

## 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**

**令和8年7月14日**

**プログラムディレクター（PD） 三好 建正**

**（理化学研究所 計算科学研究センター チームプリンシパル）**

# 目次

---

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. 外部評価結果
4. 今後の方向性
5. 参考

# 目次

---

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. 外部評価結果

4. 今後の方向性

5. 参考

# 1.1 目指す社会像（1）

**2050年のターゲット:** 激甚化しつつある台風・豪雨（線状降水帯によるものを含む）の強度・タイミング・発生範囲などを変化させる**制御によって極端風水害による被害を大幅に軽減**し、我が国及び国際社会に幅広く便益を得る。

**10年目のターゲット:** 現実的な操作を前提とした台風・豪雨（線状降水帯によるものを含む）の制御によって被害を軽減することが可能なことを**計算機上で実証**するとともに、広く社会との対話・協調を図りつつ、操作に関わる**屋外実験を開始**する。



従来の防災技術の活用を前提に、被害が大幅に減るよう極端気象を制御する

## 1.2 解決すべき課題

## ① 気象という超高次元カオス系を制御する理論の開発

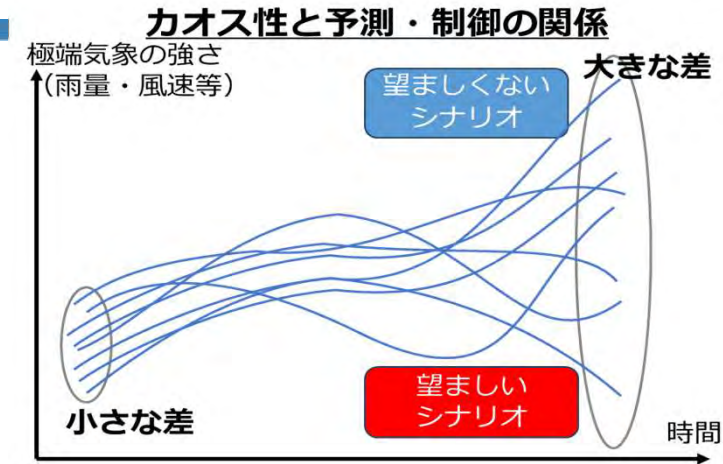
- 低次元系(数十～)でのPoCに基づきプログラムがスタート⇒超高次元(数百万～1億～)へ展開
- 完全な予測は不可能であるため、高確率で減災し、最悪でも被害を拡大させないロバスト性が重要

## ② 膨大な規模の気象を、人類が扱える介入で制御 (理論と現実のマッチング)

- 高い気象予測精度の獲得
- 効果的で経済的な介入手法の特定
- 観測・予測・制御を、計算機と実社会の両方でリアルタイムに行うシステムの開発

### ③ 社会受容される気象制御の確立(ELSI対応)

- 社会的な合意が得られる基準の設計
- 屋外実験・社会実装に向けたルールメイキングやステークホルダーとの調整



# 1.3 プログラムのマイルストーン

2050

極端気象に対する効果的な気象制御のための大気への介入手法を持ち、  
それらが客観的ルールのもとで現業的に運用が行われる状態となる。

2040

2031

**豪雨**：制御操作に関わる**小規模な屋外実験**を実施する。実験にもとづき、大規模な屋外実験にむけたルールの拡張を行う  
**台風**：制御の現実的な実現可能性を評価する。そのために、運用が可能で経済合理性のある介入により、台風の全体もしくは一部を変化させ、減災が可能であることを**数値シミュレーション**によって示す。  
**ELSI・その他**：2050年を見据えた気象制御の具体的な運用パッケージ例を示し、現実的な気象制御の実施に向けたELSIの解決に着手する。豪雨制御で得られた実験ルールを参考にし、台風の制御に有用な実験ルールを策定する。

2026

**豪雨**：制御の現実的な実現可能性があることをロバストに示す。そのために、運用が可能で経済合理性のある介入により豪雨を変化させ、豪雨の減災が可能であることを**数値シミュレーション**によって示す。  
**台風**：制御の原理的な実現可能性を評価する。そのために、人類が扱える規模の介入により、台風の全体もしくは一部を変化させうることを**数値シミュレーション**によって示す。  
**ELSI・その他**：小規模な屋外実験の実施に向けたルールの原案を作成し、関連するELSIの解決に着手する。また、屋内実験によって介入手法の要素検証を行う。

2024

**豪雨・台風共通**：気象制御の実現可能性を示す。そのために**数値シミュレーション**を用いた実験を行うとともに、有効な制御手法を特定する。  
**ELSI・その他**：気象制御の実現と研究開発過程における主要なELSIを抽出し、特に屋外での小規模な実験を実施するために検討が必要な課題を明らかにする。制御装置の試作に着手する。

- プログラム全体として10年間は**計算機上での検証に注力**する計画
  - 前半5年で「制御」の前提となる、人類が扱える介入による極端気象の「変化」を確認
  - 後半5年で「制御」理論の適用により、極端気象を減災に誘導できることを示す
- 3年目中間評価を経て、豪雨・台風研究のタイムラインを分割するなど計画を見直し
  - 単発の介入で豪雨を一定程度抑制できることを計算機上で示すとともに、ELSI対応を加速し、ターゲットよりも**可能な限り屋外実験を前倒し**する方針とした

# 1.4 プログラムの推進体制



プログラムディレクター  
三好 建正(理研)

アドバイザー

11名

国際アドバイザー

3名

## 豪雨制御プロジェクト



山口弘誠(京都大)

ゲリラ豪雨・線状対流系  
豪雨と共に生きる気象制御

## 台風制御プロジェクト



澤田洋平(東京大)

社会的意思決定を支援する  
気象－社会結合系の制御理論



小槻俊司(千葉大)

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



筆保弘徳(横国大)

安全で豊かな社会を目指す台風  
制御研究

ELSI・数理・予測精度等に係るプロジェクト横断活動

- 現在は、2050年の目標達成からバックキャストした計画に基づき、**気象・工学・数理・ELSI/RRI**といった総合的な研究開発を行う4つのプロジェクト(PJ)で構成
- プログラム開始から3年間は個別の課題解決に取り組む小型のPJも存在  
予定通り終了し、成果や必要なノウハウ等を現存するPJに吸収
- プログラムマネジメントに国際的な視点を取り入れるため、**国際アドバイザー**も設置

# 目次

---

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. 外部評価結果
4. 今後の方向性
5. 参考

## 2.1 国内外の研究開発動向との比較（１）

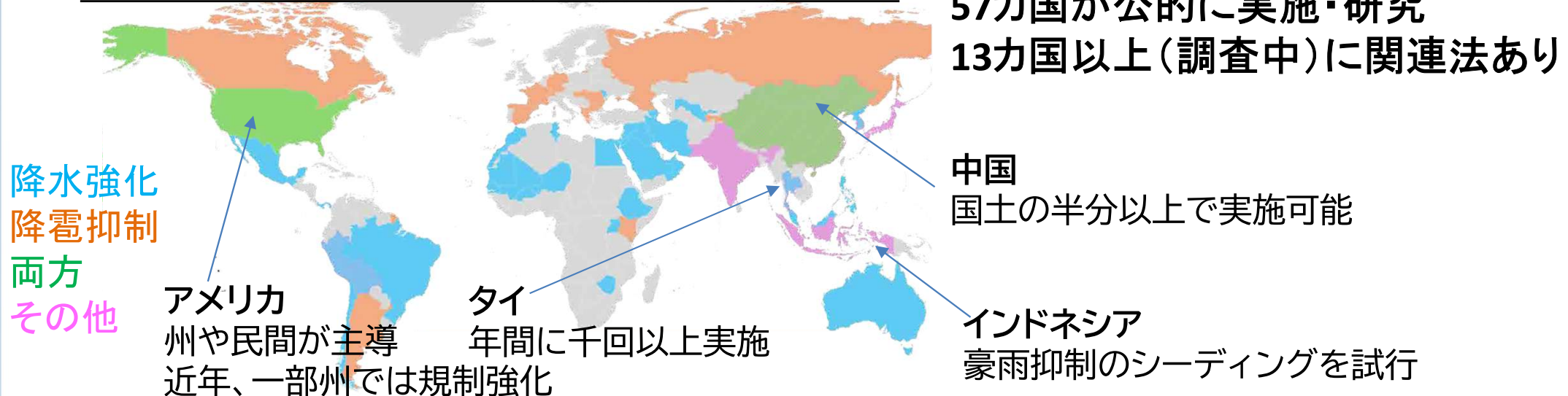
### 気象改変と気象制御の比較

|      | 気象改変（従来）                   | 気象制御（目標8）                                   |
|------|----------------------------|---------------------------------------------|
| 主な目的 | 人工降雨<br>（水資源確保、大気汚染対策）     | 豪雨や台風がもたらす災害の抑制<br>（強い降水や風を弱める）             |
| 対象   | 穏やかな気象<br>（カオス性が小さく、予測が容易） | 激しい気象<br>（カオス性が強く、予測が困難）                    |
| 方法論  | 決定論的                       | 確率論的<br>複数のシナリオ予測に基づき、望ましいシナリオ<br>（減災）に誘導する |
| 介入   | 直接的<br>フィードフォワード型          | カオス性を逆手にとった、小さな介入の成長を利用<br>フィードバック型         |

- 気象制御は、従来の気象改変を発展させた技術
- 高度な予測と観測を基盤として、気象学や制御理論を用いて特定した減災に効果的な「ツボ」に介入を行う
  - 数日にわたって生じる大規模な豪雨や台風の制御には、特に制御理論が導くフィードバック型の介入の重要性が大きい
- 気象制御の原理は、気象予測において観測に近づける修正を逐次的に加えることでシミュレーションを現実同期させるデータ同化と同様

