

小特集 原子・分子過程によって支配されるプラズマの複雑性と構造形成

4. 大気圏・電離圏における雷・放電現象の構造と素過程

4.1 雷放電現象の構造と素過程

河崎 善一郎

大阪大学 大学院工学研究科

(原稿受付：2008年5月8日)

近年の研究成果によれば、雷雲内の電荷分離は、着氷電荷分離機構により理解できる。すなわち通常成熟期の雷雲では、電荷構造は雷雲上部から下部にかけて正負正の三重極構造となっている。そして落雷は雷雲の成熟期に最も頻繁に発生、概ね中層の負電荷域から稀に上層の正電荷域から開始する。また雲内の電荷間での中和で放電の完結する雲放電は、落雷よりもさらに頻繁に発生する。これらの議論を踏まえ、本稿では最後に、雷放電進展の様相を、VHF 波帯広帯域干渉計による観測結果として紹介している。

Keywords:

lightning discharge, lightning progression, charge distribution, negative breakdown, VHF radiation, broadband interferometer, lightning channel, severe storm

4.1.1 はじめに

一口に雷放電現象の構造と素過程といっても、雷雲内の電荷分布、放電開始機構、放電の進展、そして雷撃電流による雷雲電荷の中和過程等々、現象論的には多岐にわたるため、ともすれば議論が発散しがちになる。そこで本稿では、大阪大学大学院工学研究科の雷研究グループが進めている、VHF 波帯広帯域干渉計による、放電進展様相の観測的研究[1,2]に焦点をおいて議論を進めることとする。すなわち、本稿で議論する「構造と素過程」を、雷放電の進展に伴って放射される VHF 波帯インパルス状電磁波の放射源位置の特定を、干渉計で観測的に推定することとした。通常我々が Flash と呼んでいる一度の雷放電(専門外の方ならピッカと光るあの稲妻)で、VHF 波帯インパルス状電磁波は、少なくとも数千が放射されており、それぞれの継続時間も100ナノ秒程度であることがこれまでの観測を通じて知られている。そして、その数千のインパルスの放射される位置を、時間経過通りに表示すると、我々が眼にする稲妻とよく似た形状となる。稲妻は一瞬の輝きと見えるものの、実は光速と比較できる程度の速さで進んでいることから、VHF インパルス波は、放電進展の最前面、或いは空間的に広く分布している電荷が中和される位置から放射されていると考えられている。そこで本稿では、先に述べたように干渉計観測結果を中心に議論を進める。そしてそのために、まず雷雲内電荷構造の概略を知っておく必要があり、主題の方向を誤らない程度に、電荷構造の過程や分布についての説明から開始したい。

4.1.2 仮説・着氷電荷分離機構

雷雲内にどのようにして電荷が蓄積されるのかは、長い間関連研究者の間で、議論が尽きなかった。ただ我が同僚の高橋氏(ハワイ大学在)が、低温チャンバーを用いて気の遠くなるような実験を行い、電荷分離機構について納得しうる結果[3]を導いている。あとで述べるそのシナリオとしては多くの研究者が肯定的とはいえ、温度や雲水量といった諸パラメータに関し研究者間で若干の開きがあり、本稿では敢えて仮説・着氷電荷分離機構と、「仮説」の冠を付した。ここで高橋氏の気の遠くなる実験について説明したい。高橋氏は低温のチャンバー内に霰と見た建てた氷を置き、さらに雲粒を低温チャンバー内に発生させることにより雪片を形成し、氷と衝突させた。そしてこの衝突による氷や雪片の帯電量を詳細にそして丹念に測定し、各種降水粒子の帯電する条件を見出し図1に示すダイアグラムとしてまとめた。その条件を要約すると、「霰が摂氏-10~-15度付近で雪片と接触するとき負に帯電する。ただしその時の環境は適度に乾いていなければならない。」といったシナリオである。なお梅雨末期によく経験する集中豪雨の場合、そのようなときには非常に雲水量の高いのが普通で、霰は正に帯電することになるのであるが、このような極端な場合は本稿での議論の外としたい。すなわち集中豪雨下のような限られた場合を除けば、成熟期にある雷雲の電荷分布は、図2に示すように、高度の低い位置から上部に向かって、限られた小領域に電荷のあるポケット正電荷(湿気た霰)、パンケーキ状とも言われている比較的薄い負電荷(乾いた霰)、そして雷雲の上層部に広く分布する正電荷(雪片)となっていて、いわば三重極構造となっている。

