

気象庁領域気象化学モデル（NHM-Chem）を用いた雲へのシーディングによる対流システムの制御に関する研究

Study on artificial control of convective systems through cloud seeding using JMA regional-scale nonhydrostatic meteorology-chemistry model (NHM-Chem)

研究代表者：森 修一（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

研究分担者：筆保弘徳（横浜国立大学台風科学技術研究センター）

担当：数値シミュレーション実験の立案と結果解析

広瀬 駿（横浜国立大学大学院教育学研究科）

担当：数値シミュレーション実験の実施と結果解析

清原康友（横浜国立大学台風科学技術研究センター）

担当：数値シミュレーション実験の立案と結果解析

梶野瑞王（気象庁気象研究所）

担当：計算機運用支援

橋口浩之（京都大学生存圏研究所）

担当：計算機運用支援

研究目的 (Research Objective):

ムーンショット型研究開発プログラム目標 8 (MS8)「2050 年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現」に係るコア研究課題「安全で豊かな社会を目指す台風制御研究」(研究代表者:筆保弘徳@横浜国立大学)において、将来的な台風制御の可能性について数値モデルを用いた研究を行う。具体的には、気象庁領域気象化学モデル（NHM-Chem）を用い、日本へ接近する台風の雲に対するシーディング（雲凝結核となり得る化学物質の人為的な散布）手法について、散布物質、散布量、散布継続時間、散布高度、散布領域等の諸条件を変化させた数値実験を多数行うことにより、台風勢力（中心気圧、最大風速、降水量など）の変化や介入感度について検討する。

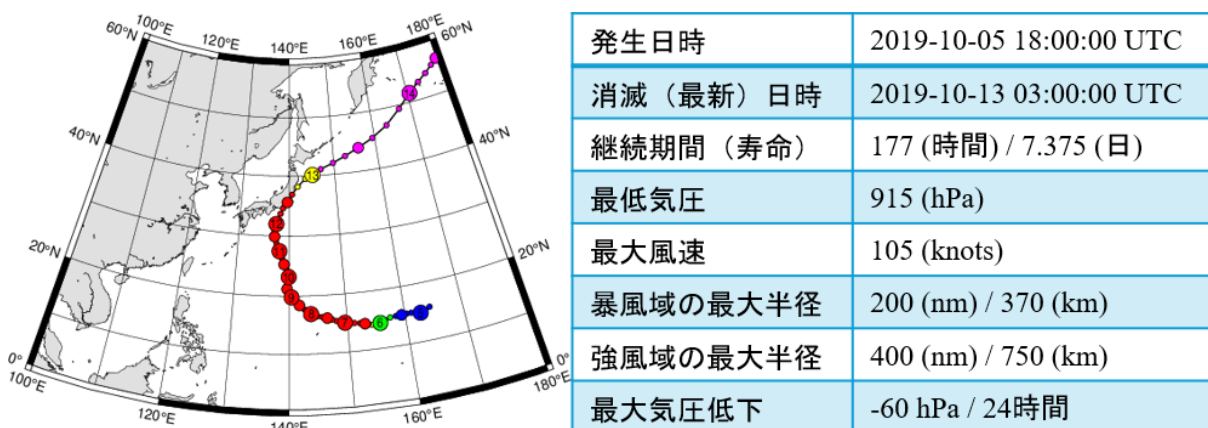


Fig.1 実験に用いる台風例 2019 年第 19 号(Hagibis)の経路図(左)と勢力概要(右)。

シーディング物質としては、雲凝結核（CCN）や氷晶核（INP）として機能する吸湿性物質（塩化ナトリウム、塩化カリウム）、ヨウ化銀、ドライアイス等）を想定している。実験対象の台風としては、近年に日本に上陸した 2018 年第 21 号 Jebi や、2019 年第 15 号 Faxai、同年第 19 号 Hagibis とする。特に Jebi については関西における被害も大きく、京都大学生存圏研究所が運用している信楽 MU レーダーによる実観測データも豊富であることから、CTL 実験に対する検証に用いる予定である。

計算手法 (Computational Aspects):

