雷雲中の降水粒子分布測定に基づく 電荷量と電場の推定手法に関する研究

A STUDY ON ESTIMATION OF CHARGE AND ELECTRIC FIELD BASED ON
THE PRECIPITATION PARTICLE DISTRIBUTION MEASUREMENT IN
THUNDERCLOUD

小池雄大¹・大石哲²・小川まり子³
Yudai KOIKE, Satoru OISHI and Mariko OGAWA

¹学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

²フェロー会員 工博 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

³学生会員 工修 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

The present study describes estimation of charge and electric field based on the precipitation particle distribution measurement in thundercloud. An X band multi parameter (MP-X) radar and a multi LF sensor network (BOLT) as lightning detectors were used. Polarization parameters obtained from MP-X radar were used to perform the precipitation particle distinction. Distinguished particle distribution from the polarization parameters including graupel gives particle size distribution, and electric charge amount in the collision of graupel and ice crystals. By solving the Poisson equation with charge amount obtained, the electric potential and the electric field have been calculated.

In fact, the present study shows possibility to predict lightning by using MP-X radar through calculating charge and electric field in real time.

Key Words : multi parameter radar, particle distinction, particle size distribution,
charge and electric field, graupel and ice crystals

1. 本研究の背景と目的

近年、問題となっているゲリラ豪雨が今回の研究の背景にある。一般的に、雷はゲリラ豪雨に先行して発生することが多いため、雷とゲリラ豪雨の関係により予測を行うことを考えた。しかし、現時点では雷と豪雨の相関関係で未解明な点が多く、すぐにゲリラ豪雨の予測をすることは困難と考えられる。そこで、本研究では気象レーダーを使用して、雷発生のメカニズムの検証を行う。

雷放電に関して先行研究からわかっていることを述べる。河崎¹⁾によると、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して表現することが妥当である。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

て雲放電と呼んでいる。電荷の中和は雲の中で始まり、雲の中でも電荷の中和がしきれない時、大地との間で中和を行う。

雷における被害は停電、鉄道障害、火災、人身傷害、電子器具、通信障害、航空機障害などに及び、大きな被害をもたらす。そのため、落雷を予測し、未然に落雷事故を防ぐことが重要である。

過去の研究としてTakahashi²⁾が軸対称2次元雲モデルを用いた雷モデルを開発した。このモデルの電荷分離機構には着氷電荷分離機構、イオン拡散、誘導イオン拡散機構、地上からのコロナ放電機構が含まれており、雷放電は主な空間電荷間で発生し、20C（クーロン）中和される。さらに3次元雲解像モデルを用いた雷モデルをMacGorman et al.³⁾が開発した。このモデルの電荷分離機構には着氷電荷分離機構と水滴、氷晶、霰同士の衝突・分離の際、電場によって誘起された誘導電荷を片方が持ち去る誘導電荷分離が含まれる。

また、発雷予測手法は、金子⁴⁾が雲解像モデル（CReSS: Cloud Resolving Storm Simulator）を用いて、雷

雲内電荷分布と雷を再現する雷モデルを開発した。雲の雷活動を『雲構成粒子の帯電による電荷の蓄積』と『発雷による電荷の消費』の2つに大きく分け、電荷を予報変数として新たに導入し、雲の帯電機構は、微物理過程において発生する氷晶、雪、霰の帯電機構である着氷電荷分離機構を用いている。また電荷分離、電荷分布のモデル化を行い、電荷分布から電位、そして電場の計算を行っている。発雷判定については、電場を発雷のしきい値とし、発雷後の電荷の消費をパラメタライズする発雷パラメタリゼーションを用いた雷モデルの開発を行っている。

しかし、これらの研究は、数値シミュレーションによる発雷予測であり、実際に観測されたデータから発雷予測を行った研究は今なおない。

そこで、本研究では気象レーダーを使用した電場の計算アルゴリズムの構築を行った。具体的には、Xバンドレーダーを用いて粒子判別された降水粒子の粒径分布推定結果から大気中の電荷分布を算出し、電場の計算を行った。

