

雷放電の位置標定

Location of Lightning Discharge

石井 勝*

Masaru ISHII

雷放電の位置標定を行うことについては、特に光で見ることのできない雲内、あるいは見通し距離外の現象に対して要求があった。1970年代になって、これらを可能にする位置標定システムが次々と実用化され、その効果で夏の雷に関しては、防災、研究の両面で、かなり色々なことが判明してきた。これらの実用面、研究面で威力を発揮している各種の位置標定システムについて解説する。

1. はじめに

何らかの現象を研究対象とするとき、その生じる位置を把握することは、極めて基本的な研究手段である。特に研究対象が制御できない自然現象であり、遠隔測定がその取ることのできる主要な手段である場合、観測点から現象の生じている点までの距離を知ることは、現象にかかわる物理的諸パラメータを推定する上で、欠かすことのできない場合も多い。

自然現象が災害をもたらす等、社会活動に大きな影響を及ぼす場合には、単にその現況を把握し、関係方面に伝達するだけでも社会に貢献することとなる。この場合現象の位置標定手法は、研究の手段にとどまらず、社会的にもその整備が望まれることとなる。雷現象は言うまでもなく、この種の自然現象の一つである。

光学的手段による観測が可能ならば、通常はそれが最も精度が良く、かつ比較的容易に実現できる位置標定手法となろう。雷研究においても、精度の良いものとしては、これが長い間唯一の観測手段であった。しかし光は雲を透過する際に散乱され、放射源を精度良く位置標定することができなくなる。また地上でも遠方の雷を観測する場合には、地球の曲率に妨げられない距離でも、雷活動が存在するようになるときに視程が数十km以上にもなることは、余り期待できない。したがって、雷雲の中では何が起きているか、あるいは数十km以上遠方の雷活動について知るためには、これらの条件下であまり散乱、減衰しない媒体を利用する必要がある。数GHz以下の周波数の電磁波、それに低周波の音波が、これらの目的のために利用可能である。また光も、上方から観測できる場合には、視程の制限を受けない。

これらの媒体を受動的あるいは能動的に使用して、雷

放電の位置標定を行う幾つかのシステムが、1970年代に入って相次いで実用化され、雷研究はそれに伴って飛躍的な進歩を遂げた。また数百km遠方の雷活動を実時間で把握する実用的なシステムも開発され、研究に使用されるのに先んじて、防災面で広く利用されるようになっている。いずれも位置標定の原理そのものは古くから知られていたものばかりである。しかし地震、暴風雨といった第一級の自然災害に比べれば重要度が低いと見られる雷研究のための位置標定システムが、次々に実用化されるに至ったことには、マイクロプロセッサを始めとする半導体製品の大幅なコスト低減が寄与している。

2. 雷放電の概要

2.1 放電の過程

火山雷などの特殊なものを除き、雷現象は積乱雲の中で電荷が分離されることに始まる。電荷分離の機構についてはここでは立入らないが、負電荷は電荷分離の生じている場所に留まり、正電荷は雲内の上昇気流に乗って上方に運ばれてゆくのが主要な過程となっていることは、現在のところほぼ定説となっている。分離された電荷の蓄積によって、その周辺の電界が局部的に増大し、空気の絶縁耐力を越えると放電が生じる。こうして、それまでは静電場の観測のみでしか知ることのできなかった段階から、電磁波、光、音の放射によって観測可能な段階へと雷放電の過程が進行してゆく。放電は雷雲のもつ電界のエネルギーが減少して、それを継続させることができなくなるまで続き、その時間はおおむね1秒以内である。放電が終了すると、直ちに分離された電荷の蓄積が再開される。

雷放電の形式は、放電経路によって対地放電（落雷）、雲放電、それに放電路が空中で終わっている大気放電の3種に大別される。雷放電は雲内放電と雲間放電にさら

*東京大学生産技術研究所 第3部

に分けることもできるが、この区別は重要ではない。

雷害の主要な原因である対地放電は、他の放電と同じく、雲内で放電路が伸展してゆく段階からはじまる。夏に見られる対地放電のほとんどは負電荷の放電で、その場合には、雲外に伸びた放電路は数十 μ sの間隔で明滅しつつ、大地に向かって枝分かれしながら伸びてゆく。こうしてステップを踏みながら伸びてゆくことから、この段階の放電路は階段状先駆（ステップトリード）と呼ばれる。その実態は、負電荷のつまった細長い紐が雲からぶら下がっているようなもので、先端の電界は非常に高くなることから次々にそこで絶縁破壊が生じ、紐が伸びてゆく。伸びる速度は 10^6 m/sのオーダーである。雲から供給される電荷量が十分ならば、枝分かれしたステップトリードの一端が大地に到達し、そこから帰還雷撃と呼ぶ明るい部分が、リードを逆にたどって光に近い速度で上昇してゆく。このとき放電路と大地の間には、継続時間 100μ s程度、ピーク値が数十kAオーダーのパルス電流が流れるが、これはリード中の電荷が放電する過程である。その後、雲内の電荷が大地に流入する過程が数ms続き、その間は数百Aの電流が流れる。大地への電荷の移動がこれで終わらず、放電路の跡をたどって再び電荷の紐が下りてきて、次の帰還雷撃が生じることがある。前の雷撃から時間がそれほど経っていない（約百ms以内）ときには、下りてくる電荷の紐は矢形先駆（ダートリード）と呼ばれ、連続伸展で、速度も1桁速く、枝分かれもしない。前の雷撃から少し時間が経って、古い放電路の導電性がかなり失われていると、リードはステップとダートの中間的な性質を示し、またしばしば放電路の下部では古い経路を外れて、近くの異なった地点に落雷する。これを静止写真で写すと、放電路の下端が二又に分かれているように見える。2番目の帰還雷撃以降は後続雷撃と総称し、それを含む対地放電を多重雷と呼ぶ。夏には半数以上の対地放電が多重雷である。

