

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月17日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740312

研究課題名（和文）落雷特性を規定する雷雲の雲微物理構造とその形成過程に関する観測的研究

研究課題名（英文）Microphysical Structure and its Formation Process Relating to Cloud-to-Ground Lightning Characteristics of Thunderclouds

研究代表者

出世 ゆかり（YUKARI SHUSSE）

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 水・土砂防災研究ユニット・主任
研究員

研究者番号：80415851

研究成果の概要（和文）：落雷活動は、積乱雲内の降水粒子の種類とその時空間分布に密接に関係している。本研究では、偏波レーダー観測データと落雷観測データを用いて、夏季に観測された雷雲のうち顕著な落雷特性を示した事例について雷雲の雲微物理構造とその時間発展を詳細に解析した。負極性落雷が卓越した活発な雷雲では、雷雲発生後 10 分程度で落雷活動が開始した。また、落雷が不活発だった雷雲では雨滴が強降水域を構成していたのに対し、落雷が活発だった雷雲の強降水域は霰が主な構成粒子であった。さらに、夏季にはまれな正極性落雷が卓越した雷雲では、雷雲中層に湿った霰が広範囲に分布しそれらが正に帯電したことが、正極性落雷の発生に重要であったと示唆された。

研究成果の概要（英文）：Lightning activity is closely related to the hydrometeor types and those space-time distribution within thunderclouds. In this study, several thunderclouds which showed the distinctive characteristics of cloud-to-ground (CG) lightning were examined to reveal their microphysical structures and evolutions using the X-band polarimetric radars and the lightning location systems. A thundercloud with active -CG lightning started its lightning activity approximately 10 minutes after its occurrence. Polarimetric measurements indicate that a major hydrometeor within its strong echo region was graupel, while it was rain in a non-active thunderstorm. In a thunderstorm dominated +CG lightning, which is uncommon in warm season, it is considered that the positively charged wet graupel in the middle level of the cloud contributed to the generation of the +CG lightnings.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	24,805	7,441	32,246
2012年度	575,195	172,558	747,753
総計	2,400,000	719,999	3,119,999

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 ・ 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：雷雲、落雷特性、雲微物理構造、偏波レーダー

1. 研究開始当初の背景

(1) 落雷は積乱雲に伴う極めて激しい自然現象であり、大規模な停電や火災のみならず人身事故をも引き起こす。室内実験などの研究から、雷雲内の降水粒子とその分布が雷雲内の電荷構造や落雷特性と密接に関わっていることが示唆されてきたが、雷雲がもたらす落雷の極性や落雷数は雷雲によっても大きく異なり、落雷特性(落雷極性や落雷数)を規定する雷雲の雲物理構造には未解明の点が多い。

(2) 海外では、近年、雷雲内の降水粒子分布の情報が得られる偏波レーダーと、落雷の位置、極性などを測定する落雷位置標定システムなどを用いて、雷雲の3次元的電荷構造とその形成過程の解明を目的とした観測プロジェクトが実施されている。特にアメリカで頻繁に発生するスーパーセルなど、激しく発達する雷雲事例が集中的に研究され、研究成果が発表されつつある。日本では大気環境場の特徴の違いから、アメリカで観測されるようなスーパーセルの発生は稀であるが、夏季熱雷や豪雨に伴い非常に多くの落雷が発生する。しかし日本国内での偏波レーダー観測の歴史は浅く、雷雲の構造そのものを対象とした偏波レーダー研究はこれまでほとんど実施されていない。近年、国内でも偏波レーダーの導入が進み、雷雲内の降水粒子の3次元分布と気流の情報が得られるようになってきた。

2. 研究の目的

濃尾平野および関東平野で観測された夏季の雷雲を対象とし、落雷位置標定システムと偏波レーダーの観測データを用いて、落雷特性を規定する雲微物理構造とその形成過程を明らかにすること。

3. 研究の方法

本研究では、偏波レーダーデータと落雷観測データを用いて解析を行った。落雷特性を規定する雲微物理構造とその形成過程を明らかにするため、解析には、顕著な雷雲特性(1. 負極性落雷が卓越、2. 正極性落雷が卓越、3. 落雷数が少ない)を示す事例を選択した。ここでは下記の解析事例について報告する。

(1) 濃尾平野で 2008 年と 2009 年の暖候期(6 月から 10 月)に発生した雷雲事例のうち、正極性落雷が著しく卓越していた対流雲事例。解析には、名古屋大学の 2 台の X バンド偏波レーダーと、中部電力より提供を受けた落雷位置標定システムのデータを用いた。