## 2.1 国内外の研究開発動向との比較（２） 気象改変の実施状況と目標8の位置づけ

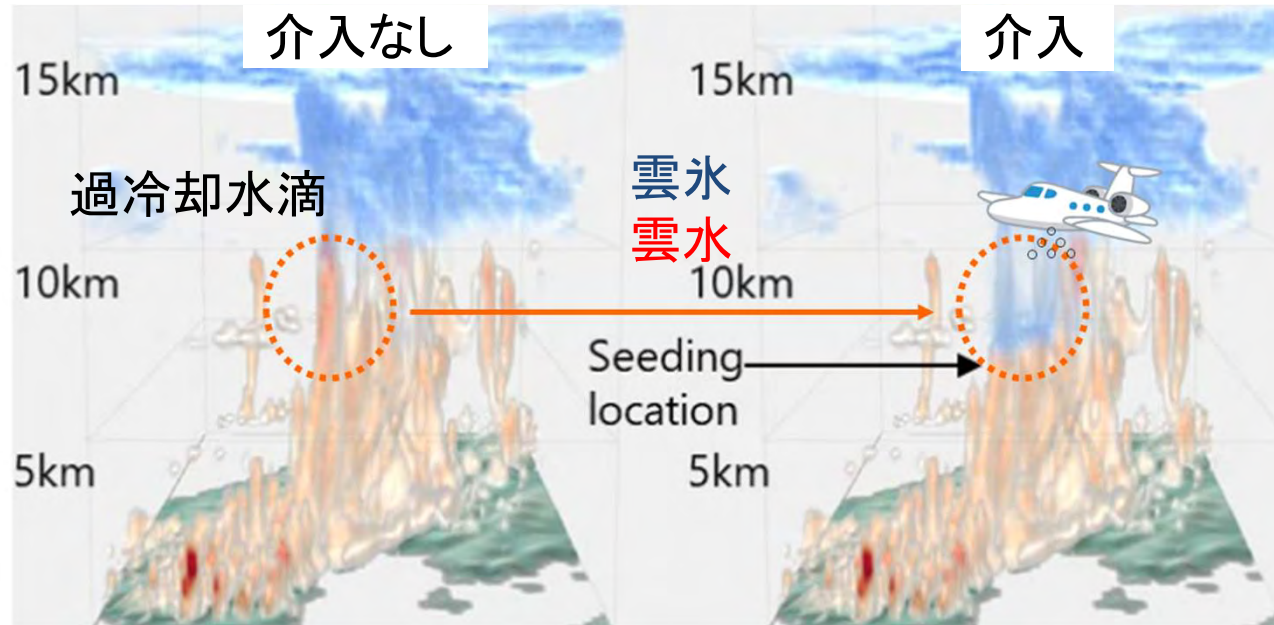
### 2020-2025シーディングの実施および研究状況



- **介入手法としては、目標8で様々な介入手法を検討し、気象改変/人工降雨等に用いられているシーディングの応用が気象制御に効果的であると判断**
  - シーディング:ドライアイスやヨウ化銀、塩等の散布で、雲の成長を変える技術
  - 目標8内でのシーディング以外の手法の探索は継続
- **計算機上での極端気象への介入や、緻密に「制御」するための数理研究では日本・目標8が先行**
  - 国際誌に掲載された世界初の成果例:オーバーシーディングによる豪雨抑制のシミュレーション、豪雨への制御理論の適用、台風への制御理論の適用
- 気象への介入(人工降雨)は国内公的機関で10年以上行われておらず、**実験手法の再構築から始める必要がある**

## 2.2 革新的な取組・成果（1） 豪雨

### 2014年広島豪雨のシミュレーション(小槻PJ)



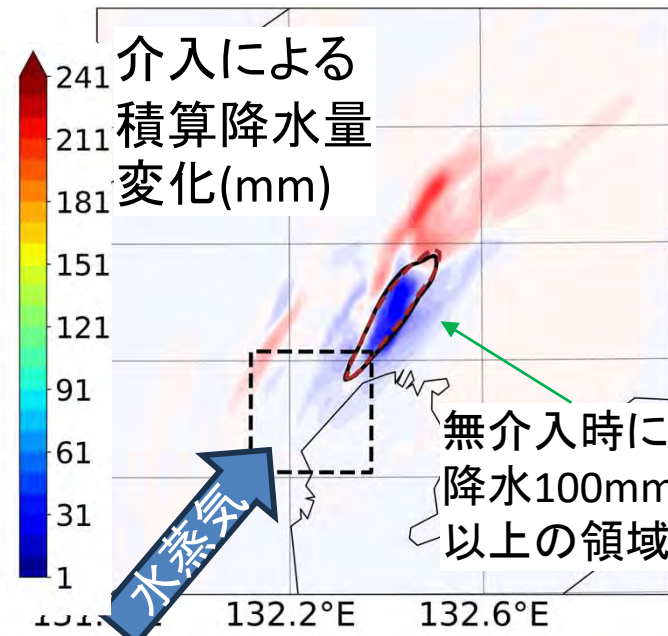
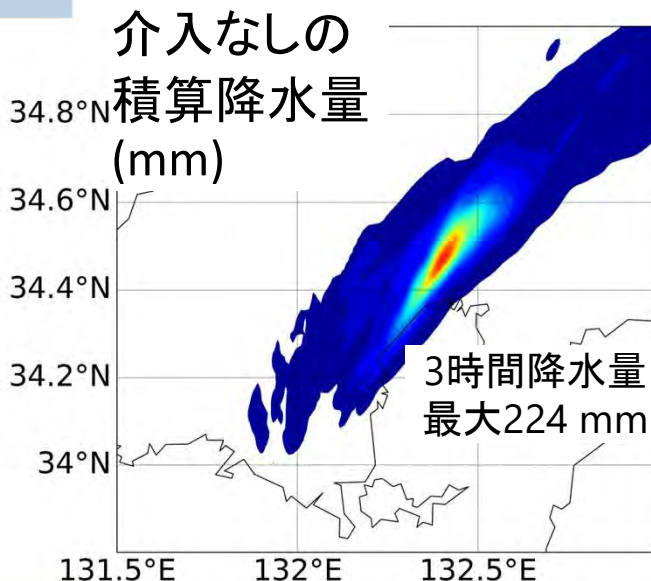
24km四方へ3時間で3トンの  
ドライアイス散布に対応する介入  
(氷晶核の増加)を実施



多量かつ小さな過冷却水滴を氷の  
雲粒に変化(オーバーシーディング)



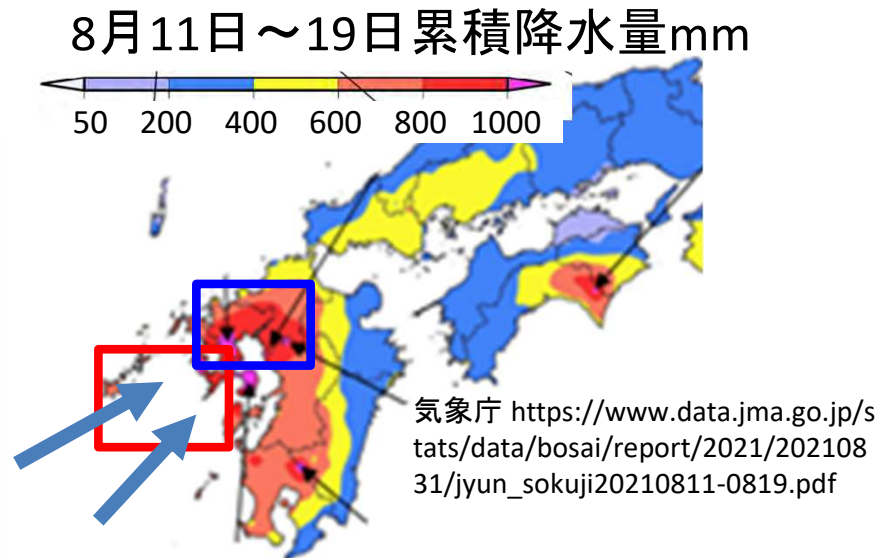
雲の成長が遅れ降水が分散  
ピーク域の降水が10%以上減少



より狭い領域への介入や、他  
事例(山口PJ:2017年九州北  
部豪雨など)のシミュレーショ  
ンでも降水分散の効果が示  
され、**集中豪雨の被害抑制  
へのオーバーシーディングの  
有効性を確認**