以上は対地放電の中でも最も良く研究されている負極性の下向き放電、すなわち雲からの下向きリードにはじまり、負極性電荷が大地に流入する過程について述べたものである¹⁾。高緯度の地方を除き、年間の落雷数の90%以上が負極性の下向き放電である。

これ以外の経過をたどる対地放電、すなわち夏を除く季節に多く見られる、雲中の正電荷が大地に流入する形式の放電（正極性落雷）や、高い建造物の先端から雲に向かってリードが上昇することによって開始される上向き放電、それと同種のワイヤ付きロケットにより誘雷される放電がある。いずれも負極性下向き放電とはやや異なった経過をたどり、数としてはかなり少ない。雲中電荷と大地の間に一度放電路が完成すれば、以後の経過は大筋ではほぼ同じと考えられる。

雲放電には明確に識別される帰還雷撃がない。このた

め流れる電流はせいぜい10kAのオーダーで、余り大きくないと思われる。これについては航空機による少数の直接観測例がある²⁾。

2.2 電磁波の放射

雷放電に伴って、広い帯域にわたる電磁波が放射される。大気圏内に起源をもつ自然雑音、いわゆる空電の原因の大部分は雷放電と考えられる。放射される電磁波のスペクトルは、古くから狭帯域の受信機によって観測されており、図1に示すように100MHzまでは約6 dB/oct、それ以上の周波数では約12dB/octの割合で、周波数が高くなるに従って減衰するような特性をもつ³⁾。放射の最大となる周波数は、放電形態により若干異なるが、10kHz前後に存在する。ただし、この滑らかな曲線は、1秒以上にも及ぶことがある雷放電の全過程を平均したものであって、それを構成する個々の過程における電磁波の放射強度分布が合成されたものにほかならない。

図2は、広帯域の観測システム⁴⁾で記録した、約30~50km遠方の負極性帰還雷撃による典型的な電磁界変化波形を示す。この波形は雷放電路を流れる電流波形と密接な関係があると考えられており⁵⁾、大きく立上った

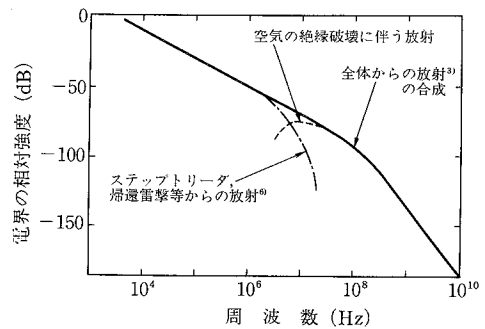
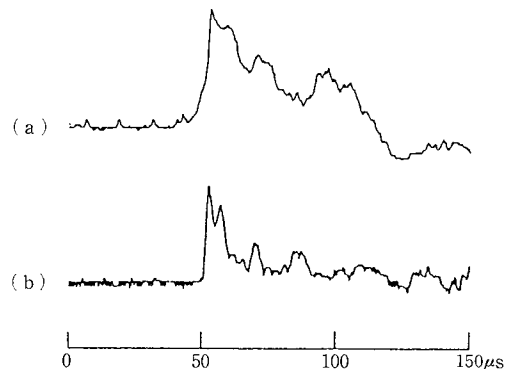


図1 雷放電による電磁界放射のスペクトル



(a) 負極性第1雷撃
(b) 負極性後続雷撃

図2 帰還雷撃に伴う電磁界変化波形例

ている部分が帰還雷撃電流の立上がり部分に相当する。その前の小さく規則的なパルス列はステップトリグの各ステップに対応すると解釈され、後続雷撃による波形には認められない。この小さなパルス状電磁界変化でも数kAの電流に対応すると推定される。帰還雷撃の前後の電磁波の放射強度は非常に大きく、電磁波放射スペクトルのピークを構成する。帰還雷撃に伴う電磁界変化は、電流値の大きさを反映して雲放電によるものよりも大きく、VLF成分は地球の裏側にまで地表波として伝搬する。これらの大電流に起因する放射成分は図1に示したように、数MHzを境にして、それより高い周波数では急速に減少することが判明している⁹⁾。

高い周波数領域における、大電流とは無関係な放射スペクトル成分の放射機構の詳細は、まだ十分に明らかになっていないが、雲の内外で放電路が進展しているとみられる期間に観測され、帰還雷撃が生じている間にはほとんど受信されない。このため、進展中の放電路の先端において、まだ電離されていない空気が絶縁破壊を生じるに伴って、高い周波数の電磁波が発生すると考えられている。

