



ムーンショット型研究開発事業
新たな目標検討のためのビジョン策定

Moonshot R&D MILLENNIA* Program

*Multifaceted investigation challenge for new normal initiatives program

「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/Initiative Report

令和3年7月

目標検討チーム/Brainstorming Team「タイフーンショット」

チームリーダー：筆保 弘徳（横浜国立大学 教育学部 教授）

サブリーダー：鹿渡 俊介（デロイトトーマツコンサルティング（同） マネジャー）

チームメンバー：坪木 和久（名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授）

佐藤 正樹（東京大学 大気海洋研究所 教授）

森 信人（京都大学 防災研究所 教授）

林 秀樹（新エネルギー・産業技術総合開発機構 客員フェロー）

川又 昭夫（川崎重工業株式会社 基幹職）

加藤 大輔（株式会社東京海上研究所 主任研究員）

寺尾 裕（東海大学 海洋学部船舶工学科 名誉教授）

満行 泰河（横浜国立大学 大学院 工学研究院 准教授）

Contents (目次)

I. Concept (MS 目標案のコンセプト)

1. Proposed MS Goal (MS 目標案)
 - 1.1 Proposed MS Goal title (MS 目標案の名称)
 - 1.2 Vision for 2050 society (実現したい 2050 年の社会像)
2. Targets (当該 MS 目標の達成シーン。2050 年 (及び 2030 年) に何が実現しているか)
3. Background (当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等)
 - 3.1 Why now? (当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが、今必要である理由)
 - 3.2 Social significance (目標達成の社会的意義)
 - 3.3 Action outline (当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要)
4. Benefits for industry and society
(当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化)

II. Analysis (統計・俯瞰的分析)

1. Essential scientific/social components
(当該 MS 目標を達成するための課題 (科学技術的・社会的課題) や必要な取組)
2. Science and technology map
(当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰)
3. Japan's position in overseas trends
(当該目標に関連する研究開発の動向 (全体)、海外動向及び日本の強み)

III. Plan for Realization (社会像実現に向けたシナリオ)

1. Area and field of challenging R&D, research subject for realization of the Goals (挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題)
2. Direction of R&D for realization of Goals
(2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標 (マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果)
3. International cooperation (目標達成に向けた国際連携の在り方)
4. Interdisciplinary cooperation
(目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方)
5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)
(目標達成に向けて取り組む上での倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

IV. Conclusion (結論)

V. References (参考文献)

I. Concept (提案する MS 目標案のコンセプト)

1. Proposed MS Goal (MS 目標案)

1.1 Proposed MS Goal title (MS 目標案の名称)

2050 年までに、台風の「脅威」を「恵み」に変換し資源活用することで安心かつ安定した持続可能な社会を実現

1.2 Vision for 2050 society (実現したい 2050 年の社会像)

2050 年とある日。ニュースキャスター「本日、日本の南の海上に台風△号が発生しました。日本政府は、この台風△号は○県×市を 3 日後の□日 12 時に通過すると予測。関係機関に対し 1 時間当たり積算 50 mm の降水量、最大 20m/s の風速に減勢するよう指示をしました。また台風発電により、○県周辺地域の電力供給量が増加することから、今月の電気代が約半額になります。・・・」 ○県民「台風が来てくれて嬉しいわ。今月の電気代が半額になるなんて！」。

これが、我々が描く 2050 年の日常的一幕である (図 1)。毎年甚大な被害をもたらす台風と、その脅威に為す術のなかった人類。その台風の勢力を人為的にコントロールし、さらには台風のエネルギーを用いた発電をすることで、台風を人類にとっての「脅威」から、水資源やエネルギーをもたらす「恵み」へと変貌させる。これこそが、本チームが提案する近未来の社会像である。そのために、「台風の人工制御」と「台風エネルギーを利用した台風発電船による発電」を実現する。

この 2050 年の世界では、台風の進路を正確に予測し、台風の勢力も人為的にコントロールされ、さらに台風のエネルギーを活用した発電が実現されている。人々にとって台風は生命や財産を奪う「脅威」ではなく、エネルギーをもたらす「恵み」と捉えられている。この技術は日本から世界に発信されており、台湾やフィリピン、インド、アメリカ等のタイフーン、サイクロン、ハリケーンに悩まされていた国々の生活も一変させ、世界中の人々に安定をもたらしている。気象災害、とりわけ台風への心配がなくなったことから、日本国内の生産活動も安定して行われている。気象災害リスクが低減され、自然エネルギー供給量が増加した日本は、豊かな自然を育みながら、安心かつ安定的に産業に取り組める拠点としての魅力を世界に発信している。



図 1： 実現したい 2050 年の社会像

2. Targets（当該 MS 目標の達成シーン。2050 年（及び 2030 年）に何が実現しているか
MS 目標の達成シーンとして以下を掲げる。

【2050 年】

- ・ 2050 年までに、被害が甚大となると予測される台風が襲来する場合に、航空機からのインパクト物質の散布による台風制御が実行されている。その結果、台風による人的/経済的被害がゼロに抑えられている。
- ・ 2050 年までに、高精度に予測・制御された台風を利用した台風発電船によって発電・蓄電した電気エネルギーを日本に運搬/送電している。

【2030 年】

- ・ 2030 年までに、気象予測シミュレーション技術が発達し、台風の進路/強度予測の精度が向上しているため、強度に応じた適切な対策と対策が必要となるエリアを正確に住民にアナウンスし防災行動を促すことができる。

本 MS 目標が目指すのは、「台風を脅威から恵みに変えること」である（図 2）。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、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、台風の勢力をコントロールすることで、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の一方で、水資源という恵み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。これらを維持したまま、インフラの許容量を超える部分だけを制御することが目標である。

理想とする制御のあり姿は、「台風による被害を最小化すること」である。災害をもたらすことが予想される台風について、高精度に被害推定を行い、コンピュータ上で膨大な数の制御実験から、制御しない場合に起こる被害をどの地域も越えないことを前提に、全体として最も被害を小さくするような制御を見いだす。その方法に基づいて実際に台風の強度と進路を制御するものである。例えば、強度については 10%、進路については 5 度程度の変更を行う、というのが制御方法の一例である。建物に働く力は風速の二乗に比例するため、風速を少し減少させるだけで、建物への暴風災害は大きく軽減される。台風の強風による建物被害は、経験的には風速の 5~7 乗に比例することが知られている。仮に最大瞬間風速 60m/s を持つ台風の風速を 10%低下させることができれば、強風による建物被害率は、60~72%まで大幅に軽減できるポテンシャルがある。2018 年の台風 21 号の被害の多くは強風に関連しており、仮に総被害の半分が強風によると仮定すると、大阪で観測された最大瞬間風速 58m/s が 10m/s 軽減された場合に軽減できる被害額は、1300~1900 億円となる。これらによる台風災害の減災は経済損失を大きく減少させる可能性がある。また、台風の暴風域は中心から進行方向右手側の 100km 程度のところに限定されており、わずかの進路変更（方向にして数度程度）によっても暴風災害は大きく軽減される可能性がある。

次にマイナスをプラスに変える、つまり、台風からエネルギーを取り出す方法として、台風発電船を構想している。発電の原理は、台風の可航半円（台風の進路の左側の半円は、台風の風速が台風自身の移動で弱められ、船舶が航行できるため可航半円と呼ばれる）内の後方で台風の横風を帆で受けて台風の移動速度と同一速度で帆船を航行させ、海中のスクリュプロペラを回して発電するというものである。発電能力を計算すると、船のプロペラ径 28m、船の速度 9m/s (= 台風の移動速度 32km/h)、ツインプロペラで効率を 0.3 と仮定すると 0.14GW という、通常の風力発電や海流発電の発電量と比較すると非常に大きな値となる。これは、海水の密度が空気の約 800 倍と大きいこと、台風の移動速度が海流の流速の約 3 倍あり、発電能力が流速の 3 乗と密度に比例するためである。もし、年間 20 個の台風をそれぞれ 5 日間追走できたと仮定すると、その発電量は 1 艇あたり 3.3×10^8 kWh となる。因みに日本の年間の総発電量は、約 10^{12} kWh となっている。発電エネルギーをいかにして陸域まで送るかについては、海水を電気分解し、得られた水素を輸送する方法、船底の蓄電池に蓄電し、船で陸域まで輸送する方法、近くの離島や洋上基地へマイクロ波送電する方法等が検討される。

本 MS 目標が実現されることで、台風制御と台風発電という新たな市場 (= ビジネス) が

形成されることも重要なポイントである。

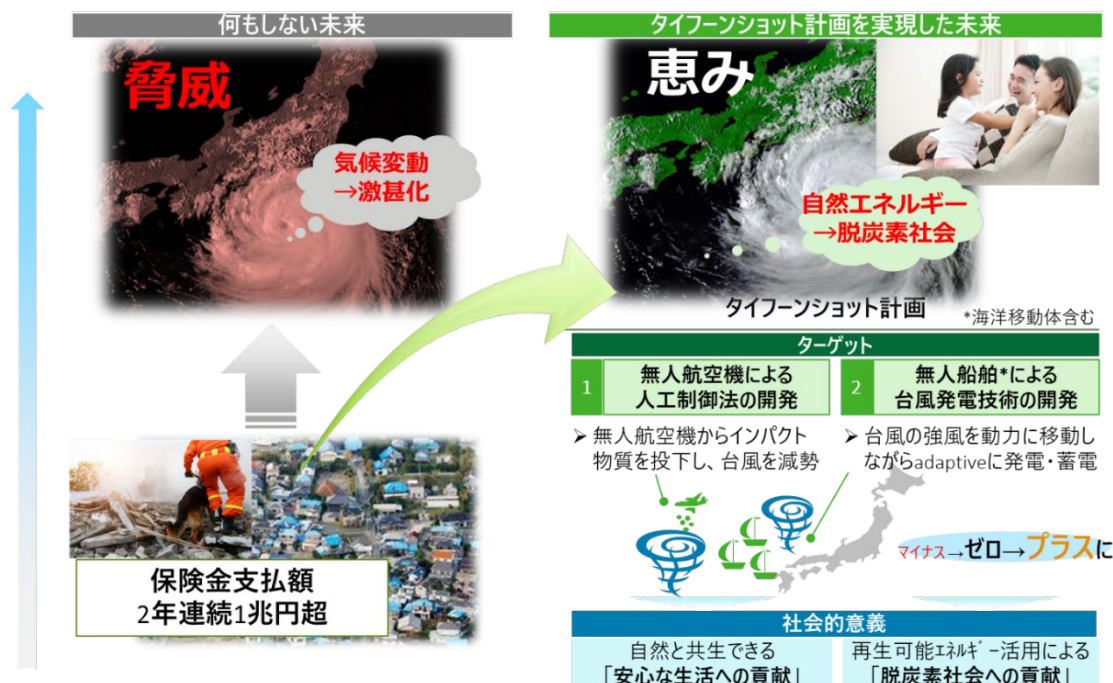


図 2：本ムーンショット目標のターゲット

上記、MS 目標の達成シーンが実現可能であるとする理由として以下 2 点を挙げる。

実は脆い台風

非常に巨大かつ凶暴な台風であるが、実は海水温や大気の状態のわずかな変化に敏感に反応して大きく変わってしまう。台風の眼の壁雲、降雨帯、上部吹き出し層の巻雲などの雲の変化によっても強度や進路が変化することが知られている。歴史を紐解くと、この台風の脆さに着目し、人類が台風を制御しようとした取り組みは本 MS 目標が初めてではない。人類が月を目指した 1960 年代、実は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) ^[15]。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てしまった。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。今日我々は、コンピュータシミュレーションという 50 年前には全くなかった手段を手に入れている。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、どうすれば台風を制御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。

