

雷雲の北東のすみでは、新しい対流細胞が発生している。その反面、雷雲内部では等値線の混みかたがゆるく、古い対流細胞の生き残りが高層の風で流されてる様子を偲ばせる。

### 3. 第II世代の雷雨

次に、16時少し前に熊谷付近で発生した大雷雨は、発生域Aの雷雨からの冷氣外出流がひきおこした第II世代の雷雨のようである。第5図によれば、発生域Aの雷雨の地域で、1時間に最大 $-8^{\circ}\text{C}$ に達する気温降下があり、雲底下の冷氣プールの存在を示している。

また第5図に示した15時のアメダスの風を14時の図(省略)と比較すると、目立って変化しているのは埼玉県東部である。ここでは、冷氣プールからの発散風と、

それまで卓越していた東風が合流して南東風となったと思われる。そして、その先端部で風が収束しており、ここで熊谷雷雨が発生したのではないだろうか。

同じようにして、発生場所と発生時刻からみると、発生域Cは熊谷雷雨による第III世代の雷雨である可能性がある。しかし、その点は第II世代ほどはっきりしない。

### 謝 辞

図ならびに資料を提供して下さい共同研究者の日本気象協会の奥山和彦氏、田口晶彦氏、および「つくば域降雨実験観測」グループの諸氏に感謝の意を表します。

202:203 (雷雲; 落雷)

## 3. 雷雲の電気構造と落雷の発生\*

仲 野 黄\*\*

### 1. はじめに

雷雲内には、上層部に正電荷、下層に負電荷があり、さらにその下に局所的に正電荷が分布しているという構造が1950年代に描かれ、落雷は局所的な正電荷と負電荷の間の放電によって開始するという事になっている。しかし、ここ10数年の雷雲内電荷分布の直接観測、雷放電の発生位置の測定、室内実験等によって、電荷分布、電荷発生機構や放電進展様相が今までよりはっきりしてきた。推定から実測へと移行してきたといえる。本稿では雷雲の電気構造と落雷の発生と雲内での放電進展様相について、最近の実験・観測結果について紹介したい。

### 2. 雷雲の電気構造

#### 2.1 雷雲の電気構造

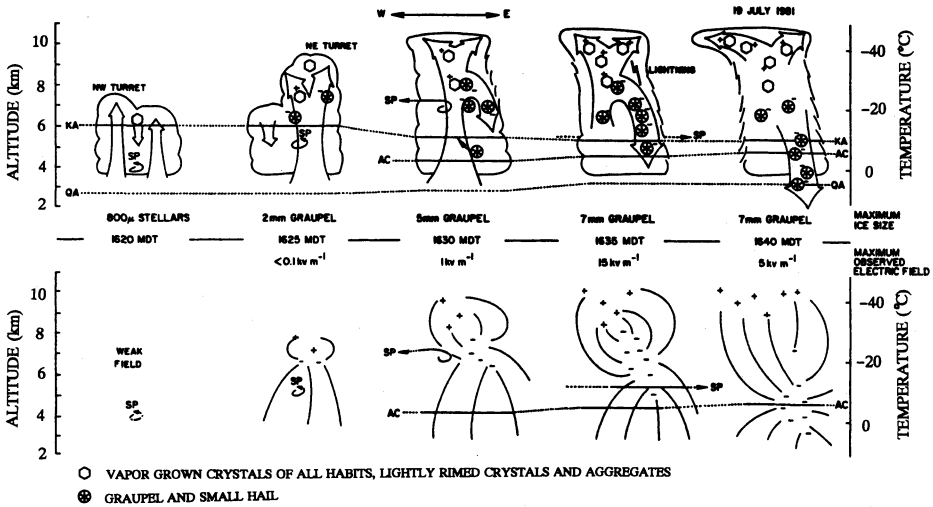
雷雲の電気構造を探るのには2つの方法があげられる。第1は気球やロケット、航空機を用いた直接観測