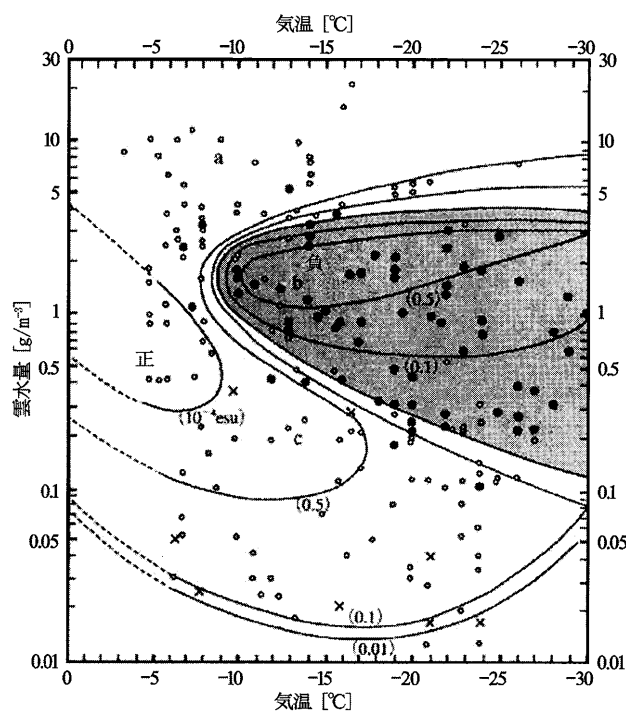


図1 着氷電荷分離機構。霰の電荷符号は白丸が正、黒丸が負。氷晶1個あたりの衝突による電荷分離の大きさ(単位: esu)を数字で示す。

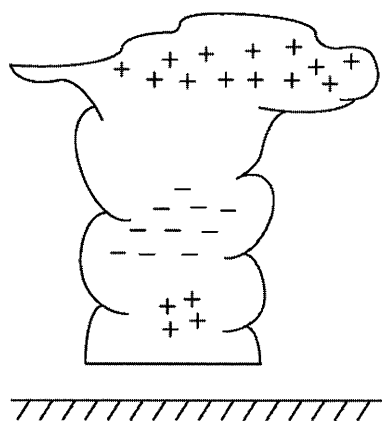


図2 雷雲の三重極構造。

仮説・着氷電荷分離機構を考慮して、負電荷の主として存在する付近の温度を摂氏 -12 度と仮定すれば、真夏の場合この地上高度はおおよそ 7 kmと概算することができる。これは大雑把な近似ながら、地上付近を摂氏 30 度、気温減率を 0.6 度/ 100 mとしての概算の結果である。ちなみに冬季の場合、地表を摂氏 6 度(日本海沿岸を流れる対馬暖流の海面温度は、摂氏 10 度は下るまいだろうが...)として、負電荷の存在する高度は 3 km程度となる。両者の高度の違いは、現象論的には落雷の際の興味ある極性相違となるのだが、それは次節で述べることにする。

4.1.3 落雷の極性

前節では、夏季雷嵐時の成熟期にある雷雲内電荷分布の概念図を示した。古典的な絶縁破壊理論と高電圧発生装置

を用いた室内実験を併せて考えれば、雷雲内に正負電荷が分離され、例えば 10 C以上の電荷が蓄えられ、電界強度が 3.0×10^6 V/m程度ともなれば放電を開始して、雲放電もしくは対地放電となる。前節の議論によれば、夏季の雷放電活動の場合、負電荷領域は地上高 7 kmで、この電荷が大地に誘導される正電荷と中和する現象が比較的多く、負極性の落雷ということになる。一方雲放電は、雷雲内(あるいは雷雲間)の電荷間での放電で、落雷より発生する可能性が高く、落雷数との比をとれば、概ね $10:1$ 程度であろう。ただしこの比は、Severe Stormと呼ばれる「雷嵐」の激しさに依存し、たとえば竜巻を伴うような場合には、 $100:1$ となるといった報告もある。さらに雷雲上層部の正電荷が落雷に寄与することもないわけではなく、正対負落雷の比は $1:10$ との報告もある。しかしながら前述の内容は、「夏季雷嵐時」と付したように、一般的な夏季の統計的な意味での知見である。