台風能耐うる船舶の実現性

2018 年に関西に上陸した台風 21 号の影響で関西国際空港の連絡橋に錨泊中のタンカーが走錨し衝突した映像は多くの国民に衝撃をもたらすと同時に台風の前ではいかに人間が無力であるかを痛感させた。そのように強大なエネルギーを持つ台風が突入して無事でいられるのか。答えは理論的には可能である。

台風の可航半円内で台風の強風を帆で受けて台風の移動速度で帆船を航行させ、海中のスクリュプロペラを回して発電できることは研究レベルでは提案されており、プールでの縮小模擬実験でも検証されている。また、海上構造物の観点では、すでに台風下での風車による風力発電について国際認証取得事例も存在している。さらに、台風の中に船舶が突入するため、乗組員の安全を確保するには、この船舶は無人運航可能であることが要請される。遠隔操船についてはすでに実証実験段階、自律操船については研究が始まった段階であり、実現の可能性は十分にあるといえる。

3. Background（当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等）

3.1 Why now?（当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由）

社会における要請の側面

激甚化する気象災害

近年、強い台風の本州への上陸が続き、これに関連して深刻な風水害が連続して発生している。図 3 は、1945 年～2018 年の主な台風の死者・不明数と気圧低下・高潮偏差の経年変化を示したものである。本州に上陸した強い台風（気圧低下量）は、1965 年以前もしくは 1990 年以降に多く見られ、2m を超える高潮偏差をとまなう台風も同様な経年変化の傾向があることがわかる。また 1960 年以前は数百人以上の死者・行方不明者を伴う被害が多かったが、これ以降は大きく減少していることもわかる。一方で、2018 年および 2019 年と強い台風の大阪および東京への通過は、これまでの被害と様相の異なる被害がいくつか見られた。

2018 年台風第 21 号（Jebi）は、8 月 30 日には 915hPa まで発達し、近畿を中心として広い範囲に大きな被害をもたらした。2019 年台風 15 号（Faxai）は、9 日 3 時前に三浦半島を通過し、千葉市で最大風速 35.8m/s を記録し、千葉県に大きな強風被害をもたらした。Faxai に続いて 10 月に発生した台風 19 号（Hagibis）は、大型で猛烈な台風に発達し、大型で強い勢力（中心気圧 960hPa）で伊豆半島に上陸し、横浜市で最大瞬間風速 43.8m/s を記録、箱根町の 24 時間降水量は 945.2mm と非常に強いものであった。これら 2018 および 2019 年の 3 つの台風のイベントによる損害保険の支払額は両年共に 1 兆円を超えている。

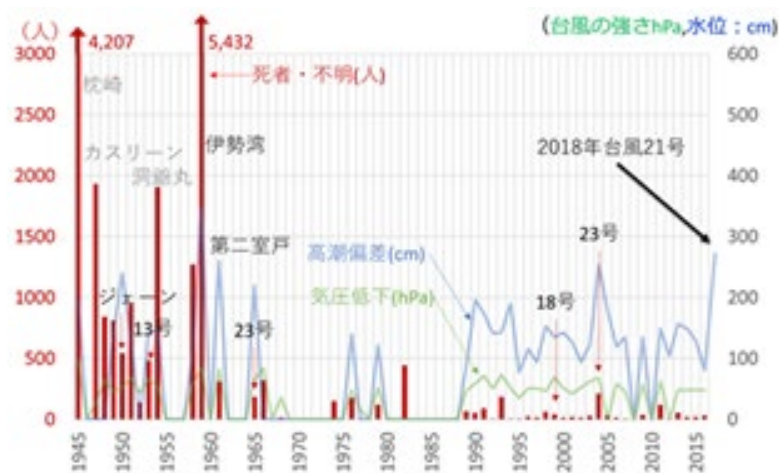


図 3： 主な台風の死者・不明数と気圧低下・高潮偏差の経年変化
(気象庁災害をもたらした気象事例^[19]より高知工科大学磯部先生作成資料を改変)

土木学会レジリエンス確保に関する技術検討委員会（2018 年）^[20]では、東京で最大クラスの高潮被害が生じた場合には直接・間接経済被害が合計 110 兆円、洪水被害で 62 兆円を見積もっている。この際の想定死者数は高潮被害で 8000 人、洪水被害で 2100 人、さらに影響人口は高潮被害で 140 万人、洪水被害で 126 万人と甚大な被害想定が示されている。

温室効果ガス増加による地球温暖化への影響は、気温上昇や海面上昇だけでなく自然災害に影響を与えることが予測されている。予想されている将来の温かい気候条件は、台風発達に重要な海洋の海面温度の上昇や大気不安定度の変化が予想され、台風の勢力の強大化や強い台風の発生割合の増加が多くの研究で予測されている（Knutson et al. 2015^[9]; Yoshida et al. 2017^[18]; Yamada et al. 2017^[17]）。台風強度の増大だけでなく、スーパー台風のような非常に強い台風が日本本土へ上陸するなど(Tsuboki et al. 2015^[12])、中緯度においてもこれまでにないようなハザード強度の増加が予測されている。地球温暖化の影響の中で、我が国の風水害への影響として最も重要なのは台風勢力の強大化であり、これに連動して強風、斜面崩壊、河川氾濫、沿岸部氾濫に対して顕著な被害の増加が予見されている。地球温暖化の影響は、先の被害想定規模をさらに加速させ、我が国に対して壊滅的な被害をもたらす風水害の発生につながることを予想されている。高潮による水位上昇や風により構造物にかかる力は風速の 2 乗に比例するため、台風強度が 10hPa 程度強くなるだけでも、災害強度には大きな影響を与える。これらに対応する為には、防災インフラのさらなる強化が必要であるが、非常に長期間の対応と莫大なコストが必要である。

本 MS 目標は、ハザードそのものを調整することにより、被害額軽減に直結する研究を目指している。この成果は、現在、災害復旧に大きく投資されている防災事業費そのものを軽

減することが期待され、研究投資として効果が明確であると考えられる。

新しいグリーンエネルギーへの期待

地球温室効果ガス削減目標に向けて、日本は「2050 年カーボンニュートラル」を宣言し、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を推進していくことを発表している。グリーン成長戦略では、再生可能エネルギーのより積極的な導入と効率的な運用が求められており、その中でも洋上風力と蓄電池を成長分野とするための支援を重点的に行っていくことを表明している。一方で、既存の再生可能エネルギー利用だけで電力需要を満たすことは現実的ではなく、他のエネルギーと併用しながらの運用となることが想定されている。このような状況の中では、既存の再生可能エネルギーの効率的な運用だけでなく、新たな発想での再生可能エネルギー取得方法についての研究開発を推し進めていく必要がある。

台風発電は従来までの洋上風力発電に対し、船舶という移動体によって台風に従って発電するという新たな発電方式を実現することで、まさに新しい再生可能エネルギー生成手段を拡大することとなり、我が国のグリーン成長戦略を支える新エネルギー源としてのポテンシャルを大いに秘めている。

科学技術的要請の側面

スーパーコンピュータの発展

アメリカにて 1960 年代に実施されたハリケーン制御実験プロジェクト Stormfury では、台風減勢に成功したとの結果記録が残されているものの、制御効果によって台風が減勢したのか、自然現象として台風が減勢したのかについて、明確な切り分けができなかった (Willoughby et al. 1985^[15])。そのため、その後の制御実証実験が凍結されてきた。日本においても、1961 年に制定された災害対策基本法に「台風に対する人為的調節」の語が記載されているが、アメリカと同様の理由により、これまでは政府が手厚く支援し得る技術レベルに達していなかった。

しかし、近年のコンピュータ技術進展によって、詳細な数値予測モデルを用いて、広範囲の領域に対して台風シミュレーションを実施できる環境が整ってきた。このため、航空機観測等の手段を用いて、観測的に精度の高いモニタリングを実施し、高精度な初期値／境界値を数値シミュレーションに考慮することで、制御効果と自然現象の切り分けができる可能性が出てきた。

近年、日本には強い勢力の台風が複数襲来し、大きな被害を連続的に引き起こしている。数値予測モデルの精緻化と精度の高い初期値／境界値の取得に力を注ぎ、激甚化する台風、日本の技術で立ち向かい、災害対策基本法で定められる台風の人為的調節を実現に向かわせることが、今まさに求められている。

観測技術の発展

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 年と 2018 年に名古屋大学を中心とするグループは、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^[16])。これにより台風の勢力をコントロールしてい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^[5])。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^[13])。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^[14])。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、本 MS 目標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る。近年のこれらの発展は本 MS 目標に取り組むポテンシャルを急速に高めた。

無人操縦技術の発展

近年、IoT や AI 技術の進化、通信環境の整備により自動車分野を中心に無人操縦技術の開発が急速に進展しており、すでに世の中で実証されている製品が登場している。この無人操縦の流れは航空機・船舶の分野にも広がりを見せている。日本財団は 2019 年より無人運航船の実証実験にかかる技術開発共同プログラムをスタートさせており、2025 年までに無人運航船の実用化を目指すことを明らかにしている^[23]。

台風に突入し、強風下でオペレーションする台風発電船に船員を乗船させることは安全性を考えると非現実的である。そのため、台風発電船は無人操縦であることが必須条件となるが、その実用化はすぐそこまで迫っているといえる。

3.2 Social significance (目標達成の社会的意義)

台風制御による「安全で生き活きとした持続的な社会への貢献」

我が国を見舞う台風が近年、激甚化しており、甚大な被害をもたらしていることから、政府としても国土強靱化施策により、災害に強い日本のインフラを造ることで対応を進めてきている。一方、日本は四季折々に様々な表情を見せる自然に恵まれた国であり、そのことが豊かな文化が育まれる背景となってきたことに鑑みると、コンクリートのような人工物に囲まれ、自然と隔離された世界での生活というのは、日本にとって重要な文化を失っていくことに繋がりがかねない。また、今後人口減少に伴い、税収が減少していくことが想定され

る中で、より強固なインフラを作り続けることが現実的に可能かについても検証が必要である。

そういった、国土強靱化計画の限界を端緒として、激甚化する災害そのものを小さくすることはできないのか、という社会ニーズが人々の間に生まれると予想される。

我々が目指す台風制御を日常化させる目標は、悲惨な災害への脅威を取り除き、自然と共生することを可能にするものである。このことは日本で暮らす人々が安全で生き生きとした生活を送ることのできる持続可能な社会を創出するものであると確信している。

台風発電という再生可能エネルギーの創出による「脱炭素社会への貢献」

前述の通り、地球温室効果ガス削減目標に向けて、日本は 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を推進していくことを発表している。グリーン成長戦略では、再生可能エネルギーのより積極的な導入と効率的な運用を掲げているが、既存の再生可能エネルギーの効率的な運用だけでなく、新たな発想での再生可能エネルギー取得方法についての研究開発が必要だと認識している。また今後期待されている洋上風力発電は、洋上風域の適地が限られること、送電線の整備が必要であること、洋上でのメンテナンスが困難であることという要因から、近い将来に発電資源としてのコストベネフィットおよび資源量の上限に達すると思われる。

巨大なエネルギーを持っている台風から効率的にエネルギーを取得することができれば、「台風」を既存の再生可能エネルギーのラインナップに加えることが可能になる。日本は、ほぼ毎年のように巨大なエネルギーを持つ台風が来襲すること、広大な排他的経済水域を有しているという、台風発電を実現する上では、非常に有利な国であるといえる。これまでエネルギーに乏しい国と称されてきた日本が、脅威を恵みに変えるというまさに逆転の発想で脱炭素社会における自然エネルギー大国として名乗りを上げることは十分に可能である。

