

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
安全安心な社会を実現」**

戦略推進会議

プログラムディレクター：

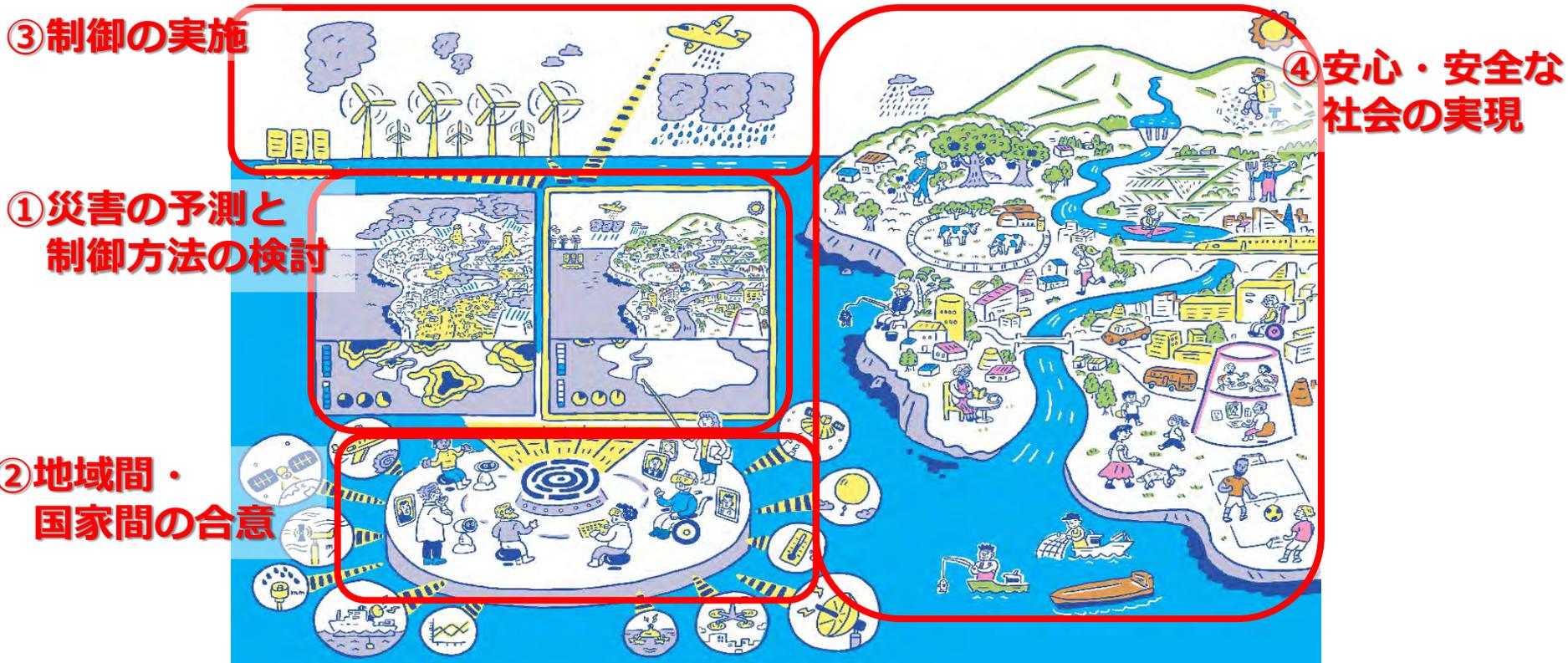
三好 建正

(理化学研究所・チームリーダー)

令和6年3月29日

1. 研究開発プログラムの概要
2. 研究開発プログラムの状況
3. プログラムマネジメントの状況
4. 今後の方向性
5. 自己評価結果

1. 研究開発プログラムの概要（1）目指す社会像



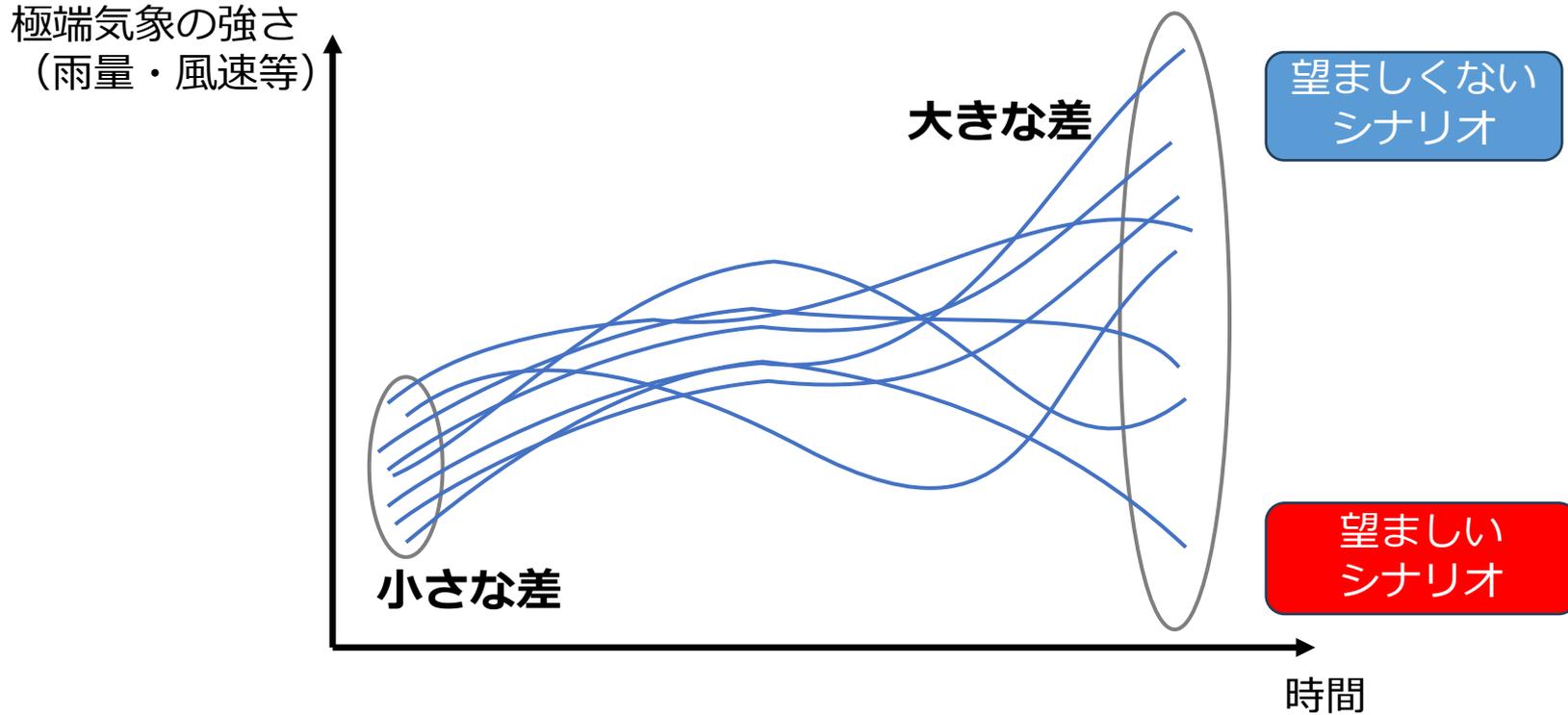
2050年には、高精度な気象予測に基づき、周辺の地域・国家との合意のもと、防災・減災の一つのツールとして、台風や豪雨等の極端気象を制御できるようになる



1. 研究開発プログラムの概要 (2)

解決すべき課題 (理論的背景)

カオス性と予測・制御の関係



- 極端気象の持つ**強いカオス性**は予測を困難にする
- カオス性は**小さな介入**によって気象を**大きく変える**ポテンシャルを与える
- 予測と介入を繰り返し、望ましい方向に制御する技術を開発

1. 研究開発プログラムの概要（3）

解決すべき課題（長期的に取り組む主要な課題の例）

2022～2031年

2030年代

2040年代

2050年

気象制御の実現可能性を具体的に示し、社会的・学術的な合意形成を目指す

↑

現実的な操作を前提とした**気象制御理論**の策定

+

気象に対して**効果的にインパクトを与える制御手法**の開発

+

主要な**ELSI課題の抽出**とその解決に向けた取り組み

小規模な気象制御実験を実施し、効果と安全性を検証

↑

必要な擾乱を起こす**制御手法の特定**

+

気象制御実験に向けた国内外における主要なELSI課題の解決

大規模な気象制御実験を実施し、効果と安全性を検証

↑

気象制御理論の確立

+

気象制御に向けた国内外における主要なELSI課題の解決

極端風水害の脅威から解放された社会を実現

↑

極端気象に対する**階層的で効果的な気象制御手法**の獲得

+

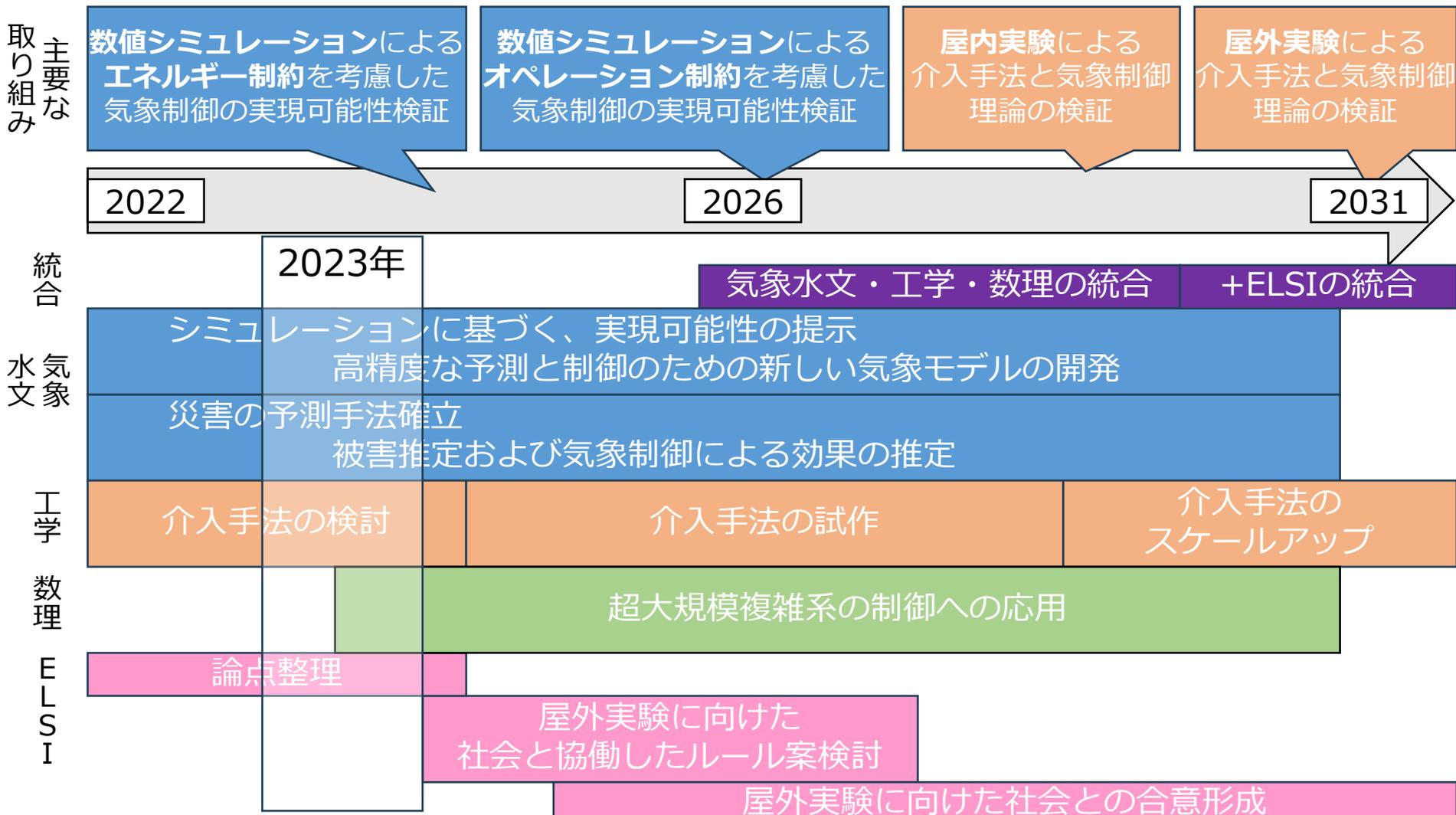
気象制御に係る**客観的ルール**の確立・合意・運用

ELSI : Ethical, Legal and Social Issues
社会実装を見据えた**ELSI**の抽出・検討・対応に係る一貫した取り組みを、**研究開発期間全体**を通して実施