2.3 音波の放射

対地あるいは雲放電の放電路が完成し、パルス状の大電流が流れると、放電路が急激に加熱されて膨張し、外側に向けて広がる円筒状の衝撃波を発生する。平均的なエネルギーの雷では、衝撃波は数m伝搬すると音波へと緩和すると考えられ、これが遠方では雷鳴として聞かれる。その周波数スペクトルは100Hz付近に最大値をもつ¹⁾。この音源の位置標定ができれば、可視光では観測できない雲中の放電路の形状が推定できる。

1Hz付近の超低周波音波は、雷鳴のスペクトル上ではパワーがピークの1/100以下で、その成分は問題にならないが、雲中からの放射が雷鳴とは別に観測されており、放電路形成とは別の発生機構が推測されている⁷⁾。

3. 位置標定方式の原理

雷放電の位置標定を受動的な方法で行う場合には、光を含む電磁波、または音波を利用することになる。これらの放射源の位置標定は、放射の到来方位を測定する方式と、複数の観測点への放射の到来時間差から計算する方式の2種類に大別される。

到来方位を計測する方式では、何らかの方法で標定対象までの距離がわかれば、1地点からの観測で位置標定が可能である。近距離からの測定で良く利用されるのは音と電磁波の到来時間差である。数千km遠方の雷をVLF領域で観測する場合には、電磁波の伝搬特性の距離依存性が利用される。

離れた2地点から放射の到来方位が同時計測できれば、交会法により位置が判明する。計測の同時性の精度は、

2点で同じ現象を観測していることが保証できていればよい。複数の観測点への放射の到来時間差を利用する方式では、測定の同時性に要求される精度は交会法よりもはるかに高い。

放射の到来方位の測定では、電磁波や音波の波面を平面波として扱うことになる。近距離からの測定では空間的な方位(方位角および仰角)が求められる。これには各観測点に複数のアンテナまたはマイクロホンを設置して、それぞれへの放射の到来時間差を計測して方位を決定する方式が使われる。これはさらに、広帯域の受信システムを使用して入射波形の特徴を抽出し、時間差を直接抽出する方法と、狭帯域の受信システムを使用して、各アンテナへの入射波形の位相差を計測する方法に分けられる。音波の到来方位の計測には前者が使用される。

方位角のみの測定でよい遠距離の雷においては電磁波のみが用いられる。VHF帯ではビームアンテナの組み合わせ、低い周波数では直交ループアンテナが使用される。

以上、受動的な位置標定方式の原理は単純であり、真新しいものではない。しかし放射源の特性と、これら種々の方式の特性の組み合わせにより、標定精度、位置標定システムの実現性の難易度は、実にさまざまである。たとえば、雷放電路全体からの放射を受信して処理してしまう狭帯域の電磁波到来方位測定システムが雷放電の近くに置かれると、放射源がかなりの空間的広がりを持っているために、測定される方位は不確定の度合いが大きくなる。

以上のほか、レーダによる能動方式、人工衛星による方式、静電界の多地点観測による放電電荷の推定方式などがある。以下ではこれらを含めた代表的なシステムについて述べる。

4. 中・遠距離からの位置標定

4.1 狭帯域受信システム等

数十km遠方の雷放電の位置標定を行いたいという要求は、かなり以前からあったが、それは襲雷警報としての需要のためである。音波の到達距離はせいぜい10km、最大でも25kmといわれているため、数十kmの距離で利用できるのは電磁波に限られる。襲雷警報としてだけならば、標定精度はそれほど要求されないのだから、たとえば雷放電カウンタ⁸⁾を数十kmおきに多数配置してネットワークを構成し、それぞれの動作情報を集中して受信することで実用に供している例がある。これは日本の幾つかの電力会社で実施している。なお雷放電カウンタとは、数十km以内の雷放電数を計数する目的で設計されたもので、最も普及している型はELF帯の電界を受信し、無指向性である。

電磁波の到来方位の計測は、かなり古くから実用化され、早くから雷放電にも応用された。LF、MF帯で狭帯

域で直交ループアンテナにより受信する方式が最も多かったと思われる。直交ループアンテナだけでは方位測定に $\pm 180^\circ$ の不確実性が生じるので、この方式では電界アンテナも必要とする⁹⁾。狭帯域で受信する場合、波形の情報を利用しないことになるので、数十kmの位置では雷放電源の空間的な拡がり方が方位測定精度をかなり悪くする。またこの程度の距離の伝搬では、垂直から大きく傾いた放電路からの電磁波が垂直偏波に緩和していないので、偏波誤差の方位測定への影響も大きい。

VHF帯の電磁波の方位測定にはビームアンテナを用いる。この場合、偏波誤差の問題はなくなり、 $\pm 2^\circ$ という精度を発表している例もあるが¹⁰⁾、電波源の拡がりの問題は依然として残る。100MHzを受信する方位測定局2か所をオンラインで結んだ実用位置標定システムを、航空自衛隊が小松基地周辺で運用している。