台風イノベーションによる「技術大国日本の復活に貢献」

我が国の科学技術力は、論文の量や質、各種競争力指標等、国際比較において凋落が著しい。日本は 2000 年代初頭に論文数のシェアで世界 2 位を誇っていたが、17 年には米国、中国、イギリス、ドイツに次ぐ 5 位にまで転落した。ほかの研究者が論文を作成する際に引用される機会の多い「ハイ・インパクト論文」で見ても、02 年から 17 年までの間に、トップ 1% 論文（論文引用の回数が上位 1% に入る論文）数では 5 位から 12 位に転落した。

日本の産業競争力も科学技術力の推移と並行して凋落傾向にある。産業の米とも呼ばれる半導体業界については、1980 年代半ば、日本は世界を席卷し、世界シェアが 50% を超えたこともあったが今や世界シェアは 6% にまで落ち込んでいる。また戦後の長い期間、世界シェアの過半数を握っていた造船業界においても、2020 年における建造量の世界シェアは 22% にまで低下している。

日本の科学技術力、産業競争力を復活させるためには、中国、米国などがこれまで 20 年以上に渡り地道に行ってきた研究開発への投資と人材の育成が必須であるが、既存の産業技術力を高めるといのはなかなか難しい。将来の夢を実現させるムーンショット型の技術開発では、これまでとは全く異なる社会の実現を目指すため、市場も新しく創出され、全く新しい技術・製品が必要となる。この新たな技術、産業において日本は再度技術で世界を牽引する存在を目指すべきであると考え。台風を制御し、活用する（発電）というこの目標を実現することは、このチャンスをもたらすものであり、凋落傾向にある日本の産業を活気づけ、技術大国日本の復活に繋がるものと考えている。そして日本発の新技术が、台風被害を受けている世界の国々にも同様に恵みを分け与えるものとなると確信している。

産学シームレスでの研究による「世界で戦える人材育成に貢献」

目標達成に至る過程において、若手の研究人材および起業人材が育成される。

まず、目標達成には多岐に渡る科学技術的・社会的課題の解決が必要であり、これら課題解決を図る研究開発を 2050 年まで長期的に担う人材の育成が必須であることから、目標達成に至る研究上の取り組みが、戦略的な研究人材育成の場として機能すると期待される。対象とする研究分野は、気象学、計算機科学、船舶工学、航空工学といった既存の領域に留まらず、台風を中心としたジオエンジニアリングとも呼べる新たな研究分野にも及ぶ。さらにイノベーションを研究対象とする社会科学分野の研究等も含まれる。育成された研究人材により裾野の広い研究が展開され活性化が見込まれる。

また、研究成果の社会実装のための事業化、あるいは研究開発途上で生み出されるバイプロダクトを活用したスタートアップ創業が促されることで、研究開発への投資を呼び込み、安定した持続型の研究開発が可能となり目標達成を加速させると考えられる。研究人材の育成と同様に、これら事業化を担う起業人材の育成と登用も目標達成に至るプロセスにおいて促進されると見込まれる。

研究人材、起業人材いずれの育成の場合においても、我が国の産業競争力回復のポテンシャルをもつ本目標を達成するための具体的な課題に若手世代が取り組むことで、世界で戦える実践的な人材育成がなされると期待される。

3.3 Action outline（当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取り組み概要）

本目標案を実現するためには、気象分野だけでなく、防災、計算機科学、船舶工学、航空工学の研究者の参画が不可欠である。また産業界からの参画も必須である。台風制御に必要な航空機の開発・製造や台風発電に必要な台風発電船・発電・蓄電・送電システムの開発・製造には重工業界や電機業界など、さらに台風制御をするべきかどうかを判断するためには被害の予測が必要となるため過去の災害データを保有する保険会社や試算を実施するコンサルティング会社などの参画も必要となるであろう。

台風は地球規模の現象であるため、日本に接近・上陸する台風であっても制御・発電にあ

たっては近隣諸国との合意に基づいた実施が必要となり、国際法の整備や国際機関によるガイドラインの策定も必要となる。

台風という広範囲かつ多数の人々に影響を及ぼす現象の制御となれば、その実施可否の判断は国が実施することが妥当と想定され、台風発生からの短期間で実施を判断し、実行に移すためには既存の行政組織の枠組みを超えたスムーズな連携が求められる。

そして何よりも、台風制御・台風発電という新しい技術に対して国民が正しく理解し、この技術を希求するムーブメントを巻き起こすことが肝要だと考えている。

4. Benefits for industry and society

(当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化)

社会にもたらされる変化

台風制御の実現によって、人命の損失という耐え難い精神的苦痛から解放されるだけでなく、台風による経済的な損失の回避や、将来への不確実性の減少によって、国民の生活や企業活動が安定する。国や自治体レベルにおいても、防災のための人的、金銭的成本の低減によって、不要となったコストを成長につながる施策に振り向けることができる。このような安定した社会の実現は、わが国の魅力の向上にもつながり、海外からの投資や、優秀な人材の流入にもつながることが期待できる。また、台風発電の実現によって新たな、かつクリーンなエネルギー源が膨大に生まれることで、再生可能エネルギーへの転換が促進され、脱炭素社会の実現に近づくことができる。現在の世界共通の課題である脱炭素社会の実現に向けた有効な解決策を提示することで、わが国の国際的なプレゼンスの向上も期待できる。

産業構造にもたらされる変化

台風制御や台風発電は様々な領域のビジネスによって構築されており、MS 目標実現後はもちろんのこと、実現に至る段階においても様々なビジネスの創出が期待できる。台風制御の実現に至る過程では、制御実行のための準備として、例えば衛星、無人観測機、高性能スーパーコンピュータの開発、製造、運用が必要になり、これらに関連した産業が発展する。制御の実行段階においては、例えば航空機、インパクト物質の散布装置、インパクト物質を調達する必要がある、関連産業が発展する。これまで防災・減災の中心はインフラ産業であったが、海外への技術輸出は地域特性や事業規模の大きさから大きな障壁があった。一方、本 MS 目標と関連の深い産業は、航空機製造業や船舶製造業などの製造業であるため輸出がより容易になる。すなわち、防災・減災関連産業の市場を世界規模で拡大することが可能である。

MS 目標が実現された、台風による甚大な被害を心配することがない世界では、ビジネスの前提条件が大きく変化する。台風による強風を考慮する必要がなくなれば、これまで

以上の超高層ビルを日本に建設することが可能となったり、高潮を考慮しなくてよくなれば、水辺や水上に都市を建設することも可能となるなど、ビジネスの自由度が高まり都市開発にも有益な影響をもたらす。また、台風上空・内部での安全な飛行技術を応用し、台風上空からの遊覧や台風の眼内部への突入など観光資源としての台風の活用も実現し、台風制御システムや台風発電システムから取得されるデータを利活用した新たな産業が創出されることも期待される。

また、台風による人的、資産的被害が生じない社会になれば、サプライチェーンマネジメントや事業継続計画（BCP）の前提も変化する。台風が生産拠点や流通網へもたらす影響を考慮する必要がなくなるため、効率的なサプライチェーンの構築が実現できるとともに、台風対策に充当されていたリソースを他へ振り向けることができる。さらに、自然環境というビジネスのマクロ環境がより安定すれば、ビジネス拠点としての日本の魅力が向上し、海外からの投資の増加や日本へ進出する企業の増加、ひいては労働人口の増加というわが国の経済発展に好ましい影響をもたらす。

ここまで述べた通り、台風制御、台風発電の実現は日本の産業にとって非常に大きなインパクトを与えることが期待される。まとめとして、台風制御、台風発電の市場規模について試算した結果を示す。

台風制御市場

温暖化の影響を受け、世界の気象災害被害は年々増加傾向にあり、2000～2020 年にかけての被害額は年平均で 5%上昇している^[21]。今後もこの傾向が続くと想定すると 2050 年には台風（サイクロン・ハリケーン）による被害額は日本国内で年 7.8 兆円、世界全体では 30.5 兆円に達すると予想される。我々が提案する台風制御はこの被害を 0 にすることを目指している。台風のような広範に影響を及ぼす自然現象を制御することを考慮し、台風制御が国によって公共サービスとして実施されることと考え、さらに事業の費用対効果として $B \text{ (Benefit)} / C \text{ (Cost)} = 2$ として費用をかけるとすれば、台風制御の市場規模は以下のように推算される。

日本国内市場：3.9 兆円（2050 年）

世界全体：15.2 兆円（2050 年）

台風発電市場

日本国内の 2050 年の消費電力は 1.3-1.5 兆 kWh と見積もられている。また、2050 年には以下の電源構成を基本に検討を進める旨、経産省から提示されている^[22]。

- ・再生可能エネルギー：50-60%
- ・火力・原子力：30-40%
- ・水素・アンモニア：10%

再生可能エネルギーの割合を増加させる動きは世界の趨勢であり、日本も実現に向けて研究開発が進むものと想定されるが、一方で、2030 年時点の再エネ割合は最大 25%と見積もられており、再生可能エネルギー目標達成に向けてはさらに 25-35%の増加が必要となる。もしも台風発電が実現されれば、新たな再生可能エネルギーとして注目されることは間違いない。エネルギー単価として、中長期の再生可能エネルギー（風力）コスト目標として置かれている 8-9 円/kWh を採用するとすれば、台風発電の市場規模は以下のように推算される。

台風発電が将来期待される再エネ比率増加分を賄うシナリオ：4.7 兆円（2050 年）

再生可能エネルギー100%（台風発電 65%）シナリオ：8.8 兆円（2050 年）

II. Analysis（統計・俯瞰的分析）

1. Essential scientific/social components

（当該 MS 目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取組み）

提案する MS 目標では、「台風は人類にとっての脅威ではなく、エネルギーをもたらす恵みへと変貌している」社会像を 2050 年に実現することを掲げている。そのための技術開発目標として、台風制御と台風発電という 2 つの項目を開発ターゲットとして掲げているが、科学的・社会的な観点でこの 2 つを実現するための共通の基盤課題として台風の高精度予測が必須となる。台風の高精度予測が実現することで、台風制御効果と自然現象の切り分けがはじめて可能となり、また台風制御や台風発電による精度の高い効果予測に基づく実施判断をすることができるようになる。さらに、持続可能な社会システムとして台風制御や台風発電を成立させるためにはその効果と費用の比較、すなわち事業成立性評価も重要な課題と言える。

以下では、台風の高精度予測、台風制御、台風発電のそれぞれにおける科学技術的課題、事業成立性評価のための科学技術的課題と、MS 目標全体を実現するための社会的課題を整理する。

台風の高精度予測における科学技術的課題

台風予測の現状として、スーパーコンピュータを用いた高解像度の広域の数値予測モデルによって精度の高い台風予測が実現することが期待されるものの、台風の中心気圧や風速等の実測値が得られておらず、現実の台風の実態が正確に理解されていない。また、台風の初期摂動に対する変化・脆弱性やメカニズムについては十分に理解されていない。スーパーコンピュータの継続的な発展に基づいた高精度な数値予測モデルの開発、航空機による直接観測や人工衛星・地上レーダ等によるリモセン観測に基づく台風の正確なモニタリング、台風詳細メカニズムの解明が必要である。台風制御や台風発電を実現するためには、より高精度な台風予測を可能とする高精度な数値予測シミュレーションの実現が必要となる。具体的には、台風観測（真値、境界条件の取得）による正確な台風モニタリング、高解像度台風予測モデルの構築及びスーパーコンピュータの活用に取り組むことにより、台風予測シミュレーションの高精度化が進み、台風制御・台風発電の精度と事業成立性の評価が可能となる。

台風制御における科学技術的課題

提案する MS 目標が目指す社会像である「台風の脅威を恵みに変換する」のうち、台風制御が果たすべき役割は、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。

