

台風制御 ～ムーンショット目標 8 での取り組み～

森 信人（京都大学 防災研究所）

1. はじめに

2022 年度から科学技術振興機構（JST）により、ムーンショット型研究開発事業・目標 8「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心安全な社会を実現」がスタートしている。この中で、筆保弘徳（横浜国立大学台風科学技術研究センター長・教授）をプロジェクトマネージャーとする「安全で豊かな社会を目指す台風制御研究」（以下、台風制御課題）が実施されている（筆保ら，2021）。執筆者はこの研究グループの課題推進者である。以下では、台風制御課題における実施状況について解説する。

台風制御課題が究極的に目指すのは、「台風を脅威から恵みに変えること」である（図 1）。その主旨は、台風災害による人命と財産の損失を台風制御によりゼロにすることに加えて、台風からエネルギーを取り出すことであり、マイナスをゼロに、そしてさらにプラスにするということである。損失をゼロにするとは、台風の勢力や上陸をゼロにするということではない。既存の防災インフラが許容可能な風速・雨量を超過する分について、人為的な介入によって台風の勢力を低下させて、損失をゼロにするということである。台風は災害をもたらすという負の側面的一方で、水資源というプラスの側面も有している。また、大気・海洋などの地球環境のバランスを保つ役割も果たしている。この自然界の中での台風の役

割も維持したまま、インフラの許容量を超えて甚大な被害が出る勢力分だけ減勢することが最終目標である。

台風制御課題では、最終目標の第一歩として、台風災害による人命と財産の損失を台風への介入により「少しでも軽減」できないかという切り口で、技術開発を進めている。

2. 台風制御の歴史

台風制御の技術開発は奇をてらった研究テーマではない。歴史を紐解くと、アメリカでは 1940 年代後半からハリケーンの人工制御の研究が始まっている。1969 年には、米国海洋大気庁がハリケーン Debbie に対して、その中心に形成される壁雲に航空機からヨウ化銀を散布した。その人為的介入の結果、散布した直後のハリケーンの風速が約 30%軽減したという報告がある（藤原，1971）。

一方、当時の日本でも、台風制御の研究にのりだすかどうかの検討が行われていた（小元，1971）。1961 年に施行された災害対策基本法には、「台風に対する人為的調節の実施に努めなければいけない」ことが記載されている。しかし、やはり多くの懸念があり、日本では台風制御研究には踏みきれなかった。特に科学的な懸念は、当時は台風のメカニズムそのものもまだわかっていなかったことである。そして、台風介入による効果の検証、つまり「効果判定」が難



図 1 プロジェクトのビジョン

しいことも壁となった。ハリケーン Debbie のケースでも、人為的介入により風速の軽減があったが、もしも介入しなかった場合でも台風の勢力は弱まったのではないか、という異議が残った。

制御の相手が自然現象のために、一度でも台風介入をしてしまうと、まったく同じ台風は存在しないために介入しなかった場合と比較ができない。自然相手では、人為的介入の効果判定は非常に難しい。米国のハリケーンの制御研究も、予測技術の更なる高度化や現象のメカニズム解明が求められて、ハリケーンに対する実証実験も 1971 年を最後に中断している。

3. 効果判定に関連する技術の発達

1960 年代に、アメリカにてハリケーン制御実験プロジェクト Stormfury が実施されている (Willoughby et al. 1985)。これはハリケーンの上空からヨウ化銀を散布することでハリケーンを減勢させる試みであった。記録では減勢に成功したとの結果が残されているものの、このプロジェクトはのちに中止された。大きな理由は、ハリケーンがヨウ化銀を散布したため減勢したのか、自然と減勢したのか、証明することができなかったためである。今日、コンピュータシミュレーションを用いることにより、定量的な効果判定を行うことができつつある。さらに、航空機や気象衛星による観測データを基に、台風の正確な数値モデリングを行い、どうすれば台風の減勢ができるのかをシミュレータ上で検証することで効果的な台風制御方法を科学的に導き出すことが可能となりつつある。