1000km以上の距離になると、LF以下の周波数を使用することになる。この周波数では、電磁波は地表波として安定に遠方まで伝搬する。十分遠方の雷放電を測定対象とするので、偏波誤差も少なく、放射源の拡がりも問題にならない。人工衛星による観測が開始されるまでは、これが全球的規模で位置標定を行う唯一の方法であった。世界数か所で位置標定システムが運用されているが、日本では北海道、愛知、鹿児島島の3局でVLF空電を同時に受信し、交会法で位置標定を行うシステムを名古屋大学空電研究所が運用している。受信時刻の同期精度はオフラインで十分である⁹⁾。1か所で方位測定と距離の推定を同時に行うシステムは¹¹⁾、標定精度は落ちるが、複数の受信局間の同期という問題がない。

4.2 広帯域方位測定システム

近年、世界的に広く使用されるようになったシステムで、当研究所でも昭和57年に設置し、引き続き雷観測を行っている。このシステムは複数の落雷方位測定局を電話回線で結んでオンライン化し、落雷位置を交会法により実時間で計算する。この方位測定局も直交ループアンテナと電界アンテナをもち、磁界信号を受信して方位測定を行う点は、古くからある狭帯域システムと変わりはないが、異なる点は、受信周波数を広帯域(1kHz~0.5MHz)として波形情報の利用を可能にしたことである。すなわち波形の特徴を抽出して図2のような帰還雷撃に対応する部分を識別し、2つのループアンテナ出力の波高値の比から、雷放電の方位を算出する。こうすることによって、対地放電のみについて位置標定を行えるようになったほか、方位測定に使用する部分の波形は、雲と大地を結ぶ放電路の大地に近い部分から放射されるため、放射源は平面上の1点となり、かつ垂直に近い放電路からの放射のため、偏波誤差も少ないという利点を持つようになった¹²⁾。実際、筆者らが実測した結果でも、方位測定におけるランダムな誤差の90%は $\pm 1^\circ$ 以内に入っ

おり¹³⁾、数十kmという比較的近い距離からの方位測定でも、VLFによる遠距離雷の方位測定と同程度の精度が得られている。

このシステムは襲雷警報用として広く使用されているが、その特性上、磁界信号強度波高値、対地雷撃の極性についても、多重雷中の個々の雷撃について知ることができるので、研究目的にも十分に使用が可能である。このため最近になって、このシステムを利用して行った雷パラメータ等に関する研究の成果が、幾つか発表されている¹⁴⁾¹⁵⁾。しかしこのシステムの動作特性は、地域、季節、方位測定局の設置条件、信号波形識別のための波形判定基準など、多くの条件に影響される¹⁶⁾¹⁷⁾。システムを研究目的に使用するに当たっては、これらの条件下での動作特性について把握しておくことが重要である。

当研究所のシステムの方位測定局(DF)は、冬季の雷を観測するため、図3のように新潟県に、互に約60kmを隔てて3局設置されている。図4はその1つの柏崎DF局で、建物の上に立っているのが直交ループアンテナであ

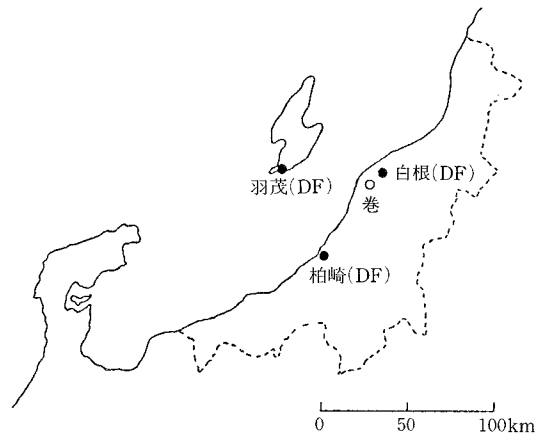


図3 落雷位置標定システムの配置図

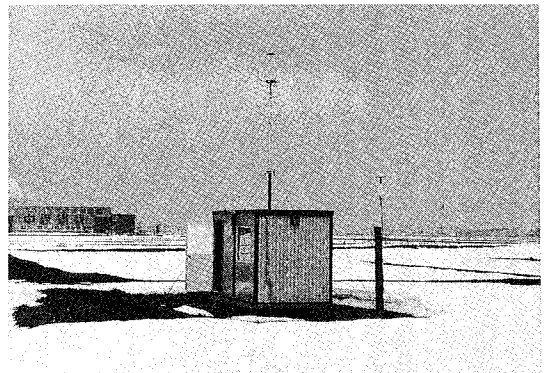
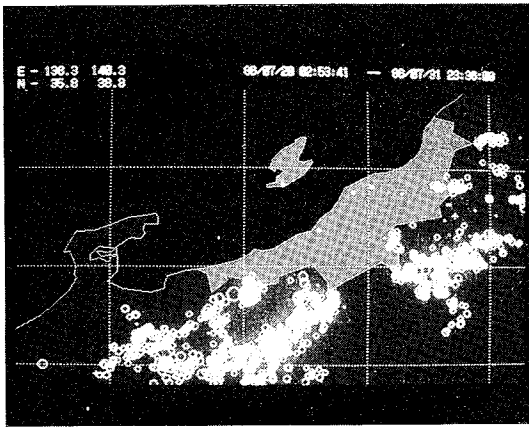
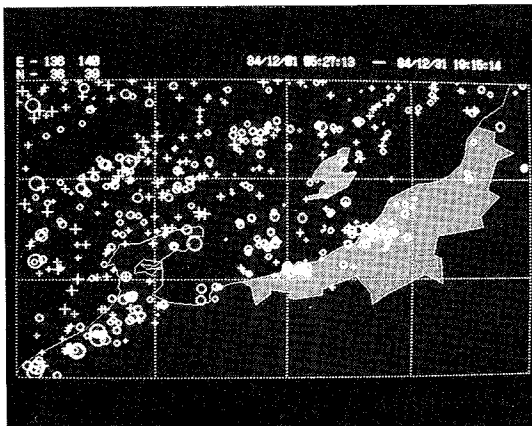


