

## 第49回メソ気象研究会—雷研究の現状と今後の展望—の報告

コンピーナー：櫻井南海子\*1・下瀬健一\*2・加藤亮平\*3

## 1. はじめに

近年、雷研究に有用なデータの取得が飛躍的に容易になった。一つは雷観測データである。自前の雷観測測器を持っていない研究者は、これまでは気象会社が独自で観測している雷データを購入するか電力会社の雷データを提供してもらい研究を行ってきた。しかし、2017年1月より気象庁の雷監視システム(LIDEN)による雷観測データが気象業務支援センターより入手可能になった。もう一つは偏波レーダーデータである。気象レーダーは、広範囲、高時空間分解能で降水および風を観測出来ることから、気象庁の雷ナウキャストの雷の危険度予測に利用されている。気象レーダーはここ20年程の間に目まじしく発展し、偏波レーダーやフェーズドアレイレーダーが開発されてきた。偏波レーダーは、雷雲内の電荷の担い手である霰等の降水粒子情報を広範囲、高時空間分解能で取得出来ることから、雷研究を行う上で重要なデータである。国交省によって2008年から整備が始まったXバンド偏波レーダーのネットワーク(XRAIN)データが2015年10月よりDIASから学術利用向けに公開されるようになった。これらのデータ利用が可能になった今、これらのデータを使って新たに雷研究に取り組もうと考えている方もいることだろう。日本国内には、上記データだけでなく、雷3次元観測機器や数値シミュレーション等が併行して開発されてきた。そこで、2018年度春季大会前日の2018年5月15日(火)に気象庁講堂で開催したメソ気象研究会では、5名の

方に講演を依頼し、現業・観測・シミュレーションの点から話題提供をしていただいた。この研究会で、現在、国内ではどのような雷研究が行われているのかを情報共有し、今後の研究課題を整理するきっかけになればと考え開催した。当日は、約200名の方々に参加していただいた。

## 2. 気象庁での雷関係プロダクト—LIDEN・雷ナウキャスト・発雷確率ガイダンスの概要について

加藤輝之(気象庁観測システム運用室)

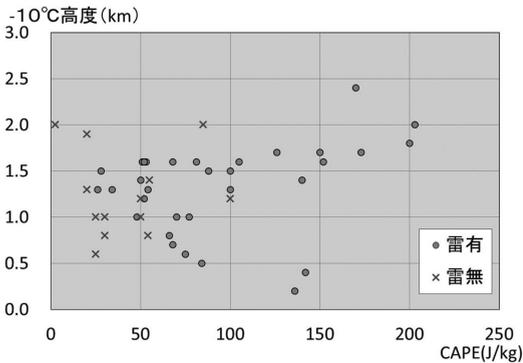
気象庁では、日本国内とその周辺領域で発生している雷(対地放電及び雲間放電)を30の空港に設置した監視局(センサー)によってリアルタイムで観測し、雷の発生位置や時刻等の情報を航空気象官署や航空局等へ提供する雷監視システム(LIDEN)を運用している。その情報は気象庁の予報現業でも活用されており、気象庁のウェブサイトでの高解像度降水ナウキャストのページで確認することができる。監視局では、雷発生時に放出される電磁波を観測し、清瀬市にある中央処理局にデータを収集して「磁界方位測定方式」と「到達時間方式」を併用して発雷位置を標定している。前者では雷放電の到来方位角から交点法によって発雷位置を算出し、後者では時刻同期の取れているセンサー間の到達時間差から交点(発雷位置)を算出している。雷ナウキャストとは、気象庁の観測・予報データを用いた雷活動の解析(実況)及び予想であり、雷の可能性・激しさに応じた「活動度」を解析・予想する。活動度は4段階設けており、LIDENの対地放電・雲間放電から求めた発雷密度により活動度4(激しい雷)、活動度3(やや激しい雷)、活動度2(雷あり)を決定する。LIDEN検知がなくても、レーダー3次元情報から30分以内の落雷危険度を指数形式で算出した「レーダー雷解析」において、まもな

\*1 (連絡責任著者) Namiko SAKURAI, 防災科学技術研究所, sakurain@bosai.go.jp

\*2 Ken-ichi SHIMOSE, 防災科学技術研究所.

\*3 Ryohei KATO, 防災科学技術研究所.