ここで1970年代になって北陸の冬季に見いだされた正極性落雷について考えてみたい。先に述べた仮説・着氷電荷分離機構によれば、摂氏 -12 度の高度に存在する霰が負に帯電しており、冬季には前節で述べた通り地上高 3 km程度で、したがって正電荷の地上高はたかだか 5 km程度となっていることが知られている。夏季に比べ対流は弱いといえ、単位体積あたりに含まれる電荷量は、夏冬で大差ないものと仮定して現実的には矛盾ないであろうと考えたい。それなら、雷雲内電荷の地上に及ぼす電気的な影響の強さはどうなるであろう。くどいようだが総量は大きく、冬の距離が夏の半分ということになるので、それぞれの電荷群の作る電界強度あるいは電場は、距離の 2 乗に逆比例することを考慮して、冬季雷雲の正電荷の地上への影響は、夏季雷雲のその 4 倍も強いということになる。ここまでの話は、下層の負電荷のことを無視して議論しているため、えらく乱暴な議論には違いないが、冬季雷活動時の正極性落雷の相対比率の多さがこのあたりとも関係しているとは、筆者の理解である。それに、冬季雷雲は強い西風で傾くということや、夏季程も上昇気流が強くなく下層で負に帯電している霰が容易に落下してしまうと予想されることなどの理由で、雷雲内の正電荷が中和される正極性落雷が比較的容易に発生すると理解されている[4]。このほかにいくつかの仮説も唱えられてはいるものの、必ずしも満足な説明が、今までのところなされていない。ともかく夏季には落雷極性の比率が正対負 $1:10$ 程度であるのに対し、冬季には $1:1$ 程度になるというのが現象論的な知見である。ただ筆者は、正電荷の位置が地面に近いことが、冬季に正極性落雷の多い一つの要因に違いないと信じていることを重ねて書き添え、本節の結びとしたい。

4.1.4 雷放電の進展

筆者が、雷放電と呼ぶ現象を情緒的に言うなら、「正負両電荷が繋がって一緒になる」現象である。そしてその繋がる過程を我々は、放電の進展と呼んでいる。ただ両電荷が一緒になって消えてしまうのではなく、中和するというのが正確な表現であるかも知れない。雷雲の電荷と大地の

電荷間の中和を落雷，雲の中の電荷間の中和を雲放電と呼ぶことはこれまでも述べている．これら雷放電に関わる電荷は，大気という絶縁媒質で囲まれている．だから一挙に繋がって中和するのではなく，筆者らが「ステップトリーダ」と呼んでいる間欠的な進展の後繋がることになる．

これまで，電荷には正電荷領域と負電荷領域があると述べてきたけれど，放電の開始は，正の電荷の付近であることも，負の電荷の付近であることもある．通常電界強度が高い，言い換えれば電界強度を高くする原因，例えばとがった霰などが存在すれば，そのあたりから放電が開始する．さらに放電の開始は，電荷の極性に依存して条件が異なり，電界強度という物差しによれば，正電荷の場合の放電の開始する電界強度は，負電荷のそれより一桁程度低いことが，経験や実験を通じて知られている．近年，放電の開始は電界強度という物差しだけで決められるのではなく，宇宙線を起源とし我々のまわりを高速で飛び出してしまう電子(runaway electron)が寄与するのだという仮説がある．すなわち最初に述べた放電の開始を古典的絶縁破壊と言うなら，後者は逃走電子絶縁破壊の仮説ということになる．そして筆者は，どちらかに軍配が上がるというよりは，両仮説とも正しく，周囲の環境によりいずれかの場合，あるいは複合する形で放電が開始するのだろうと理解している．