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。台風のどの場所に、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。

台風の高精度予測に向けての取組みとしては、既述の通りである。

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、実際に航空機のできる飛び方と、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の機体計画が挙げられる。航空機によるオペレーションは低コストで、なるべく少ない機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を計画することが課題となる。

台風発電における科学技術的課題

提案する MS 目標が目指す社会像である「台風の脅威を恵みに変換する」のうち、台風発電が果たすべき役割は、台風を資源活用することで、人類にとっての恵みに変換するところにある。台風発電の現状として、洋上での代表的な発電方式である洋上風力発電は、着床式または浮体式のいわゆる移動不可な風車を採用しており、台風が頻繁に通過する日本では風速の変化の幅が大きいため風車の故障率が諸外国と比較して高く、導入が遅れているのが現状である。通常的环境だけでなく台風時にも安定的に発電するための風車の開発事例は存在するが、台風を積極的に利用して船舶のような移動体によって台風を追跡しながら発電しようという取り組みは現状では存在しない。

台風発電を実現するために必要な科学技術的課題としては、台風の高精度予測、台風発電船の構想立案、台風発電・蓄電・送電システムの確立の3つが挙げられる。

台風の高精度予測については、台風発電を実施する際に台風がどの速度で進みいつ台風がなくなるかなどの台風の進路が高精度に予測できないと台風発電の発電量などの効果算定ができず、結果として損失を出す可能性もあるため必須となる。

台風発電船の構想立案については、台風に向かい、発電終了後に陸地へ寄港するのに要するエネルギー以上の発電を得ることができるような台風発電船を開発する必要がある。実際にどのように発電するのかについては様々なオプションが考えられるが、発電効率を考慮すると硬翼帆やフレットナーローターによって台風の強風を利用して台風に従うように船舶を移動させ、同時に船底に設置した水中タービンを回転させることによって発電するような形態が望ましいと考えている。また、発電した電気の利用法は様々な考えられる。直接送電する方法、水素変換を行い輸送する方法、または船舶に設置された蓄電池などを利用して蓄電する必要がある。蓄電についても様々なオプションがあり、台風発電船としてどのような設計案を採用すべきかをより詳細に検討する必要がある。

台風発電・蓄電・送電システムの確立については、実際にオペレーションを実施するための全体システムの構築が必要となる。具体的な開発項目としては、遠隔・無人での台風発電船オペレーション手法の開発、台風発電船に適した蓄電システムの開発が挙げられる。また、船舶は、個々の要素技術を取りまとめて搭載し、有機的に連携することで要求される機能を実現する統合システムである。そのため今後急速に進歩し続ける個々の技術成果の中から、その時の最適なものを採用し、システムとして統合する作業を繰り返すことになる。その上で実海域試験を繰り返し、2050年までに企業化に耐える発電船システムの構築を目指す。

事業成立性評価のための科学技術的課題

提案するテーマの事業成立性は、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。

また台風発電についても同様に、様々な発電方法の一種と考えれば、他の発電方法よりコスト面や環境面で有利であることを示していく必要もある。

持続可能な社会システムとして根付かせていくために、効果についても科学的に実証していくことが必要であると認識している。

MS 目標全体を実現するための社会的課題

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。また台風発電についても、約 60%が台風発電によって得たエネルギーを台風が通過したエリアの市民に供給するアイデアについて魅力的だと回答している。これらの結果から、国民の半数以上が台風制御や台風発電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。また、台風発電については約 31%が強風による設備の損壊に対し懸念を示している。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・台風発電の仕組みや、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発電・台風発電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、様々なプレーヤーを巻き込んだ議論が今後必要となる。

2. Science and technology map

(当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰)

前項で述べた科学技術課題を俯瞰して記述したものを図 4 に示す。ここでは、それぞれの項目ごとに研究開発の変遷と提案する MS 目標の実現につながるブレークスルー項目に関する検討内容を説明する。

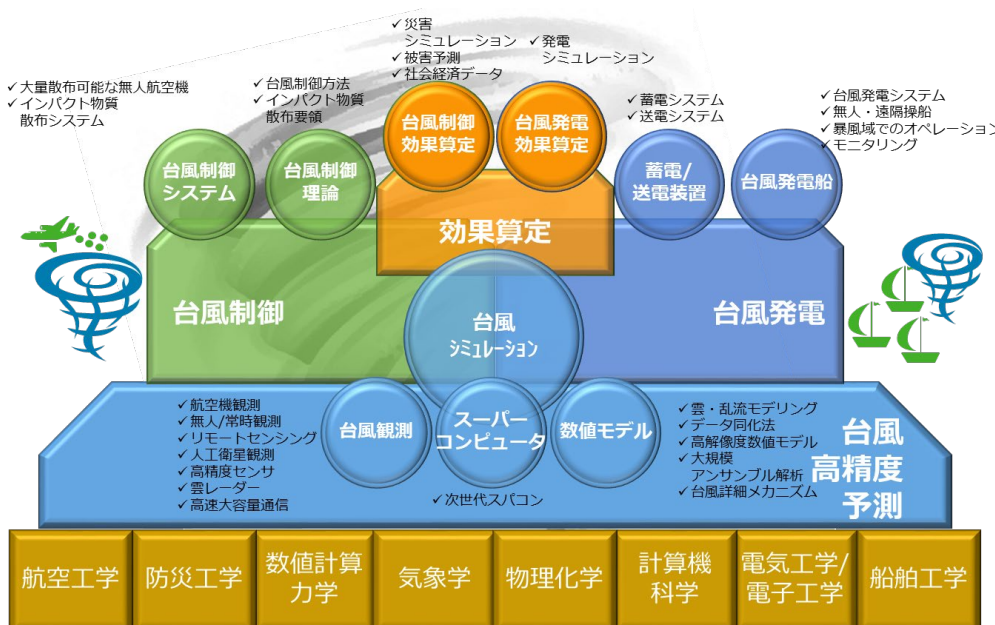


図 4： MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰

台風の高精度予測

台風の予測精度向上のためには、以下の各項目の進展が必要である。観測等から得られた初期場・環境場の情報から、数値モデルをスーパーコンピュータ上で駆動することによって、台風の進路・強度等の予報が得られる。台風を現実的に再現するためには数値モデルの高解像度化や雲・乱流モデルの改良等の高度化が必要であり、数値シミュレーションの結果を改善するためには、台風および周囲の気象場の発展に関する科学的理解の進展が必要である。

稠密・高頻度な観測

観測については、現状では海洋上の台風の観測データは、不十分であり、台風の予測精度を向上するためには、真値をより正確に観測する必要がある、そのためには航空機による直接観測が要請される。日本に接近する台風全てについて航空機観測をするのであれば、毎年4億円程度の経費が必要と見積もられる。2050年にむけて前半では、台風の航空機による現業的な観測を実現する必要がある。さらに将来（後半）は、無人航空機・無人観測船による台風中心の定常的な観測の実現に向けて検討を進める必要がある。これらのデータはリアルタイムで地上の台風研究機関および台風予測現業機関に送信される必要がある。そのために大規模容量通信の整備も必要である。

台風の内部構造について、高解像度かつ高頻度(km, 5分程度)での時空間分布をより正確に把握する必要がある。人工衛星観測、航空機観測、船舶観測、地上観測を統合的に利用して、数値モデルを介した同化により、台風内部構造のデータ同化データベースを構築する必要がある。技術的には現状の知見で十分取り組みが可能であるため、早急にこの研究を進める必要がある。数値モデルにおいては、雲・降水過程の表現の不確定性が大きいと、様々なリモセンデータを制約することで、台風の雲物理構造を検証・改善・精緻化する必要がある。

台風の人工衛星観測による監視のため、静止気象衛星ひまわり等の多くの観測衛星による包括的な観測が利用されている。これらの人工衛星は5-10年程度の寿命があり、今後継続的に人工衛星観測を継続する必要がある。特に、台風の現業的な監視には、静止気象衛星ひまわりが最重要な役割を果たしており、将来も安定的に観測を継続する必要がある。また、台風の静止気象衛星による常時監視のためには、国際的な静止気象衛星観測網の構築・維持が必要である。気象庁において、2028年頃の打ち上げを目標に、ひまわり9号後継機の静止気象衛星について検討が進められているが、着実な実現が要請される。次期静止気象衛星では、国際的に要請される新規センサー（赤外サウンダーや雷検出装置等）の整備も進める必要がある。

日本に接近する台風の稠密な観測のためには、高解像度高頻度のレーダ網による地上リモートセンシング観測が必要である。フェーズドアレイ気象レーダ・二重偏波気象レーダの全国の稠密な展開が要請される。また、台風の現状監視のために今まで観測が手薄であった南洋（小笠原等）の離島での観測を今後整備する必要がある。これら地上リモセン観測デー

タは、台風の内部構造の詳細監視のために直接利用される他、数値モデルの雲降水過程の検証・改良およびデータ同化による台風コアデータベース構築のために必要不可欠である。近年のレーダは偏波レーダであり、かつフェーズドアレイ気象レーダが発展しつつあるので、その観測データはきわめて大規模である。そのためこれらのデータを、リアルタイムで台風研究機関および台風予測現業機関に送信するために、大規模容量通信の整備が不可欠である。

台風の強度の高精度モニタリングは、1ヶ月程度の飛行が可能な成層圏無人航空機からドロップゾンデ観測を台風の各発達過程について実施する。ドロップゾンデ投下装置を成層圏無人航空機に搭載し、台風の中心を常に追跡しつつ、ドロップゾンデ投下を行うことで、長期間の高時間分解能のドロップゾンデ観測を実現する。このような成層圏無人航空機については、2020年にソフトバンク HAPS mobile 社が成層圏飛行実験に成功しており、1ヶ月程度の成層圏無人飛行は実現可能性が見えつつある。

同時に有人飛行機を用いて、台風周辺を飛行し、高度 45000 フィート（約 14km）からドロップゾンデを投下することで、台風の環境場のデータを取得する。また、これまでの研究で可能であることが示された有人航空機による高高度で台風の眼への貫入観測を行い、眼内部でドロップゾンデを投下して、台風の強度の直接観測と内部構造の観測を行う。これらは近年の台風研究において実現しており、これを多数の台風に実施することが次の課題である。

台風へのインパクト物質の散布により、台風の雲がどのように変化するかを観測することはそのインパクトの検証の上で不可欠である。それを実施するためには、航空機に搭載した Ka バンド雲レーダが不可欠であるのでその開発を行う。航空機搭載のフェーズドアレイレーダは、X 帯、C 帯ではすでに米国で開発されているが、Ka 帯のフェーズドアレイレーダを航空機に搭載するためにはこれまでに無い技術開発が行われる。

台風を現実的に表現が可能な高解像度・高精度な数値モデルの継続的な改良・開発

台風の強度変化、特に急発達(rapid intensification)の予測のためには、km 程度以下のメッシュの数値モデルが必要とされており、かつ雲物理や乱流過程等の物理過程の精緻化が必要である。解像度、アンサンブル数に関しては、さらなる高解像度、多くのアンサンブル数の方がより予測精度向上に寄与すると考えられる。台風の強度予測には、台風の内部構造、すなわち眼壁やアウターレインバンド等の数値的再現性が必須であり、現状ではまだまだ不十分である。眼壁の形成・強化、多重眼壁、眼壁の入れ替わり等が台風の強度変化と関わっている。これらの予測精度向上のためには、眼壁の力学の理解の進展、再現のための数値モデルの改良（力学的・物理的）に多くの課題がある。

将来の台風予測の精度向上のためには、必要な解像度・アンサンブル数を実現することに加えて、数値モデルの性能を向上させる必要がある。このためには、数値モデルの結果を、実際の観測データによって検証し、その相違を改善するための科学的な検討が必要になる。

