地磁気観測所テクニカルレポート　第17巻第１号　1-24頁　令和４年３月
Technical Report of the Kakioka Magnetic Observatory Vol.17, No.1, pp.1-24, March 2022

地磁気観測所における大気電場と雷雲との関連の調査
－降雹４事例（2012/5/6，2014/4/4，2017/6/16，2018/5/24）－

熊本真理子

地磁気観測所観測課

2021年11月２日受領，2022年３月９日受理，2022年３月22日刊行

要　　旨

地磁気観測所（茨城県石岡市柿岡）では構内で４件（2012年５月６日，2014年４月４日，2017年６月16日，2018年５月24日），降雹が見られた．地磁気観測所で常時観測していた大気電場のデータの時間変化と，気象庁の３次元レーダーや成田，羽田両国際空港設置のドップラーレーダーのデータの時間変化や降水量の関係から，雷雲の構造との関連について調査を行った．大気電場の変動の主な特徴は以下である．

１）降雹発生前５～10分前に，中層に53dBz 以上の領域（雹域コアと想定）が近づくと大気電場は大きく正（＋）の極大に急変した．

２）雹域コアの降下時に，大気電場が負（－）側に変動し極小となり，直後に降雹が発生した．

３）降雹の発生時には，大気電場は０付近で変動が見られた．

４）降水が止むと，大気電場は負（－）の極小となり，エコー通過後，寒気移流時に大気電場は正（＋）の極大に変化した．

レーダーエコーの監視と共に，大気電場の変化をモニターすることによって，１），２），３）の変化から雹域コアの到来を探知し，降雹の発生を直前に知ることに繋がるのではないかと考える．

また，2020年の４～10月の大気電場の変動が顕著な事例から，短時間降水が最大となる時には，大気電場が負（－）の極小になる場合と０付近で変動する場合があった．前者はウォームレインで，後者は上空で霰や雹を伴う降水と考えられる．短時間降水が最大となる時に，大気電場が正（＋）の電荷となる事例は１例のみであった．2017年～2019年の４～10月について，大気電場の顕著な事例を調べたところ，2020年と同様な傾向であった．

１．はじめに

発達した積乱雲によって，短時間強雨や落雷，突風，降雹を伴うダウンバーストや竜巻などの顕著現象が，５～数10分程度の短時間に数100m ～数 km 程度の狭い領域で発生する．時には人的被害，家屋や車両の損壊，果樹の損傷，農作物への被害など様々な被害を伴うことがある．

筆者は，1996年７月15日16時前につくば市でダウンバーストに遭遇した．真夏の晴れた日にこれまで出会ったことがないような真っ黒い雷雲がやってきて，わずか５～10分，横殴りの風と土砂降りの雨に見舞われ，まるで突然，台風の真っただ中に入ったようだった．事前に到来の惧れを知ることなく，突然，短時間強雨や突風に遭遇することは恐怖だった．この雷雲は約１時間前の15時頃，下館市でダウンバーストを発生させ，JR 鬼怒川鉄橋の風速計は46 m /s の瞬間風速を観測しており，死者１人，負傷者19人などの被害があった（中村・森（1999））．事前にシビアストームの到来を知らないことは，屋外では危険である．逆に，事前に到来を知ることによって，わずか数分間屋内にいれば，少なくとも人的被害を防げることは多いのではないだろうか．

降雹は局所的に発生するため，現在の地上気象観測網で降雹や降雹による被害の実態をとらえた事例は少ないが，最近は様々な研究がなされている．レーダーやドップラーレーダーの積乱雲の３次元構造から，上空の雹域コアや降水コアの形成から落下に至るシステムが解析され（Browning and Foote（1976）；楠（1999）；中村・森（1999）；森・高谷（2004）；出世・坪木（2006）；山下（2007）；石原（2012）；林ほ

©2022 Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

か（2015）），最近では，フェーズドアレイレーダーにより電域コアや降水コアの詳細な３次元構造が観測されている（足立（2019））．また，スーパーセルによって雹が形成される場合は，進行方向前面にヴォールト（上昇流域）があり，雨が降らないところに，突然の降雹や短時間強雨，ダウンバーストなどが発生するため，屋外で活動中の時など事前の退避が重要である．

しかしながら，不規則な形状の雹に関する報告はほとんど見られず（平野（1927）），雹形成に至るシステムの報告はされていない．近年SNSなどで数々の雹の写真が掲載され，それらは球状の雹が多いが，時折，多様で不規則な形状の雹の写真も見られる．そこで，降雹３事例（2014/４/４を除く）について，ドップラーレーダーの鉛直構造の解析を行い，球状な雹と不規則な雹では，雹形成に至るシステムが異なることがわかった（熊本（2022））．

一方，雷雲の接近・通過時には，地表付近の大気電場の変動はW型（＋－＋－＋）の特徴的な変化が見られることが，これまで報告されており（Simpson and Scrase（1937）；畠山・久保（1946）；今道・菊池（1950）；Kuettner（1950）；畠山（1970）；北川（1996）；Rakov and Uman（2005）；Toya and Tsunomura（2008）；高橋（2009）），降雹時の事例は少ないが，大気電場の変動もW型であることが報告されている（道本ほか（1996）；Fujiwara *et al.*（2021））．

大気電場を常時測定していた地磁気観測所（茨城県石岡市柿岡）では，2012年～2021年２月の10年で４例，構内で降雹が見られた．このうち，降雹時刻が明らかな３例（2014/４/４を除く）について，気象庁の３次元レーダーデータや成田，羽田両国際空港設置のドップラーレーダーデータの時間変化と地表付近の大気電場の変化，および降水量（アメダス柿岡）の関係から，降雹直前から降雹に至る雷雲の鉛直構造の変化を主として，調査を行った．雷雲の接近に伴って，上層雲や中層雲が近づいてくると，大気電場は＋や－の変動が見られ，降雹直前に上空に電域がかかってくると，大気電場が＋から－に急減し，降雹時には０付近で変動が見られることがわかった（熊本（2022））．

本報告では，雷雲の水平構造の高度別時間変化と大気電場の変化について，降雹の前後における雷雲の構造と詳細な関係を調査した．また，2017年～2020年の４～10月について，短時間強雨と大気電場の関係について，調査を実施した．大気電場が大きく変化する時に，短時間強雨となるか，雨が降らないか，降雹となるかならないか，その違いについて調べた．以下，報告する．

２．降雹４事例の概要

図１に地形図と降雹４事例のレーダーエコーと竜巻の経路，図２に空中電気室（水滴集電器）とフィールドミル（テラテクニカ製EF-308），図３に構内の機器の配置図と降雹が見られた地点，表１に降雹４事例の状況及び図４に雹の写真と気象状況を示す．2012年５月６日を事例①，2014年４月４日を事例②，2017年６月16日を事例③，2018年５月24日を事例④と記す．図１のように事例③と事例④の積乱雲は，栃木県・茨城県県境の雨巻山付近から加波山方面を経て発達し，同じような経路を通ってほぼ同じ時刻07UTC（以下，UTと記す）過ぎに地磁気観測所で降雹があった．事例②は加波山の北側で発生し，事例③，④と同じ経路であった．事例③と同日，八王子駅周辺でも降雹2cmが発生し，ドップラーレーダーにより解析されている（石原（2020））．どちらも西側に南北走向の山があり，雹を伴う雷雲の発達

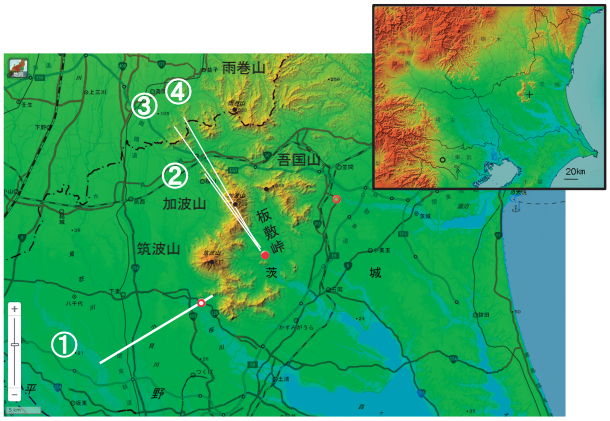


図１　事例①～④の経路と地形図（地理院地図）．事例①0335-0353UT竜巻の経路と0351UT北条の竜巻被害地点（◯）（気象研究所2012），事例②～④レーダーエコーの経路．●：地磁気観測所，◎：事例①0415UT笠間市降雹を確認した地点　右上図＋：地磁気観測所，○：八王子駅（③降雹2cm（石原（2020））．

図２　空中電気室（水滴集電器）とフィールドミル．

において，地形の影響が推察される．事例①の経路はこれらと直交する方向であった．

図３のように，大気電場はアメダス柿岡から約100 m南西にある水滴集電器（空中電気室：センサーの設置高は地表面から約2.5 m）で，地表面付近から垂直方向の電場（静穏時は正電荷で約100V/m）を観測していた．フィールドミルは感度補正などを実施していないデジット値のため，絶対値として使用できないが，水滴集電器の正負の極性の変化を確認するなど参考資料として使用した．当時，地電流観測を実施しており，付近で雷鳴があり落雷のおそれがあるときには，機器の保護のため地電流観測を停止し遮断していた．そのような時は必ず，大気電場の変動は大きい．

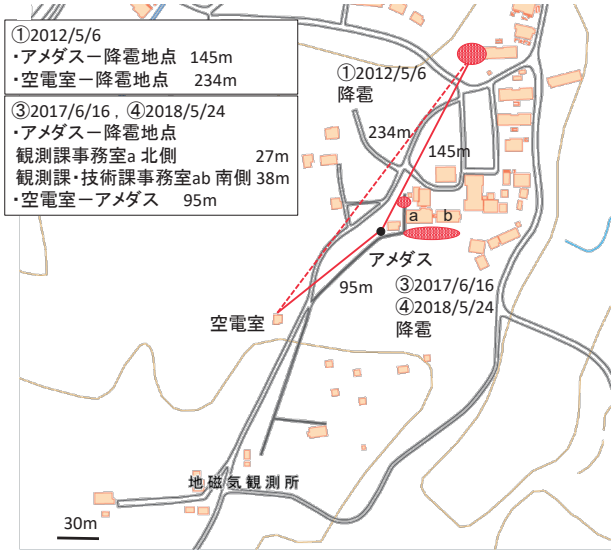


図３　構内配置図（地理院地図より）．空中電気室（空電室），アメダス，事例①，③，④の降雹を確認した地点と距離

事例①：2012年５月６日0335-53UTにつくば市で竜巻が発生し，0351UT頃北条では竜巻による人的被害や家屋の甚大な被害が発生し，スーパーセルであったことが報告されている（気象研究所（2012））．この２分後，0353UTに地磁気観測所の構内宿舎付近にて，雹（球状，3cm）が雨と共に降っている動画が記録されていた．写真は動画から静止画に取り出したものである（図４①左）．アメダス柿岡での雨量はわずか0.5mmであった．雨量計と降雹の見られた地点の距離は145 mで，雨量計は南西に位置する（図３）．この22分後の0415UT頃，笠間市で雹（球状，5cm）が降り，職員によって写真が撮影されていた（図４①右）．芝生の上に落ちたものを，降雹の合間に一番形のいいものを採取した．直径５～10mm位の粒が集まって直径5cmの球体となっていたとのことである．

事例②：2014年４月４日について，観測課の記録を調べると，雹（0.6cm）の写真があり，0831,32,33UTに３枚の写真が屋外で撮影されていた．そのうち１枚は大きさがわかり，0.6cmの雹であった（図４②）．降雹の時刻は0830UT頃と推察される．

事例③：2017年６月16日0640UT頃，地磁気観測所の観測課事務室（図３の③・④降雹が見られた地点）では，北側の山々の方から雷鳴が聞こえてきた．0707UTより少し前から雨が降り始め，0707UT頃，雨に混じって霰（大きさ5mm未満）が降り出した．米粒のような丸みを帯びた楕円形で，半透明

表１　降雹４事例．

事例	日付	発生時刻［UT］	継続時間	雹の形状	雹の大きさ	最大	雹の特徴	降雹の発生地点（地磁気観測所又は職員が写真撮影）	アメダスとの距離[m]	降水量[mm]	最大降水強度[mm/h]	備考（大きさは雹）
①	2012/5/6	0353	不明	球状	3cm	3cm【5cm】	不透明の球状	構内宿舎周辺【笠間市】	145【NE13km】	6.5 (0.5)*1	32.7 (0.5)*1	・【】笠間市 ・0415UT水戸2.8cm＊3，0450-55UT盛岡0.5cm＊3 ・0335-0353UT竜巻,0351UT北条の竜巻被害（気象研究所 2012） ・竜巻発生前 つくば市 雹＊2
②	2014/4/4	0831-33撮影	不明	三角錐	0.6cm	不明	不透明と透明	構内	不明	5.5 (--)*1	36 (--)*1	・0535UT 宇都宮0.5cm ・東京都内 局地的に雹 ・0620UT頃 さいたま市桜 突風
③	2017/6/16	0710-20	10分	球状	1-2cm	2cm	不透明の球状が透明な氷で覆われている	観測課・技術課事務室周辺	17 38	19.0	72	・0707UT雨と霰(0.5cm未満)、降雹時は雨まじり ・0434UT 宇都宮2cm＊3
④	2018/5/24	0717-21	4分	不規則な形状	1-2cm	4cm	透明な部分が多く突起状のものもあり様々、透明と不透明の層が重り中心部分が透明なものもある	観測課・技術課事務室周辺	17 38	3.5	85.7	・雨まじり ・0430UT頃八王子駅周辺　大粒の雹（2cm余り）（石原 2020）

*1 降雹発生時の降水量と最大降水強度，＊2 SNS，＊3 地上気象観測日表

と透明な部分があった（図４③）．やがて，0710UT頃，土砂降りの雨となり，大きさ1cmの丸い氷の粒，雹が混じり始めた．雹の多くは中が不透明で，外側が透明の２層構造，球形が多いが，一部は変形していた．不透明な部分は数mm程度の小さな不透明の霰がまとまって，金平糖のようなものもあった．0720UT頃，地面に落ちた雹のうち，大きいものを拾って計測し，冷凍庫へ保管した．最大で大きさ2cm，1cm前後が多かった（図４③）．雷雲の構造は中層で反時計回りの回転が見られ，ドーナツ状のWER（Weak Echo Region）があり，下層で収束，上層で発散があり，スーパーセルの形状であった（熊本（2022））．

事例④：2018年５月24日0650UT以前に，北西方向の山々の方から雷鳴が聞こえてきた．雷雲は次第に近づいてきて，LIDENによると0700UTに地磁気観測所付近で雲間放電があり，0710UTには6km東で対地放電があった（熊本（2022））．0717UTに大きさ0.6cm位の雹が雨と共に降り始め，0719UTには大きさ2-3cm，最大4cmのいろいろな形（突起がついているような形状もあり）の雹（図４④）が降った．中が不透明なものが多いが，透明なものもあった．0721UTには雨のみとなった．雷雲通過後，南東方向に虹が出ていた．上空に寒気が入り晴れ間が出てきたためである．わずか４分間の降雹であった．

３．気象状況

図４に気象状況を示す．300hPaの高層天気図では，事例①～④では上空に－45℃の寒気移流があり，衛星の水蒸気画像では関東地方の南まで，乾いた空気が入り込んでいた（熊本（2022））．地上天気図では事例①，②，④では寒気に伴う低気圧が入ってきており，事例②では寒冷前線の通過後，寒気が入ってきている．つくばの高層断面図から，中層には乾燥した寒気が入っており，不安定度の指数であるCAPEは事例①，③の順で約500，300J/Kgと大きく不安定で，事例②，④で０近くと小さい．ホドグラフから，下層は事例②，③，④では東風成分があり（事例②では降雹時刻0830UT頃，東風），上空では強い南西風で鉛直シアーが大きい．事例③は下層では南風で，図５-３（g）のアメダスの風と気温の分布から，地磁気観測所の南側と北側で温度傾度が大きかった．地上付近の温度分布は事例①，③，④では地磁気観測所の北東側に寒気移流があり，事例③で特に顕著で，地磁気観測所付近では，北西から南東方向に温度傾度が大きく，事例②では温度差が小さいが，同様に温度傾度があった（図５-２（g））．北側から寒気移流があるとき，図１より筑波山系の

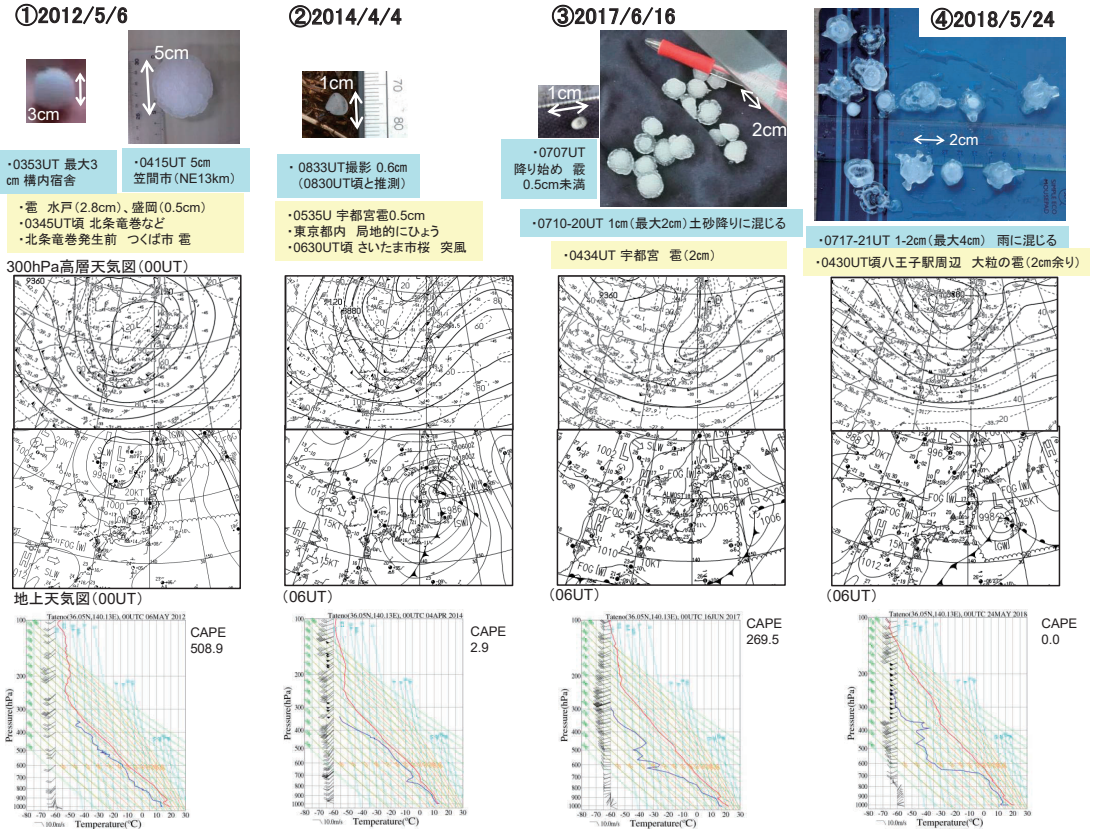


図４　４事例の雹の写真と高層天気図（00UT）と地上天気図および高層断面図（館野）．

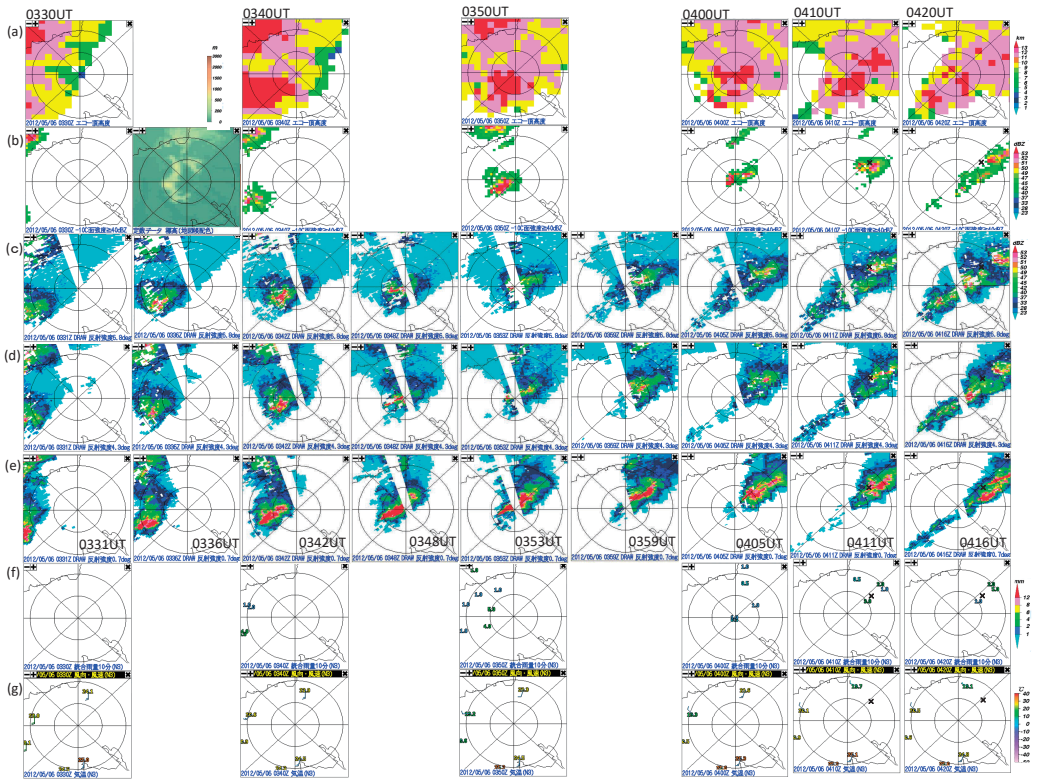


図5-1 事例①2012年５月６日の降雷事例の成田ドップラーレーダーエコーと雷と気象データ．(a) レーダーエコー頂高度，(b) −10 ℃面40dBz 以上（高度約4km），(c) 成田ドップラーレーダー反射強度（仰角6.8度；高度約6km），(d) 仰角4.3度：高度約4km，(e) 仰角0.7度:高度約1km，(f) 雨量（10分値），(g) アメダスの気温と風　中心は地磁気観測所，×は笠間市．円は半径10km と20km．時系列は左から右に進む．左上の地図は標高図．