放電開始の極性が正か負かはともかく，絶縁体である空気を電気の通りやすい状態に変えない限り進展はできない．これが先に述べたステップトリーダとなる理由で，進展と停止を繰り返すとき，電磁波が放射される．放射のされ方は，正と負でかなり違う．電磁波的な静かさという観点から見れば，負電荷からの放電進展の放射する電磁波強度が20 dB程も強いという観測事実[5]もある．いずれにしても雷放電の進展を，稲妻の進み具合という言葉に変えて理解していただいてもよく，1000万分の1秒というVHF波帯のインパルスが数多く放射される．様相の違いの最右

翼は，放射されるパルスの強度で，負の放電は，正の放電の10倍以上もあることを再度強調しておきたい．

これまで正の放電，負の放電とあいまいな表現をしてきたけれど，正確には Negative Breakdown (負の絶縁破壊) および Positive Breakdown (正の絶縁破壊) と表現されるべきであろう．筆者らが，長年 VHF 波帯広帯域干渉計を用いて研究しているのは，パルスの放射されている位置を推定することなのである．実はこのパルス雷雲のあちらこちらから放射されていて，放射の位置を時間経過に従って並べて行くと，はじめの節でも述べたように稲妻の形とほぼ同様になる．すなわち雷放電の進展の研究手段は，VHF パルスの放射される順序を明らかにすることなのである．

以上の議論を踏まえ，広帯域干渉計やその観測結果例を次節で紹介したい．

4.1.5 VHF 波帯広帯域干渉計

VHF 波帯広帯域デジタル干渉計は干渉法を基に VHF 波帯電磁波放射源を標定するシステムである．干渉法の基本原理は2機の広帯域アンテナで受信し，VHF 波帯広帯域電磁波の位相差を求めることである．また，本システムの特筆すべき点は広帯域信号にこの手法を適用していることで，したがって搬送波成分を考慮しなくてもすむことである．別の言い方をすれば，同調回路などの必要がなく，デジタル干渉計を構成するのに有利となっている．

図3のようにアンテナ間の距離が d であるアンテナ対を考えると，1対2機の広帯域アンテナが受信した信号をそれぞれ $F_1(t)$, $F_2(t)$ とする．実際はこれらが有限長の離散信号 $f[n]=f(n\Delta t)$ ($0 \leq n \leq N-1$) であることから，その離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform, DFT) は次のように定義される．

$$F_1[m] = \sum_{n=0}^{N-1} f_1[n] \exp\left(\frac{-j2\pi mn}{N}\right) \quad (0 \leq n \leq N-1) \quad (1)$$

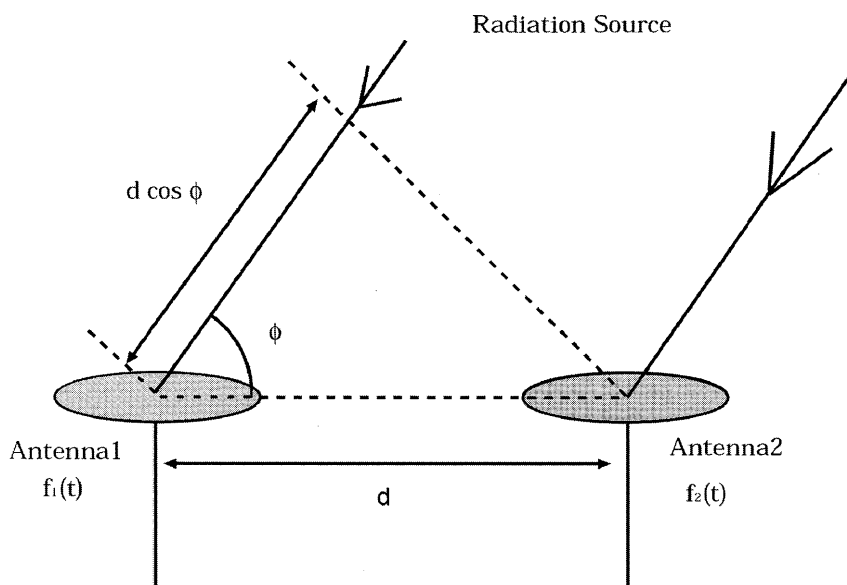


図3 アンテナの基本構成．

$$F_2[m] = \sum_{n=0}^{N-1} f_2[n] \exp\left(\frac{-j2\pi mn}{N}\right) \quad (0 \leq n \leq N-1) \quad (2)$$