台風の強度変化の予測向上のためには、台風の内部構造の力学の理解の進展が必要であり、台風の進路の予測向上のためには、台風と環境場の相互作用の理解の進展、環境場自体の変化の精度向上が必要である。数値モデルの改良のためには、力学的な数値スキームの検討、雲や乱流・放射等の物理スキーム、大気と海洋・陸面等との相互作用の検討と改善が必要であり、それぞれ科学的課題を正確に理解して、改良を図る必要がある。

高性能なスーパーコンピュータ

スーパーコンピュータの今後の発展に関して、今後は今までの外挿での技術の進展は難しい。スーパーコンピュータ「富岳」の次期を見据えたスーパーコンピュータの検討が進められているが、従来のアーキテクチャーでの性能向上には限界が予想されている。メモリースループット、電力等制約要因を考慮して、新時代のコンピュータに適合して、数値モデルの方も変革が迫られる。多様なアーキテクチャーに対応できるように、数値モデルのプログラムを Domain Specific Language (DNS) で構築し直す等の開発が必要であり、モデル開発のために計算科学的な素養を有する研究者の養成が必要である。

台風制御

我々が目指す社会像である「台風の脅威を恵みに変換する」のうち、台風制御が果たすべき役割は、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。この「脅威でないレベルに低減」を実現するために必要な科学技術的課題及び取り組むべき研究開発内容について以下に述べる。

台風制御理論の構築

効果的な台風制御方法の特定

台風の強度を制御する方法は 1960 年代に米国が Stormfury プロジェクトで実施したインパクト物質の散布が基本と考えられる。台風やハリケーンなどの熱帯低気圧は、雲によって発生、発達し、構成する雲の構造と特性によって、強度がコントロールされている。このため雲の構造が変わると台風の強度が変わる。さらに雲の分布は台風の力学場を変えるので、その変化によって進路も変化することが分かっている (Fiorino and Elsberry, 1989^[3])。Khain et al. (2010)^[7] は米国に甚大な災害をもたらしたハリケーンカトリーナ (2005) について、雲の凝結核 (雲粒子を作るエアロゾル) の量により、台風の周辺の構造が変わり、中心気圧に最大で 40hPa も差が生じることを示した。このような雲の形成に影響するエアロゾルを変えるとハリケーンなどの熱帯低気圧の強度が変わることは多くの研究が示している (たとえば、Carrió and Cotton, 2011^[1]; Rosenfeld et al. 2007^[10]; Rosenfeld et al. 2012^[11] など)。さらに台風の強度を変化させるのは、エアロゾルだけではなく、雲の分布そのものが台風の強度をコントロールすることが、これまでの研究で分かっている (Fovell et al. 2016^[4] など)。これらの他に海洋から熱を遮断する方法や宇宙からマイクロ波で台風の雲上部を加熱する

などの方法が考えられるが、前者は海洋環境に甚大な影響を与える問題があり、後者は巨大な宇宙施設を必要とするという問題がある。これらと比較して、雲のコントロールによって台風強度を制御する方法ははるかに実現性が高い。現在、台風の予報モデルはきわめて洗練されてきており、高精度の台風再現が可能となっている。これを用いて台風制御実験が可能であることは上記の研究で示されている。これらの既存の技術を発展させ、最適な台風制御法を発見することは実現性が高い。それに基づいて、実際の台風インパクト物質を散布し、台風の雲をコントロールすることで、台風強度を制御することは原理的に可能である。

本調査中に検討し、コンピュータ上で実際に行ったシミュレーションは以下である。シミュレーション対象を2019年台風15号とし、台風の眼の中に30~50 kmの四方で囲んだ領域に氷晶を大量に散布するという条件を与えた。この方法だと中心気圧は人工制御なしのシミュレーションと比べて、中心気圧は3~5 hPa 上昇し、台風の最大風速は1~3 m/s 減少した。今回の人工制御では、台風の眼の中で散布した氷は乾燥域で気体に蒸発し、その蒸発冷却により台風中央部の暖気を一部冷やしたために気圧や最大風速が弱まるというメカニズムである。

今回の人工制御のために与えた領域はやや広めであり、その散布する氷晶の量は 10^{12} ~ 10^{13} kg になる計算で、実行には難しいと考えられる。今後は、質量対効果を考えて、実現可能な台風制御方法を考えなければならない。

台風制御におけるインパクト物質散布要領の確立

実際に航空機を用いて台風制御を行う場合、有人及び無人航空機が飛行しながらインパクト物質（例えば吸湿性物質）を散布するため、散布した吸湿性物質の濃度は、撒いてすぐのところは濃く、その拡散により濃度が変化する（図5）。すなわち、時間を関数とした種々のパラメータで構成されるので、インパクト物質の拡散をある程度モデル化してシミュレーションに組み込み、それに合わせた散布法を確立できるかが、航空機を使ったインパクト物質散布の社会実装のカギになると考えられる。

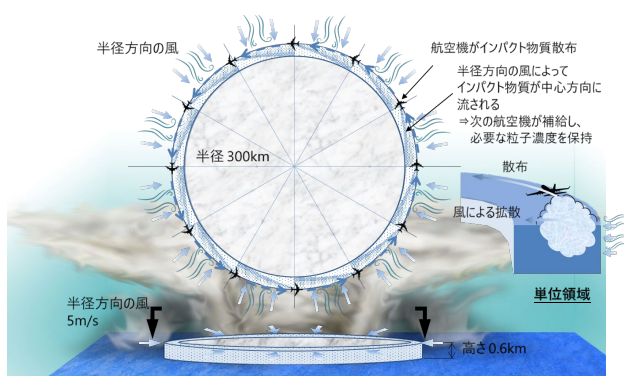


図5： インパクト物質散布イメージ

また、インパクト物質の散布量をより少なくし、より短い状態維持期間で、より大きな効果を得るためには、台風の敏感な箇所を明らかにし、そこに集中して散布することが効果的である。ハリケーンの構造／エネルギー収支に関するモデル(Malkus and Riehl 1960^[7], Riehl and Malkus 1961^[5])にもとづくと、ハリケーン的全運動エネルギーの50~60%は、全体の2

～5%の小面積に当たる壁雲内の上昇気流内の潜熱の放出によってまかなわれているので、効率的な散布箇所は、台風の眼の中の壁雲内という可能性がある。このような、費用対効果を最大化する検討も必要である。

台風制御システムの確立

台風制御システムとしては、インパクト物質を散布することに適した航空機と航空機に搭載される散布システムが核となる。

まず航空機についてであるが、台風制御によって得られる経済的效果に見合った規模での運用を想定した場合、どの程度の機体規模になるのか試算するため、散布するインパクト物質の粒子濃度や散布継続時間をパラメータに、最大積載量が1.5tonの小型機と、36tonの大型機が、各機の航続距離又は最大積載量が上限に達するまで、いくつかの代表速度で散布作業を行ったとして、それぞれの条件で散布に必要な機数を見積もった結果を図6に示す。

本図より、文献（Rosenfeld et al. 2007^[10]; Rosenfeld et al. 2012^[11]）で台風制御に必要と定義される粒子濃度（1kg/km³）や散布継続時間（2.5日間）を条件とした場合、大型機では10機程度、小型機では数百機程度必要との試算結果となった。その機数について、大型機は経済的成立範囲内だが、小型機はその範囲外であることから、機体の調達にかかるコストがある程度高価であっても、インパクト物質の積載量が大きい方が、経済的成立性と技術的成立性の両立には有利に働く可能性が示された。機体の大きさは、台風制御手法に適したものを選択するにせよ、経済的成立性を配慮した場合、必要機数を減らすために、なるべく積載量を稼げる機体を開発／活用することが課題になると考えられる。

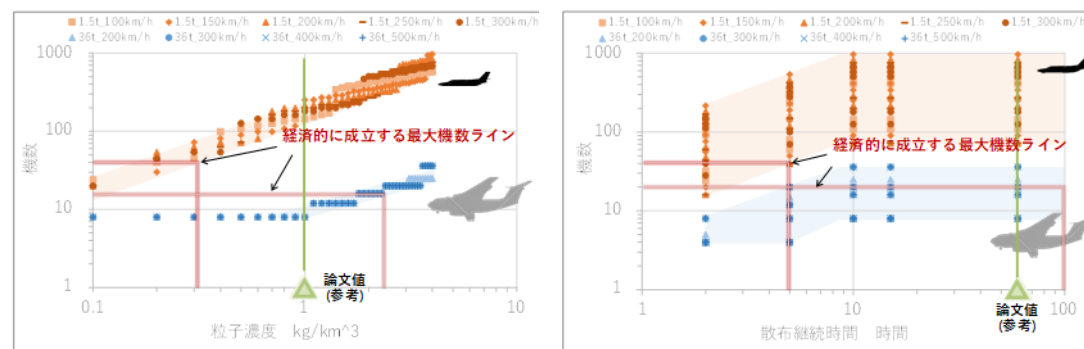


図6： 散布に必要な機数

また航空機に搭載される散布システムについても、シミュレーションによって得られた効果的なインパクト物質の散布を実現するものである必要があり、かつ積載量に制限がある航空機に搭載されるため、重量、耐空性等様々な条件をクリアする装置の開発が必要になると考えている。

台風発電

提案するMS目標が目指す社会像である「台風の脅威を恵みに変換する」のうち、台風発

電が果たすべき役割は、台風を資源活用することで、人類にとっての恵みに変換するところにある。この「台風の資源活用」を実現するために必要な科学技術的課題及び取り組むべき研究開発内容について以下に述べる。

台風発電船の構想

移動体である船舶によって台風を利用してエネルギーを取得する方法は様々なオプションが考えられるが、現状では発電効率を考慮すると、図 7 のような硬翼帆やフレットナーローターによって台風の風を利用して台風に追従するように船舶を移動させ、同時に船舶に設置した水中タービンを回転させることによって発電するような形態が望ましいと考えている。

硬翼帆やフレットナーローターを使った風の力を利用して船舶を推進させる技術は主にヨットで使われているのが現状であるが、実際の大型船でも実用レベルで使われている事例も出てきている。実用レベルで使われているフレットナーローターを推進器として用いる方法は、あくまで推進力の主となるプロペラ推進に対する補助的な役割で使われているのが現状であるが、帆走性能でいえばアメリカズカップなどではヨットの帆を利用して風速の 3 倍のスピードで推進することが可能な中型のヨットも存在する。台風に追従するように台風発電船を動かすのであれば、横風からの操船を上手に行うことで、船の横安定性を損なうことなく容易に推進力を得ることが可能である。もちろん、台風の強風に煽られて転覆などしないように復原性を考慮した台風発電船の設計が必要である。

また、台風下での船舶の操船は非常に過酷な状況であり、その中で人間が操船するのは安全性の観点から非現実である。台風発電船の社会実装のためには、無人・遠隔での操船が可能であることが必須となる。同時に、台風という過酷な環境下で操船するため、モニタリングやデジタルツイン技術などを活用することで常に船舶としての構造安全性を評価し、必要に応じてメンテナンスを実施するような仕組みの構築が必須となる。

