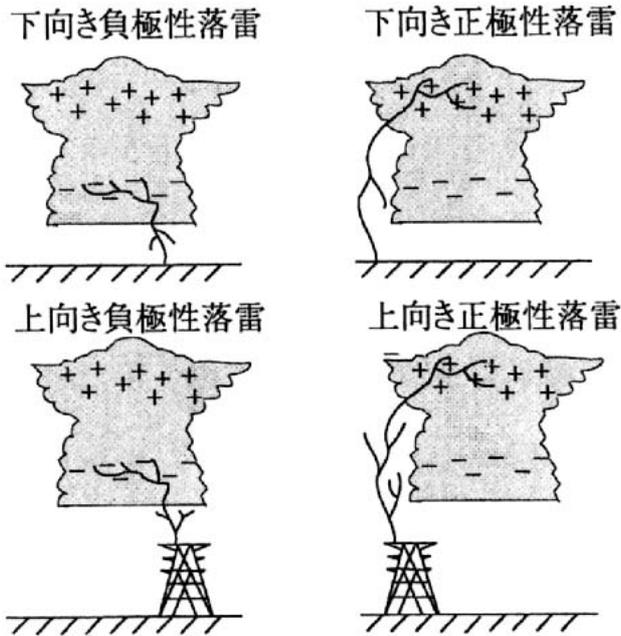


Fig. 3 Categorization of four types of cloud to ground (CG) strikes.

たピアノ線等の導体を、ロケットで引き上げて落雷させる能動的な「ロケット誘雷」も含まれるが、本稿ではこれ以上立ち入らない[11-14].

次に雲放電について考えてみたい。雲放電は、実際には落雷の分類ほどには単純ではない。ただ単純化して述べるなら、「正電荷で開始するのか」もしくは「負電荷で開始するのか」の二者択一となる。雲放電開始の電氣的極性は、関連研究者の間で長い論争があるものの、最近の研究結果では、確率の高低はあるにせよ、いずれの場合も起こりうる様であるというのが大筋の一致した理解である。室内実験により、正電荷からの放電開始が、負電荷のそれよりも、より低い電界強度であることが確認できるとの理由で、雲放電の開始については、正電荷位置からとの理解が長かったのだが、1980年代以後 VHF 波による放電進展の観測が行われるようになり、先に述べた共通の認識に至っている。なお雲放電の観測結果の興味ある一例として、VHF 放射源の Bi Level(二層構造)分布が報告されており、筆者らの VHF 波帯広帯域デジタル干渉計の観測でも同様の、Fig. 4に示す結果の得られていることを付記しておきたい。同図の理解には、放電の極性についての知見が鍵となることだけを述べて、これ以上は立ち入らないこととしたい。本節の最後にあたり雲放電の概略を Fig. 3 を模して描くと Fig. 5 のようになる。また雲放電には、(A)一つの雷雲内の正と負の電荷間で放電する場合と、(B)異なった雷雲の正負電荷間で放電する場合および、(C)雷雲から放電路が雲外に進展する大気放電の場合、の3種類がある[10].

1.4 雷放電の素過程

雷放電は、少なくとも数キロメートルの距離を隔てて存在する正負電荷群を電氣的に短絡する現象である。正負電荷間には大気が存在し電氣的絶縁を保っているのだが、1気圧で 3×10^6 V/m を越す電界強度に達したとき、空気の

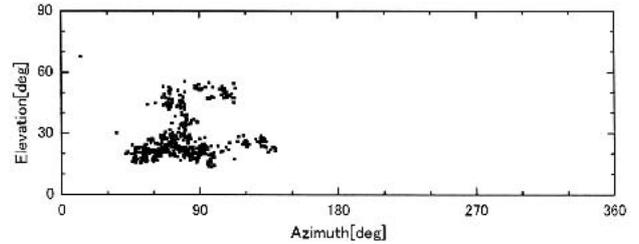


Fig. 4 Bi-level charge distribution measured by VHF broadband digital interferometer. The lower dense VHF sources are believed to be positive charge locations, and higher thin ones are negative charges.

