

降電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—

熊本 真理子*

1. はじめに

発達した積乱雲によって、突然の短時間強雨や突風、降電、ダウンバースト、竜巻、落雷などの現象が、5～数10分程度の短時間かつ数100m～数km程度の狭い領域で発生し、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。先行研究で、一般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、上空の電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 (Chisholm and Renick 1972 ; 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)。しかしながら、シビア現象は局所的に発生するため、現在の地上観測網で降電や被害の実態をとらえた事例は少ない。また、多様で不規則な形状の電に関する報告はほとんど見られず (平野 1927)、電形成に至るシステムの報告はされていない。近年 SNS などで数々の電の写真が掲載され、それらは球状の電が多いが、時折、歪で不規則な形状の電の写真も見られる。また、スーパーセルによる場合には、進行方向前面に上昇流域ヴォールトがあり、降水がないところに突然の降電や短時間強雨、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。

一方、雷雲の接近・通過時には、地表付近では W 型 (+ - + - +) の特徴的な大気電場の変動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)、降電時の事例は少ないが、大気電場の変動は 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8月の10年で4件、構内での降電事例が確認・記録されている (熊本 2022)。このうち、降電時刻が明らかな3例について調査を行った。①2012年5月6日に球状の電 (最大直径3cm (笠間市で最大直径5cm))、②2017年6月16日に球状の電 (最大直径2cm)、③2018年5月24日に不規則な形状の電 (最大直径4cm) である (このほか2014年4月4日構内で電 (三角錐の形状、0.6cm) が降り0831-33UTC (以下 UT と記す) に写真撮影されている)。②と③の事例は、レーダーエコーの強雨域 (40mm/h 以上) の経路はほぼ同様であったが、電の形状は全く異なるものであった。また、地磁気観測所の水滴集電器による大気電場の連続観測によると、雷雲の接近から降電に至るまで特徴的な大気電場の変化が見られた。

そこで、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、雷雲の構造の調査を行った。以下、報告する。

2. 降電3事例の概要

①2012年5月6日0353UT、構内宿舍周辺にて電 (球状、3cm) が降り、22分後の0415UT 笠間市で電 (球状、5cm) が降ったことが、職員によって写真に記録されていた。同日、0335-53UT に竜巻が発生し、

* 気象庁地磁気観測所。

mkumamoto@met.kishou.go.jp

© 2022 日本気象学会

第1表 降電3事例.

事例	日付	降電						降水		備考 (大きさは電)		
		発生時刻 [UT]	継続時間	電の形状	主な電の大きさ	最大	電の特徴	発生地点 (地磁気観測所 又は職員が 写真撮影)	雨量計 との距離 [m]		降水量 [mm]	最大降水強度 (1分) [mm/h]
①	2012/ 5/6	0353 【0415】	不明	球状	不明	3 cm 【5 cm】	不透明の球状【直径5-10mm位の粒が集まって直径5cmの球体になっている】	構内宿舍周辺 【笠間市】	145 【NE13km】	0.5*1	0.5*1	・【】笠間市 ・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電*2 ・0415UT 水戸2.8cm*3, 0450-55UT 盛岡0.5cm*3
②	2017/ 6/16	0710-20	10分	球状	1-2 cm	2 cm	不透明の球状が透明な水で覆われている	観測課・技術課 事務室周辺	17 38	19.0	72	・0707UT 雨と霰(0.5cm未滿)降り始め, 降電時は雨まじり ・0434UT 宇都宮2 cm*3
③	2018/ 5/24	0717-21	4分	不規則な形状	1-2 cm	4 cm	いろいろな形(突起状もあり)の電あり, 中が不透明が多いが透明もあり, 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	・0717UT 雨と電(6mm程度)降り始め, 降電時は雨まじり, 垂直降り, 0721UT 電無くなり降雨のみ ・0430UT 頃八王子駅周辺 大粒の電(2cm余り)(石原2020)

*1降電発生時の降水量と最大降水強度, *2SNS, *3地上気象観測日表

0351UT 頃北条では竜巻による人的被害および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)。構内の降電はこの2分後に発生している。②2017年6月16日地磁気観測所の観測課・技術課事務室周辺にて、0707UT 頃から雨と共に霰(0.5cm未滿)が降り始め、土砂降りの雨と共に0710-0720UTの10分間、電(球状、1-2cm)が降り、最大直径は2cmであった。③翌2018年5月24日同じ場所にて、0717UT 雨と電(0.6cm程度)が降り始め、0717-21UTの4分間、電(不規則な形状、1-2cm、最大4cm)が雨と共に垂直に降り、その後、降雨のみとなった。

②と③の積乱雲の経路は、栃木県と茨城県の県境付近から加波山方面を経て発達し、同じような経路を通してほぼ同じ時刻に地磁気観測所で降電があった。③と同日、八王子駅周辺でも降電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、地形の影響が推察される。①、②、③の降電の概要を第1表に、電の写真と気象状況を第1図に、レーダーエコーの経路と地形図を第2図に示す。

大気電場は、アメダス柿岡から約100m 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2.5m)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。②2017/6/16と③2018/5/24の降電のあった場所はほぼ同じであり、アメダス柿岡の雨量計の東側20~40mと近かった。①2012/5/6の降電が撮影された地点は雨量計から