© 2018 日本気象学会



第1図 2017/18年冬季の46降雪事例を対象とした、冬季日本海側（北海道石狩～山陰）の発雷と $-10^{\circ}\text{C}$ 高度・CAPE（直近のMSM 予報値から判断）との関係。

く落雷に至る可能性が高いとされた領域も活動度2とする。活動度1（雷可能性あり）はレーダー雷解析を含むレーダー3次元情報・ひまわり8号データ・数値予報資料等から1時間以内に発雷の可能性のある領域を広く解析する（気象庁 2016, 2017）。

発雷確率ガイダンス（PoT, 土田 2018）では、目的変数をLIDEN, 地上気象観測, METARの雷観測から作成し、発雷確率を20 km格子で求める。ただし、PoTの定義はその格子を中心とする60 km格子のどこかで発雷する確率である。統計手法には、逐次学習をしないロジスティック回帰を用い、説明変数には3つの必須変数（モデル3時間降水量予報値, CAPE, SSI (850-500 hPa間) または SSI (925-700 hPa間)）に加え、気柱相対湿度（鉛直方向に飽和していると仮定した飽和可降水量に対する可降水量の割合）、 $-10^{\circ}\text{C}$ 高度、下層東西風、下層南北風、鉛直シア、500 hPa渦度、850 hPa-地上間の気温減率、冬型降水指数（風向別降水率 $\times$ 850 hPa風速 $\times$ （海面と下層温位の飽和比湿差））から3つの変数を選択している。説明変数は日本領域を35地区、 $-10^{\circ}\text{C}$ 高度を4通り、予報時間をGSMとMSMではそれぞれ7通りと6通りの時間帯に層別化して決定している。予測精度を統計的に調べると、12月と1月の冬季を除いて、概ねMSMの方が良く、GSM, MSMともにPoTが15%を閾値に発雷の有無を判断するのが最も精度が良い。

2017/18年冬季の46降雪事例を対象に、冬季日本海側（北海道石狩～山陰）の発雷と雲頂高度・ $-10^{\circ}\text{C}$ 高度・CAPEとの関係を調べた。CAPEが100 J/kg以

上では、雲頂高度に関わらず発雷していた。また $-10^{\circ}\text{C}$ 高度1 km未満かつCAPE 50 J/kg未満であると、発雷は観測されなかった（第1図）。このような調査結果は、今後の雷ナウキャストやPoTの改良に役立つものだと考える。

### 3. Xバンド偏波レーダーを用いた夏季雷雲内部の降水粒子分布観測

額額文晴（情報通信研究機構）

従来の気象レーダーでは降水粒子の形状の情報が得られなかったが、水平・垂直の直交二偏波を用いる偏波気象レーダーの登場により、降水粒子判別の研究が進んでいる。米国では降雹の検出のために早くからSバンド偏波レーダーによる降水粒子判別の研究が進んでいた（Liu and Chandrasekar 2000など）。日本では2007年に名古屋大学にXバンド偏波気象レーダーが導入され、2008年からは国交省のXバンド偏波レーダーによる観測網（XRAIN）が主要都市域に順次展開された（国土交通省 2010）。この直後、2010年7月15日に愛知・岐阜県で発生した豪雨災害ではXRAINによる偏波レーダー観測データが事例解析に活用された（Oue *et al.* 2014）。さらに、2016年からはCバンド偏波レーダーも組み合わせるXRAINの観測範囲が拡大され（国土交通省 2016）、偏波レーダーによる雷雲観測の環境が急速に整いつつある。

過去の室内実験（Takahashi 1978; Saunders and Peck 1998など）により、霰と氷晶が衝突して電荷分離する際に、気温が $-10^{\circ}\text{C}$ より高温もしくは雲水量が著しく多く急速なriming（ライミング：過冷却水滴が氷晶表面に付着して氷晶が急成長すること）により表面が湿っているような条件下では霰は正に帯電し、 $-10^{\circ}\text{C}$ よりも低温で雲水が極端に多くない条件下では負に帯電することが示されている。検証が難しい降水粒子の種類もあるが、偏波レーダーでは氷晶・乾いた霰・湿った霰の判別が可能である。雷雲内のこれらの粒子の分布と時間変化を調べることで、地上で観測される落雷極性と室内実験で得られた降水粒子の帯電極性とを結び付け、雷という現象の理解をより深めることが期待される。