図4 落雷位置標定システムの柏崎DF局



(a)夏季の熱雷による落雷点の分布



(b)冬季の分布

図5 落雷位置標定システム出力の画面表示例

る。図5には夏、冬の一定期間内に標定した落雷点を表示したが、各季節における落雷点の分布状況の違いが一目でわかる。記号の意味は、○が負極性、+が正極性落雷で、大きさは磁界信号強度をあらわすが、これは雷電流の大きさに換算することが可能である¹⁶⁾。

4.3 広帯域到来時間差システム

広帯域方位測定システムに次いで、米国でかなり使われるようになったのが、到来時間差システムである¹⁸⁾。使用目的も同じであり、数百km遠方の雷放電の位置標定を行う。2次元の面上での位置標定なので、最低3つの局が同一の信号を受信すれば標定が可能となる。受信帯域は方位測定システムと同じなので、対地雷撃に対応する波形について位置標定を行うことも可能である。

位置標定精度に関しては、方位測定による交合法よりも、時間差法のほうが原理的にすぐれているのではないかとと思われる。受信局付近の建造物の影響を、方位測定局より受けにくく、また無指向性の電界アンテナで受信するので、アンテナの設置方位を気にしなくてよい。しかし、標定精度を維持するためには、互いに数百km離れ

た受信局間の時刻の同期を μs オーダの精度で保つ必要がある。これはロランCの信号や、航法衛星の助けを借りて行っている。

このシステムの実性についてはまだ明らかではなく、研究目的で使用された例は、まだ目にしていない。方位測定方式では、2局が同時に信号を受信すれば位置標定ができるのに対し、時間差方式では3局が必要なことから、標定可能な落雷数の全落雷数に対する割合(標定効率)は低くなるのではないかとと思われる。標定可能範囲は、方位測定方式と同じ信号を利用していることから判断して、同程度(500~600km)であろう。電界信号強度の記録も行う場合は、電界アンテナの感度が周囲の条件に大きく影響されることから、磁界信号強度を記録する方位測定システムにくらべて感度較正が難しくなると予想される。

5. 3次元的位置標定

5.1 電磁波放射源の位置標定

3次元的位置標定が行えるのは、放電が生じている場所から20~30km以内であり、研究目的が圧倒的に多くなる。光では見えない雲中の放電路の様相を知るためには、この3次元的位置標定が不可欠である。標定対象の大きさが放電路の一部という具合に小さくなると、利用できる電磁波の波長も短くなり、VHF帯がよく使用される。

最初に実現されたのは到来時間差方式である¹⁹⁾。3次元的位置標定のためには、受信局は最低4点必要で、同期の精度も $1\mu\text{s}$ 以内が要求される。図6にはこの最初のシステムにおける受信局の配置を示す。5つの受信局は10MHzの帯域幅のマイクロ波回線で結ばれており、受

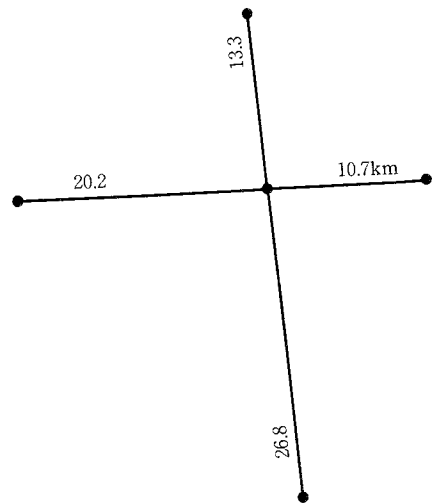


図6 最初のVHF到来時間差方式による3次元位置標定システムにおける5つのVHF受信局の配置¹⁹⁾

信されたデータは記録され、オフラインで解析が行われる。その後米国のケネディ宇宙センターに同種のLDARと呼ばれるシステムが設置されたが²⁰⁾、これは襲雷警報を目的としているために、実時間で位置標定を行う。標定時間間隔、精度とも、最初の南アフリカのシステムより当然ながら粗い。LDARの受信信号記録を用いて、オフラインで放射源の移動を解析し、後述する放電電荷位置の標定結果と比較した研究もある²¹⁾。しかし、記録、解析系を一新した南アフリカのシステムは、雲内の放電路が伸びてゆく状況を実に精細に描き出している²²⁾。

電磁波到来方位測定方式は、1地点に互いに10m程度離してVHF信号受信アンテナ群を設置し、それらへの電磁波の到来時間差を用いる方式²³⁾と、2つのアンテナへの狭帯域信号の位相差検出方式²⁴⁾²⁵⁾が実現された。ただし2地点での同時測定から実際に3次元的な電波源の位置標定を行っているのは、前者のみである。この場合、2地点間の時刻の同期は、同一事象を観測しているか否かが識別できればよいが、10 μ sのオーダの精度は欲しいところである。図7にこの測定の概念図を示す。