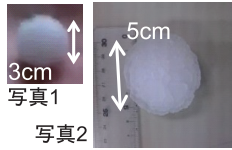
北東に150mほど離れており、降水は0.5mmであった。

降電3事例とも高層天気図(300hPa)では、 -45°C の強い寒気移流が①2012/5/6は潮岬付近、②2017/6/16と③2018/5/24は輪島付近まであり(図省略)、第1図のように衛星の水蒸気画像(高知大学 2018)によると、関東地方付近に暗域がかかり、中層から乾いた空気が移流し不安定な成層状態で、ゾンデ観測によれば下層と上層の鉛直シアは大きく、水平スケールは小さいながら、鉛直方向に活発な積乱雲が発生しているのが見られる。これらの日には第1表のように関東地方の他の地点でも降電が発生している。

3. レーダーデータと気象データの時間変化

レーダーエコーによる電の目安として、1) 反射強度45dBz以上であること(Waldvogel *et al.* 1979)、2) 被害の発生した降電では反射強度55dBz以上であったこと(森・高谷 2004)、3) Vild (Vertically Integrated Liquid Water density: 鉛直積算降水量密度)が $1.0\text{g}/\text{m}^3$ 以上という条件が15mm以上の降電の必要条件であること(吉田ほか 2006)、4) 暖候期の電判別の閾値として $3.5\text{g}/\text{m}^3$ 、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、これらを電域判定の参考とした。第3図はそれぞれの事例で、上段から(1)レーダーエコー頂高度、(2) -10°C 面40dBz以上(高度①約4km、②約6km、③約5km)、(3)降水強度(高度約2km)、(4)LIDEN(▲雲間放電、×対地放電)、(5)雨量(10分値)、(6)アメダスの気温と風、中心は地磁気観測所、①の太い×は笠間市。円は半径10km

① 2012年5月6日



② 2017年6月16日



③ 2018年5月24日

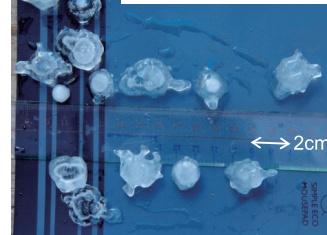
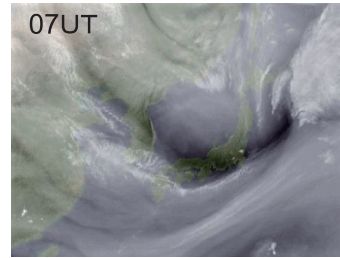
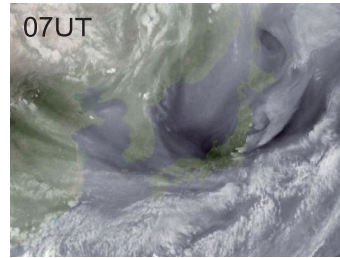
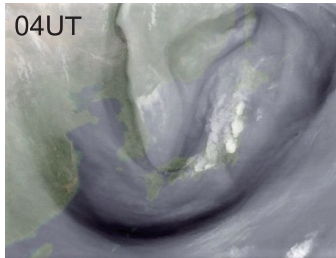
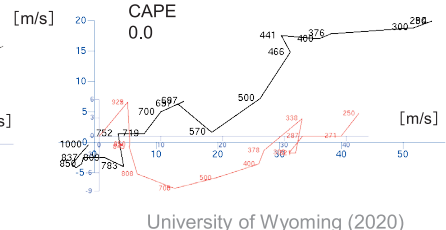
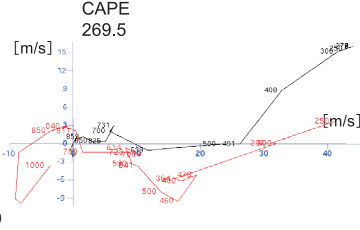
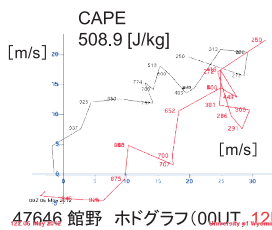


写真4



水蒸気画像 (高知大学 2018) (コントラストを明暗+30に調整)



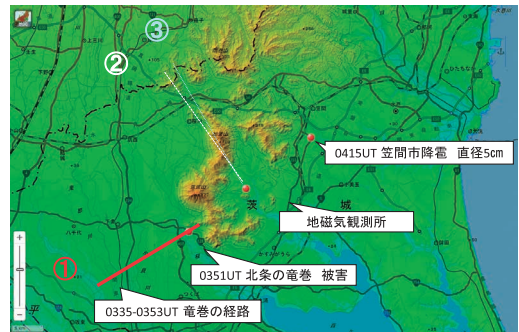
47646 館野 ホドグラフ(00UT, 12UT)

University of Wyoming (2020)