2. 観測装置

(1) Xバンド偏波ドップラーレーダー

本研究では名古屋大学所有の気象用Xバンド偏波ドップラーレーダー（東芝製固体素子タイプ、以下GINと称する）を用いる。GINは神戸国際大学に設置され、覆域64km、空間分解能150m、駆動速度方位角3rpmで通常はPlan Position Indicator（PPI）走査を行っており、15仰角を6分間かけてボリュームスキャンを行っている。

(2) 雷探知装置

雷探知装置は吉田ら⁵⁾が開発した多地点LF帯センサ（以下、Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorm, BOLTと称する）を用いる。BOLTは雷放電時に放射されるLF帯電磁波を11地点のLF帯センサで受信してその放射源位置推定を行うものである。観測範囲が半径200kmと広範囲の雷進展を捉えることが可能である。

3. 雷雲中の降水粒子分布測定に基づく電荷量と

電場の推定手法

雷電気の主な電荷の担い手は霰、氷晶と考えられる。金子⁴⁾によると、雷は雷雲内の落下や上昇による帯電粒子の運動によって分離されて強まった電気エネルギーを電氣的に中和するために発生する。雷雲内の電荷分布によって作られる電場に電子やイオンが作用され加速され

る。その時加速が十分で一定以上の運動エネルギーを持つと他の分子と衝突・電離して新たな電荷を生成する。この作用が雪崩式的に発生すると正電荷と負電荷の共存する放電路が作られる。この放電路は一般的に導体の特徴を示すといわれ、放電路表面に放電路内の電場をうち消すように電荷が分布する。この電荷は一般的に放電路先端に集中する。その電荷符号は線上放電路の一方の端では正、もう一方の端では負となるのが一般的で、その電荷がその付近の電場を強化する方向に働く。このことによって放電の開始点と同様に大気の絶縁効果が破壊され放電路が伸びていく。放電路の開始には実質的に電場の強度が重要でこの値がしきい値以上に達すると放電が開始される。雷の効果で最も主要なものは雷雲内の電荷を中和することである。正電荷と負電荷が合わさって中性になることをいう。雷雲内への作用としては、電荷分布による電気エネルギーを減らす方向に作用し、それは正・負電荷それぞれ絶対量を減らすことになる。

本研究では、雲の帯電機構である着氷電荷分離機構を基に電荷量、電場の推定を行う。気象レーダーから得られる偏波パラメータであるレーダー反射因子、レーダー反射因子差、伝搬位相差変化率、偏波間相関係数（以下それぞれZH, ZDR, KDP, ρ_{HV} と称する）を用いて、降水粒子判別を行い、粒子判別の結果、霰または霰と氷晶の混在状態または霰と氷晶と雪片の混在状態と判定されたデータを使用し、偏波パラメータから霰の粒径分布を算出する。ここで、粒子判別では混在状態を考慮しているが、霰と氷晶の混在状態、霰と氷晶と雪片の混在状態と判定されたデータは主に、霰を観測していると仮定する。次に、求めた霰の粒径分布から霰の電荷量を求め、電荷量からポアソン方程式を解くことで、電位と電場を算出する。

本研究では気象レーダーを用いた電場の計算アルゴリズムの構築が目的であるため、今回は試算として $4 \times 4 \times 4$ の狭い領域でのみの計算を行った。図-1に電荷量から電場までの推定手法を示す。

図-1 雷雲中の降水粒子分布測定に基づく電荷量と電場の推定手法

(1) 降水粒子判別手法

本研究では降水粒子判別手法として中北ら⁶⁾の方法を利用している。MPレーダーの観測情報は降水粒子の大きさ、形、向き、相変化や落下形態などの特性を偏波パラメータによって推定することが可能であるので、降水粒子の種類を分類するために利用可能である。中北ら⁶⁾は、Cバンド型偏波ドップラーレーダーCOBRAを用いて降水粒子の種類（雨滴、凍結氷、霰、氷晶および雪片）を推定する手法を確立した。同期観測したCバンド偏波ドップラーレーダーの偏波パラメータ（ZH, ZDR, KDP, ρHV）を使って粒子判別を行った。この方法はその後Xバンドレーダーに拡大され、本研究ではXバンドのアルゴリズムを用いて降水粒子判別を行った。

