

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350514

研究課題名(和文) 三次元雷放電点観測および偏波レーダーによる高精度落雷発生予測手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of high accurate lightning forecast by using 3-dimensional lightning observation system and polarimetric radar

研究代表者

林 修吾 (Hayashi, Syugo)

気象庁気象研究所・予報研究部・主任研究官

研究者番号：20354441

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：雷放電の発生には、発達した積乱雲内で生成した霰の存在が重要であることが知られているが、その霰の存在位置や電荷量と雷放電発生の関係は明らかになっていなかった。本研究では、高精度な落雷予測手法の開発のために、三次元雷放電点観測および偏波レーダー観測を用いることで、雷雲内での霰量の変化を三次元的にとらえ、その変化をもたらした上昇気流の存在を明らかにした。その結果、雷放電の開始には雲内に霰が存在するだけでなく、電荷を蓄積するのに十分な体積(数十立方km)が必要であることを明らかにした。これらの結果を用いることで雷放電予測精度を向上した。

研究成果の概要(英文)：It is well known that existence of graupel in a thunderstorm is very important for lightning initiation. But the location and electrical charge of graupel in a thunderstorm is not clarified. In this study, using 3-dimensional lightning observation system and polarimetric radar data, the characteristics of graupel volume and upward velocity in a thunderstorm are clarified. As a result, it is revealed that several tens cubic kilometer of graupel volume is needed for a lightning initiation. Based on these results, lightning forecast is improved.

研究分野：大気電気

キーワード：雷観測 偏波レーダ情報 積乱雲 シビアストーム 雷災害

### 1. 研究開始当初の背景

落雷による人的・経済的被害の発生は、近年の高度に電子化された機器類やその製造工程(2012年9月18日中部地方での落雷による電圧低下による工場生産ライン停止など)、さらに航空機その他の交通機関の運行(同年10月14日千歳空港の停電など)に大きな影響を及ぼしている。また2012年には、落雷による人的被害も多く発生した(同年8月18日大阪長居競技場で10人が死傷、同日にはほかにも人的被害や鉄道ダイヤの乱れ多発など)。現在の気象庁による雷注意報や雷ナウキャストは、広いエリアや長い時間スケールを対象に雷発生ポテンシャルをあらわしているが、雷災害を防ぐために、より細かい時間・空間精度で高い精度の雷予測へも社会的ニーズが存在する。しかし現時点ではそのような高精度の発雷予測技術は存在しない。

これまでによく知られている発雷の直前予測手法としては、Gremillion and Orville (1999) による気象レーダによる反射強度を利用した「-10 高度に 40dBz のレーダエコーがあらわれてから平均 7.5 分後に発雷する」という指標がある。この指標はその後の多くの研究においても参考にされているが、有効な閾値には幅があり、事例・季節・気象条件に左右されるため常に高い予測精度を示すことは難しい (Yang and King 2010, Mosier et al. 2011 など)。

このような状況を改善するためには、レーダ反射強度だけでなく、雷放電についての大気電氣的知見を付加したより高精度な発雷予測技術の確立が必要とされる。

### 2. 研究の目的

落雷による人的・経済的被害の低減を目的として、三次元雷放電点観測および偏波レーダ観測により、雷放電および落雷が発生する物理的条件(大気の絶縁破壊と大地との接地)が出現するために必要な積乱雲内の電氣的構造の気象学的・大気電氣的学的条件を明らかにし、リードタイム(予測時間)が1時間以内での時間的・空間的に高精度な落雷発生予測手法を確立する。

### 3. 研究の方法

VHF 帯を用いた三次元雷放電位置標定装置による観測で、積乱雲内で雷放電が開始する位置およびその進展を正確に捉える。同時に、偏波レーダ観測により、発雷をもたらした積乱雲の反射強度分布および偏波パラメータ分布を立体的に観測し、積乱雲内の粒子判定とその分布を推定する。雷放電観測と粒子分布推定から、積乱雲内の帯電粒子分布とその

帯電量の大きさを見積もる。積乱雲の発達プロセスと粒子分布を対応させることで、雷放電開始前に放電条件が満たされているかを判定し落雷予測を行う。

また、被害をもたらすような雷放電の発生状況を把握するために、これまでの有人観測に比べ時間的・空間的に均質なデータが得られる電磁波を用いた雷観測データを用いて、季節的・時間的な雷発生頻度を調査する。