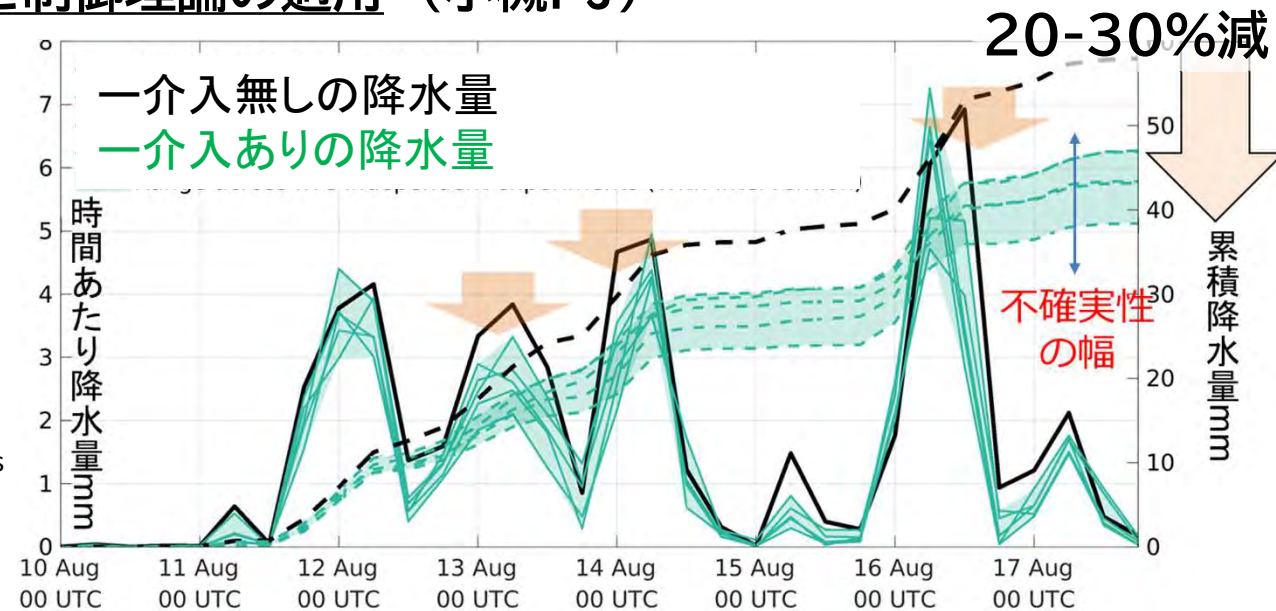
## 2.2 革新的な取組・成果（2） 豪雨

### 2021年8月大雨のシミュレーションと制御理論の適用（小槻PJ）



□ 降水量削減の対象域

□ 介入の範囲（下層風の変化）

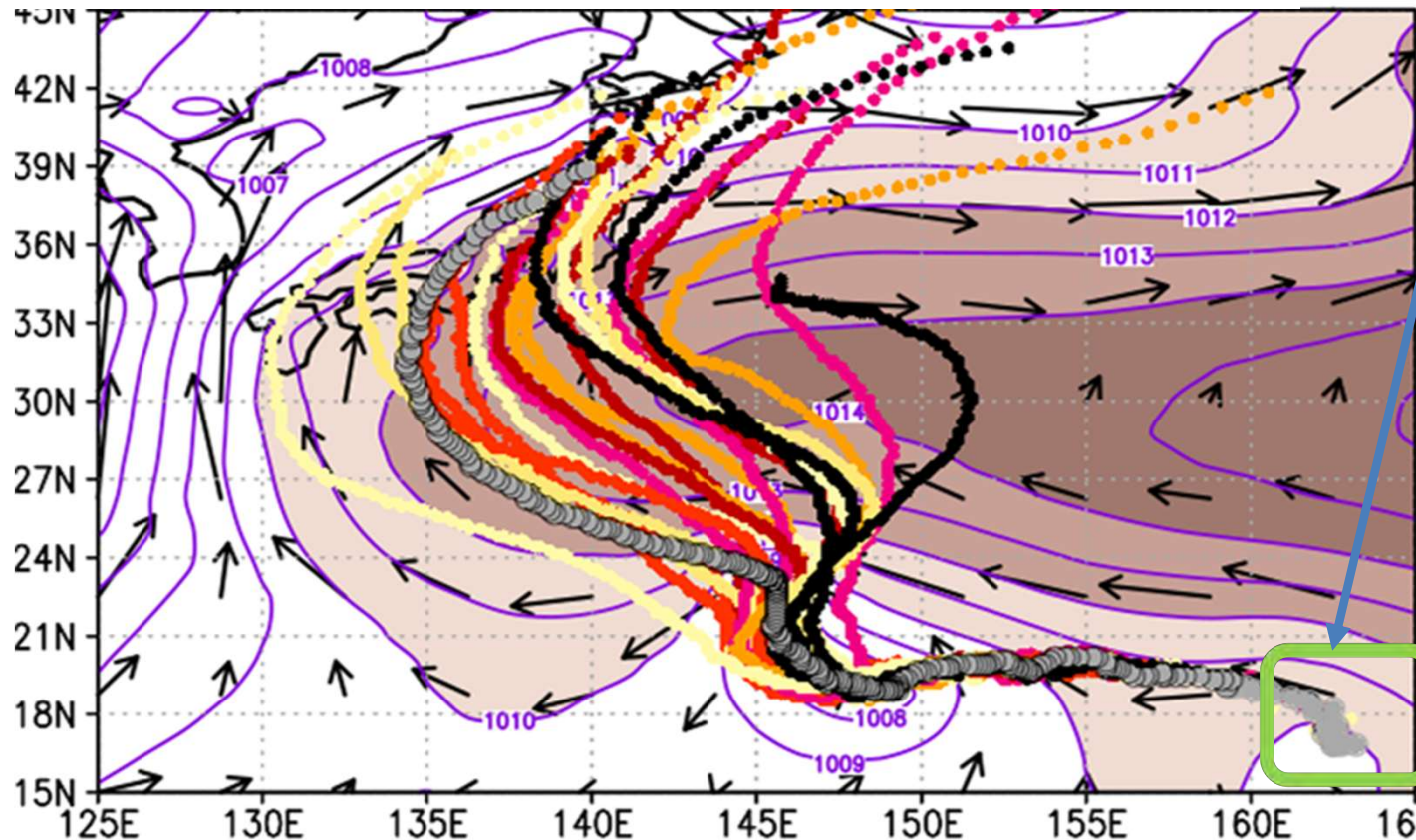


疑似観測を変えた4つの独立した実験

- EnMPCで介入（海上の風を弱める）の「ツボ」（最適な場所）を見つける  
↳ 制御理論であるMPC（Model Predictive Control）にアンサンブル（Ensemble）近似を適用し、超高次元系にも適用可能とした新しい数理手法
- 豪雨シミュレーションに対して、制御理論を適用した世界初の成果
- 予測誤差を考慮しても豪雨をロバストに抑制できる可能性を示した
- より現実的な介入手法であるシーディングの実装を準備中

## 2.2 革新的な取組・成果（3） 台風

### 2018年台風21号のシミュレーション(筆保PJ)



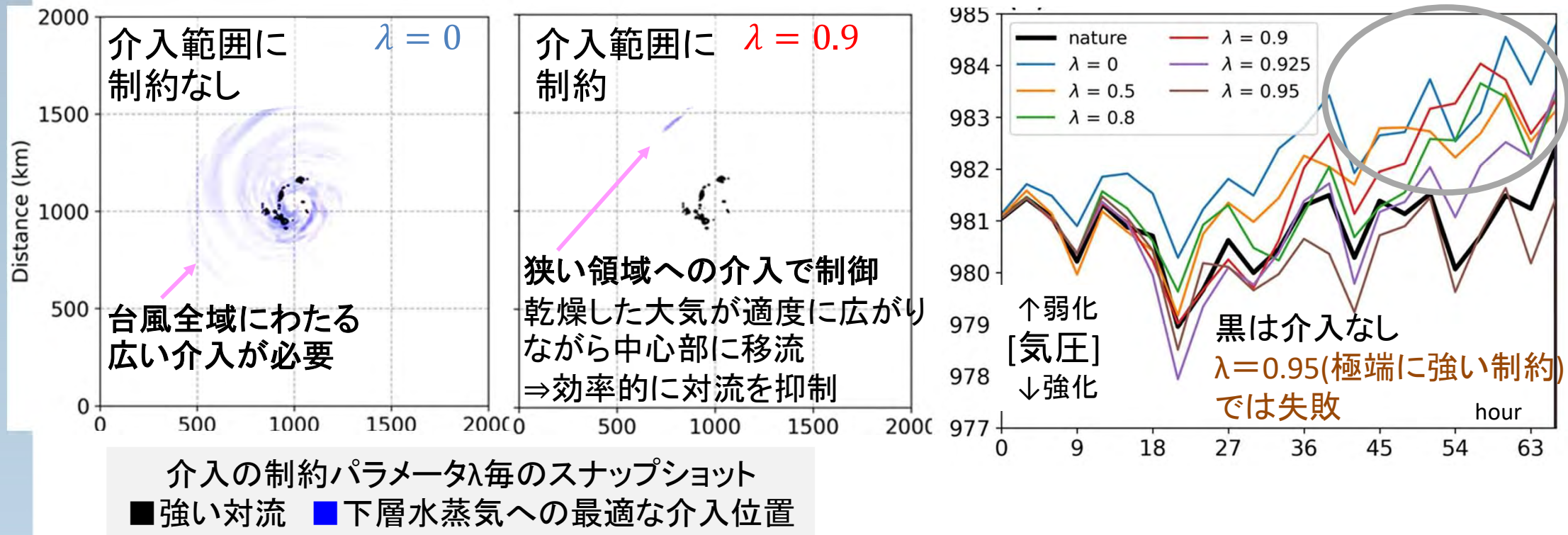
台風発生の前2日前に  
凝結核シーディングに対応  
する介入を実施  
(雲粒数を増加)

シーディングの位置と量を  
少しずつ変えて感度を調査  
・淡色ほど散布量が少なく  
・濃色ほど散布量が多い  
・灰色は介入なし  
散布量は硫酸塩換算で  
200トン～10万トン

- 3年目までに、発達期の台風を対象としたシーディングによる強度変化を示した
- 5年目までに、**台風発生前のシーディングで、強度と進路の両方に大きな変化を引き起こせる可能性**を全球モデルを用いたシミュレーションで世界で初めて示した
  - 台風発達後へのシーディングでは進路に変化がないことを確認
  - 現実的な介入に向けた散布量の縮小や方法を検討していく