観測技術の発展も研究を後押しする背景となっている。北太平洋西部の洋上で発生する台風は、観測する手段が気象衛星を除いて、ほとんどないのが現状である。1987 年に米軍による航空機観測の終了以降、台湾による台風周辺の観測を除いて、航空機観測は行われてこなかったため、衛星観測からの台風の強度推定値に大きな誤差が含まれ、数値予報による台風の強度予測はほとんど改善されていない。

これらの問題を解決するために 2017 年、2018 年、*年、*年に名古屋大学を中心とする研究グループは、日本の民間航空機によるスーパー台風の眼への高高度からの貫入観測に成功し、中心気圧や最大地上風速のドロップゾンデによる直接観測を行った (Yamada et al. 2021)。これにより台風の勢力を決

める眼内部の暖気核の高高度から海面までの全層観測が行えるようになるとともに、航空機観測データを数値予報モデルにデータ同化により取り込むことで、台風予測の改善が示された (Ito et al. 2018)。また、雲を解像する数値モデルにより観測されたスーパー台風の暖気核構造が再現され、その特徴的形成メカニズムがあきらかにされた (Tsujino et al. 2021)。さらに気象衛星の発展により台風の眼内部の雲の動きを高精度に知ること、眼の内部の運動を知ることができる可能性が示された (Tsukada and Horinouchi, 2020)。このような衛星観測の検証にも航空機観測データが使用された。日本においても独自の台風の航空機観測が可能となり、それに基づく台風観測のこれらの成果は、MS 目標 8 の提案における基盤の一つであり、その目標実現の信頼性の大きな根拠となっている。

4. 科学、技術および ELSI 課題と目指すもの

台風制御課題が目指す目標は、台風がもたらしてきた人類にとっての脅威を、脅威でないレベルに低減させるところにある。これを実現させるためには、科学的、技術的そして倫理的・法的・社会的課題 (ELSI) をクリアする必要がある。以下では、台風制御課題で取り上げるべきとスクリーニングされた、課題について概説する。

4.1 台風制御における科学技術的課題

台風制御の現状として、既述の通り台風の制御効果と自然の変化の切り分けができていないことがボトルネックとなっている。この解決に必要な取り組みとしては、台風の高精度予測、台風制御理論の構築、台風制御システムの確立が挙げられる。例えば米国が行ってきた介入方法であるシーディング（種まきとも呼ばれ、自然の雲にヨウ化銀・ドライアイス・吸湿性粒子などの物質をまいて雲の内部構造を変化させること）で介入する場合、台風のどの場所に、どのタイミングで、何をどれだけ撒けば、台風がどのように変化するのか（台風制御理論）を、高精度な台風シミュレーションで予測（高精度予測）し、それを人工制御システムで実際の台風に実行する（人工制御システム）。その結果生じた台風の変化が、シミュレーション通りであることを示すことで、制御効果と自然変化の切り分けを実証する必要がある。

台風制御理論の構築に向けての取組みとしては、インパクト物質の選定、散布法の設定及び最適化が挙げられる。インパクト物質は、台風の発達する海洋上まで運搬されて、海上で大量に散布されるため、環境負荷が少ないことに加え、質量対効果の高い物質を選定する必要がある。このインパクト物質を、台風のどこにどれだけ撒くかについては、コンピュータシミュレーション上で、様々な条件下で台風制御実験を実施し、制御効果が出る条件を見出すことで、台風制御理論として構築する。その際に、航空機による散布条件を考慮し、実際に航空機でできる飛び方と、人工制御で想定する条件設定のすり合わせを行うことで、技術的/経済的に最適化する必要があることが大きな課題となる。また、高精度な台風シミュレーションと併せて、台風に人工制御を与えた後の台風の挙動についても、高い精度で予測することで、制御効果と自然現象の切り分け評価の精度向上を図る必要がある。