であり、第2は雷放電に関与した電荷について、その電気量や放電位置から電荷分布を推定する方法である。気球・航空機による電界・電荷の測定はアメリカで行われており、1981年モンタナで行われた4機の航空機と1機のグライダーを用いた観測では、小規模雷雲の電気構造の時間空間変化がとらえられている。第1図に Dye *et al.* (1986) による観測結果を示す。電荷分布は2極構造で下部の負電荷は、初期には $-20^{\circ}\text{C}$ 付近に卓越し、発達とともに負電荷は下降し、電界が最大を示すフェイズでは負電荷は $-10^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 層に分布している。観測された最大の電界は、 $15\text{ kV/m}$ でこの値は雷雲内の電界としては小さく、雷放電も観測されているが、比較的小さい規模の雷雲である。これに対し、Marshall *et al.* (1993) によりオクラホマで行われた気球観測では、第2図に示すように、電界の高度変化はそんなに単純でなく、推定される電荷分布も3極構造よりもっと複雑である。最大電界も $-100\text{ kV/m}$ を越えており、電氣的活動がかなり活発な雷雲である。このような雷雲では、電荷分布の3極構造は時間的空間的な平均の分布としてはいいのかも知れないが、テンポラリーあるいはマイクロにみると非常に複雑な分布になっているといえる。第3図に Koshak and

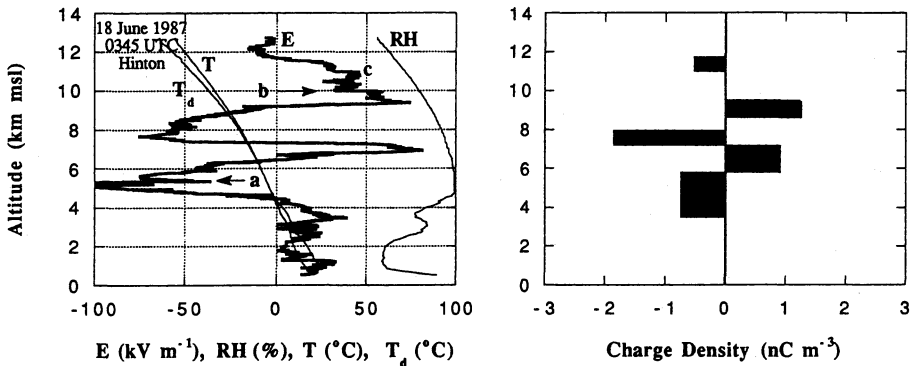
\* Electrical structure of thundercloud and generation of cloud-to-ground lightning.

\*\* Minoru Nakano, 豊田工業高等専門学校.

© 1996 日本気象学会



第1図 航空機観測から得られた雷雲の発達過程. 上は力学的な変化, 下は電気的な変化を示す (Dye *et al.*, 1986)



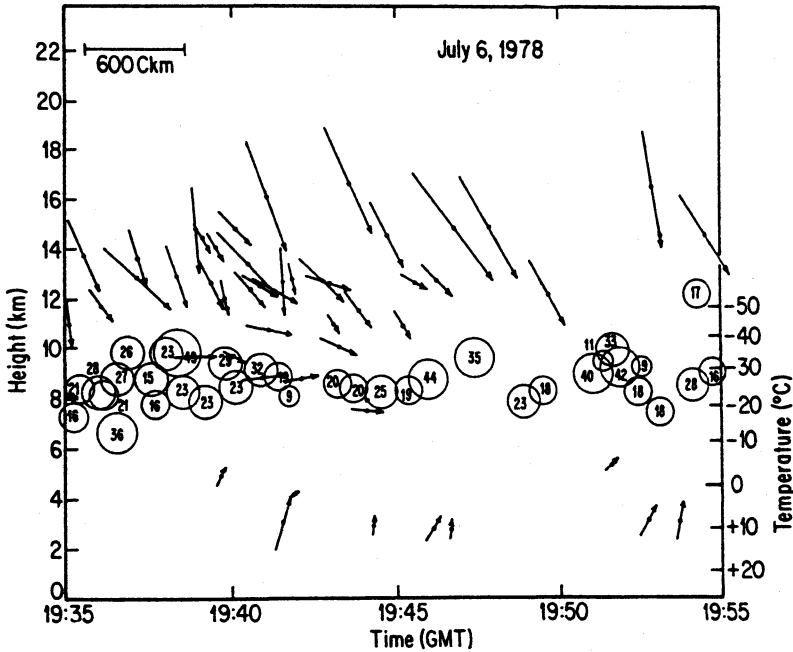
第2図 気球観測による電界, 空間電荷の高さ変化. 左は電界変化, 右は電界変化から計算された空間電荷 (Marshall and Rust, 1993)