第1図 3事例の降電の写真と気象衛星水蒸気画像とホドグラフ。

と20kmである。時系列は左から右に進む。

第3図の(3)より、レーダーエコー53dBz以上の領域(雷域と想定)は①2012/5/6と②2017/6/16は進行方向20km、直交方向10kmの拡がりがあり、③2018/5/24は進行方向10km、直交方向5kmと小さい。同図(1)より積乱雲の雲頂高度は①と②は13km以上の領域が20×20km広がり、③は12km以上の領域が10×10km程度である。同図(2)より-10°C面高度50dBz以上(橙から赤の部分)は①、②、③は10km程度の領域で、時間と共に、地磁気観測所付近で50dBz以上の領域が急減し、同図(5)によれば降水は地磁気観測所付近の数km程度の狭い地域で観測されている。①2012/5/6は、同図(2)より笠間市付近で50dBz以上の領域の急減が見られ、同図(5)によれば笠間付近で降水が観測されている。同図(4) LIDEN よると雲間放電、対地放電が活発で、地磁気観測所付近では対地放電が見られる。同図(6)によると①は南風の暖気移流、②は東北東風で南北走向に温度傾度があり、③は東南東風で東西走向に温度傾度があり、ともに地磁気



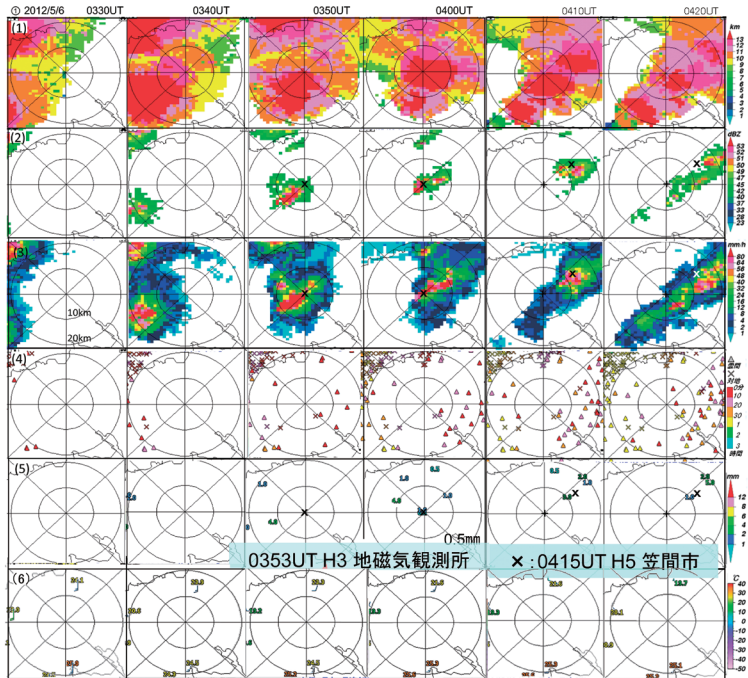
第2図 降電地点 (①2012/5/6と②2017/6/16と③2018/5/24)地磁気観測所、①2012/5/6笠間市)と①竜巻の経路(気象研究所2012)と②、③レーダーエコーの経路および地形図(地理院地図)。