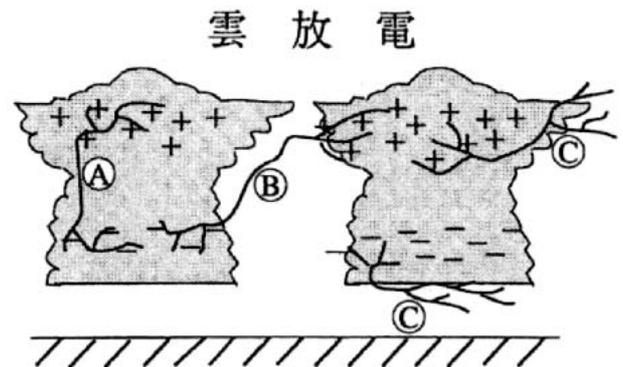


Fig. 5 Categorization of three types of cloud discharges, (a) intra-cloud, (b) inter-cloud, and (c) air discharges.

絶縁破壊が開始し、放電が進展することとなる。この放電の進展速度は 10^5 m/秒であることから、放電路が形成されるのに数十ミリ秒～百ミリ秒程度の時間を要するのが普通である。したがって、雷放電は通常の生活感覚では短い僅か一秒に満たない、しかしながら電子レベルで見れば、比較的長い時間を必要とする現象である。そこで、大気電気学ではこの雷放電をいくつかの過程に分けて議論し、理解するのが普通である。これらの諸過程を、放電の開始から中和の完了までを時間経過に沿ってアルファベットで表現すれば、Preliminary Breakdown(Initiation), Stepped Leader, First Return Stroke, Continuing Current, M Process, J Process, K Process, Subsequent Leader (Dart Leader, Dart-Stepped Leader, Attempted Leader), Subsequent Return Stroke といった如きになる[9]. 前節で述べたように、これら諸過程、極性、開始位置が相互に関係してさらに現象を複雑にすることとなる。本稿では読者の理解を比較的容易にとの配慮から、良く知られている、「雷雲内の負電荷群から開始する放電」に関する知見を基礎として、議論を進めたい。ただし対地および雲放電のいずれかについては特に配慮しない。これは最近の研究の成果として、対地および雲放電の厳密な区別が必ずしも適当でなく、たとえば比較的長時間に及び雲放電の後に対地放電となるといったハイブリッド型の雷放電も報告されているからである。

まず Preliminary Breakdown(Initiation) から始める。電荷群周囲の大気の絶縁破壊の開始で、それに伴って電界の

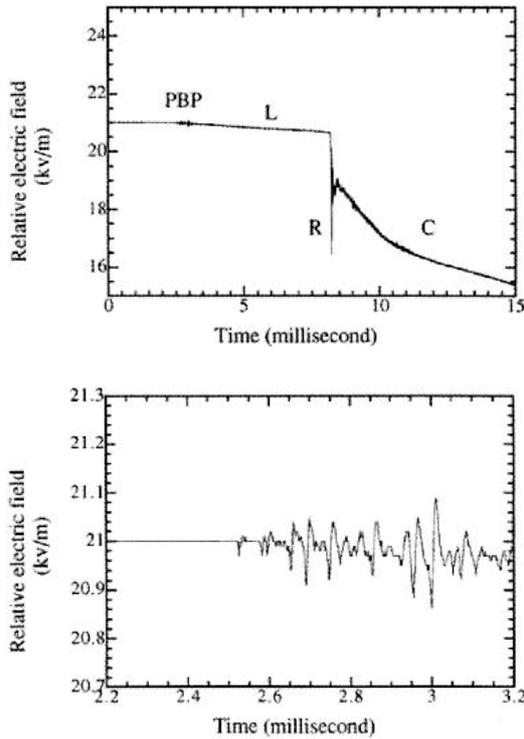


Fig. 6 Electric field change caused by a positive cloud-to-ground (CG) strike as a function time (a) The entire electric field change, (b) The initiation part of CG called preliminary breakdown with time axis expanded.

