

# 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」  
プログラムの進捗状況(報告)**

令和6年6月20日

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)

# 目次

---

1. ムーンショット目標 8 の概要（社会像、体制等）
2. 研究開発の成果
3. プログラムマネジメントの状況
4. 今後の方向性
5. 参考資料

# 目次

---

1. ムーンショット目標 8 の概要（社会像、体制等）
2. 研究開発の成果
3. プログラムマネジメントの状況
4. 今後の方向性
5. 参考資料

# 1. ムーンショット目標 8 の概要 (社会像)

③ 制御の実施



① 災害の予測と  
制御の提案



② 地域間・  
国家間の合意



④ 安心・安全な  
社会の実現



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

被害



ハザード



曝露

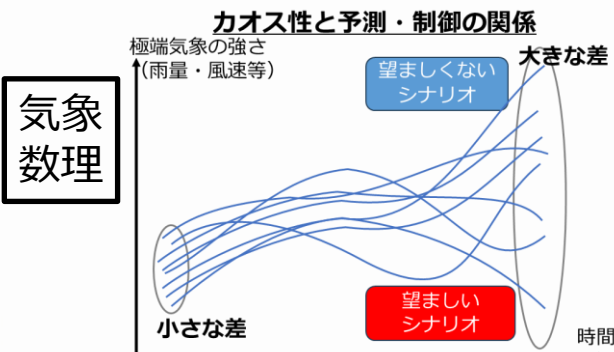


脆弱性

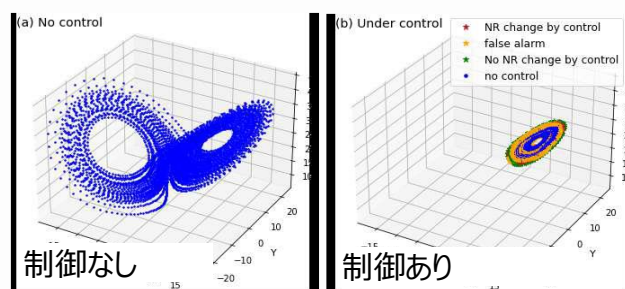
気象の制御で  
軽減

防災インフラや  
社会行動等で改善

# 1. ムーンショット目標8の概要（主要な課題とアプローチ）

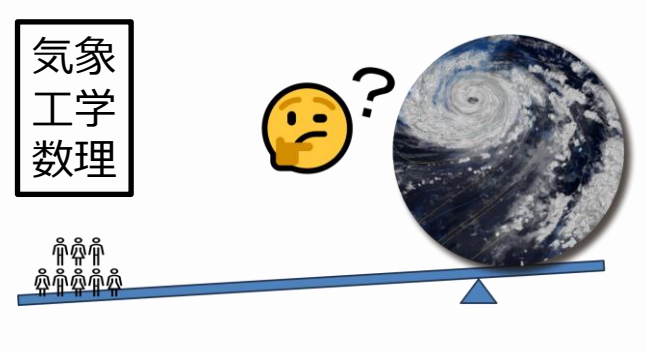


カオスな現象である気象はそもそも制御できるのか



カオス性は予測を難しくするが... 小さなエネルギーでの制御を可能にする

超大規模複雑系である気象に適した制御理論を開発



膨大なエネルギーを持つ気象を人間の力で制御できるのか



ものつくりに加え、予測・制御精度改善や影響評価などの技術も開発

制御理論と気象学の両面から制御手法を探索  
実用化のための幅広い技術開発



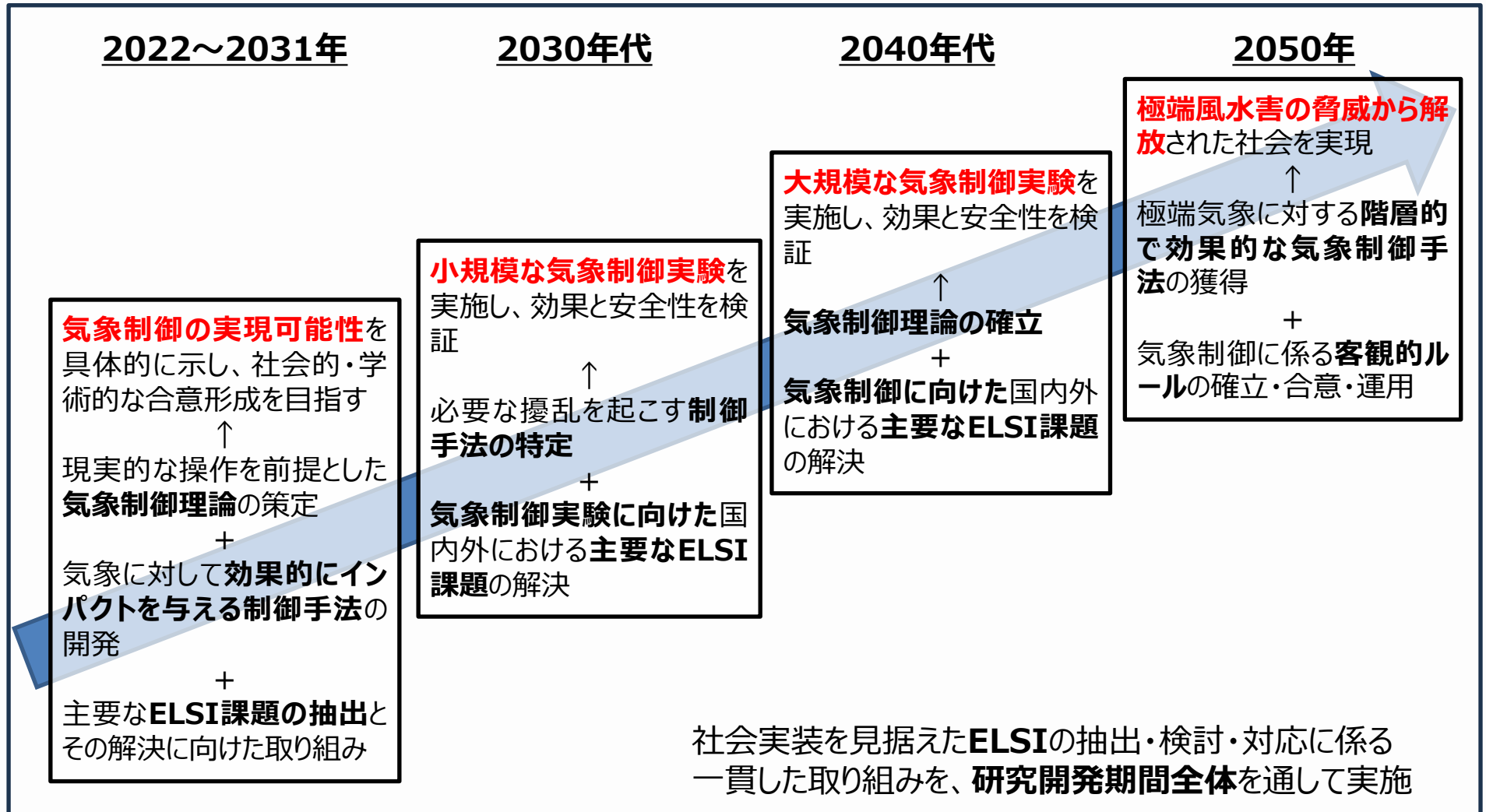
気象を人間が制御できるとして社会に受け入れられるか

- 気象制御に係るELSIの整理や過去事例のレビュー
- 研究開発のためのルール策定
- 社会実装のためのルール提案や標準化への取り組み
- ステークホルダーとの調整