## 2.2 革新的な取組・成果（４） 台風

### シミュレーション中の理想台風への制御理論の適用(澤田PJ)

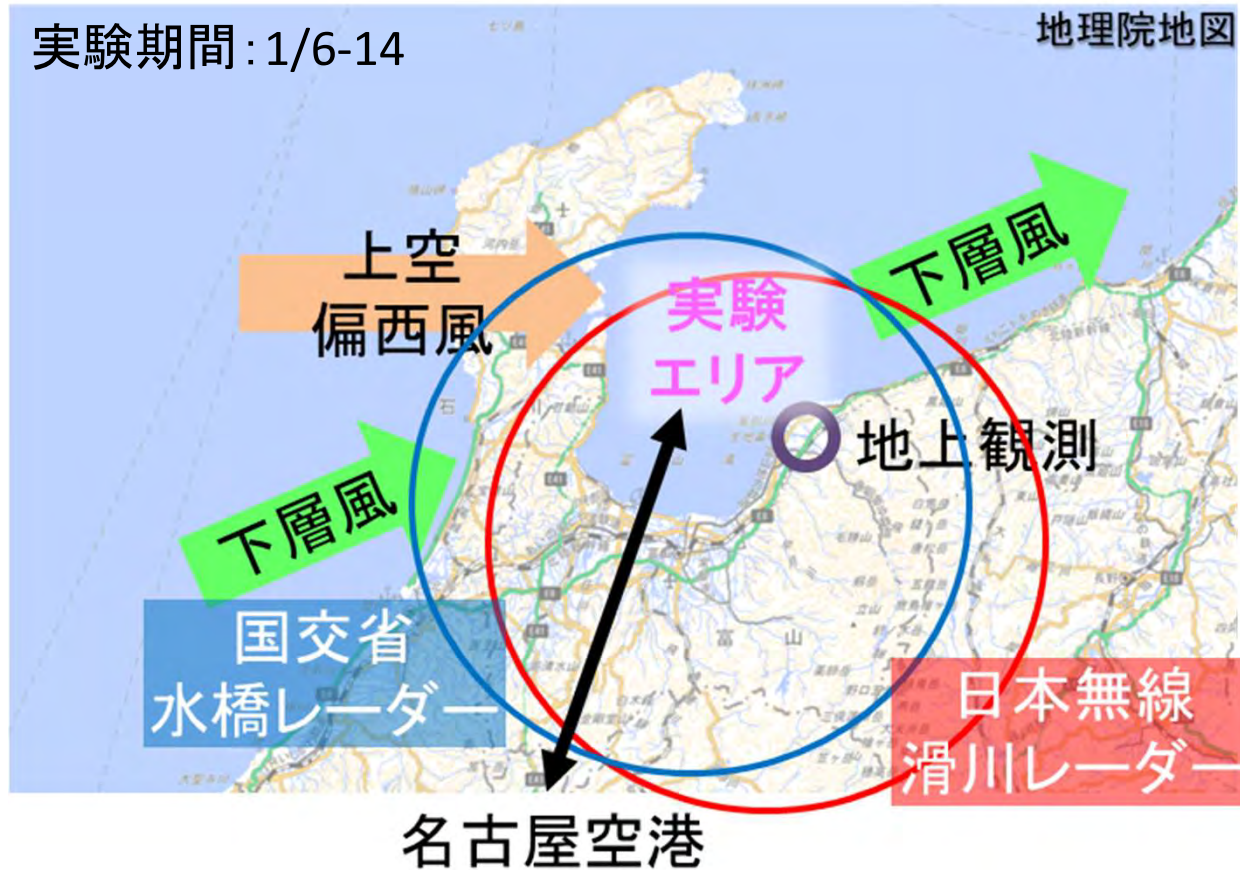


- アンサンブルカルマンコントロールで介入(海上の大気をわずかに除湿)の「ツボ」を見つける  
↳ 気象予測に用いられるデータ同化技術を応用して開発した数理手法
- 限られた領域への介入によるシミュレーション上での「**台風の制御**」に世界で初めて成功
- 気象学的に有効性を解釈できる介入位置が特定されており、**データ駆動によるメカニズム解明**への発展も期待
- 現在、シーディングの実装を加味した数値シミュレーションに取り組んでいる

## 2.2 革新的な取組・成果（5） 屋外実験

### シーディングの予備実験（小槻PJ）

実験期間：1/6-14



風が陸域に吹かず、大雪の恐れが無いときのみ散布を実施

航空機 (King Air 200T)



ドライアイスペレット押し出し機



高度約3.5kmからドライアイスペレット30kgを散布

- 国内公的機関によるシーディングは10数年ぶりであり、散布手法の再構築、航空機の運用・観測との連携に関するロジスティクスの確認とELSI対応（次スライド）を主目的に、予備実験として実施
- 期間中4回のフライトを行い、本格実験に向けた多くの知見を得た

## 2.2 革新的な取組・成果（6） 屋外実験

| 関係各所訪問                                                                                      | 基礎自治体訪問・説明会                                                                                                                                                                                 |      |      | 市民説明会                                                                                         |       | 実験審査会                                                                                              | 実験                                                                               | 報告会                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 8月初旬～                                                                                       | 9/12                                                                                                                                                                                        | 9/16 | 10/3 | 10/6                                                                                          | 10/26 | 11/12                                                                                              | 1/6～1/14                                                                         | 3/2                                                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・富山県防災課</li> <li>・富山地方気象台</li> <li>・陸上自衛隊</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・富山県危機管理局防災課防災係</li> <li>・新潟県防災企画課</li> <li>・朝日町総務政策課</li> <li>・入善町総務課</li> <li>・黒部市防災危機管理班</li> <li>・魚津市防災危機管理室</li> <li>・糸魚川市消防本部 消防防災課</li> </ul> |      |      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・関係自治体担当者</li> <li>・関係市町の住民</li> <li>・取材関係者</li> </ul> |       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・目標8PD, サブPD/AD</li> <li>・審査基準や方式をJST ELSI分科会と調整</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・富山地方気象台に都度連絡</li> <li>・WEBで速報</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・富山県庁で市民・マスコミ向けに実施</li> </ul> |

### 予備実験に係る調整等(小槻PJ、ELSI基盤ユニット)

- **富山県庁と連携し、関係機関・自治体と順次調整**
  - 調整には富山大・富山県立大の研究者と、流域治水に取り組む地元企業が前面に立ち、丁寧に対応
  - 国のプログラムとしての位置づけを説明するため、プログラム側からも協力
  - ステークホルダーとの調整を経て実験を実施し、10年目ターゲットを達成
- MSの分野横断的支援組織であるELSI分科会の助言も受けながら**実験ルールを整備し、11月に実験審査会を実施**
  - 意義、必要性、有効性、安全性、ELSI/RRI対応の5つの観点を設定

## 2.2 革新的な取組・成果（7） ELSI/RRI

### RRI原則・ルールメイキング（ELSI基盤ユニット）

- 気象制御に係るRRI原則を公開し2025年度マイルストーンを達成
- 屋外実験の審査ルールを整備し2026年度マイルストーンを達成
- 屋外実験の自主規制ガイドラインを公開

### 市民対話（山口・小槻・澤田・筆保PJ）

- ロールプレイやアートなどを導入した市民対話を各地で実施（～2025年度末までに50回）
- 気象と社会と技術の関わりを「気象コモンズ」として体系化する取組を継続

### 気象制御の法的な検討（小槻・筆保PJ）

- 制御が予期せぬ影響をもたらした際に備えた補償問題の検討（様々な補償制度や水害保険制度等を調査）
- 社会実装時の運用主体として各種公的機関の検討
- 気象制御の国際的な位置づけの把握

#### 【RRI原則の構成】

1. 社会的意義の追求
2. 倫理及び正義への配慮
3. 科学的根拠に基づく研究開発
4. 環境及び社会への影響評価
5. 多様な主体との対話
6. 透明性
7. 順応性（柔軟な見直し）

日本語版：

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal8/rri.html>

英語版：

<https://www.jst.go.jp/moonshot/en/program/goal8/rri.html>

## 2.3 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

- 3年目中間評価後に合宿等をPDが主催し、屋外での観測や介入実験の早期着手、運用可能性・経済合理性に基づいた数値実験、台風の様々な発達段階への介入検討など、プログラムを強力に推進するための指示を全研究者に向けて発出した。
- 特に屋外実験に対してはプログラムとして強力に支援を行うことで、短い準備期間での実施を可能とした。
- 気象制御や屋外実験について広く理解を得るため、これまで以上に積極的なアウトリーチ活動をPJに指示した。
- PJで共通性の高いテーマ(ELSI/RRI、制御理論、予測高度化)については、連携自体をミッションの一部とする基盤ユニットを構築した。

## 2.3 プログラムマネジメントの状況（2）

### 国際連携

- 前半5年間は気象制御の実現可能性を示す段階であり、海外向けにはアカデミアを中心としてプレゼンスを高める活動を推進
  - プログラム主催の国際シンポ:3件、学会セッション立ち上げ:14件
- プログラム運営に国際的な知見を取り入れるため、**独自の国際アドバイザリーボードを設置**
- MS8の開始以降に立ち上がった、**海外の類似プロジェクトとの連携を推進**

| 名称 | Aeolus Labs | Cyclogenesis Project | Weather Jiu-Jitsu | Exploring Climate Cooling |
|----|-------------|----------------------|-------------------|---------------------------|
| 国  | アメリカ        | オーストラリア国立大           | 米 アリゾナ州立大         | イギリス ARIA                 |
| 組織 | 民間スタートアップ   |                      | 米 コロンビア大          |                           |
| 時期 | 2024-       | 2023-                | 2025-             | 2025-                     |
| 目的 | 台風の抑制、渇水対策  | 台風の抑制                | 極端気象制御            | 気候の冷却                     |

### 産業界との連携・橋渡し

- 気象制御の実装に向けて、**既存の機材や組織を防災を含めた多目的に利用**することを目指し、民間事業者との連携(4社)や、社会実装を想定した法制度面の検討
- 気象制御の前提となる被害推定の精緻化に向けて、損害保険会社と連携(2社)
- 省庁や公的な研究機関との連携を促進
  - 予測精度向上に係る気象研からの参画(参加者15名)
  - 屋外実験を見据えた観測に係る防災科研(PI 1名)および極地研(PI 1名)からの参画

## 2.3 プログラムマネジメントの状況（3）

### 広報・アウトリーチ活動

- 屋外実験について、市民・マスコミ向けの事前説明会や事後の報告会を行うなど、説明責任を重視し信頼関係の獲得に努めた
- 2025年大阪・関西万博に山口・筆保PJが出展した