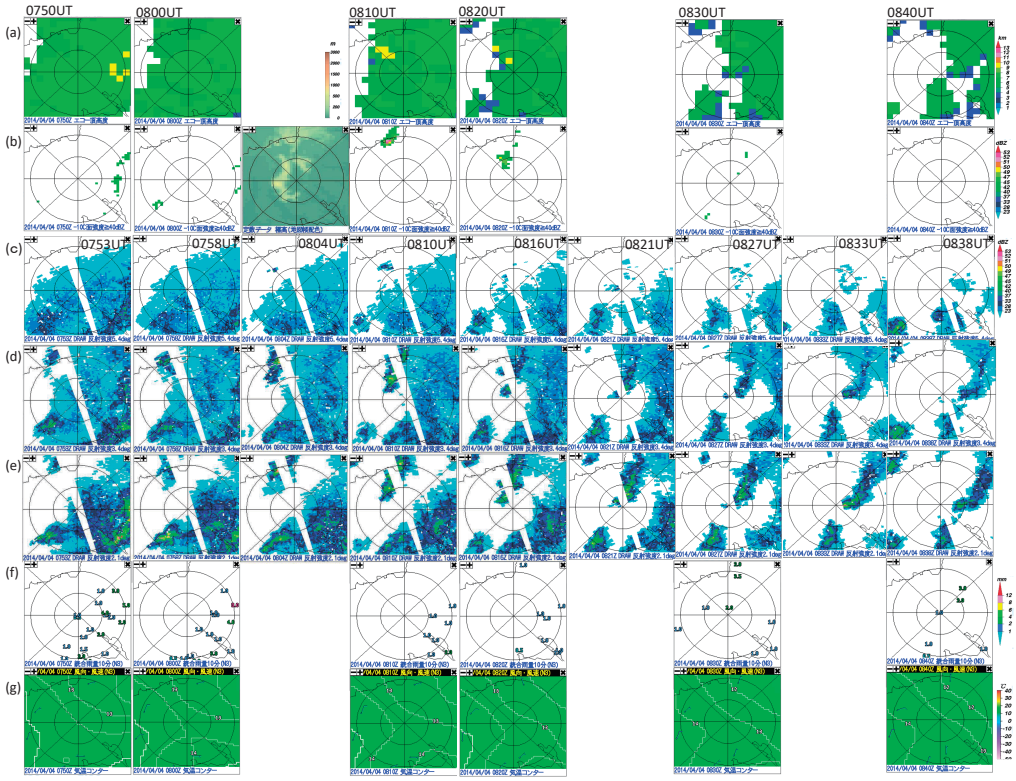


図5-2 事例②2014年４月４日の降雷事例の成田ドップラーレーダーエコーと雷と気象データ．(a) レーダーエコー頂高度，(b) −10 ℃面40dBz 以上（高度約6km），(c) 成田ドップラーレーダー反射強度（仰角5.4度；高度約5km），(d) 仰角3.4度：高度約3km，(e) 仰角2.1度：高度約2km，(f) 雨量（10分値），(g) アメダスの気温と風．
中心は地磁気観測所．円は半径10km と20km．時系列は左から右に進む．左上の地図は標高図．

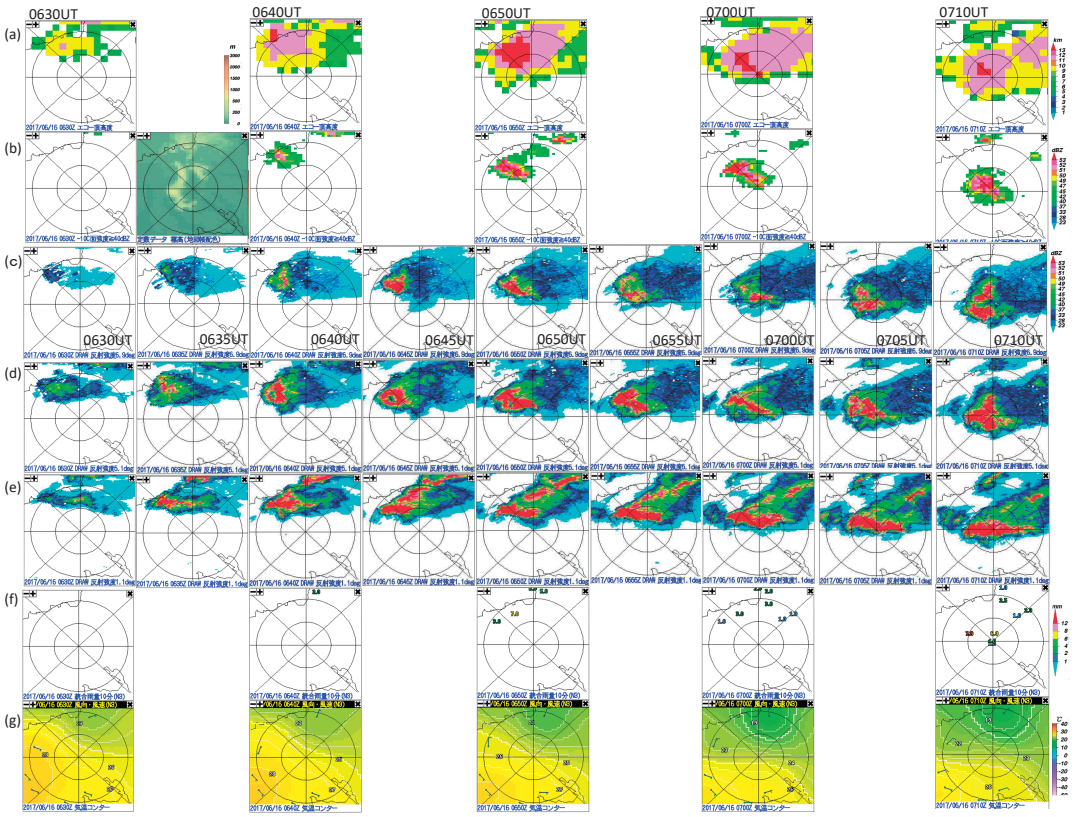


図5-3 事例③2017年６月16日の降雹事例の成田ドップラーレーダーエコーと雷と気象データ．(a) レーダーエコー頂高度，(b) −10 ℃面40dBz 以上（高度約6km），成田ドップラーレーダー反射強度（(c) 仰角6.9度：高度約7km，(d) 仰角5.1度：高度約5km，(e) 仰角1.1度：高度約1km），(f) 雨量（10分値），(g) アメダスの気温と風．
中心は地磁気観測所．円は半径10km と20km．時系列は左から右に進む．左上の地図は標高図．

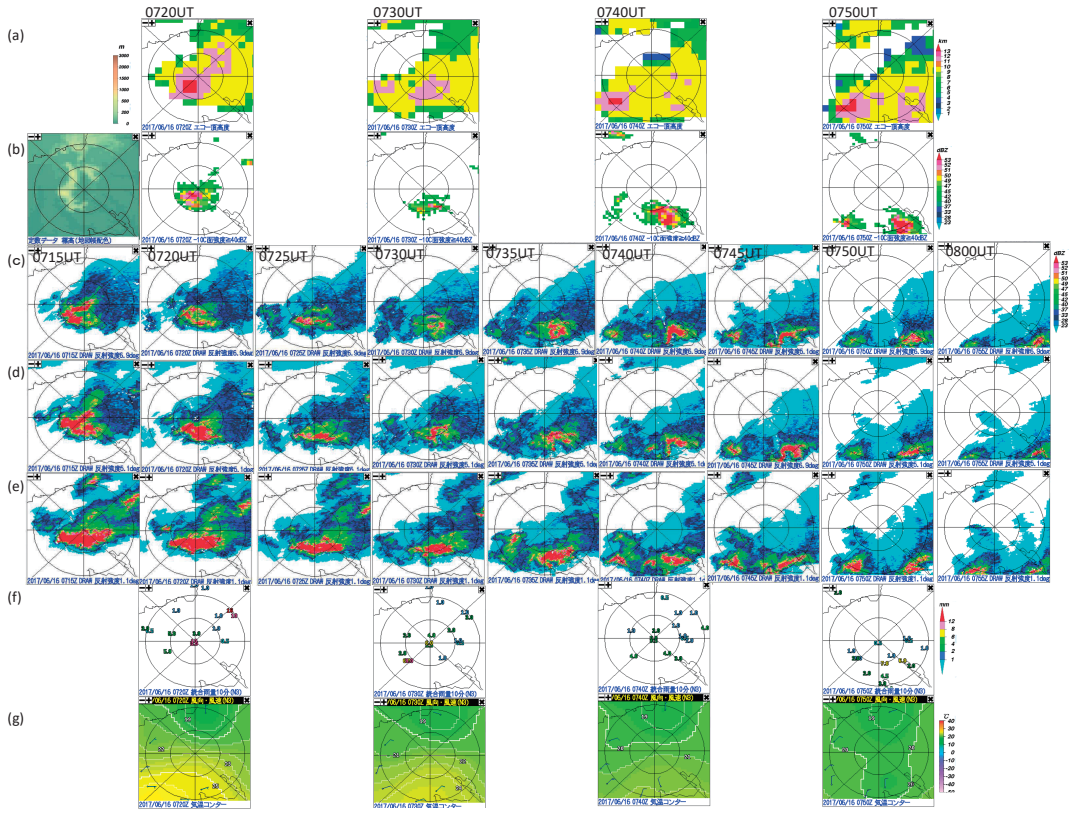


図5-3（続き）．

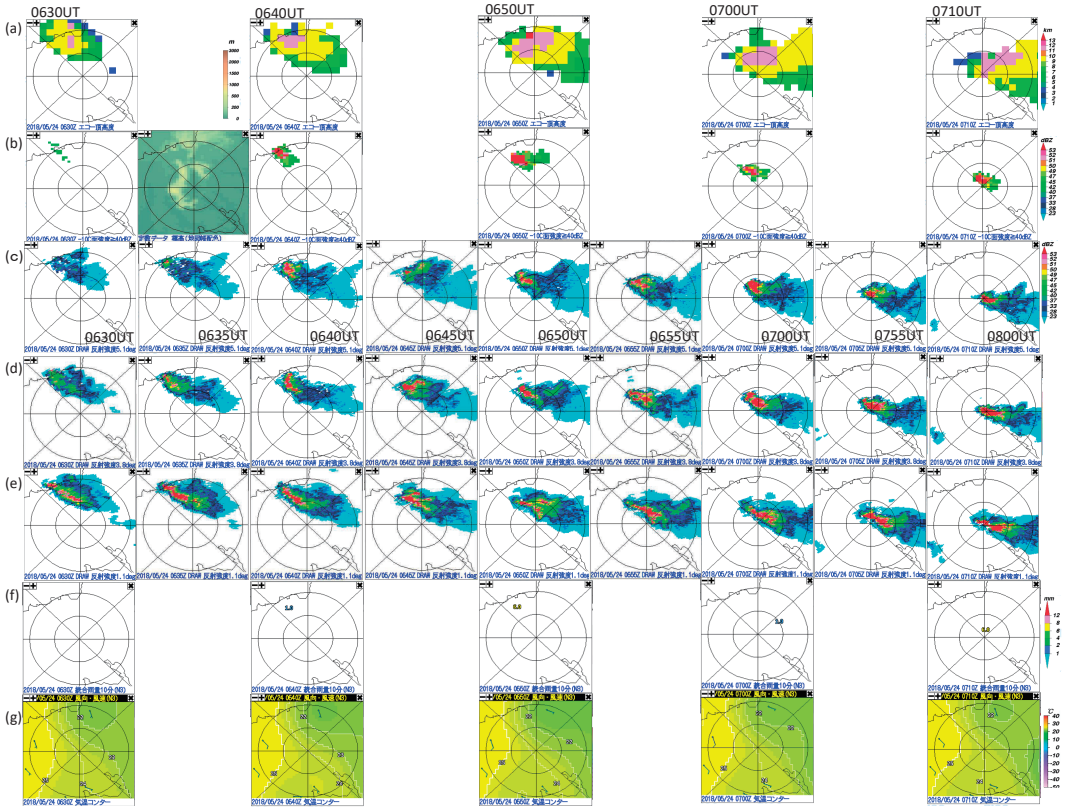


図5-4 事例④2018年５月24日の降雹事例の成田ドップラーレーダーエコーと雷と気象データ．(a) レーダーエコー頂高度，(b) −10 ℃面40dBz 以上（高度約5km），(c) 成田ドップラーレーダー反射強度（仰角5.1度：高度5km），(d) 仰角3.8度：高度4km，(e) 仰角1.1度：高度1km，(f) 雨量（10分値），(g) アメダスの気温と風．
中心は地磁気観測所．円は半径10km と20km．時系列は左から右に進む．左上の地図は標高図．

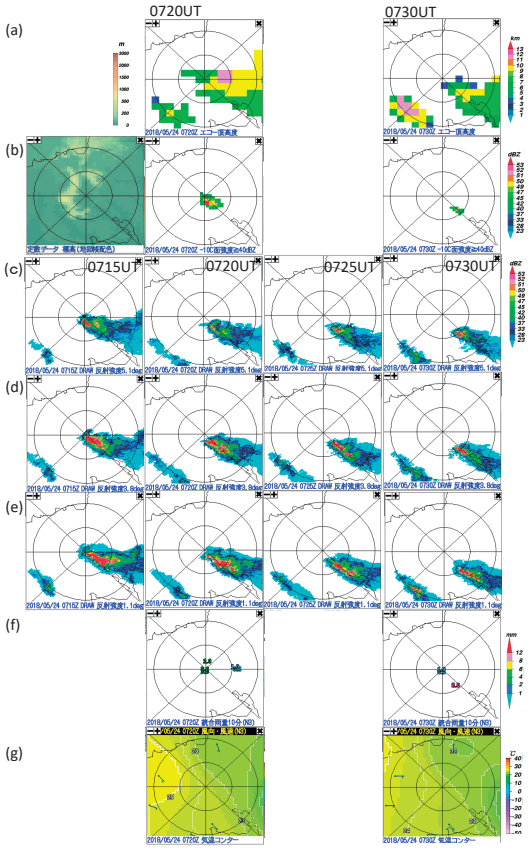


図5-4（続き）．

山々が寒気を遮り，八郷盆地で温度傾度が大きくなったと推察する．また，事例①では南風の暖気移流が強いときに，筑波山系の地形によって遮られ，東西方向に温度傾度が大きくなったと推察する．

4．ドップラーレーダーの時間変化と大気電場

レーダーエコーによる雹の目安として，1）反射強度45dBz 以上であること（Waldvogel *et al.*（1979）），2）被害の発生した降雹では反射強度55dBz 以上であったこと（森・高谷（2004））を参考とした．また，Vild（Vertically Integrated Liquid Water density：鉛直積算降水量密度）が３）1.0g/m^{3}以上であることが15mm 以上の降雹の必要条件であること（吉田ほか（2006）），４）3.5g/m^{3}が暖候期の雹判別の閾値であることや，５）top（頂高度）8km が適当である（内田ほか（2010）），とされていることから，これらを雹域判定の参考とした．

図17のように大気電場の急な変化が顕著であるが，柿岡に降水がなく，付近で降水が観測されたことがあったことから，雷雲の水平構造の高度別時間変化を調べた．成田や羽田のドップラーレーダーによる4-6分毎の上層，中層，下層に相当する仰角のPPI（Plan Position Indicator）を図５-１～４に示す．

図６に４事例の大気電場（水滴集電器とフィールドミル）と降水量および降水強度（１分）を示す．

事例①では，図６より大気電場は0325-30UTにかけて大きくなり正（＋）の極大となった時，図５-１より上層のエコーが接近し，地磁気観測所の真上にかかってきていた．その後0335UTにかけて大気電場は減少し，負（－）の極小に急変しているが，この時上層のエコーは33dBz以上が接近し中層にエコーがかかり始めている．0345UTに大気電場が正（＋）の極大に転じた頃，図５-１の0348-53UTでは上層～中層に赤い領域53dBz以上（雹域と想定）が真上にかかり，下層の53dBz以上の領域は地磁気観測所のやや北側を通過した．0350UTに大気電場が急減したが，0342-48UTにかけて上層～中層の53dBz以上の領域が減少し，下層の同領域の中頃で増加し前方に張り出していることから，地磁気観測所の南西5km付近で降水があったと推察される．このあたりに雨量の観測点はなく不明である．その後，0353UTに大気電場は０付近で変動が見られ，この頃，降雹があり，柿岡では0.5mmの降水が記録されている．同時刻のエコーでは上層～中層の53dBz以上の領域が真上にかかってきており減少し，下層では53dBz以上の領域の西側が減少し，－10℃面高度では0350-0400UTにかけて53dBz以上の領域が地磁気観測所付近で減少し，地磁気観測所の降雹はその一部と考えられる．図５-１の0411-16UTにかけて，笠間付近では上層や中層の53dBz以上の領域が北東進し，後面ではエコーがくさび状にくび