* 気象制御実験の規模の設定自体が研究開発の対象であり、ELSI面でのハードルの高さで定義される想定

1. 研究開発プログラムの概要（4）

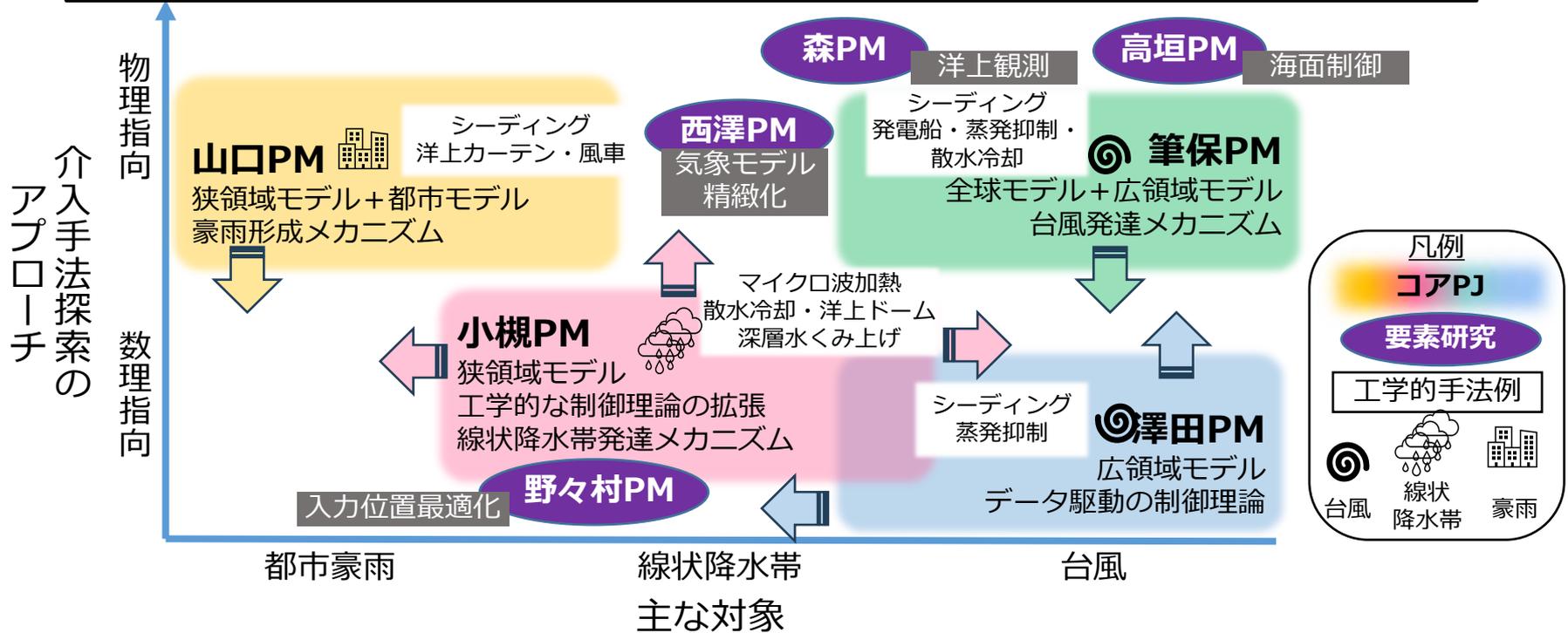
解決すべき課題（短期的に取り組む課題の例）



※ 制御の精度や費用対効果、安全性を向上させるための各技術の精緻化および介入手法の拡充は継続的に実施

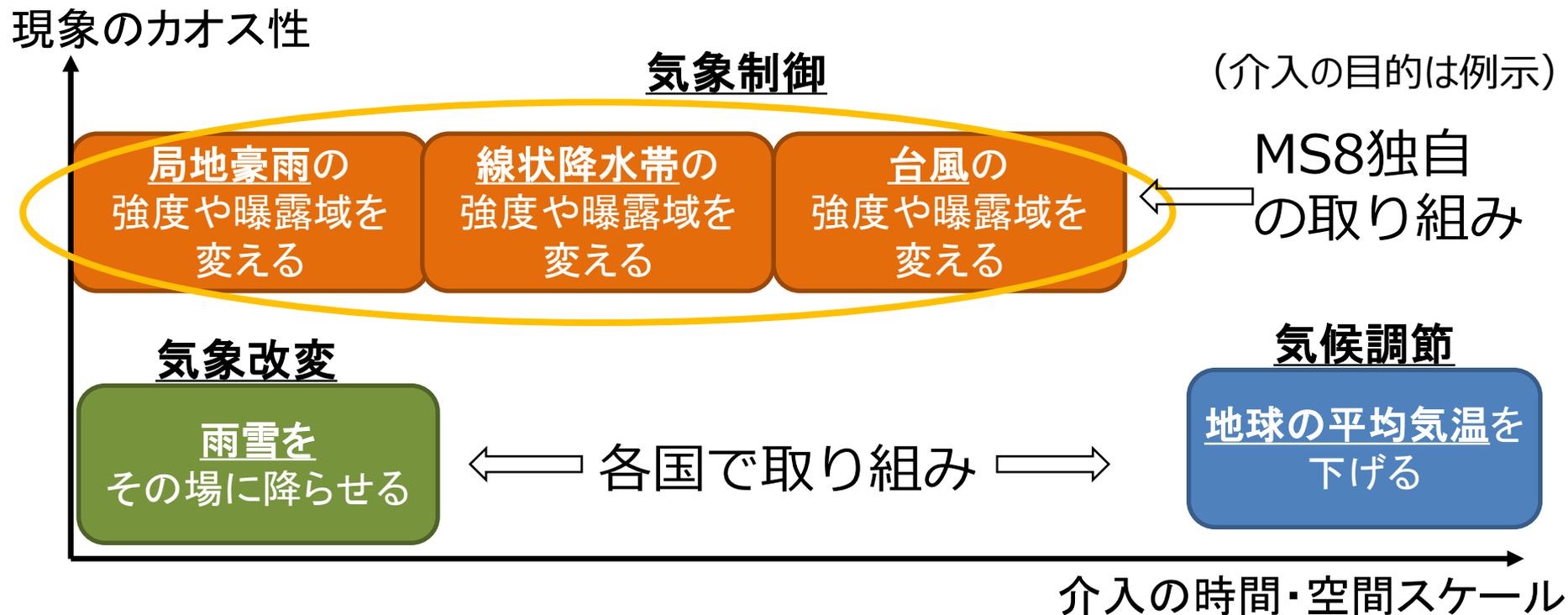
1. 研究開発プログラムの概要（5）推進体制

シナリオ初期における重点的研究開発領域と期待する展開



- **追加公募を実施**し、豪雨（線状降水帯）を中心とした研究開発を行うコアPMとして、要素PMであった小槻氏を採択
 - **対象気象別のポートフォリオが充足**
 - 小槻PMの要素PJは、作り込みの終了とともに発展的に解消（済）
- **4つのコアPJ**が異なるアプローチで気象制御を目指すとともに、相補的に研究開発を推進
- 早期に解決すべきボトルネックに対し、**4つの要素PJ**が新奇なアイデアで挑戦
- **ELSI・数理に係る横断的活動**も実施（後述）

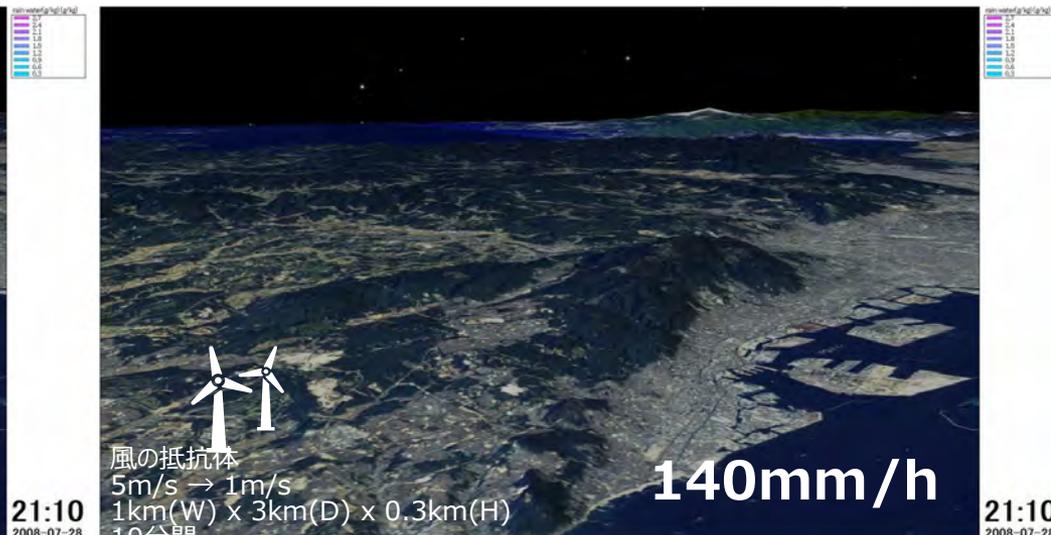
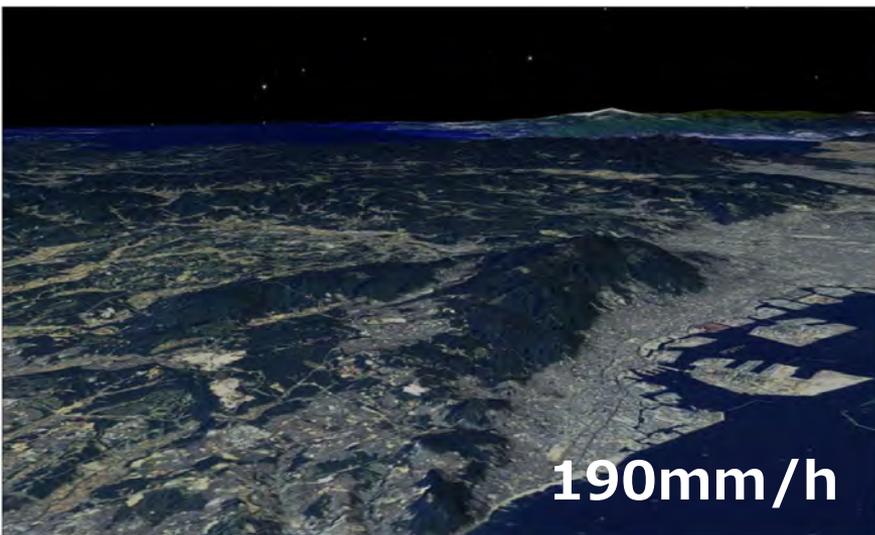
2-1. 研究開発プログラムの状況 国内外の研究動向との比較



- ローカルな気象改変や全球の平均場を変えるような気候調節への取り組みは各国で取り組まれているが、**極端気象の制御を目指す大規模プログラムは他に見当たらない**
- 気象改変や気候調節等と共通する技術やELSIについて、今後**連携を模索**
- 気象制御の実現および社会実装には気象・工学・数理・ELSIの研究者からなる**学際的な取り組みが必須**であり、MS8ではこの体制をいち早く整えることで、**世界に先行して研究開発を実施している**

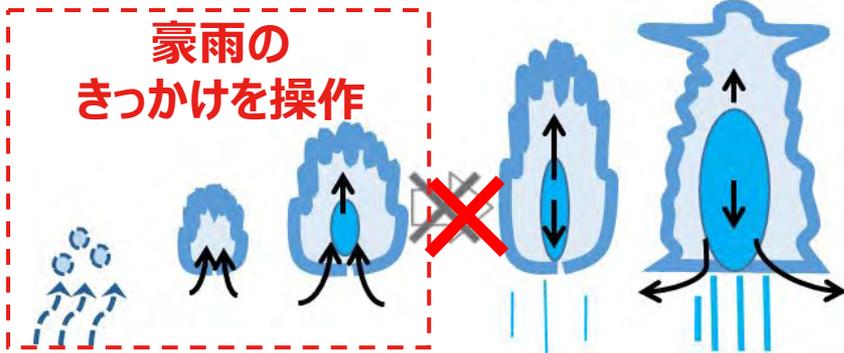
2-2. 研究開発プログラムの状況(1) 革新的な取組み・成果 —シミュレーションによる気象制御の可能性検証