Krider (1989) による, 落雷の帰還雷撃に關与した電荷の位置と電氣量を示す. 図から落雷に關与した負電荷は $-20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 層に分布している. 特に注目したいのは, 時間とともに電荷の高度はほとんど変化していないことである. 同じ特徴は別の雷雲では $-10^{\circ}\text{C}\sim -20^{\circ}\text{C}$ 層と低い高度が報告されている. 以上のことは, 当然のことながら, 雷雲の電荷分布は雲物理的な雷雲の構成要素や雲力学によって決まることを示している.

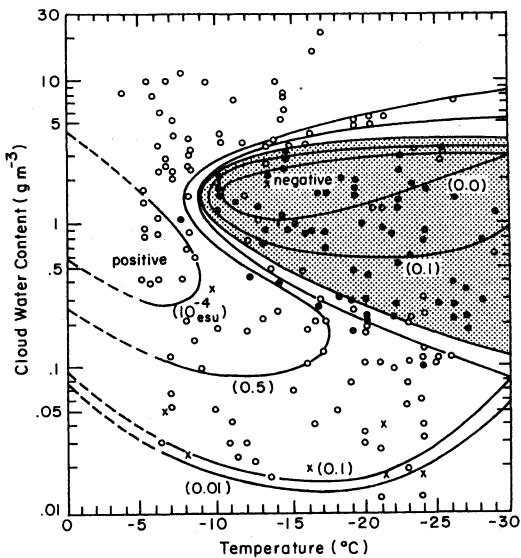
2.2 雷雲内の電荷発生・分離

雷雲の電荷生成・分離については, 古くから諸説があり, 1960年代から70年代にかけて Latham and Mason (1962) や Mason (1972) による氷フェイズの誘導電荷説でほとんど説明できるとされた時期があった. しかし, 室内実験を繰り返す中で, とても実際の

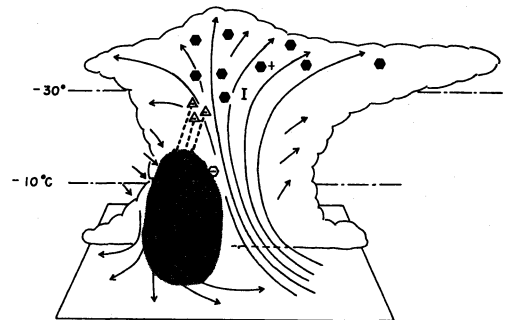
雷雲の電荷を説明できるほどの電荷生成は起きないことがわかってきた. 代わって息を吹き返したのが水の凍結・着水に伴う電荷発生である. 1970年代から80年代にかけて, 霰への着水に伴う電荷生成が実験室で調べられた. Takahashi (1978) は第4図に示すように, あられの帯電は温度や雲水量によってその符号が変化するを見出している. 同様の実験は Gaskell *et al.* (1980) や Jayaratne *et al.* (1983) によっても行われている. その結果は Saunders (1991, 1994) にまとめられているが, Takahashi (1978) の結果とは幾分異なっている. すなわち雲水量が $0.5\text{ gm}^{-3}$ 以下で, 気温が $-10^{\circ}\text{C}\sim -15^{\circ}\text{C}$ の領域で, Takahashi (1978) の実験では, あられは正に帯電するのに対して, Saundersらの実験では, 正から負に変化するか, 負に帯電する.