本発表では名古屋大学に設置されたXバンド偏波レーダーを用いて観測された岐阜県美濃地方の雷雲について、Xバンド偏波レーダー用の降水粒子判別法（Kouketsu *et al.* 2015）を用いて得られた雷雲中の降水粒子分布について紹介した。発生から衰退までの

時間変化を観測できた雷雲のうち、反射強度が特に強い（すなわち、霰の帯電による落雷が支配的であると考えられる）降水コアの部分において、ほぼ負極性落雷のみが見られた事例（2010年7月26日：事例A）と、負極性落雷だけではなく正極性落雷も見られた事例（2010年8月25日：事例B）を解析対象とした。落雷位置と極性の情報として、中部電力の落雷位置標定システム（LLS, Momozawa *et al.* 2012）のデータを使用した。

事例Aに比べて事例Bでは発達高度の高い降水コアが多く、降水コアの部分抜き出して粒子分布を調べた結果、正極性落雷をもたらした降水コアの方が、負極性落雷のみをもたらした降水コアに比べて40 dBZ, 30 dBZのエコー頂高度、および乾いた霰と湿った霰が判別された最大到達高度がいずれも高くなっていた。このことは正極性落雷をもたらした降水コアの方が高い高度まで大きな霰粒子が存在していたことを示しており、室内実験で示されていた雲水量が多く霰が正に帯電する条件と整合的であると考えられる。誌面の都合で詳細は紹介できないが、詳しい結果は Kouketsu *et al.* (2017) を参照されたい。

質疑において、正極性落雷での放電経路の吟味や、雷雲内部での降水粒子の現場観測の必要性のご指摘を頂いた。いずれも重要な課題であり、次節で紹介されている雷の3次元標定装置による観測や、現状では安全面から実施が難しい雷雲中の降水粒子の現場観測によるデータの蓄積により、雷の観測技術の一層の発展を期待したい。本研究がそのための一助となれば、研究者として望外の喜びである。

#### 4. 雷3次元標定装置の発展とその応用

吉田 智（気象研究所）

雷放電の3次元標定装置の開発は、遅くとも1970年代より始まっている。この分野のパイオニア的な研究者である、南アフリカのProctorは雷放電の3次元標定に到達時間差法を用いて成功している（e.g., Proctor 1971）。Proctorが開発した機器は、複数の地上VHF帯センサで構成され、各センサが雷放電に伴う電磁波を受信する。電磁波源から各センサまでの距離はそれぞれ異なるため、電磁波の到着時刻は異なる。到達時間差法では、センサ間の到達時間差を用いて逆問題を解き、電磁波源の位置と時間を推定する。

Proctorの取り組みとは独立して、1980年代以降に米国の研究グループによって到達時間差法を用いた

Lightning Detection and Ranging (LDAR) が開発されている。このLDARをベースとして、軽量化、低電力化、ソーラパネルでの駆動を可能としたのがLightning Mapping Array (LMA) である。LMAは1990年代後半にニューメキシコ工科大の研究グループにより開発された機器で、数kmから数十km離れた10程度のVHF帯狭帯域センサから構成される。主に雷放電の負極性リーダに伴う電磁波源を到達時間差法により3次元標定する（Krehbiel *et al.* 2000）。現在、LMAは米国のみならず、ヨーロッパ、アジア等でも広く用いられており、現時点で最も普及している3次元標定装置と考えられる。

このLMAとほぼ同時期に開発が進んだのが、VHF帯広帯域干渉計である。この機器は大阪大の研究グループが開発した機器で、10m程度の間隔でVHF帯広帯域センサを設置し、センサ間の位相差（干渉法）から雷放電に伴う電磁波の到来方向（方位角、仰角の2次元）を推定する。干渉法ではpulse burstのような複雑な電磁波波形にも適応が可能で、雷放電路を詳細に把握することが可能である。近年は非常に微小な放射電力の電磁波源の標定に成功し、従来は難しいとされていた放射電力の小さい正極性リーダの標定に成功している（Akita *et al.* 2014）。複数のVHF帯広帯域干渉計で一つの雷放電を同時観測することにより、交会法を用いて3次元標定が可能となる。

