

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05659

研究課題名(和文) 数値気象モデルと放射線計測の融合による雷雲の電場構造と雷放電メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of the lightning using numerical model and radiation detection observation

研究代表者

佐藤 陽祐 (Sato, Yousuke)

北海道大学・理学研究院・特任准教授

研究者番号：10633505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：雷を直接考慮した気象モデル(雷気象モデル)を用いて台風内部の電荷構造を再現した。同時に、エアロゾルの数濃度が台風内部の電荷構造に与える影響を感度実験によって調査した。感度実験の結果から、エアロゾルは台風の強度自体には大きな影響は与えなかったが、台風内部の電荷構造と発雷頻度に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

また、観測から指摘されていた台風のライフサイクルと台風周辺で発生する雷頻度の関係を数値モデルによって再現し、台風のライフサイクルと台風周辺で発生する雷頻度の関係が生じる理由を明らかにした。最後に雷雲から放出される放射線を多地点で観測し、雷気象モデルを改良するデータを蓄積できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、雷を直接計算した気象モデルで、台風を網羅できるほどの高領域で大規模な数値実験を実行できるようになった。また、数値実験により観測的研究から指摘されていた、台風のライフサイクルと台風周辺の発雷頻度を気象モデル再現でき、その原因を明らかにできた。さらに、今後雷を考慮した気象モデルによる雷予測の精度の向上させるために必要な、雷雲から放出される高エネルギーガンマ線のデータを蓄積することができた。これらは台風の強度予測に資する知見になる可能性があるだけでなく、現在の天気予報では予報されていない雷を、将来的に予報するための技術開発が一步進んだことを意味し、人間生活の利益に資する研究である。

研究成果の概要(英文)：Firstly, the vertical structure of the charge density in the tropical cyclone (TC) was reproduced by using a meteorological model, which explicitly calculates the charge density of cloud and lightning. The effects of the aerosols on the charge density and lightning frequency were investigated through sensitivity experiments to the aerosol number concentration. Second, the relationship between TC's lifecycle and the lightning frequency reported by previous observational studies was reproduced by the model. Our analyses elucidated the reason of the relationship between the TC's lifecycle and the lightning frequency. Third, we accumulated observational data of the gamma ray emitted from lightning cloud. The data is useful for improving the meteorological model developed in this study.

研究分野：気象学

キーワード：雷放電 気象モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

豪雨や豪雪をもたらす積乱雲内に伴って発生する雷は通信異常や落雷などによって人間生活に大きな影響を及ぼす。雷の危険性を示す情報が気象庁などから発信されているものの(例: 雷ナウキャスト: 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/>)、これらの手法は観測の外挿や、経験則に基づいて求められるため、雷が発生する直前でなければ、雷の発生を予測することは難しい。一方、予測精度 80% (気象庁, 2015) を超え、1 日前には高い精度で予報できる日々の天気予報は、大型計算機を用いて数値気象モデルと呼ばれるシミュレーションコードを実行した計算結果に基づいて出される「数値天気予報」である。雷を将来的に数値天気予報によって予報することができれば、雷被害軽減につながる可能性があり、人間生活に大きなメリットがある。

しかしながら気象モデルで雷を直接扱った計算は、計算負荷が高い(計算に膨大な時間がかかる高コストな計算)ため、多くの気象モデルでは雷を扱っていない。近年の計算機能力の向上によって雷を直接考慮した気象モデル(以下気象雷モデルと表記)による計算が可能になってきたが、計算領域を狭い領域に限定した計算にとどまっていた。

そこで、研究代表者の佐藤は本研究開始前に次世代の大型計算機で性能が出るように設計され、高速に計算が可能な気象モデル SCALE (Sato et al., 2015, Nishizawa et al., 2015) を、雷を直接扱えるように拡張した。この SCALE と大型計算機を用いれば、台風代表される複数の積乱雲が集合してできた雲システムのような空間スケールが大きな現象全体を覆い、かつ雷を直接扱った計算が可能になるため、それらの雲システム内部の雲粒電荷や雷の頻度について詳細な議論が可能になる。また近年エアロゾルが雲微物理過程を介して雲粒電荷や雷に影響を与える可能性が示唆されているが、雷を直接扱える SCALE の数値実験によりエアロゾルが雷に与える影響の評価が可能になる。