2008年 神戸都賀川のゲリラ豪雨の事例 【山口PJ】



ピーク降雨強度を27%抑制

豪雨の
きっかけを操作

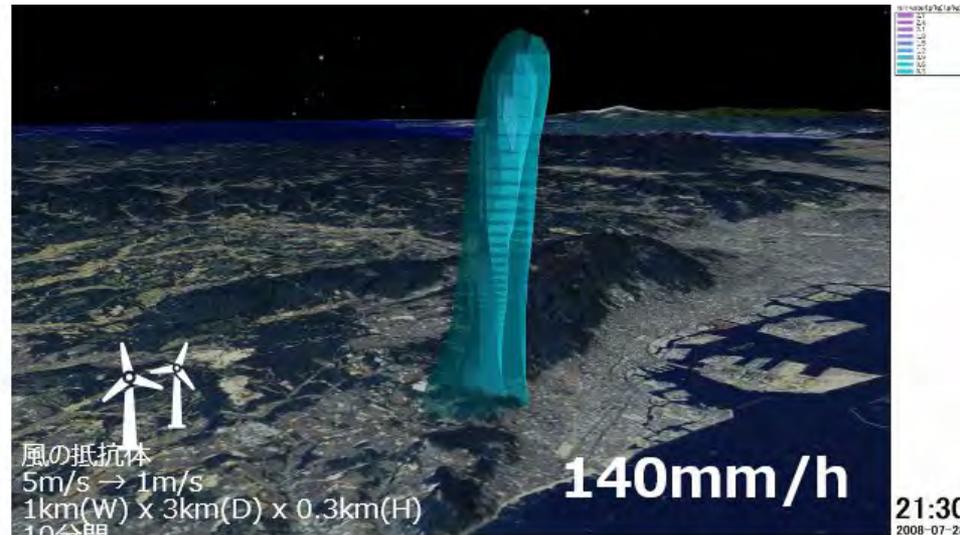
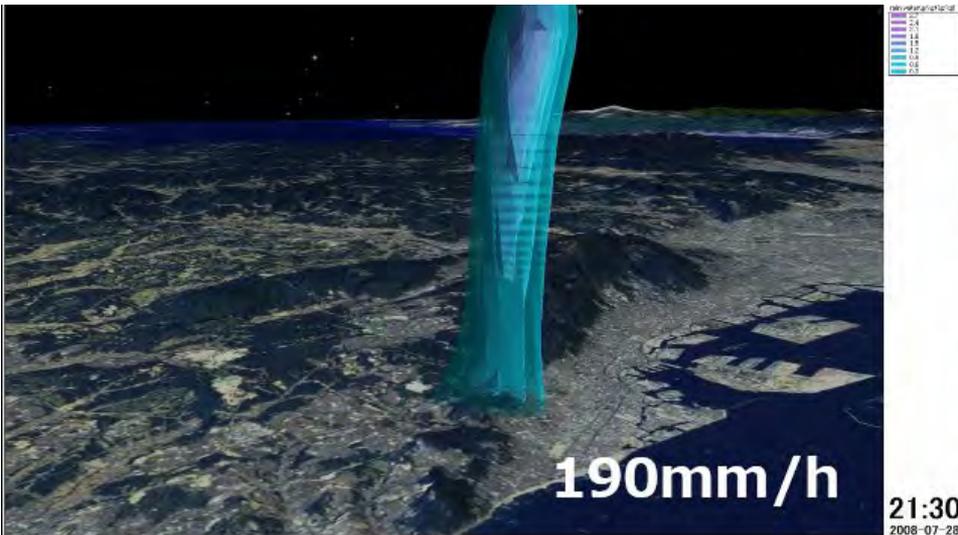


都市化

- 局地豪雨の発達初期の**カオス性**に注目
- 技術的に製作が可能な**直径 200 m 程度の風車2台**に対応する風エネルギーの吸収で、**豪雨のピーク値が減少**することを、シミュレーションで実証

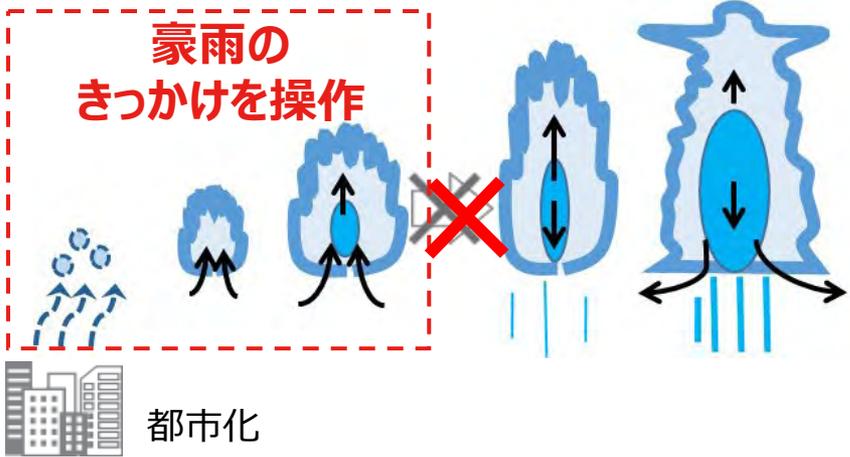
2-2. 研究開発プログラムの状況 (1) 革新的な取組み・成果 —シミュレーションによる気象制御の可能性検証

2008年 神戸都賀川のゲリラ豪雨の事例 【山口PJ】



ピーク降雨強度を27%抑制

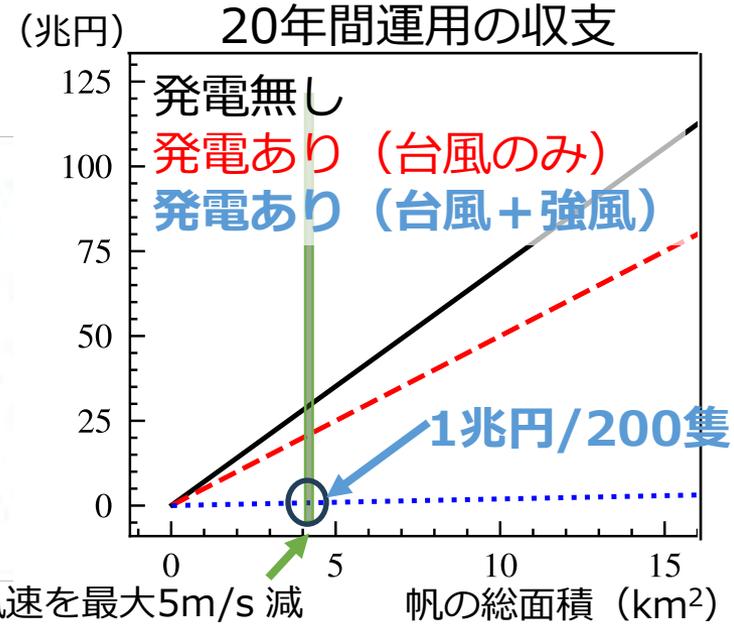
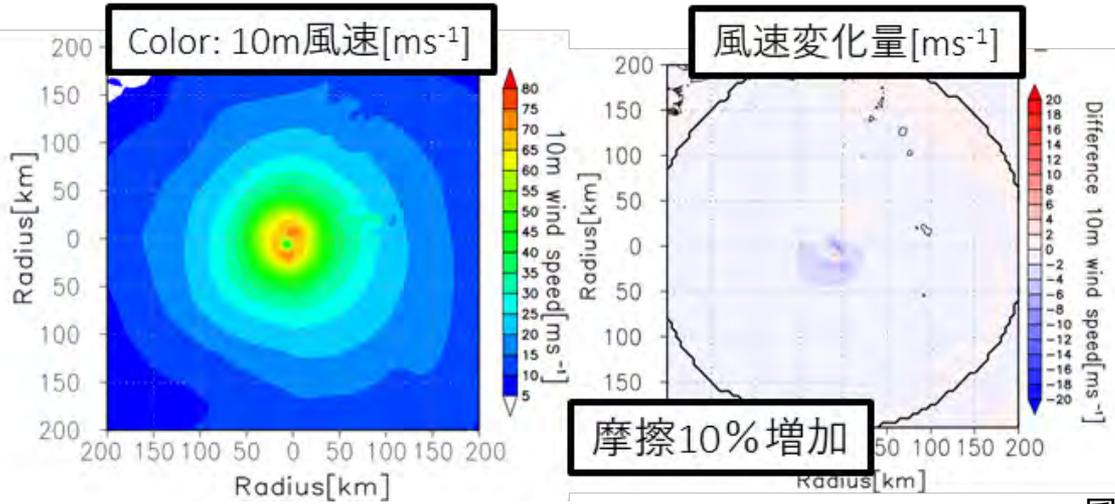
豪雨の
きっかけを操作



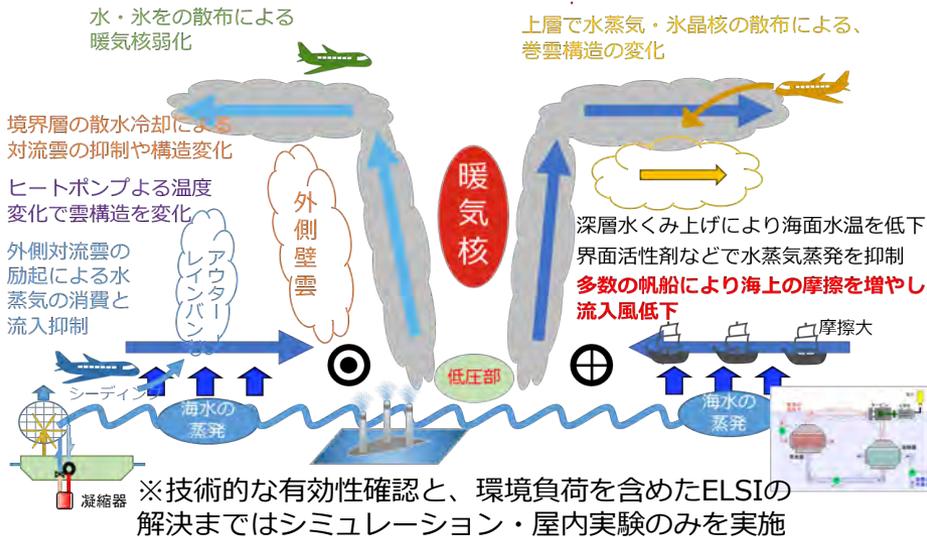
- 局地豪雨の発達初期の**カオス性**に注目
- 技術的に製作が可能な**直径 200 m 程度の風車2台**に対応する風エネルギーの吸収で、**豪雨のピーク値が減少**することを、シミュレーションで実証

2-2. 研究開発プログラムの状況 (2) 革新的な取組み・成果 —シミュレーションによる気象制御の可能性検証

2019年 台風 Faxaiの事例 【筆保PJ】



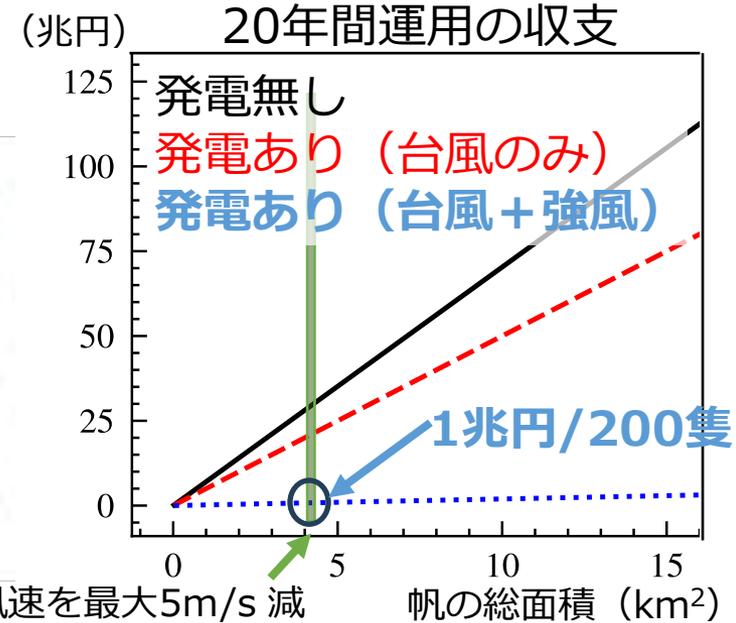
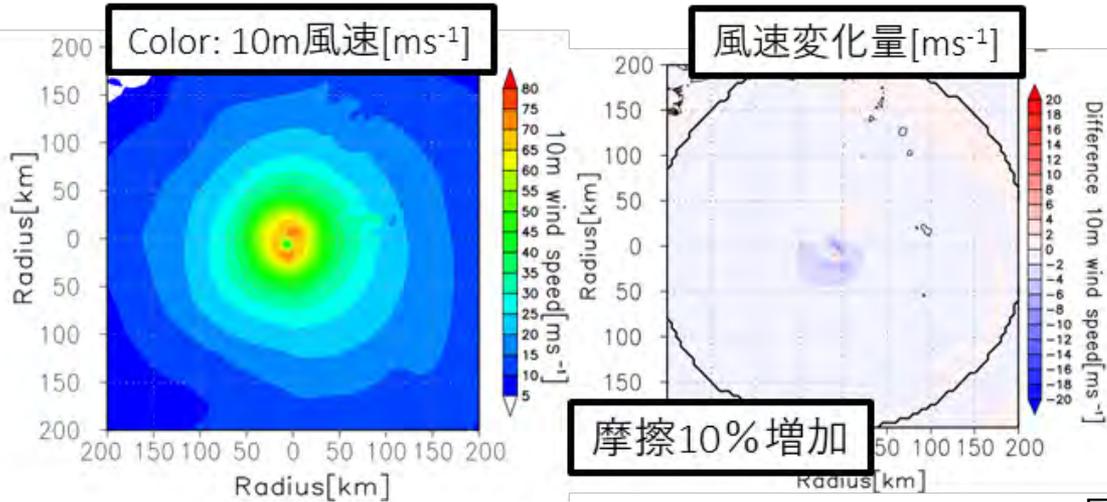
台風の発達メカニズムに注目した介入の構想