各実験では、気象庁第 3 次長期再解析（JRA-3Q）や 55 年長期再解析（JRA55）等を初期値とした 20 km×20 km 格子間隔の親ドメイン（雲パラメタリゼーションあり）を準備し、6 時間ごとに境界値を与える。この中に格子間隔が水平 2.5 km×2.5 km、鉛直平均 350 m（東西 1923 格子×南北 1923 格子×鉛直 83 層ストレッチ座標、雲パラメタリゼーションなし）の子ドメインをネストする設定を基本とする。計算タイムスリップは 4 秒とし、600 秒ごとに計算結果を出力させ、それぞれ 6 日間（144 時間の実験を行う予定である。海面水温は NOAA OISST（米国海洋大気庁 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature）使用し、初期時刻における値で固定させる。子ドメインにおける雲微物理モデルにはダブルモーメントバルク法、およびサブグリッドスケールの乱流には 1.5 次のクロージャーモデルを用いる予定である。図 2 に親ドメインの計算領域および基本的な実験設定を示す。

以上の手順により、各台風について

①CTL 実験結果

およびシーディング条件（散布物質、散布量、散布継続時間、散布高度、散布領域の違い等）を様々に組み合わせた

②シーディング実験結果 a, b, c, d, …

の計算結果を得ることになる。それら計算結果から、シーディング条件（散布物質、散布量、散布継続時間、散布高度、散布領域の違い等）が各台風の強さ（中心気圧、最大風速、降水量など）、進路、および進行速度等を与える影響を詳細に解析する。

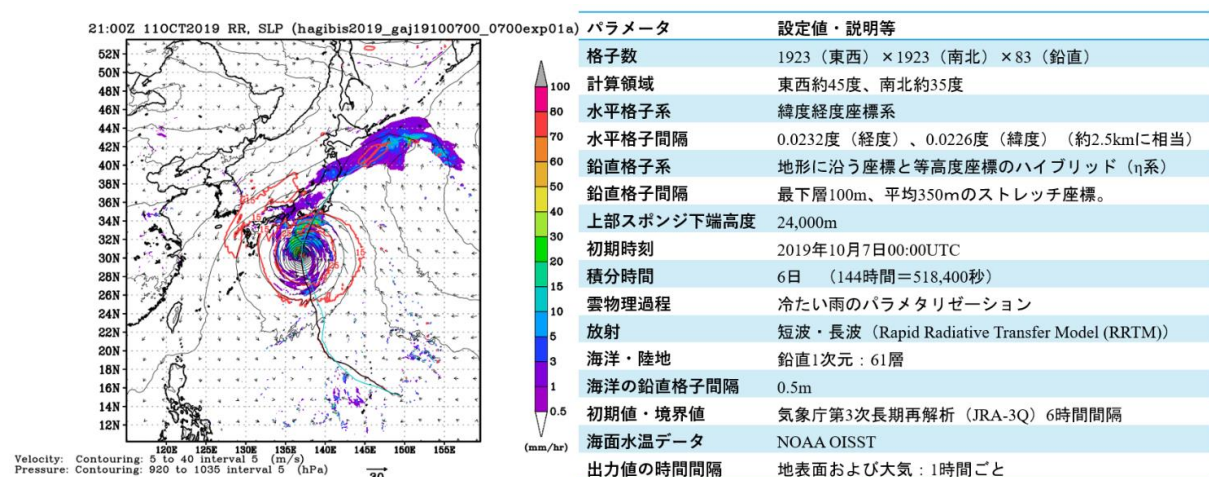


Fig.2 実験に用いる親ドメイン領域（左）および実験設定パラメータ概要の例。

研究成果 (Accomplishments) :

NHM-Chem を用い、雲シーディングが台風の構造および強度に及ぼす影響について数値実験により検討した。対象事例として、2019 年に日本の南方海上で発生した 2019 年台風 19 号(HAGIBIS)を用いた。シミュレーション期間は 2019 年 10 月 9 日 06UTC から 10 月 12 日 18UTC までとし、水平解像度 3 km, 502×502 格子、鉛直 40 層で計算を行った。シーディングは、硫酸塩 (SO_4^{2-}) 粒子を想定した仮想的な散布として、10 月 9 日 12UTC から 12 時間実施した。散布領域は、台風中心付近、中心から半径 200 km 以内、100~300 km の環状領域、ならびに同心円状の円筒領域とし、散布位置の違いによる影響を比較した。粒径は 100 nm, 粒子数フラックスは $1.0 \times 10^8 \text{ particles m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と設定し、散布総量は約 2,000 トンに相当する。