加えて、近年の放射線計測による観測によって雷雲通過時に発生する高エネルギーガンマ線が発見された(Enoto et al. 2017)。これは宇宙線などが、大気分子から電離した数百 keV 電子を種とし、雷雲電場が電子を加速しつつ雪崩増幅して、空気との相互作用で制動放射ガンマ線が生じたと解釈されている。このような観測は雷放電のトリガーに関わる高エネルギー粒子を捉えていると考えられている。上記の雷を扱う気象モデルでは、雷放電のトリガーが何か? という基本的な問いが明らかでないため、放電の開始がいつ起こるかについては経験的な定式化によって計算されている。放射線計測のデータを蓄積・解析し、放射線計測学と気象学とが連携することによって、放電のトリガーのメカニズムがわかれば、気象モデルの経験的な定式を排除して原理的な計算が可能になることが見込まれる。

2. 研究の目的

以上の背景から本研究では、SCALE を用いて「1、台風全体を覆った、かつ雷を考慮した計算を行い、台風内部の雲粒電荷や雷発生頻度を詳細に理解すること」、「2、エアロゾルが雷に与える影響を評価すること」、「3、雷雲から発生するガンマ線の観測を行い、SCALE を改良するためのデータを蓄積すること」、「4、SCALE の雷過程を改良するための知見を気象学、放射線計測学の連携で見いだすこと」を目指した。

3. 研究の方法

研究代表者の佐藤は、雷を直接扱える SCALE を使って、台風全体を覆い、台風の発生から成熟するまでの台風の一連のライフサイクルを網羅した数値実験を行った(図 1)。この数値実験の結果を解析することで、台風周辺で発生する雷の発生頻度と、台風内部の電荷の構造を詳細に理解することを目指した。また同様に実験をエアロゾルの数濃度を変えて行い、エアロゾルが台風内部の電荷と雷発生頻度に与える影響を評価した。

同時に研究分担者の榎戸が北陸で冬季にする雷雲を対象として地上での放射線計測を行い、SCALE を改良するためのデータの取得を行なった。

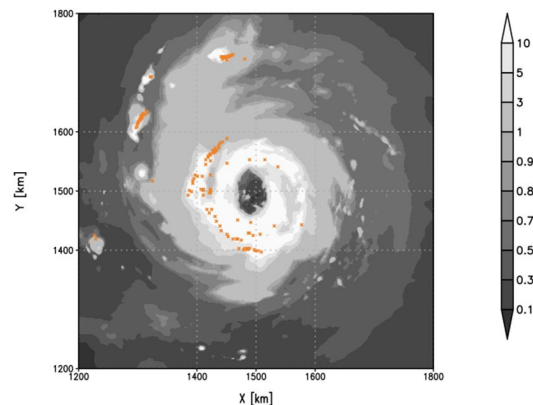


図 1: SCALE で計算された台風の雲水量(シェード: kg/m^2)と雷発生場所(黄色の x マーク)

4. 研究成果

はじめに、エアロゾルが台風内部の雲粒がもつ電荷と雷発生頻度に与える影響を評価した。数値実験の結果から、台風の強度や台風の構造にエアロゾルが与える影響は小さかったが、台風内部の雲粒が持つ電荷の構造には大きな影響があることが明らかになった。図 2 はエアロゾルの数濃度を変化させた時の台風内部の雲粒が持つ電荷密度の鉛直分布である。エアロゾルの数濃度が小さい時は電荷が下層 上層に向かって正 負 正の 3 極構造となっている一方、エアロゾルの数密度が大きくなると下層 上層に向かって負 正の 2 極構造となっていた。解析の結果から、このような構造の違いは、エアロゾルの数密度が大きくなった時に雲粒のサイズが小さくなるというエアロゾル雲相互作用によるものであると結論づけられた。すなわちエアロゾル