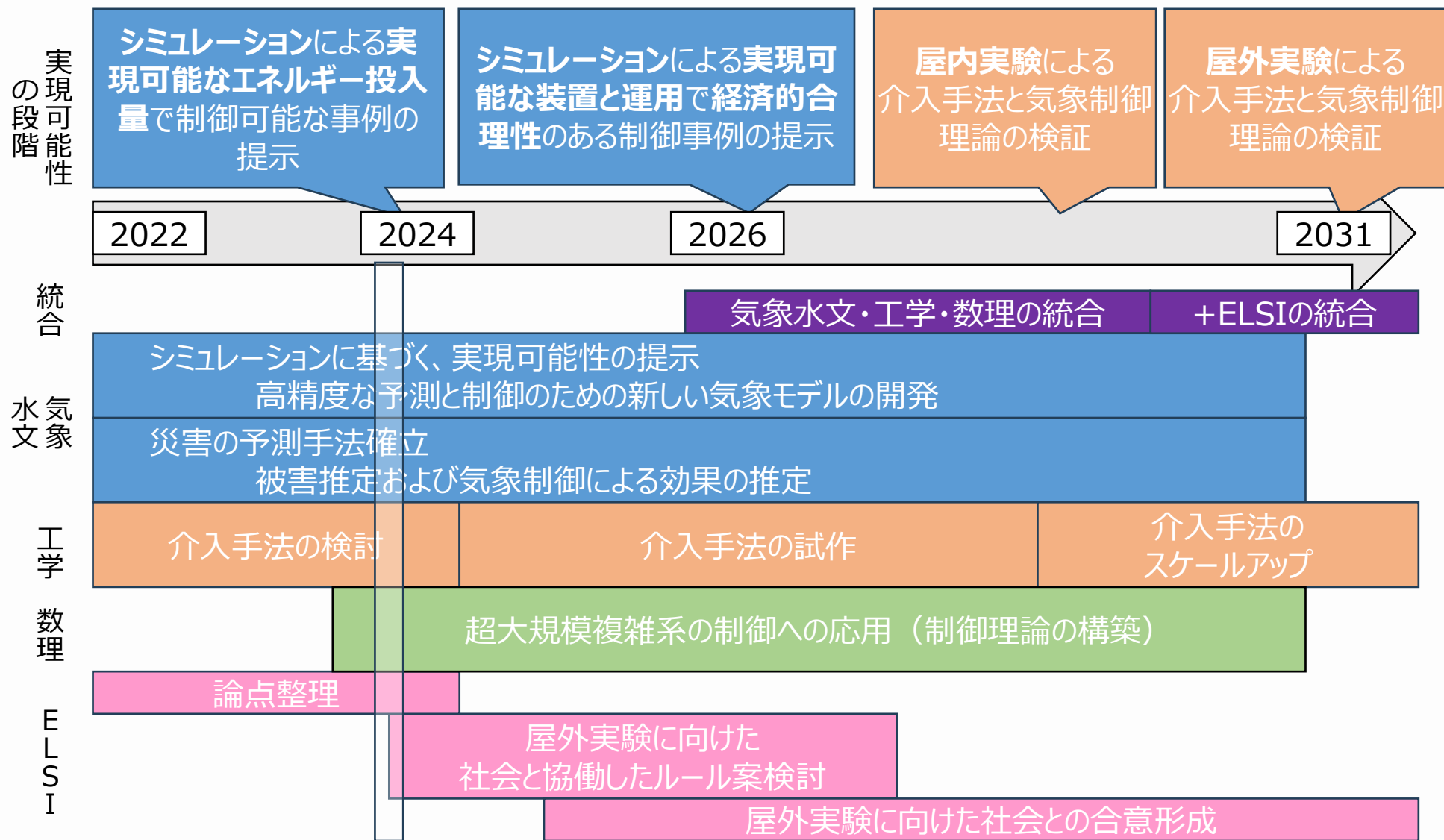
ELSIへの取り組みを科学技術の研究開発との両輪として実施



# 1.ムーンショット目標8の概要（長期計画）

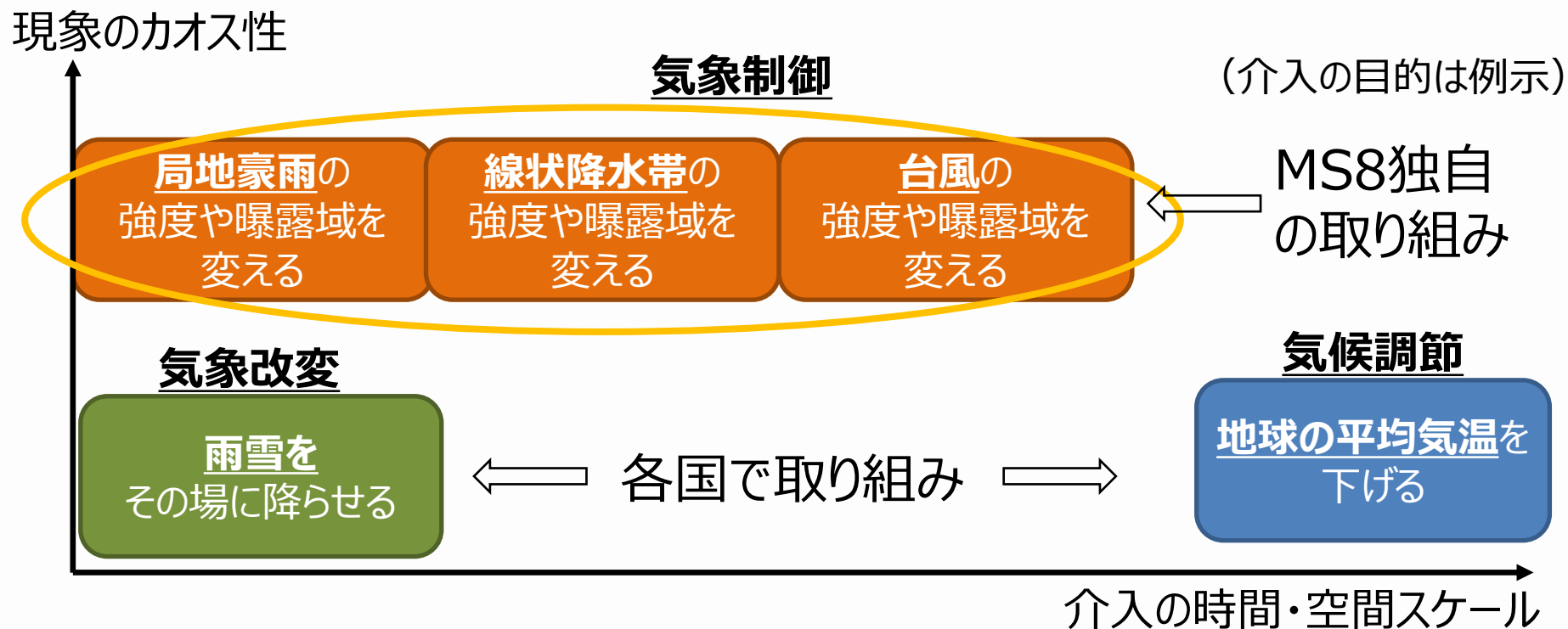


# 1.ムーンショット目標8の概要（短期計画-概要版）



※ 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

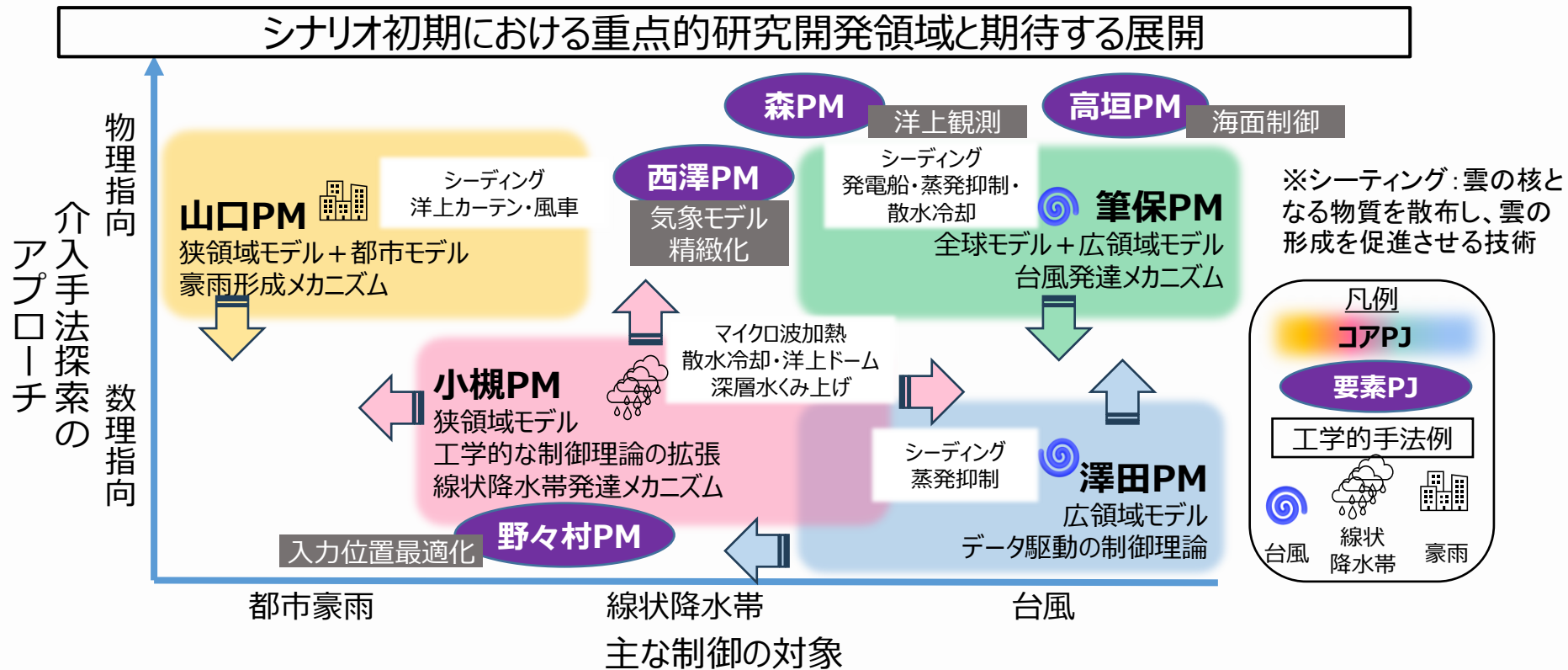
# 1.ムーンショット目標8の概要（国際比較）



- 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**



# 1.ムーンショット目標8の概要（研究開発の体制）



- 4つのコアPJが、気象制御の実現を目指し、異なるアプローチで相補的に取り組む  
↳ 2050年までのシナリオに沿って、気象・工学・数理・ELSIの全要素を含んだ研究開発を実施
- 4つの要素PJが、早期の解決が必要な個別のボトルネックに取り組む
- ELSI・数理についてPJ横断的な活動を実施（後述）