ここで、 F_1 と F_2 の相互相関関数 $G[m]$ は次の「畳み込み」で与えられる。即ち

$$\begin{aligned} G[m] &= R_1^*[m]R_2[m] \\ &= G_{\text{Re}}[m] + jG_{\text{Im}}[m] \\ &= |G_{12}[m]| \exp(-j\theta[m]) \end{aligned} \quad (3)$$

であり、フーリエ周波数毎の位相差 $\theta_{12}[m]$ は

$$\theta_{12}[m] = \tan^{-1}\left(\frac{G_{\text{Im}}[m]}{G_{\text{Re}}[m]}\right) \quad (4)$$

として算出できる。具体的な演算過程では相互相関関数に頼ることなく、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) を用いてフーリエ成分毎に位相差 $\theta_{12}[m]$ を求めているけれど、数学的には等価であろう。ただ高周波数成分ではフーリエ成分の位相差が一周期 (2π) を超える場合があり、フリッジ不確定性を考慮しなくてはならない。点波源の広帯域信号の場合、位相差がフーリエ周波数に対して線形であろうことを利用し、高周波数に対して θ_{12} に $\pm 2\pi$, $\pm 4\pi$ の適当な値を加算することでこの不確定性を取り除くことになる。ただし最低次のフーリエ成分には 2π の不定性が起こらないため、低次から高次に繰り返し方的に位相差を明らかにしていくと、図4のようにフリッジ不確定性を取り除いた位相差 θ_{12} が求められる。雷放電進展に伴い放射される電磁波を対象とするとき、アンテナ間隔 d に対して電磁波放射源までの距離が十分長いのでアンテナ付近では平面波とみなすことができる。そのため、アンテナ対のベースラインに対する入射角 $\phi[m]$ は

$$\phi[m] = \cos^{-1}\left(\frac{c\theta[m]}{2\pi f[m]d}\right) \quad (c: \text{光速} (\sim 3.0 \times 10^8 \text{ m/s})) \quad (5)$$

として求めた位相差 $\theta[m]$ から算出できる。本稿では、全フーリエ周波数成分について求められる入射角の算術平均を、VHF 波帯電磁波放射源の入射角として採用している

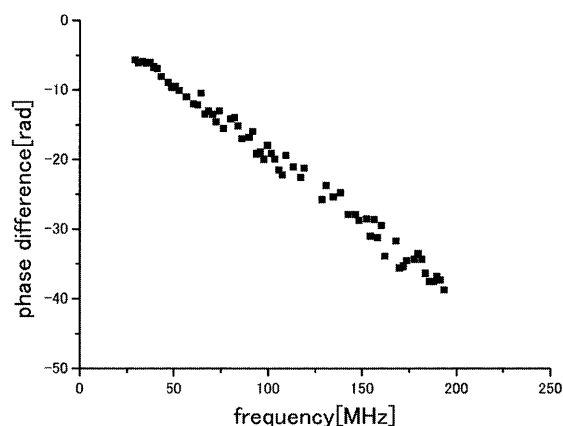


図4 フリッジ不確定性を取り除いた位相差 θ_{12} .