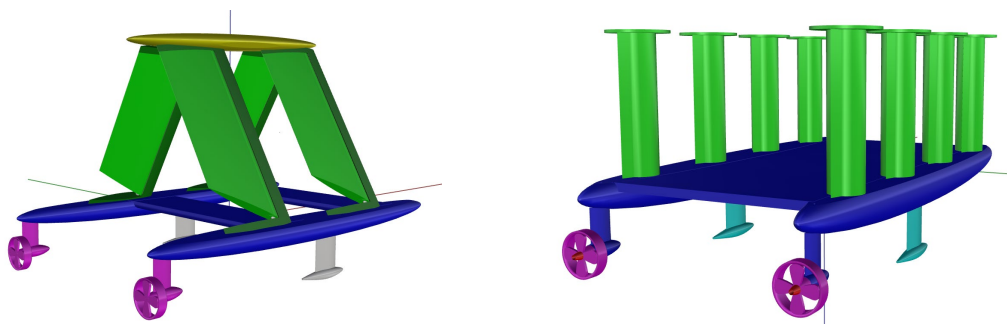


図 7： 台風発電船コンセプトイメージ

蓄電・送電システムの開発

船上エネルギーの貯蔵と輸送に関しては、いくつかの候補が考えられる。1つ目は、電気エネルギーを蓄電池に貯蔵して帆船で輸送するというものである。蓄電技術については、リチウムイオン電池、全固体電池、シリコン負極電池、空気電池、次世代スーパーキャパシタ、レドックスフロー電池など多くの技術開発が精力的に進められている。ただし、台風発電では、これらの蓄電池を大量に帆船に積む必要があるため、その製造コストと重量エネルギー密度を十分に考慮する必要がある。次に考えられるのは、上記蓄電池を用いずに、汲み上げた海水を電気分解して得られた水素を輸送する手法である。この場合は同時に海水中に含まれるレアメタルの回収も可能となる。水素の輸送に関しては、水素を圧縮する方法、液化する方法、トルエン等の液体に吸収させる方法などが開発され実用化が進みつつあるが、発電船内での作業であることをよく考慮して、システムの小型、軽量化開発が必須となる。上記した蓄電池や貯蔵水素の輸送は発電船が陸域に帰還することにより実行できるが、その他の手法として発電したエネルギーをマイクロ波で近隣の離島や洋上の基地へ直接送電する手法も考えられる。

効果算定

台風制御の効果算定

台風制御によるベネフィットは、軽減された被害によって推計される。軽減される被害の見積もりは、台風制御の有無の条件下での強風、地滑り、内水、外水および高潮等の台風に関連するすべての風水害の人的および経済被害額を予測するシミュレーション技術開発が必要となる。

現状の風水害に関する予測は、風速や降雨量、もしくは河川水位等ハザード予測か、これらをもとにしたバルク的もしくは診断的な被害予測に留まる。国民全員の理解を得るためには、制御により全体および個人への被害が増加しないという量的な保証が必要である。経済の直接被害の推計では、家一軒一軒の被害を求める地先レベルの超高解像度の風水害被害予測モデルが必要となる。間接被害の推計では、産業関連構造を地区単位で解く経済被害

予測モデル開発が必要となる。さらに人的被害の推計についても、大規模避難等も考慮した広域を対象とした詳細な避難予測モデル開発が必要となる。さらに、これらの人的被害および経済被害を予測するモデル開発では、実証実験およびモデル最適化が必要であるが、大規模災害に対する実データが圧倒的に不足しているという問題がある。また被害予測モデルの構築には、日本全国をカバーする 3D 都市および建物データ、資産価値データおよび準リアルタイムな人口動態のデータが必要であるが、これらについても現時点では存在しない。

台風発電の効果算定

台風発電によるベネフィットは、台風を利用した発電量と、陸上への輸送を含む台風発電に必要なコストの差によって推計される。発電量については、台風発電船によってどの程度発電できるかをモデルスケールではなく実機での実証実験を通して見積もる必要がある。コストについては、台風発電船を保有するために必要な CAPEX としてのコストだけでなく、港から台風への移動、台風下での操船、台風から港への移動に必要な OPEX としてのコストを考慮する必要がある。現状、世の中には台風発電船のような海上での移動体による発電システムの社会実装例は存在しないため、コストがどのように計上されるのかは社会実装の仕方によって大きく左右されるが、発電量の予測については、実機での実証実験を通じて事前に検討する必要がある。

3. Japan's position in overseas trends

(当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み)

台風制御

台風、ハリケーン、サイクロンが災害を引き起こす国は日本とアメリカ合衆国をはじめとして、東アジア、インド、バングラデシュなどのインド洋沿岸の国、および南半球の島嶼国やオーストラリア、ニュージーランドなどである。アメリカでは、避難についてはアメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁 FEMA が災害の避難等の指示を出す。避難自体の判断は個人に任されている。長期的な防災・減災対策については、US Army Corp の管轄であり、日本の国土交通省と同様であり、災害のアクティブ制御についての研究投資はされていない。

台風などの熱帯低気圧の観測やシミュレーション研究を行っている国に対して、台風やハリケーンの制御の現状と将来の研究実施可能性について調査した。対象は、台湾、韓国、米国、英国、フランス、中国、カナダ、バングラデシュである。米国の Stormfury 実験以降、台風・ハリケーンの制御実験が行われたことはなく、近い将来についてその計画がないというのがこれらの国に共通した回答であった。一方、日本が台風制御研究に取り組むことについては問題点を指摘しつつも歓迎するという回答がほとんどであった。これらの結果から、台風制御の研究への取り組みは日本のみで、この研究において世界最先端となりうる可能性がある。

台風発電

風力発電については欧州がリードしているが、台風発電のためには固定の洋上風車ではなく船舶という海上移動体を用いる必要がある。この点を踏まえた台風発電を実施する際の日本の強みとして、台風発電船の開発と運用方法の検討に必要なプレーヤーである船主・造船所・船用機器メーカー・船級協会・電力会社などが、すべて日本国内に「海事クラスター」として存在していることが挙げられる。小規模な会社を除けば他の国ではこのような状況はなく、台風発電船を開発するときに総合的な観点でエンジニアリングを展開することが可能なのは日本のみである。

また、台風発電帆船事業の社会実装を実現させるためには、洋上の発電船で得られたエネルギーの蓄電、送電（輸送）技術の高度化が必須である。幸いにして我が国はこの分野の研究開発は進んでいるため、これらの技術をさらに高度化し、結集することにより台風の恵みを人々に届ける事業は達成可能である。

さらに台風の通過する海域の多くは日本の排他的経済水域内であることも忘れてはならない。このことは、従来災害大国日本の象徴であったが、台風イノベーションによって、日本の大きな強みに生まれ変わるのである。

III. Plan for Realization（社会像実現に向けたシナリオ）

1. Area and field of challenging R&D, research subject for realization of the Goals（挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題）

MS 目標を達成するための挑戦的研究開発の分野・領域は、社会像実現にむけて必要な研究開発のうち、研究例が少なく、技術成熟度も低く基礎研究レベルのものが対象になると考えられ、図 8 の第三象限に位置する研究開発分野となる。

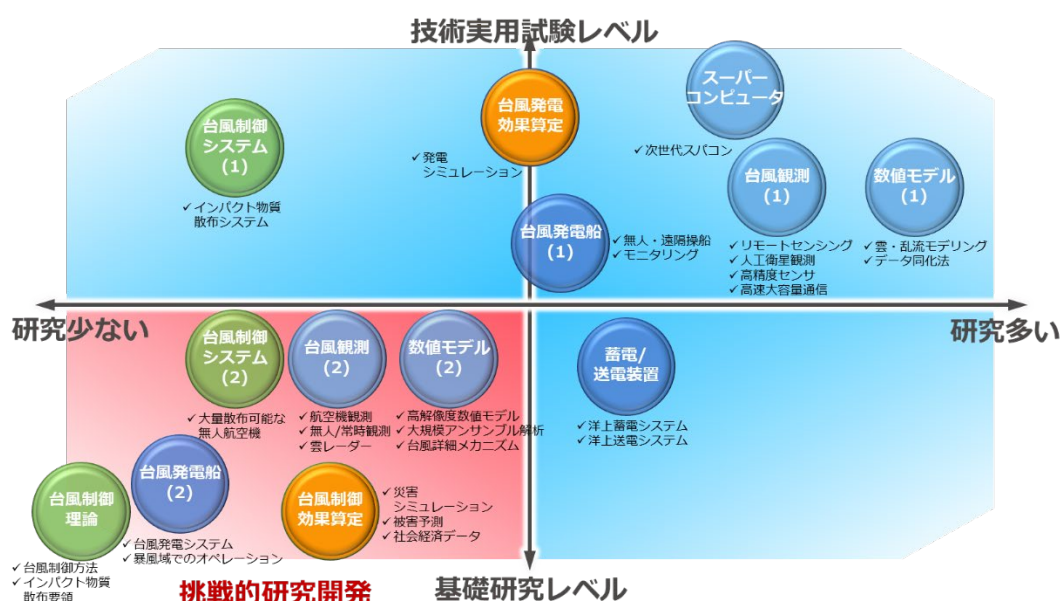


図 8：社会像実現に向けて必要な研究開発の位置づけ

台風シミュレータ（モデル・メカニズム）

台風の内部構造を詳細にシミュレートし、かつ台風の進路・強度を高精度で予測する「台風シミュレータ」の開発を必要とする。台風シミュレータは、現在、現業あるいは研究機関で開発が進められている数値気象予測モデルをベースに開発を行う。台風は、キロメートルスケールの眼の壁雲、アウターレインバンドのような内部の詳細構造を有し、太平洋高気圧やジェット気流といった大規模循環によって進路が規定される。したがって、台風シミュレータは広域かつ高解像度の数値モデルとする必要があり、1km 以下メッシュで全球まで拡張可能な広域を覆う高解像度数値モデルを開発の目標とする。台風シミュレータにより、1000 種類のアンサンブル計算を実施し、不確定性に関する確率情報を得る。台風シミュレータに利用する初期値、検証のためには台風の内部構造を正確に反映した観測情報が必要

である。台風シミュレータは、台風制御・台風発電の効果判定に利用するとともに、台風による被害予測にも利用する。本研究の全ての研究テーマに関わる基盤となる開発目標である。

現状での台風の強度・進路の予測は不確定性が大きく、初期値や環境場のわずかな差異によって台風の性質が大きく影響をうけることが知られている。しかし、台風のこれらの変化がどのようなメカニズムによるのか理解が不十分である。台風の眼壁の力学や環境場・海面との相互作用が重要な要因と考えられているが、信頼できる予測情報・制御の効果の判定のためには台風詳細メカニズムのさらなる理解の解明が必要である。台風シミュレータによる試行実験等を通じて、台風詳細メカニズムの解明につなげる可能性がある。

台風観測（航空機観測）

現在、台湾による限定的な台風周辺の航空機観測を除いて、台風の観測はすべて気象衛星によって行われている。このため台風の中心気圧や最大風速は衛星からの推定値であり、強い台風ではその誤差が大きいことが台風の実態把握と量的高精度予測のボトルネックとなっている。衛星からでは気圧や詳細な温度・水蒸気構造を得ることができない。そこで本テーマの挑戦的研究開発として、有人航空機による高高度からの台風の直接観測と無人航空機による長期間モニタリングを行う。これにより台風の実体とメカニズムを理解し、数値気象モデルによる予測実験のためのデータを取得することができ、台風予測の高精度化のブレークスルーになることが期待される。

また、台風の雲の時空間変動を立体的に観測するため航空機搭載雲レーダを開発し、雲の観測とインパクト物質散布に対する雲のレスポンスの観測を行う。

台風制御法の確立（シミュレーション、要素技術実証試験、実証実験）

従来考えられてきた台風の勢力を抑える方法としては、壁雲の外側の領域に種まき法を行う方法があげられる。種まき法とは、氷点下の大気でも凝結しない過冷却水に、ドライアイスやヨウ化銀を散布することで、凝結を促して氷粒形成を増加、対流雲の促進を導く。壁雲の外側で対流雲を促進させることは、台風中央への水蒸気流入を抑制させて結果的に台風の勢力を抑えることにつながる。しかしこの方法には、費用対効果の面で、散布領域や散布量で課題がある。また、台風減勢効果が出るまでには数日かかることも懸念される。台風制御を実現するためには、近年の高度な数値シミュレーションを駆使して、もっと効果的な台風制御方法を考案するのか近々の課題となる。