# 目次

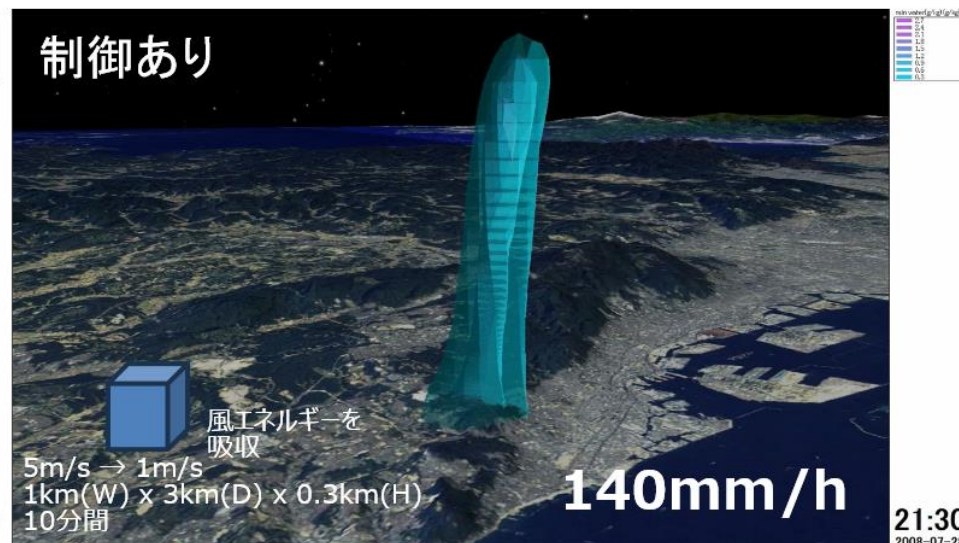
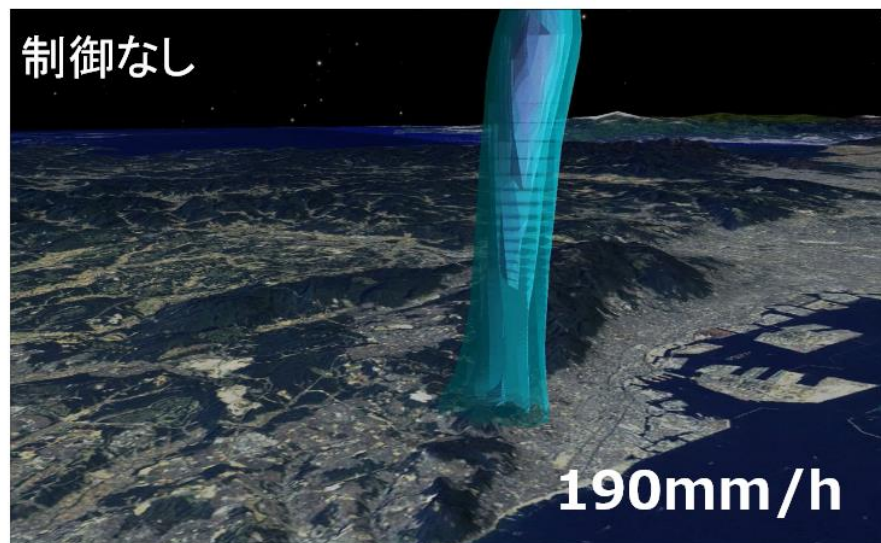
---