三次元雷放電標定システムは東京都三鷹市と調布市に設置されており、偏波レーダデータは新横浜および埼玉に設置された X バンド二重偏波ドップラーレーダを使用し、三鷹市・調布市周辺で発生した雷雲についてその雷活動と積乱雲の発達を詳細に解析する。

### 4. 研究成果

#### (1) 発雷発生状況の把握

日本で発生する雷について、その頻度および季節分布について調査を行った(図1)。

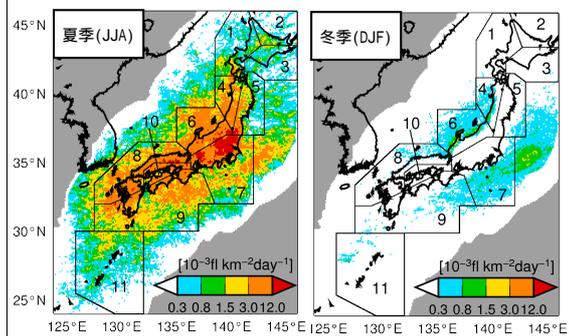


図1. 気象庁 LIDEN による 2002-2008 年の対地放電頻度分布 ( $10^{-3}$  Flash/ $\text{km}^2/\text{day}$ )。左図) 夏(JJA), 右図) 冬(DJF)

夏季の内陸部での極大、冬季の北陸地方沿岸での極大は先行研究と一致する結果が得られた(図1)。さらに詳細に海岸線からの距離で対地放電密度を分類した結果、冬季は日変化はなく海岸線からの距離が内陸側 20km に明瞭な極大を持ち、夏季は 60km 以上内陸側で日本時間 15-18 時に極大を持つことが示された。また、冬季の太平洋側の黒潮流域でも日本海側の冬季雷同様に対地雷が発生していること、さらに「一発雷」も同様に発生していることがはじめて確認された。

#### (2) 孤立積乱雲での発雷に伴う VHF 放電点分布と偏波パラメータの評価および雷放電路進展の様相

2013 年 8 月 21 日に東京都調布市付近で発達した積乱雲について、その発達過程および雷活動を偏波レーダおよび三次元雷標定装置の観測結果を用いて詳細に解析した。その

結果，以下のような新たな知見が得られた．  
 偏波レーダ観測から推定した雷雲内の高度別霰体積は，発雷開始の約 20 分前から 0 より低温層で  $10\text{km}^3$  以上に増大し，時間と共に高度が上昇していくことが確認された（図 2 上図）．さらにデュアルドップラー解析により雷雲内の  $10\text{m/s}$  を超える上昇気流体積の時間変化を調べると，霰体積が増加する高度よりやや高い高度で同様の時間変化傾向を示すことが明らかとなった（図 2 下図）．雷活動最盛期には，霰体積・上昇流体積共に最も高い高度まで伸展し，その後，雷活動が弱まると共に高度が低下していく様子が見られた．これらは，上昇流による霰の活発な生成と霰粒子の落下とそれに伴う着氷電荷分離