- 台風の**発達メカニズム**に注目
- 帆船**200隻**の展開により、上陸時の風速が**最大5m/s**ほど低下することをシミュレーションで実証
- 帆船に**発電機能**を持たせるアイデアで収支を改善させることを提案
- 帆船の最適配置等、費用対効果を改善する**数理的な技術開発**にも挑戦

2-2. 研究開発プログラムの状況(2) 革新的な取組み・成果 —シミュレーションによる気象制御の可能性検証

2019年 台風 Faxaiの事例 【筆保PJ】



台風の発達メカニズムに注目した介入の構想



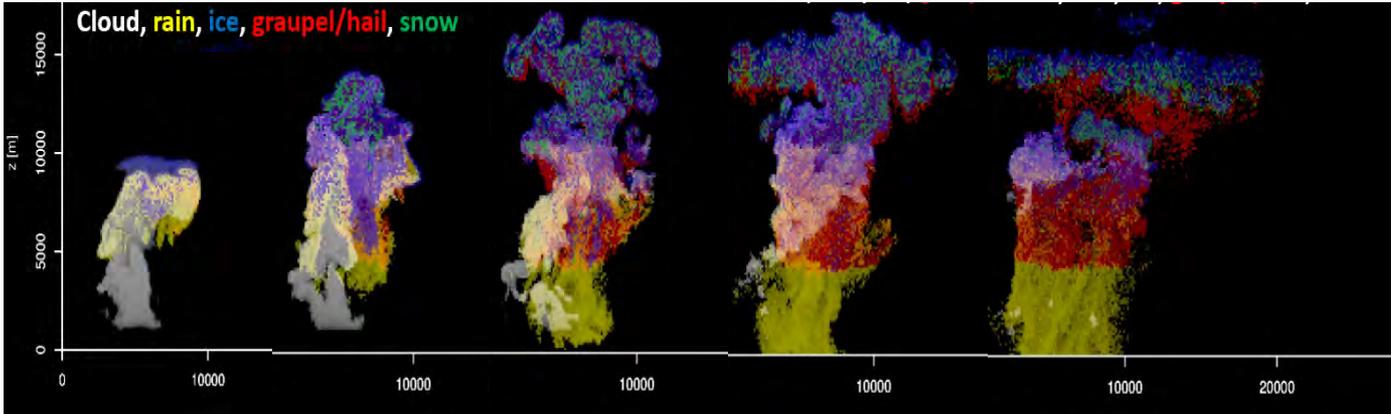
- 台風の**発達メカニズム**に注目
- 帆船**200隻**の展開により、上陸時の風速が**最大5m/s**ほど低下することをシミュレーションで実証
- 帆船に**発電機能**を持たせるアイデアで収支を改善させることを提案
- 帆船の最適配置等、費用対効果を改善する**数理的な技術開発**にも挑戦

※技術的な有効性確認と、環境負荷を含めたELSIの解決まではシミュレーション・屋内実験のみを実施

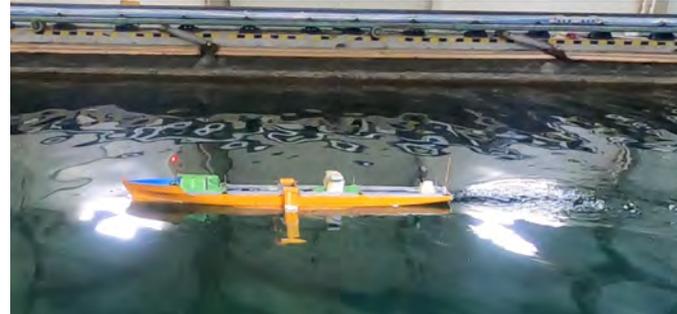
2-2. 研究開発プログラムの状況 (3) 革新的な取組み・成果 一実世界での制御実験に向けて

気象制御の原理的な実現可能性は明らかになりつつある
実証の場を数値シミュレーションから現実に移行する準備として、
 予測と介入を精緻に表現するモデル開発や、工学的な介入手法の試作に着手

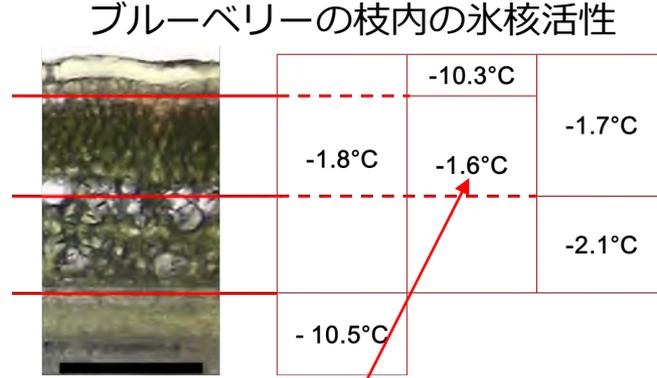
simulation



降水の予測精度と、
シーディングの表現
精緻化に繋がる、ラ
グランジュベースの
雲微物理過程の開発
【西澤PJ】



台風下での風への抵抗体とし
て用いる船舶の本体部の模型
【筆保PJ】



シーディングにおけ
る散布量と環境影響
のボトルネックを解
消するための、植
物・菌類由来で雲の
形成を促進する物質
の探索

自然では氷が形成されにくい
温度帯でも、雲を形成可能
【澤田PJ】

3. プログラムマネジメントの状況（1）

PDによるプログラムマネジメント

- 個々の気象に対してアプローチする各PMの活動に加え、**目標8全体として取り組むべき課題に対して横断的に対応**（ELSI、数理科学等・後述）
- 困難である気象制御の実現には、参加者全員が目的意識を共有しながら取り組むことが肝要であり、昨年度に構築したプログラム内の**コミュニケーションの仕組みを継続して利用**（サイトビジット、全体会議、月例会等）

国際連携

- 「気象制御」という概念が国内外で認知されていない中、アカデミア内での**機運醸成や仲間作り**が必須であり喫緊の課題
- 目標内で創出された新たな知見は可能な限り研究コミュニティ内で展開し、**オープンサイエンス**を推進⇒**気象制御研究の潮流**をつくる
国際会議バナー
 - ✓ 国際学術大会でのセッション等の提案・実施（AOGS2023@Singapore、AGU2023@US）
 - ✓ **国際会議を主催**し海外有識者と目標の進め方に関する会合を実施、**国際ADボードの人選開始**



産業界との連携・橋渡し

- 社会実装に向けてプロジェクトの産学連携を推進
 - ✓ 介入装置の作成にかかる製造業者や、被害推定の精緻化を行う損保会社等が参画
 - ✓ 気象制御の可能性提示後に産業界が参画することを見据え、将来の連携のための意見交換を推進

3. プログラムマネジメントの状況（2）

ELSI、数理科学、プログラム間連携等、横断的な取組

【ELSI/RRI検討】

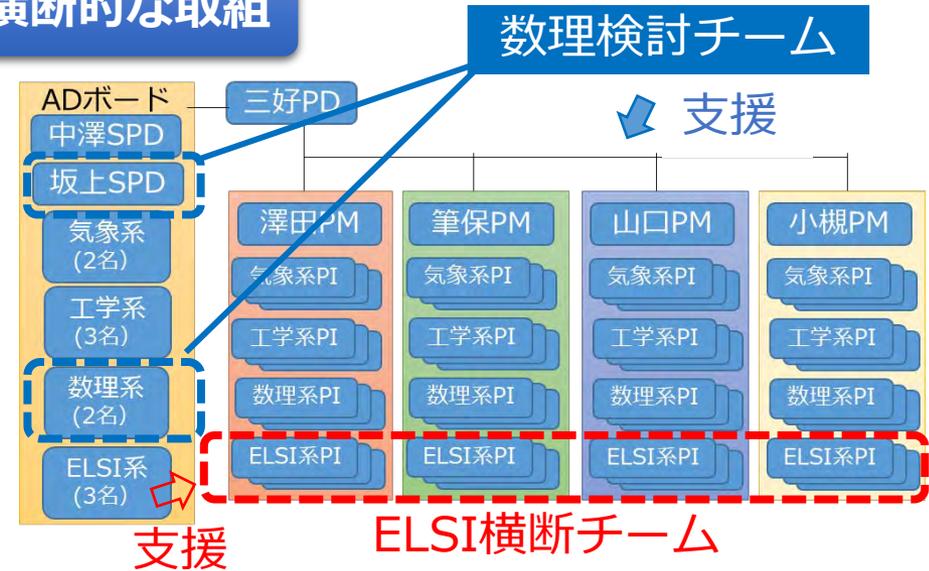
- 目標俯瞰的なELSI/RRIの整理と対応を担う、コアPJのELSI担当PIによる**ELSI横断チーム**を設置
- 気象制御のELSIにかかるアクションプラン策定に向けて、横断チームが**コアPJの研究者に対してインタビュー**を行い、実施者目線での**気象制御の論点整理**を精緻化

【数理科学】

- コアPJにおける数理課題の抽出・解決を支援するため、数理系のSPD・ADによる**数理検討チーム**を設置
- 検討チームとの議論や、JST数理科学分科会からの意見交換の場を設定し、コアPJにおける**今後の数理研究の方向性提示**を完了を支援

データマネジメント

- 産学での利活用およびオープンサイエンスを推進するため、それに資する実験データや気象モデルのソースコードを公開するなど、**積極的なデータ公開・共有を実施**



4. 今後の方向性（1）

目標達成に向けた現状と課題①

課題 I. 数値シミュレーションで示された極端気象の制御事例の数が過少

＜課題＞ 数値シミュレーションを用いた模擬実験に多くのリソースが投入されているにもかかわらず、効率が悪い

＜要因＞ 戦略的な事例選定がなされておらず、また経験がPJ間で共有されていない

課題①に対する対応方針

- 今年度において、**数値シミュレーションによる極端気象の制御事例を示すことに優先的に取り組むよう各PJに指示し、その結果、少数ではあるが初めて有効な制御事例が見いだされた**
- さらに研究開発を加速するため、来年度計画の作り込みや臨時のサイトビジットおよび合宿等の取り組みを実施し、**戦略的かつ系統的な実験の実施を各PJに指示している**

4. 今後の方向性（2）

目標達成に向けた現状と課題②

課題 II. 屋内実験・屋外実験の実施に向けた直近の課題

気象モデル

<課題> 気象制御の前提となる**予測精度が不足**かつ、**介入の表現に制約がある**

<要因> 従来モデルは広域・長期間の予測のための計算効率が重視され精度に限界がある上、その開発においても人為的介入による物理現象の表現精緻化を目指していない

介入手法

<課題> 極端気象のもつ様々な側面に対応する**多様な制御手法に取り組めていない**

<要因> 気象分野以外からの参画が少なく、公募をしても魅力的な研究対象に映っていない

数理

<課題> **介入最適化の計算時間**および**意思決定における不確実性**を考慮していない

<要因> 気象制御に必要な数理は多岐にわたり、今必要な数理研究のフォーカスができていなかった

ELSI

<課題> **屋外実験実施に向けた取り組みが不足**（課題整理、要件の定義、優先度格付け等）

<要因> ELSI横断チームは各々のPJ活動もある中で、ELSI俯瞰分析以降の活動が低調だった

4. 今後の方向性 (3)