1. ムーンショット目標 1 の概要（社会像、体制等）
2. 研究開発の成果
3. プログラムマネジメントの状況
4. 今後の方向性
5. 参考資料

## 2. 研究開発の成果 (豪雨制御への取り組み例)

### 【山口PJ】神戸都賀川豪雨(2008年)のシミュレーション中での制御実験

- 地上付近の水蒸気集中が、都市豪雨をもたらす積乱雲の発達に重要
- 都市部における水蒸気集中を阻害するように、風の流れを変化させたシミュレーションを実施



ピーク降雨強度を27%抑制

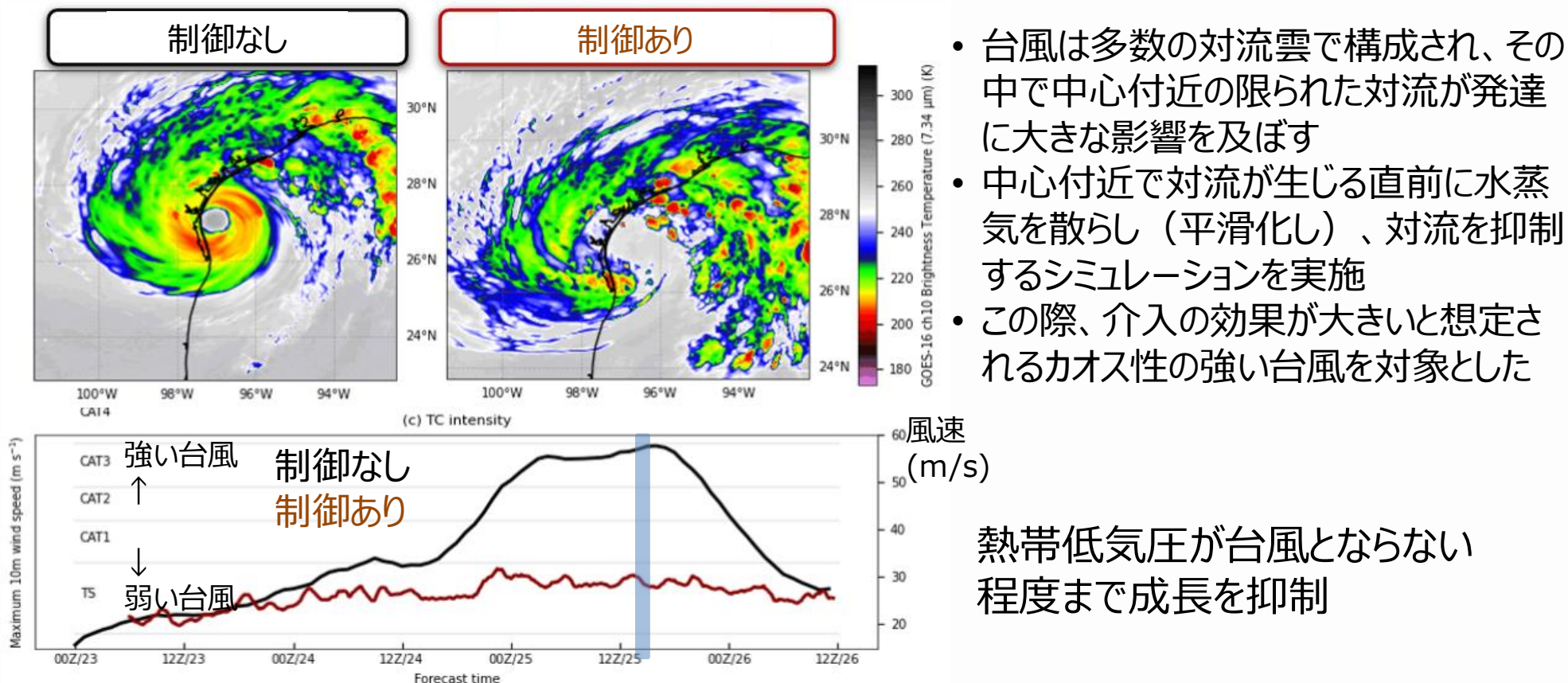
吸収した風エネルギーは大型の風車2基分に相当するものであり、

人類が建造可能な陸上構造物で**豪雨被害を抑制できる可能性**を示した

- ※ 風車は移動が困難であるが、機器の操作により数kmの範囲に影響を及ぼすことができる
- ※ 将来のウィンドファームを活用も検討
- ※ 同等の物理的介入が可能な代替策も検討中

## 2. 研究開発の成果 (台風制御への取り組み例)

### 【澤田PJ】ハリケーンHarvey (2017年) のシミュレーション中での制御実験



- 台風は多数の対流雲で構成され、その中で中心付近の限られた対流が発達に大きな影響を及ぼす
- 中心付近で対流が生じる直前に水蒸気を散らし（平滑化し）、対流を抑制するシミュレーションを実施
- この際、介入の効果が大きいと想定されるカオス性の強い台風を対象とした

現象と比べてはるかに小さなスケールの介入によって台風を制御するという、**カオス性を用いた気象制御のコンセプト検証**がなされた

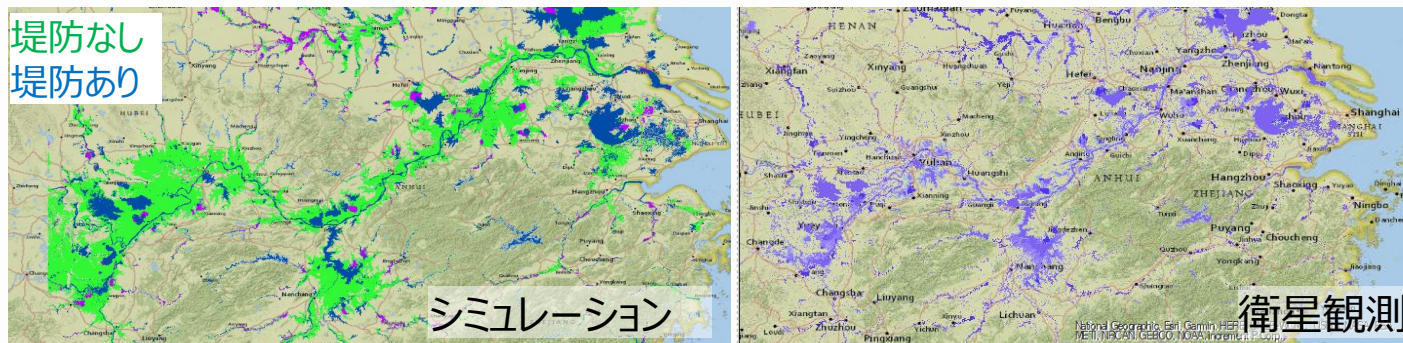
※ただし、本実験では10kmを超える範囲で高頻度に介入を行う必要があり、実現可能性を考慮できていない  
※現在、工学的介入手法と結びつけられる、より効率的な介入を同定する技術を開発している



# 2. 研究開発の成果 (制御の実用化に向けた取り組み例)

影響評価：気象制御のメリット・デメリットを定量的に示す

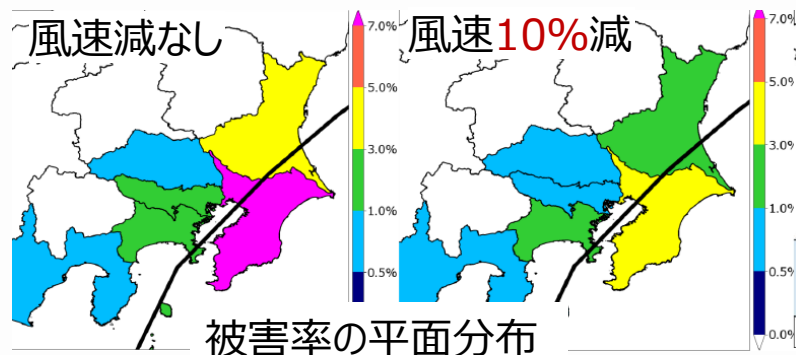
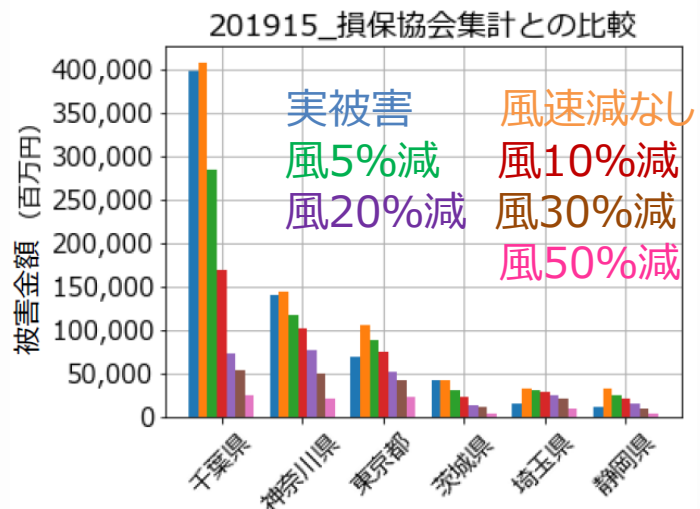
【澤田PJ】堤防を考慮した広域・高速の浸水被害の計算