5.2 音源の位置標定

マイクロホンを地上に多数設置して、雷鳴による音波の到来時間差からその到来方位を求め、さらに電界信号との間の時間差から音源までの距離を推定し、雲中放電路の位置標定を行う方式²⁶⁾は、扱う信号の周波数帯域が

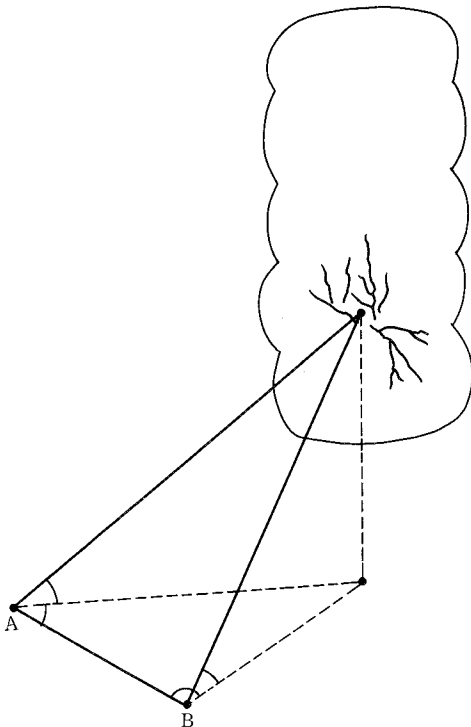


図7 方位測定方式による3次元位置標定システム

低いため、比較的測定が容易である。ただ電磁波放射源の位置標定の精度は気象条件に影響されないのに対し、音波の速度、伝搬経路は気温、風向、風速に大きく影響されるため、これらの垂直分布が同時に得られない限り、音源の位置標定に高精度は期待できない²⁷⁾。

5.3 レーダ観測

雷放電路のエコーが気象レーダ上で観測されることは1950年ごろから知られていたが、レーダで得られる情報が定量的に解析されるようになったのは、1970年代になってからであろう。レーダによる位置標定の精度は、距離については正確だが、方位の精度はビームの幅による限度があり、通常は1°前後である。雷放電路は完全導体という訳ではなく、導電性のコアの直径もレーダ波長よりかなり小さい。導電度の時間変化も早く、約百msで導電性を失うといった特徴がある。このためレーダビームを機械的に振る方式では、現象の変化のほうが早過ぎて、ビームと垂直の方向への構造をとらえることはできず、ビームの方向の情報しか得られないのが普通である。こうしたことから、放電路の導電度、直径、空間的な配置などをレーダ断面積の情報から得る研究が続けられている²⁸⁾。

レーダによる位置標定情報より、雲中での放電路の進展速度が推定される²⁹⁾³⁰⁾。水平方向に90kmにも及ぶ拡がりをもつ放電路の存在³¹⁾や、0.2秒以内に互いに1km以上離れた場所で生じる雷放電の組が多数存在すること³²⁾などはレーダによらなければ観測が困難である。このように、レーダによって雷放電路の位置情報を得るのが主目的の場合には、放電路の電子密度が低くても観測が可能なVHFレーダ、UHFレーダが使用されることが多い。今後はドップラーレーダなど³³⁾、各種のレーダを動員しての雷放電路の観測が、ますます盛んになるものと思われる。

5.4 雲中電荷分布

雷雲の中では上方に正電荷、下方に負電荷があつて、さらにその下方に小さい正電荷が存在するという以前の雲中電荷モデル¹⁾は、最近のゾンデやロケットによる多数の観測によつても、変更が加えられるような発見はない。

こうした直接的な観測だけでなく、雷放電によって急変する静電界を地上の多数の地点で観測し、雲内で変化した電荷分布をモデル化して、その位置と大きさを推定する手法がある。決して新しい手法ではないが、負極性の多重雷で、おのおのの帰還雷撃で放電される負電荷が、従来考えられていたのとは違って、主として水平方向に分布していること³⁴⁾、正極性の対地放電を多く発生させる冬の雷雲でも、正電荷は負電荷の上方に位置し、以前の電荷分布モデルに従っていたこと³⁵⁾が、この手法で明らかになっている。

6. 衛星からの観測

以上に述べてきた手法のほかに、人工衛星や惑星探査機による雷観測がある。専用のセンサを搭載した衛星は、まだ一群のDMSP衛星しかないが³⁶⁾、多目的の光センサや空電センサにより雷放電が観測されている。金星、木星での雷活動はこうして観測され³⁷⁾、また核実験探知衛星による地球上のスーパーボルトの発見³⁸⁾は、一時マスコミをにぎわせた。DMSP衛星も核実験探知衛星も、光パルスを検知するセンサをもつ。