### ELSI、数理科学、プログラム間連携等、横断的な取組

- ELSIと数理科学を必須の研究開発の対象と位置づけ、全てのPJが両方に取り組んだ
- RRI原則や実験ガイドラインに係るELSIや、気象モデルの高度化、制御理論等、PJ間で共通性の高いテーマについては「基盤ユニット」という横串で連携する仕組みを構築した
- プロジェクト横断の数理ワークショップを2025年度内に2度開催し、数理研究者や気象研究者の連携を進めた
- RRI原則の策定や、実験ルールの策定など、節目にはELSI分科会(※)からの助言を受けながらELSI対応を推進した
- 数理科学にかかる研究開発方針の策定(3年目)や、数理研究の体制検討(4年目)など、節目において数理科学分科会(※)からの助言を受けながら研究開発を推進した

### データマネジメント

- 技術標準の確立に向け、オープンサイエンスの考え方を基盤とし、成果の学会発表や論文公開に加え、メタデータや、データ本体およびソースコード等の公開を積極的に進めた

※ムーンショット事業全体の横断的支援組織

# 目次

---

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. 外部評価結果
4. 今後の方向性
5. 参考

# 3.1 外部評価委員一覧

\* 運用評価指針に従い、以下の構成メンバーにより、プログラムおよびプロジェクト評価を実施

## ●プログラム評価（総合評価）

|        |                              |
|--------|------------------------------|
| 藤野 陽三  | 学校法人城西大学 理事（非常勤）※欠席          |
| 石塚 博昭  | 三菱ケミカル株式会社 シニアエグゼクティブコンサルタント |
| 江村 克己  | 福島国際研究教育機構（F-REI） 理事         |
| 大野 英男  | 情報通信研究機構 理事長                 |
| 西尾 章治郎 | 国際高等研究所 所長                   |
| 濱口 道成  | 科学技術振興機構 参与                  |
| 深見 希代子 | 東京薬科大学 生命医科学科 名誉教授／客員教授      |

## ●プログラム評価(主に技術専門的観点)

|            |                                     |
|------------|-------------------------------------|
| 新野 宏       | 東京大学 大気海洋研究所 名誉教授・特任研究員             |
| 飯塚 聡       | 防災科学技術研究所 極端気象災害研究領域 水・土砂防災研究部門 部門長 |
| 中村 尚       | 東京大学 先端科学技術研究センター シニアリサーチフェロー       |
| 藤森 俊郎      | 株式会社IHI 資源・エネルギー・環境事業領域 技監          |
| Rajib Shaw | 慶應義塾大学 政策・メディア研究科 教授                |

## ●プロジェクト評価

|       |                              |
|-------|------------------------------|
| 三好 建正 | 理化学研究所 計算科学研究センター チームプリンシパル  |
| 中澤 哲夫 | 気象庁 気象研究所 台風研究部 元 部長         |
| 坂上 貴之 | 京都大学 大学院理学研究科 教授             |
| 井村 順一 | 東京科学大学 理事/工学院 教授             |
| 牛尾 知雄 | 大阪大学 大学院工学研究科 教授             |
| 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 |
| 斉藤 和雄 | 気象業務支援センター 国際事業部 専任主任技師      |
| 佐藤 芳昭 | 気象庁 総務部 参事官                  |
| 標葉 隆馬 | 慶應義塾大学 大学院メディアデザイン研究科 准教授    |
| 水藤 寛  | 東北大学 材料科学高等研究所 教授            |
| 山田 道夫 | 京都大学 数理解析研究所 特任教授            |
| 余田 成男 | 京都大学 名誉教授                    |

## 3.2 外部評価結果（1/4）

**総合評価：研究開発プログラムが概ね期待通りに推進されている。**

### 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）

- 本プログラムは、大気のカオス性を活用した数理解析手法を駆使して豪雨や台風の制御を目指す、世界最先端の革新的な挑戦であり、シミュレーションによって効果的な抑制・介入事例を提示するなど学術的にも新規性の高い成果を得ていると評価できる。
- PDの強いリーダーシップにより、当初10年目までに予定されていた屋外での検証実験の一環として、富山湾におけるシーディングの予備実験を前倒しで実施した。実験手順の確立や機材の開発に知見を得た他、地元自治体等との対話を進めるなど、ELSI面でも重要な進歩が見られた。
- AI、ドローン、量子技術といった先端技術を積極的に取り入れ、それらをPDが開発した「ゲリラ豪雨リアルタイム予測システム」を発展させた気象デジタルツインシステムで活用していく将来構想も大いに期待できる。
- 今後は、介入による変化の物理プロセスの解明や予測精度の向上、制御可能性のより実践的な評価を行うとともに、富山湾に加えて島しょ部等の温暖な地域での検証実験を加速し、データの蓄積と観測や介入を含めたシステムの高度化を進めることが重要である。
- 社会受容性のさらなる向上に向け、成果発信の在り方を戦略的に検討するとともに、台風制御については国際的なコミュニケーションの強化及びルールメイキングへの貢献も重要となる。
- プログラム終了後の研究開発や社会実装を見据え、研究成果と社会的意義に対する理解促進や関係府省との議論を通じて、将来的に中核的役割を担う体制や組織の在り方が明らかになっていくことを期待する。

## 3.2 外部評価結果（2/4）

### 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り組み（評価項目⑦）

- 大気のカオス性を利用した数理解析手法を駆使して豪雨や台風の制御を目指す本プログラムは、世界最先端の革新的な挑戦であると評価できる。特に、台風進路に対するシーディングの影響評価は、他に例を見ない新規性の高いものである。
- 屋外実験は計画より5年以上前倒しで開始され、機材整備や関係機関連携を経て短期間で航空機実験を実現した点は、社会実装志向の取り組みとして高く評価できる。
- 屋外実験においては、対流雲へのエアロゾル散布の介入効果の観測的検証法の確立が急がれる。また、富山湾とそれ以外の地域の差異にもよく留意する必要がある。

1-2.プログラム目標に向けた今後の見通し（評価項目③）

- 数値シミュレーション上で、運用可能性を考慮したシーディングによる豪雨の抑制事例や、特に発生初期の台風への効果的な介入事例を示した。ELSIにおいても倫理原則の公開等を着実に進めていることから、2026年のマイルストーン達成が期待できる。
- 数理に基づいて開発された制御理論について、風や水蒸気への直接的な介入だけではなく、シーディングについても最適化の対象とするように、実装の加速が求められる。

1-3.その他

- 後半期間に向けて提案された、プロジェクトポートフォリオの改組は、10年目のターゲット達成の加速を強く意識した体制作りの一環として評価できる。
- 台風制御について、介入により進路が変わる可能性も示されており、介入の判断に当たって、安全性の確認や、進路変化の物理的メカニズムの理解、それらに基づく国内外の社会への説明などが後半期間では重要と考えられる。

## 3.2 外部評価結果（3/4）

### 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） | <ul style="list-style-type: none"><li>気象制御の実装に向けて、既存の機材や組織を防災を含めた多目的に利用することを目指している。民間事業者との連携や、公的機関による航空機運用を想定した法制度面の検討を行っている。</li><li>気象制御の前提となる被害推定の精緻化に向けて、損害保険会社との連携を進めている。</li></ul>                                                                                |
|                                                        | b.その他                                       | <ul style="list-style-type: none"><li>プログラム終了後の社会実装を見据えて、省庁や公的な研究機関との連携を重視している。</li></ul>                                                                                                                                                                               |
| 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）                          |                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>台風制御のルールメイキングを念頭に、アジア・太平洋地域での連携を重視し、ESCAP（国連アジア太平洋経済社会委員会）/WMO（世界気象機関） 台風委員会などへの参加を検討している。</li></ul>                                                                                                                              |
| 2-3.国民との科学・技術対話に関する取組み（評価項目⑨）                          |                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>屋外実験について、市民・マスコミ向けの事前説明会や事後の報告会を行うなど、説明責任を重視し信頼関係の獲得に努めている。</li><li>一般社会の認知と受容性を高めるために成果の発信をどのように進めるのか、入念に検討して進める必要がある。</li></ul>                                                                                                 |
| 2-4.その他                                                |                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>ELSIと数理科学を必須の研究開発の対象と位置づけ、全てのプロジェクトが両方に取組むとともに、プロジェクト連携の仕組みも構築している。</li><li>データマネジメントについては、技術標準の確立に向けたオープンサイエンスの考え方を基盤とし、成果の論文公開を積極的に進めている。</li><li>今後、機械学習・AIの役割が大きくなると想定し、観測やシミュレーションの実データが、プロジェクトをまたいで活用されるよう準備している。</li></ul> |

●メタデータ件数：327件（うち研究データの公開40件、共有117件、非共有・非公開170件）

## 3.2 外部評価結果（4/4）

### 3. 研究推進法人のPD/PM等の活動に対する支援（評価項目⑩）

今回評価した各目標においては、以下のPD・PMサポートに必要な事柄について工夫をしながら適切に実施したと評価する。

- ① 確実な研究契約の締結・予算管理
- ② MS目標に沿った研究開発計画の作り込み(目標8,9：25プロジェクト)
- ③ PD・ADとPMの議論の場の設定、円滑なコミュニケーションの促進
- ④ プログラムの状況に沿った数理科学分科会やELSI分科会の運用
- ⑤ 大阪・関西万博への参画を含む積極的な広報活動 等

その上で、更なる支援強化として期待することや考慮すべき事項は以下の通り。

- ✓ PDによるプログラム運営を支援するため、サブPDやAD等の知見を体系的に取り込むことができるような、マネジメント体制のさらなる強化が重要である。
- ✓ アウトリーチ活動は一定の実績を上げているが、プログラムが社会に広く理解・受容されるよう、取り組みや成果等の社会的価値を分かりやすく示す発信の強化が引き続き求められる。
- ✓ 国際連携や国際的ルールメイキングに向けて、国内外のステークホルダーとの調整を引き続き進めることが望まれる。