計算期間中、台風を中心気圧は 975 hPa から約 955 hPa まで低下し、台風は発達過程にあった (Fig.3)。シーディングによる強度変化は大きく 3 つのフェーズに分類できる。シーディング前および直後では、シーディングを行わない CTL との差は小さく、中心気圧差は約 1 hPa にとどまった。一方、散布開始から約 24 時間後までは、多くのシーディング実験で CTL よりも中心気圧の低下が大きく、最大で約 6.0 hPa の強化が見られた。その後、約 48 時間以降では、逆に CTL より中心気圧が高くなる実験が多く、最大で約 6.2 hPa の弱化が示された。ただし、台風中心付近に散布した実験では、期間を通じて一貫して強化傾向が確認された。最大風速についても、実験間で大きな時間変動が見られ、CTL と比較して最大で 6.4 m/s の強化、または 5.6 m/s の弱化が生じた。シーディング粒子は、散布後いったん沈降するものの、対流が強化される局面では再び上昇し、実験によって 5,000~7,000 m 程度まで到達した。大気中での滞留時間は 27~66 時間と幅があり、散布領域の違いによって空間分布や残存特性が大きく異なった (Fig.4)。一方で、モデル結果からは、散布期間中にシーディング粒子の 80~90% が地表に沈着していることが示され、放出された物質の多くが雲過程に寄与する前に失われている可能性が示唆された。