スーパーボルトとは、平均的な雷の100倍以上の光出力を発する地球上での発光現象であり、巨大な雷と考えられている。その報告の中で、光出力が通常の雷の約 10^3 倍を越えるものの出現確率が、 5×10^{-7} と述べられているが、この数字は衛星による観測の重要性を示している。どういふことかという、当研究所が運用している広帯域の磁界による落雷位置標定システムは、落雷の位置標定を行う効率においては、恐らく他の方式より秀れていると思われるが、それでも1システム当たりの年間の落雷検知数は 10^5 のオーダーである。したがって、 10^{-6} 以下の発生確率の現象を、統計値として扱えるような数だけ収集することは、1システムだけでは困難といえよう。衛星からの観測は、地球上をくまなく走査してデータを収集できるのみならず³⁹⁾、発生確率の極めて低い高エネルギー現象のデータ収集にも極めて有力である。

7. おわりに

最後に、現用中または最近運用された位置標定手法をとりまとめて表1に示す。精度は公称値、または条件が良いときの概略の推定値である。

広帯域の磁界による位置標定システムは、現在北米大陸のほとんどをカバーし、世界的にも設置する国の数が増えているが、これはこのシステムがある程度有用であることが認識されているためと見ても良いのではないかと

表1 現行の雷放電位置標定手法

方 式	文 献	媒 体	標定対象	標定結果	精 度	標定範囲
静電界変化	34) 35)	静電界	電荷の移動	3次元	~10%	~20km
音 波 DF	26) 27)	音波,電界変化	主放電路		~10%	~15km
到来時間差	19) ~22)	VHF	空中絶縁破壊		数百m	~30km
DF(到来時間差)	23)	VHF	空中絶縁破壊		0.5'	~30km
DF(電波干渉計)	24) 25)	VHF	空中絶縁破壊	2次元	0.3'	~30km
レ - ダ	28) ~33)	VHF~SHF	放電路		1'	数百km
広帯域 DF	12) ~17)	LF~MF	対地雷撃放電路		1'	数百km
到来時間差	18)	LF~MF	対地雷撃放電路		0.3%	数百km
単一周波数DF	10)	VHF	空中絶縁破壊	2'	~200km	
単一周波数DF	9) 11)	VLF, ELF	対地雷撃放電路	1'	数千km	
衛 星	36) 38)	光	主放電			地球表面

(DF=Direction Finding, 方位測定)

このように、一般的に使用されているシステムに対して、3次元の位置標定システムは非常に特殊であり、製作者以外が運用に当たっているケースはほとんどない。しかしそれらが特にここ10年ほどの間に雷の研究の上で果たした役割については、計り知れないものがある。そのお陰で、夏の雷雲の構造や、負極性落雷についての現象面は、かなり明らかになってきた。すなわち、負電荷の存在領域は、 -10°C 前後の温度の高度で割合に薄い層状に分布し、放電開始領域もこの中に存在することが多いこと、放電路は垂直方向よりも水平方向に伸びる傾向があり、水平成分を多く持つこと、雲内の放電路の進展速度は 10^6m/s のオーダーであること、等である。

冬の雷は、落雷数が少ない割合に、送電線等が事故を起こす割合が高く、正極性落雷が多いこと、かなり低い構造物からでも上向きリーダが伸びはじめ、落雷に至ることがある等、その特異性により、最近注目を集めている。ここで述べた各種の位置標定手法が適用されれば、特異性の原因の解明も急速に進むものと期待される。

本稿をまとめるに当たって、種々御討議をいただいた当所第3部北條準一氏に厚く御礼申し上げる。

(1987年10月24日受理)

参 考 文 献

- 1) M.A. Uman, "Lightning" Dover edition, 1984
- 2) P.L. Rustan, et al., "Correlated Airborne and Ground Measurement of Lightning", Proc. of the Int. Aerospace Conf. on Lightning and Static Electricity, A10, 1982
- 3) T.H. Schumpert, M.A. Hornell, G.K. Lott, Jr., "Measured Spectral Amplitude of Lightning Sferics in the HF, VHF, and UHF Bands", IEEE Trans. EMC-24., pp 368-369, 1982
- 4) J. Hojo, M. Ishii, T. Kawamura, F. Suzuki, R. Funayama, "The Fine Structure in the Field Change Produced by Positive Ground Strokes", J. Geophys. Res., 90, pp 6139-6143, 1985
- 5) C.D. Weidman, E.P. Krider, "The Fine Structure of Lightning Return Stroke Wave Forms", J. Geophys. Res., 83, pp 6239-6247, 1978
- 6) C.D. Weidman, E.P. Krider, M.A. Uman, "Lightning Amplitude Spectra in the Interval from 100kHz to 20MHz", Geophys. Res. Lett., 8, pp 931-934, 1981
- 7) N.K. Balachandran, "Acoustic and Electric Signals from Lightning", J. Geophys. Res., 88, 3879-3884, 1983
- 8) J. Hojo, T. Kawamura, M. Ishii, T. Iwaizumi, "Development of Vertical Antenna Type Lightning Flash Counter and its Sensitivity Adjustment at Site", Trans. I.E.E. of Japan, Sec. E, 101, pp 95-101, 1981
- 9) 岩井, 西野, 柏木, 佐藤:「三点空電方位測定網による雷の発生位置探知システム」, 電気学会論文誌C, 98, pp 43-50, 1978