が、たとえば最頻値、中央値等々のいずれかを採用することが可能であろう。いずれにしても、VHF 波帯電磁波放射源はベースラインを軸として、頂角を $\phi[m]$ とする円錐の側面上に存在することになる。そこで、図5に示すように直行する2つのベースラインで入射角 ϕ_1 , ϕ_2 を求めると、VHF 波帯電磁波放射源の方向は2つの円錐の交点として求めることができる。

このとき、観測点を原点とし、電磁波放射源の x 座標を x , y 座標を y , 電磁波放射源までの距離を r として、入射角 ϕ_1 , ϕ_2 を求めると、

$$x = r \times \cos \phi_1 \quad (6)$$

$$y = r \times \cos \phi_2 \quad (7)$$

のように示される。一方、電磁波放射源の x 座標および y 座標を方位角 α と仰角 β で表せば、

$$x = r \times \cos \beta \times \cos \alpha \quad (8)$$

$$y = r \times \cos \beta \times \sin \alpha \quad (9)$$

となり、式(6)~(9)を連立させて方位角と仰角について解いて、

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\cos \phi_2}{\cos \phi_1}\right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \cos^{-1}\left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \alpha}\right) \\ &= \cos^{-1}\left(\frac{\cos \phi_2}{\sin \alpha}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

と求められる。このようにして、VHF インパルス波到来の方位と仰角を求めることができることになる。

4.1.6 放電進展様相の観測結果

VHF 波帯広帯域干渉計による観測結果を図6~8に示す。本来ならアニメーションにしても示すべきところではあるが、本稿は印刷しての議論であり、残念ながらそれはできない。ここに図6は雲放電、図7は負極性落雷、そして図8は正極性落雷の放電進展様相である。なお図6~8の横軸および縦軸はそれぞれ、方位および仰角となっている。先に述べたようにこのように表示すると進展の動きまでは理解できないため、図中に矢印で概ねの動きを示