上記のVHF帯観測器に加え、雷放電に伴うLF帯電磁波を受信し標定する機器も国内外で開発されている。その代表的なものとしてBroadband Observation network for Lightning and Thunderstorm (BOLT) が挙げられる（Yoshida *et al.* 2017）。この機器は大阪大の研究グループが中心となって開発した機器で複数のLFセンサを用いて3次元標定を行う。負極性リーダ進展に加え、通常VHF帯では観測が難しい落雷地点（リターンストローク）の標定も可能である。また、夏季雷だけでなく冬季雷の観測にも成功している。

雷放電を3次元標定することの利点の一つは、雷放電に伴う中和電荷領域が推定できることである。多数の雷放電を標定することにより、積乱雲内の電荷領域推定が可能となる。BOLTの観測データ解析により、大阪平野で発生した積乱雲が正負正の3重極分布であることを示した。さらに、雲放電に寄与した上部正電荷領域は非常に強い上昇気流内に存在することを示

し、積乱雲の局所の上昇気流を監視する一指標として雷放電3次元標定データが利用できる可能性を示した。

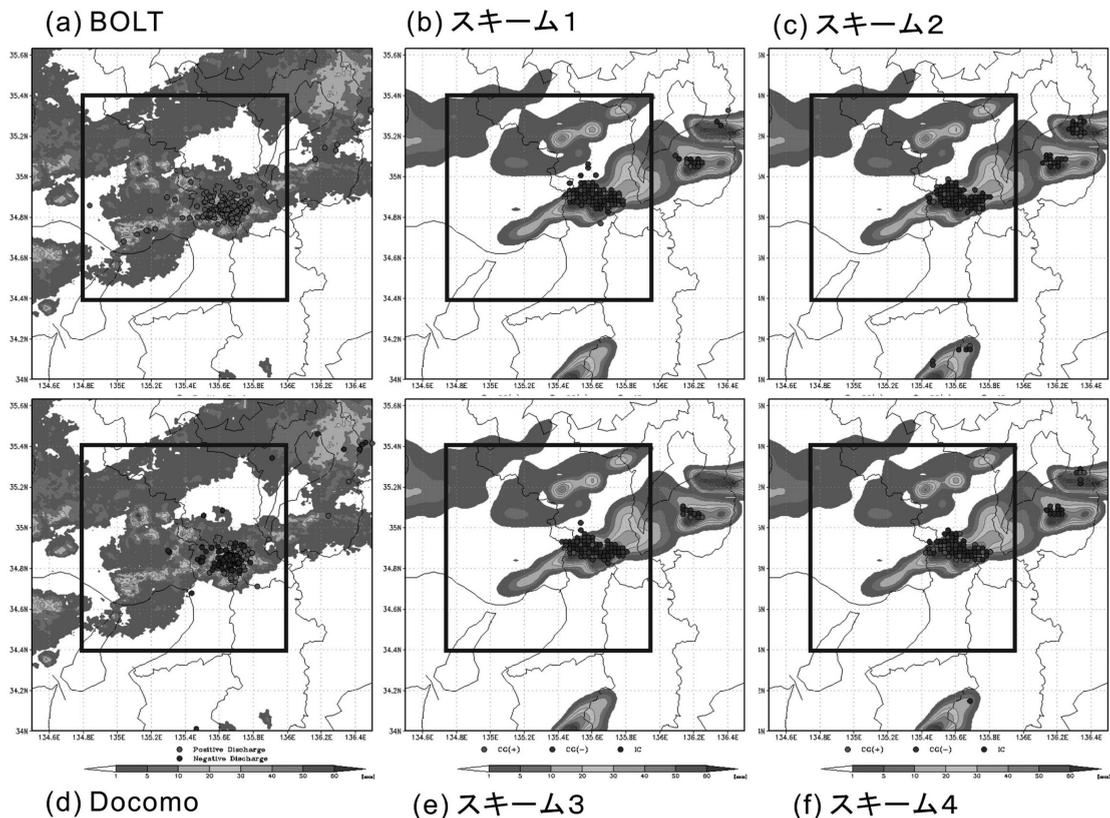
5. 雲解像モデルCReSSによる雷シミュレーション

加藤雅也 (名古屋大学)

数値モデルを用いて発雷現象を表現する手法として、環境場やモデルの予報変数を用いて診断する方法と電荷分布を直接的に計算する方法がある。雲解像モデルは電荷生成に重要な役割を果たしている氷物質(霰、雪、および雲氷)と鉛直流を直接的に計算しているため、雷現象の基となる3次元の電荷分布を直接的に計算することが可能である。名古屋大学宇宙地球環境研究所では雲解像モデルCReSS (Tsuboki and Sakakibara 2002) に各凝結物質が持つ電荷量を予報変数として導入し、着氷電荷分離機構 (Takahashi