(2) 2012 年 8 月 17 日に関東平野で発生した多

数の雷雲のうち、落雷が活発だった事例と不活発だった事例(いずれも負極性落雷が卓越)。解析には、防災科学技術研究所の 2 台の X バンド偏波レーダーで取得した短時間ボリューム観測データと、フランクリンジャパンの落雷位置標定システムのデータを利用し、雷雲構造の比較を行った。

4. 研究成果

(1) 正極性落雷が卓越した雷雲の雲微物理構造

① 2008 年と 2009 年の暖候期(6 月から 10 月)に中部電力の落雷位置標定システムで観測された全落雷の極性比を調べたところ、その 70%が負極性落雷であった。またほとんどの落雷日において、孤立積乱雲または対流性降水システムが発生していた。その中で、2009 年 10 月 8 日に台風 0918 号の中心付近で発達した対流雲に伴う落雷は、著しく正極性落雷の割合が高かった。そこで、この雷雲事例について詳しく調査した。

② 図 1 に 2009 年 10 月 8 日の台風 0918 号の経路とその日の全落雷の位置分布を示す。台風は紀伊半島の東側海上を北上し、勢力が強い状態で 05JST 過ぎに愛知県に上陸し、偏波レーダー観測領域を通過した。台風の通過に伴い、紀伊半島東側斜面全域に強い降水が観測された(図省略)が、落雷は、伊勢湾北部から愛知県西部にかけての 40km(東西) x 50km(南北)の領域に集中していた。

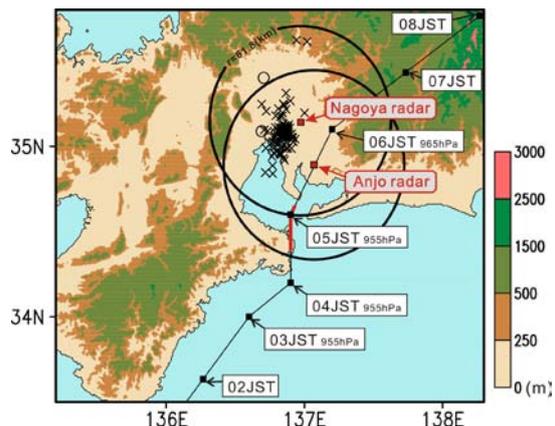


図 1 台風 0918 号の経路(気象庁ベストトラック)と 2009 年 10 月 8 日の落雷分布(x: 正極性落雷、o: 負極性落雷)。円は名古屋市(名古屋大学)と安城市(国土交通省中部地方整備局安城出張所)に設置した名古屋大学 X バンド偏波レーダーの観測範囲。

10 月 8 日の全落雷数は 94 個で、そのうち 92 個が 0435JST から 0505JST の 30 分の間に

発生し、0450JSTには1分あたりの落雷数が12個に達した(図2)。また、図2に示した落雷のうち、97%もの落雷が正極性落雷であり、暖候期としては非常に特殊な落雷特性であったことが分かる。

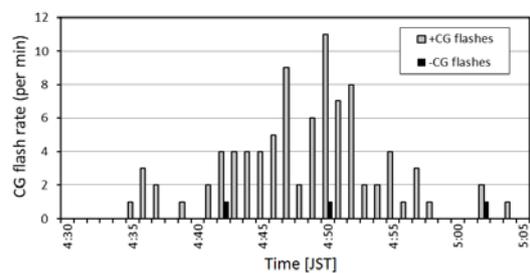


図2 図1の領域における2009年10月8日0430JSTから0505JSTの落雷頻度。

③落雷開始時刻前後の気象庁レーダーによる降雨強度分布と落雷位置を図3に示す。0430JSTには台風中心の北西側に2つの強い降水域がみられた(図3a)。このうち北側に位置する降水域で、0435JST以降活発な落雷活動がみられた(図3b)。この降水域におけるエコー頂高度は、落雷開始時刻には14kmを超えており、活発な落雷活動は台風中心付近で発達した一つの対流雲に伴って発生したことが分かった。