観測所付近で寒気と暖気の境界があった。

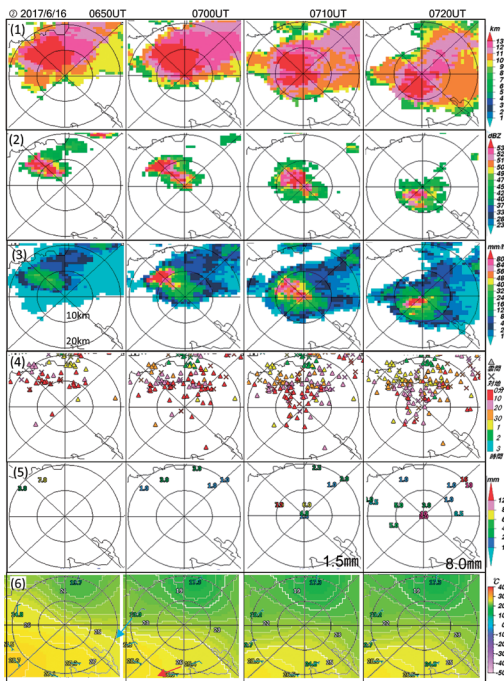
4. 降電を伴う積乱雲の接近と大気電場の変化

第4図は3事例の羽田、成田のドップラーレーダー

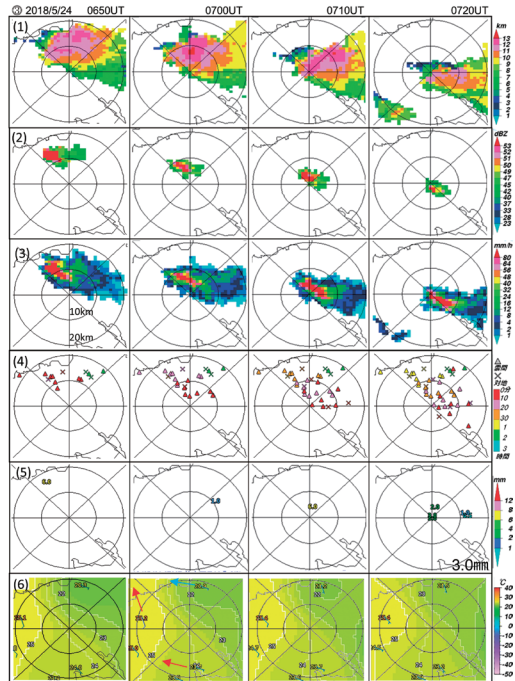
①2012/5/6



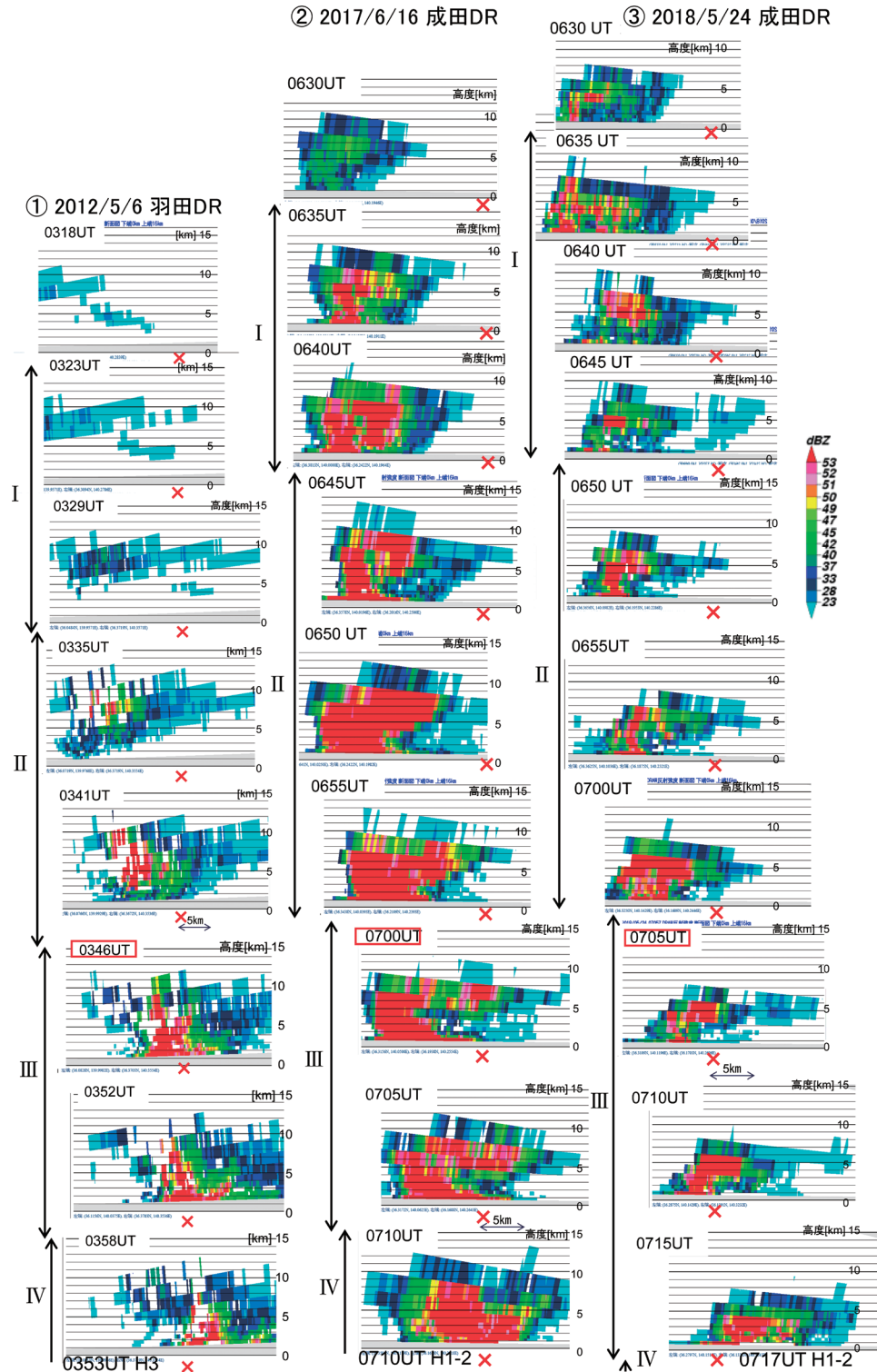
②2017/6/16



③2018/5/24

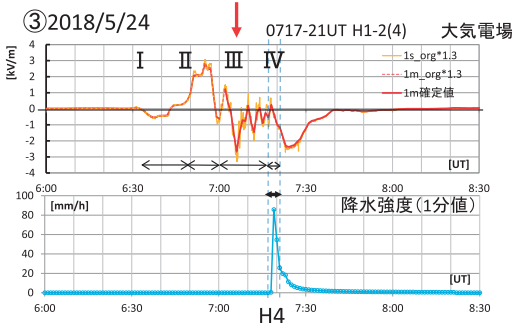
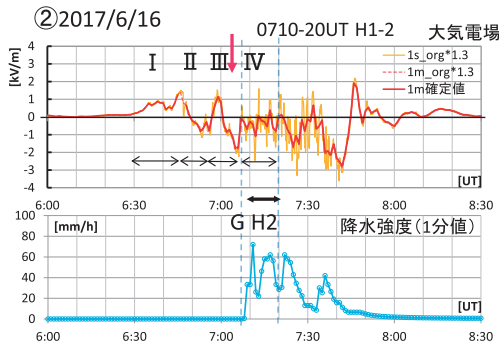
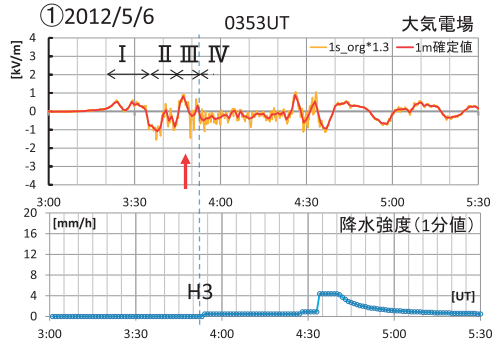