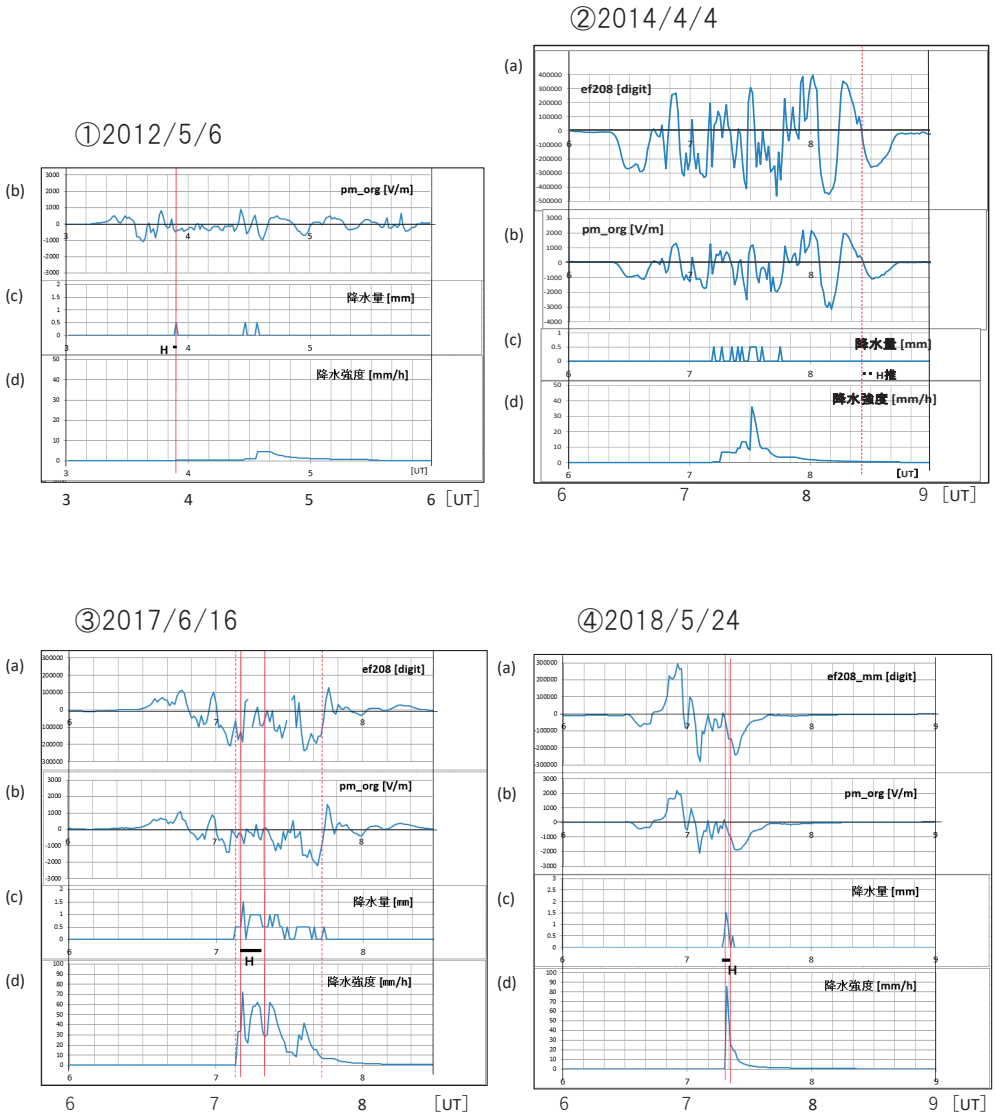


図６　降雹４事例の大気電場（(a) フィールドミルと (b) 水滴集電器）と (c) 降水量および (d) 降水強度（１分値）．事例③2017/６/16 0646－47UT，事例④2018/５/24 0701UT 作業欠測　大気電場の水滴集電器の分値は参考値（確定値はオリジナルデータに平面較正1.3補正）．「H」と赤線は，降雹の発生した時刻を示す．事例②は推測であるため，点線で示す．事例①は，降水があった時刻を示す．

れており，0415UTに付近で5cmの降雹があったことから，降雹と共に後面から中層の乾いた空気の流入があったのではないかと推察される．

事例②では，図6より0620-30UTに大気電場が負（－）の極小に急変しているが，この頃，地磁気観測所付近の上層～中層にエコーがかかってきていた．その後，南西方向から北東方向に連なって，盛衰を繰り返しながら広がった．大気電場は±の脈動がみられ数分の短い周期で変動していた．0800UTに正（＋）の極大になり，0810UTに急変して負（－）の極小になったが，図5-2より0800UTに下層ではエコーが通過しており，地上付近では北東から寒気の流入が見られ，上空からの寒気が移流したものと推察される．

その後，0815UTに大気電場が正（＋）の極大となったが，これは，それまでとは別に，0804UTに加波山方面にエコーが発生し，発達しながら0820UTに上層～中層のエコーが北西5km以内に近づいてきたことに対応している．0827UTに大気電場は急減し0付近であるが，この頃エコーは0830UTに上層～下層ともに小さくなりながら地磁気観測所付近にかかっており，降雹があった．アメダス柿岡では降水が観測されていないが，地磁気観測所の北側の瓦会で2.0mm，0840UTに近くの八郷町柿岡で1.0mm観測されている．0830UTに大気電場は負（－）の極小であるが，この頃エコーは通過しており，降雹とともに上空の空気の降下があったと推察される．

事例③では，図6から0630-45UTに大気電場が正（＋）の極大に上がったが，図5-3より0635UTに上層のエコーが5km以内にかかり，0640UTには中層で5km付近，0645UTには中層で28Bz以上のエコーが地磁気観測所の真上にかかってきていた．0655UTには大気電場は負（－）極小に変化したが，この頃下層までエコーがかかってきていた．0700UTに大気電場は急変し正（＋）の極大となったが，この頃エコーは上層～中層まで地磁気観測所の真上に53dBz以上のエコーがかかっていた．0705UTに大気電場は負（－）の極小に急変していたが，この頃，上層～中層も53dBz以上のエコーは地磁気観測所の真上を通過中であり，下層にも53dBz以上のエコーがかかってきていたことから，雹域の降下が推察される．0707UTには大気電場は急変し0付近で変動がみられたが，同時刻に霰と雨が降りはじめた．この後0710-20UTに降雹が継続していたが，この時刻の大気電場は0付近で変動していた．0740UT大気電場は負（－）の極小に急減し，0745UTに急変し正（＋）の極大となったが，0740UTにほぼ降水は止み，上層～中層のエコーは通過しており，図5-3（g）より地上では20℃線が南に下がり寒気が流入し，0740-50UTにかけて20℃線は大きく南下し上空からの寒気の移流が推察される．

事例④では，図6から0630-40UTにかけて大気電場が減少し負（－）の極小になったが，この頃，図5-4より0635UTでは中層のエコーが5km以内にかかりはじめ，0640UTでは中層の28dBz以上のエコーが5km以内にかかっていた．0650-0700UT過ぎにかけて大気電場が正（＋）の極大になったが，0650-0705UTにかけて中層の40dBz以上の領域が接近してきていた（熊本（2022）の図4③の鉛直断面図をみると明らかである）．0700UTには大気電場は一時急減し0付近となったが，0700-05UTにかけて上層～下層の53dBz以上の領域が減少し，0710UTに北側の瓦会で6.0mmの短時間強雨があり，雹域の降下があったと推察される．その後，0705UTに大気電場は急減し負（－）の極小になったが，この頃，0705-10UTでは，地磁気観測所の真上に，中層に53dBz以上の領域がかかってきた．0713-17UTのわずか4分間に土砂降りの雨と共に降雹があった．その後，0725UTにかけて大気電場は負（－）の極小となったが，同時刻にはエコーは通過しており，寒気の流入によると推察される．

5．積乱雲内の電荷構造と地上付近の大気電場

事例③と事例④は，進行方向にヴォールトがあり，雷雲の構造がシンプルであった（熊本（2022））．そこで，雷雲の電荷構造と地表面付近の大気電場の概念図を図7に示す．雷雲の霰の電荷分離は－10℃以下で－電荷，－10℃以上で＋電荷と分かれることから（図10：高橋（2004）），高層気象観測（館野）から得られる上空の気温をもとに－10℃と0℃のラインを付し，雲内の電荷分布を推測した．事例①～④の大気電場の変化パターンを図8に示す．大気電場の変化が典型的なW型に近いものから順に事例③，①，④，②を記す．図7と図8の事例③と④のⅠ～Ⅶはそれぞれ対応する．

事例③は積乱雲の接近に伴い，Ⅰ上層雲（＋電荷）がかかり始め，地表付近では＋が増加し，Ⅱ次第に雲が厚くなり中層雲（－電荷）がかかり始め，地表付近では大気電場が負（－）の極小となり，ヴォールトの領域に入り，Ⅲ上空に雹域コアがかかり始めると，地表付近では正（＋）の極大となり，Ⅳその直後，雹域が下層に降下し始めると地表付近では負（－）の極小となり，Ⅴ雹域が地上に達すると0付近となり変動がみられた．地表面付近では－の電荷

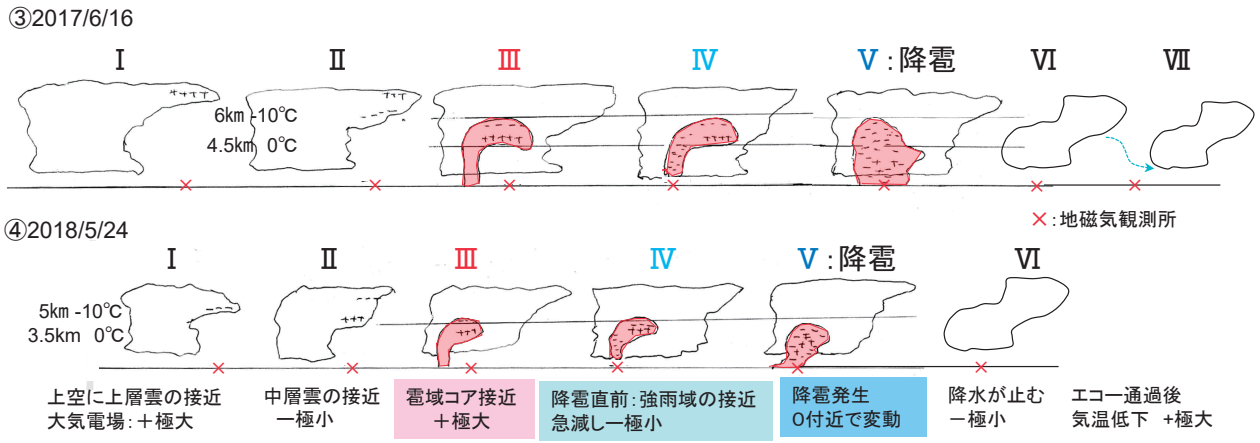


図７　雷雲の電荷構造と地上付近の大気電場.

のなかに＋の電荷も混ざり合い，土砂降りの雨と雹がアースされたと推測する．やがて，Ⅵ降雹が止み雨も上がった後，大気電場は負（－）の極小に急変し，Ⅶエコーが通過し，図５-３より地上付近に寒気が入り気温が下がる頃，大気電場は正（＋）の極大となり，やがて０付近に戻っている．

事例④はⅠ中層雲（－電荷）がかかり始め，地表付近は－から＋となり，Ⅱ中・下層雲がかかると，地表付近は正（＋）の極大となり，その後－に急変し（この頃，付近でエコーの降下あり），Ⅲヴォールトの領域に入り，上空に電域コアがかかり始めると，地表付近は正（＋）の極大となり，強雨域の接近に伴い，地表面付近の大気電場は負（－）の極小に急減し，降雹の発生とともに大気電場は０付近となる変動がみられた．Ⅵ降雹や雨が止んだ直後，大気電場は負（－）の極小となり，やがて０に戻っている．事例③のⅦのような大気電場の変化は見られず，地上付近の温度の低下はわずかで寒気移流が小さかったと推察する．

事例①ではⅣ降雹直前の負（－）の極小の変化はみられなかった．進行方向とヴォールトが事例③，④のように同じ方向ではなく斜め方向であったためと推察する．事例②はＷ型の変化は見られず，＋と－であった．雹は0.6cmと小さく，図５-２（b）より電域の拡がりも見られなかったため，ⅢやⅣがなかったと推察する．

図９のように，積乱雲内の電荷分布を＋と－のシンプルな構造とし（Rakov and Uman（2005）），ドップラーレーダーの電域コアの高度と水平距離および地表付近の大気電場の極大，極小値から，積乱雲の＋電荷と－電荷を変えて，図７の③と④の大気電場の極大，極小値となるように見積もった．

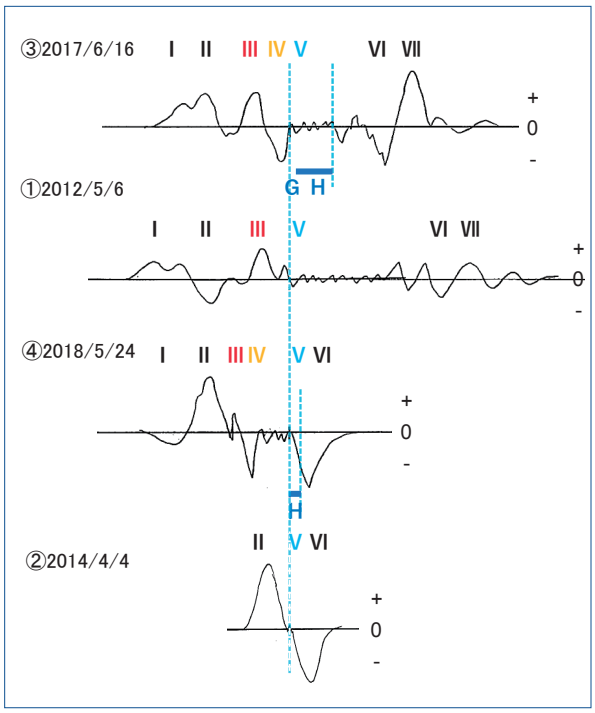


図８　降雹４事例の大気電場の変化パターンと降雹の関連．上から順にＷ型に近いものから，③2017/６/16，①2012/５/６，④2018/５/24，②2014/４/４．Ｇは霰，Ｈは降雹のあった時刻．青い点線は降雹や霰のあった時刻．Ⅰ～Ⅶは，図７の各ステージに対応．Ⅰ，Ⅱ：上層，中層雲の接近，Ⅲ：降雹コアの接近に伴う＋極大の変化，Ⅳ：降雹直前の強雨域の接近に伴う－極小の変化，Ⅴ：降雹発生，大気電場は０付近で変動，Ⅵ：降水が止み－極小，Ⅶ：エコーが通過後，寒気移流により気温が下がる，＋極大の変化．

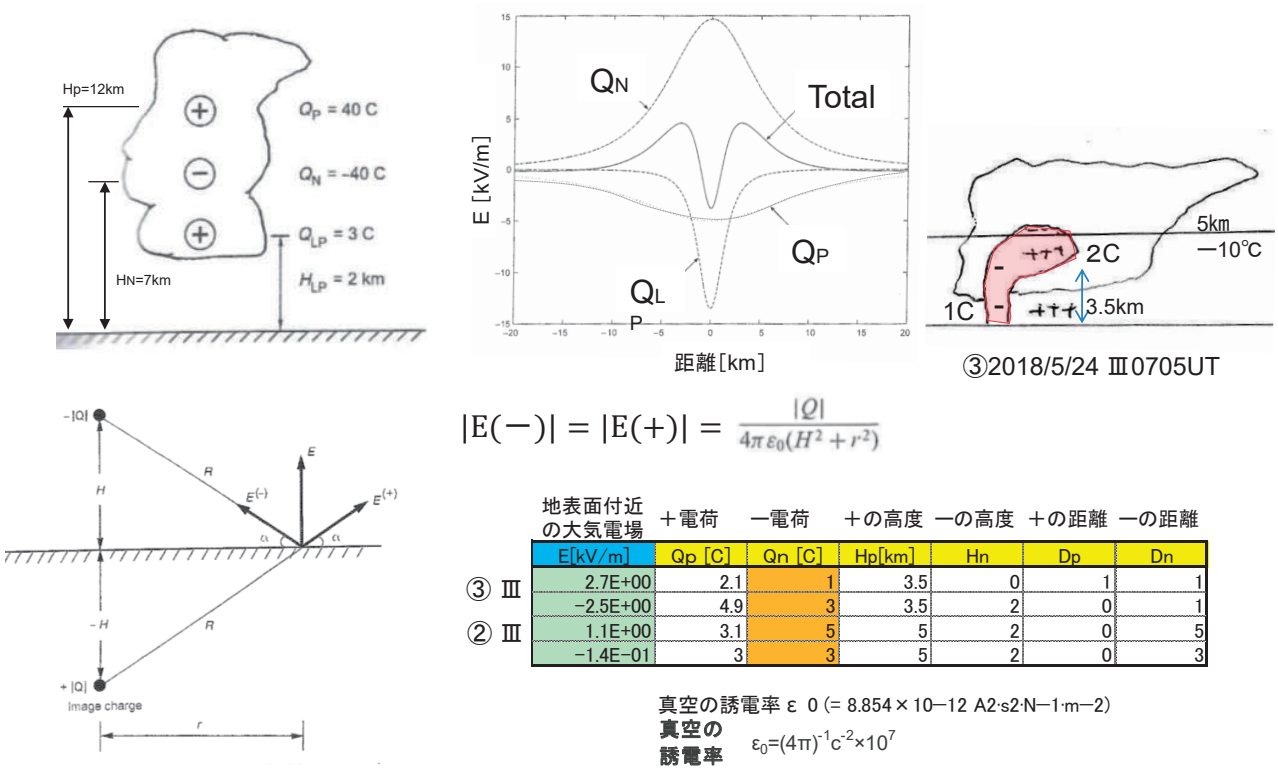
６．大気電場の変化と降水量の関係

2017～2020年の３～10月の大気電場の変化（水滴集電器とフィールドミル）と，日最大10分間降水量の関係を図11，図12に，2017年３～10月の日降水量との関係を図11に示す．日最大10分間降水量が多い

ときには，大気電場の変動も大きいが，日降水量が大きいときに大気電場の変動が大きいわけではない．雷雲が活発で霰や雹が形成され電荷分離が激しいほど，短時間強雨が大きくなり，狭い領域に集中すると推察される．水滴集電器とフィールドミルの大気電場は定性的に同じ変化をしているが，変化量は異なることがあり，定量的には違いが見られる．

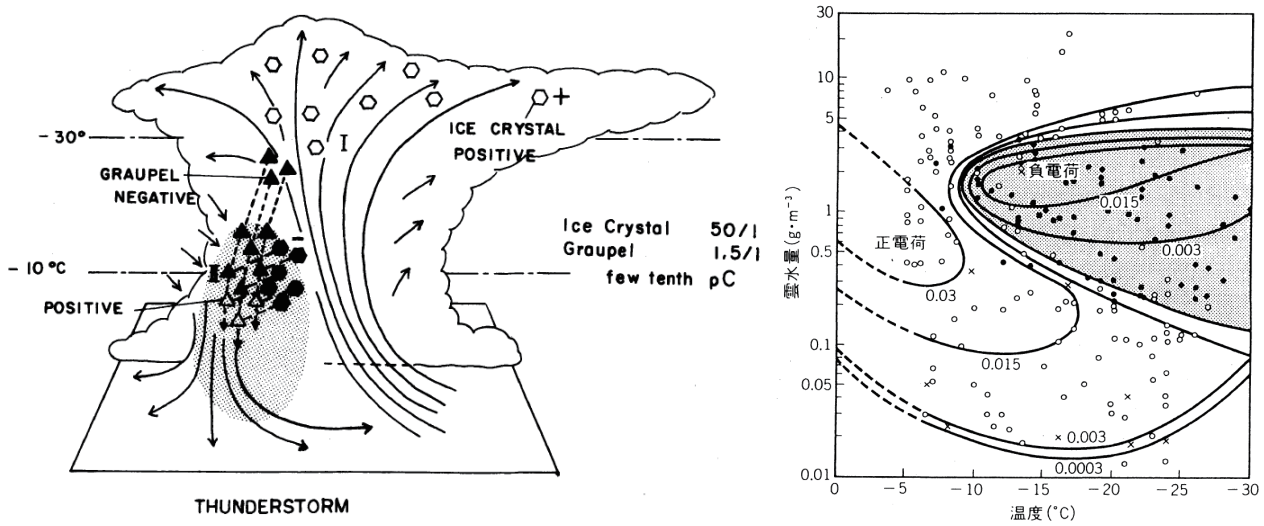
また，図12のように大気電場の変動は年や季節によって異なる．

図13に2020年５月と６月の大気電場（水滴集電器とフィールドミル）と地電流（EW 成分，NS 成分）と１時間降水量の関係を示す．大気電場の変動が顕著な時には，１時間降水量が大きいことが多いが，降水がわずか0.5mm や降水無の場合もある．



	地表面付近の大気電場	＋電荷	一電荷	＋の高度	一の高度	＋の距離	一の距離
	E[kV/m]	Qp [C]	Qn [C]	Hp[km]	Hn	Dp	Dn
③ Ⅲ	2.7E+00	2.1	1	3.5	0	1	1
	−2.5E+00	4.9	3	3.5	2	0	1
② Ⅲ	1.1E+00	3.1	5	5	2	0	5
	−1.4E−01	3	3	5	2	0	3