第3図 雷放電電荷の高さの時間変化。○は落雷の負電荷の高さ、矢印は雲放電のダイポールの方向と高さを示す (Koshak and Krider, 1989)



第4図 着氷帯電。氷晶1コ衝突当たりの帯電電荷を esu 単位で示す。○(正), ●(負) (Takahashi, 1978)



第5図  $-10^{\circ}\text{C}$ 層への負電荷蓄積機構。正電荷は黒く塗りつぶしてある。△:霰, ○:氷晶 (高橋, 1987)

霰が上昇流に支えられ、 $-10^{\circ}\text{C}$ 層より温度が高い領域では霰は正に帯電し、負に帯電した氷晶が上昇流により $-10^{\circ}\text{C}$ 層より温度が低い領域の負に帯電した霰の領域に入り、両者で強い負電荷領域を形成するという筋書きである。このような電荷発生分離の効率よい複合過程が、実際に起こっているかどうか今後の観測が必要である。

この両者の違いについては Williams (1995) がコメントを与えている。高橋 (1987) は上の実験結果から、第5図に示すような雷雲の電荷構造を提案している。 $-10^{\circ}\text{C}$ 層より温度が低い領域では霰は負に帯電し、この

第1表 室内実験による放電開始電界

粒子種類	放電開始電界 (V/m)
水滴	
1.5 mm	$1 \times 10^5$
2.7 mm	$8 \times 10^5$
2.7 & 0.65 mm	$2.5 \times 10^5$
雹	$4 \sim 7 \times 10^5$
霰	?
雪片	?

第2表 雷雲内で観測された電界 (Uman, 1987)

Investigation	Typical (V/m)	High values occasionally observed (V/m)	Measurement type
Winn <i>et al.</i> (1974)	$5 \sim 8 \times 10^4$	$2 \times 10^5$	Rockets
Winn <i>et al.</i> (1981)	—	$1.4 \times 10^5$	Balloons
Kasemir and Perkins (1978)	$1 \times 10^5$	$2.8 \times 10^5$	Aircraft
W. D. Rust and H. W. Kasemir (personal communication)	$1.5 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	Aircraft
Imyanitov <i>et al.</i> (1972)	$1 \times 10^5$	$2.5 \times 10^5$	Aircraft
Evans (1969)	—	$2 \times 10^5$	Parachuted sonde
Fitzgerald (1976)	$2 \sim 4 \times 10^5$	$8 \times 10^5$	Aircraft