課題②に対する対応方針

課題 II に対する対応

気象モデル

高い計算負荷を許容して、**高精度な予測と制御のためのモデルを開発する体制を構築**

介入手法

各PJによる拡充は継続しつつ、プログラムとしても**対外的な呼び込みを実施**

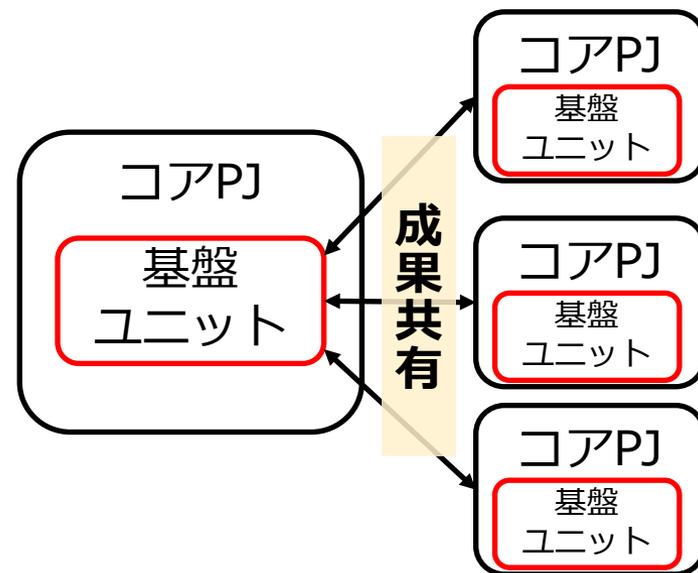
数理

数理研究の方向性提示を踏まえ、**超大規模複雑系の制御に取り組む体制を構築**

ELSI

横断チームの活動を**屋外実験への課題整理と要件定義に向け、成果をPJ評価に反映**

気象モデルと数理研究に係る
体制構築のイメージ



気象モデルと数理に係るPJ共通の課題については、R7年度までに課題毎に基盤ユニットを組成し、**成果をPJ間で共有**

5. 研究開発プログラムの自己評価結果 (1/3)

総合評価：マイルストーン（目標値）の達成あるいは達成への貢献に対して、一部の見通しが定かでない。あるいは、不可抗力等により、期待した成果が得られていない。プログラム運営の改善に向け新たな手段、工夫が必要と判断される。

総合コメント

MS目標達成等に向けたポートフォリオの妥当性（評価項目①）

今年度は、線状降水帯を対象とするプロジェクトや、気象への介入手法候補を担当する課題推進者を追加するなど、ポートフォリオの充足に向けた取り組みが進んだ。また、研究開発においては、気象制御の実現可能性提示に向け、現実的なエネルギー制約を考慮した介入によって極端気象が制御できる事例を数値シミュレーション実験で示すことに注力した結果、少数事例であるが実現可能性を示すことができたことは評価に値する。これに加えて、数値シミュレーションの精緻化や高速化、被害推定等の技術開発も進展しており、今後の屋内・屋外実験での実現可能性の検証に向けた準備が順調に進んだ。また、気象制御に伴うELSI（倫理的・法的・社会的課題）研究に係る進捗も着実に進展しており、社会実装に向けた整理が進捗していることも評価できる。

他方、気象制御の実現可能性を明らかにするためには、まずは数値シミュレーション上で多様な有効事例を示すことが求められるが、現状では限られた事例でしか示せておらず、研究開発の推進に工夫が必要である。

今後は、目標全体の研究開発の優先度や各プロジェクトの役割分担を絶えず確認しつつ進めるとともに、検証対象とする極端気象事例の戦略的な選定や、極端気象の多様な発達段階への介入シミュレーションなど、より戦略的かつ系統的な実験の実施が必要である。また、気象制御の社会実装に向けて、制御結果の科学的・気象学的な意味に加えて、その防災上の効果や費用などを組み合わせて検討し、社会的意義を総合的に示していくことが重要である。

5. 研究開発プログラムの自己評価結果 (2/3)

1. プログラムの目標に向けた研究開発進捗状況 (評価項目②)

1-1.大胆な発想に基づく挑戦的かつ革新的な取組み (評価項目⑦)

数値シミュレーションによって、技術的に建造が可能な見込みのある、巨大風車2基で豪雨被害を抑制できる事例や、台風発電船を用いた界面摩擦の増加が、台風被害を抑制できる程度に風速を低下できる事例を示したことは評価できる。加えて、気象制御の基盤となる気象モデルについて、シーディングや風車等の表現精緻化、GPU対応や量子コンピュータ活用など、先進的な成果が得られている。被害および制御効果の算出や環境影響の評価に欠かせない水文モデルについて、全国レベルの被害推定データベースを作成し、増水のみならず濁水も通年で評価が可能なモデルを作成するなど、順調な進捗が得られた。モデル開発のみならず、工学的な介入手法の開発のため、増風機や台風発電船の実験模型などの試作が進められた。ELSIについては、昨年度から引き続きプロジェクト横断チームが気象制御にかかる課題の俯瞰的な整理を継続するとともに、各プロジェクトでも個別の介入手法を想定した具体的な研究が進展している。しかし、風車と台風発電船のシミュレーション以外で、有効な制御事例を示せていない。今後、様々な条件を想定した系統的かつ網羅的な検討を行う必要がある。

1-2.プログラムの目標に向けた今後の見通し (評価項目③)

公募により線状降水帯を対象とするプロジェクトや新たな介入手法候補を担当する課題推進者を追加し、ポートフォリオの充足に向けた取り組みが進んだ。また、制御に必要な気象モデルや数理の研究開発について、プロジェクト共通的な課題を抽出し、気象制御の実現可能性検証をコンピュータから現実世界へと展開する準備も進められている。今後、研究開発の優先度付けや各プロジェクトの役割分担の明確化、プロジェクト共通課題への対応として横断的なチームの結成等、目標全体としての研究開発体制の最適化検討が重要となっている。介入手法の更なる拡充も必要である。

1-3.その他

特になし

5. 研究開発プログラムの自己評価結果 (3/3)

2. PDのプログラムマネジメントの状況 (評価項目④)

2-1. 研究資金の効果的・効率的な活用 (官民の役割分担及びステージゲートを含む) (評価項目⑧、評価項目⑤)	a.産業界との連携・橋渡しの状況 (民間資金の獲得状況 (マッチング) スピンアウトを含む) b.その他	気象制御の実現可能性が現実世界で示されていない現段階においても、連携の可能性のある企業との意見交換を始めたことは評価できる。今後はバイプロダクトの社会実装を含め、産業界からの参入を進める必要がある。 介入のためのデバイス開発については、シミュレーション上で実現可能性が示されてから本格投資する方針としているが、他方で多様な介入手法を獲得するための少額かつ短期間での検証も進めており、適時・適切な資金活用がなされている。引き続き過剰な重複や、見込みのない研究開発を中止する等の研究管理を進めることが重要である。
2-2.国際連携による効果的かつ効率的な推進 (評価項目⑥)		国際学会でセッションを提案し、昨年度リジェクトされた米国地球物理学連合 (AGU) でも開催ができたこと、また、国際シンポジウムを主催して国際的に著名な研究者を招聘し、今後の研究開発に関する意見交換を行ったことは評価できる。気象制御という概念が国際的にはまだ十分に理解されていないことを意識し、より積極的に国際連携を進める必要がある。
2-3.国民との科学・技術対話に関する取組み (評価項目⑨)		国内シンポジウムやサイエンスアゴラin神戸など、参加者がPDや研究者と対話できるイベントを複数実施したことは評価できる。今後も、幅広い年齢・地域等を対象として社会との接点を増やすことが重要である。
2-4.その他		コアプロジェクトにおける数理研究の方向性提示がなされた。数理系サブPDとアドバイザーからなる「数理検討チーム」の議論やJST数理科学分科会との意見交換など、深い検討がされたことを評価する。

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
安全安心な社会を実現」**

戦略推進会議

-参考資料-

プログラムディレクター：

三好 建正

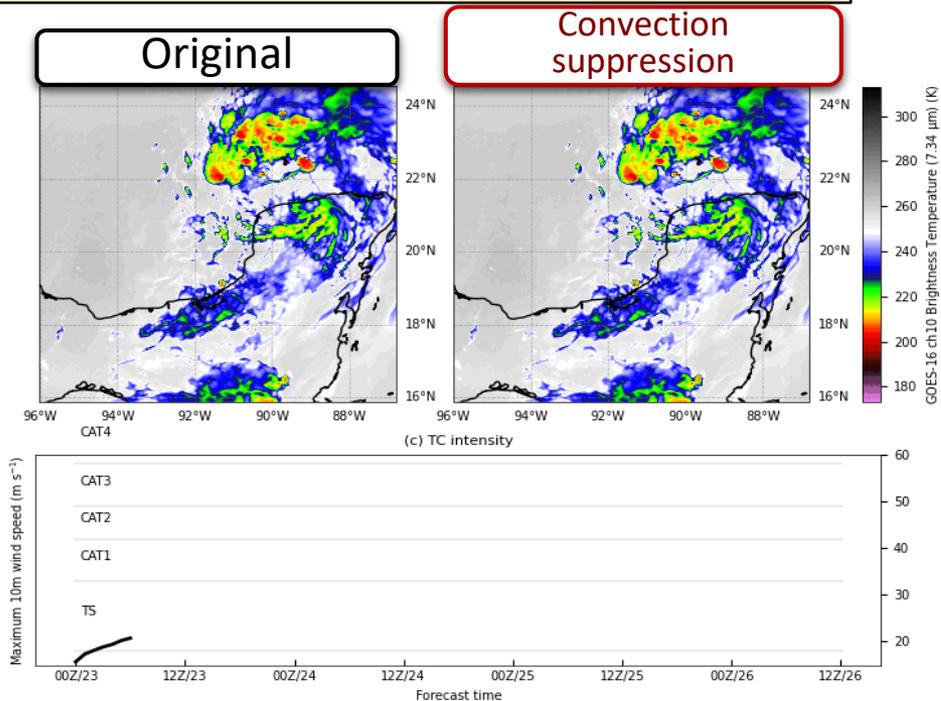
(理化学研究所・チームリーダー)

令和6年3月29日

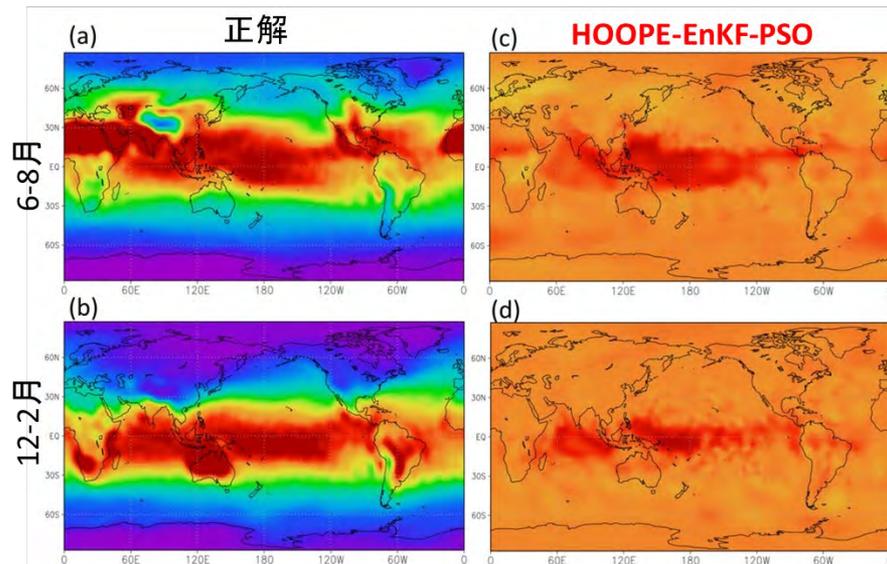
(参考) 各プロジェクトの主な成果 (1) 澤田PJ (コア)

社会的意思決定を支援する気象-社会結合系の制御理論

小さな力で大きな変化を生む気象制御理論



信頼できる制御のための次世代モデリング



- 台風中心付近の湿潤対流ができる直前のシグナルをとらえ、そのシグナルのみを変化させることで台風全体の行く末を変化させようというアイデアの提唱
- 現実的な介入外力で制御結果の例示ができるよう、現在研究資源を全力投入中