国際的な協調の元で気象制御を実施するために必要な、世界各地での氾濫計算を可能とする

【筆保PJ】風災被害推定モデルの開発

2019年台風Faxaiが減勢したときの被害額（左図）、被害分布（右図）を推定



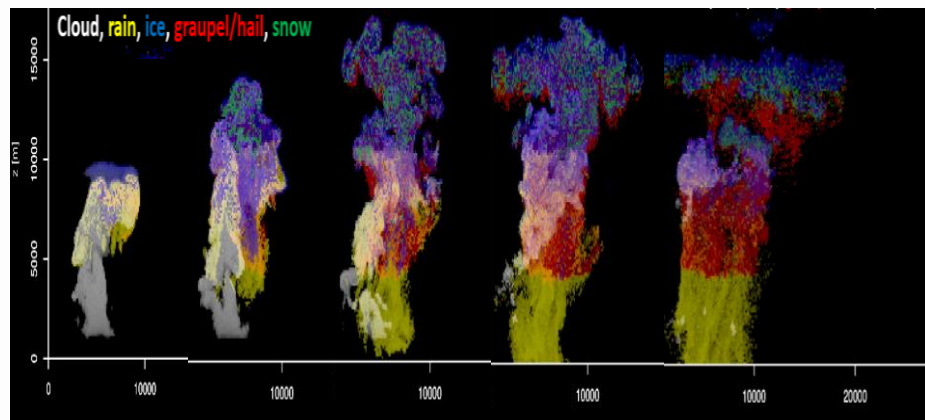
(例) 10%減勢すると被害額が3500億円、被害率が52%減少

# 2. 研究開発の成果 (制御の実用化に向けた取り組み例)

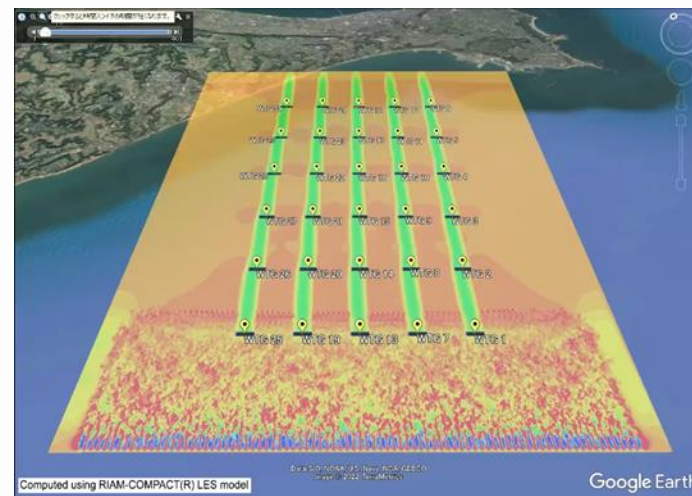
予測・制御精度の向上：制御効果の最大化や副作用の低減を目指す

【西澤PJ】シーディングの効果も表現できる新しい雲微物理モデルの開発

simulation

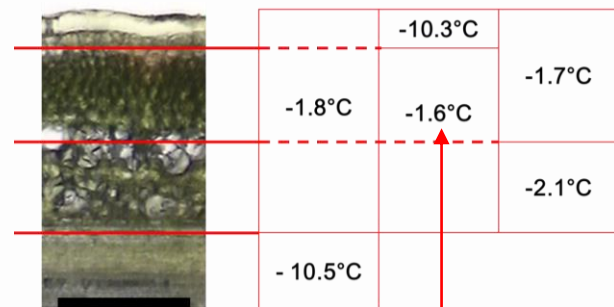


【山口PJ】風車が作る気流の詳細なモデリング



工学的介入手法：実現可能な手法開発に向けたアイデアの検証

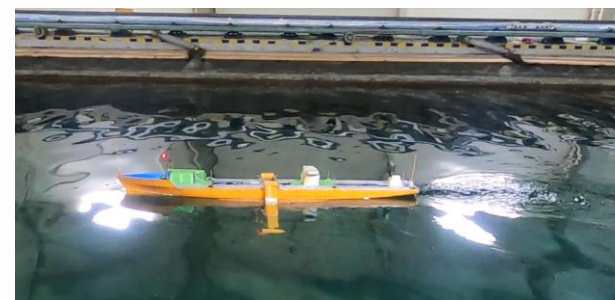
【澤田PJ】安全・安心・高効率なシーディング物質探索



ブルーベリー枝内の氷核活性

自然では氷が形成されにくい温度帯で雲を形成可能な物質を含む部位

【筆保PJ】台風下で運用できる帆船の開発



強度を検討するための本体部模型による水槽試験



## 2. 研究開発の成果 (ELSIに関する取り組み例)

### 【PJ横断チーム】気象制御にかかるELSIの俯瞰的整理 (カテゴリ名のみ抜粋)

#### 1. 地球規模のリスクに関わる課題

—制御技術が抱える長期的・広域的なリスクを軽減できるか

#### 2. 地域レベルのリスクに関わる課題

—制御技術が抱える地域的なリスクを軽減できるか

#### 3. 社会システムの脆弱性をめぐる課題

—我々の社会は制御技術を上手に使い込ませることができるか

#### 4. 自然・文化にわる価値判断をめぐる課題

—制御技術のあり方や限界を見極めることができるか

#### 5. 社会的判断・意思決定プロセスに関わる課題

—制御技術に対する市民の理解を促すことができるか

#### 6. 責任ある研究・イノベーション実践に関わる課題

—技術開発・実装を責任をもって進めることができるか

### ELSIに係る進捗とこれからの進め方

R4年 気象制御の全般に係るELSIの俯瞰的整理を実施

R5年 気象制御の研究者・実施者視点での論点を整理

R6年 **屋外実験の実施に向けた論点を整理**

R7年 屋外実験の基本方針を策定

R8年 **屋外実験のルールを策定**

### 【澤田PJ】ELSIの論点抽出を目的とした市民対話



# 目次

---

1. ムーンショット目標 1 の概要（社会像、体制等）
2. 研究開発の成果、及びその周辺動向
3. プログラムマネジメントの状況
4. 今後の方向性
5. 参考資料