図９　積乱雲内の電荷分布と大気電場（Rakov and Uman (2005)）．



着氷電荷発生機構による電荷３極構造形成メカニズム．６角形が氷晶，３角形が霰，白抜きは正電荷，塗りつぶしは負電荷．

着氷実験による霰電荷の符号と大きさ．白丸：正，黒丸：負，氷晶１個衝突当りの電荷量を pC で示す，x は無帯電．

図10　雷雲の３極構造（左）と霰の電荷分離（右）（高橋 (2004)）．

７．大気電場と降水，地電流，レーダーの関係

図13から１時間降水量が大きくなる時は，大気電場の変化が顕著であった．一方，大気電場の変化が大きくても降水の無い場合もある．そこで，2020年４～10月について，大気電場の変化が500V/m 以上の67例の大気電場の変化と積乱雲の発達および降水の関係を調べた．大気電場は1m（分値：オリジナルデータ）を使用した（１分確定値はおおよそオリジナルデータに平面較正1.3を掛けた値）．表２に調査項目を示す．大気電場の変化パターン，地電流の雷対応による欠測やノイズおよび gap，降水強度（１分），降水量，積乱雲の構造として，レーダーの－10 ℃面40dBz 以上，CAPPI（Constant Altitude PPI：等高度面データ）23dBz 以上の最も高い高度，LIDEN，付近の雨量，および最大降水強度となるときの大気電場の型について調べた．

７．１　最大降水強度発生時の大気電場の変化

表２に示された事例について，最大降水強度が発生した時の大気電場の変化の型を図14に示す．大気電場が－で極小となる事例が最も多く約40％で，次に０付近で変動の事例が25％，－から＋，＋から－に変化する事例が約10％，正（＋）の極大は１例のみであった．降水無や降水量0.5mm も合わせて24％であった．典型的な２つの例を図15に示す．図15右のように，大気電場の変化が負（－）の極小となる時に短時間強雨が発生した事例は，降雨が継続中に発達したエコーがかかってきた場合であり，次第に降水強度が大きくなる山型の変化であった．これは,「暖かい雨」型，ウォームレイン（高橋（2009））に対応する．図15左のように，大気電場の変化が０付近に急変する時に短時間強雨が発生した事例は，突然強い雨が降り出すことが多く，孤立した雷雨が到来する場合であった．これは，霰を含む「冷たい雨」型（高橋（2004））に対応する．大気電場は降水の降り出す数10分前から大きな変動が見られた．後者のような場合は，雨が降っていないところに，突然，短時間強雨が発生するため，屋外で作業中の場合など，特に注意が必要である．

７．２　雹域コア発生と雷電の事例

表３にレーダーの－10 ℃面40dBz 以上（雹域コアと想定）が水平距離5km 以内にあった場合７例，水平距離7-15km にあった場合６例を示す．前者は１例を除き，近くで雷鳴があり，地電流にノイズや gap がみられた．降水無の場合は，大気電場は＋－または－変動など大気電場の変動はシンプルであった．

表４に地電流にノイズや gap が見られた17例を示す．１例の遠雷を除き，近くで雷鳴が発生し，大気電場の大きさは2000V/m 以上であった．

７．３　降水現象がほとんど見られなかった事例

表５に降水無と降水量0.5mm の事例を示す．降

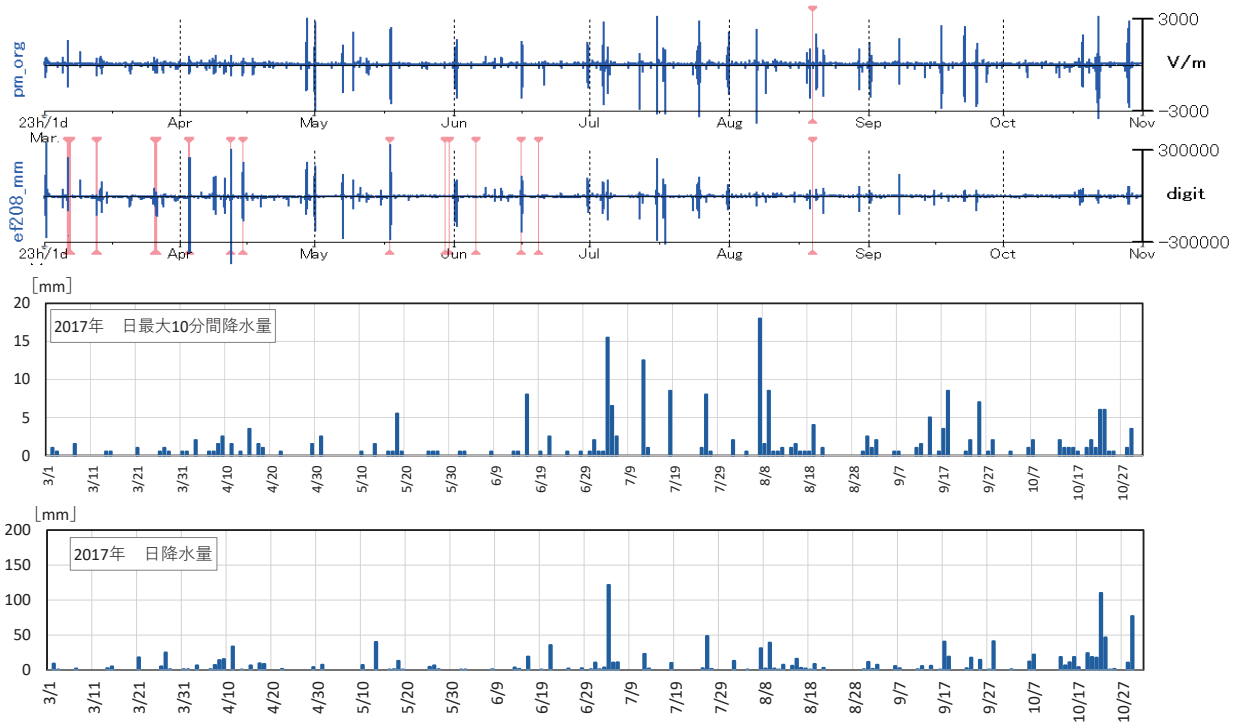


図11　大気電場（水滴集電器とフィールドミル）日最大10分間降水量及び日降水量（JST）．2017年３月～10月 赤線は欠測．

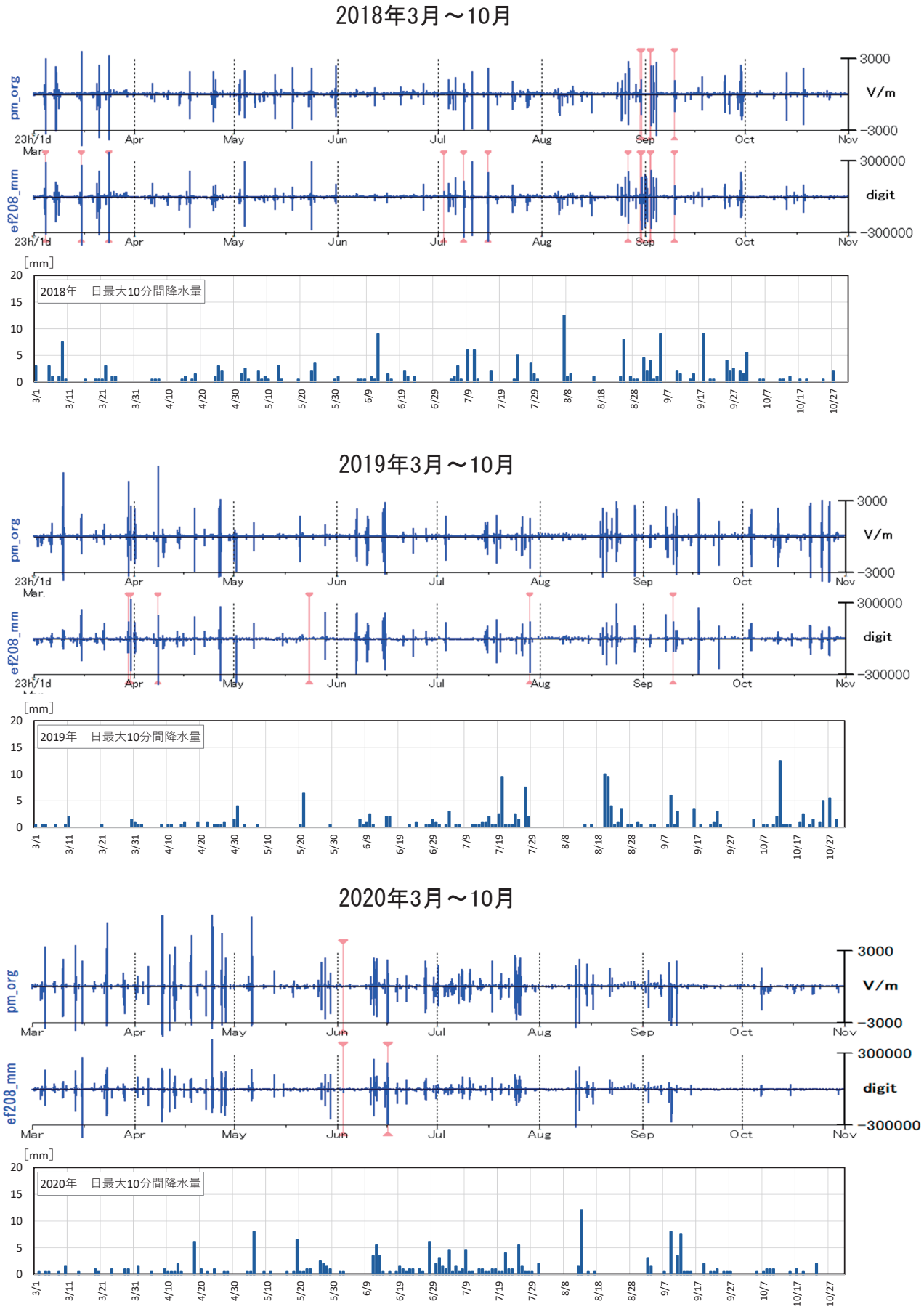


図12　大気電場（水滴集電器とフィールドミル）と日最大10分間降水量（JST）．2018年～2020年の３～10月．赤線は欠測．

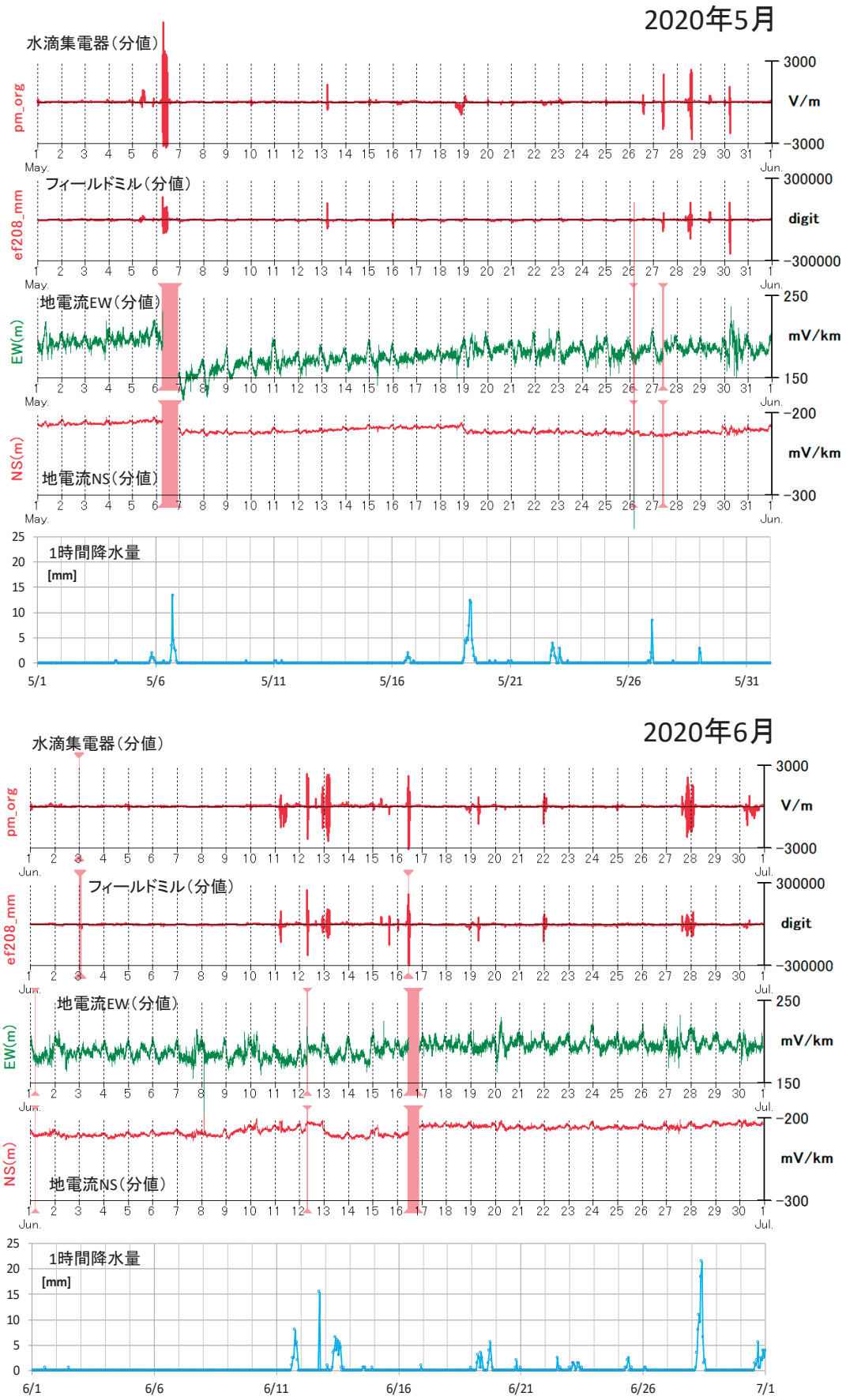


図13 大気電場の変化と１時間降水量．2020年５月，６月，水滴集電器（分値：オリジナルデータ），フィールドミル（分値：オリジナルデータ，参考資料），地電流（分値：EW・NS），１時間降水量（柿岡）．地電流観測の欠測は，近くに雷鳴があり落雷のおそれがあるときに機器の保護のため停止．

表２　大気電場の変化が顕著な事例 2020年４～10月 500V/m 以上（分値：オリジナルデータ）67例.