台風制御システムの確立に向けての取組みとしては、台風制御理論をもとにして実際に制御オペレーションを実施するための航空機や船舶の設計が挙げられる。航空機や船舶によるオペレーションは、低コストで、なるべく少ない数で実現する必要がある、そのためには積載量をなるべく稼いだ航空機や船舶を計画することが課題となる。

4.2 工学的技術的課題

台風制御課題の事業成立性は、制御に必要な物質を台風もしくは台風周辺に散布する技術が 1 つの課題となる。制御物質の散布技術は、先の台風制御効果とペアであり、お互いにコミュニケーションを取り、技術開発する必要がある。

また、台風制御と台風発電に必要な経費とそれに対する効果の比率が重要となる。台風制御は台風という災害に対する備えの一種であると考えられるため、堤防建設や防潮堤建設と同様にどれだけの費用を投じて、どれだけの効果が得られるのかを提示し、その費用を投じることの合理性を説明する必要があると考えられる。そのためには、台風がもたらす人的/経済的被害を精緻に見積もり、台風制御による効果を定量的に示すためのシステムを構築する必要がある。

4.3 社会的課題

社会的課題として、社会受容性の醸成が挙げられる。日本全国 1 万人を対象に実施したアンケート調査では、約 62% が台風制御を「ぜひ実現してほしい」、あるいは「どちらかといえば実現してほしい」と回答している。これらの結果から、国民の半数以上が台風制御に期待を抱いていると考えられる。一方で、台風制御については約 37% が環境への悪影響を懸念しており、自由コメントからは自然を人為的にコントロールすることによる心理的な抵抗も読み取れる。社会受容性の醸成のためには、懸念については真摯に受け止めながら、台風制御の仕組みや、自然や社会への影響を丁寧に伝える活動を通じて、国民の理解を醸成することが必要である。

また、事業として台風制御を実現することを想定すると、実施有無を誰が判断するのか、望まない結果をもたらした際の責任は誰がどのように負うのか、意思決定から実行までの官民のスキームはどのようにすべきか、利用される航空機や船舶などの認証策定、地球規模の気象現象である台風の制御・活用に対する国際的ガイドライン制定など、様々なプレイヤーを巻き込んだ議論が今後必要となる。

5. 現在の検討状況

5.1 気象学的アプローチ

台風の内部構造を詳細に表現する高精度数値予測モデルを開発し、それを利用して有効な台風制御が可能な手法を数値的に評価することを目標として研究を進めている。具体的には、シーディング、海

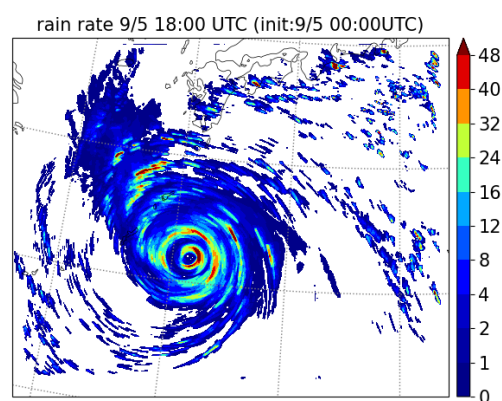


図2 1km メッシュモデルでの令和 2 年台風第 10 号 Haishen の予測実験例。九州南方において北上する台風の二重壁雲の内部構造が再現されている。

面水温を低下させて台風エネルギーとなる水蒸気の蒸発を抑える方法、海上に障壁や風車をおいて海上風を弱めたり風向を変化させたりする方法、などを検討しえらる。しかし、人間が実施できる限りなく小さい外力で台風強度に大きな変化を生む手法や、持続的な弱い介入によって台風に変化を与える手法を定量的に解明する。航空機からのシーディングを想定した場合、対流雲における雲物理の詳細を調べる室内実験を実施している。