台風制御に適した無人航空機概念検討

現存する無人機のうち、対空型無人機は高高度飛行が可能、戦闘型無人機は巡航速度が大きい点が特長だが、これらの無人機を台風制御に流用するには積載可能量が不足している。

台風制御に用いる航空機には、インパクト物質を多く搭載できること、遠くの台風に早く

到達できること、経済性に優れることが求められるため、台風制御に特化した航空機の概念設計を行い、現実な機体計画を立案することが、台風制御の社会実装に向けたブレークスルーの一つになると考えられる。

台風発電・蓄電に適した無人船舶概念検討

台風を利用して発電するという既存には存在しない全く新しいコンセプトでの台風発電船を設計する必要がある。要素技術としては、台風の強風を利用して推進するための仕組みの検討、水中タービンを回して船舶の中で効率的に発電・蓄電するための要素技術、台風発電船を無人にて操船する技術、過酷な環境下で安全性を担保するためのモニタリング技術などが挙げられる。また、個別の要素技術だけでなく、様々なリスクや運用スキームなども考慮した経済合理性が成り立つ全体システムとして設計する必要がある。

効果算定（台風制御・台風発電）

送蓄電の方法に依存するが、台風発電によるベネフィットは総発電量で推計される。一方、台風制御によるベネフィットは、軽減された被害によって推計され、このリアルタイム推計技術開発が重要となる。オペレーションズ・リサーチにより、台風制御・台風発電にかかる費用およびベネフィットの最適化が行われる必要があり、これに関連するモデル開発を行う。台風制御のベネフィットとして、台風制御の有無に対する強風、内水、外水および高潮等の風水害の被害額を予測するシミュレーション技術が必要となる。直接経済被害の推計では、家一軒一軒の被害を求める地先レベルの超高解像度の風水害被害額予測モデルが必要となる。間接経済被害の推計では、産業連関構造を地区単位で解く空間的应用一般均衡モデルが必要となる。人的被害の推計は、エージェントベースモデル等の避難予測モデルが必要となる。これらのモデル開発、実証および最適化が必要であり、またモデルの実行には日本全国を対象とした 3D 都市データおよび準リアルタイムな人口動態のデータが必要とされる。

2. Direction of R&D for realization of goals

（2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果）

2030 年、2040 年、2050 年におけるマイルストーンと、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果を整理したロードマップを図 9 に示す。

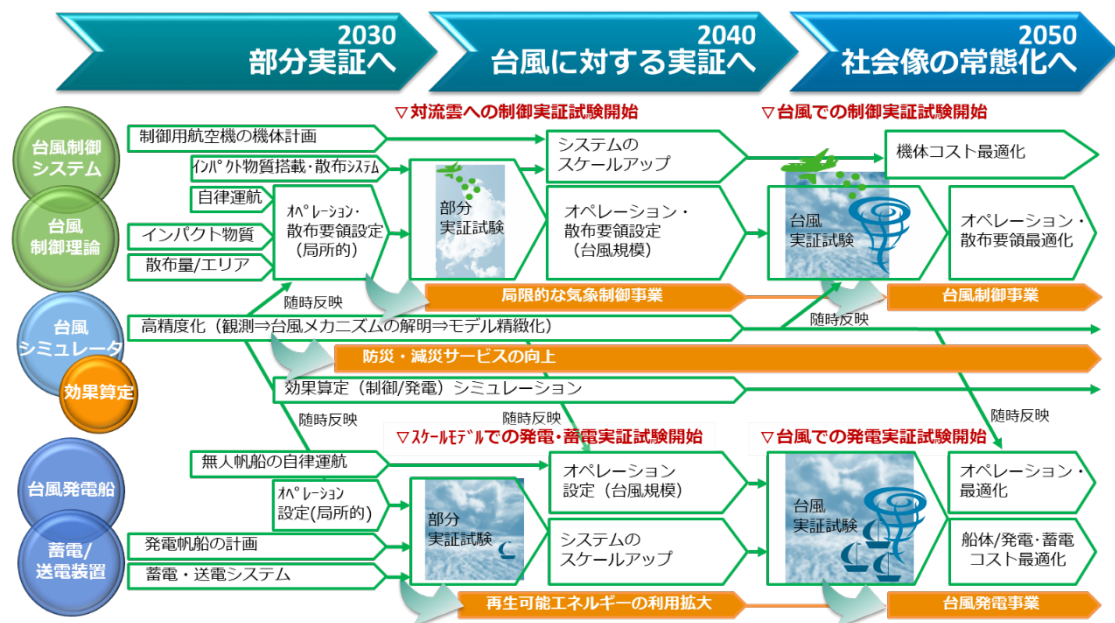


図 9： 社会像実現に向けたロードマップ

【2030 年】 部分実証試験開始を目指して

	台風制御	台風発電
① 具体的な目標（マイルストーン）	試作機による対流雲等への制御実証試験開始 台風制御のミニチュア実験として、孤立積乱雲のような対流雲に対してインパクト物質の散布試験を段階的に実施する。	スケールモデルでの発電・蓄電システム実証試験開始 台風発電のミニチュア実験として、小型帆船による発電・蓄電試験を段階的に実施する。
② 具体的な研究テーマ	台風シミュレーション高精度化 全期間を通じて継続的に高精度化を目指した研究を推進。特に、台風の直接観測による台風メカニズムの解明／モデルの精緻化により台風シミュレーションの高精度化を実現する。台風の定常観測手法の検討も実施する。 台風制御理論構築 台風のどこに何をどれだけ散布すれば良いのか、更にインパクト物質の散布量をより少なくし、より短い状態維持期間で、より大きな効果を得る方法について検討し、効果的な台風制御方法を見出す。 制御用航空機計画（自律運航含む） 台風制御用航空機として、インパクト物質を多く搭載でき、遠くの台風に早く到達でき、経済性に優れる機体を計画する。無人機を活用する場合は、自律運航技術の取込みも考慮する。	発電帆船計画 強風下で水中タービンを回して船舶の中で安定的・効率的に発電可能な船舶を計画する。発電船としての性能・経済合理性に目途が立った後、その要素技術を盛り込んだスケールモデルを開発する。 無人帆船の自律運航 強風を安定的に利用して推進するための仕組みの検討、無人にて操船する技術を開発する。

インパクト物質搭載・散布システム開発 台風制御理論に基づく散布法を実現できる、インパクト物質搭載システム・散布システムを開発する。航空機への取付検討も課題。 オペレーション・散布要領設定（局所的） 対流雲等への制御実証試験を見据え、インパクト物質散布を模擬したシミュレーションにより、航空機オペレーション（機数、航路等）及び散布要領を設定する。 制御効果算定手法構築 台風制御による被害軽減効果と制御費用の算定手法を構築する。	蓄電・送電システム開発 高効率な蓄電・送電システムの開発／既存技術の適用を検討する。発電船への搭載を考慮し、小型化・軽量化が必須である。 オペレーション設定（局所的） 一般的な強風域での発電・蓄電システム実証試験を見据え、想定する発電量を得るためのウエザールーチンや帆船オペレーション（隻数、航路等）を設定する。 発電効果算定手法構築 海上の強風状態と発電船の航路に基づいた、発電量等の効果算定手法を構築する。
--	--

③ 社会にもたらす効果	
防災・減災サービスの向上 台風シミュレーションの高精度化により、台風の進路/強度予測の精度が向上しているため、数日前から、台風の進路に応じた行動をとることができ、効果的な防災対策が可能となる。 局所的な気象制御サービスの創出 局所的な気象制御手法を見出したことにより、屋外での大規模イベント(オリンピックや国体等)等を対象に、数キロメートル四方程度の地域における対流雲制御による気象制御サービスが始まる。	

【2040 年】台風に対する実証試験開始を目指して

	台風制御	台風発電
①	具体的な目標（マイルストーン）	
	試作機による台風制御実証試験開始 実際の台風に対してインパクト物質の散布試験を段階的に開始する。	試作船を用いた台風発電実証試験開始 実際の台風に対して発電帆船を航行させ、発電試験を段階的に開始する。
②	具体的な研究テーマ	
	台風シミュレーション高精度化 全期間を通じて継続的に高精度化を目指した研究を推進。特に航空機観測の定常観測実用化及び大アンサンブル計算による精度向上に取り組む。 オペレーション・散布要領設定（台風規模） 部分実証試験の成果を見つつ、インパクト物質散布を模擬した台風規模のシミュレーションにより、航空機オペレーション（機数、航路等）及び散布要領を設定する。 システムのスケールアップ 台風制御実証試験向けに、スケールアップしたシステムを準備する。	オペレーション設定（台風規模） 台風規模のシミュレーションにより、想定する発電量を得るための無人帆船オペレーション（隻数、航路等）を設定する。 システムのスケールアップ 台風への発電・蓄電システム実証試験向けに、スケールアップしたシステムを準備する。
③	社会にもたらす効果	
	台風制御による台風被害の低減 台風制御実証試験を通して、台風減勢に成功することにより、台風被害が低減する。 台風発電による再生可能エネルギー比率の増加 台風発電実証試験を通して得られたエネルギーにより、日本の再生可能エネルギー比率が増加する。	

【2050 年】台風制御／台風発電の常態化を目指して

	台風制御	台風発電
①	具体的な目標（マイルストーン）	
	台風制御事業の常態化 防災インフラの許容量を超えるような激甚化した台風が減勢され、台風による人的/経済的被害がほぼない社会が常態化している。	台風発電事業の常態化 台風発電が、再生可能エネルギーの一つとして、日本の電力供給に貢献している社会が常態化している。
②	具体的な研究テーマ	
	台風シミュレーション高精度化 台風シミュレータを実用化し、現実的な大アンサンブル台風予測および被害予測を実施し、最適な台風制御法・台風発電スキームの判定を行う。	
	機体コスト最適化 台風制御用航空機、散布装置等の低コスト化	船体／発電・蓄電コスト最適化 台風発電用発電帆船、発電・蓄電システムの低コスト化
	オペレーション最適化 航空機オペレーション・散布要領の最適化	オペレーション最適化 船舶オペレーションの最適化を追求する。
③	社会にもたらす効果	
	台風制御による台風被害の更なる低減 台風制御事業の常態化により、防災インフラの許容量を超えるような激甚化した台風が来ても、台風被害はほぼなくなる程度にまで減勢され、台風が脅威ではなくなる。自然との共生と安全な生活の両立を実現している。	
	台風発電による再生可能エネルギー比率の更なる増加 台風発電事業の常態化により、日本の再生可能エネルギー比率がさらに増加し、グリーン成長戦略を支えている。その先には、近隣諸国への輸送により、エネルギー大国日本となることも視野に入る。	

3. International cooperation

（目標達成に向けた国際連携の在り方）

研究における国際連携

先に述べたように台風制御実験は、米国において 1969 年に実施された Stormfury 計画が最後と考えられている。この計画以降の台風制御について、各国の現状を調査するために、米国、台湾、韓国、中国、カナダ、イギリス、フランス、バングラデシュの研究者についてヒアリングを行った。まず、過去に台風制御実験が行われたか、及び将来実施する計画やその検討が行われたかについては、すべての国で「ない」という回答であった。次に台風制御の社会に対して利益をもたらすかどうか、また、そのときの懸念事項について質問したところ、ほとんどが大きな利益をもたらすという回答であった。一方で懸念事項として、想定外のことが起こる可能性とそれによるリスクや台風の水資源としての利点が損なわれることなどもあげられた。最後に日本が台風制御研究を行う場合、共同研究をするかについて質問したところ、中国を除いて、すべての研究者が「共同研究を希望する」という回答であった。