1978) に基づく電荷分布、そして MacGorman *et al.* (2001) による雷の主放電路決定や雷放電に伴う中和過程を含む、雷現象に伴うすべての過程を計算する雷モデルの開発を行っている。雷放電前後における各凝結物質の電荷量を観測することが非常に困難であるため、中和過程における雷放電により消費されずに残った正味の電荷量を各凝結物質に再分配するスキームはまだ完全には確立されておらず、これの検討をする余地がある。そこで MacGorman *et al.* (2001) による再分配スキームの他に3つのスキームを提案し、それぞれについて検討を行った。

第2図は2013年8月23日に近畿地方で発生した発雷事例について、気象庁レーダー降水強度と BOLT および DoCoMo LLS による観測結果 (第2図 a, d) と CReSS によって再現された降水強度と発雷地点を再分配スキーム毎に示したものである。いずれの再分配スキームを用いた場合でも発雷地点を概ねよく再現



第2図 2013年8月23日の発雷事例について、観測されたレーダー降水強度と (a) BOLT, (d) DoCoMo LLS による発雷位置と (b) (c) (e) (f) CReSS による降水強度と異なる電荷再分配スキームによる発雷位置の分布、図中の枠は検証領域を示す。

した。発雷高度や落雷の極性については再分配スキーム間で差が見られ、今後さらに事例を重ねて検討を行う必要がある。CReSSの雷モデルでは電荷生成機構にTakahashi (1978)の温度と雲水量の関係図を用いているが、この関係図を用いた場合、特に上昇流が強い領域において電荷分布を正しく再現出来ない事例も報告されている(Kuhlman *et al.* 2006)。従って電荷生成過程に用いる対応表についても再検討を行う必要がある。

これらの検討・検証を行う際、現在は発雷位置の観測結果と比較することで雷モデル全体の検証を行っている。しかしながら、電荷生成機構や中和過程の検証には3次元の電荷分布の観測があることが望ましい。雷モデルの検証に必要な観測も含めた雷モデルのより高度な検証方法の確立が期待される。CReSSに実装されている雷モデルは放電路の決定と中和過程において計算コストが非常に大きく、残念ながら実時間よりも長い計算時間が必要である。このため、予報目的のためには計算コストの低減化を行うと共にさらなる計算機の高速化が求められる。

## 6. 雷の監視・危険度予測技術開発に向けた発雷指標高度化の試み

櫻井南海子 (防災科学技術研究所)

第3節で述べられたように、偏波レーダーは、雷雲内の電荷の担い手である霰等の降水粒子情報や霰の生成に重要な役割を果たす上昇流を広範囲、高時空間分解能で取得出来ることから、雷の監視および危険度予測の高度化への活用が期待されている。Woodard *et al.* (2012)は、偏波レーダーの雷開始予測への有効性を調査し、CSIやリードタイムの改善は目覚ましくないが、FARの改善が見られたことを報告している。本研究では、Lier-Walqui *et al.* (2016)の手法に倣って、Xバンド偏波レーダーの偏波間位相変化率( $K_{DP}$ )を用いて、積乱雲内に正の $K_{DP}$ 領域が柱状に現れる $K_{DP}$ カラムを抽出し、 $0^{\circ}\text{C}$ 高度より上空に伸びた $K_{DP}$ カラムの体積を発雷指標として、LMAで観測された雷放電に伴う電磁波源(ここでは雷放電点と呼ぶ)の数との相関関係を調べた。正の $K_{DP}$ 領域が下層から $0^{\circ}\text{C}$ 高度より上空まで伸びているということは、 $0^{\circ}\text{C}$ 高度より上空に比較的大きな過冷却水滴が存在していることを示しており、すなわち強い上昇流の存在が示唆される。強い上昇流が存在するということは、深い対流が発達し、今後電荷の担い手である霰の

生成が進むことが考えられるため、本研究では発雷指標として $0^{\circ}\text{C}$ 高度より上空の正の $K_{DP}$ 体積に注目した。解析事例は、2017年8月19日に都内で発生した雷雲である。 $K_{DP}$ 体積と雷放電点の位置標定点数の時間変化は良く対応しており、ラグ相関係数は0.8を超え、 $K_{DP}$ 体積が雷放電点数に対して5分先行していた。これらの結果から、 $K_{DP}$ 体積が発雷指標として活用できる可能性が示された。