変化が観測される。Fig. 6は、正極性落雷に伴う電界変化の一例である[15]。余談となるが、電界変化の表現法には不思議なことに二通りの方法がある。すなわちそれらは、雷雲内の正電荷の中和されたときその変化を負方向の電界ベクトルで表す方法（大気電気学的慣習）と、その逆に正方向の電界ベクトルで表す方法（物理学的慣習）である。最近は後者が多く用いられるようになってきているが、Fig. 6は古典的な大気電気学的慣習にしたがっていることに注意いただきたい。同じ大気電気学の研究者同士で、議論が噛み合わず議論の終わりになってようやく表記法の違いに気づくといった笑えない笑い話も少なくない。話を本題に戻す。Preliminary Breakdownに伴う電界変化の振幅は、比較的大きいのが普通である[16]。当然のことながら観測される波形の振幅は、現象が発生している点までの距離に逆比例するので、距離で規格化して議論せねばならないけれど、それを考慮してなお大きい。中性の大気から導電性の電離気体へのきっかけには、あたかも慣性力が効いているかのごとくは、筆者の判断である。

Stepped Leaderは、間欠的に進展する絶縁破壊過程で、キロメートルを越す空間を一気に放電が進展しないことに寄っている[9]。この過程は、「ある程度の進展の結果その先端の電荷密度が低くなり、局所的な電界が弱くなるため、後方からの電荷補給を待ち、再び強い局所電界が満足されたときに、次のステップとなる」と理解されているものの、これはきわめて情緒的な理解である。観測的には色々な知見が得られており、ある種のモデル図としてFig. 7が良く用いられている[17]。落雷位置を前もって知るこ

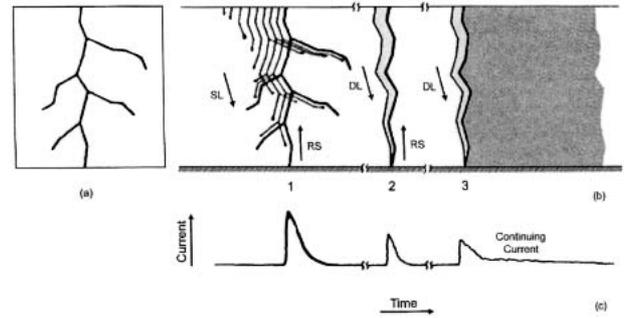


Fig. 7 Conceptual process of the stepped leader and return stroke.

とが雷放電研究の目的の一つであることから、Stepped Leaderの進展はその機構の理解を含め研究の対象であると考えられている。数十ミリ秒～百ミリ秒程度の時間をかけ、Stepped Leaderは大地（あるいは雲内正電荷域）に接近し、放電路を大気の電離された道として形成する。ちなみにStepped Leaderの平均的進展速度は 10^5 m/秒、放電路電子温度は5,000 K程度、というのが通常理解である。

Return Strokeは、Stepped Leaderにより正負電荷中和のための放電路の形成がほぼ成し遂げられた瞬間に起こる。「ほぼ」と少し婉曲的表現をとった理由は、形成された放電路の先端が大地に近づいたとき、大地から「お迎えのリーダ」と呼ばれる短絡最終過程のあることが知られているからである。議論の本筋とずれることになるため、ここではお迎えのリーダについて興味ある読者に専門書の一読を勧めるに留め置きたい[9,17]。さてReturn Strokeである。正負が電離している気体で短絡された状態であるため、電流にして少なくとも十数キロアンペアもある大電流が流れる。放電路の温度は1マイクロ秒程度の中に、20,000～30,000 Kにまで引き上げられる。電流値としては少ない場合でも十キロアンペア程度であり、電流の進展速度は光速の三分の一程度あるいはそれ以上である。進展方向は、大地から雷雲に向かうため、落雷という概念とは逆ということになるが、このReturn Strokeが、電光と雷鳴の主たる原因となっている[18]。なおReturn Strokeは、大地の正電荷と雷雲の負電荷を中和するとは、双極子モデルの理解に過ぎず、Leaderが雷雲内の電荷を放電路に長く分布させ、Return Strokeは放電路に分布した電荷および雷雲内電荷を中和する現象であるというのが正しい理解であろう。また先に諸過程の名前をアルファベットで列記した際Return Strokeに、Firstという修飾語を付した理由は、雷雲内には広く電荷が分布しておりそれらは電気的には同一ポテンシャルではない、別の言い方をすれば電氣的に繋がっていないため、一度のReturn Strokeでは完全に中和の終わらない場合もあるからである。そしてContinuing Currentはそのようなときに起こる、低振幅ではあるがReturn Strokeに引き続く電流を指している。物理的には、Preliminary Breakdown (Initiation)の位置にReturn Stroke電流の到達後も、さらに大地から電荷が補給され、雷雲内の電荷を求めて放電が進展する現象と理解されている。そしてこのContinuing Currentは放電路を追過熱することに