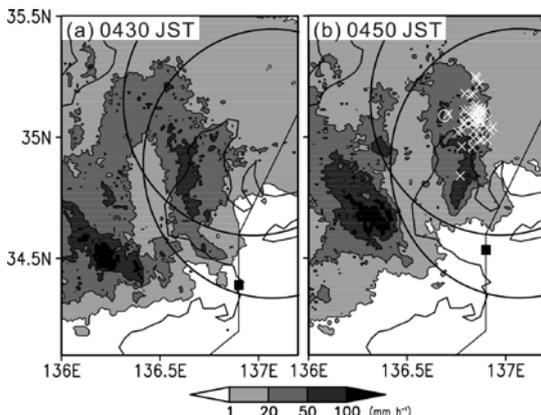


図3 (a)0430JSTと(b)0450JSTの、気象庁レーダー降雨強度分布とレーダーデータの時刻を中心とする10分間に観測された落雷位置(x:正極性落雷、o:負極性落雷)。黒四角は気象庁ベストトラックから内挿して求めた台風中心位置。

④名古屋大学の2台の偏波レーダーは、この対流雲の3次元観測に成功した。この観測データを用いて、対流雲内の降水粒子分布の推定とデュアルドップラーレーダー解析を行った。粒子タイプはファジーロジックにより推定し、パラメータは偏波レーダーで得られるレーダー反射強度(Z_{H})、レーダー反射因子差(Z_{DR})、偏波間相関係数(ρ_{HV})、偏波間位相差変化率(K_{DP})と、03JSTの潮岬のゾンデデータから得られた温度の鉛直分布を用いた。降

水種別とメンバーシップ関数はKeenan(2003)のものを使用した。ただし、Keenan(2003)のメンバーシップ関数はCバンド用に開発されたものであるため、送信電波の波長に反比例する K_{DP} については、メンバーシップ関数をXバンド用に修正した。

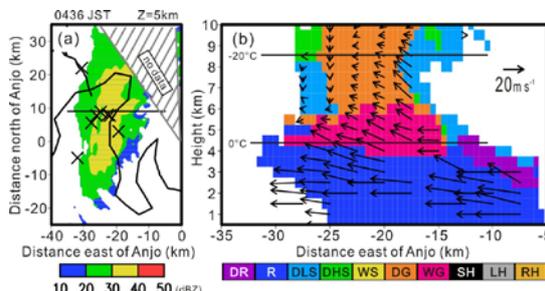


図4 (a)0436JSTの高度5kmのレーダー反射強度と0436JSTから0442JSTに発生した落雷(x:正極性落雷)の水平分布。(b)降水粒子タイプ(カラーシェード)と風速場(矢印)の鉛直分布。粒子タイプは、霧雨(DR)、雨(R)、低密度の乾雪(DLS)、高密度の乾雪(DHS)、湿雪(WS)、乾いた霰(DG)、湿った霰(WG)、小さい雹(SH)、大きい雹(LH)、雨雹混合(RH)。

図4に、落雷開始直後の対流雲の構造を示す。図4aから、正極性落雷は対流雲の降水の中心付近で発生していることが分かる。図4bはエコー頂高度が高く、落雷の発生数が多かった対流の中心付近の鉛直断面である。対流雲の下層から中層にかけて、広い上昇気流域が存在しており、上昇気流速度は最大で 10 m s^{-1} に達していた。高度4kmから6km付近には湿った霰の領域がみられ、この領域は、0448JSTには高度9kmまで広がった。これらの結果は、落雷発生期間には、ウェットグロースの過程にある湿った霰が $0\sim -20^\circ\text{C}$ の領域に広がっていたことを示唆している。過去の研究では、ウェットグロースの状態にある霰は着氷電荷分離機構によって正に帯電することが指摘されている。従って、この対流雲では、対流中心の $0\sim -20^\circ\text{C}$ 高度付近に湿った霰が広がり正に耐電したことで、多くの正極性落雷が短期間に発生したと考えられる。

(2) 落雷活発事例と不活発事例の雲微物理構造と時間発展の比較(雷雲の高時間分解能観測)

①2012年8月17日には、関東地方で5,000個を超える非常に多くの落雷が発生した。そのうち89%が負極性落雷であった。神奈川県海老名市と千葉県木更津市に設置した防災科学技術研究所の偏波レーダーは、この日、2分間隔の高時間分解能3次元観測を実施した。観測に成功した雷雲のうち、落雷が不活発だった雷雲(雷雲A)と活発だった雷雲(雷

雲 B) の 2 事例の雷雲の構造を調べた。特に、雷雲の発生初期から落雷最盛期までの偏波パラメーター構造の時間発展の違いに注目して解析を行った。

雷雲 A の落雷総数は 6 個で、全て負極性落雷であった。一方、雷雲 B の落雷総数は 226 個で、そのうち 213 個 (94%) が負極性落雷であった。いずれも孤立して発生し、雷雲の水平規模は 15km~20km 程度であった。