日時		大気電場				降水		レーダー		雷関連			降水量			
date [JST]	調査事例[UT]	大気電場の大きさ H:ヒゲ状有	大気電場の変化	降り始め直前の電場変化 R無：降水無	最大降水時の大気電場	強雨の型	部外雨量(5km)など	一10℃面40dBz以上(雲域コア)など	23dBz以上の最大高度 cappi	LIDEN ▲雲間,×対地放電	地電流epr N:ノイズ, 欠:欠測	雷対応	日合計 [JST]	1時間最大値 [mm]	時分 [JST]	10分間最大値 [mm]
4/1	01d5-14h	-1000	ー	同時	極小付近	地雨		層状	5-6km			なし	33.5	5.5	21:50	1.5
4/2	01d23-24h	+1000,-500	ー+	R無	R無	R無			水色4km			なし	0	0.5	0:22	0
4/5	05d3-7h	±2000	ー↓+ー+ー+ー+	ー10分	極小	少雨			2km以下			なし	2.5	2	13:22	0.5
4/9	09d7-12h,12-16h	±5000 H	ー+↓ー±±脈動ー	ー30分	極小	地雨			4km	0810▲	0805N,0810-25欠	遠雷 0805-40	12	3	19:05	1
4/11	11d13-14h	±3000 H	ー+→凸-極小↓変動+	ー20分	極小	0.5			3km			なし	0.5	0.5	23:41	0.5
4/12	11d15-16h	+500,-1000	ー小+	同時	0.5	0.5	1510八郷柿岡0.5		3km			なし	4	1	6:37	0.5
4/13	13d1-6h, 6-8h	±3000 H	→+脈動++→+、→+-↓+-	同時、ー10分	極小,極小	地雨、凸雨			5km通過, 4km0650	0410▲S2km, 0220▲N10km,	0410N,0410-20欠	遠雷 0400-20	35	7.5	14:13	2
4/18	18d2-8h	±3000 H	ー±-±脈動	同時	極小付近	地雨			5km0210、4km2120-	0540▲E5km	0600N,0600-0740欠	遠雷 0602	87	19	12:33	6
4/20	19d20-21h,23h-20d1h	-1000	ー0ー、ー0ー	同時	極小付近	地雨			5km付近2010			なし	10.5	3.5	9:21	1
4/23	22d15-17h	+1000,-2000	+ー+ー+	R無	R無	R無			5km15h,3km16h,3km通過1030,付近で少し降下模様			なし	0	0	24:00	0
4/24	24d7-14h	+6000,-4000 H	+-+-++-+-++-+-++	+15分	極小付近	地雨			4km0900_10-40上_50減		0730,0845,0852,0904N,0903-1130欠	近雷 0900-20	7.5	4.5	19:35	1
4/27	27d5-12h	±3000 H	±±脈動、ー+-+ー±脈動	R無、ー20分	極小付近	地雨			4kmかかる0820, 5km真上1000_10過ぎる			なし	2.5	1.5	19:35	0.5
4/28	28d6-10h,12-14h	+2000,-3000 H	ー0ー↓+、ー+ー↓+	R無、+25分(ー5分)	極小付近	0.5			水色5km,1230小エコー通過,3km	0640▲S3km		なし	1	0.5	24:00	0.5
5/5	05d8-13h	+1000	+0+0+	同時	地雨	地雨			3-4km			なし	6	2	20:01	0.5
5/6	06d6-13h	±3000 H	+ー0付近+-脈動	同時	0付近変動	地雨の始め 強雨山型		0700-10 かかり減少	11km	0640▲10km NNW	0650N gap,0752N大,0655-欠	近雷 0655 -1000	28.5	15	16:54	8
5/13	13d5-7h	+1000,-500	+ー	R無	R無	R無		0610S10km,top10km	9km(S5km)	0610▲W2kmとE,0600▲13kmSW発達		遠雷 0500-0630	0	0	24:00	0
5/19	18d15h-19d3h	+500,-1000	ー0ー	同時	極小付近,強雨あり	地雨			6km			なし	61.5	19	7:20	6.5
5/23	23d0-7h	+200	小+0-	同時	0付近	0.5			水色3km			なし	5	3	2:19	1
5/26	26d13-16h	+500,-1000	小-+-	+同時(降水強度増加)	極小付近				水色8km,4km			なし	11.5	8.5	24:00	2.5
5/27	27d9-12h	±2000	-ー+-+	極大から減少時	0.5 +	0.5	1050瓦会1.0, 1110八郷柿岡0.5	1010小NE5km, 1020E2km通過	8km1100,5-6km1040		1006N,1008-1156欠	近雷 1000	1.5	9.5	0:13	2
5/28	28d12-16h	+2500,-3000	小+-、小+-+↓+-+-	小+ー15分	極大付近,14h過ぎ,15h過ぎ+雨	凸雨			1210付近減5km,1410発達雨,1420_5km真上,5km1510,1540過	1330▲SW5km	1336N	なし	3	3	24:00	1.5
5/30	30d6-7h	+1000,-2000	+ー	R無	R無	R無		0600-10SE5km小,付近で急発達,top10km,0630衰退	1-9km	0610▲7kmSE発達		遠雷 0600	0	0	24:00	0
6/11	11d5-12h	+1000,-1500	-+-+脈動,-0-	同時	極小付近	山型			1-7km			なし	26.5	11	18:28	3.5
6/12	12d7-10h	±2500	W型+-0-0+-+-	+15分0付近	0付近	凸山型		0810-20SW5km小エコー,付近で急発達,top13km	12km0810,1-9km	0810▲付近1-10km,0910▲W3km	0755gap,0821-0906欠	近雷 0810-50	15.5	15.5	18:02	5.5
6/13	12d22h-13d7h	±2500	-+-脈動,-+-+-+-+-変動	同時	0付近、極小付近	凸雨、地雨		付近で発達	6km22h,7km05h			なし	39.5	7	14:20	3.5
6/16	16d10-13h	+2500,-3500 H	V型+-0付近↓	+60分ー極小40分変動有0付近	0付近	0.5×2		1210W15km・N15km	7km1130,6km1140かかり始める	多数▲	1120gap,1136-欠	近雷 1130	1	1	22:19	0.5
6/19	19d8-10h	+500,-1000	ー+ー	ーから+同時	ーから+0付近	地雨、山型			6km0810			なし	27.5	6	18:02	1.5
6/22	22d0-4h	+1000,-1500	-0-+,小+↓-、小+	+同時	0.5×3,R無,小+,R無	0.5×3			8km			なし	4	2.5	12:08	1
6/28	27d19h-28d4h	+2000,-2500	±脈動ー+ー+ー+-+		脈動+,極小付近	地雨+山型			7km2120,6km2310,28d0030			なし	82.5	22.5	9:48	6
6/30	30d7-16h	+1000,-1500	ー、ー		極小付近	地雨+山型			7km0750・15h			なし	26	5.5	17:14	2
7/1	01d14-17h	±2000	W型風±脈動ー+-+-+-	同時	極小付近	山型			7km1450			なし	20	10.5	0:26	3
7/3	03d14-24h	-1000	ーー	同時	極小付近	山型			6km1820-30			なし	6	3	23:54	1
7/4	04d14-15h	-1000	小ー0ー	ー5分	0付近	凸雨			7km1430-40通過減少			なし	40.5	9	4:14	4.5
7/5	05d16h-06d2h	+500,-1000	小-+-、ー+-+、ー	ー10分	小-から+、極小付近×2	凸雨、地雨+山型			7km1620・2040			なし	1	5	0:31	0.5
7/6	06d14-16h	-500	ー	同時	極小付近	並雨+山型			6km1440-50			なし	22.5	4	6:33	1.5
7/7	07d19-21h	+1000,-1500	小-、-+↓-	ー10分	ーから0付近+	0.5、凸雨			5-7km2020真上通過			なし	5	3	0:12	0.5
7/8	08d20h-09d3h	+1500,-1000	小-、ー+-、+-、-	同時、+から-、-から+	極小付近×2	並雨+山型、0.5×2			6km2220,7km2240発達,付近強いエコー			なし	2.5	2	6:13	1
7/9	09d11-13h	+1500,-1000	ーー	同時	極小付近	山型			7-8km1200-10発達真上			なし	23	8	21:53	4.5
7/11	11d5-6h,10-12h	±1500	W型風ー+↓ー+、+ー	ー20分+、R無	0.5,+,R無	0.5、R無			5-7km0530,5-6km1050-1100・R無			なし	0.5	0.5	15:32	0.5
7/12	12d4-5h	+500	小+	R無	R無	R無			5-6km0430SW10km雨有・R無			なし	0	0	24:00	0
7/14	14d9-12h	+1000	小+-+	R無	R無	R無	1020八郷柿岡1.0小エコー,+付近エコー		5-6km1020小			なし	12.5	3	10:05	1
7/17	17d12-15h	-500	小-↓0-、小-	同時	極小付近	山型+地雨			5-6km1220,7km付近S5km			なし	7.5	3	22:25	1
7/18	17d22-24h,08d0-2h	±2000	+-+-+-脈動、-0-0-+↓-+-	小+10分	極小0.5極大×3	0.5×5、0.5×2			5-6km			なし	5	2	8:46	1
7/21	20d14-19h	±1000	小+0+↓-+-0-、+↓-+-	+10分	+0付近極小,+極小	凸雨	1710瓦会1.0,1720八郷柿岡0.5,1730柿岡0.5		9km1650-1820,7-8km1730			なし	9.5	7	0:59	4
7/23	23d3-4h	+500,-1000	ー+ー↓	ー20分	0.5×2	0.5×2			4km0230,5-6km0330			なし	6	2	10:55	1
7/24	24d18-21h	+3000,-2000	-0-+-+-0-0-+脈動	ー10分	+から-強雨×2	山型	1950瓦会8.0	1910 20kmS, 192015kmSW	8km近く1950,vildあり			なし	0	0	24:00	0
7/25	25d1-3h,4-7h,9-11h,19-22h	+2500,-3000	W型ー↓+ー+-+-+変動、+-↓+-↓+ー変動、-+-、ー+-+-	ー10分、+-25分	変動時、ーから+0付近	0.5×3,凸雨,同時0.5,0.5×6	0540八郷柿岡4.5		5km0130,5kmvild 0200,8km0520真上,0530発達6-8km,0540vild,+7km,5-7km0940,5-6km1000,20h前急にエコー	0510▲SW10km		遠雷 0510	25	9	4:56	5.5
7/26	26d0-2h,4-9h	+2500,-3000	ー0ー↓+-+-,-±変動		急変時0.5×2	0.5×3,山型,0.5,0.5×2			6-7km			なし	9.5	3.5	22:57	1.5
7/31	30d21-31d1h	-500,-500	小-0↓-,小-0-	ー8分,同時	-から+,極小付近×2	凸雨、凸雨、凸雨			5-7km			なし	8.5	5.5	9:29	2
8/12	12d3-8h,8-12h	+2000,-3000 H	ー+ー変動有0↓-0-+、+ー+-+	+30分-20分	-から+0付近	凸雨、0.5		0400WSW10km減少	5-8km09h	0300▲,0320	0358N,0358-0521欠,0915N	近雷 0357-0527	2.5	2	14:23	1.5
8/13	13d-12h	+2500,-3000 H	W型+-0↓付近変動-+	+10分-20分	-から+0付近	凸雨	強雨120mm/h	0940W7-12km減少	5-10km,9kmまで0920		0902gap,N0908-1004欠	近雷 0906-1102	22.5	22.5	19:38	12
8/15	15d12-15h	+2000,-1500	W型ー変動0↓+-+-	-30分+	-から0+極大付近	0.5	1330R0.5	28dBz以上12km,1320降下 1-2km増,1230-40W20km	12kmから急減1250-1320		1228N,1250gap-1307N	遠雷 0830-0930	0.5	0.5	23:21	0.5
8/17	17d8-12h	+1000,-2000	W型ー変動0↓+-+-		+から-極小付近	0.5	0920瓦会12,30同11,40同1.0	0910付近,0920NE5km	12km0910		0855N,0910-N多,0915-欠	近雷 0900-	0.5	0.5	21:06	0.5
8/22	22d9-13h	+1500,-1000	+-	R無	R無	R無			10htop11-12km,6-8km1050,2km以下エコー無			なし	0	0	24:00	0
8/23	23d3-5h	+1000,-500	-+	R無	R無	R無	0330W10km12雨強し		5-10km0300-0410N発達	0240▲N10km		なし	0	0	24:00	0
9/2	02d5-6h	-500	-	小ー15分	極小付近	凸雨			5-8km付近		0522ノイズ	なし	4.5	4	15:18	3
9/3	03d3-5h	+1000,-2000	-0付近↓-+	ー10分	-から0付近極大 強雨後+	凸雨			1-9km0320-30付近通過,5-6km S5km0410		0255N,0302Ngap,0308-0417欠	近雷 0310-0400	2	2	13:11	1.5
9/7	06d22-23h,07d0-1h	±1000	小+-↓、小+-		0.5,R無	0.5、R無			7km2230-2250付近E全通過			なし	0.5	0.5	8:48	0.5
9/9	09d8-10h	+2000,-3000	小+-↓変動大+	小+30分小-15分	-から0付近 極大 強雨後-+	凸雨	180mm/h,0840-50雨量通過10	0840E通過	1-12km0830-40S-E通過,1-8km小0810-20S付近通過	0750✕付近	0820N gap,0827-0918欠	近雷 0826-0935	8.5	8	18:34	8
9/10	10d3-6h	-3000 H	ー変動　ー変動	R無	R無	R無	10.0mm0840-50通過	通過	1-9km0330W 0430W通過,5km以内付近小急発達,0530弱8kmW側通過	0550✕NNE8km	0310-N,0340-N多,0348-0615欠	近雷 0345-0619	0	0	24:00	0
9/11	11d13-17h	+2500,-3500 H	ー、-0-↓変動大+-	同時,ー15分	極小付近,極小+0付近極小,強雨後-+	凸雨×2			1-8km1400真上			なし	6.5	4	23:52	3.5
9/12	11d19-21h	-500	小-,ー0-↓変動+-	同時	極小付近	山型,凸雨						なし	17	11	0:58	7.5
10/7	07d5-8h	±2000	+-↓、-+↓		0.5×2	0.5×2			3-8km0530,1-4km05405km以上通過			なし	7	1.5	20:47	0.5
10/8	08d0-4h,8-14h	-500	ー　ー	同時	極小付近	山型			5km0020、5-6km0910			なし	34	4	22:14	1
10/9	09d0-12h	-500	小-		地雨	地雨						なし	32	3.5	21:24	1
10/17	17d2-9h	-500	-		極小付近	地雨						なし	26	4	16:19	1
10/23	22d18-19h,23d2-3h	-500	小-、小-	同時	極小付近	0.5、山型						なし	14	6	11:53	2

水無の場合は，大気電場の変動が＋－，－＋，－変動など，67例の中では大気電場の変動が小さかったが，0.5mm の場合は，大気電場の変動の急変が見られるものもあった．図17にこのような事例を示す．降水が観測されなくても，大気電場が短時間に急変しており，レーダーエコーの変化から，付近で降雨があったと推測される．

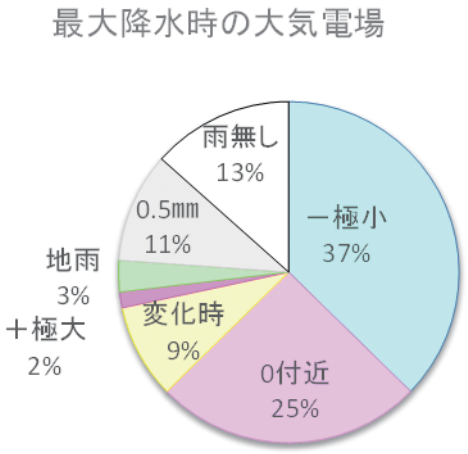


図14　最大降水時の大気電場の変化型．表２の67事例から．

７．４　最大降水発生直前の大気電場の変化

地磁気観測所で，近年降雹が発生したことが確認できた事例は，事例①～④の４つであった．それらに共通する特徴として，降雹直前に，大気電場が＋から－に急減し，降雹時には０付近で変動することがわかった．また，2017～2021年の４月～10月において，降雹が確認できたのは，事例③と④の２例のみである．そこで，2017～2019年の４月～10月について，降雹がある場合と，そうでない場合にどのような違いがあるか調べた．表６～８に示す．

図８のような大気電場の変化がＷ型に似た例は，毎年数例見られた．このような時は，－10℃面40dBz 以上が発生したり，Vild が0.1g/m^{3}以上の

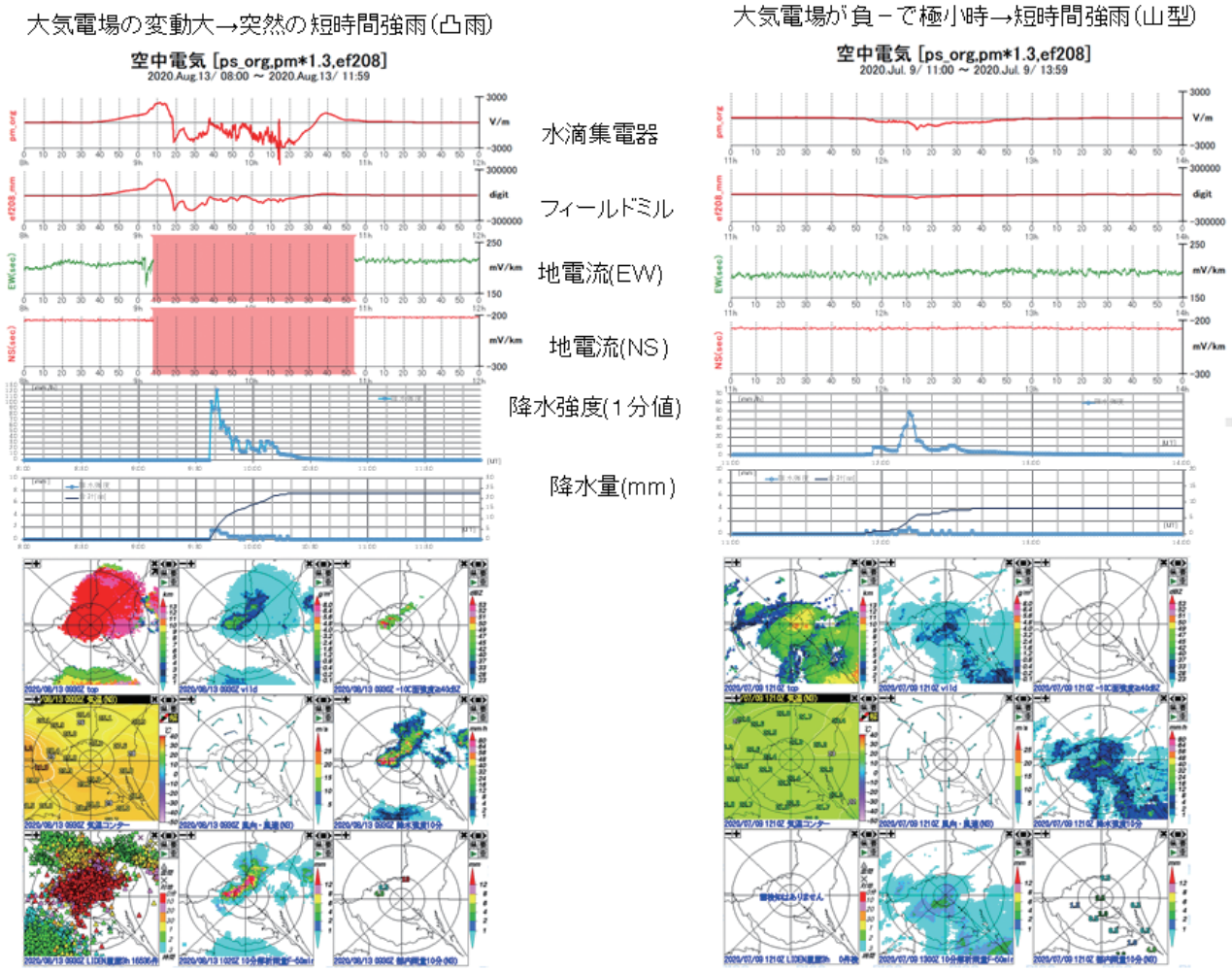


図15　短時間強雨の発生した時の主な２つの大気電場の変動．左は図14の「０付近」，右は「一極小」の例．上段：図説は図13と同じ，但し，地電流観測は秒値．下段：図説は図５と同じ，但し，レーダーエコー，Vild（鉛直積算降水量密度）と解析雨量，LIDEN（▲雲間放電，×対地放電），雨量はアメダスのみ．

領域がかかったり，CAPPI の高さ5km 以上で23dBz 以上が発生するなど，積乱雲が発達し，エコーは発達して０℃以下になり，霰や雹などの固形降水が形成され，電荷分離が起こっていると推察される．数 km 程度の小さいエコーでも，真上を通過する時には，大気電場は大きな変化が見られる．また，図１②～④のような経路をエコーがたどって，発達しながら地磁気観測所の真上に到来する場合も年に数例みられた．しかしながら，セルが分裂したり，近くにいくつかのセルが盛衰したり，事例③や④のようにエコーがまとまった一つのシステムとなっている事例や，図８のⅢ，Ⅳ，Ⅴが顕著にみられるような事例は見られなかった．事例①，③，④のような2cm 以上の雹が形成されるときには，システムがひとつにまとまって，雹域コアが形成され，降水が局所的に短時間に集中している．上層から下層にお

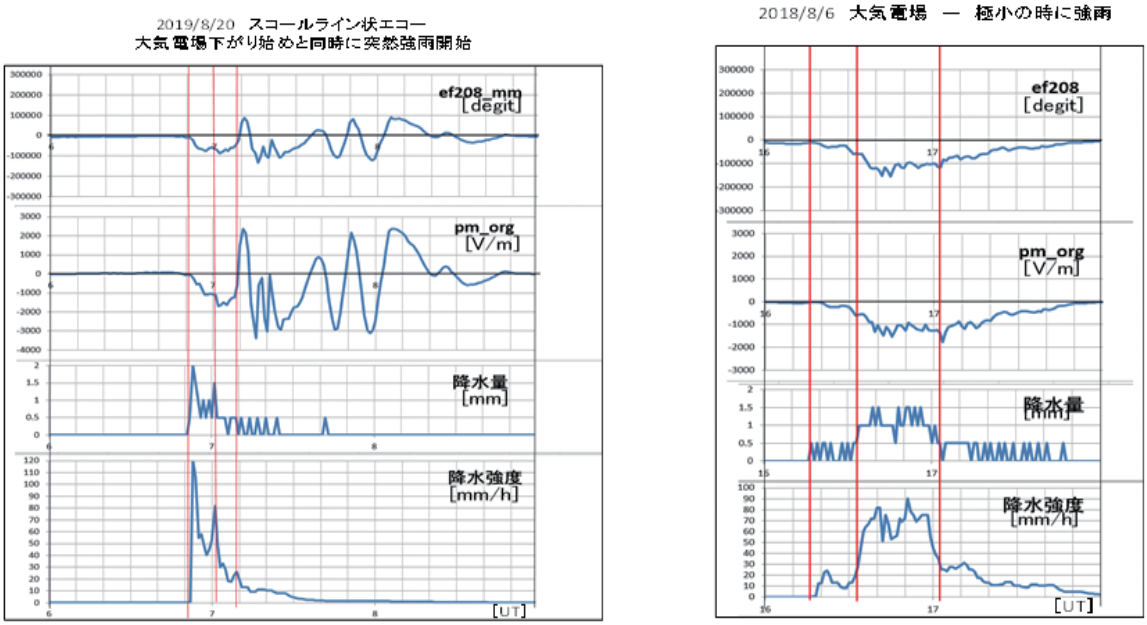


図16　大気電場（水滴集電器とフィールドミル）と降水量（１分）及び降水強度（１分）．左：2019年８月20日スコールライン状エコー．大気電場の下がり始めと同時に突然に短時間強雨開始（凸型と記す）．右：2018年８月６日．大気電場は「ー」で極小のときに最大降水強度（ー極小と記す）．

表３　大気電場の変化が顕著な事例の抽出．表２の事例のうちー10℃面40dBz 以上の領域が5km 以内にあった場合と，7-15km 以内にあった場合．

-10℃面40dBz以上（雹域コア）　5km以内

日時		大気電場				降水		レーダー		雷関連			降水量			
date [JST]	調査事例[UT]	大気電場の大きさ H:ヒゲ状有	大気電場の変化	降り始め直前の電場変化 R無：降水無	最大降水時の大気電場	強雨の型	部外雨量(5km)など	ー10℃面40dBz以上(雹域コア)など	23dBz以上の最大高度 cappi	LIDEN ▲雲間,?対地放電	地電流epr N:ノイズ, 欠:欠測	雷対応	日合計 [JST]	1時間最大値 [mm]	時分 [JST]	10分間最大値 [mm]
5/6	06d6-13h	±3000 H	+ー0付近←脈動	同時	0付近変動	地雨の始め 強雨山型		0700-10 かかり減少	11km	0640▲10km NNW	0650N gap,0752N 大,0655-欠	近雷 0655 -1000	28.5	15	16:54	8
5/27	27d9-12h	±2000	ーー+-+	極大から減少時	0.5 +	0.5	1050瓦会1.0, 1110八郷柿岡0.5	1010小NE5km, 1020E2km通過	8km1100,5-6km1040		1006N,1008-1156欠	近雷 1000	1.5	9.5	0:13	2
5/30	30d6-7h	+1000,-2000	+ー	R無	R無	R無		0600-10SE5km小,付近で急発達,top10km,0630衰退	1-9km	0610▲7kmSE発達		遠雷 0600	0	0	24:00	0
6/12	12d7-10h	±2500	W型+-0-0+-+-	+15分0付近	0付近	凸山型		0810-20SW5km小エコー,付近で急発達,top13km	12km0810,1-9km	0810▲付近1-10km,0910▲W3km	0755gap,0821-0906欠	近雷 0810-50	15.5	15.5	18:02	5.5
8/17	17d8-12h	+1000,-2000	W型ー変動0↓+-+-		+から-極小付近	0.5	0920瓦会12.30 同11,40同1.0	0910付近,0920NE5km	12km0910		0855N,0910-N多,0915-欠	近雷 0900-	0.5	0.5	21:06	0.5
9/9	09d8-10h	+2000,-3000	小+-↓変動大+	小+30分小-15分	-から0付近 極大 強雨後ー+	凸雨	180mm/h,0840-50雨量通過10	0840E通過	1-12km0830-40S-E通過,1-9km小0810-20S付近通過	0750? 付近	0820N gap,0827-0918欠	近雷 0826-0935	8.5	8	18:34	8
9/10	10d3-6h	-3000 H	ー変動 ー変動	R無	R無	R無	10.0mm0840-50通過	通過	1-9km0330W 0430W通過,5km以内付近小急発達,0530弱8kmW側通過	0550✕NNE8km	0310-N,0340-N多,0348-0615欠	近雷 0345-0619	0	0	24:00	0
5/13	13d5-7h	+1000,-500	+ー	R無	R無	R無		0610S10km,top10km	9km(S5km)	0610▲W2kmとE,0600▲13kmSW発達		遠雷 0500-0630	0	0	24:00	0
6/16	16d10-13h	+2500,-3500 H	V型+-0付近↓	+60分ー極小40分変動有0付近	0付近	0.5×2		1210W15km・N15km	7km1130,6km1140かかり始める	多数▲	1120gap,1136-欠	近雷 1130	1	1	22:19	0.5
7/24	24d18-21h	+3000,-2000	-0-+-+-0-0-+脈動	ー10分	+から-強雨×2	山型	1950瓦会8.0	1910 20kmS, 192015kmSW	8km近く1950,vildあり			なし	0	0	24:00	0
8/12	12d3-8h,8-12h	+2000,-3000 H	ーー+ー変動有0↓-0-+、+ー+-+	+30分-20分	-から+0付近	凸雨、0.5		0400WSW10km減少	5-8km09h	0300▲,0320	0358N,0358-0521欠,0915N	近雷 0357-0527	2.5	2	14:23	1.5
8/13	13d-12h	+2500,-3000 H	W型+-0↓付近変動-+	+10分-20分	-から+0付近	凸雨	強雨120mm/h	0940W7-12km減少	5-10km,9kmまで0920		0902gap,N,0908-1004欠	近雷 0906-1102	22.5	22.5	19:38	12
8/15	15d12-15h	+2000,-1500	W型ー変動0↓+-+-	-30分+	-から0+極大付近	0.5	1330R0.5	28dBz以上12km,1320降下 1-2km増,1230-40W20km	12kmから急減 1250-1320		1228N,1250gap-1307N	遠雷 0830-0930	0.5	0.5	23:21	0.5