### 3. 落雷の発生

#### 3.1 放電開始

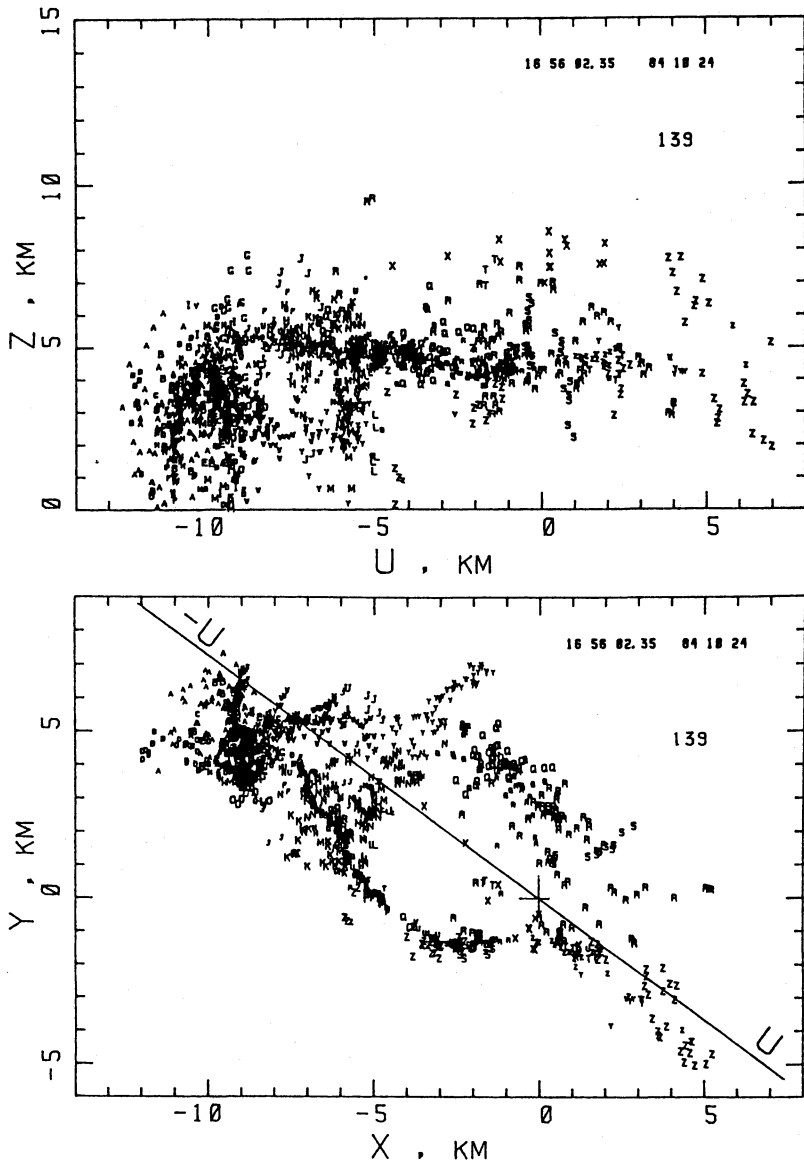
雷放電は落雷・雲放電ともに、 $-10^\circ\text{C}$ 層付近の負電荷領域または負電荷領域と $0^\circ\text{C}$ 層付近にある正電荷領域でまず発生すると考えられてきた。この結果は雷放電による静電界変化の観測から導きだされたものであるが、水滴が放電に関与する場合は、最も放電開始電界が低いという実験結果とも矛盾しない。持続するコロナ放電が降水粒子から開始するための臨界電界についての室内実験の結果を第1表にしめす。コロナ放電の開始電界は水滴の衝突の場合に  $250 \text{ kV/m}$  と最も低く、氷の場合はその形状によって異なるが、 $400 \text{ kV/m} \sim 500 \text{ kV/m}$  である (Griffiths *et al.*, 1974; Crabb *et al.*, 1974)。霰や雪片についての実験は報告されていないが、導電率が雨滴や氷粒に比べて小さいことから、臨界電界はこれらよりかなり高いことが予想される。一方実際に雷雲内で測定された電界を第2表にしめす (Uman, 1987)。ロケットによる観測では最大値  $400 \text{ kV/m}$ 、中央値  $40 \text{ kV/m}$  という値が報告されている (Winn *et al.*, 1974)。しかし気球による観測では最大電界はおよそ  $100 \text{ kV/m}$  程度かそれ以下である (Winn *et al.*, 1978; Marshall *et al.*, 1991, 1993)。従って降水粒子から持続するコロナ放電が開始する電界と