②雷雲 A (落雷不活発事例)

図 5 に雷雲 A の発生(ここでは 20dBZ 以上の領域の出現を指す)から約 1 時間の、落雷数と雷雲構造の時間変化を示す。雷雲の発生は 0252UTC で、エコー頂高度はその後徐々に発達した(図 5b)。0322UTC (雷雲発生から 30 分後)には高度 5km 付近で 60dBZ を超える領域が観測された。落雷は 40dBZ のエコー頂が高度 8km を超えた直後の 0328UTC (雷雲発生から 36 分後)から約 10 分間続いたが、2 分あたりの落雷数は最大で 2 個程度であった(図 5a)。図 5c に示されるように、60dBZ 以上の強エコー域では、最大で 4dB を超える大きな Z_{DR} 値が観測された。このことから、落雷が不活発だった雷雲 A で落雷開始直前に 0°C 高度付近に存在した強エコー域は、主に雨滴で構成されていたと考えられる。

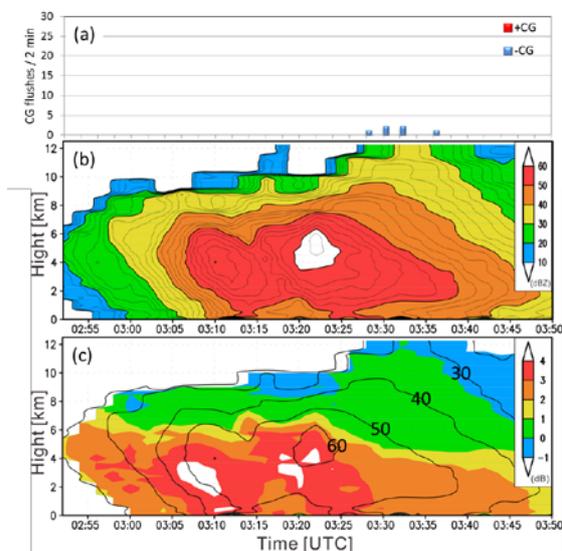


図 5 雷雲 A の (a) 落雷数、(b) 各高度最大 Z_h の鉛直プロファイル (c) 各高度最大 Z_h 位置の Z_{DR} の鉛直プロファイル(カラーシェード)の時間変化。(c) の等値線は最大 Z_h の鉛直プロファイル。示した期間は雷雲発生から 1 時間。

③雷雲 B (落雷活発事例)

0644UTC に発生した雷雲 B では、発生後約 10 分で Z_h の最大値が急激に増加し、0656UTC (雷雲発生から 12 分後)には 60dBZ に達した。またこの時間に落雷活動も開始した

(図 6a、6b)。2 分間の落雷数は、0714UTC (雷雲発生から 30 分後)には 27 個に達し、落雷活動は 0734UTC まで約 40 分間続いた。 Z_h の最大値は 62dBZ と、雷雲 A の値と大きな違いはなかったが、図 6c にみられるように、0656UTC に出現した強いエコー域の Z_{DR} 値は最大で 2.6dB であり、雷雲 A の強エコー域よりも小さかった。また落雷最盛期の 0714UTC の強エコー域では、 Z_{DR} は 1dB 弱とさらに小さかった。このことから、雷雲 B の 0°C 高度付近の強エコー域を構成する降水粒子は、雨滴よりも球形に近い霰が卓越していると考えられる。