なるため、放電路の発光が続くのが普通である。やがて進展する放電の先端が雷雲内の電荷群に到達した場合、次の Return Stroke の文字通り準備をすべく、Subsequent Leader が引き起こされる。一方放電の先端が比較的小規模な電荷群に接近する場合、おそらくその電荷群からも進展してくる放電の先端に向かう何らかの現象が起こり、その結果流れる電流の増大により発光の強度が増すことがある。この現象を M Process、発光そのものを M Component と呼んでいる。なお Subsequent Leader, Stroke は、Continuing Current を伴うことなく、一度電流が完全に休止 (Cut Off) して後数十ミリ秒以上も経過して起こることもある。Continuing Current を伴う多重落雷を Hybrid 型、伴わない場合を Discrete 型と呼んでいる。観測的知見は数多くあるが、両者を別ける要因を完全に理解しているわけではない。

議論の展開が前後してしまったが、Discrete 型の多重落雷について議論してみたい。First Return Stroke の電流が休止後も、雲内では何らかの電氣的活動、放電活動が起こる場合があるとは先に述べた。放電路の電流が零に近いであろうから、電界変化などに注目してもはっきりとした現象は見つからない。ただ放電路先端は電荷群を求めてわずかながらでも延びようと努力している様である。延びるといことは電荷が移動するということであり、感度の良いもしくはダイナミックレンジの広い電界計で測ると、ゆっくりとした小振幅の電界の変化が見つかる。これを Junction (結合) の J をとって J Process という[9]。J Process により放電路先端が電荷群に到着できたら、少し振幅の大きい、そして少し急峻である様な電界変化が起こる。これは局所的な電荷の中和であり、Mini Return Stroke といえるかもしれない K Process である。そして、伴う電界変化そのものを K Change と呼ぶ。K Process (K Change) は発見した、北川信一郎博士の頭文字 K を取っての命名となっている[9]。

Hybrid 型にせよ、Discrete 型にせよ、それが多重落雷である限り、First Return Stroke の後、数十ミリ秒以上経過して、Subsequent Leader が起こる。放電路温度が比較的高く、高い導電率が維持されているような場合には、Leader が連続進展するため Dart Leader と呼ばれる。休止間隔が長く連続進展と完結的進展の中間の進展をする場合には Dart Stepped Leader と呼ばれる。さらに Leader が大地に到達する以前に進展を休止する場合もあり、Attempted Leader と呼ばれる。Subsequent Return Stroke は、Subsequent Leader が大地に十分近づいたときに、大地から雷雲に向かう大電流の現象であることは、先に述べた First Return Stroke と原理的には同じと考えてよい。ただ Fig. 8 に比較して示す両者の雷撃電流は、First と Subsequent Return Stroke では、それらの立ち上がり時間が完全に異なっているが、単純に導電率の相違と考えてまず間違いはない[19]。本節の議論を要約して一連の概念図として表すと Fig. 9 のようになる。この種の概念図は雷放電物理のほとんどの教科書に示されているが、本稿では V. Rakov 等[17]の図を用いることにする。