# 3.3 プロジェクト評価結果

| プロジェクト       | 評価結果 | 評価結果の概要                                                                                                                                                                                    |
|--------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 小槻PJ<br>(豪雨) | S    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計算機上で、豪雨を抑制する実現可能な手法を特定した</li> <li>・ 計算機上で、豪雨に対する制御理論の適用に成功した</li> <li>・ 気象制御の実装に向けた法的検討を進めた</li> <li>・ 屋外実験に着手し、豪雨制御の研究開発の前倒しに大きく貢献した</li> </ul> |
| 山口PJ<br>(豪雨) | A    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計算機上で、豪雨を抑制する実現可能な手法を特定した</li> <li>・ 計算機上での豪雨制御実験に係るモデルの精緻化を進めた</li> <li>・ 頻繁な市民対話を実施するとともに、得られた知見の体系化を進めた</li> </ul>                             |
| 筆保PJ<br>(台風) | B    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計算機上で、工学的な実現可能性を考慮した介入による、台風の有意義な変事例を得た</li> <li>・ 気象制御に係る国際連携や国際法の検討を進めた</li> <li>・ 制御理論の活用など、介入規模の削減に向けた取組に改善の余地がある</li> </ul>                  |
| 澤田PJ<br>(台風) | B    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計算機上で、台風に対する制御理論の適用に成功した</li> <li>・ 気象制御による地域間の経済被害変化について定量化を行った</li> <li>・ 介入の工学的な実現可能性の獲得に向けた取組に改善の余地がある</li> </ul>                             |

台風系PJについては、それぞれの強みを活かした役割分担を行うことにより、成果の総和としてプログラムの5年目マイルストーンを達成することが可能であると考えている

# 目次

---

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. 外部評価結果
4. 今後の方向性
5. 参考

# 4.1 今後の方向性（1）

## 10年目のターゲット（再掲）

現実的な操作を前提とした台風・豪雨（線状降水帯によるものを含む）の制御によって被害を軽減することが可能なことを**計算機上で実証**するとともに、広く社会との対話・協調を図りつつ、操作に関わる**屋外実験を開始**する。

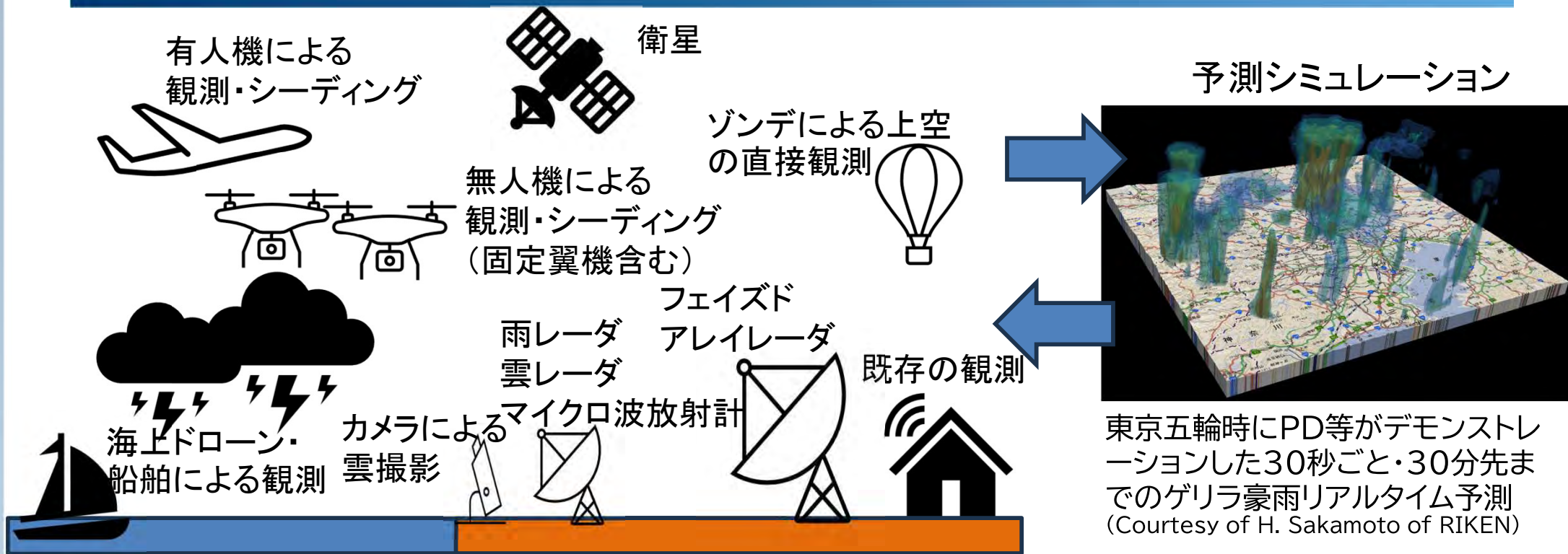
今後は、研究開発と社会実装を前倒しして実施する

- 気象デジタルツインの開発
- 屋外実証実験の加速
- 気象制御（特に台風制御）に係る国際ルールメイキングへの貢献
- これらに対応した研究開発体制の改組

## 4.1 今後の方向性（２）計画の前倒し

|                                 | 主要なマイルストーン                                                                                             |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2050                            | 台風制御を社会実装 ←2050年目標を維持                                                                                  |
| 2040's 後半                       | 台風制御の技術を確立                                                                                             |
| 2040's 前半                       | 豪雨制御を社会実装 ←2050年目標から前倒し                                                                                |
| 2040 頃                          | 豪雨制御の技術を確立                                                                                             |
| 2030's 中頃                       | 台風への介入実験に着手                                                                                            |
| 2030's 前半                       | 豪雨への介入実験に着手                                                                                            |
| 2031（10年目）<br>当初は屋外実験の<br>開始が目標 | 豪雨制御に向けて、気象デジタルツインを現実の降水抑制で実証<br>台風への介入手段の開発に着手<br>台風の屋外実験に係る国際的なルールメイキングに貢献<br>気象制御の社会実装に向けた国内向けの政策提言 |
| 2029（8年目）                       | 気象デジタルツインの運用開始<br>台風制御の実現可能性を計算機上で実証                                                                   |

# 4.1 今後の方向性（3）気象デジタルツイン



- 介入前(初期場)・介入後(効果測定)の観測網の構築、高精度予測、効果的な気象介入手段を獲得し、世界初となる**気象デジタルツインシステム**を構築
  - PD等の開発したゲリラ豪雨リアルタイム予測システムを発展させて開発
  - シーディング以外の介入手法の継続的に探索
- **AI、ドローン、量子**といった先端技術も積極的に取り入れる
  - AI: 気象予測の精緻化・高速化、観測に基づく介入対象の決定
  - ドローン: 気象・海洋の観測、固定翼機を用いた雲中での介入
  - 量子: 誤り訂正型量子コンピュータが将来もたらす、超高速データ同化

# 4.1 今後の方向性（４）屋外実験の加速

- 屋外実験の多数試行
  - 2031年には数十～百回の実施を目指す  
(2025年度4回、2026年度10回を予定)
  - デジタルツインプロトタイプの実証と運用ノウハウ獲得
- 屋外実験の複数地域での実施
  - 冬期富山湾はシーディングの国内最適地  
⇒技術の検証や高度化の場として位置づけ
  - 夏期の積乱雲を対象とした実験サイトを、島しょ部で早期に構築する
  - その他の地域にも順次展開し、季節や地域に応じた特性の類別と整理を行う
- 実験基盤の整備
  - 大型レーダーや航空機の確保
  - 関係機関との連携強化