第3図 降電3事例のレーダーエコーと雷と気象データ。(1)レーダーエコー頂高度,(2)-10°C面40dBz以上(高度①約4km,②約6km,③約5km),(3)降水強度(高度約2km),(4)LIDEN(▲雲間放電,×対地放電),(5)雨量(10分値),(6)アメダスの気温と風,中心は地磁気観測所,①の太い×は笠間市,円は半径10kmと20km.時系列は左から右に進む.



第4図 降電3事例のドップラーレーダー進行方向鉛直断面図. ×: 地磁気観測所, 53dBz以上(赤): 雹域と想定, 赤枠の時刻: 第5図のⅢ上空に雹域コアがかかり始めた時刻.

による積乱雲の進行方向の5～6分毎の鉛直断面図で、地磁気観測所の位置を「×」で示す。反射強度の赤い部分は、レーダーエコー53dBz以上(電域と想定)の領域で、赤枠を付けた時刻は、地磁気観測所の上空にその電域コアがかかりはじめた時刻を示す。第5図に降電3事例の大気電場と降水強度(1分値)を示す。降水強度(1分値)は1分毎の降水量(0.5mm単位)



第5図 降電3事例の大気電場と降水強度(1分値)。作業欠測(②2017/6/16 0646-47UT, ③2018/5/24 0701UT)。1m, 1sは参考値(オリジナルデータに平面較正1.3補正)。青点線:霰または降電の降り始めと降り終り, 赤矢印:降電直前の大気電場の+極大から-極小への急減。

の時間変化から求めたものである。大気電場は確定値(1分値)と参考データとして1m(分値:オリジナルデータ)と1s(秒値:オリジナルデータ)に平面較正1.3を掛けた値を記す。②③は保守点検のための作業欠測が1-2分ある。第4図の5～6分毎のドップラレーダーの鉛直構造と第5図の大気電場と降水強度(1分)を合わせてみると、積乱雲の接近に伴い、I上層雲がかかり始めると、大気電場は①②では正、③では負に変化し、II中層雲がかかり始めると、大気電場は①②では負、③では正の極性に变化している。III上空に電域コアがかかり始めると(第4図の赤枠の時刻)、ヴォルト(上昇流域)の領域になり、大気電場は①②③で正の極大となり、直後に電域コアが降下すると大気電場は負の極小に急変している(第5図の赤矢印)。この頃、ドップラレーダーでは後方に電域コアの降下が見られる。第5図の青点線のように、降電の時刻は①②③とも大気電場は0付近で変動している。これらは②③の霰や電の降り始めおよび①②③の降電があった時刻と一致している。

5. 降電をもたらした積乱雲の動態

第6図に①2012/5/6と②2017/6/16および③2018/5/24の成田と羽田ドップラレーダーによるPPI(Plan Position Indicator: ビーム方向の水平面)の反射強度とドップラ速度を示す。①はスーパーセルであり(気象研究所 2012)、中層(高度約6 km)付近で反時計回りの回転がみられ、下層で収束、上層で発散している。②は中層(高度約4 km)付近で反時計回りの回転が見られ、上層(高度約7 km)でドーナツ状のWER(Weak Echo Region)があり、雲頂付近の上層(高度約13km)では発散、下層(高度約1 km)で収束があり、スーパーセルの形状をしている。③は下層(高度約1 km)の進行方向前面でエコーの後方に向かう風が卓越し、後面からエコー前面に入り込んでくる風と収束し、中層(高度約4 km)から上層(高度7 km)の後方では、後面に向かう流れがみられる。上層(高度約7 km)では前述したエコーの前方から後方へ流入してくる風を挟んで、進行方向の後方から前方へ向かう流れが卓越している。