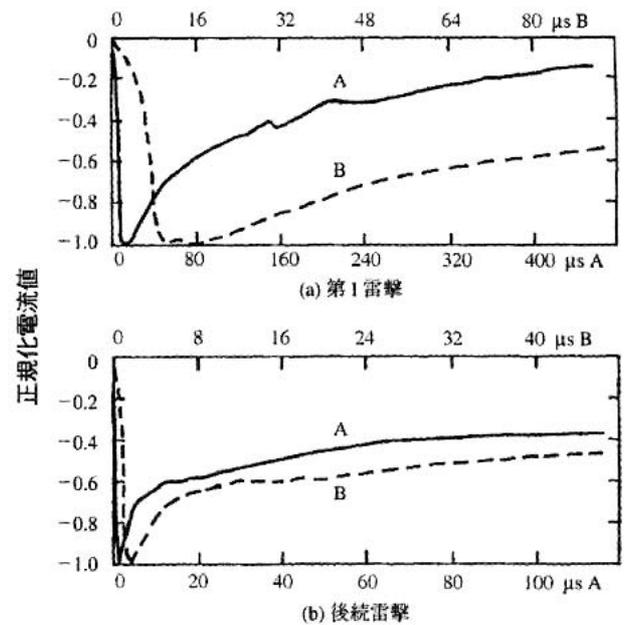


Fig. 8 Average negative return stroke current wave shapes normalized to the peak amplitude as reported by Berger[18].

1.5 最近の話題

1989年夏、ミネソタ大学の Franz 等[20]は、まったく偶然に雷雲の頂部から電離層に向かう発光現象を発見した。文献に拠れば、彼らは衛星搭載用超高感度カメラの較正のための実験中に、巧まずして地平線の彼方に起こった発光現象を写すこととなったそうである。そしてこの発光現象は、Red Sprite(赤い妖精)と命名され、たちまちのうちに世界中の関連研究者の注目するところとなった。そもそも、雷雲の頂部から電離層に向かう放電は、すでに19世紀末に Toynbee 等[21]の「Nature」の論文において指摘され、地球電気回路(global circuit)(例えば文献[10])の問題と関連して、大気電気学分野の研究者に長年その存在の可能性が信じられてきた現象である。Franz 等以後10年余の間に、国際共同による地上観測が相次いで実施され、Red Sprite 以外の発光現象 Blue Jet, Blue Starter[22], Elves [23]が相次いで発見されている。加えて航空機観測や衛星観測も行われ、発見当初「発光現象(TLE: Transient Luminous Event)」として扱われていたこの種の諸現象が、今日では「放電」の一種として理解されている。筆者らも、オーストラリア最北端のダーウィンで光学観測を行い、1997年11月には、一晩のうちに70余の Red Sprite の撮影を達成している。Red Sprite が雷放電と同様の「放電」であると認知された今日にあっても、一晩で70余というのは記録的かもしれない。Fig. 10はこのときにイメージインテンシファイア付きの通常のビデオカメラで記録された Sprite のうち、最も興味深かった一例である[24]。一例とは言えその形を時々刻々変えており、ニンジン型、羽飾り型、くらげ型、柱状型とその形で種類分けされている Red Sprite のほとんどの型を含んでいる。この観測例は、筆者らの観測結果のうちでは最も継続時間の長く続いた例で、およそビデオカメラの5~6フレームにわたって継続して