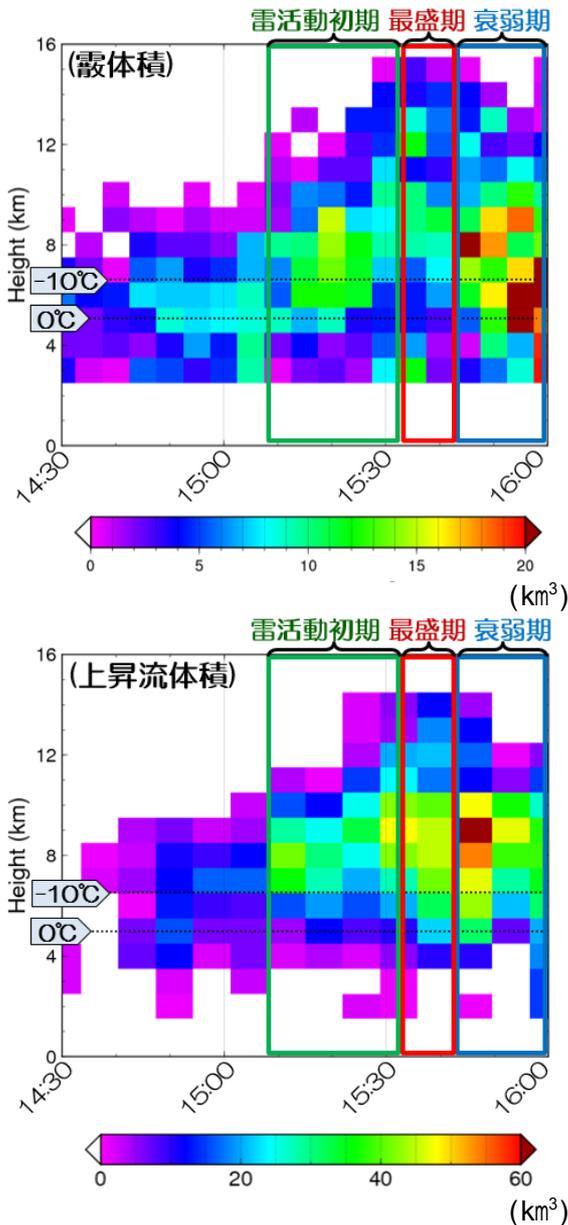


図 2．2013 年 8 月 21 日に発生した積乱雲の霰体積(上図)及び  $10\text{m/s}$  を超える上昇気流体積(下図)の高度-時間変化．横軸は日本時間．カラーは体積( $\text{km}^3$ )を表す

が効率的に働くことで，粒子の帯電及びその結果としての雷放電が発生していることを示している．また雷活動の 20～30 分前からこれらの特徴が捉えられたことから，リアルタイムでの雷予測に有効な指標となり得る事を示している．

一連の雷放電の最初の VHF 放電開始点は，偏波レーダ観測による偏波パラメータの特徴から，最も水物質の多い反射強度極大域ではなく，その周辺の雲氷域との間に位置していることが明らかとなった（表 1）．その後放電路は，各粒子の存在する領域あるいは地上へ伸びていく事が確認された．

別の事例調査として，2014 年 6 月 24 日に三鷹市・調布市付近で発生した非常に激しい降雹（降雹の深さ  $10\text{cm}$  以上）を伴った積乱雲についても，同様に偏波レーダおよび三次元雷標定装置による観測データから，その特徴の解析を行った．ここでも同様に，雷活動開始前に，0 より低温域で霰体積の増加が観測され，上層への伸展及びその量の増大が確認された．この事例では，地表で激しい降雹が確認されたことから，偏波レーダ観測による霰領域との比較を行い，その領域が地上で降雹が観測された領域と一致していることを確認した．

表 1．雷放電開始点付近で観測された偏波パラメータ値．0 より低温域，0 付近で場合分けした．

T ( )	Ze (dBZ)	Zdr (dB)	Kdp ( $^{\circ}/\text{km}$ )	ρhv
<0	20 ~ 35	0 ~ 1.0	0 ~ 1.0	0.90 ~ 0.96
0	25 ~ 45	0 ~ 3.0	0 ~ 4.0	0.85 ~ 0.96

### (3) 雷放電予測

前述の 2 事例の雷雲の詳細な解析結果から，最初の雷放電発生時の霰体積は  $20 \sim 60\text{km}^3$ ，対地放電開始から最盛期では  $50 \sim 100\text{km}^3$  程度で，その時の霰域の中心高度は  $6 \sim 8\text{km}$  であったことがわかった．先行研究によると，一般的な雷雲内での大気の絶縁破壊強度は（乾燥空気の絶縁破壊強度より小さくなり）一気圧のもとで約  $300\text{kV/m}$  程度，空間電荷密度が  $1\text{C}/\text{km}^3$  とされていることとおおよそ整合する結果が得られた．

個々の積乱雲を詳細に解析することで，前述の 2 事例のような雷放電発生過程を追うことは可能だが，リアルタイム性に欠ける．また X バンド偏波レーダも現在展開中で日本全土をカバーできていないため霰粒子情報を常に取得するのは困難である．そこで，現在リアルタイムで利用可能な情報に基づいた手法として気象庁現業レーダの高度別レーダ反射強度から算出した個々の雷雲の 0 以下の  $40\text{dBZ}$  体積を霰の指標とすることで，ど

の程度の性能が得られるのか調査した。

統計的な性能を調査するために 2015 年 7、8 月の 2 ヶ月を対象に、関東域 (36~38°N, 138.5~140.0°E) で 10 分毎のレーダデータから 1351 個の積乱雲を発雷の有無にかかわらず抽出し、各 10 分間での発雷数を比較した(図 3)。観測されたレーダ反射強度体積は雷放電数と強い相関(相関係数 0.73)をもち、本手法が高い性能を持つことが示された。