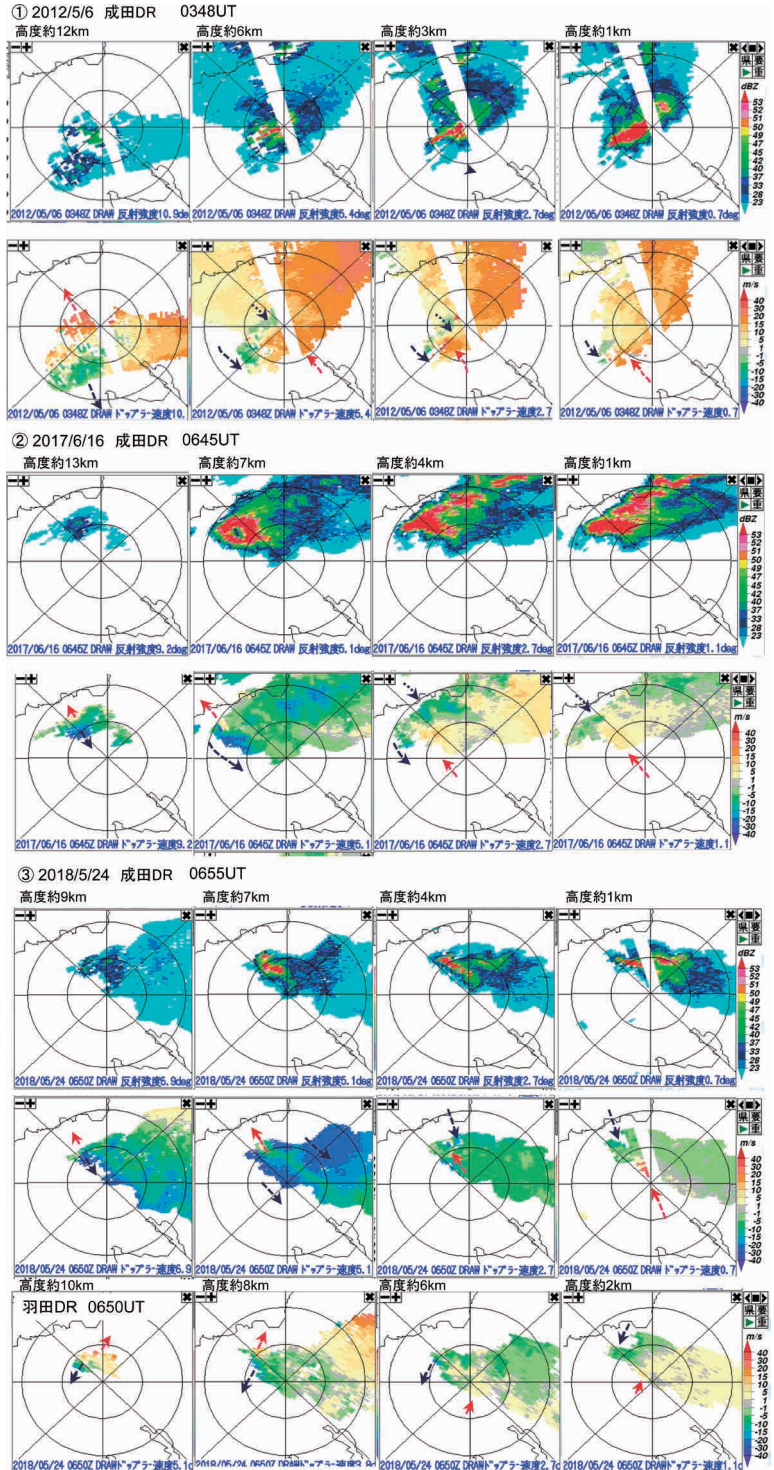
第7図に事例③2018/5/24の鉛直断面図を示す。上段に成田ドップラレーダーによる進行方向の鉛直断面図を、同図下段に羽田ドップラレーダーによる進行方向に直交する方向の鉛直断面図を示す。第7図左図の反射強度からエコーの進行方向後方にヴォルト

(上昇流域)があり、これに直交する方向の後方西端に小さいながら西向きのヴォールト(上昇流域)が見られる。右下図のドップラー速度では上空高度9kmで発散しており、この西向きの流れの下に左下図の53dBz以上の領域(電域コアと想定)が位置する。

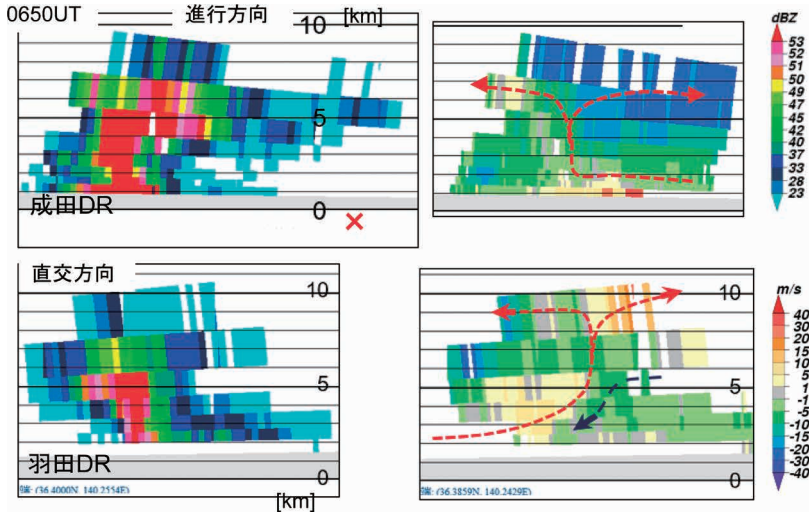
6. 大気電場の変化と雷を伴う雷雲の構造

②2017/6/16と③2018/5/24について、雷雲の電荷構造と地表付近の大気電場の概念図を第8図に示す。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(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。雷雲の接近に伴い、②2017/6/16はI上層雲(+)がかかり始め、地表付近では大気電場が+になり増加し、II次第に雲が厚くなり中層雲(-)がかかり始め、地表付近では大気電場が-の極小となり、IIIヴォールト(上昇流域)の領域に入り上空に電域コアがかかり始めると、地表付近では大気電場が+の極大となり、その直後、電域が下層に降下し始めると地表付近では大気電場が-の極小となり、IV電域が地上に達すると地表付近の大気電場が0付近となり変動がみられた。