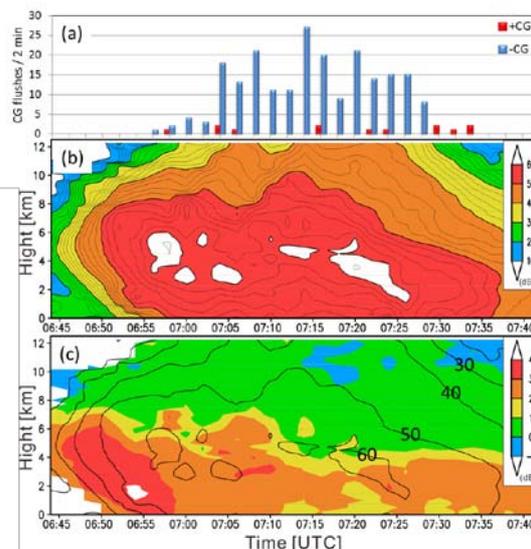


図 6 図 5 と同じ。ただし、雷雲 B について。

④このように、偏波レーダーの高時間分解能 3 次元観測により、落雷が不活発だった雷雲と活発だった雷雲それぞれにおいて、雷雲発生から落雷活動開始までの時間が高精度でとらえられ、雷雲の発達初期における両者の発達速度の違いが明らかとなった。特に、落雷が活発だった雷雲では、発生後 10 分程度で落雷が開始しており、孤立して発生した雷雲でも、落雷をもたらす雷雲内の電荷分離構造が非常に短時間で形成されることが分かった。さらに、偏波パラメーターの解析により、雷雲の強エコー域を占める主な降水粒子は、前者では雨滴、後者では霰と考えられ、雲微物理構造の違いも示された。

(3)まとめと今後の課題

本研究では、複数台の偏波レーダー観測およびそれらの高時間分解能観測を実施し、顕著な落雷特性を示す雷雲それぞれの雲微物理構造とその時間発展を明らかにすることができた。このような詳細な偏波レーダー観測データにより雲微物理情報を含めた雷雲の内部構造を示した研究はこれまで国内ではほとんど報告がない。また海外でもそれほ

ど多くないため、雷雲の構造に関する新しい知見を得ることができた。しかし本研究では、偏波レーダーによる雷発生予測あるいは雷危険度予測の指標を構築するには至らなかった。現在の雷予測技術においては、特に雷発生前はレーダーによる雷雲の監視が主である。落雷予測の捕捉率は高い一方で空振り率も高く、より信頼性の高い雷危険度予測の指標の構築が期待されている。本研究の成果は、偏波レーダーの高時間分解能観測が、雷危険度予測における技術開発に大きく貢献できる可能性を示した。今後は、雷雲内の降水形成過程、電荷分離過程、さらには雷放電による雲内空間電位差の中和過程を含めた総合的な雷現象の理解を促進するため、偏波レーダー観測に加えて、地上や飛行機での降水粒子観測、さらには雷放電経路の3次元観測が重要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

①Morotomi, K., T. Shinoda, Y. Shusse, T. Kouketsu, T. Ohigashi, K. Tsuboki, H. Uyeda, and I. Tamagawa: Maintenance mechanisms of a precipitation band formed along the Ibuki-Suzuka Mountains on September 2-3, 2008., J. Meteor. Soc. Japan, 査読有, **90**, 2012, pp. 737-753.

②Shusse, Y., N. Takahashi, K. Nakagawa, S. Satoh, and T. Iguchi: Polarimetric radar observation of the melting layer in a convective rainfall system during the rainy season over the East China Sea., J. Appl. Meteor. Climatol., 査読有, **50**, 2011, pp. 354-367.

[学会発表] (計5件)

①櫻井南海子・清水慎吾・出世ゆかり・岩波越・前坂剛・鈴木真一・三隅良平: XバンドMPレーダと広帯域VHF干渉計を用いた夏季に発生する雷雲の3次元観測—MPレーダを用いた雷監視システム構築に向けた研究. 日本気象学会, 2012年10月3日, 北海道大学.

②出世ゆかり・眞木雅之・岩波越・三隅良平・鈴木真一・加藤敦・前坂剛・清水慎吾・平野洪賓・櫻井南海子・木枝香織: 2010年7月5日に東京都北部に豪雨をもたらした降水システムにおける降水コアの振る舞い. 日本地球惑星科学連合, 2011年5月22日, 幕張メッセ.

③出世ゆかり・眞木雅之・岩波越・三隅良平・

鈴木真一・加藤敦・前坂剛・清水慎吾・平野洪賓・櫻井南海子・木枝香織: 2010年7月5日に東京都北部に豪雨をもたらした降水システムの雨滴粒径分布と降水セルの振る舞い. 日本気象学会, 2011年5月21日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.

④Shusse, Y., K. Tsuboki, T. Ohigashi, and H. Uyeda: Cloud-to-ground lightning characteristics and microphysical structure of a convective cloud near the center of Typhoon Melor., International Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia (ICMCS-VIII), 2011年3月9日, 名古屋大学.

⑤出世ゆかり・坪木和久・大東忠安・上田博: 台風0918号の中心付近で局所的な落雷をもたらした降水雲の特性. 日本気象学会, 2010年5月15日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

出世 ゆかり (SHUSSE YUKARI)

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 水・土砂防災研究ユニット・主任研究員

研究者番号: 80415851