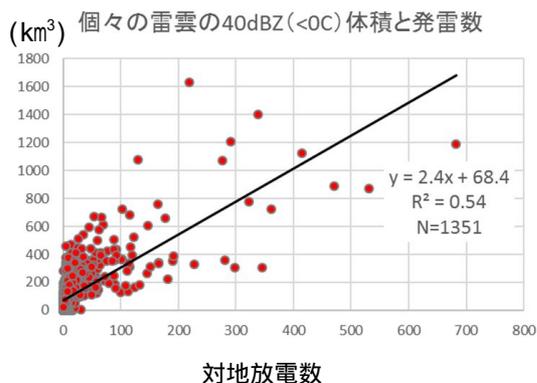


図 3.0 以下の 40dBZ 体積と雷放電数の関係 (2015 年 7、8 月関東域)

#### 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 3 件) 3 件とも査読有り

1. 林修吾, 丸井知鶴, 2016: 「一発雷」の発生頻度と季節変化. Journal of Atmospheric Electricity, 36, 13-22. doi:10.1541/jae.36.13
2. Syugo Hayashi, 2016: Statistical Relationships of Precipitation Rate and Wind Gust Intensity to Lightning Activity in Japan. Journal of Atmospheric Electricity, 35, 43-51. doi:10.1541/jae.35.43
3. Kyosuke Ishii, Syugo Hayashi, Fumiaki Fujibe, 2014: Statistical analysis of temporal and spatial distribution of cloud-to-ground lightning in Japan from 2002 to 2008. Journal of Atmospheric Electricity, 34, 79-86.

[学会発表](計 8 件)

1. 林修吾, 2015: 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, 非静力ワークショップ, 2015 年 12 月 1 日, 沖縄県那覇市
2. Adachi, T., K. Kusunoki, S. Yoshida, K. Arai, S. Hayashi and T. Ushio. High-speed volumetric observation of downburst using X-band phased-array

radar, 37th Conference on Radar Meteorology, 14-18 September 2015, Norman, OK, USA

3. 林修吾, 吉田智, 楠研一, 2015: 2014 年 6 月 24 日に調布・三鷹に激しい降雹・落雷をもたらした積乱雲の発生発達とその構造. 気象学会秋季大会, 2015 年 10 月 30 日, 京都府京都市
4. Syugo HAYASHI, Chizuru MARUI, Fumiaki FUJIBE, 2015: Characteristics of lightning 3D distributions and polarimetric parameters in a thunderstorm. 26th IUGG GENERAL ASSEMBLY 2015, 2015 年 6 月 29 日, Prague, Czech
5. Syugo Hayashi, Chizuru Marui, Fujibe Fumiaki, 2015: Characteristics of Lightning 3D Distributions and Polarimetric Parameters in a Thunderstorm, 95th AMS Annual Meeting, 2015 年 1 月 5 日, Phoenix, USA
6. 足立 透、佐藤光輝、三原正大、牛尾知雄、山崎敦、鈴木睦、菊池雅行、高橋幸弘、Uman Inan、Ivan Linscott、芳原容英、林修吾、楠研一, 2014: Imaging and spectrophotometric measurement of lightning by JEM-GLIMS, 2014 AGU Fall Meeting, 15-19 December 2014, San Francisco, USA
7. 丸井知鶴、林修吾、藤部文昭、西橋政秀, 2014: 積乱雲内の雷放電点の三次元分布と偏波パラメータの特徴. 日本気象学会 2014 年春季大会, 2015 年 5 月 24 日, 神奈川県横浜市
8. Syugo Hayashi, Chizuru Marui, Fujibe Fumiaki, 2013: The statistical features of radar echo for cell-tracked thunderstorm: case study for the typical summer thunderstorm in Japan. DACA13, 8-12 Jul 2013, Davos, Swiss.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 修吾 (HAYASHI SHUGO)

気象庁気象研究所 予報研究部 主任研究官

研究者番号: 20354441

(2)研究分担者

楠 研一 (KUSUNOKI KENICHI)

気象庁気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 室長

研究者番号：40354485

(3)連携研究者

藤部文昭 (FUJIBE FUMIAKI)

首都大学東京 都市環境学部地理環境コース 特任教授

研究者番号：60343886