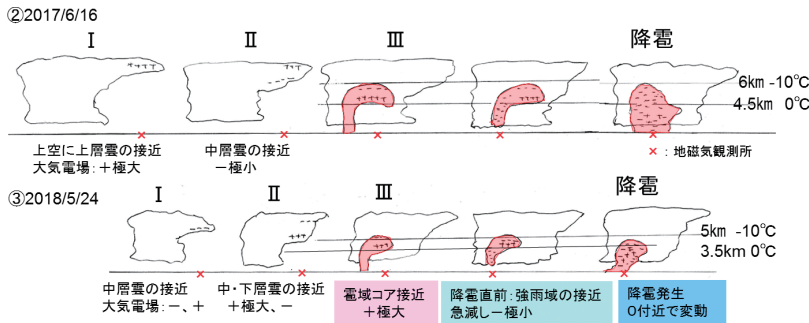
③はI中層雲(-)がかかり始め、地表付近は大気電場が-となり、II中・下層雲がかかると、地表付近は大気電場が+の極大となり、その後-に急変し(この頃、付近でエコーの降下



第6図 降電2事例のドップラーレーダーPPI(ビーム方向の水平面)。①2012/5/6成田DR、②2017/6/17成田DR、③2018/5/24成田DRと羽田DR。上段:反射強度、下段:ドップラー速度、53dBz以上(赤):電域と想定。



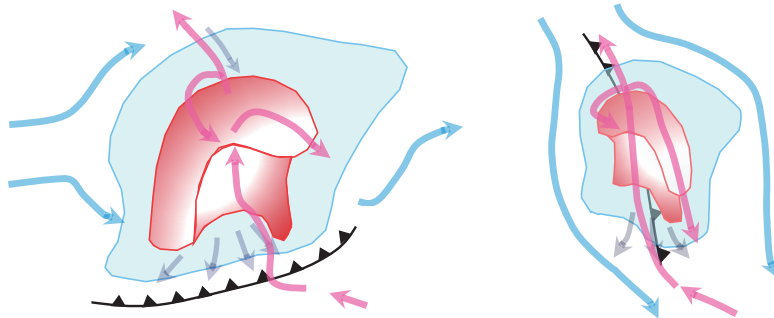
第7図 ③2018/5/24 0650UTにおける進行方向断面(成田DR)と直交方向(羽田DR)の反射強度とドップラー速度。



第8図 雷雲の電荷構造と地上付近の大気電場の概念図。

②2017/6/16 (球状の電)

③2018/5/24 (不規則な形状の電)



第9図 上昇気流と電域コアの模式図(不連続線は地上の温度傾度大の部分)。

あり), IIIヴォールト(上昇流域)の領域に入り, 上空に電域コアがかかり始めると, 地表付近の大気電場は+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一極小に急減し, IV降電の発生とともに地表付近の大気電場は0付近となり変動がみられた。これは, 電域コアは高度4-6km(0°C~-10°C付近)にあり, 上空に電域コアが接近した時には, 電域コア下部の+電荷の影響, その後, 電域コアが降下する時には, 降水と共に電域コアの一電荷の降下の影響が大きくなり, 降電時には-の電荷に+の電荷が合わさって地表面にアースするためと考えられる。ここでは雷雲以外の電荷を考慮しない。

ドップラーレーダーのPPI画像(第6図)およびRHI画像(第7図)でのレーダー反射強度とドップラー速度の解析結果をもとに, ②と③の事例における電域コアの模式図を作成した(第9図)。②2017/6/16は, 中層に反時計周りの回転がみられ, ヴォールトは円形の1つのシステムだったことが推測でき, その中で成長した電は一様な球状の電となったのではないかと考えられる。一方, ③2018/5/24は, 進行方向に細長い小さなシステムで, 幅の狭い領域の中, エコーに向かって下層から上層に上昇流があり, 上層の後方西端で進行方向にまわり込むような流れとなっていたことが推測できる。そして, このような大きな流れの

中、両者が交わるあたりで、過冷却水をまとう電がくっつきあうなどして、不規則な形状の電が形成されたのではないだろうか。また、一部はそれらの電同士がくっついたことで第1図の写真4のような多様な形状の電がみられたのではないだろうか。

7. まとめ

地磁気観測所で発生した3事例の降電を伴う雷雲と大気電場の調査から、第5図のように、I上・中層雲が接近すると地表付近の大気電場は+または-となり、II中層雲が厚くなると地表付近の大気電場は-または+となり、III中層の電域コアが上空にかかるると地表付近の大気電場は+極大となり、直後に急変し-極小となり、この頃付近で電域の降下が見られ(①は-が小さかったが、この付近では降水は0.5mmで降下が小さかったためと考えられる)、IV降電時には地表付近の大気電場は0付近で変動が見られた。IIIの変化は、降電直前に上空の電域コアの接近を検知することに有効と考えられる。