# 3. プログラムマネジメントの状況(概要)

## PDによるプログラムマネジメント

**スモールスタート指向**：研究開発計画の前半ではシミュレーションによる実現可能性の検証やELSI研究者による社会受容性の検証に比重を置き、大規模な観測や機器開発などの大型投資は気象制御の実現の確度が高まってから実施

## 国際連携

**オープンサイエンスの重視**：「気象制御」という概念が国内外で認知されていない中、積極的な交流と、知財に関わらない情報についての公開を行い、気象制御研究の潮流を形成（海外機関との連携、学会での気象制御セッションの運営、国際アドバイザリーボードの検討等）

## 産業界との連携・橋渡し

**産業界との連携促進**：気象制御の実用化における民間企業との連携の必要性に鑑み、各プロジェクトにおける現時点からの連携を推進（介入装置の開発に係るメーカー、被害や制御効果の推定を行う損保企業等との意見交換やプロジェクトへの参画等）

## 広報・アウトリーチ活動

**気象制御の機運醸成**：丁寧な情報発信や社会との対話を重視し、対象層別に対応を実施（防災関係者を対象とした国内シンポ、中高生を対象とした地方での対話イベント、小学生を対象とした科学館での対話イベント等）

# 3. プログラムマネジメントの状況(概要)

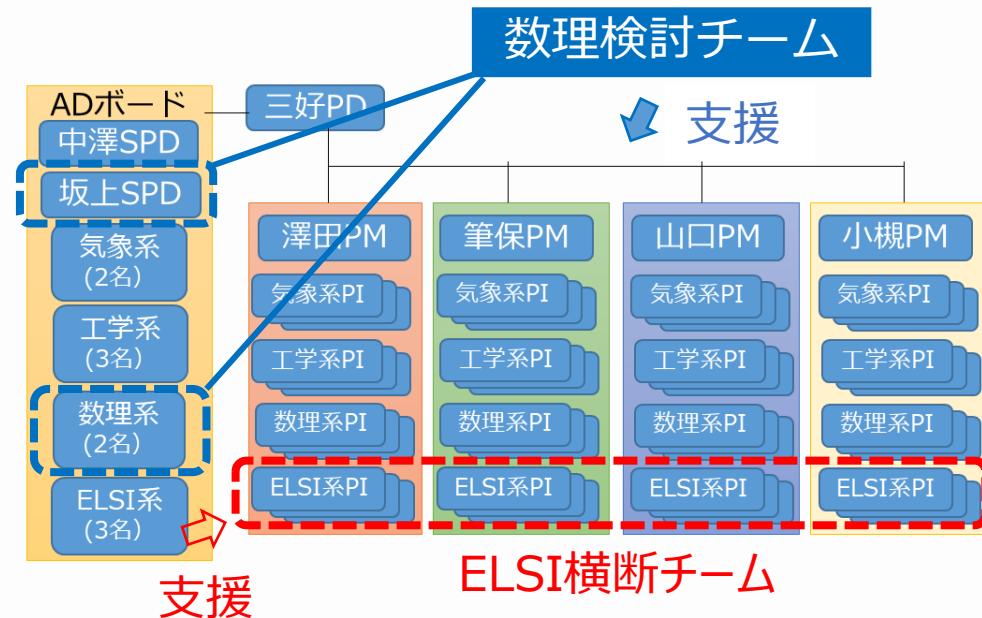
## データマネジメント

産学での利活用およびオープンサイエンスを推進：実験データや気象モデル・制御理論の実証用コードを公開するなど、積極的なデータ公開・共有を実施

## ELSI・数理学等横断的な取り組み

**ELSI横断チーム**：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

**数理検討チーム**：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



# 目次

---

1. ムーンショット目標 1 の概要（社会像、体制等）
2. 研究開発の成果
3. プログラムマネジメントの状況
4. 今後の方向性
5. 参考資料

# 4. 今後の方向性：課題と対応策

## 【現在の達成状況】

- シミュレーションにおいて、気象学的な原理に基づく気象制御の実現可能性が見えつつある
- 屋内・屋外実験による検証に向けた取り組みを加速していく時期となった

## 【課題と対応】

### 1. 制御理論の気象への適用

- 小さな介入で大きな制御効果を得る、気象のカオス性を利用した効率の良い制御理論が必要
- 実用化のためには、発災の予測から限られた時間で効果的な介入を決定する必要
  - 低次元系での有効性が確認された介入最適化の技術を、超大次元系へと早期に拡張できるよう、中核となるプロジェクトに資源を分配したり、数理検討チームとの連携を強化したりする

### 2. 工学的介入手法の多様化

- シミュレーション上の制御結果を実現する、現実的な介入手法が不可欠
- これまでは気象制御に必要な大気への介入の内容・大きさが明らかでなかったため、工学者・技術者の取り組みや外部から呼び込むことに制限
  - 今年度中に示される多数の制御事例のデータを元に、介入手法の要件定義と、それに基づく工学者・技術者の呼び込みを行う



# 4. 今後の方向性：課題と対応策

## 【現在の達成状況（再掲）】

- シミュレーションにおいて、気象学的な原理に基づく気象制御の実現可能性が見えつつある
- 屋内・屋外実験による検証に向けた取り組みを加速していく時期となった

## 【課題と対応】

### 3. 屋外実験に向けたルールの策定

- MS8内の技術開発もこのルールに沿うよう行われていくため、早期の策定が必要
  - まずはプログラム内外の専門家や市民との議論によって、ルールの前提となる原則を定めつつ、研究開発計画を随時アップデートしていく

### 4. 社会的に受容可能な気象制御の構築

- 気象制御を実現するためには、現実的な介入操作で被害が低減し、かつその経済的合理性や実施決定のプロセスが社会的に受容可能である必要
  - 制御理論・介入手法・影響評価・ELSIそれぞれの研究開発の計画・進捗をプログラム内で共有し、検討過程や実験設定の整理を進める