- 10) H. Yamashita, et al., "VHF Direction Finder for Locating Lightnings at Close Ranges", Proc. of the Res. Inst. of Atmospheric, Nagoya Univ., 30, pp 5-24, 1983
- 11) H. Volland, et al., "Registration of Thunderstorm Centers by Automatic Atmospheric Stations", J. Geophys. Res., 88, pp 1503-1518, 1983
- 12) R.C. Binford, et al., "Wideband Magnetic Direction Finder Networks for Locating Cloud-to-Ground Lightning", 1983 Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, Fort Worth, 50
- 13) 石井, 北條, 河村, 鈴木, 船山; 「磁界による落雷方位測定装置の精度と動作特性の検討」, 昭和59年電気学会全国大会 1021
- 14) D.W. Peckham, M.A. Uman, C.E. Wilcox, Jr., "Lightning Phenomenology in the Tampa Bay Area", J. Geophys. Res., 89, pp 11789-11805, 1984
- 15) R.E. Orville, et al., "Cloud-to-Ground Lightning Flash Characteristics from June 1984 through May 1985", *ibid.* 92, pp 5640-5644, 1987
- 16) 石井, 北條, 三宅, 船山, 塩釜; 「雷パラメータのLLSによる測定」, 電気学会放電・高電圧合同研究会資料, ED-87-84, HV-87-31, 1987
- 17) 北條, 石井, 河村, 鈴木, 小室, 塩釜; 「落雷に伴う電磁界変化波形の特性と評価法」, 電気学会論文誌掲載予定
- 18) R.B. Bent, W.A. Lyons, "Theoretical Evaluations and Initial Operational Experience of LPATS (Lightning Position and Tracking System) to Monitor Lightning Ground Strikes Using a Time-of-Arrival (TOA) Technique", 7th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Albany, 6.6, 1984
- 19) D.E. Proctor, "A Hyperbolic System for Obtaining VHF Radio Pictures of Lightning", J. Geophys. Res. 76, pp 1478-1489, 1971
- 20) C.L. Lennon, "LDAR - A New Lightning Detection and Ranging System", EOS Trans. AGU., 56, p 991, 1975
- 21) P.L. Rustan, M.A. Uman, D.G. Childers, W.H. Beasley, C.L. Lennon, "Lightning Source Locations from VHF Radiation Data for a Flash at Kennedy Space Center", J. Geophys. Res., 85, pp 4893-4903, 1980
- 22) D.E. Proctor, "Lightning and Precipitation in a Small Multicellular Thunderstorm", *ibid.* 88, pp 5421-5440, 1983
- 23) W.L. Taylor, "A VHF Technique for Space-Time Mapping of Lightning Discharge Processes", *ibid.*, 83, pp 3575-3583, 1978
- 24) J.W. Warwick, C.O. Hayenga, J.W. Brosnahan, "Interferometric Directions of Lightning Sources at 34 MHz", *ibid.*, 84, pp 2457-2468, 1979
- 25) R. Richard, et al., "Spatial and Temporal Characterization of VHF-UHF Lightning Electromagnetic Radiation", 7th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Albany, 7.10, 1984
- 26) A.A. Few, "Lightning Channel Reconstruction from Thunder Measurements", J. Geophys. Res., 75, pp 7517-7523, 1970
- 27) A.A. Few, T.L. Teer. "The Accuracy of Acoustic Reconstructions of Lightning Channels", *ibid.*, 79, pp 5007-5011, 1974
- 28) V. Mazur, R. Doviak, "Radar Cross Section of a Lightning Element Modeled as a Plasma Cylinder", Radio Sci., 18, pp 381-390, 1983
- 29) D.E. Proctor, "Radar Observations of Lightning", J. Geophys. Res., 86, pp 12109-12114, 1981
- 30) V. Mazur, W.D. Rust, "Lightning Propagation and Flash Density in Squall Lines as Determined with Radar", *ibid.*, 88, pp 1495-1502, 1983
- 31) W.D. Rust, W.L. Taylor, D. MacGorman, "Preliminary Study of Lightning Location Relative to Storm Structure", Am. Inst. of Aeronaut. Astronaut. J., 20, pp 404-409, 1982
- 32) V. Mazur, G.B. Walker, "The Effect of Polarization on Radar Detection of Lightning", Geophys. Res. Lett., 9, pp 1231-1234, 1982
- 33) V. Mazur, D.S. Zrnica, W.D. Rust, "Lightning Channel Properties Determined with a Vertically Pointed Doppler Radar", J. Geophys. Res., 90, pp 6165-6174, 1985
- 34) P.R. Krehbiel, M. Brook, R.A. McCrory, "An Analysis of the Charge Structure of Lightning Discharges to the Ground", *ibid.*, 84, pp 2432-2456, 1979
- 35) M. Brook, M. Nakano, P. Krehbiel, T. Takeuti, "The Electrical Structure of Hokuriku Winter Thunderstorms", *ibid.*, 87, pp 1207-1215, 1982
- 36) B. N. Turman, B.C. Edgar, "Global Lightning Distributions at Dawn and Dusk", *ibid.*, 87, pp 1191-1206, 1982
- 37) M.A. Williams, E.P. Krider, D.M. Hunter, "Planetary Lightning, Earth, Jupiter and Venus", Rev. Geophys. Space Phys., 21, pp 892-902, 1983
- 38) B.N. Turman, "Detection of Lightning Superbolts", J. Geophys. Res., 82, pp 2566-2568, 1977