これまでの雷雲の強雨域の際には、上空の+の強雨域が地上に降り、地上ではW型の変化となり強雨域は+となると報告されているが(Simpson and Scrase 1937; 畠山・久保 1946; Kuettner 1950; 高橋 2009)、今回解析した降電3事例については、降電時(すなわち強雨域)には地表付近の大気電場は0付近で大きく変動する形になっていた。雲内での電形成や帯電メカニズム、 -10°C 付近を堺とした電荷分離など、積乱雲の動きと大気電場との関係性にはまだ不明なところも多いと考えられ、今後のシビア現象の研究において、一般レーダーやドップラーレーダーのデータと共に大気電場を解析することで、積乱雲の内部構造を理解する一助となるのではなかろうか。

②と③の降電事例の比較から、スーパーセル型降電については電域コアの形成システムについて様々な報告があるが、③のようにシステムは小さくても、電がくっつきあうことで短時間に局所的に大きな電が形成されることが判った。局所的な短時間強雨発生に至ることも推察され、このような電域コアの形成についても今後の研究が必要と考えられる。

謝辞

雨量はアメダスデータに加えて、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

用させていただきました。気象研究所の吉田 智様、元気象研究所の高谷美正様、地磁気観測所の齋藤 誠 所長にはご助言をいただき、電の写真は地磁気観測所の職員(当時を含む)の方々のご協力により収集することができました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 足立 透, 2019: 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.
- Browning, K. A. and G. B. Foote, 1976: Airflow and hail growth in supercell storms and implications for hail suppression. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 499-533.
- Chisholm, A. J. and J. H. Renick, 1972: The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. *Alberta Hail Studies, Research Council of Alberta Hail Studies Rep.* (72-2), 24-31.
- 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, 2021: Difference between lightning activities in thunderstorm cells with and without hailfall in western Tokyo. *J. Atmos. Electr.*, 40, 10-31.
- 畠山久尚, 久保時夫, 1946: 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.
- 畠山久尚, 1970: 雷の科学. 河出書房新社, 259pp.
- 林 修吾, 吉田 智, 楠 研一, 2015: 2014年6月24日に調布・三鷹に激しい降電・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.
- 平野烈介, 1927: 熊谷に於ける降電観測. *気象集誌*, 5, 189-190.
- 今道周一, 菊池繁雄, 1950: 柿岡附近の雷による急変化電場に就いて. 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.
- 石原正仁, 2012: 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.
- 石原正仁, 2020: 降電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.
- 気象研究所, 2012: 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).
http://www.jma.go.jp/jma/press/1205/11c/120511tsukuba_tornado.pdf (2021. 9. 20閲覧)
- 北川信一郎, 1996: 大気電気学. 東海大学出版会, 200pp.
- 高知大学, 2018: 気象情報頁. <http://weather.is.kochi-u>

- ac.jp/ (2018. 5. 25閲覧)
- Kuettner, J., 1950: The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds. *J. Meteor.* **7**, 322-332.
- 熊本真理子, 2022: 地磁気観測所における大気電場と雷雲の関連の調査—降電4事例(2012/5/6, 2014/4/4, 2017/6/16, 2018/5/24)—. 地磁気観測所テクニカルレポート, **17**, 1, 1-24 (投稿中).
- 楠 研一, 1999: 1996.7.15下館ダウンバーストの前兆現象. 気象研究ノート, (57), 125-127.
- 道本光一郎, 紫村孝嗣, 松井敏明, 河崎善一郎, 1996: 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.
- 森 真理子, 高谷美正, 2004: 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.
- 中村 一, 森 真理子, 1999: 1996年7月15日の下館・つくばダウンバースト. 気象研究ノート, (57), 111-123.
- Rakov, V. A. and M. A. Uman, 2005: *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press.
- 出世ゆかり, 坪木和久, 2006: 非定常で短寿命の対流セルをもたらす降電の水平規模と雷の大きさ—2002年5月26日の阪神間の降電事例について—. 天気, **53**, 871-877.
- Simpson, G. C. and F. J. Scrase, 1937: The distribution of electricity in thunderclouds. *Proc. Roy. Soc. A*, **161**, 309-352.
- 高橋 劭, 2004: 雷雲電荷発生機構—霰の電荷符号逆転の謎. 天気, **51**, 7-15.
- 高橋 劭, 2009: 雷の科学. 東京大学出版会, 271pp.
- Toya, T. and S. Tsunomura, 2008: Discussion of variation patterns of atmospheric electricity. Technical Report of the Kakioka Magnetic Observatory —Selected Translations—, **6**, 11-22.
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, 2010: 気象レーダーによる雹(ひょう)の監視の試み. 天気, **57**, 646-650.
- Waldvogel, A., B. Federer and P. Grimm, 1979: Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 1521-1525.
- 山下浩史, 2007: 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.
- 吉田公一, 谷 善典, 岡田 京, 2006: 降電時のレーダー3次元データの特徴. 平成18年度東京管区調査研究会誌.