-10℃面40dBz以上（雹域コア）　7～15km以内

ける気象状況と，雷雲のシステムが共に影響し合い，一つのシステムとなった時に形成されると推察される．

一方，小さなエコーが発達し，図８②のような大気電場の変化は時折みられることから，霰や0.6cm程度の雹などは，発生しているのかもしれない．

表４　大気電場の変化が顕著な事例の抽出．表２の事例のうち雷電（地電流にノイズやgap）があった場合．

雷電

日時		大気電場				降水		レーダー		雷関連			降水量			
date [JST]	調査事例[UT]	大気電場の大きさ H:ヒゲ状有	大気電場の変化	降り始め直前の電場変化 R無：降水無	最大降水時の大気電場	強雨の型	部外雨量(5km)など	−10℃面40dBz以上(電域コア)など	23dBz以上の最大高度 cappi	LIDEN ▲雲間,?対地放電	地電流epr N:ノイズ,欠:欠測	雷対応	日合計[JST]	1時間最大値[mm]	時分[JST]	10分間最大値[mm]
4/24	24d7−14h	+6000,−4000 H	+−+−++−−++−+−++	+15分	極小付近	地雨			4km0900_10−40上_50減		0730,0845,0852,0904N,0903−1130欠	近雷0900−20	7.5	4.5	19:35	1
5/6	06d6−13h	±3000 H	+−0付近+−脈動	同時	0付近変動	地雨の始め 強雨山型		0700−10 かから減少	11km	0640▲10km NNW	0650N gap,0752N 大,0655−欠	近雷0655−1000	28.5	15	16:54	8
5/27	27d9−12h	±2000	−−+−+	極大から減少時	0.5 +	0.5	1050瓦会1.0, 1110八郷柿岡0.5	1010小NE5km, 1020E2km通過	8km1100,5−6km1040		1006N,1008−1156欠	近雷1000	1.5	9.5	0:13	2
5/28	28d12−16h	+2500,−3000	小+−、小+−+↓+−+−	小+−15分	極大付近,14h過ぎ,15h過ぎ+雨	凸雨			1210付近減5km,1410発達雨,1420_5km真上_5km1510,1540過	1330▲SW5km	1336N	なし	3	3	24:00	1.5
6/12	12d7−10h	±2500	W型+−0−0+−+−	+15分0付近	0付近	凸山型		0810−20SW5km小エコー,付近で急発達,top13km	12km0810,1−9km	0810▲付近1−10km,0910▲W3km	0755gap,0821−0906欠	近雷0810−50	15.5	15.5	18:02	5.5
6/16	16d10−13h	+2500,−3500 H	V型+−0付近↓	+60分−極小40分変動有0付近	0付近	0.5×2		1210W15km・N15km	7km1130,6km1140かかり始める	多数▲	1120gap,1136−欠	近雷1130	1	1	22:19	0.5
8/12	12d3−8h,8−12h	+2000,−3000 H	−+−変動有0↓−0−+、+−+−+	+30分−20分	−から+0付近	凸雨、0.5		0400WSW10km減少	5−8km09h	0300▲,0320	0358N,0358−0521欠,0915N	近雷0357−0527	2.5	2	14:23	1.5
8/13	13d−12h	+2500,−3000 H	W型+−0↓付近変動−+	+10分−20分	−から+0付近	凸雨	強雨120mm/h	0940W7−12km減少	5−10km,9kmまで0920		0902gap,N,0908−1004欠	近雷0906−1102	22.5	22.5	19:38	12
8/15	15d12−15h	+2000,−1500	W型−変動0↓+−+−	−30分+	−から0+極大付近	0.5	1330R0.5	28dBz以上12km,1320降下 1−2km増,1230−40W20km	12kmから急減 1250−1320		1228N,1250gap−1307N	遠雷0830−0930	0.5	0.5	23:21	0.5
8/17	17d8−12h	+1000,−2000	W型−変動0↓+−+−		+から−極小付近	0.5	0920瓦会12,30同11,40同1.0	0910付近,0920NE5km	12km0910		0855N,0910−N多,0915−欠	近雷0900−	0.5	0.5	21:06	0.5
9/2	02d5−6h	−500	−	小−15分	極小付近	凸雨			5−8km付近		0522ノイズ	なし	4.5	4	15:18	3
9/3	03d3−5h	+1000,−2000	−0付近↓−+	−10分	−から0付近極大 強雨後+	凸雨			1−9km0320−30付近通過,5−6km S5km0410		0255N,0302N gap,0308−0417欠	近雷0310−0400	2	2	13:11	1.5
9/9	09d8−10h	+2000,−3000	小+−↓変動大+	小+30分小−15分	−から0付近 極大 強雨後−+	凸雨	180mm/h,0840−50雨量通過10	0840E通過	1−12km0830−40S−E通過,1−8km小0810−20S付近通過	0750? 付近	0820N gap,0827−0918欠	近雷0826−0935	8.5	8	18:34	8
9/10	10d3−6h	−3000 H	−変動 −変動	R無	R無	R無	10.0mm0840−50通過	通過	1−9km0330W 0430W通過,5km以内付近小急発達,0530弱8kmW側通過	0550×NNE8km	0310−N,0340−N多,0348−0615欠	近雷0345−0619	0	0	24:00	0

表５　大気電場の変化が顕著な事例の抽出．表２の事例のうち降水量無しと降水量0.5mmの場合．

降水無し（R無）

日時		大気電場				降水		レーダー		雷関連			降水量			
date [JST]	調査事例[UT]	大気電場の大きさ H:ヒゲ状有	大気電場の変化	降り始め直前の電場変化 R無：降水無	最大降水時の大気電場	強雨の型	部外雨量(5km)など	−10℃面40dBz以上(電域コア)など	23dBz以上の最大高度 cappi	LIDEN ▲雲間,?対地放電	地電流epr N:ノイズ,欠:欠測	雷対応	日合計[JST]	1時間最大値[mm]	時分[JST]	10分間最大値[mm]
4/2	01d23−24h	+1000,−500	−+	R無	R無	R無			水色4km			なし	0	0.5	0:22	0
4/23	22d15−17h	+1000,−2000	+−+−+	R無	R無	R無			5km15h,3km16h,3km通過1030,付近で少し降下模様			なし	0	0	24:00	0
5/13	13d5−7h	+1000,−500	+−	R無	R無	R無		0610S10km,top10km	9km(S5km)	0610▲W2kmとE,0600▲13kmSW発達		遠雷0500−0630	0	0	24:00	0
5/30	30d6−7h	+1000,−2000	+−	R無	R無	R無		0600−10SE5km小,付近で急発達,top10km,0630衰退	1−9km	0610▲7kmSE発達		遠雷0600	0	0	24:00	0
7/12	12d4−5h	+500	小+	R無	R無	R無			5−6km0430SW10km雨有・R無			なし	0	0	24:00	0
7/14	14d9−12h	+1000	小+−+	R無	R無	R無	1020八郷柿岡1.0小エコー,+付近エコー		5−6km1020小			なし	12.5	3	10:05	1
8/22	22d9−13h	+1500,−1000	+−	R無	R無	R無			10htop11−12km,6−8km1050,2km以下エコー無			なし	0	0	24:00	0
8/23	23d3−5h	+1000,−500	−+	R無	R無	R無	0330W10km12雨強し		5−10km0300−0410N発達	0240▲N10km		なし	0	0	24:00	0
9/10	10d3−6h	−3000 H	−変動 −変動	R無	R無	R無	10.0mm0840−50通過	通過	1−9km0330W 0430W通過,5km以内付近小急発達,0530弱8kmW側通過	0550×NNE8km	0310−N,0340−N多,0348−0615欠	近雷0345−0619	0	0	24:00	0
4/11	11d13−14h	±3000 H	−+−+凸−極小↓変動+	−20分	極小	0.5			3km			なし	0.5	0.5	23:41	0.5
4/12	11d15−16h	+500,−1000	−小+	同時	0.5	0.5	1510八郷柿岡0.5		3km			なし	4	1	6:37	0.5
4/28	28d6−10h,12−14h	+2000,−3000 H	−0−↓+、−+−↓+	R無、+25分(−5分)	極小付近	0.5			水色5km,1230小エコー通過,3km	0640▲S3km		なし	1	0.5	24:00	0.5
5/23	23d0−7h	+200	小+0−	同時	0付近	0.5			水色3km			なし	5	3	2:19	1
5/27	27d9−12h	±2000	−−+−+	極大から減少時	0.5 +	0.5	1050瓦会1.0, 1110八郷柿岡0.5	1010小NE5km, 1020E2km通過	8km1100,5−6km1040		1006N,1008−1156欠	近雷1000	1.5	9.5	0:13	2
7/11	11d5−6h,10−12h	±1500	W型風−+↓−+、+−	−20分+、R無	0.5,＋,R無	0.5、R無			5−7km0530,5−6km 1050−1100・R無			なし	0.5	0.5	15:32	0.5
8/15	15d12−15h	+2000,−1500	W型−変動0↓+−+−	−30分+	−から0+極大付近	0.5	1330R0.5	28dBz以上12km,1320降下 1−2km増,1230−40W20km	12kmから急減 1250−1320		1228N,1250gap−1307N	遠雷0830−0930	0.5	0.5	23:21	0.5
8/17	17d8−12h	+1000,−2000	W型−変動0↓+−+−		+から−極小付近	0.5	0920瓦会12,30同11,40同1.0	0910付近,0920NE5km	12km0910		0855N,0910−N多,0915−欠	近雷0900−	0.5	0.5	21:06	0.5
9/7	06d22−23h,07d0−1h	±1000	小+−↓、小+−		0.5,R無	0.5、R無			7km2230−2250付近Eを通過			なし	0.5	0.5	8:48	0.5

降水量0.5mm

8．議論

降雹が発生した４事例において，降雹を伴う雷雲と大気電場の関係について，以下のことがわかった．

・事例①～④において，雹が降り始めてから降り終わるまで，大気電場は０付近で±数100V/m 程度変動が見られた．また，降雹の前後で，大気電場は±1kV/m～3kV/mの顕著な変化が見られた．

・事例②より，単一セルで小さな0.6cm の降雹の場合，雷雲の接近に伴って，大気電場は＋の変化となり，降雹時は０付近で変動し，その後－に大きく変化する．中層の霰や雹など固形降水を含むエコー接近に伴い＋の電荷となり，降雹の後は降水に伴って，雷雲内の空気が降下し－の電荷になったと推察する．地磁気観測所の真上を通過する場合は，小さなエコーでも大気電場の変動は大きい．

・事例④より，中層に53dBz 以上（雹域に想定）が接近すると，大気電場は正（＋）の極大となり，降雹直前に雹域の降下が始まると－の電荷になると推察する．降雹の後，事例②と同様に－の電荷となる．

・事例③より，上層雲や中層雲の接近に伴って，大気電場は30分程度前から＋や－の変動があり，中層に53dBz 以上（雹域に想定）が接近し，降雹が発生，降雹が止むと，④と同様な変化をする．その後，地表付近の気温が降下すると大気電場は一時，正（＋）となりやがて０に戻る．

・事例①より，雷雲の進行方向とヴォールトの方向が同じでない場合は，事例③や④のような降雹直前の負（－）の極小は見られない．中層に53dBz 以上の領域（雹域コアと想定）が近づくと，正（＋）の極大の変動が見られ，降雹直前の探知となる．

発達した雷雲が接近し，短時間強雨が降り，通過すると，短時間強雨は＋の電荷を持ち，地表付近では＋電荷となり，大気電場は接近に伴って W 型（＋－＋－＋）の特徴的な変動が見られると報告されているが（Simpson and Scrase（1937）；畠山・久保（1946）；今道・菊池（1950）；Kuettner（1950）；畠山（1970）；北川（1996）；Rakov and Uman（2005）；Toya and Tsunomura（2008）；高橋（2009）），４事例の解析から，降雹発生時には，０付近で変動が見られ，短時間強雨のときも同様で，＋電荷の事例はわずかであった．また降雹発生直前に正（＋）極大から負（－）の極小，そして０付近の変動という特徴的な変化が見られたことから，雹の形成には＋や－の電荷分離，また，融合などの影響が関わっている可能性が考えられる．

9．まとめ

降雹４事例について大気電場の変動は以下であった．

1）発達した雷雲が近づき，上層雲や中層雲がやってくると，降雹の30分程度前から，大気電場は次第に正（＋）や負（－）に大きく変化した．

2）降雹発生前５～10分前に，中層に53dBz 以上の領域（雹域コアと想定）が近づくと大気電場は

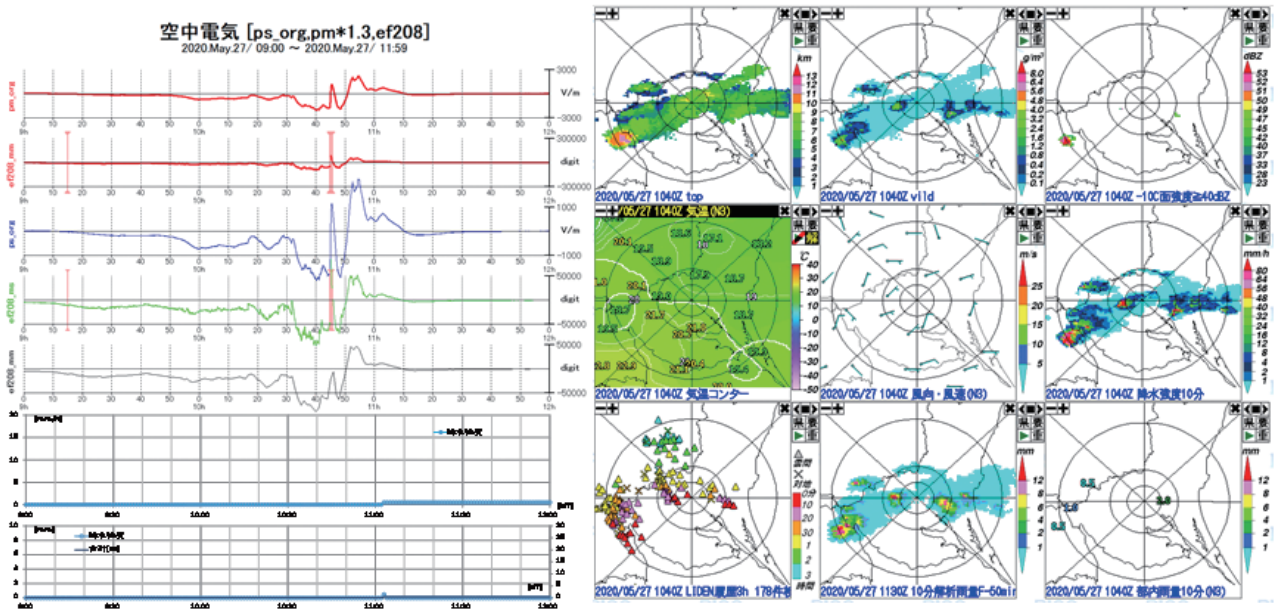


図17　大気電場の変化が顕著な事例の抽出．2020年５月27日，降水が観測されなくても，大気電場の急変あり．レーダーエコーの時間変化から，付近で降雨があったと推測される．左：水滴集電器（分値），フィールドミル（分値：参考資料），水滴集電器（秒値），フィールドミル（秒値：参考資料），フィールドミル（分値：参考資料），いずれもオリジナルデータ，降水強度（１分）と降水量，右：図説は図15下段と同じ．