また、パラボラアンテナを機械的に回転させて降水観測を行うこれまでの気象レーダーと比べて高時空間分解能であるフェーズドアレイレーダー(日本無線よりデータ提供)による雷雲観測から、雷雲内で発生する新しい対流域(水平スケール10~20 km程度)の発達(エコー頂高度の上昇)に伴って雷放電点の高密度域も上昇することを報告した。雷放電点の高密度域が上昇する現象は、Ushio *et al.* (2003)でLightning bubble (LB)と呼ばれている。また、Yoshida *et al.* (2017)等では、LBは上昇流域と良く対応することが報告されている。フェーズドアレイレーダーとLMAによって、雷雲内をこれまでより詳細に捉えられるようになった。鉛直流情報は発雷指標として有用であることから、今後は、発雷指標を検討する上でLBの時空間スケールの上昇流を考慮する必要があるのかを調べる予定である。

## 7. 総合討論

総合討論では、各講演を振り返りつつ、今後、日本の雷研究の方向性を考える材料として、櫻井から1990年以降の海外の雷研究に関する観測プロジェクトを紹介した。偏波レーダーが導入され、偏波レーダーを用いた降水粒子判別技術が進み、雷3次元観測が広まりつつある点からみると、今の日本の雷研究体制は米国の2000年はじめ頃に相当する。2000年はじめ頃に米国で雷を研究主テーマとして行われた観測プロジェクトにはSTEPSやTELEXがある。これからの日本の雷研究を進める上でこれらの観測プロジェクトや研究成果は大変参考になるであろう。STEPSやTELEXが行われた背景には、正極性落雷の割合が高い地域の原因とその発生メカニズムを解明する目的があった。

今後の雷研究の方向性を考える上で、雷研究で解決すべき課題を洗い出す必要があるが、総合討論ではいくつかの貴重な意見を頂けた。今後取り組むべき課題として、小林文明氏(防衛大)から冬季雷が挙げられた。今回は夏季雷に関する講演が主であったが、日本

海側では冬季雷も発生する。夏季雷と異なり、世界的に見て冬季雷が発生する地域は限られており、未解明な部分も多い。1990年代には、大学や電力会社等による冬季雷観測プロジェクトが複数行われた。1990年代より観測技術等が飛躍的に進んだ今、また新たに観測プロジェクトを実施することで冬季雷の理解の進展が期待される。

また、雷研究は、気象学、大気電気学、電気工学など多岐に渡って行われている。横山 茂氏（静岡大）からは、これまでそれぞれの雷研究は別々に進められることが多かったが、今後は双方の情報を共有し共同で取り組むことで、それぞれの雷研究分野を発展させられるのではとの提言を頂いた。研究会には、気象学関係内外から多くの方々に参加いただき、情報交換が行われた。今後は、それぞれが持つ知見や観測技術、数値モデル等を持ち寄って、新たなブレイクスルーが生まれることを期待する。今回の研究会が、お互いの存在を知り、今後の雷研究が幅広く発展していくきっかけとなれば幸いである。

## 謝 辞

今回の研究会を開催するに当たって、会場の準備・運営をしていただいた気象庁企画課・数値予報課ならびに気象学会員の有志のみなさまに感謝します。

## 略語一覧

CAPE : Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー  
 DIAS : Data Integration and Analysis System データ統合・解析システム  
 DoCoMo LLS : NTT ドコモが提供する落雷データ。  
[https://www.nttdocomo.co.jp/info/news\\_release/2010/08/05\\_01.html](https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2010/08/05_01.html) (2018.8.16閲覧)  
 GSM : Global Spectral Model 気象庁全球モデル  
 LIDEN : LIghtning DEtection Network system 雷監視システム  
 METAR : 定時飛行場実況気象通報式  
 MSM : MesoScale Model 気象庁メソモデル  
 SSI : Showalter Stability Index ショワルター安定指数  
 STEPS : The Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study  
 TELEX : The Thunderstorm, Electrification and Lightning EXperiment  
 XRRAIN : eXtended Radar Information Network