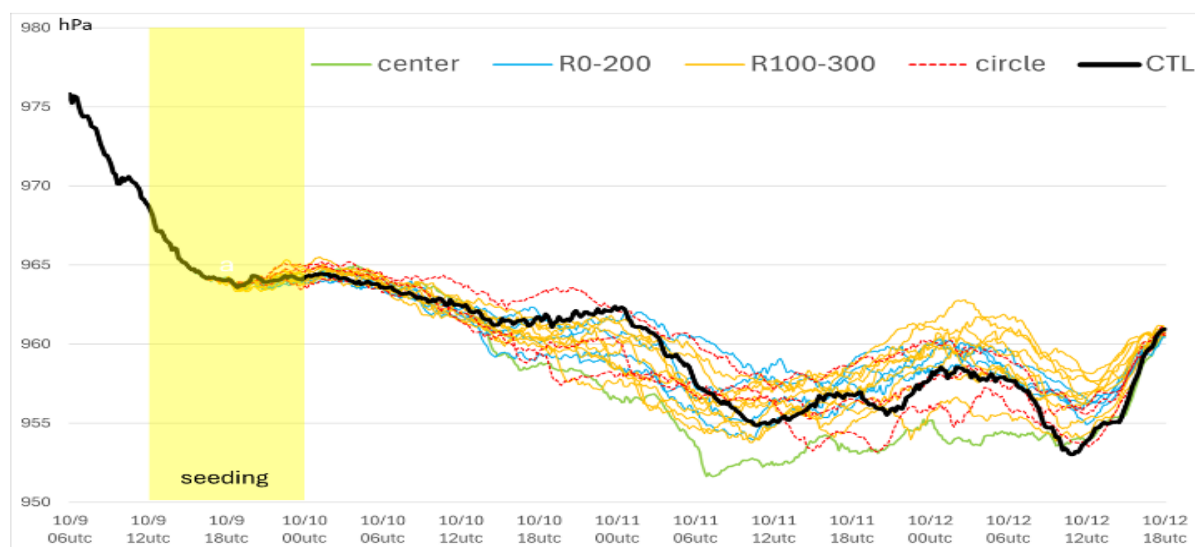


Fig.3 CTL と各実験における台風中心気圧の時間変化

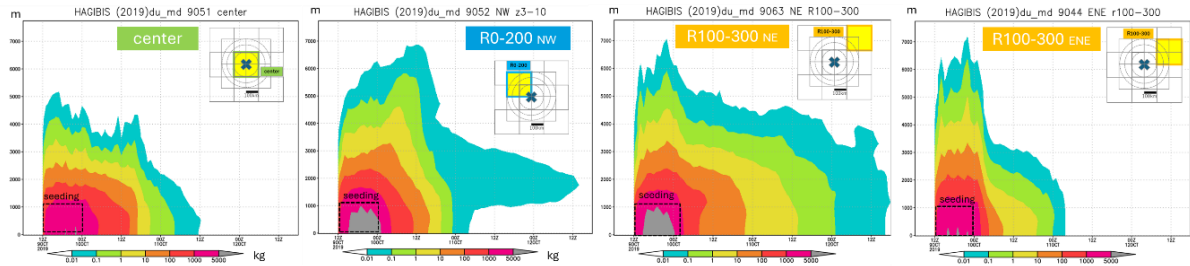


Fig.4 シーディング物質濃度の鉛直時間断面図

また、同じく NHM-Chem を用い、台風発生期に対するクラウドシーディングによる強度および進路への影響についても検討を始めた。対象事例は同じく 2019 年に発生し、関東地方に上陸した台風 15 号 (FAXAI) とした (Fig.5)。子ドメインの水平解像度を 7 km, 302×206 格子, 鉛直 40 層とし, 計算期間は台風発生 24 時間前の 9 月 03 日 18 UTC から 96 時間, このうち発生 12 時間前の 9 月 04 日 06 UTC から 24 時間のシーディングを行った。散布物質は吸湿性海塩粒子の微物理特性を模擬し, 雲底下の高度 60~500 m に仮想散布した。散布範囲は, 台風中心から 400 km×400 km (大規模), および 200 km×200 km (小規模) の領域とし, 総散布量は約 4,600 トン (大規模) および 1,150 トン (小規模) となる。

Fig.6 および Fig.7 は, CTL および上記 2 つの範囲へのシーディング実験における中心気圧と最大風速の時系列, ならびに台風進路の比較を示す。小規模散布 (200 km 四方) では, 中心気圧が実験全体を通じて CTL とほぼ同程度を維持し, 9 月 6 日 18 UTC 頃にわずかな上昇 (弱化) が現れた。一方, 大規模散布 (400 km 四方) では 9 月 5 日 18 UTC 頃から明らかな気圧低下 (強化) が確認できた。また, 最大風速は CTL と 2 つのシーディング実験の間に有意な差異が認められなかった。さらに, 両シーディング実験において散布後 72 時間頃 (96 時間シミュレーション終了間際) に気圧と風速の急激な発達を示したほか, 台風の進路は CTL と両シーディング実験の間でほとんど差異がなく, その差も実験終了の間際に顕著にすべて収束した。いずれの結果も, 計算領域境界に近く, 親ドメインにおける台風情報に強く影響を受けた結果と考えられる。なお, Fig.8 に大規模散布 (400 km 四方) 実験における散布物質の移流状況を示す。散布初期に台風中心付近の上昇気流に巻き込まれた散布物質は, 時間の経過とともに外側へ拡散されていることが明瞭であり, シーディング効果が大きく低下した可能性が高い。

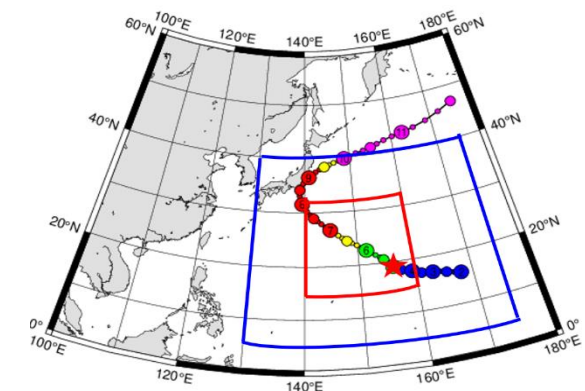


Fig.5 発生期シーディング実験に用いた 2019 年台風 FAXAI のベストトラック (EDA を含む), 計算領域 (青実線: 親ドメイン, 赤実線: 子ドメイン), および台風発生地点を赤星印で示す (デジタル台風 Web サイトの図に追記)。

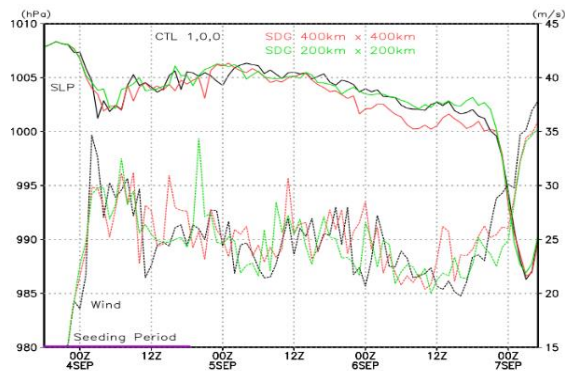


Fig.6 広範囲散布実験(赤)と小範囲散布実験(緑), およびCTL(黒)における台風中心付近の最低気圧(上)と最大風速(下)の比較.