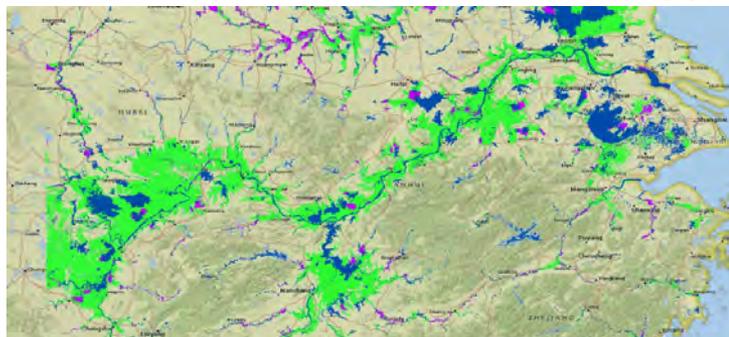
時空間変化パラメータの効率的な推定
 全球気象モデルの対流トリガーの時空間分布を湿度観測から推定する理想実験に成功
 →予測について、メソ気象モデルへの応用や現業機関(ベトナム水文気象庁)との連携も進む

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (1) 澤田PJ (コア)

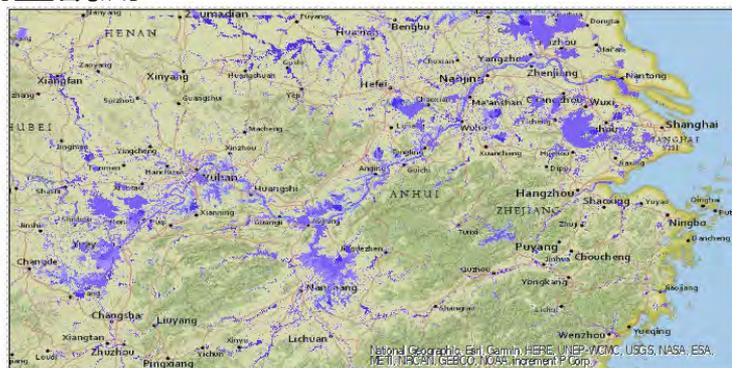
社会的意思決定を支援する気象-社会結合系の制御理論

広域な水害ハザード推定を世界一高速にかつ精緻に

緑：堤防なし、青：堤防ありの浸水計算



衛星観測



堤防を考慮した氾濫計算が世界中どこでも可能に

気象制御で変わりゆく社会を見通す

本研究で特定された台風制御技術への懸念	想定済みELSI
項目に含まれるキーワード例	アンケート項目
恩恵の喪失	水不足になる
想定外の影響	別の降雨災害が増える
環境・生態系の侵害	海に悪影響が及ぶ 人為的調整に使う仕組みが環境に悪影響を及ぼす
人工物への忌避感	粉を降らせる、筆イオンを撃ち込む
地域格差	差別、東京に取られていく、田舎、大都市
利益相反	県同士の対決、外国とのいざこざ、利害関係者が相反、代わりの被害、いろいろな職業や立場、資源の争奪戦
意思決定・責任	行政、当事者、市民の意見、気象庁、投票、天に任せる
コスト・補償	保険会社、地域、国、外国
社会の脆弱化	油断、他の災害
名称への忌避感	命令
自然に対する尊敬、自然とともに生きる、日本的、西洋的、自然への冒瀆	近隣諸国に悪影響が及ぶ 調整した地域の台風は減るが、逆に他の地域に台風が増える
能力や技術の過信	人間の思い上がり、非科学的、わけの分からない技術
その他	人為的調整に失敗した際に、より強い台風が発生する



既存の1万人の市民を対象としたアンケート調査ではカバーしきれていなかったELSI項目を市民から直接抽出することに成功。
「社会課題」の重要性が浮き彫りに

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (2) 筆保PJ (コア)

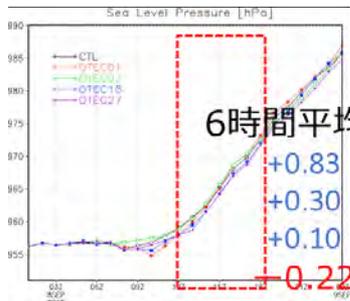
安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

対象とする台風に対し、種々な介入手法においてその介入強度に対する風速、気圧等の変化量を評価

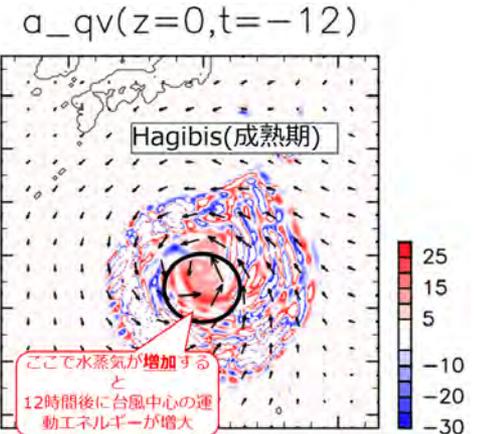
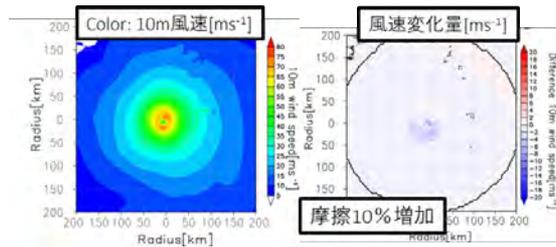
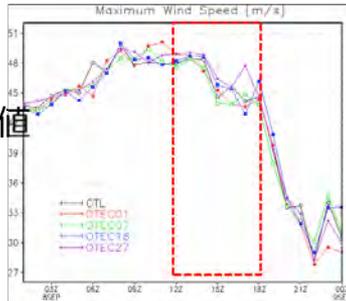


勢力低減のためのアプローチ	勢力低減のための介入方針	気象学的アプローチで検討している現実的な介入方法	現状
海面付近の温度差を下げる	海面水温を下げる	深層水を汲み上げる(筆保PJ)	OTECを想定して検討中 計算はしたけどちょっと微妙?
海水蒸発を抑制する	海水蒸発を抑制する	海面カーテンの導入(筆保PJ)	界面活性剤導入を検討中 計算はまだ
上昇気流を抑える	雲の温度場を変える	海水を境界層に散布(佐藤PJ)	1km噴射が可能な噴水を想定して検討中 計算中
	inflowを抑制する	局所的に温めたり冷やしたりする(藤本PJ)	1MWヒートポンプを想定した介入効果を検討中 計算中
	海面摩擦を増加させる	外側対流雲を励起させる(吉田PJ)	ヨウ化銀などを撒くことを想定して検討中 計算中
暖気核を冷やす	暖気核を直接冷やす	摩擦を発生させる物体を導入(筆保PJ)	硬翼帆船の大量導入を想定して検討中 概算は出して詳細計算中
上層の雲を落下させる	上層の雲の落下速度を増加させる	氷水を散布する(那須野PJ)	飛行機の利用を想定して検討中 計算中
		水蒸気・氷を散布する(坪木PJ)	飛行機の利用を想定して検討中 計算中

中心気圧



最大風速



OTEC (海洋温度差発電) を想定した海面水温を低下させた制御シミュレーションを実施

海面摩擦を上昇させた制御シミュレーションで、10%の摩擦増加により、風速が最大 5 m/s 低下

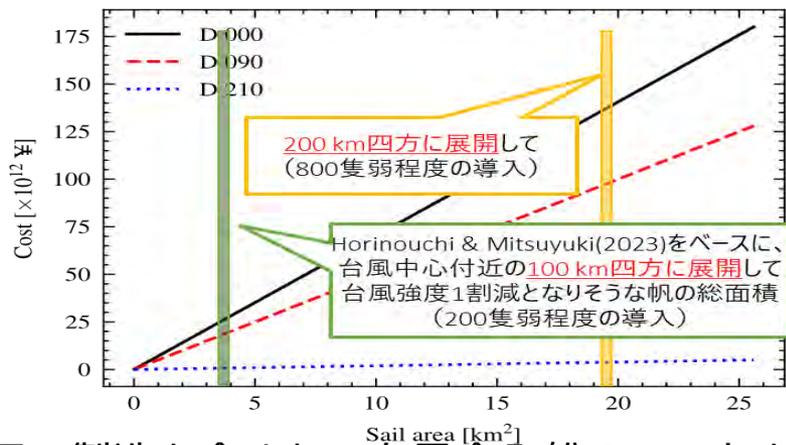
WRFDAを用いたアジョイント感度解析によって示された、12時間前の台風中心付近の最下層水蒸気量に強い感度

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (2) 筆保PJ (コア)

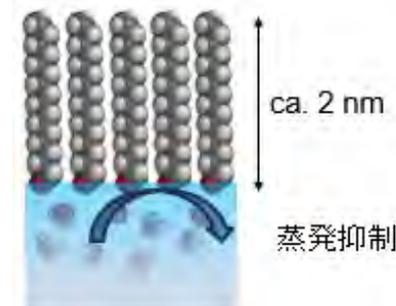
安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

工学的アプローチに係る、コスト見積もりとデザイン

20年間の運用を想定した総コスト



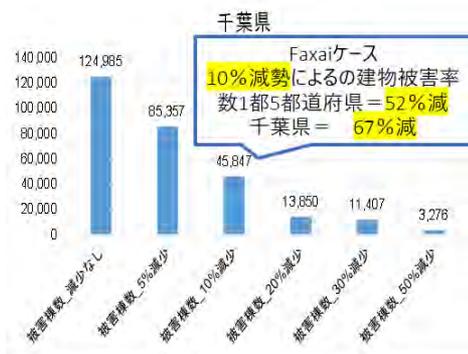
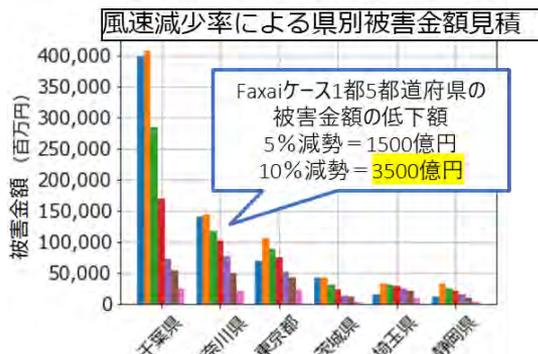
運用・製造を含めた、台風介入船のコストを見積り



PI公募により、台風制御を実現する手段として、界面活性剤による蒸発抑制のフィジビリティ検証を開始

人為的介入によってもたらされる気象学的・社会的・経済的な評価

制御シナリオを前提としたELSIのリストアップ



手法	懸念される事項	論点
【手法1】 航空機等を用いたクラウドシーティング	<ul style="list-style-type: none"> 現行法規制との関係 第三者・環境への影響 投下する物質の環境影響 (物質の種類、散布量、散布場所による) 投下行為の安全性 (落下物) 漁業等の海上活動への影響 (他の手法と共通) 	<ul style="list-style-type: none"> 耐空証明は必要か? (機体の性質決定) <ul style="list-style-type: none"> 100g以上の無人機の性質は2種類: 無人航空機 (ドローン) と無操縦者航空機 (VTOLなど) → 人が乗れるかどうかが基準 (座席の有無ではない) → 無操縦者航空機であれば、耐空証明必要 (cf. 旧MRJ) ※ 試験飛行の特例、自衛隊機などの例外あり 立ち入り制限 (上空・海上警戒区域の設定など) は必要か (cf. Dカットの打上げ、物件の投下区域で足りるか?) 水路通過の要否 (NOTAMは必要) 環境影響評価 (環境アセスメント) の要否 (航空機の飛行ではなく、台風制御活動の環境影響評価?) 関係者への説明、理解増進、漁業補償等の対応
【手法2】 船舶からのフォーシオン船による介入	<ul style="list-style-type: none"> 現行法規制との関係 第三者・環境への影響 環境変化の程度 漁業等の海上活動への影響 	<ul style="list-style-type: none"> 無人船舶の航行可能性 (国際海事機関 (IMO) ではIMASSコード作成中、ただし、現在のところでは、機関部無人までは想定されていない (自動運転≠無人)) → 各種規格、船級協会規則などの自主規制、国文書ガイドラインに従って実証実験
【手法3】 OTEC (海洋温度差発電施設) を用いた介入	<ul style="list-style-type: none"> 現行法規制との関係 第三者・自然環境・景観への影響 	<ul style="list-style-type: none"> 定置OTECの海洋法上の位置づけ (オフショア掘削施設、洋上風力発電施設との類似性) 浮遊式OTECの法的な位置づけは現在のところ不明 (船舶 (sea-going ship) かどうか)