また、台風制御の実施にあたっては、災害をもたらす可能性がある事例を事前に予測して選択し、人為的な介入の影響の効果を判定できる程度にまで予測精度を高める。このため、高解像度モデルによるデータ同化システムに航空機・船舶観測データを同化し、台風の進路・強度・内部構造の高精度な再現と予測の改善を行っている。

これまでの成果では、台風制御方法の検討、台風を詳細に表現する高精度数値予測モデル開発、対流雲における雲物理実験研究、高解像度モデルを基礎とするデータ同化システム開発、航空機データを利用した台風の高精度な再現と予測の改善に取り組んでいる。可能な台風の強度に影響を与える可能な制御方法を検討し、候補の手法を下記の図のようにまとめている。主として、航空機からのシーディングにより対流雲に変化を与える方法、海面水温の低下や海面からの蒸発を抑制する方法、無人船等で 1km 以下の境界層の風速・温度・湿度に変化を与える方法を検討している。

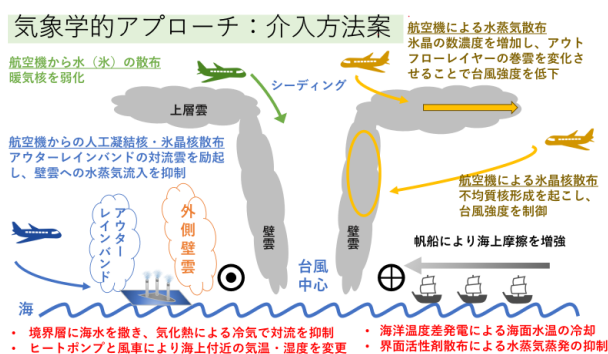


図3 台風の断面図の模式図と可能な制御方法。

5.2 影響評価

台風制御により気候学的影响が生じる可能性がある一方、被害軽減効果が期待できる。総合的な社会受容性を評価するためには、両者の影響を計量化す

必要がある。

気候学的影响については、台風制御を行うことによる環境場（北西太平洋域）への副次効果を見積もる必要がある。また、主な台風被害には、人的被害だけでなく経済的被害（直接被害・間接被害）がある。台風制御による経済的被害の軽減効果の推計は、被害額の推計とほぼ同義だが、風速や降雨量等の気象外力を被害額に変換することができる精緻な評価手法を構築する必要がある。

影響評価グループでは、これら気候環境場と台風に関連する風水害である強風、内水氾濫、外水（河川）氾濫、沿岸浸水（以下、風水害）についての被害を総合的に評価可能な統合的風水害被害評価モデルを開発し、台風制御による経済被害を推計している。また、台風制御が企業活動や避難行動や中長期的な社会経済活動へもたらす影響の分析も実施している。

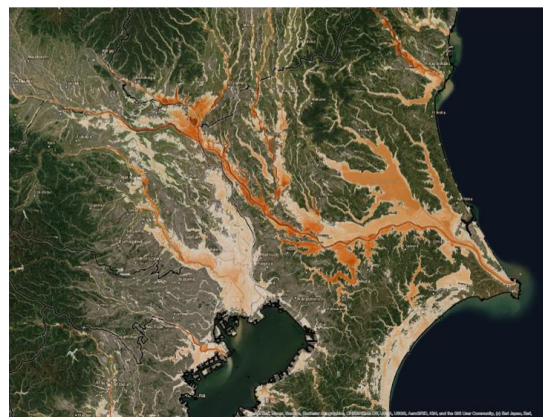


図4 台風水災害影響評価モデル開発の一例：2019年台風第19号浸水域のダウンスケーリング

5.3 ELSI の分析と検討

台風制御技術には、実際の台風の勢力を弱めることで、防災、減災等の社会的に意義のある結果をもたらすことが期待される。伊勢湾台風を契機に制定された災害対策基本法（昭和36年法223号）にも、台風に対する人為的調節を防災分野で活用可能にすることが明記されている（8条2項9号）。