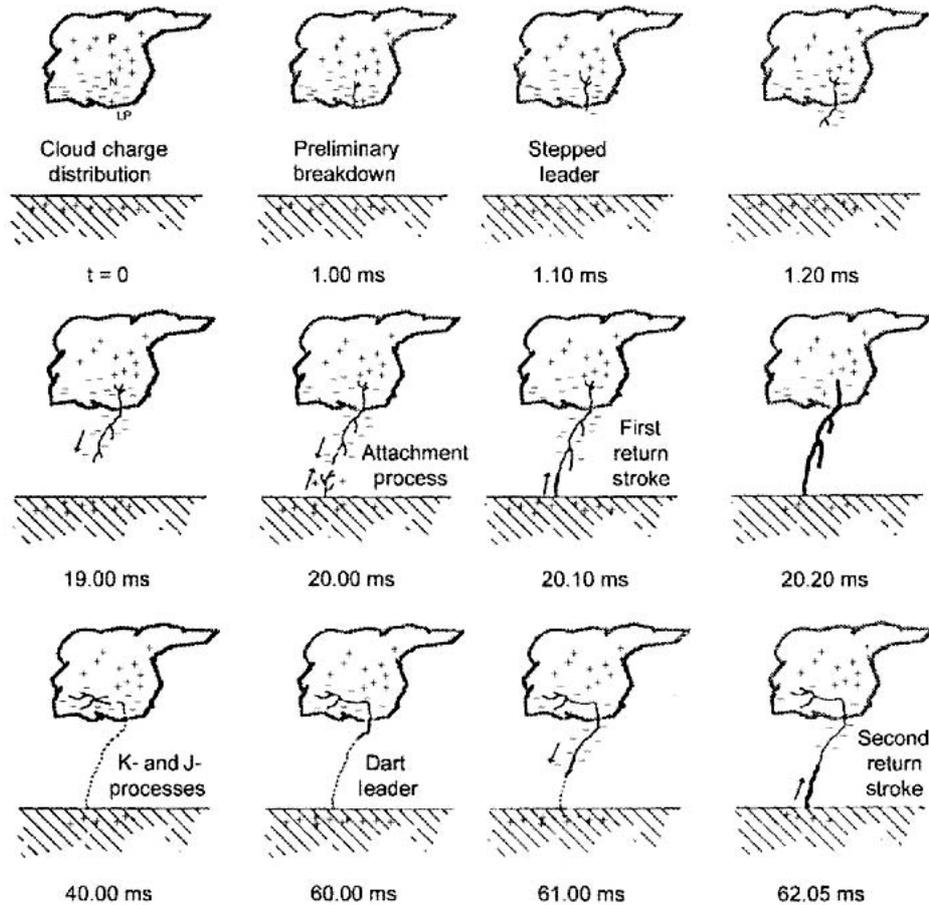


Fig. 9 Conceptual time sequence of a cloud-to-ground strike. This sequence includes all of the processes which are described in the text.

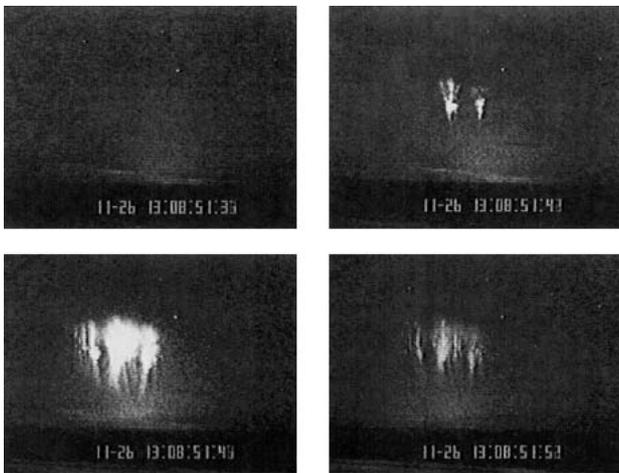


Fig. 10 Time sequence of a red sprite for every 32 millisecond recorded a Darwin Australia.

おり、100 ms 程度の継続時間と推定できる。10年間の成果として、Red Sprite は、中規模対流型の雷嵐に多く出現し、正極性落雷の発生との相関が高いようである。雷嵐の規模としては面積が数千平方キロを越す場合、落雷に寄与する電荷の電気双極子モーメント数百クーロン・km が Red Sprite 発生の必要条件であるらしいことが観測を通じて明らかとされているが、研究の歴史はまだ十年足らずであることから、今後の成果の待たれるところである。なお北陸

の冬季雷活動中にも Red Sprite の発生が見出されていることを記してこの節を終えたい。

1.6 終わりに

今日知られている雷放電の機構について、電荷分離の機構および、放電の諸過程について概説した。議論の展開上「1.3 雷放電の種類」と題する項も設けたが、今となっては屋上屋を重ねる説明となってしまったのではと反省している。加えてフランクリン以来250年余の今日にあっても、あれが不明、これが理解不足と、愚痴が先にたつ概説となってしまうに恥ずかしい限りである。これは大気電気学者の力不足や怠慢のためでは決してなく、電荷分離機構の理解にはミクロな物理が、雷放電の理解にはマクロな物理が必要という現実的な困難さによっているとは筆者の理解である。「マイクロメーターで都市間の距離を測定するがごとき難しさ」とは言い古されたフレーズかも知れぬが、今しばらくは雷放電研究者の飯の種は尽きそうもないことだけは確からしい。筆者もますます研鑽をと考えている次第である。