雲内の電界にはまだ開きがあるのが現状であり、コロナ開始電界を実効的に下げるなんらかの機構があるのかも知れない。

一方冬季日本海沿岸で発生する落雷では、 $100 \text{ C}$  を越える負電荷や  $500 \text{ C} \sim 1000 \text{ C}$  の正電荷が放電により大地に流れ込むことが観測で明らかになっている。通常の夏の落雷では電荷量は  $20 \text{ C}$  程度とされており、これと比較すると1桁かそれ以上大きい電荷量である。従って冬の雷雲では等価的にコロナの発生が抑えられているか、今までに報告されている以上に広い範囲の雲内電荷が放電に関与していることが考えられる。日本の冬季雷については、この他にも落雷のピーク電流が大きいことや、連続電流タイプの放電が多いことなど夏季雷と異なる特性が報告されている。

#### 3.2 雲内の放電進展様相

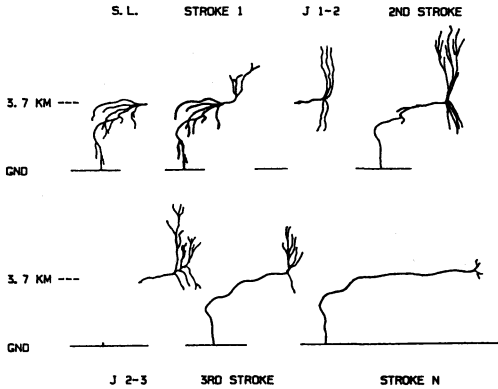
従来から雷の研究では、何とか雲の中の放電様相を探ろうと観測が行われてきた。静電界、音響、電磁波等が考えられる観測手段であるが、雷放電による静電界変化の地上多地点同時観測により、雷放電に関与した雲内の電荷位置と電荷量を算出し、放電進展様相を推定する手法が最もポピュラーである。第3図に示した電荷位置はこの手法で測定されたもので、電荷量を求められるのが大きな特徴である。最近、雲内の放電



第6図 多重落雷のVHF放射源の3次元マップ。上図は下図に示されているU平面への投影図 (Procter *et al.*, 1988)

の時間空間変化を調べるために、放電から放射されるVHF/UHF帯の電磁波を用いて放射源を決定する手法が多く用いられるようになってきた。電磁波の放射源を求めるために、電磁波到来の方位角・高度角を測定することが必要である。このために複数地点での同時観測により電磁波パルスの到達時間差を測定する方法 (Procter, 1971, 1981; Procter *et al.*, 1988; Taylor, 1978; Rustan *et al.*, 1980) と、やはり複数アンテナを用いて到来電磁波の位相差を測定する方法

(干渉計法) (Hayenga *et al.*, 1981; Richard *et al.*, 1985, 1986; Rhodes *et al.*, 1994; Shao *et al.*, 1995; 和田ほか, 1996) がある。測定手法の詳細は文献にゆずることにして、ここではこれらの観測で得られた雲内の放電様相の結果について述べたい。Procter *et al.* (1988) は 355 MHz 帯の UHF 放射源を、30~40 km の長いアンテナ間隔 (基線長) を用いた時間差法から、算出している。第6図に解析例の3次元マップを示す。下図は X-Y 平面の放射源分布図で、上図にUの平面

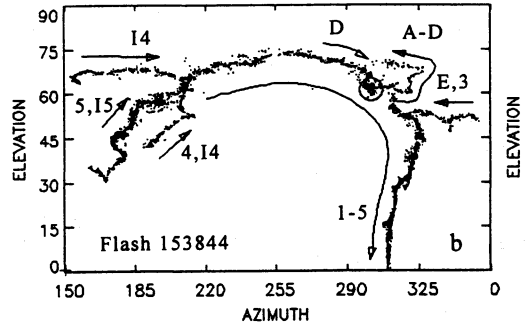


第7図 多重落雷の放電進展過程を示す模式図 (Procter *et al.*, 1988)