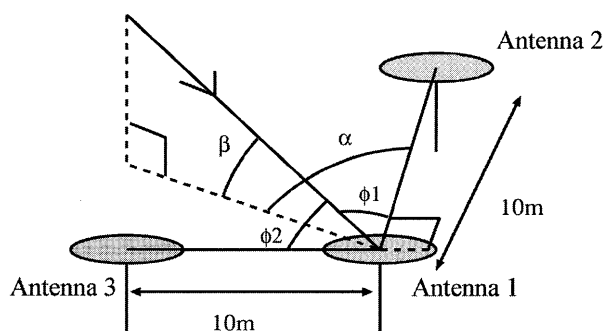


図5 干渉計の二次元標定。

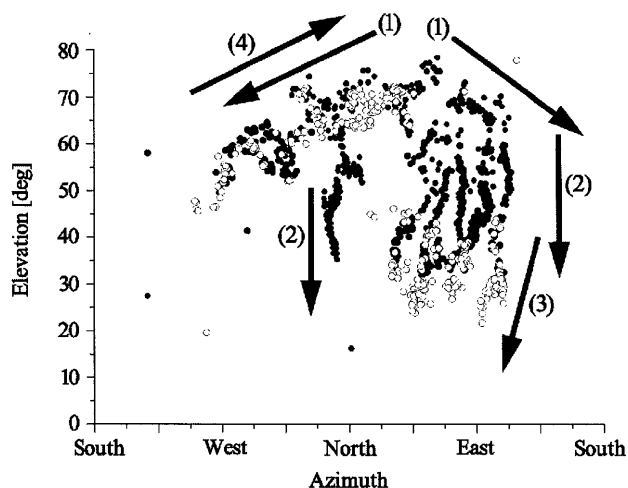


図6 雲放電の観測結果。(1)北東から左右に分かれ、(2)6本の枝が同時に進展する。(3)東の枝の進展が終わった後、(4)では(1)と同経路を逆に進展した。

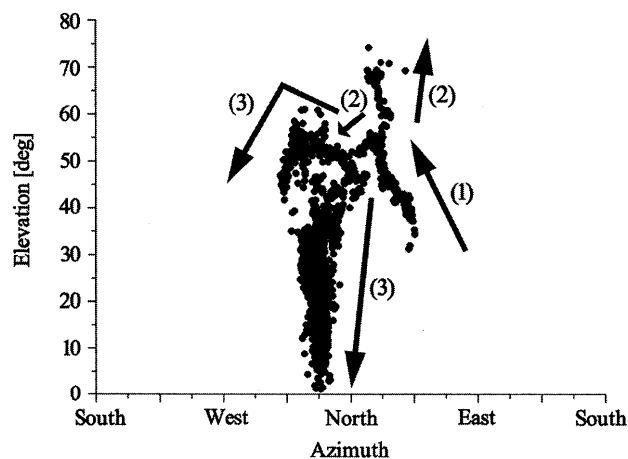


図7 負極性落雷の観測結果。(1)北東から開始し、(2)進展先が2つに分かれる。(3)さらに分岐し一方が地面へ進展した。

している。これまでの議論で重ねて述べているように、通常 Negative Breakdown (負極性の絶縁破壊) 進展に伴い放射される VHF パルス波の振幅が大きいため、VHF 広帯域波帯干渉計で可視化できるのは、負のリーダー進展および正極性落雷の場合の帰還雷撃進展 (もしくはリコイルストリーマ) であり、したがって図7ではリーダー進展が、図8では帰還雷撃の進展が示されている。難解なのは図6に示している観測結果で、この図では花火の「しだれ柳」の如くに見受けられる放電路も、実際その詳細進展様相まで考慮すれば、Negative Breakdown やリコイルストリーマが観測されているのが理解できるけれど、本稿ではそこまでは立ち入らない。雷放電を議論する場合、本稿の最初に述べているとおり、「Negative Breakdown」と「Positive

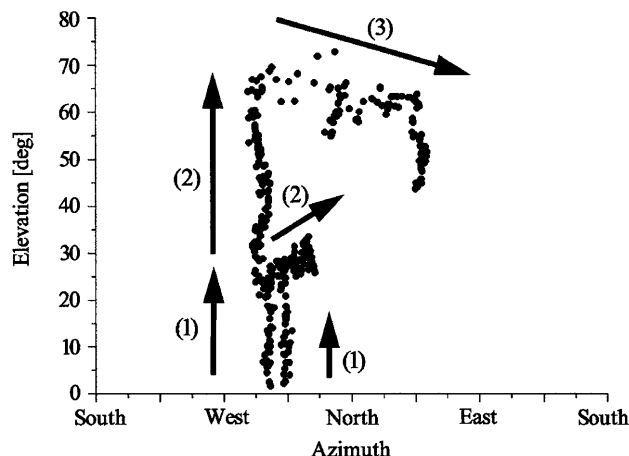


図8 正極性落雷の観測結果。(1)北西から同時に2本の帰還雷撃が開始した。北西側の帰還雷撃が終了すると、(2)西側の帰還雷撃が二手に分かれ、さらに(3)一方が北東へと進展した。

Breakdown」の両過程を経て中和が完結するため、雲放電の場合 (あるいは雲内の放電活動の場合) は、図6およびその説明に述べているように複雑な進展過程をするものと理解している。

4.1.7 おわりに

本稿では、筆者らの大阪大学大学院工学研究科の雷放電研究グループが行っている、VHF 波帯広帯域干渉計による最近の観測結果を紹介しながら、放電の進展様相あるいは素過程について議論した。ちなみに開発してきた干渉計は、ほぼ稼働型といえる程度にまで完成期に近づいており、図6～8の結果は取り立てて見やすい表示となるような処理は一切施していない。筆者が講演などで冗談として申し上げるように、通常非常な近距離への落雷でない限り、雷鳴の聞こえるよりは早くに、放電路が可視化されてパーソナルコンピュータの画面に表示されることを付け加えて、本稿のまとめとしたい。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、ご協力いただいた本学博士後期課程学生の中村君および秋田君に謝辞を表したい。

参考文献

- [1] T. Ushio, Z-I. Kawasaki, Y. Ohta and K. Matsu-ura, Geophys. Res. Lett. **24**, 2769 (1997).
- [2] T. Morimoto, A. Hirata, Z-I. Kawasaki, T. Ushio, A. Matsu-moto and J.H. Lee, IEEJ Trans. FM. **124**, 1232 (2004).
- [3] T. Takahashi, J. Atmos. Sci. **35**, 1536 (1978).
- [4] 北川信一郎, 河崎善一郎, 三浦和彦, 道本光一郎: 大気電気学 (東海大学出版会, 東京, 1996) 6章.
- [5] T. Morimoto, Z. Kawasaki and T. Ushio, Atmos. Res. **76**, 445 (2005).