参考文献

- [1] T. Takahashi, J. Atmos. Sci. 35, 1536 (1978).
- [2] G.C. Simpson, Proc. R. Soc. London, Ser. A. 114, 376 (1927).
- [3] C.T.R. Phil. Trns. A 221, 73 (1920).

- [4] G.C. Simpson and F.J. Scrase, Proc. Roy. Soc. A 161, 309 (1937).
- [5] B. Vonnegut, Proc. Conf. Atmos. Electr. Portsmouth 169 (1955).
- [6] V. Mazur., X-M. Shao. and P.R. Krehbiel, J. Geophys. Res. 103, 19811 (1998).
- [7] T. Takeuti, M. Nakano, M. Brook, D. J. Raymond, and P. R. Krehbiel, J. Geophys. Res. 83, 2385 (1978).
- [8] M. Brook, M. Nakano, P.R. Krehbiel and T. Takeuti, J. Geophys. Res. 87, 1207 (1982).
- [9] M.A. Uman, The Lightning Discharge (Academic Press Inc, 1987).
- [10] 日本大気電気学会編：大気電気学概論（コロナ社，2003）。
- [11] M. Brook, G. Armstrong, R.P.H. Winder, B. Vonnegut and C.B. Moore, J. Geophys. Res. 66, 3967 (1961).
- [12] M.M. Newman, J.R. Stahmann, J.D. Robb, E.A. Lewis, S. G. Martin and S.V. Zinn, J. Geophys. Res. 72, 4761 (1967).
- [13] K. Horii and M. Nakano, *Artificially Triggered Lightning* (Chapter 6 in Handbook of Atmospheric Electrodynamics), Vol. 1, CRC., 151(1995).
- [14] K. Nakamura, K. Horii, Y. Kito, G. Ikeda, S. Sumi, M. Yoda, S. Aiba, H. Sakurano and K. Wakamatsu, IEEE Trans. Power Delivery 6, 1311 (1991).
- [15] 牛尾知雄：広帯域電界・電磁波による雷放電の観測的研究（大阪大学博士論文，1998）。
- [16] W.H. Beasley, M.A. Uman and P.L. Rustan, J. Geophys. Res. 87, 4883 (1982).
- [17] V.A. Rakov and M.A. Uman, *Lightning: Physics and Effects* (Cambridge University Press, 2003).
- [18] R.E. Orville, J. Atmos. Sci. 25, 827 (1968).
- [19] K. Bergerm, R.B. Anderson and H. Kroninger, Electra 80, 23 (1975).
- [20] R.C. Franz, R.J. Nemzek and J.R. Winckler, Science 249, 48 (1989).
- [21] H. Toynbee and T. Macenzie, Nature 33, 245 (1886).
- [22] D.D. Sentman and E.M. Westcott, Phys. Plasmas, 2251 (1995).
- [23] H. Fukunishi, Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U.S. Inan, and W.A. Lyons, Geophys. Res. Letters 23, 2157 (1996).
- [24] S.F. Hardman, R.L. Dowden, J.B. Brundell, J.L. Bahr, Z-I. Kawasaki and C.J. Roger, J. Geophys. Res. 105, 4689 (2000).



かわ ざき ぜんいちろう
河崎 善一郎

1949年1月17日生まれ，専門分野は雷放電物理，電波理工学．VHF 干渉計に雷放電進展様相の野外観測を実施．とりわけオーストラリア・ダーウィン地域の雷活動の解明にこだわり，1995年より継続して同地でのキャンペーンを実施している．最近では衛星観測にもかわかり，TRMM 衛星の LIS の日本側 PI，東大阪のまいどシリーズのミッション（雷観測）も担当している．