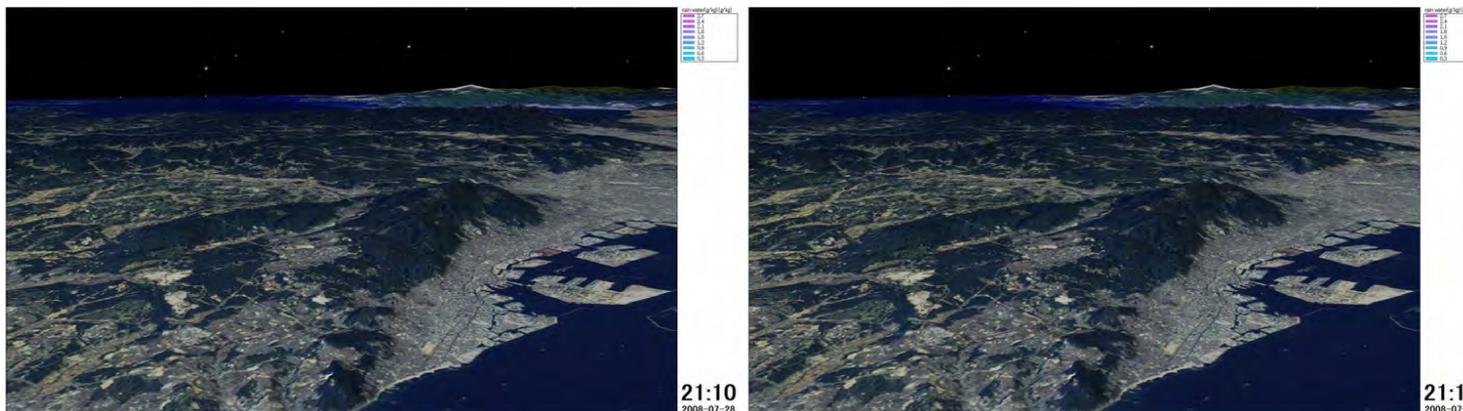
風災被害推定モデルを開発し、令和元年房総半島台風を10%減勢できれば、千葉県の建物被害率を67%減できることを示した

介入手法ごとにELSI論点の洗い出しと体系化

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (3) 山口PJ (コア)

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

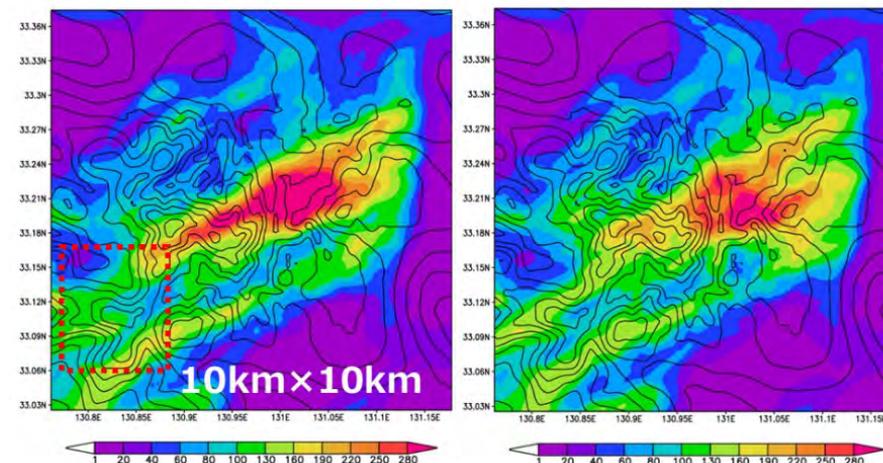
具体的な操作手法を想定した、気象制御の事例の提示



巨大風車2基を想定した気流の操作により、豪雨のきっかけに介入することでゲリラ豪雨のピーク降雨強度を27%抑制できることを、シミュレーションで示した。

操作無し

シーディング

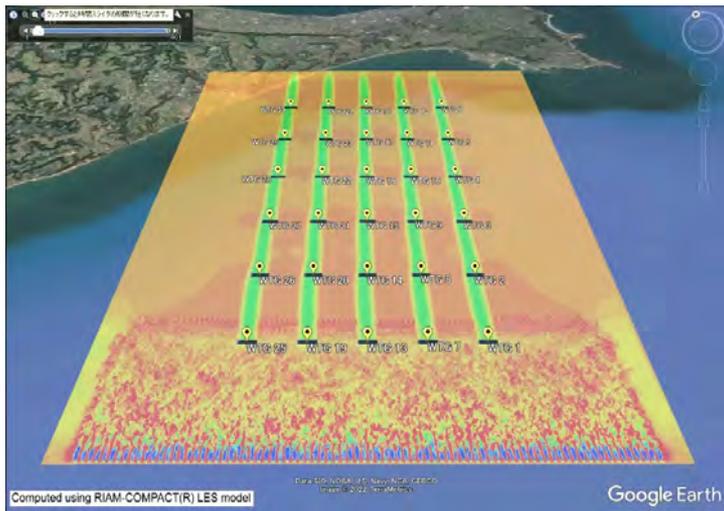


シーディング操作によって、線状対流系豪雨の時間積算雨量を6~18%抑制（ただし領域平均は変化無し）できる事例をシミュレーションで示した。

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (3) 山口PJ (コア)

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

数値計算に基づく工学的手法の開発と、室内実験による工学的手法の要求性能の特定

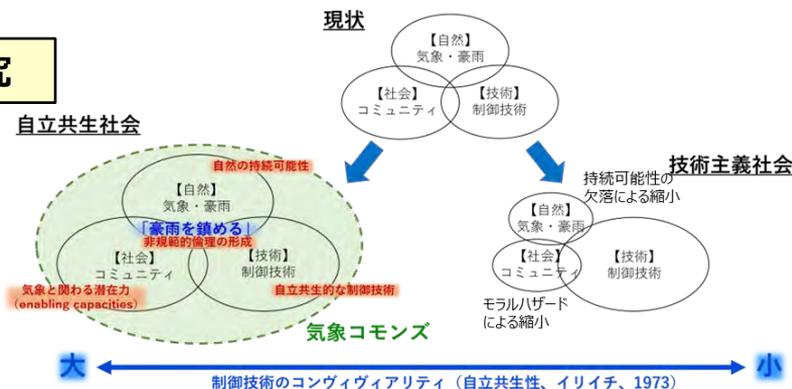


都市内部への介入を模擬するための準備として、縮尺模型実験によって、構造物周辺の風速パターンを3次元的に計測

現実的なウインドファームを想定し、風車がローカルな気象場に与える影響をLES計算によって評価

気象制御の社会受容に向けた、気象制御のあり方 (哲学) の研究

コンビビアリティ (自立共生) を実現するための「気象コモンズ概念」の創出に向けて取り組み

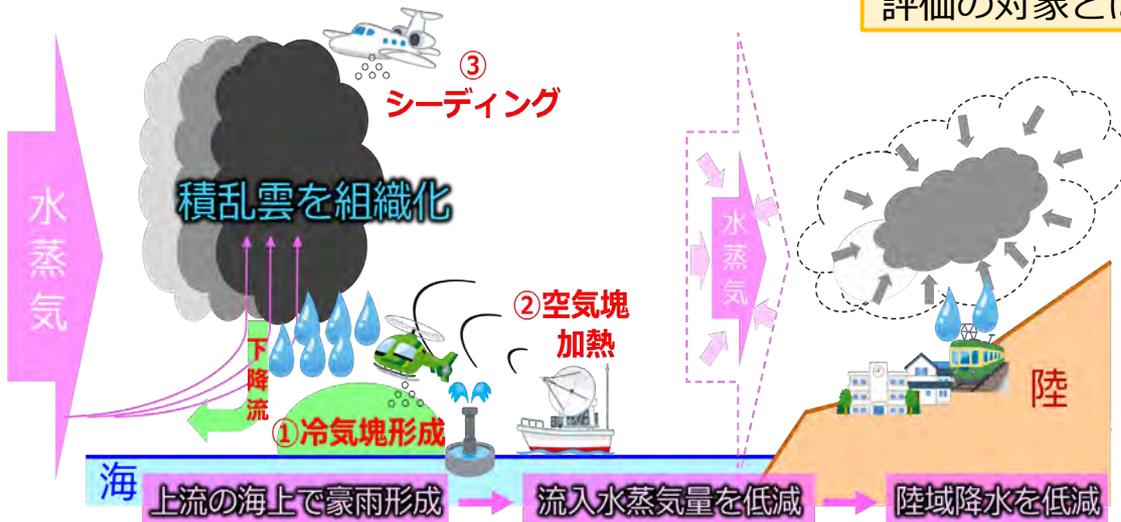


集合行為をすることだけでなく、自発的に考える力や風土を創発することが重要

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (4) 小槻PM (コア)

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

プロジェクトは12月に開始。研究実施期間が短いことから評価の対象とはせず、ここには作り込みの内容を掲載



水蒸気流の上流にあたる海上で豪雨を起こし、大気中の水蒸気を大幅に減らすことで豪雨被害を緩和することを目指す

【採択～研究開発開始まで】

7月31日 採択
8月 全体計画の策定
9～11月 個別計画の策定
12月 研究開発の開始

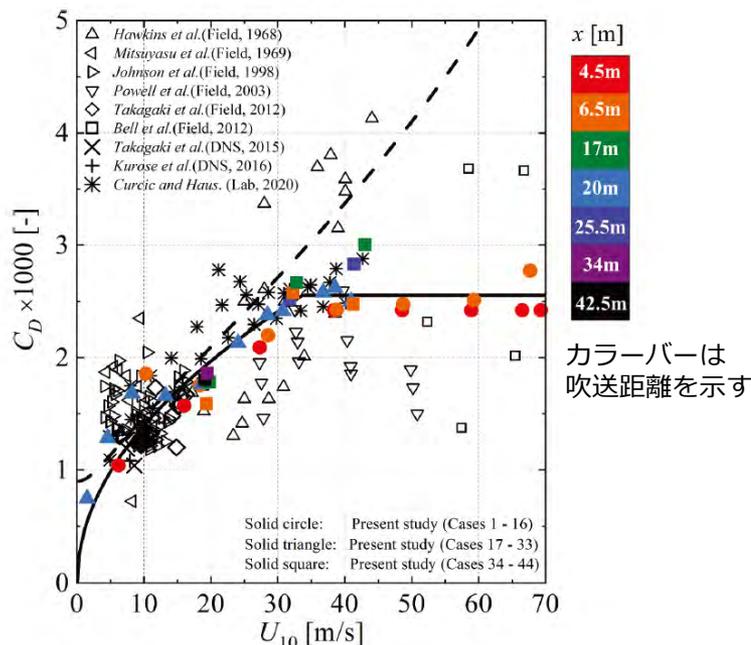
【作り込みの実施実績とポイント】

8月中にプログラム全体計画に沿ったプロジェクトの全体計画、マイルストーンについて議論 (計4回、各回平均2時間、出席者は新規PM・PD・SPD・JST)
その後も、計画書の記載内容の議論を通じ、実施内容の詳細な方向性を作り込み

- **2026年までに豪雨の制御可能性を示す**ため、当初は**数値シミュレーションを中心とした研究開発を重点化**
 - まずは人為的な海上豪雨形成が実現可能であることをシミュレーションで示すことに注力するとともに、制御手法についても実機開発への着手前に精緻なシミュレータを作成するよう指示
- 気象制御実現の大きな課題である**制御手法について、多様な手法の中から有効な手法を見出していく**
 - 2050年の社会実装を見据えた技術開発のハードルは高くとも大きな効果が期待される手法と、2030年代の小規模屋外実験に適したハードルの低い手法を組み合わせた計画を策定
- **要素研究で行っていた課題**のうち、プログラム/プロジェクトにとって必要な部分を**継承**
 - 要素研究の中核であった気象制御容易性定量化のための数理研究を発展させる形で継承

台風下の海表面での運動量・熱流束の予測と制御

台風の成長・発達に重要な、強風下の海面と大気の相互作用を水槽実験によって計測



Takagaki et al. (2023) Fetch effects on air-sea momentum transfer at very high wind speeds.