## 参 考 文 献

- Akita, M., M. Stock, Z. Kawasaki, P. Krehbiel, W. Rison and M. Stanley, 2014: Data processing procedure using distribution of slopes of phase differences for broadband VHF interferometer. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 6085–6104.
- 気象庁, 2016: 雷ナウキャスト活動度1の改善. 配信資料に関する技術情報, (441).  
<https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/441.pdf> (2018.5.16閲覧).
- 気象庁, 2017: 「ひまわり8号」の観測データを活用した雷ナウキャストの改善について.  
[https://www.jma.go.jp/jma/press/1707/12a/20170712\\_kmncst.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/press/1707/12a/20170712_kmncst.pdf) (2018.5.16閲覧).
- 国土交通省, 2010: XバンドMP (マルチパラメータ)レーダの降雨観測情報 (web 画像) の一般配信について.  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/river03\\_hh\\_000243.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000243.html) (2018.8.14閲覧).
- 国土交通省, 2016: 「XRRAIN (エクスレイン)」の配信エリアを大幅に拡大します!  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03\\_hh\\_000905.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000905.html) (2018.8.14閲覧).
- Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo and K. Muramoto, 2015: A hydrometeor classification method for X-band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environments. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 2052–2074.
- Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi and K. Tsuboki, 2017: Relationship between cloud-to-ground lightning polarity and the space-time distribution of solid hydrometeors in isolated summer thunderclouds observed by X-band polarimetric radar. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 8781–8800.
- Krehbiel, P. R., R. J. Thomas, W. Rison, T. Hamlin, J. Harlin and M. Davis, 2000: GPS-based mapping system reveals lightning inside storms. *Eos Trans. Amer. Geophys. Union*, **81**, 21–25.
- Kuhlman, K. M., C. L. Ziegler, E. R. Mansell, D. R. MacGorman and J. M. Straka, 2006: Numerically simulated electrification and lightning of the 29 June 2000 STEPS supercell storm. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2734–2757.
- Lier-Walqui, M.V., A. M. Fridlind, A. S. Ackerman, S. Collis, J. Helmus, D. R. MacGorman, K. North, P. Kollias and D. J. Posselt, 2016: On polarimetric radar signatures of deep convection for model evaluation:

- Columns of specific differential phase observed during MC3E. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 737-758.
- Liu, H. and V. Chandrasekar, 2000: Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 140-164.
- MacGorman, D. R., J. M. Straka and C. L. Ziegler, 2001: A lightning parameterization for numerical cloud models. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 459-478.
- Momozawa, K., F. Suzuki, H. Tsuji and Y. Onozuka, 2012: Evaluation of the new LS7001 network in the Chubu region of Japan. <https://my.vaisala.net/en/events/ildcilmc/Documents/Network%20Performance/Evaluation%20of%20the%20New%20LS7001%20Network%20in%20the%20Chubu%20Region%20of%20Japan.pdf> (2018.7.20閲覧).
- Oue, M., K. Inagaki, T. Shinoda, T. Ohigashi, T. Kouketsu, M. Kato, K. Tsuboki and H. Uyeda, 2014: Polarimetric Doppler radar analysis of organization of a stationary rainband with changing orientations in July 2010. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 457-481.
- Proctor, D. E., 1971: A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning. *J. Geophys. Res.*, **76**, 1478-1489.
- Saunders, C. P. R. and S. L. Peck, 1998: Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions. *J. Geophys. Res.*, **103**, 13949-13956.
- Takahashi, T., 1978: Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator. *High Performance Computing (H. P. Zima et al., ed.)*, Springer, 243-259.
- 土田尚侑, 2018: 発雷確率ガイダンス. 数値予報課報告・別冊64号, 気象庁予報部, 165-176. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/64/chapter4.pdf> (2018.5.16閲覧).
- Ushio, T., S. J. Heckman, H. J. Christian and Z.-I. Kawasaki, 2003: Vertical development of lightning activity observed by the LDAR system: Lightning bubbles. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 165-174.
- Woodard, C. J., L. D. Carey, W. A. Petersen and W. P. Roeder, 2012: Operational utility of dual-polarization variables in lightning initiation forecasting. *Electronic J. Oper. Meteor.*, **13**, 79-102.
- Yoshida, S., T. Adachi, K. Kusunoki, S. Hayashi, T. Wu, T. Ushio and E. Yoshikawa, 2017: Relationship between thunderstorm electrification and storm kinetics revealed by phased array weather radar. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 3821-3836.