に投影した高さ分布が示されている。放電の時間経過は上図で左の方から放電が右の方へと移っている。この放電は多重雷撃で雷撃によって雷撃点も変化していることが示されている。多くの放電源は高さ5 km付近にあって、水平に分布している。Procter *et al.* は多重雷撃の落雷の放電進展様相について第7図のような模式図を示している。Rustan *et al.* (1980) はおよそ10 mの基線長の観測システムから30~50 MHzのVHF放射源を求めている。それによると帰還雷撃間の放電では放射源は雲の上部から下部の負電荷領域へと移動している。このことは上部の氷晶域でJ-過程の放電が始まることになり、前述の放電開始条件をますます複雑にしている。同じような放射源の移動は位相差法による観測手法でも得られている。第8図に2次元マップの例を示す (Rhodes *et al.*, 1995)。やはり放電域が雲内で水平に広がっていることを示唆している。今後干渉計法による3次元のマップがでてくれば、雲内の放電進展様相が一層明確になってくることが期待される。

3.3 落雷の位置決定

落雷の位置決定に関しては、直交ループアンテナによる磁界測定から電波の到来方位を決定するシステムが一般的に広く実用に供されている。これに加えて前述の時間差法や干渉計法を用いたシステムも実用化されている。アメリカでは全国を114の磁界測定システムのステーションでカバーし、これらをネットワークで結んで、リアルタイムで発雷状況が監視でき、どこからでもアクセス可能なシステムが運用されている (Orville, 1991)。日本でも電力会社や気象サービス会社、気象協会等が磁界測定システムや時間差法、干渉



第8図 落雷によるVHF放射源の2次元分布図 (Rhodes *et al.*, 1994)

計法のシステムを運用しており、電力会社関係のシステムはネットワーク化の試みも行われている (耐雷設計委員会, 1996)。近い将来アメリカと同様、リアルタイムで全国の発雷状況がモニタできるようになりそうである。しかし発雷予測、移動予測となると、やはりまだこれらのシステムのデータの解析が必要な段階であり、地形その他局地的な要因を取り入れた予測はこれからの課題といえそうである。

4. おわりに

ここ10数年の間にアメリカでは、雷雲を含んだメソケール気象の総合観測が、フロリダ、オクラホマやモンタナ等で行われてきた。それらの観測により、雷雲の電気構造や雲内の雷放電進展様相がかなり明らかにされてきた。さらにロケット誘雷実験等によって、落雷のメカニズムの研究や最終雷撃過程の研究がすすんでいる。わが国では、近年冬季雷の研究が盛んで、ロケット誘雷実験を含めて、冬季雷の研究では総合観測も行われている。冬季雷の特徴である正極性落雷や上向きリーダで始まる落雷に関しては、活発に研究が行われている。しかし夏の雷の研究では欧米諸国に遅れをとっているのが現状であり、局地的な発雷予測や発雷域の移動予測、落雷の予測や雷撃点の予測等の観点からの研究が今後必要になってくるであろう。

参考文献

Crabb, J. A., and J. Latham, 1974: Corona from colliding drops as a possible mechanism for the triggering of lightning, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **100**, 191-202.  
 Dye, J. E., J. J. Jones, W. P. Winn, T. A. Cerni, B. Gardiner, D. Lamb, R. L. Pitter, J. Hallett, and C. P.