(2) 霰の粒径分布推定手法

霰の粒径分布 $N(D)$ は以下の式で表せる。

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (1)$$

ここで、粒径分布関数の N_0 [$\text{m}^{-1}\text{m}^{-3}$]、 Λ [m^{-1}]はそれぞれ粒径分布のパラメータ、 $D[\text{m}]$ は霰の粒径を表す。

粒径分布のパラメータ N_0 と Λ を求める時に、MPレーダーで観測される偏波パラメータ（ZH, ZDR, KDP）を利用する。図-2より、ZDRから霰の扁平率を求める。図-2は霰を扁球と仮定し、ランダムに回転させた場合の数値計算結果であり、扁長の霰に関しては考慮していない。粒子判別では一格子に存在する様々な種類の粒子の中から代表した粒子を粒子判別で表示しているが、ここでは1つの粒子に着目すると仮定する。

図-2 ZDRと扁平率 (b/a) の関係⁷⁾

また、深尾ら⁸⁾より、ZH, KDPはそれぞれ以下の式で表せる。

$$ZH = \int_0^\infty D^6 N(D) dD = \frac{N_0 \times 6!}{\Lambda^7} \quad (2)$$

$$KDP = \frac{\pi k C_k}{12} \int D^3 \left(1 - \frac{b}{a}\right) N(D) dD \quad (3)$$

$$= \frac{\pi k C_k \left(1 - \frac{b}{a}\right) N_0 \times 3!}{12 \Lambda^4}$$

ここで、 k はレーダー電波の波数（=202.68/m）、 C_k は周波数による定数（=3.75）、 b/a は霰の扁平率を表す。

また、霰の空間数濃度 $n(u)$ は以下の式で表せる。

$$n(u) = \int_0^\infty N(D) dD = \frac{N_0}{\Lambda} \quad (4)$$

(4)式より、霰の空間数濃度を算出するには、霰の粒径分布を求めればよい。

(3) 霰の電荷量推定手法

着氷電荷分離機構によると霰と氷晶が衝突するときに、霰と氷晶の間で電荷の受け渡しが起こり、結果、霰と氷晶が逆符号・同量の電荷を分け合う。

金子⁴⁾はTakahashi²⁾が低温室内で金属円柱を用いて実験して得られた着氷電荷分離機構を取り入れて、霰と氷晶の衝突における電荷分離は以下の式で表しているの、本研究でもそれを採用する。

$$\frac{\partial Q_{g-i}}{\partial t} = \int_0^\infty \int_0^\infty \alpha \frac{\partial q_{charge}}{\partial t} n_{g0} \exp(-\Lambda_g D_g) dD_g dD_i$$

$$\equiv \frac{5\pi \bar{D}_i^2 N_i n_{g0} q E_{sep} \alpha_{ug}^2}{4V_0 D_0^2} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{2\gamma_{ug}} \Gamma(3 + 2\beta_{ug}) \bar{D}_g^{3+2\beta_{ug}} \quad (5)$$

α は以下の通りである。

$$\alpha = 5 \left(\frac{D_i}{D_0}\right)^2 \frac{|U_g(D_g) - U_i(D_i)|}{V_0} \quad (6)$$

ここで、氷晶の落下速度は霰の落下速度に比べて無視できるほど小さいと仮定する。 Q はモデル格子内の霰の電荷密度 (C/m^3)、 t は時間、 g は霰 (graupel)、 i は氷晶 (icecrystal)、 q_{charge} は霰一個の電荷密度 (C/m^3)、 n_{g0} は霰の数密度の切片（= N_0 ）、 Λ は粒径分布パラメータ、 D は粒子直径、 $\bar{D}$ は平均粒子直径、 N は粒子数濃度、 q は帯電係数（分離電荷量）（=0.015pC= $1.5 \times 10^{-14}\text{C}$ ）、 E_{sep} は衝突分離係数（=1）、 V_0 は基準落下速度（=8m/s）、