# 4.1 今後の方向性（５）社会実装・ルールメイキング

- 国内向けの政策提言

- アクションプランとして、課題と対応時期を整理(既に着手)
- 2031年までに、気象制御に関する補償制度や実施体制等の政策原案を提案

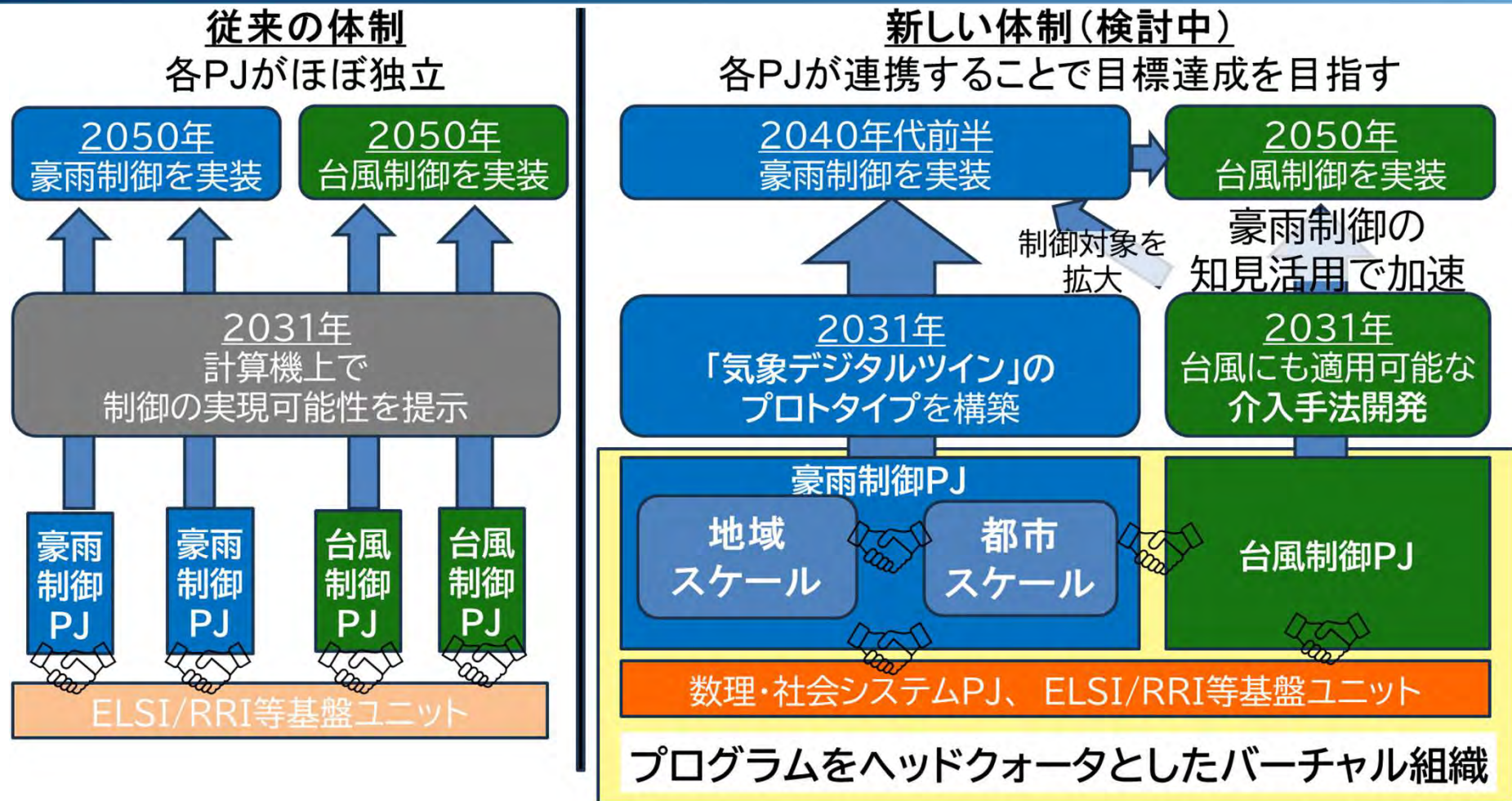
- 国際的なプレゼンスの強化

- 学会セッション立ち上げや論文投稿といったアカデミア向け活動は継続・強化
- 多くのアジア太平洋諸国が参画する枠組みでのプレゼンスを特に重視
- 各国の気象・水文・防災機関等が参加するESCAP/WMO 台風委員会の本年12月の統合部会において、目標8の取組を発表するために、同委員会関係者と調整中。

- 国際的なルールメイキングへの貢献

- 筆保PJが構築した著名な台風研究者からなるネットワークを活用し、ルールメイキングの議論を行う
- 台風制御に関心のある国との国際連携を強化し、同国における屋外実験のデータ解析や、ルールメイキングに向けた協働を行う

# 4.1 今後の方向性（6） 研究開発体制



- 研究開発の進捗に伴い課題認識が精緻化されるとともにPJ間の取組に収斂、さらに各PJの強み・弱みがはっきりしてきた
  - 豪雨制御は2PJを並立（加速・相乗効果）、台風制御は1PJに集約、1PJを数理に特化
  - 各PJの先進性に配慮しつつ、プログラム全体での連携を重視し、研究開発を効率化
- MS期間終了後の体制も見据え、PJが一体となったバーチャルな組織を構築

# 目次

---

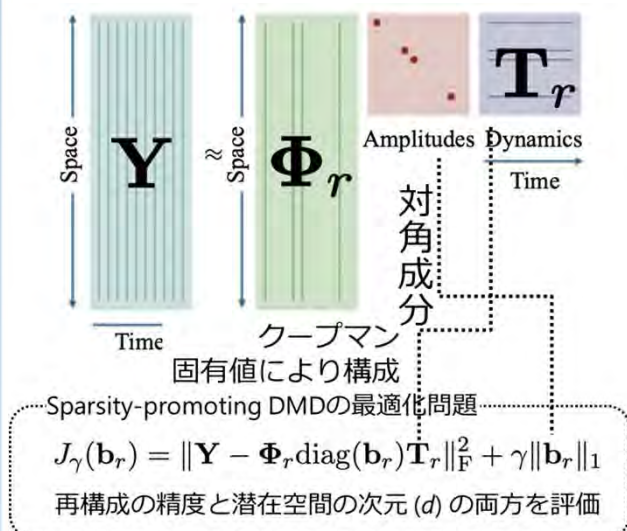
1. 研究開発プログラムの概要
2. 研究開発プログラムの状況
3. 外部評価結果
4. 今後の方向性
5. 参考

# 各プロジェクトの進捗・成果（小槻 PJ）

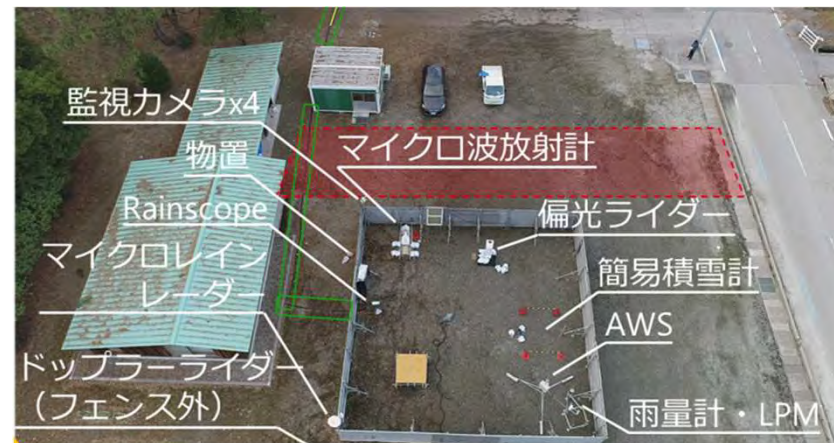
## 主要な取組の例

- 豪雨抑制に対するオーバーシーディングの有効性をシミュレーション上で提示
- 豪雨に適用可能な制御理論(EnMPC)の開発
- 人的被害・民間固定資産・営業停止(利益損失)等間接被害をワンストップで算出するモデルの開発
- 豪雨がもたらす斜面崩壊ハイブリッドモデルの開発
- 気象の時間変化を、少数の重要な成分からなる低次元モデルで表現する手法を開発
- 気象予測の高速化に資するAI天気予報の高度化
- 気象制御の社会実装時の補償問題や公的機関による運用等の検討
- 屋外予備実験の実施
- シーディング手法の高度化
- 気象デジタルツインのシステム開発着手

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



| 検討テーマ  | 主な知見                     | 制度設計上の示唆   |
|--------|--------------------------|------------|
| ダム操作規則 | 洪水の定義・運用基準を整理            | 実施基準策定の基礎  |
| 実施主体   | 既存防災機関の権限・役割を比較          | 主体選定と権限設計  |
| 洪水保険制度 | 米国Risk Rating 2.0への移行を確認 | リスク反映型補償制度 |
| 住民意識   | 安全性に関する期待水準を整理           | 社会的受容性の確保  |
| 補償制度   | 既存制度による救済の限界を確認          | 独自の補償制度の検討 |



計算高速化のための気象情報低次元化  
気象の変化を、観測量と呼ばれる特徴量の時間発展として捉え、気象制御に必要な力学的情報を取り出す技術を開発。

気象制御をめぐる法的課題と制度設計への示唆  
気象制御の実験および実装に向け、災害対策関連法制等を、整理・検討を進めた。

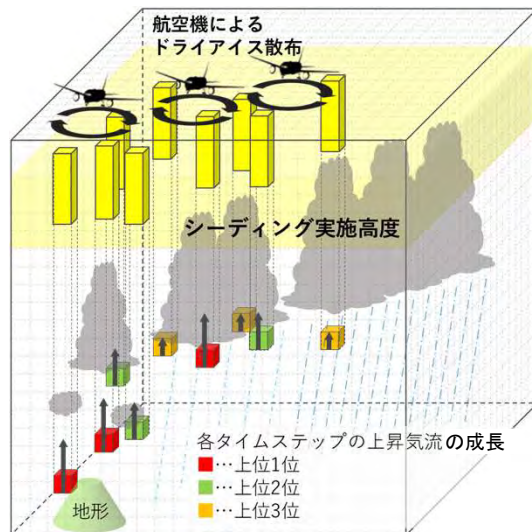
富山湾での予備実験における地上観測所  
今後の気象制御実験に向けて、屋外観測・実験を含む技術的・運用的な知見の蓄積を進めた

# 各プロジェクトの進捗・成果（山口 PJ）

## 主要な取組の例

- 豪雨抑制に対するオーバーシーディングの有効性をシミュレーション上で提示
- シーディングシミュレーションの精緻化  
（航空機経路、散布物質のラグランジュ的挙動の考慮、ピンポイントシーディング）
- 気象モデルの高度化（雲微物理の精緻化、都市LESモデルの開発）
- 風車等を用いた風操作による局地豪雨の抑制可能性検討
- 豪雨制御による流出・水資源変化の推定 ● 随伴法にもとづく制御理論の構築
- 継続的な市民対話による、ELSI論点の抽出や理解の深化
- 気象と社会と技術の関わりを「気象コモンズ」として体系化

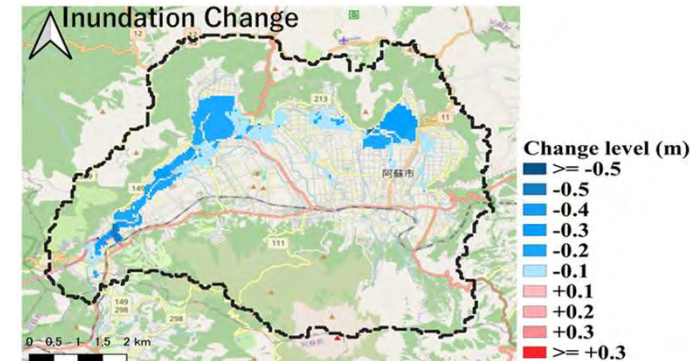
ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と  
共に生きる気象制御