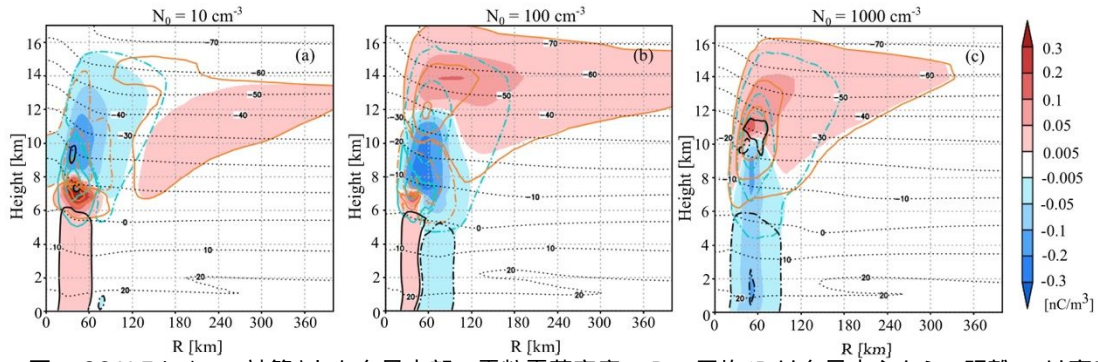


図 2: SCALE によって計算された台風内部の雲粒電荷密度の R-z 平均 (R は台風中心からの距離、z は高度である)。エアロゾル数濃度がそれぞれ(a) 10 cm^{-3} 、(b) 100 cm^{-3} 、(c) 1000 cm^{-3} の時の結果を表し、暖色系が正、寒色系が負の電荷を表す。(Sato et al. 2019 を抜粋し編集)

の数濃度が大きくなると雲粒のサイズが小さくなるため、電荷を獲得する際に決定的な役割を果たす、霰と雲粒、雲氷の衝突が起こらず、下層で電荷分離が起きないため、下層で正の電荷が形成されていなかった。また 2 極構造の時は雷頻度が大きくなっていた。これらの結果は Sato et al. (2019) として発表された。

これらの研究を学会等で発表する過程で、観測学的研究より台風の周辺で発生する雷発生頻度、台風が急発達する直前に大きくなるという報告がなされていることを知った。数値実験の結果を解析したところ、数値実験でも台風が発達する直前で雷頻度が最大になるという台風のライフサイクルと雷発生頻度の関係が再現されていた (図 3)。そこで数値モデルの結果を詳細に解析し、台風のライフサイクルと雷発生頻度の関係が生まれる原因を調査した。調査の結果から台風周辺で発生する雷が「孤立積乱雲」と「壁雲」という 2 種類の雲で発生していること、「孤立積乱雲」の方が雷を効率良く発生させられることが明らかになった。また、台風発達直前には Pre-conditioning と言われる「孤立積乱雲」が高頻度で発生する期間があり、この期間に雷を効率良く発生させることのできる「孤立積乱雲」が高頻度で発生するために、台風の発達直前で雷の頻度が最大になっていると明らかになった。このような解釈は観測学的研究からは推測されていたが、雷と雲に関して時空間的に十分な解像度のデータを持つ本研究のモデル計算によって初めて明らかにできたと言える。これらの結果は現在投稿論文として投稿済みである。

さらに、課題分担者である榎戸らが冬季北陸で観測される雷雲を対象とした放射線計測を多地点で行い、雷雲に伴って発生する高エネルギー粒子の観測データを蓄積した。さらにこれらのデータを解析し、雷雲に伴って起こる高エネルギー粒子とそれに付随する現象についての知見を得ることに成功した (Wada et al. 2019a, 2019b)。

またこれらの観測データを説明するための粒子加速計算にも着手した。これらの粒子加速計算には 3 次元の電場情報が必要となる。観測によって 3 次元の電場を得ることは不可能であるため、SCALE が計算した電場の情報を用いて粒子加速計算を行う検討を始めた。これらの観測データと粒子加速計算の結果を詳細に解析することで、雷放電の物理プロセスの理解度を向上させ、SCALE で取り扱っている雷放電の物理プロセスを改良するための知見を得る取り組みを今後行なっていく予定である。この点については当初の本研究期間中に取り組み予定であったが、そこまで至ることができなかった。重要な研究テーマであるため研究期間終了後も引き続き取り組む予定である。