D_0 は基準粒子直径(=100 μm)， α_u (=124)と β_u (=0.64)と γ_u (=0.5)はそれぞれ落下速度の形状パラメータ， $\bar{D}_g$ は霰の粒径分布の中心値を表す．ここで，基本場の地表面の空気密度 ρ_0 を水蒸気と水物質を考慮した湿潤大気密度 ρ で割った値を1と仮定する．また，氷晶は雲内に無数に存在しているため，レーダーから正確な数を測定することは困難である．そのため，本研究では高橋⁹⁾より， $\bar{D}_i$ の氷晶の平均粒子直径を200 μm ， N_i の氷晶の空間数濃度を $5 \times 10^4/\text{m}^3$ と仮定する．また， $U_g(D_g)$ ， $U_i(D_i)$ はそれぞれ霰，氷晶の粒径に応じた落下速度を表す．

(5)式より， n_{g0} と $\bar{D}_g$ を求めれば電荷量が算出できることが分かる．(5)式を積分し，初期条件で $t=0$ のとき， $Q=0$ と仮定することで，単位時間当たりの電荷量は以下の式で求められる．

$$Q_{g-i} = \frac{5\pi \bar{D}_i^2 N_i n_{g0} q \alpha_{ug}^2}{4V_0 D_0^2} \Gamma(3 + 2\beta_{ug}) \bar{D}_g^{3+2\beta_{ug}} \times t \quad (7)$$

(4) 霰の電位，電場推定手法

電位は電荷分布によって決まる．電場ベクトルは電位の傾きによって決まる．電位のポアソン方程式，電場の式はそれぞれ以下のように表せる．

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (8)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (9)$$

V は電位[V]， ρ は電荷密度[C/m³]， ϵ_0 は真空の誘電率(=8.85 $\times 10^{-12}$ F/m)， $\vec{E}$ は電場ベクトル[V/m]を表す．1格子毎にそれぞれ電荷密度 ρ [C/m³]の値があり，4 $\times$ 4 $\times$ 4格子の周りの電荷は0 C/m³，電位は0Vとおいた．(8)式のポアソン方程式を収束するまで繰り返し計算を行い，電位を算出する．その後，電位から電場を算出する．

(5) 計算結果

2012年10月28日18時の天気図¹⁰⁾を示す(図-3)．気象庁¹¹⁾によると，この日は18:13に神戸観測所で北方向5km未満の距離で強度2の雷電を確認し，断続的に18:50まで確認している．また，降水量は神戸観測所で18:20に10分間で6.5mm，降雨強度に換算すると39.0mm/hrの強い雨が降り，しばらく雨が降り続けている．

本研究の観測範囲を図-4に示す．また，電場の計算を行った範囲を図-4に赤枠で示した．

図-5は2012年10月28日18:20に観測されたGINとBOLT

をAVS可視化ツールを用いて三次元表示した結果である．ここで，図の下面は大阪湾周辺の地形を立体表示し，赤，緑，青の等値面は雷雲を表している．色はレーダー反射因子を表している．黄色の点はBOLTで観測された雷の分岐点を表している．

図-5より，レーダーエコーが強い部分にリンクしてLF波が発生していることが目視で確認できる．

図-3 2012年10月28日18時の天気図¹⁰⁾

図-4 解析対象範囲(赤枠は電場の計算範囲を表す)

図-5 2012年10月28日18:20のGINとBOLTによる事例解析結果(鳥瞰図)

カラーバー：レーダーエコーの強さ[dBZ]

黄色の点：雷放電

図-5 (続き) 2012年10月28日18:20のGINとBOLTIによる事例解析結果 (平面図)

カラーバー: レーダーエコーの強さ[dBz]

黄色の点: 雷放電

本研究では図-4に示した赤枠の範囲について電荷と電場を計算した。図-5と同じ日時の2012年10月28日18時20分の事例を検討する。

GINで得られた偏波パラメータから粒子判別と電荷量の計算を行った結果を図-6に示した。また、AVSを用いて図-7から図-11にGINによる鉛直断面の霰の数濃度、電荷分布、電位分布、電場分布を示した。ここで、Xの90~93格子はGINから東に19km~22km, Yの142~145格子はGINから北に3km~6km, Zの14~17格子はGINから上空に6.75km~8.25kmの位置を表す。

図-6 2012年10月28日18時20分のGINによる10秒後の粒子判別と電荷量算出の結果 (単位: $1 \times 10^{-9} [\text{C}/\text{m}^3]$)