# 目次

---

1. ムーンショット目標 1 の概要（社会像、体制等）
2. 研究開発の成果
3. プログラムマネジメントの状況
4. 今後の方向性
5. 参考資料

# 【参考】目標8 PD・アドバイザー一覧

	氏名	所属・役職	専門
PD	三好 建正	理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー	気象・データ同化
サブPD	中澤 哲夫	元 気象庁 気象研究所 台風研究部 部長	気象、国際
サブPD	坂上 貴之	京都大学 大学院理学研究科 教授	応用数学
	石田 純一	気象庁 総務部 参事官	気象行政
	井村 順一	東京工業大学 工学院 教授/理事・副学長	制御理論、ネットワーク制御
	牛尾 知雄	大阪大学 大学院工学研究科 教授	計測工学、防災工学、大気水圏科学
	大原 美保	東京大学 大学院情報学環 総合防災情報研究センター 教授	社会基盤（土木・建築・防災）、 防災工学、リスク評価
	齊藤 和雄	気象業務支援センター 国際事業部 専任主任技師	気象学（メソ数値予報、局地風）
	標葉 隆馬	大阪大学 社会技術共創研究センター 准教授	科学社会学、科学技術社会論
	水藤 寛	東北大学 材料科学高等研究所 教授	応用数学、数理モデリング
	山田 道夫	京都大学 数理解析研究所 特任教授	非線形力学・流体力学
	余田 成男	京都大学 国際高等教育院 副教育院長／特定教授	気象学、大気物理学

# プログラムマネジメントの状況

## PDによるプログラムマネジメント

- **スモールスタートを指向**
  - 機器開発などの大型投資は気象制御の実現の確度があがってから実施
  - 研究開発計画の前半ではシミュレーションによる実現可能性の検証や、ELSI研究者による社会受容性の検証に比重
- **プログラム内のコミュニケーションを重視**
  - 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
    - 全体会議、サイトビジット、合宿（多くの研究者が一堂に会した対面での会議）
    - チャットツールを用いた非同期のコミュニケーション
    - 月例会（全メンバーが参加可能なオンライン会合を毎月実施）
- **プロジェクト横断的な取り組み**
  - 特定の気象や独自のアプローチで取り組む各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（詳細は後述）
    - ELSI横断チーム
    - 数理検討チーム

# プログラムマネジメントの状況

## 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
  - ✓ 国際学術大会でのセッション等の提案・実施  
(AGU2023@US、AOGS2024@韓国 等)
  - ✓ **国際会議を主催 (2023.8/神戸・2024.10/東京)**  
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ボードの結成**に向け人選を開始。上記国際会議に招聘する方針。



## 産業界との連携・橋渡し

- 気象制御の実現可能性提示による企業参画の加速を見据え、各プロジェクトには現時点からの連携を推奨
- 各プロジェクトでは、介入装置の開発に係るメーカーや、災害被害軽減によってメリットを得られる損保企業が既に参画するほか、気象制御の運用に興味のある企業等との意見交換を実施

# プログラムマネジメントの状況

## 広報・アウトリーチ活動

- 気象制御については自然環境や経済等、広範囲に影響があることから、目標8の目指す気象制御についての丁寧な情報発信と、社会の反応を踏まえた研究開発を進める
- 大都市圏からの一方的な発信のみならず、各地の関係者との相互交流を目的に、地方開催のイベントも推進

## 国内シンポジウム（2023.10/東京）



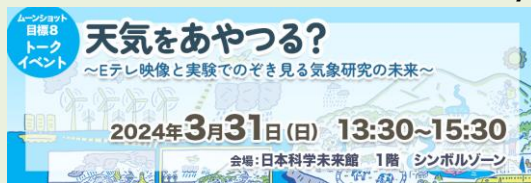
- 目標8の取り組みを一般向けに紹介
- 目標8が検討するELSIについて情報発信するとともに、質疑では一般参加者からの質問にその場で回答
- 次回は防災関係者を主な対象として、2024年12月に東京で開催予定

## 地方でのイベント（2023.11/神戸）



- 気象制御を含めた科学技術による社会変革について、来場者の質問を起点とした公開討論
- 「富岳」見学を実施し、PDが来場者に説明
- 2025年2月には佐賀での開催を目指し、関係団体と企画を構想中

## 科学館でのイベント（2024.3/東京）



- 気象の原理について映像や実験体験とともに紹介
- 来場者からリアルタイムでコメントを募り、気象制御についての感想や実施可否についての公開討論



# プログラムマネジメントの状況

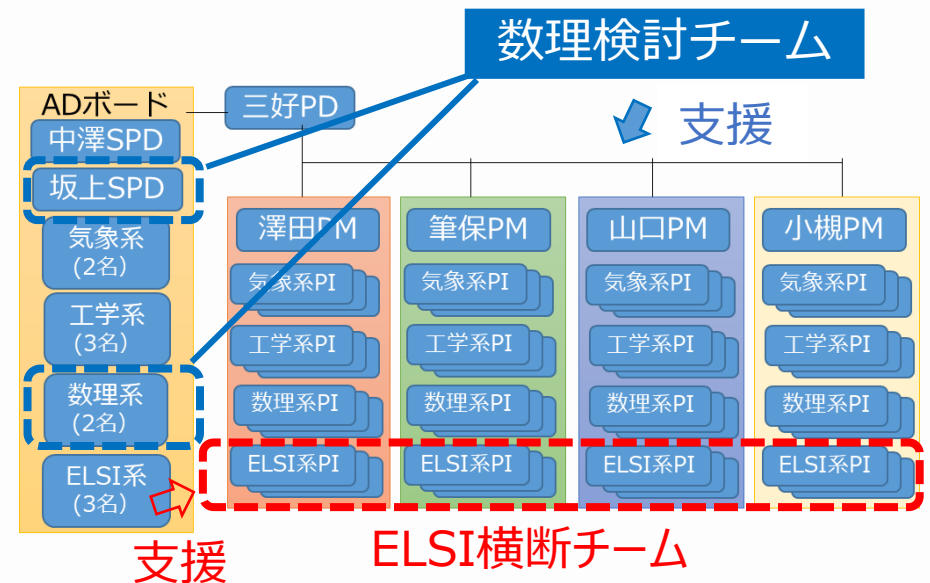
## データマネジメント

- 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

## ELSI・数理学等横断的な取り組み

### 【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数理学分科会からの意見交換の場を設定し、コアPJにおける**数理学の研究体制構築**を支援