- R. Saunders, 1986 : Early electrification and precipitation development in a small, isolated Montana cumulonimbus, *J. Geophys. Res.*, **91**, 1231-1247.
- Gaskell, W., and A. J. Illingworth, 1980 : Charge transfer accompanying individual collisions between ice particles and its role in thunderstorm electrification, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 841-854.
- Griffiths, R. F. and J. Latham, 1974 : Electrical corona from ice hydro meteors, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **100**, 163-180.
- Hayenga, C. O., and J. W. Warwick, 1981 : Two-dimensional interferometric positions of VHF lightning sources, *J. Geophys. Res.*, **86**, 7451-7462.
- Jayarathne, E. R., C. P. R. Saunders, and J. Hallett, 1983 : Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 609-630.
- Koshak, W. J., and E. P. Krider, 1989 : Analysis of lightning field changes during active Florida thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, **94**, 1165-1186.
- Latham, J., and B. J. Mason, 1962 : Electrical charging of hail pellets in a polarizing electric field, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.*, **266**, 387-401.
- Marshall, T. C., and W. D. Rust, 1991 : Electric field soundings through thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, **94**, 2171-2181.
- Marshall, T. C., and W. D. Rust, 1993 : Two types of vertical electrical structures in stratiform precipitation regions of mesoscale convective systems, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2159-2170.
- Mason, B. J., 1972 : The physics of the thunderstorm, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.*, **327**, 433-466.
- Orville, R. E., 1991 : Lightning ground flash density in the continuous United States-1989, *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 573-577.
- Procter, D. E., 1971 : A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning, *J. Geophys. Res.*, **76**, 1478-1489.
- Procter, D. E., 1981 : VHF radio pictures of cloud flashes, *J. Geophys. Res.*, **86**, 4041-4071.
- Procter, D. E., R. Uytendogaardt, and B. M. Meredith, 1988 : VHF radio pictures of lightning flashes to ground, *J. Geophys. Res.*, **93**, 12683-12727.
- Rhodes, C. T., X. M. Shao, P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, and C. O. Hayenga, 1994 : Observations of lightning phenomena using radio interferometry, *J. Geophys. Res.*, **99**, 13059-13082.
- Richards, P., and G. Affray, 1985 : VHF-UHF interferometric measurements, applications to lightning discharge mapping, *Radio Science*, **20**, 171-192.
- Richards, P., A. Delannoy, G. Labaune, and P. Laroche, 1986 : Results of spatial and temporal characterization of the VHF-UHF radiation of lightning, *J. Geophys. Res.*, **91**, 1248-1260.
- Rustan, P. L., M. A. Uman, D. G. Childers, and W. H. Beasley, 1980 : Lightning source locations from VHF radiation data for a flash at Kennedy Space Center, *J. Geophys. Res.*, **85**, 4893-4903.
- Saunders, C. P. R., W. D. Keith, and R. P. Mitzeva, 1991 : The effect of liquid water on thunderstorm charging, *J. Geophys. Res.*, **96**, 11007-11017.
- Saunders, C. P. R., 1994 : Thunderstorm electrification laboratory experiments and charging mechanisms, *J. Geophys. Res.*, **99**, 10773-10779.
- Shao, X. M., P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, and W. Rison, 1995 : Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida, *J. Geophys. Res.*, **100**, 2749-2783.
- Takahashi, T., 1974 : Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.
- 高橋 劭, 1987 : 雲の物理, 東京堂出版, 140 pp.
- 耐雷設計委員会雷性状分科会, 1996 : 落雷位置評定装置の現状とそのデータを用いた落雷頻度マップの作成, *電気学会論文誌B*, **116-B**, 395-402.
- Taylor, W. L., 1978 : A VHF technique for space-time mapping of lightning discharge processes, *J. Geophys. Res.*, **83**, 3575-3583.
- Uman, M. A., 1987 : The lightning discharge, Academic Press, Inc, 64 pp.
- 和田将一, 河崎善一郎, 松浦虔士, 松井敏明, 武蔵谷敏男, 山本賢司, 1996 : UHF 波干渉計の製作と雷観測(その1)~干渉計システムの性能評価~, *電気学会論文誌B*, **116-B**, 322-331.
- Williams, E. R., 1995 : Comment on "Thunderstorm electrification laboratory experiments and charging mechanisms" by C. P. R. Saunders, *J. Geophys. Res.*, **100**, 1503-1505.
- Winn, W. P., G. W. Schwede, and C. B. Moore, 1974 : Measurements of electric fields in thunderclouds, *J. Geophys. Res.*, **79**, 1761-1767.