その一方で、台風制御を含む気象改変技術の多くは、これによって利益を享受する者（受益者）以外の第三者に負の影響（損失）をもたらす可能性がある。たとえば、雨量を調節することで河川Aの氾濫を防ぐことができたとしても、別の地域Bに雨が降

り、結果として土砂災害が発生することが予測されるとき、台風制御技術を発動することは、倫理的に許されるか。また、制御を行おうとした結果、予測を超えて第三者に負の影響が生じてしまった場合（すなわち「制御」に失敗した場合）、この損失は誰がどのように負担すべきなのか。

台風制御技術の社会実装がもたらす倫理的 (Ethical)・法的 (Legal)・社会的 (Social) な諸課題 (Issues) について、人文・社会科学系研究者を中心に多角的な観点から研究している。まず、ELSI に関わる個別論点の研究のほか、連携のための体制作りに取り組んでいる。

6. これから

各分野の専門家を結集して、2050 年のゴール達成に向け、気象学的アプローチ、工学的アプローチ、影響評価、ELSI (倫理的・法的・社会的課題) の 4 つの研究開発項目、16 の研究課題でプロジェクトを進めている。2022 年度は、台風制御を可能とする手法を早期に見出すため、「気象学的アプローチ」「影響評価」「倫理的・法的・社会的課題 (ELSI)」からの研究開発課題に重点的に取り組んできた。

今後は、工学的アプローチも開始し、解析のための実在実験でコストを見積もり、かつ、台風介入強度に対する変化量を得るためのコストも見積もる予定である。また、社会が受容可能な程度に台風被害を軽減する様々な介入手法候補を特定するという 3 年目のマイルストーンに向けて、気象学的アプローチ、影響評価、工学的アプローチの 3 課題の結果を待つシリアルな進め方ではなく、各課題が介入強度に対する変化量、変化量に対するベネフィットやコストといった統一した評価を行う等、コンカレントに研究を進める予定である。

参考文献

- 藤原美幸, 1971 : 台風の人工制御 ストームフューリー計画をめぐって, 自然, po. 57-63
- 小元敬男, 1971 : 熱帯性積乱雲の気象調節に関するセミナー報告, 天気, pp. 605-616.
- 筆保弘徳, 2021 : ムーンショット目標検討に向けた台風制御と台風発電についての研究開発と社会実装に関する調査研究, 調査研究報告書, JST https://www.jst.go.jp/moonshot/program/mi1lennia/pdf/report_19_fudeyasu.pdf

Ito, K., H. Yamada, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda, and K. Tsuboki, 2018: Analysis and forecast using dropsonde data from the inner-core region of Tropical Cyclone Lan (2017) obtained during the first aircraft missions of T-PARCII, SOLA, 14, 105-110, doi:10.2151/sola.2018-018.

Tsujino, S., K. Tsuboki, H. Yamada, T. Ohigashi, K. Ito, N. Nagahama, 2021: Intensification and Maintenance of a Double Warm-core Structure in Typhoon Lan(2017) Simulated by a Cloud-resolving Model. J. Atmos. Sci., DOI: 10.1175/JAS-D-20-0049.1.

Tsukada T. and T. Horinouchi, 2020: Estimation of the tangential winds and asymmetric structures in typhoon inner core region using Himawari-8. Geophysical Research Letters, 47, e2020GL087637. <https://doi.org/10.1029/2020GL087637>.

Yamada, H., K. Ito, K. Tsuboki, T. Shinoda, T. Ohigashi, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, and K. Shimizu, 2021: The Double warm-core structure of Typhoon Lan (2017) as observed through the first Japanese eyewall-penetrating aircraft reconnaissance, J. Meteor. Soc. Japan, Volume 99 Issue 5, pp. 1297-1327

Willoughby, H. E., Jorgensen, D. P., Black R. A., and S. L Rosenthal, 1985: Project STORMFURY, A Scientific Chronicle, 1962-1983, Bull. Amer. Meteor. Soc., 66, pp. 505-514.