参考文献

1. Y. Sato, et al., *Prog. Earth Planet. Sci.*, 2(23), doi: 10.1186/s40645-015-0053-6, 2015
2. S. Nishizawa et al., *Geosci. Model Dev.*, 8, 3393-3419, 2015
3. T. Enoto et al., *Nature*, 551, 481-484, 2017
4. Y. Sato, et al. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6(62), doi:10.1186/s40645-019-0309-7, 2019
5. Y. Wada, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 123, doi:10.1103/PhysRevLett.123.061103, 2019a
6. Y. Wada et al., *Comm. Phys.*, 2(67), doi:10.1038/s42005-019-0168-y, 2019b

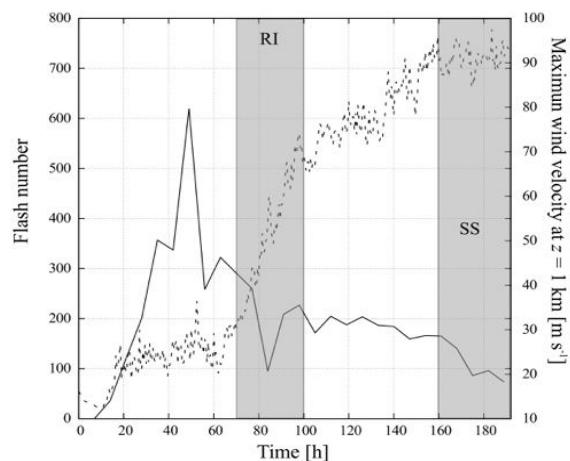


図 3: SCALE によって計算された (実戦) 雷発生頻度と (点線) 台風の最大風速の時系列。RI (Rapid Intensification) と書かれた期間は台風の急発達期間、SS (Steady State) は台風が成熟した期間を示す。RI の直前に雷の頻度が最大になっている様子が再現されている。(佐藤 2020 より抜粋)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sato Yousuke, Miyamoto Yoshiaki, Tomita Hirofumi	4. 巻 6
2. 論文標題 Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-019-0309-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wada Y., Enoto T., Nakazawa K., Furuta Y., Yuasa T., Nakamura Y., Morimoto T., Matsumoto T., Makishima K., Tsuchiya H.	4. 巻 123
2. 論文標題 Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.123.061103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wada Yuuki, Enoto Teruaki, Nakamura Yoshitaka, Furuta Yoshihiro, Yuasa Takayuki, Nakazawa Kazuhiro, Morimoto Takeshi, Sato Mitsuteru, Matsumoto Takahiro, Yonetoku Daisuke, Sawano Tatsuya, Sakai Hideo, Kamogawa Masashi, Ushio Tomoo, Makishima Kazuo, Tsuchiya Harufumi	4. 巻 2
2. 論文標題 Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-019-0168-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 佐藤陽祐
2. 発表標題 次世代気象機構ライブラリで利用可能な雷モデルの開発
3. 学会等名 日本気象学会2018年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yousuke Sato, Hirofumi Tomita
2. 発表標題 Development of lightning model on a next generation library for weather and climate model, SCALE
3. 学会等名 XVI International Conference on Atmospheric Electricity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yousuke Sato, Yoshiaki Miyamoto, and Hirofumi Tomita
2. 発表標題 Relationship between lifecycle of tropical cyclone and lightning frequency -an insight from a numerical simulation-
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤陽祐、宮本佳明、富田浩文
2. 発表標題 台風内の雷構造にエアロゾルが与える影響
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤陽祐、宮本佳明、富田浩文
2. 発表標題 台風のライフサイクルと雷発生頻度の関係に関する数値的考察
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yousuke Sato, Yoshiaki Miyamoto, and Hirofumi Tomita
2. 発表標題 Numerical study on lightning frequency in a tropical cyclone (TC)
3. 学会等名 JpGU Annual meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

佐藤陽祐、次世代気象気候ライブラリを用いた雷の発生プロセスの解明、スーパーコンピューティングニュース、22(2)、18-24、2019 (東京大学情報基盤センター機関誌への寄稿)

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	榎戸 輝揚 (Enoto Teruaki) (20748123)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・理研白眉研究チームリーダー (82401)	
研究協力者	宮本 佳明 (Miyamoto Yoshiaki)	慶応義塾大学・環境情報学部・講師	