表６　大気電場の変化が顕著な事例．2017年４～10月 500V/m 以上（分値：オリジナルデータ）．

日時		大気電場		降水		レーダー　鉛直構造	雷関連		降水量[JST]				
date [JST]	調査事例 [UT]	大気電場の大きさ[V/m] ef:フィールドミル、W:W型	大気電場の変化 ヒゲ:ヒゲノイズ	降り始め直前と最大降水時の電場変化	強雨の型 R無：降水無	t.雲頂高度、h.-10℃面40dBz以上、z:dBz、v.vild[g/m³]、c.CAPPI、k:km	地電流 N:ノイズ,欠:欠測	雷対応[UT] ×:LIDEN対地放電,▲: 雲間,k:km	日降水量 [mm]	最大降水量 [mm/h]	時分 [JST]	10分間最大	時分 [JST]
4/3	8-11	エラー（ef欠多し）	-+-0(凸雨)+-+	-0(凸雨)+	山型	h.10k付近、c.6k0900真上小エコー	N,欠	近雷 0810-1030	6.5	6.5	1857	2	1817
4/12	1330-18	エラー（ef欠多し）	-0(0.5)-+-0-+-	-0(0.5)- 脈動	0.5	小エコー続く、c.5k1410	-		0	0	2400	0	2400
4/15	0530-0730	エラー（ef欠多し）	-+0付近凸雨-+-+-	+0付近凸雨-	凸型	h.37z6h小通過、c.9k0600-10通過 0610-20降下有	N,欠	近雷 0559-0745 ×0610NE/S3k	6.5	6.5	1600	4	1513
4/17	9-12	-600,+400	+-+-	+0	地雨	v.0.1 1110付近、c.3-4k	-		9.5	4.5	2020	2	1930
4/29	8-11	-1700,+3100	+-↓+-↓(凸雨)+-+-	+-↓(凸雨)+	凸型	v.小付近0920,40、c.5-6k急発達0920-30	N,欠	近雷 09-11 ×W,SE3k0920	4	4	1917	2	1845
5/1	4-8	-3000,+2800	-+0(凸雨)-+脈動	+0(凸雨)-	凸型	v.0.2付近発達_0450-0510,コールドフロー発散	N,欠	近雷0455-0600 ×SE8,NE12_0510	7.5	6	1450	3	1406
5/7	9-11	-1800,+1300	-+-+		R無	t.8k付近_c.5k小0930,1.0mmN5k0940,エコー降下発散0930-40	N	遠雷 09-10頃 ▲N8k	0	0	2400	0	2400
5/10	9d19-21	-2100,+1700	脈動	同時	0.5x4	c.5-8k付近2020-40	-		7	2.5	618	1	1712
5/11	8-11	0,+500	+		R無	エコー付近発生09h-	-		0	0	2400	0	2400
5/13	12d16-13d9	-700,+400	-0+- - -+-0-	-極小	山型	v.0.1付近0400,c.4k以下	-		40	7.5	1326	2	1704
5/18	01-0430	-2500,+2400	+-+0↓変(凸雨)+-+	+-+0変動(凸強雨)	凸型	小エコー真上発達0110-40,h.37z付近0130-50,c.8k0130-0200	N,欠	近雷 0140-0400 ▲付近0150	13	10	1134	6	1047
6/1	6-9	-1600,+1100	-+-(瓦会1.0)+-0.5	+-(瓦会1.0)+-0.5	0.5	v.0.2真上5k通過0730-40,1.0mm瓦会	欠	遠雷 0730-0750 1940-2040	0.5	0.5	1753	1	1703
6/2	1d1830-21	-2200,+1600	+-↓0.5-+	+-↓0.5-	0.5	真上発達,c.5k0930,squall line北通過	N,欠		0.5	0.5	526	1	436
6/10	5-7	(-200,+400)	+0+0+		R無	c.5-6k,v.<0.1 0520-0550N5k以内	N,欠	遠雷 0525-0820	0	0	2400	0	2400
6/16	6-10	-2200,+1500 W	+-+-0変(凸雨)-+	+-0変動(凸雨)	凸型	v.3k真上0650,h.50z以上真上0700-10,c.8-9k50z以上減少0710	N,欠	近雷 07-08 × SW-NW2k0700-10	19	19	1707	8	1625
6/21	0230-0930	-1300,+200	-(強雨)-	-極小	山型	v.付近通過0610-20	-		35.5	9	1528	3	1524
7/1	30d1830-21	-1100,+1500	-+(強雨)-0-0	-+(強雨)-	凸型	c.5-6k1950-2030,真上2000	-		10.5	4.5	602	2	512
7/1	0-0430	-1500,+1300	+-(雨)+0+-0	+-(雨)	山型	c.5-7k0300,v.0310	-		1	0.5	502	1	412
7/4	8-15	-2600,+2800	-+0(雨)+脈動	+-0(雨)+	山型	c.5-6k0950	N,欠	近雷 1100-2315 ×付近1100	122	49	2050	16	2011
7/5	7-12	-1900,+1100 W	-+0.5+-↓凸強雨-	-+-↓(凸強雨)+	凸型	c.5-9k・t.10k0850,エコー降下0900	N	▲真上0900	10.5	9.5	1850	7	1810
7/5	20-23	-600,0	-雨	-極小	山型	v.0.1,c.4k	-						
7/12	8-11	-2900,+700	-凸型+-+--	-凸型+	凸型	h.37z0910-20,c.12k,t.13k・v.0930	N,欠	近雷 0800-1000 ▲多数真上0930	23	23	1924	13	1836
7/13	1-6	-500,+200	-+-	'0-同時(凸雨)+	凸型	小エコー付近で発達0200,c.5k,v.0.1_0150-0200	-		2	1.5	1202	1	1112
7/16	9－12	-3200,+3100	+-(ヒゲ)+-		R無	v._c.5-6k付近で減少1010-20	N		0	0	2400	0	2400
7/17	1430-18	-1100,+1100	-(凸雨)+-	-(凸強雨)+	凸型	v.通過_c.5-8k付近通過降下1710-20	N	遠雷 0340-0430	10	9.5	305	9	215
7/18	3-6	-3200,+1000	-(ヒゲ)0.5+	-ノイズ↑-0.5-	0.5	v.通過エコー減少c.5-9k急減し5-6kにO430-40	gap,N						
7/24	6-8	-600,0	-	-極小	R無	0650通過	-		0	0	2400	0	2400
7/25	5-9	-900,＋900	-+0+		R無	c.5k付近0620,c.5-6k付近0650	-						
7/25	10-14	-1200,+1200	-+-0(0.5)+		0.5x5		N	遠雷 1120-1210					
7/26	25d15-21	-3400,+2800	-+0.5±脈動	脈動+-双方あり	山型	t.13k1740,h.40z付近1740-50,c.5-10k付近発達	-	遠雷 1720-1850 ×N5k1740	48.5	30	434	8	346
8/1	31d20-22	-1000,+600	+-+-雨同時	+-極小	山型	c.5-7k発達2110-20,v.通過2120-30	-		0	0	2400	0	2400
8/1	0-3	-800,+800	-+雨	-+雨	地雨	c.5-6k0110-20,後ろに小エコー発達して通過	-						
8/1	4-7	-1400,+1200	+0.5-雨+	-雨	地雨	v.真上0520-30_0600,c.5-6k真上0500-30	-						
8/1	7-10	-2000,+2100	-0(0.5)-+1.5	+0.5-0.5	0.5x4	v.真上0800-10	-		13	3	1743	2	624
8/7	12-15	-3800,+2300	-0.5+0-0.5(強雨)+-	-(強雨)	山型	v.1200-30,v.大真上_c.5-10k1340,減少1400	-	遠雷 04時頃	31	29	2248	18	2241
8/9	11-13	-1900,0	-雨同時(強雨)	-同時(強雨)	山型	v.1110-1210,c.5-6k1110-50	-		39	33.5	2106	9	2051
8/18	14-17	-1200,+800	-雨0-+0付近(凸強雨)-	+0付近(凸強雨)-	凸型	付近発生1450,v.1520-1630,c.5-8k_5-10k1550	N,gap	近雷 1520-1615 頃 ▲1550,×あり	0.5	0.5	2400	1	2327
8/19	6-9	-2200,+1100	+-0付近雨-+	-0付近雨-	雨	v.小0720-50,c.4k0730	N	遠雷 0700- ▲,×あり	8.5	6	113	4	105
8/20	19-22	-1700.,+2000	+↓+-+-	+↓0.5 -0.5	雨 0.5x6	v.2010-40,降下推測2050-2100,c.5-7k	-		0	0	2400	0	2400
8/22	9-12	-2000.,+1000	-0付近+		R無	h.40zNW→NE5-10k減少通過1020-30	N大多	近雷 0940-1050	0	0	2400	0	2400
8/30	6-9	-1600,+1000	+0+-+		R無	c.9k接近0640,c.6k付近0710-40,通過弱まる0750	-		1	0.5	2016	1	1926
9/1	13-16	-1400,+1400	'-+-	+付近で発達0.5-0.5	0.5x6	v.付近1410,v.真上発達1430-40,c.5-8k-1510	-						
9/1	1930-2130	-2100 ,0	-0.5-雨0-	-雨	山型		-						
9/1	2d1-3	-1100,+600	'-+0.5-+		0.5		-		1.5	1	2400	1	2346
9/8	3-5	-1300,+1700	-+0+-		R無		-		0	0	2400	0	2400
9/13	23-14d00	-800 ,0	'-0-	0付近-極小	山型 強雨		-		0	0	2400	0	2400
9/17	9-14	-2800,+2500	-↑+↓-↑+- -↓	0付近-極小 +極大	山型 強雨		-		40.5	12	2140	4	2110
9/17	16-19	-1900 ,+2100 -1900,+200	-+脈動 -↓	'-極小	山型強雨		-						
9/22	14-21	-1700,+900 -2400,+2500	+-脈動	+-脈動	山型		-		2.5	1.5	2219	1	2358
9/25	9-13	-2700,+1400	-0変動-凸↑+-0-+	0付近変動凸型-	凸型	h.50z以上西側通過0950,c.12k発達1000	N,欠	近雷 0930-1200	14.5	13.5	2008	7	1918
9/27	15-24	-1200,+100	-0-0-	-極小	同時並雨		-		0.5	0.5	2143	1	2053
10/6	9-21	-800 ,0	- -0-	-極小	同時並雨		-		12	3.5	2107	1	2109
10/13	3-9	-500,0	-	-極小	同時並雨		-		18.5	7	1444	2	1428
10/14	13d16-20	-900,+200	-	-+	0.5x3		-		6.5	2	434	1	424
10/19	18d17-19d5	-1500,+1900	- -+- -+-脈動 -	-+ -極小	地雨	t.7kエコー真上	-		24	2.5	1340	1	1305
10/22	21d18-22d9	-2500,+700	-↑0-↑0-	-凸雨↑	山型 強雨	v.,小エコー付近発達	-		110	16	1514	6	2330
10/22	9-12	-3500,+3100	凸雨-+-+凸雨-	0または+凸雨-極小	凸型 強雨		-						
10/23	22d14-18	-2200,+600	- -+-0-	-極小	山型 強雨	v.付近,小エコー多数発達	-		46.5	20.5	227	6	202
10/29	28d22-29d12	-2800,+2900	+-脈動	+↓- -極小	山型 強雨		-	遠雷 0600-0900	77	12	2016	4	1949
10/29	0-2	-1100,+1400	+0+-	-極小	地雨		-						
10/29	2-8	-2800,+2400	+-脈動	-極小+極大	山型		-						
10/29	8-12	-2600,+2900	+-脈動 -	'-↓↑+凸雨↓- -極小	凸・山型		-						

表７　大気電場の変化が顕著な事例．2018年４～10月 500V/m 以上（分値：オリジナルデータ）．

日時		大気電場		降水		レーダー　鉛直構造	雷関連		降水量[JST]				
date [JST]	調査事例 [UT]	大気電場の大きさ[V/m] ef:フィールドミル、W:W型	大気電場の変化	降り始め直前と最大降水時の電場変化	強雨の型 R無：降水無	t.雲頂高度、h.-10℃面40dBz以上、z:dBz、v.vild[g/m³]、c.CAPPI、k:km	地電流 N:ノイズ,欠:欠測	雷対応[UT] ×:LIDEN対地放電,▲: 雲間,k:km	日降水量 [mm]	最大降水量 [mm/h]	時分 [JST]	10分間最大値 [mm]	時分 [JST]
4/7	6d15-16	-400 +900	-+-	-	0.5		-		0	1	23	0.5	5
4/7	9-12	-600 +100	-0-		0.5x3		-		3	1.5	2019	0.5	1957
4/14	13-15,21-15d2	-1000 +200	'- -0-+	-極小	地雨		-		2.5	2	2345	0.5	2341
4/17	17-18d4	-2100 +1900	脈動-+-+-+-0+ - -	-極小	並雨	v., 対流あるとき大気電場+-	-		1.5	1	2400	0.5	2400
4/24	13-16,20-25d3	-2300 +1900	-脈動±	-極小 -変動山型	-変動山型		-		12	4.5	2334	1	2332
4/25	13-16	-1100 +1200	-+0凸雨 -+0雨+山型-	-+0凸雨 -極小 脈動±	凸型 山型		-		58.5	8.5	1058	3	2355
5/2	18-24	-1700 +1200	脈動	-+0凸雨	山型	t.1920,v.1930,t.↓2010-20	-		12	6	2335	1.5	2305
5/4	6-10	-2000 +2000	+-0.5+-+-0.5+-	+-0.5	0.5x2	h.40z小通過0650,v.0650-0700	-	遠雷07-08頃 ×1650	1	0.5	1840	0.5	1750
5/7	5-11	-1100 +100	-同時雨 - 並雨	-	山型		-		17.5	6.5	1835	2	1752
5/9	8d17-24	-700 0	-	-	地雨				26	4.5	5:58	1	7:46
5/13	5-13	-2100 +1600	-脈動	-	山型	v.0910-20,南をエコー通過,通過後空電+	-		42	11.5	1902	3	1958
5/18	16-18	-2800 +2200	+-+	+-0.5	0.5x3	v.付近通過1630-40,c.5k発達1610	-		0	0	2400	0	2400
5/23	13-16	-1000 300	+-+-	-	地雨		-		16	8	2357	2	2354
5/24	6-8	-2500 +2400	-+-+-0変動(凸雨)- W	0変動↓凸型-	凸型 0718-22	v.N5k_h.40zNW10k発達0640,v.3k_t.付近_c.3-5kN0650,v.付近_t.10k07	N,欠	近雷0650-0740 ▲N2k,×NNW7k07	5.5	8	11	3.5	1627
5/31	13-15	-1900 +2400	'+-+-+-+	+↓0.5 -0.5 +-0.5-+	並雨		-	▲E5k1430	3	2.5	2347	1	2330
6/12	6-8	-1000 +600	+0+-0変動(凸強雨)- W	0変動↓凸型-	凸型強雨	h.40z付近通過0650-0700,v.付近通過0700,雷融けているかも	N,欠	近雷 0630-0750 ▲付近0650-07	11	10.5	1655	9	1605
6/20	19d22-20d3	-1000 +700	'-0-+	-極小+	山型		-		27.5	6.5	1118	2	1047
6/27	0-3	-900 +900	-+-+		R無	c.5-6km小付近発達0040-0100	-		0	0	2400	0	2400
7/4	12-15	-1200 +1200	'+-+-+-	+↓0.5	0.5x2		-		1	1	2316	0.5	2317
7/4	20-24	-800 +300	-	-	地雨		-						
7/5	5d16-21	-1400 +0	-	-極小	山型		-		8.5	3	631	1	2350
7/6	12-14	-1300 +1400	-+0+-	+↓0.5	0.5x4		-		28.5	8	334	3	323
7/8	78d23-9d2	-3000 +900	'-0-+-	↓凸強雨-(一時+)-	凸型	v.付近0030-50,h.付近0030-40,c.1-9km付近0030-40	N,gap,欠	近雷0020-01 ▲S3k20,×5k0030	0	0	2400	0	2400
7/9	6-9	-700 +400	-0+		R無	v.付近発達0610,h.50z小発達10k08	-						
7/11	11-16	-2900 +1900	'-±脈動	0変動凸型	凸型	v._h.50zW側発達1300-1330,c.11k発達	N,欠	近雷1230-1500 ▲13-14	14	12.5	2317	6	2230
7/16	7-11	-3000 +2200	'-+-0-+-+	0変動凸型-	凸型	付近急減,h.50z0910,0908+頃vil発達,c.12k,赤13k,	N,欠	近雷09:00-10:10 ×▲付近	3.5	3.5	1919	2	1834
7/19	1-3	-900 0	'-0-0-		R無	付近にぱらぱら弱いエコー	-		0	0	2400	0	2400
7/23	13-16	-1200 +1100	'-+-+		0.5		-		0.5	0.5	2400	0.5	2316
7/24	6-13	-600 0	-0(凸雨)-	-0(凸雨)-	R無 凸型	h.40zW10k通過_2.0mm0700,v.0.1_c.8k1210	-	▲W10k0710	6	6	2207	5	2119
7/28	27d20-28d2	-1200 +200	'-0-+-	0↓(凸雨)-	凸型	40z3kまで,c.7kまでほぼ鉛直	-		49.5	11.5	726	3.5	1638
7/28	6-11	-1100 +400	-+- -0-+-	-極小	凸型 +-		-						
8/6	9-12	-300 +500	'-+-+		R無	R+5分と降水強度相関有り，c.真上4kまで45dBz	_		0	0	2400	0	2400
8/7	6d16-18	-1800 0	-	-極小	山型		-		54.5	41.5	216	12.5	157
8/7	11-13	-1000 0	'-0-	-凸型 -極小	-凸型 -山型		-		54.5	41.5	216	12.5	157
8/9	2-4	-700 0	-	-極小	凸型		-		21	4	250	1.5	1144
8/10	13-19	,-900 +700	'+-+ -+-+-+		R無	上空電荷のみ	-		0	0	2400	0	2400
8/13	7-10	-600 +200	'-+ -		R無	エコーS,小,W付近発達	gap,欠	遠雷0730-0830 ×S付近0720	0	0	2400	0	2400
8/16	8-11	-1600 +200	'+- - -	+↓-凸型	凸型	発達通過,v.0840,小発達_,c.6kS_ライン状エコー付近通過,	-		1	1	1836	1	1746
8/24	23d22-24d6	-400 +100	'-0- -0+-	-	山型	弱いエコーS通過	-		4	3	809	1	745
8/25	8-12	-2300 +1200	-0付近変動-+- W	0付近変動-	山型	h.v.2.4,c.8k	N,欠	近雷0900-1100 ×NE6k,▲付近0920	12.5	12.5	1935	8	1855
8/26	9-15	-1700 +1700	-+0+ +-+-+0+-+ W		R無	h.40z0930,1310E↓,前半SE通過,後半N↓	N,欠	近雷1250-1320 ▲1240,×SW3k13	0	0	2400	0	2400
8/27	9-12	-2600 +2800	+-+-+-+-+- 逆W	0-	0.5x5	c.7k発達せず0950-1010,W型途中脈動あり,雨少なし	N,gap,欠	遠雷1030-×E9k1030,▲S6k	3	2.5	2113	1	2032
8/29	15-17	-700 +800	+-+ 逆W		R無	付近雨無し,上空のみ,c.3-9k	N	▲W1550,NE1620	0.5	0.5	231	0.5	141
8/30	30d17-19	-600 +300	-+		R無	上空のみ,付近雨無,解析雨量のみ,付近S小発達,c.2-5k1720	_		0	0	2400	0	2400
8/31	6-9	-1700 +1200 雷災故障	-0-+-0- 小W	-+↓-	山型	W発達0640,↓0730_S↓0800,故障	N欠	近雷0700-▲E2k0720,×0750	9.5	8.5	1726	4.5	1711
9/1	1d7-2d1	欠測	+-脈動	-+↓-	山型		N,gap	夜間一発雷1451 ×付近1500	22.5	6	1729	2	1654
9/3	3-6	-2700 +2300	-+-	-+0.5	0.5	W20k,雨無	-		0.5	0.5	1411	0.5	1321
9/4	3d23-4d3	-2400 +2400	-+- -0+	0+	0.5x3		N,gap	▲WNW7k01_SW2k10	1.5	1.5	943	1	853
9/5	4d18-22	-3500 +2700	-+-0-0-+-+-+-+-+	+0凸型-脈動	-凸型	スコールライン	N	▲NE2k1910					
9/10	7-9	'-1500 +1200	-+0+-0- W崩れ	+0雨+↓-↑0-	並雨	c.1-8k付近急発達0730,c.1-6k真上0740,スコールライン 北条竜巻エコー類似	N,欠	遠雷1600-1700 ×NE6k	10.5	4	2400	2	1641
9/13	11-13	-600 0	-		R無	c.7k小発達,W1.0mm,c.3-8k付近発達真上通過1140	_		0	0	2400	0	2400
9/15	0-3	-400 +200	'-		地雨	c.8k,雨域中エコー発達通過	-		9.5	4.5	1046	1.5	1005
9/17	9-10	0 +500	+		R無	c.4k付近急発達通過0930	-		0	0	2400	0	2400
9/18	9-15	-1300 +1500	'+- +-0-	+-	凸型 山型		-		38	24.5	2322	9	2307
9/25	4-9	-1500 +1600	+0+-+↓0凸強雨-+-	'+↓0凸強雨-	凸型	c.5kW5k急発達0620,N5k急減0630,v.0640	-		9.5	5	1608	4	1544
9/26	13-20	-1600 +200	-0-+-0-	-極小	地雨	v.0.1付近1410-20,c.5k1840	-		13.5	6	2348	2	2322
9/30	29d6-9	-1300 0	-	-極小,+	地雨	v.0.1付近0710-20,0740-0800	-		16	3.5	556	1.5	539
9/30	29d19-30d1	-700 +-1100	'-0-+-	-極小,+	地雨	T24号	-						
9/30	5-11	-2100 +24000	''-+脈動 +-+-		+地雨		-						
10/13	17-22	-2200 +1800	'+ +-+--+		地雨	v.0.1_2000-10,c.8k1940	-		0	0	2400	0	2400
10/18	19-24	-2800 +2200	'-+ -0-+-+		R無	t.7-8k2210,ふらないで通過,それほど発達せず,小エコー	-		0	0	2400	0	2400