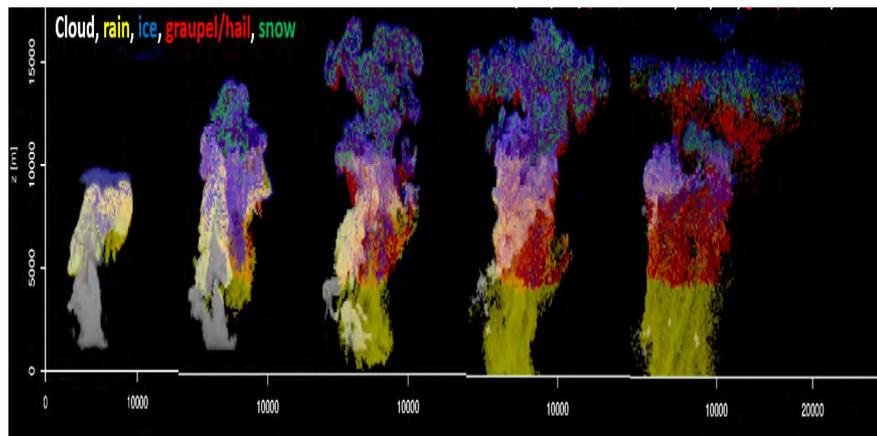
Coastal Engineering Journal, <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2244751>

- 長吹送距離で、高風速下での抵抗係数に上限が存在することを新たに示した
 - └ 海面での風速と運動量吸収の関係を表すパラメータ
- 界面活性剤の投入により、高風速下で抵抗係数が減少傾向にあることを示した。界面活性剤が砕波の形成を促進している可能性がある

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (6) 西澤PJ (要素)

局地的気象の蓋然性の推定を可能にする気象モデルの開発

シーディングの精緻な表現に必須な、
モデル中の雲微物理過程の精緻化

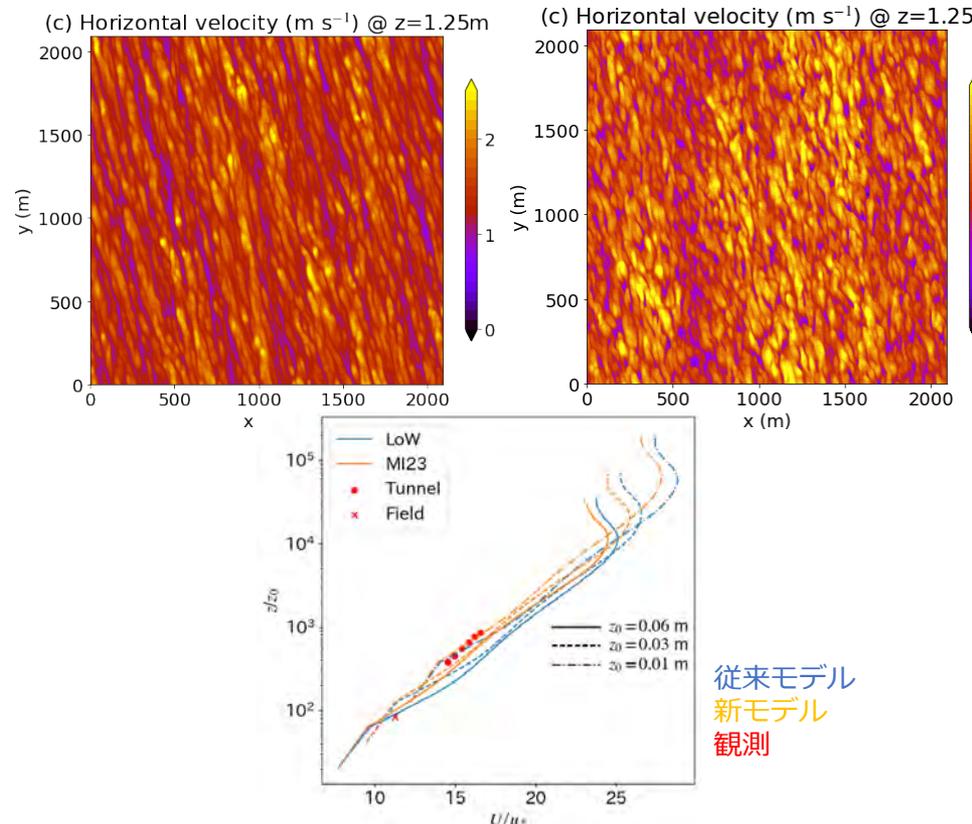


- モデル中の雲粒子のふるまいをグリッド平均としてではなく、グリッドよりも小さな局所的な変化を考慮して表現する技術を高度化した
- 従来手法と比べて計算量は大きいですが、「富岳」において計算速度を60倍以上に高速化するチューニングを果たし、実用化に向けて大きな前進を得た

高解像度モデルで必須な、接地境界層中の
乱流の時間的・空間的分布の表現を精緻化

従来モデル

新モデル



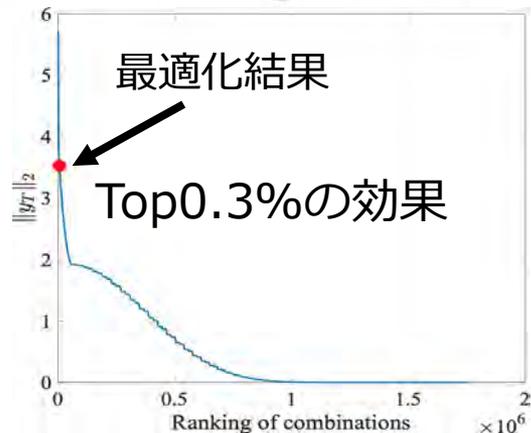
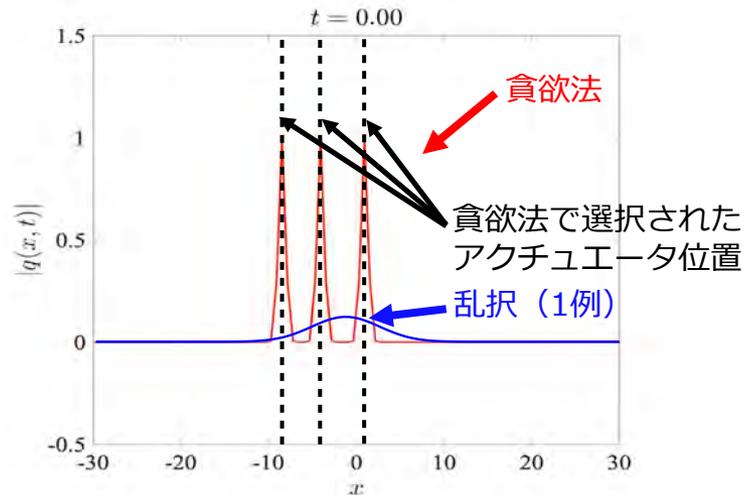
- 乱流の精緻な振る舞いを表現することを可能とし、さらに統計的性質も観測とよく一致するようになった

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (7) 野々村PJ(要素)

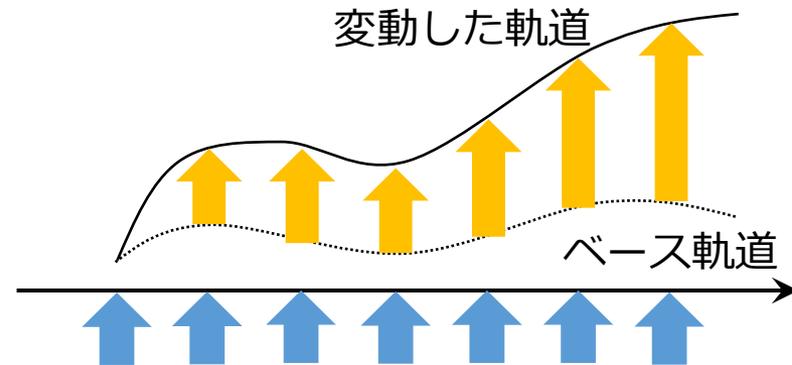
大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化

気象制御の現実世界での適用に必須な、最適な介入を高速に求める技術を開発

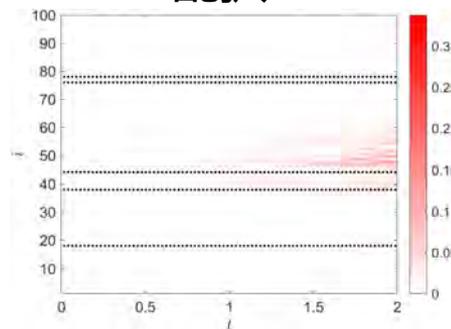
線形化GL方程式



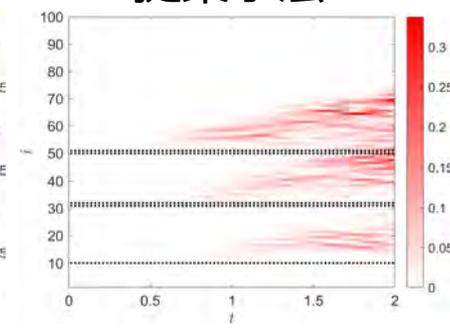
Lorenz-96モデル (非線形問題)



乱択



提案手法



新たな手法 (貪欲法) により従来手法 (総当たり法) の1/100万 程度の時間で探索が可能に

非線形問題でも適切に最適化できることを確認

R6年度は気象問題への適用を目指す

台風を追尾する無人観測機の開発に向け、試作機の外洋試験を実施

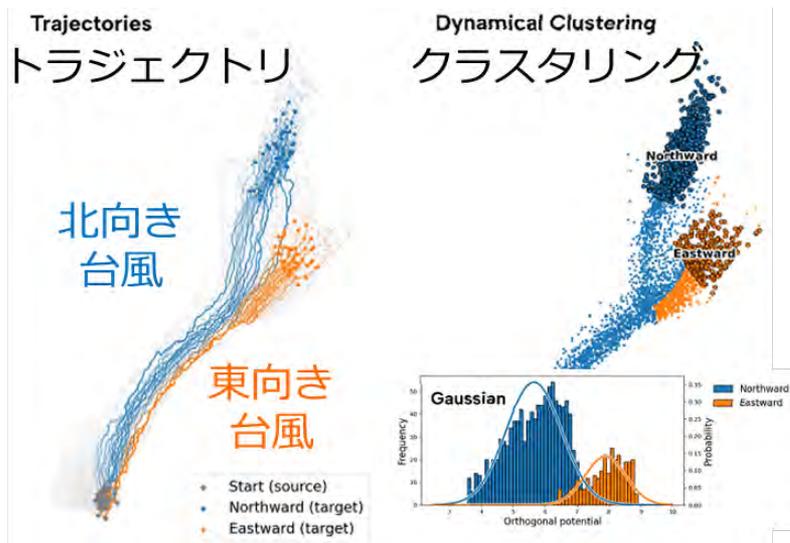
- 掲載するセンサー類の改良、追加を行った試作2号機について、国内沿岸海域試験（駿河湾、2023年6月）と外洋試験（フィリピン東方沖、2023年7月）を実施
- 当初は無人観測機の回収不要を前提として熱帯北西太平洋域における強風波浪環境下での長期試験を行う計画だったが、ELSI厳格化の観点から回収を前提とする計画に変更した
- それにともない、熱帯概要における強風波浪環境下の試験実施が困難となるが、代替の達成目標を設定し、可能な範囲での検証を行う

(参考) 各プロジェクトの主な成果 (9) 小槻PJ (要素)

気象制御のための制御容易性・被害低減効果の定量化

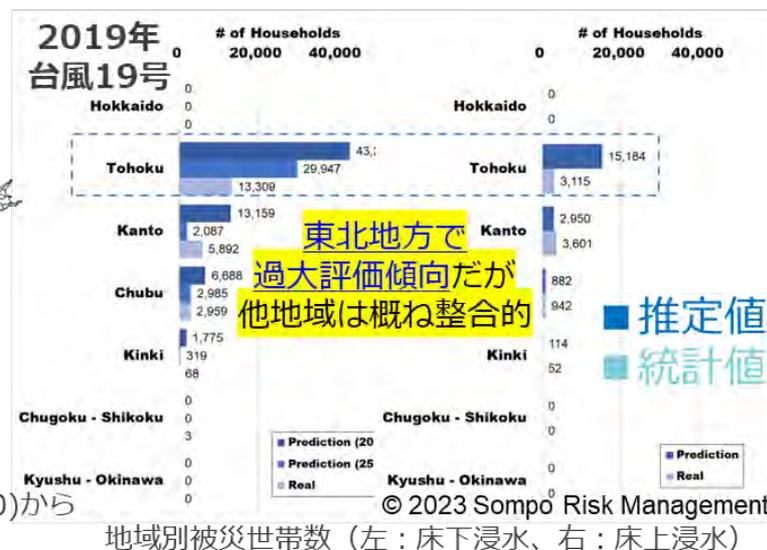
要素研究は11月に終了。要素研究開始から終了までの期間（2022年6月～2023年11月）について、研究開発終了時の事後評価を実施した。

数理科学的アプローチにより、気象制御容易性をとらえる手法を開発



生物学分野で発展してきたランドスケープ解析を気象に適用し、分水嶺のある気象災害事例を特定

全国の被害を推定するデータベースを開発し、気象災害による被害推定が可能に



2023年度公募で採択されたコア小槻PJに引き継がれ、今後も研究開発は継続