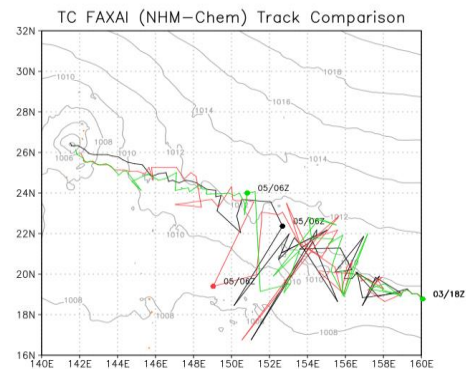


Fig.7 広範囲散布実験(赤)と小範囲散布実験(緑), および(CTL)における台風進路の比較. 等値線は9月6日12 UTCにおけるCTL海面気圧.

いずれのシーディング実験においても, 散布物質は早い段階で台風中心から外縁へ拡散されており, より少ない散布量でより強いシーディング効果を得るためには, 台風の中心部への持続的な散布に焦点を当てた戦略が必要である. 計算上の制約により, 子ドメインでは7 km 解像度, 96 時間に制限されており, 領域モデル実験では親ドメインの影響を受けやすいことが考えられる. このため, 今後の実験ではより高い空間解像度と長い積分期間が必要である. また, 並行して行われている台風発達段階を対象とした成果からの知見を取り入れ, 台風中心に対する象限別の散布戦略なども検討する予定である.

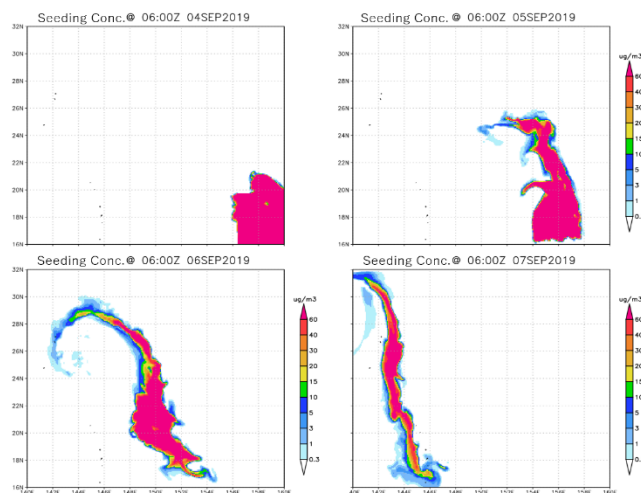


Fig.8 散布物質の空間分布(高度 60 m)を時系列に示す. 散布開始時刻(左上), 24 時間後(右上), 48 時間後(左下), および 72 時間後(右下).

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Abe, M., H. Fudeyasu, M. Sasaoka, 2025: Historical Review of Research Activities toward Typhoons/Hurricanes Modification in Japan and the United States. J. Meteor. Soc. Japan, 103, 305-320. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2025-015>
2. Fudeyasu H., K. Ito, N. Mori, Y. Kiyohara, Y. Araki, T. Miyashita, and H. Yoshioka, 2025: Demonstration of artificial bay windbreak experiments for reduction of typhoon winds and resultant storm surges in Tokyo bay, SOLA, 21, 85-93. <https://doi.org/10.2151/sola.2025-011>

(口頭)

1. 廣瀬 駿, 筆保弘徳, 梶野瑞王, 清原康友, 東原拓哉, 吉田龍二, 2025 : NHM-Chem を用いた台風に対する仮想シーディング実験. 日本気象学会 2025 年度秋季大会, A557, 福岡, 2025 年 11 月.

(ポスター)

1. Mori, S., S. Hirose, Y. Kiyohara, and H. Fudeyasu, 2025: Cloud seeding simulations during the genesis of typhoon Faxai (2019) using NHM-Chem: effect on its intensity and track, Moonshot Goal 8: International Symposium on Weather Controllability 2025, Tokyo, 30 October 2025.