(G: 霰, G+I: 霰と氷晶の混在状態, G+I+S: 霰と氷晶と雪片の混在状態を表す)

図-7 2012年10月28日18時20分のGINによる観測結果 霰の数濃度[個/ m^3]の鉛直断面 (Y格子=143)

図-8 図-7と同じ ただし、電荷密度 ($1 \times 10^{-9} [\text{C}/\text{m}^3]$) の鉛直断面 (Y格子=143)

図-9 図-7と同じ ただし、電位 ($1.0 \times 10^8 [\text{V}]$) の鉛直断面 (Y格子=143)

図-10 図-7と同じ ただし、電場 (1.0×10^5 [V/m]) の鉛直断面 (Y格子=143)

図-11 図-7と同じ ただし、電場ベクトル (1.0×10^5 [V/m]) の三次元分布図

図-6より、粒子判別の結果、すべての格子で霰が観測されていることが分かる。また、霰と氷晶の接触により電荷分離が起こると述べた通り、ほとんどの格子で霰と氷晶の混在状態が観測された。

図-7から図-11より、霰の数濃度、電荷密度、電場はZ格子14と17で大きく、電位はZ格子15と16で大きいことが分かる。

(6) 考察

図-7と図-8より、霰の数濃度が高い場所で電荷密度の計算値が大きいことが分かる。このことから、霰と氷晶の接触により電荷が溜まっていることが考えられる。また、図-8と図-9より、電荷の差が大きいほど電位が大きくなっていることが分かる。4×4×4格子の外側境界条

件の電荷を0Cと置いたため、電荷が大きい方から小さい方に電場が向き、図-11のような電場ベクトルが形成されたと考えられる。

4. 結論と今後の課題

本研究ではXバンドレーダーを用いて粒子判別された降水粒子の粒径分布推定結果から大気中の電荷分布を算出し、電場の計算を行うアルゴリズムの構築を行った。

本研究の成果として、これまでは数値シミュレーションでのみ可能であった電荷量と電場の算出について、Xバンド偏波レーダーを用いて、リアルタイムで推定できるようになった。このことで、発雷、落雷のこれまでよりも正確な予測を行う可能性をひらいたと言える。

本研究では4×4×4という非常に狭い範囲での計算のため、さらに広範囲での計算を行うこと、また、より時間分解能が高い超小型Xバンド偏波レーダー（1分間でボリューメスキャンを行う）を使用し、電荷量と電場を算出することを今後の課題とする。

参考文献

- 1) 河崎善一郎：雷放電とは、*Journal of Plasma Research* Vol.80 No.7, pp.591, 2004.
- 2) Takahashi, T.: Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J. Atmos. Sci.* Vol.35, pp.1536-1548, 1978.
- 3) MacGorman, D. R., Straka, J. M. and Ziegler, C. L.: A lightning parameterization for numerical cloud models. *J. Appl. Meteor.* Vol.40, 459-478, 2001.
- 4) 金子大志：雷モデルの開発，名古屋大学大学院修士論文，pp23-48, 2007.
- 5) 吉田智，Wu, T., 牛尾知雄，高柳裕次：多地点 LF 帯センサによる雷放電リーダの三次元標定とレーダ反射因子との比較。電気学会論文誌A, Vol.134 No.4, pp.188-196, 2014.
- 6) 中北英一，隅田康彦，山口弘誠，鈴木賢士，中川勝広，川村誠治：最新型偏波レーダーを用いた氷相降水粒子タイプの混在状態推定に関する研究，京都大学防災研究所年報第53号B, pp.433-445, 2009.
- 7) Bringi, V. N. and Chandrasekar, V.: *Polarimetric Doppler Weather Radar*, Cambridge University Press, Cambridge, pp.63, 2001.
- 8) 深尾昌一郎，浜津享助：気象と大気のレーダーリモートセンシング，京都大学学術出版，pp.143-173, 2005.
- 9) 高橋助：雷の科学，東京大学出版会，pp59-77, 2009.
- 10) ウェザーニューズ:ウェブページ <http://weathernews.jp/>
- 11) 気象庁:ウェブページ 過去の気象データ検索 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php/>

(2015. 9. 30受付)