表８　大気電場の変化が顕著な事例．2019年４～10月 500V/m 以上（分値：オリジナルデータ）．

日時		大気電場		降水		レーダー			降水量[JST]				
date [JST]	調査事例 [UT]	大気電場の大きさ[V/m] ef:フィールドミル、W:W型	大気電場の変化 ヒゲ:ヒゲノイズ	降り始め直前と最大降水時の電場変化	強雨の型 R無:降水無	t.雲頂高度、h.-10℃面40dBz以上、z:dBz、v.vild[g/m³]、c.CAPPI、k:km	地電流 g:gap、N:ノイズ、欠:欠測	雷対応[UT] ×:LIDEN対地放電、▲:雲間,k:km	日降水量 [mm]	最大降水量 [mm/h]	時分 [JST]	10分間最大量 [mm]	時分 [JST]
4/1	9-16	-2300 +2200	-+-+-+-+-+-+		0.5X3	付近弱いエコー発達,c.1-2k23z1010	-		1	0.5	2150	0.5	2100
4/8	10-14	-2600 +5900	'+-+-+0+-+-+-+-		0.5X3	W発達1140,c.3-4k	-		1.5	1.5	2208	0.5	2156
4/10	9d21-10d8	-1700 +600	脈動-0-00000-0	-	地雨	v.無,c.1k,c.1-2k0300,c.1-3k0340	-		19.5	2.5	1241	0.5	2331
4/10	13-19	-500+100	- -		地雨		-						
4/14	17-21	-1000+800	-+-		地雨		-						
4/19	9-13	-3000+2300	+-+-+0.5-(雨)	+地雨	+地雨	c.1-4k真上1120,-凸雨1140,V.小真上1140-1200,c.3-4k1140-50	gap1140	×真上1130	2.5	2	2107	1	2054
4/22	9-11	-800+600	-+-	+0付近-	凸型(1.0)	v.0.10930-40,c.4k真上0940	-						
4/26	19-23	-3400+2500	脈動+-+-小+		地雨	v.1950,c.1-4k,発達2000,付近S減2100,c.1-3k2130,2140発達	-		2	0.5	1741	0.5	1651
4/27	4-9	-3300+3100	-+-+-+-+-+0脈動		0.5x2	v.周辺通過,c.1-3k0040-50,c.1-3k通過0740-50	-		7	2.5	504	1	457
5/1	8-14	-2000+500	-+0+0+	-極小	山型	c.4k0840,v.0920,c.3k,v.0930-40真上まとまり急減,c.4k以下	-		24.5	12	1906	4	1834
5/2	1-3	-3000+200	'+-		R無	v.0.1小付近通過0130-0150,c.4k	-		0	0	2400	0	2400
5/7	4-7	-1200+1200	'+-+-+		0'.5X2	c.小4kSW5k0450,v.小付近0500,c.小4kW付近0550,v.小付近0600	-		1	1	1501	0.5	1509
5/21	20d21-21d7	-2100+1700	- -+-+-+-	(+)-山型	(+)-山型	c.5-6k,v.0.1通過2250真上2200-50,0200-10,0410	-		71.5	20.5	1431	6.5	1353
5/28	18-20	-800+900	'+- -+-+-		0.5X2	c.5k,1940v.小付近1940,降雨中発達エコー-(+凸)-,1940vild0.1	-		0	0	2400	0	2400
6/7	6d22-8	'-2100+2300	←←-←←←←0←→←-←-		地雨	エコー発達真上,c.5-8k,v.0.1付近2330,t.10k真上0710,v.0720	g2319	▲NNW5k2320	10.5	3	1650	1.5	1621
6/10	9d20-20	-2400+1700	←0←→0←←←←←0←0←0←0←0←→0←→	-同時雨	地雨	c.7-8km,脈動時上空発達エコー有雨多くない,t.10k真上1330_1550,v.0.1	-		57	8.5	1701	2.5	1641
6/15	4-7	-2100+2200	-+-+-0-+		地雨	↓-0.5同時,前c.2k,後c.4-5k,v.0450-0520_真上0550	-		27	6	702	2	615
6/15	16-19	-3200+2800	-±脈動-	→↓0凸雨-±脈動	凸型	c.3-9k発達W8k1630-NW8k1640-40,v.0.4急発達1700	g1646,N	▲SW5k1650,×付近1700					
6/21	6-9	-500+300	- -+		R無	0810c.SE2k0810_1-7kW1k0820,付近発達W通過0830-0910	-	▲NW6k0900	0	0	2400	0	2400
6/24	3-7	-1400+700	'-0-+		0.5X4	c.4k0300-10_0350-04_0350-04_5k0550-06	-		10	2	624	1	1209
7/3	21-4d3	-2000+1700	-雨 -+-強雨0	+↓-変動山型強雨↑+	山型強雨	c.5-6k,v.S2310_付近30_分裂40,雨強2340-00,エコーの中発達SW→NE	-		2.5	1.5	2307	0.5	2347
7/15	17-21	-1000+1100	'+- +0-+-		0.5 地雨	c.7kN5k1650-1710,c.4kS5k,c.7-5kエコー最後1950-2040,v.真上2030-40	-		2	1	907	1	545
7/16	8-10	-1000+1000	+-		0.5	t.8-10k0810-0910,c.3-5k先行0910	-		10	4	604	2	2340
7/16	14-16	-1500+1200	+-0-+-	-0雨+	凸型	c.6-9kSW5k1410,t.10k1420,c.6-8k真上,v.1430,c.6k以上無,v.無1440	-		10	4	604	2	2340
7/19	6-9	-2200+800	'-+-+-		0.5	c.7-9k減WNW15k0720-30,v.0.2減SW5k0730-40,t.9k,c.6-9k急減	-	▲W12k0720	4	3	116	2.5	114
7/20	9-11	-1000+500	-+-+-+- W	+↓-強雨↑0-	凸型-	t.13k≦,c.N5k0930,h.50z_v.2.4_c.50z7k1020,T↓1040	g,N,欠	近雷 1000-1030 ▲W5k0940,×0950	10.5	10	2021	9.5	1931
7/25	5-9	-1100 0 -400+100	- -0-+-	-同時凸雨+	R無 凸雨+	v.SW5k0630,v.発達NE10k0700_付近0730-0800,c.2-9kE5-10k	-	遠雷 0700-▲NE10k0700-10	2.5	2.5	1734	1.5	1651
7/26	21-27d1	-1700+800 -1600+1600	-+- +-+	-同時凸雨+	-凸型+ 0.5	t.13k≦,v.,c.1-8k真上2140,v.付近減2150,t.7k≦0020,c.3-6k付近0030	-	×,▲SW12k2140	0	0	2400	0	2400
7/27	18-23	-1100 0	-0-	-極小	山型	エコーかかる1800,c.1-6kW,18200,v.付近1840_2100	-	▲15k	10.5	10	734	7.5	644
7/29	5-9	-2600+1500	-+-+-0付近変動-+ W		R無	h.50z付近↓0700ー10,c.11k,_近く短時間強雨0730	欠	近雷 0630-0800 ×真上0630_50	0	0	2400	0	2400
8/19	15-17	-1700+1300	'+-+-+	0	山型	S付近小発達(凸雨),c.8k16_7k真上1640,降雨時v.N通過,v.5k通過	-	▲W20k1530	0	0	2400	0	2400
8/20	6-9	-3400+2400	-+-0-0-0+-+-+- W	-凸型+	-凸型+	スコールライン状,Tシア付近,v.小付近,c1-6k付近,寒フレ0650-0755	N,欠, g0753	近雷 0650-0755 ▲0710,×SW2k	21.5	16.5	1651	10	1602
8/21	7-11,12-17	-3100+2000 -1300+600	-0-0-+-0--+0+- +-+-0-0-0-0-	-+0凸雨 -山型	凸雨 山型	Tシアライン通過,0850w10km×v.付近W0900-10,c.1-7k真上0910	N,欠 g1344	遠雷 0830-0930 ×NW7k,▲0840	23	11	2318	9.5	2228
8/23	22d21-23, 23d2-4	-300+600 -1000+1500	-+-+ +-+		0.5x4 R無	c.1-6k2120_c.1-7k付近2200,v.2210通過,c.3-6k付近0230(雨無し)	-		2.5	1	1008	0.5	1012
8/24	7-9 16-18	-2100+2900 -1300+2300	+-+- +-	+-0.5+0.5 +-0.5	0.5x3	v.,c.1-3k真上,c.1-5k上空1520-30,強雨後＋	-	▲SW5k0750	1	1	1759	1	1709
8/25	10-13	-600+200	-	-極小	山型	1120v.付近1120、c.1-7k付近1240 Nエコー通過,T3℃↓0710	g1214		8	6.5	2221	3.5	2146
8/30	29d22-30d1	-3300+2600	+-+-+-+-+- 脈動	'地雨	'地雨	c.1-6k2220,v.W付近2250,c.真上1-7k0630	-		6	4	920	1	856
9/3	11-16	-1000+900	- +-+-+		R無 0.5x2	t.10k付近1130_1450-15,c.1-4k付近W1150,vild付近W	g1156	▲NW5k,×SE3k	0.5	0.5	2400	0.5	2346
9/8	3-5	-1100+3600	-+-		R無	c.1-9k0340,v.付近0350	-	▲10kSE0340	0.5	0.5	2400	0.5	2314
9/9	8d16-24	'-1800+800	-0-+-0-0-0-0- -+強雨0+-	-凸雨 山型	-凸型 山型	台風アウターバンド,v.S,c.1-7k,,2010vild通過(強雨)	g0156 (停電)		82	21	527	6	509
9/10	10-14	-2400+1900	+-+-脈動-+ W似		0.5x4	上空エコー,c.7-9kW5k1010,c.6-9k付近1020,c.5-9k真上1040	N,欠	近雷 1045-1245 ×,S3k,▲E2k1100,	2	1.5	2244	0.5	2228
9/11	6-10	-3200+2200	+-0変動-+ W	山型	山型	v.N通過,強雨かすめる,v.,c.1-9k0800,弱まって通過Sで強い、,0820つくばT-1℃,0840土浦-1℃(+)	N,欠 0728頃	近雷 0730-0900 ×付近0550,0640	6.5	5.5	1746	3	1719
9/11	'13-14	-1700+1700	+-		0.5	t.9k1310-,v.1330,c.1-6k1340通過	-						
9/15	18-23'	-800 0	-0-0-	-山型	-山型	c.1-7k真上,v.雨と-同時1850	-		0	0	2400	0	2400
9/18	2-10	-3200+3200	-0-+-+ +-+-0- -+ +-		0.5Xn	t.9k_c.1-7k02,t.9k_c.3-7k(+)_v.0310,t.10k_c.1-8k過0450	-		5	1.5	1311	0.5	1808
9/22	15-18	-800 0	-0-	-凸同雨強	凸型	v._t.7k1550,小,c.1-2k過1700-10	-		5.5	3	2400	1	2358
9/24	5-8	-2400+1300'-+ '0.5	-+		'0.5	t.7k06-,0610v.弱,c.1-4k,--+雨無	-		0.5	0.5	1703	0.5	1613
10/3	8-9	0+800	+無		R無	t.7k小0820_9k40,N2kc.2-7k,t.9k0850	-		0	0	2400	0	2400
10/4	3d21-4d1	-2600+2200	-+-+雨0+ W崩	+-地雨	+-地雨	t.9k2110,c.2-4k40,v.2210_2330,t.9-11k2310-40	-		6	4	812	1.5	831
10/11	10d15-18	-900 0	-同雨	ー山型	ー山型	1530真上,c1-3k1630-40	-		17	7	230	2	200
10/12	11d18-12d16	-2500+2400	-+-脈動	ー山型-凸型+	山型 凸型	台風アウターバンド,本体,t.7k,v.N2250-23,c.1-8k06	-		182.5	31	2208	12.5	1738
10/18	16-21	-1200 0	-同雨 極小強雨	ー山型	山型	v.W過180-20_1850-19,c.1-5k16,c.1-4k1810,時折5k	-		5	1.5	2317	1	125
10/21	13-22	-3000+2800	脈動	+-脈動,地雨	地雨	c.1-6k(5,6km)1610,v.強2010-20	-	あり	1	1	2340	0.5	2333
10/25	24d'23-25d10	-3800+3000	-ベースに+,±脈動	+山型強雨-,-山型	±山型		N,欠	あり	85	18.5	1710	5	1657
10/27	8-12	-3800+2900	-0-+-+	0	凸型-		-		11.0	6	1823	5.5	1739

大きく正（＋）の極大に急変した．

3）降雹の発生直前に，雹域コアの降下が明らかな場合は，大気電場が急減し絶対値が大きく負（－）側に変動し極小となり，直後に降雹が発生した．

4）降雹の発生時には，大気電場は負（－）から０付近に急変し変動が見られた．

5）降雹や降水が止むと，大気電場は急減し負（－）の極小となった．

6）通過後に上空からの寒気移流が顕著な場合，大気電場は正（＋）に変化する．

レーダーエコーの監視と共に，大気電場の変化をモニターすることによって，２），３），４）の変化から，雹域コアの到来を降雹の直前に探知することに繋がるのではないかと考える．

2020年の４～10月の大気電場が顕著な事例から，短時間降水が最大となる時には，大気電場が－極小になる場合と０付近で変動する場合があり，前者はウォームレインで，後者は上空で霰や雹を伴う降水である．＋電荷の降水の事例は１例のみであった．

これらの特徴は，これまでの報告されている発達した雷雲が到来する時には，強雨は＋電荷を持ち，大気電場の変動はW型（＋－＋－＋）の特徴的な変動をすることと，やや異なっていた．

謝辞

雨量はアメダスのほか，茨城県土木部河川課，国土交通省関東地方整備局，国土交通省霞ヶ浦河川事務所および独立行政法人水資源機構のデータを利用させていただいた．気象研究所の吉田 智氏，元気象研究所の高谷美正氏にはご助言をいただいた．降雹の写真について，地磁気観測所の職員の方々のご提供やご協力により収集することができたものである．齋藤誠所長にはご助言をいただき，笹岡雅宏主任研究官をはじめ，藤原善明主任研究官，海東恵美研究官，増子徳道研究官，神谷亜希子技術主任および瀧沢倫明技術課長にはご校閲いただいた．

最後に，これまで大気電場と地電流の連続観測に携われてきた所員の方々に謝意を表する．

参考文献

足立　透，フェーズドアレイレーダーを用いた顕著な大気現象の観測．日本風工学会誌，161，371-380，2019.

Browning, K. A. and G. B Foote, Airflow and hail growth in supercell storms and implications for hail suppression. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102, 499-533, 1976.

Fujiwara, H., H. Okochi, M. Kamogawa, T. Suzuki, S. Hayashi, N. Sato, Y. Orihara, J. Matsumoto, J. Hamada, K. Murata, E. Yoshikawa and T. Kudo, Difference between lightning activities in thunderstorm cells with and without hailfall in western Tokyo. J. Atmos. Electr., 40, 10-31, 2021.

畠山久尚，久保時夫，昭和15年８月中旬以後の雷雨の際の前橋に於ける電位傾度の變化．中央気象台彙報，21，271-275，1946.

畠山久尚，雷の科学．河出書房新社，259pp．1970.

林　修吾，吉田　智，楠　研一，2014年６月24日に調布・三鷹に激しい降雹・落雷をもたらした積乱雲の発生発達とその構造，2015年度秋季大会講演予稿集，108，403，2015.

平野烈介，熊谷に於ける降雹観測．気象集誌，５，189-190，1927.

今道周一，菊池繁雄，柿岡附近の雷による急變化電場に就いて．雷の研究（日本学術振興会雷災防止第九特別委員会　編），電気書院，54-61，1950.

石原正仁，2008年雑司が谷大雨当日における積乱雲群の振舞いと局地的大雨の直前予測Ⅱ―積乱雲に伴う局地的大雨の直前予測の試み―．天気，59，563-577，2012.

石原正仁，降雹の二重偏波レーダー解析－2018年５月24日八王子事例－．気象研究所台風・災害気象コロキウム（2020年２月６日開催）講演資料，2020.

気象研究所，平成24年５月６日に茨城県つくば市付近で発生した竜巻について．報道発表資料（平成24年５月11日），2012. http://www.jma.go.jp/jma/press/1205/11c/120511tsukuba_tornado.pdf（2021.9.20閲覧）

北川信一郎，大気電気学．東海大学出版会，200pp，1996.

Kuettner, J., The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds. J. Meteor. 7, 322-332, 1950.

熊本真理子，降雹を伴う雷雲と大気電場の関連の調査―2012年５月６日・2017年６月16日・2018年５月24日地磁気観測所―，天気，69，113-122，2022.

楠　研一，1996.7.15下館ダウンバーストの前兆現象．気象研究ノート，（193），125-127，1999.

道本光一郎，紫村孝嗣，松井敏明，河崎善一郎，冬季雷の気象学的特徴と雷予知技術．電気学会論文誌B，116，431-437，1996.

森真理子，高谷美正，関東地方で発生した降ひょう・ダウンバーストを伴ったスーパーセルの事例解析．天気，51，567-581，2004.

中村　一，森真理子，1996年７月15日の下館・つくばのダウンバースト．気象研究ノート，（193），111-123，1999.

Rakov, V. A. and M. A. Uman, Lightning：Physics and Effects. Cambridge University Press, 2005.

出世ゆかり，坪木和久，非定常で短寿命の対流セルのもたらす降雹の水平規模と雹の大きさ－2002年５月26日の阪神間の降雹事例について－．天気，53，871-877，2006.

Simpson, G. C. and F. J. Scrase, The distribution of electricity in thunderclouds. Proc. Roy. Soc. A, 161, 309-352, 1937.

高橋　劭，雷雲電荷発生機構－霰の電荷符号逆転の謎．天気，51，7-15，2004.

高橋　劭，雷の科学．東京大学出版会，271pp, 2009.

Toya, T. and S. Tsunomura, Discussion of variation patterns of atmospheric electricity. Technical Report of the Kakioka Magnetic Observatory -Selected Translations-, 6, 11-22, 2008. http://www.kakioka-jma.go.jp/publ/journal_DB/pdf_files/technical_report_of_KMO_sup_06_02.pdf

内田顕司，溝本　悟，澤田睦子，石原正仁，気象レーダーによる雹（ひょう）の監視の試み．天気，57，646-650，2010.

Waldvogel, A., B. Federer and P. Grimm, Criteria for the detection of hail cells. J. Appl. Meteor., 18, 1521-1525, 1979.

山下浩史，2005年５月15日東京都八王子市に降雹と突風をもたらした積乱雲の特徴について．天気，54，781-796，2007.

吉田公一，谷　善典，岡田　京，降雹時のレーダー３次元データの特徴．平成18年度東京管区調査研究会誌，2006.

Relationship between the atmospheric electric field and developed cumulonimbus clouds at the Kakioka Magnetic Observatory: Four hailstorms (6 May 2012, 4 April 2014, 16 June 2017, and 24 May 2018)

by

Mariko KUMAMOTO

Kakioka Magnetic Observatory

Received 2 November 2021; accepted 9 March 2022; published 22 March 2022

Abstract

Four cases of hailstorms (on 6 May 2012, 4 April 4 2014, 16 June 2017, and 24 May 2018) have been observed by the Kakioka Magnetic Observatory in Ishioka City, Ibaraki Prefecture. Because we had been continuously monitoring the ground-level atmospheric electric field, it was possible to investigate the relationship between the atmospheric electric field and the structure of hailstorms. By comparing precipitation with data from the 3D radar of the Japan Meteorological Agency and Doppler radars installed at the Narita and Haneda International Airports, we determined the following characteristics of the variation of the atmospheric electric field.

1) When a portion of the mid-level clouds with radar reflectivity of more than 53 dBZ (assumed to be the hail core region) approached 5 or 10 min before the occurrence of hail, the atmospheric electric field suddenly increased to the maximum positive potential.
2) When the hail core region began to descend immediately before the occurrence of hail, the atmospheric electric field decreased sharply to the minimum negative potential.
3) At the occurrence of hail, the atmospheric electric field fluctuations were observed in the positive and negative potentials.
4) When precipitation stopped, the atmospheric electric field changed sharply to the minimum negative potential. After the radar echo passed by, if cold advection was strong, the atmospheric electric field changed to the maximum positive potential.

By monitoring changes in the atmospheric electric field and radar echoes, it may be possible to detect the arrival of a hail core region above an observation area from the changes noted in points 1), 2), and 3) and to recognize the danger immediately before hail begins to fall.

In addition, in cases from April to October 2020 when the atmospheric electricity field varied widely, when cumulonimbus clouds developed and sudden heavy rain was at its maximum, the atmospheric electricity field was at the negative potential minimum or fluctuated around 0. It is considered that the former was associated with warm rain; the latter, with hail or with a hail core area overhead in the mid-level cloud. Besides it was the only case of precipitation at its maximum with a positive potential. These similar trends in prominent atmospheric electric field changes and precipitation at its maximum were observed in data of warm season (from April to October) from 2017 to 2020.