ピンポイントシーディングの概念図  
気象学的な「ツボ」への介入で、少量の物質散布による効果的な抑制の可能性を得た。



超水滴法によるゲリラ豪雨の再現実験  
気象予測精度やシーディング表現のボトルネックである雲微物理過程を精緻化した。今後の実用化に向け、AI等も活用した高速化を図っている。



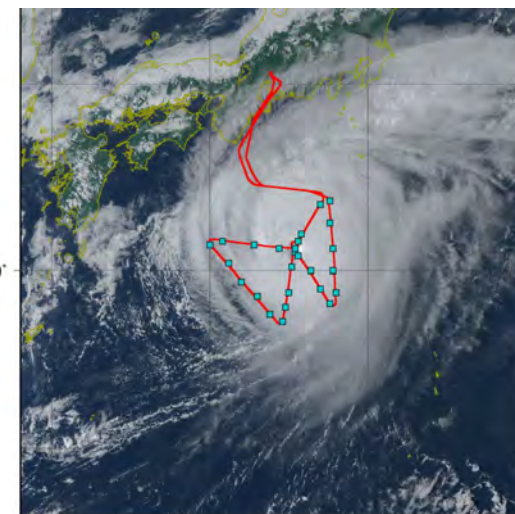
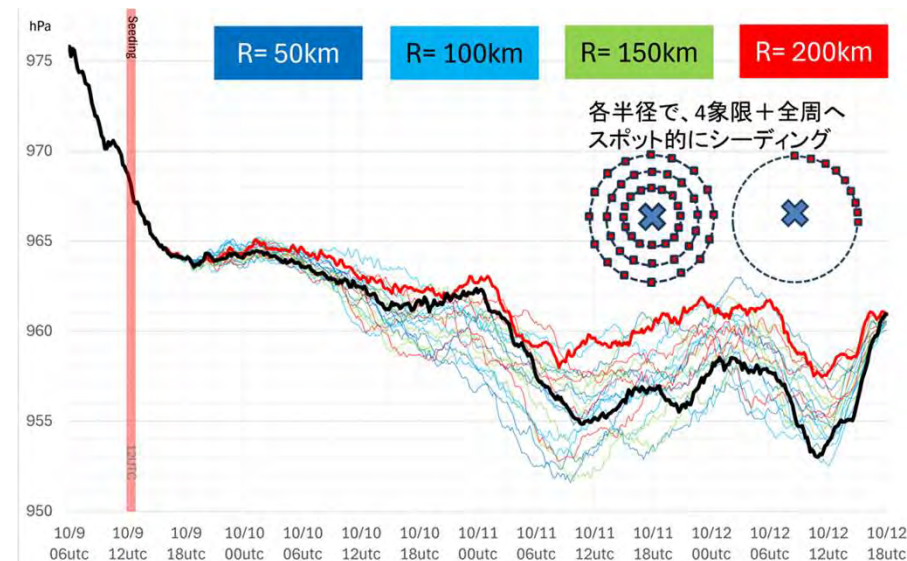
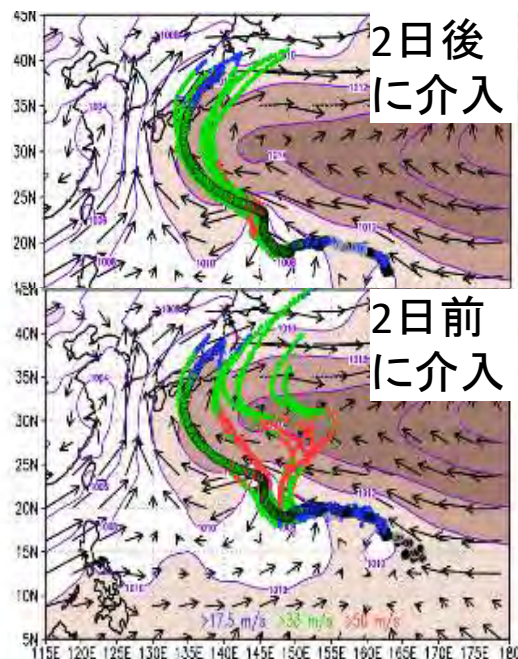
豪雨抑制時の浸水被害の変化  
水文モデルを高度化し、気象制御の前提となる被害推定を精緻化した。たとえば平成24年の九州地方での豪雨事例では、制御によって黒川流域で浸水1m以上の面積が14%減少することを示した。

# 各プロジェクトの進捗・成果（筆保 PJ）

## 主要な取組の例

- 台風の様々な発達段階への介入による、変化の可能性をシミュレーション上で提示
- 過冷却水滴を対象とした航空機による台風の直接観測
- シーディング実験の精緻化(エアロゾルモデルの導入)
- 台風による被害を総合的に推定するモデルの開発(風、浸水、高潮)
- 気象変化に関係した国際的な制度の分析
- 随伴法に基づく制御理論の検討

安全で豊かな社会を目指す  
台風制御研究



## 発達段階ごとの介入の影響

2014年台風Jebiについて、台風発達後のシーディングでは進路は変化せず、発生前～初期の介入で進路が大きく変化する可能性を全球シミュレーションで初めて示した。

Japan Science and Technology Agency

## エアロゾルモデルの導入

エアロゾルも陽に計算する高度なモデルを用い、従来よりも精緻なシーディング実験を実施した。

台風下層の一部領域に凝結核として作用する物質を散布することで、台風の強度を変化させられる可能性を示した。

## 航空機による台風の直接観測

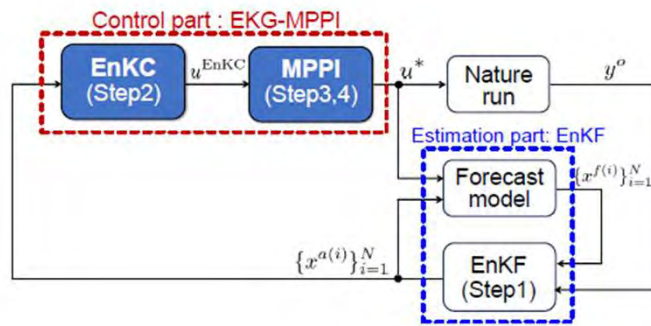
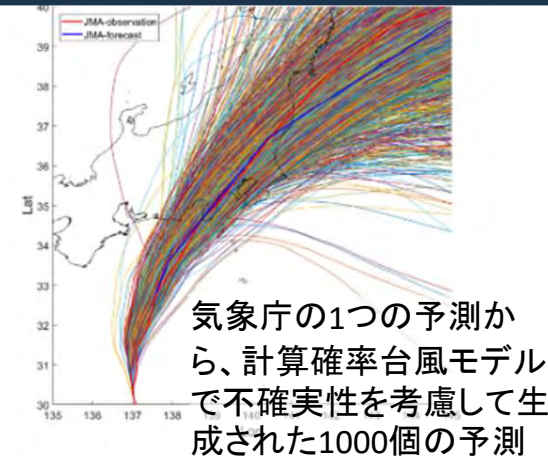
台風中の過冷却水滴は、介入の対象として効率的であるものの、その分布は明らかになっていなかった。航空機観測により分布を世界で初めて示すことに成功した。

# 各プロジェクトの進捗・成果（澤田 PJ）

## 主要な取組の例

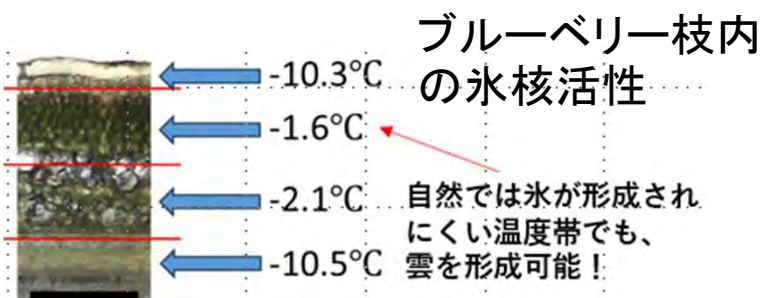
- アンサンブルカルマンコントロール(EnKC)に基づく気象制御理論の開発
- **EnKCと複雑な制御制約を扱える理論を併用する手法の開発**
- 介入-変化のメカニズム解明に向けたデータ駆動アプローチの活用
- **シーディングを効率化する生物由来物質の探索**
- 被害の地域間の差異にかかるパレート分析
- 洪水災害に関して河川区間ごとの堤防高さを自動推定する手法を開発
- 沿岸災害に関して**機械学習を用いた高速な高潮被害推定技術の開発**
- 気象制御にかかる大規模な質問紙調査

社会的意思決定を支援する  
気象-社会結合系の制御理論



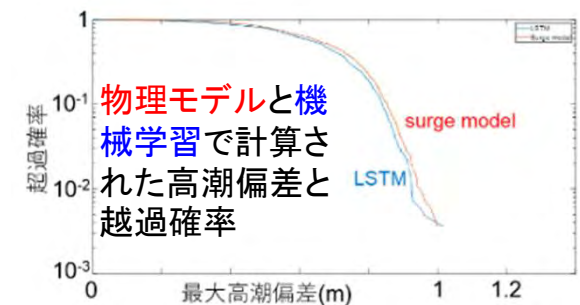
## Ensemble Kalman Guided Model Predictive Path Integral (EKG-MPPI)の概要

まずEnKCを行っておおむねどのあたりに介入すればよいかを探索し、その後より精緻なアルゴリズムであるMPPIを用いて介入の場所と強さを特定する技術を開発した。



## 生物由来のシーディング物質の探索

大気中では、氷の核となる物質がないと、-30°Cでも水が凍らず、雲が形成されないことがある。冷たい雨へのシーディングではこの核となる物質を散布する。効率的で環境負荷の小さいシーディング物質として、ブルーベリーやレンギョウ等の植物、菌類由来物質などを探索している。



## 機械学習を用いた高潮被害の被害推定

機械学習(LSTM)を用いて、物理モデルとほぼ同様のパフォーマンスの被害推定を、高速に計算可能とした。