このように台風制御実験は少なくともヒアリングした国では行われておらず、また計画もない。そのような中で、西太平洋の台風の発生・襲来領域の最前線に位置する日本が台風

制御の研究を行うことは重要であるといえる。

台風制御・台風発電の運用ルール策定における国際連携

気象変化に関する国際的な枠組みは、世界気象機関（WMO：World Meteorological Organization）の 大気研究・環境計画 天気気候研究計画専門家チームを中心に議論・制定されている。WMO からは気象制御実施に関するガイドラインが提示されているが、人工降雨を対象にしたものであり、台風の人工制御・台風発電を想定したガイドラインは現状策定されていない。また、海上で大規模に活動する際には、国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）や国際船級協会連合（IACS：International Association of Classification Societies）などで安全性などの枠組みが議論されているが、台風発電のような新しい発想のものを議論されたことはない。

台風という気象現象は国を跨いで襲来するものであるため、制御や利用については、各国が合意したガイドラインに則って運用されるべきである。そのため、今後 WMO や IMO、IACS などに対し、台風制御・台風発電を想定した世界共通のガイドライン策定を働きかけ、議論を日本がリードしていくことが必要である。

4. Interdisciplinary cooperation

（目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方）

省庁間のシームレスな連携

台風制御・台風発電の最終的な受益者は全国民であることから、実現時には国が主体となり事業を実施することが想定される。本事業を実現するためには、様々な省庁の連携が必要と考えられる。

例えば、総合的な防災という観点からは内閣府、風水害対策という観点からは内閣府および国土交通省および農林水産省、台風予測という観点からは気象庁、エネルギーという観点からは経済産業省、環境という観点からは環境省、農作物・水産資源への影響という観点からは農林水産省、航空および船舶運用という観点からは国土交通省、海上安全という観点からは海上保安庁という具合に、幅広い省庁との関わりが想定される。

このような省庁横断的な取り組みの場合、主に所管する省庁を明確にしておくことが必要と想定される。中央省庁関係者によるヒアリングでは、主たる所管省庁は政策の第一義的な目的に照らして決定される傾向があるため、2050 年時点でどの官庁が台風制御や台風発電を主に所管するかについても、こうした傾向に従う可能性が想定されるとのことであった。

このような省庁横断的、かつ、国全体に影響を及ぼす国家的な取り組みについては、1 省庁が意思決定するのではなく、政府中枢等ハイレベルでの意思決定に基づき、各関係者が遂行することも想定されるとのことであるため、今後は行政を巻き込んだ議論も必要になる

と考えている。

民間企業の巻き込み

台風制御・台風発電の実現には民間企業の協力が不可欠である。造船、航空機、重工、重電、通信機器、観測機器、ゼネコン、エンジニアリング、化学、衛星、自動車、電力会社、海運、エアライン、保険など、その業種は多岐に亘ることが想定され、これらの企業に本 MS 目標実現に向けた取り組みへの参画を呼び掛けることも重要である。

連携のための学主導型プラットフォーム

オペレーションの要件定義にはアカデミアでの基礎研究が重要となり、気象学と航空工学、船舶工学と電気工学といった分野の連携や融合領域における研究開発が必要と考えられる。また、これら研究を加速させるために、大学、研究機関の連携や共創型の研究センター等の創出も期待される。台風の総合的な研究を行う横浜国立大学台風科学技術研究センターの設立など、新しい試みも始まっている。また、このような官民の多様なステークホルダーを巻き込んだ研究開発において、アカデミアが果たす役割は大きい。アカデミアは、基盤研究を推進する主体であるだけでなく、異業種あるいは同業他社が参入し協働しやすい場も提供できる。

5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)

(目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

倫理的課題

台風というこれまで人類がどうすることもできなかった自然現象について人間が制御を加えられることになると、台風によって発生する利益や不利益までも人間がコントロールしていると考えることができるため、倫理的な議論を呼ぶ可能性は想定される。そのため台風制御によって、少なくとも台風制御をしなかった場合よりも状況が悪化することはないことをしっかりとしたエビデンスを提示することで国民の理解を得ていくことが重要となる。

法的課題

国民の利害に直結する台風制御の実現のためには、実施の可否、責任の所在と範囲、実施の判断等を司る法整備が必要である。台風制御により、国内においても利益を受ける者と不利益を被る者が生じることが想定され、外国に対して影響が及ぶ可能性もある。このように、社会の利害を調整し、万が一の場合の補償について明確化するためには国内・国際法の整備が不可欠であり、法律や経済の専門家との協力が必要である。

また、万全を期してオペレーションを実行しても、前人未到のプロジェクトには常にリス

クが存在する。このうち、航空機や船舶の航行に伴う事故等のオペレーショナルなリスクについては保険を活用した社会全体でのリスク分散が可能と考えられる。一方で、台風制御の過失によって外国に損害を与えたケース等の保険化困難なリスクについては、利害の類似した国家間で補償の原資を拠出する仕組みを構築し補償に備える等、国際的なリスク分散の制度の創設を検討する必要がある。

社会的課題

台風制御・台風発電は国民の理解と支持を得てはじめて実施できるものであるが、前述の通り、国民 1 万人を対象とするアンケート調査でも、期待だけでなく懸念を抱く層が存在することが明らかになっている。台風制御では自然本来の均衡が崩れ想定外の悪影響が生じることや生態系への悪影響など自然科学分野に関連する懸念、近隣諸国への危害をもたらすことや台風制御の政治利用など社会科学分野に関連する懸念、人間が自然を操作すべきでないとする倫理面を中心とした人文科学分野に関する懸念に大別される。台風制御の実現に向けては、多様な立場、利害や倫理観をもつ人々に寄り添い、粘り強い説明を通して理解を醸成する必要がある。台風発電については台風制御ほど大きな懸念は存在しないものの、実現性を疑問視する意見も存在する。台風発電の仕組みをわかりやすく説明し、経済合理性を担保しつつ実現が可能であることを示していく必要がある。

懸念を抱く層や実現を疑問視する層との合意形成は大きな困難が伴うが、不可能ではないと考える。我々のチームは 2021 年 5 月 15 日に約 300 人を集めたシンポジウムを開催した。これまでの台風被害や今後予想される台風変化などの研究成果、台風制御の可能性について紹介した。シンポジウム終了後にアンケートを取得したところ、実に 85%の参加者が台風制御を実施してほしいと回答した。先に述べた国民 1 万人を対象とするアンケート調査と比較すると、台風制御へ期待する層の割合が実に 20%以上も高い結果となった。この違いはアンケートの母集団の違いに起因するものと考えられる。シンポジウム終了後に実施したアンケートは、もともと台風制御や台風発電に関心の高い層が講演者の説明を聞いた後に回答しているため、母集団の理解度が高いという特徴がある。すなわち、台風制御や台風発電に対する理解の増大は受容性の向上に寄与すると考えられることから、地道な啓蒙活動が国民からの支持獲得に有効と考える。国民の意識の醸成には非常に長い時間を要することが予想されるが、2050 年までの時間軸を踏まえれば 10~20 年かけて国民の意識を変えていくことは決して不可能ではないと考えている。現在は主に自然科学分野での課題の検討が中心であるが、今後は社会科学や人文科学の専門家とも協力しつつ、社会的、倫理的課題に対処していきたい。

IV. Conclusion（結論）

ムーンショットミレニア・プログラムにおいて、本チームが提案する台風制御、台風発電の実現可能性、ロードマップ、社会的意義等について、文理融合、産学官連携のもとに半年間の調査をしてきた。専門家ヒアリングでは、科学者や技術者、関連する企業だけでなく、「東京大洪水」著者の作家などを含む、さまざまなフィールドの国内外の専門家、延べ約160人から幅広く意見を頂いた。また、国民アンケートで幅広い層の市民からも多様な意見をいただくことができた。台風制御、台風発電は一見して非常に実現困難に思えるようなアイデアだが、調査の結果から、科学的・社会的課題が明確となり、実現できる道筋が見えてきた。今回検討した社会像のアイデアは本チームのメンバーが長年構想してきたものであるが、この度のミレニア・プログラムの調査研究によって、ムーンショットの目指す未来像に相応しいビジョンとなったことを確信する。台風が脅威から恵みとなった、安心、安定で持続可能な未来の社会像を国民の多くと共有し、しっかりと実現していくことで、人々の期待に応え、2050年の人類の幸福につなげたい。

V. References (参考文献)

- [1] Carrió, G. G., and W. R. Cotton, 2011: Investigations of aerosol impacts on hurricanes: Virtual seeding flights. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2557–2567.
- [2] David Skaggs Research Center, “HURRICANE MODIFICATION WORKSHOP REPORT February 6 – 7, 2008” The Department of Homeland Security Science and Technology Directorate, 9-17pp, (2008)
- [3] Fiorino, M. and R. L. Elsberry, 1989: Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, 46, 975-9.
- [4] Fovell, R. G., Y. P. Bu, K. L. Corbosiero, W.-W. Tung, Y. Cao, H.-C. Huo, L.-H. Hsu, and H. Su, 2016: Influence of cloud microphysics and radiation on tropical cyclone structure and motion. *Meteor. Monogr.*, 56, Amer. Meteor. Soc., 11.1-11.27.
- [5] H. Riehl and J.S. Malkus, “Some aspect of Hurricane Dasy, 1958”, *Tellus*, 13, 181-213pp, (1961)
- [6] 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.
- [7] J.S. Malkus and H. Riehl, “On the dynamics and energy transformations in steady-state hurricanes”, *Tellus*, 12, 1-20pp, (1960)
- [8] Khain, A., B. Lynn, and J. Dudhia, 2010: Aerosol effects on intensity of landfalling hurricanes as seen from simulations with the WRF model with spectral bin microphysics. *J. Atmos. Sci.*, 67, 365–384.
- [9] Knutson, T. R., J. Sirutis, M. Zhao, R. Tuleya, M. Bender, G. Vecchi, G. Villarini, and D. Chavas, 2015: Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios. *J. Climate*, 28, 7203–7224.
- [10] Rosenfeld, D., A. Khain, B. Lynn, and W. L. Woodley, 2007: Simulation of hurricane response to suppression of warm rain by sub-micron aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3411–3424.
- [11] Rosenfeld, D., W. L. Woodley, A. Khain, W. R. Cotton, G. G. Carrió, I. Ginnis, and J. H. Golden, 2012: Aerosol effects on microstructure and intensity of tropical cyclones. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 987–1001, doi:10.1175/BAMS-D-11-00147.1.
- [12] Tsuboki, K., M. K. Yoshioka, T. Shinoda, M. Kato, S. Kanada, and A. Kitoh, 2015: Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 646–652.
- [13] 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.

- [14] 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>.
- [15] 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, 505–514.
- [16] 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*, (accepted).
- [17] Yamada, Y., Satoh, M., Sugi, M., Kodama, C., Noda, A. T., Nakano, M., Nasuno, T., 2017: Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model. *J. Climate*, 30, 9703-9724.
- [18] Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, and M. Ishii, 2017: Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9910-9917.
- [19] 気象庁, 災害をもたらした気象事例,
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index.html>, 2021/6/13アクセス
- [20] レジリエンスの確保に関する技術検討委員会, 2017, 『国難』をもたらす巨大災害対策についての技術検討報告書, 土木学会, 76p.
- [21] <https://www.aon.com/global-weather-catastrophe-natural-disasters-costs-climate-change-2020-annual-report/index.html>
- [22] https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/025_01_00.pdf
- [23] <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2020/20200612-45056.html>