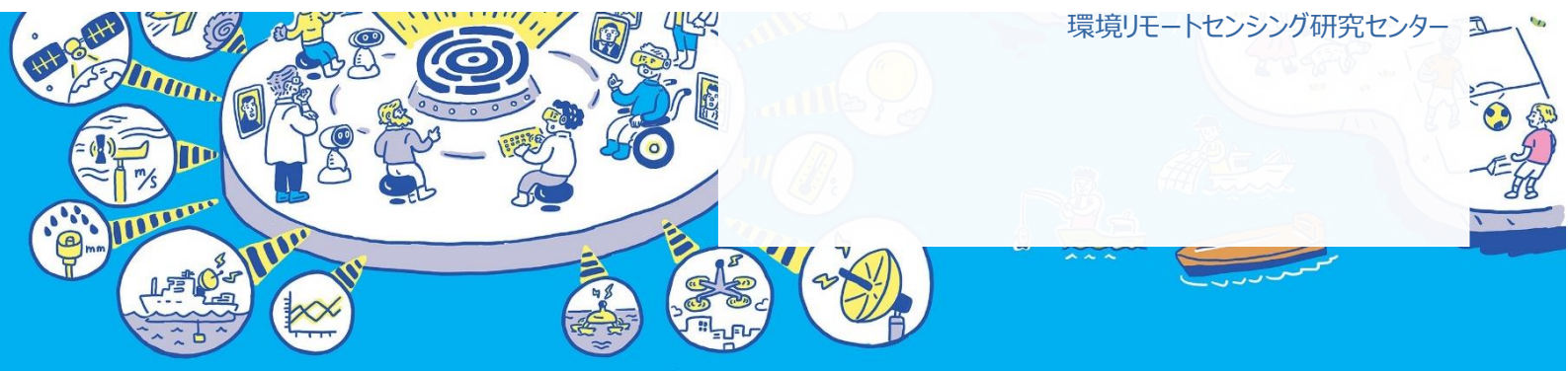




海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害
から解放される未来

小槻 峻司

千葉大学 国際高等研究基幹／
環境リモートセンシング研究センター



1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

海上からの水蒸気供給を起因とする集中豪雨に対し、水蒸気供給の上流側の海上で豪雨を形成し、大気中の水蒸気を大幅に減らすことにより、陸域の豪雨被害を緩和させる技術を開発する（図 1-1）。人間が大気の運動を直接改変できる能力には限界があるため、気象がもつカオス性を上手く利用し、介入効果を最大化して豪雨を生成するための数理に基づく気象制御手法を確立する。また、開発する制御技術の社会実装に向け、ELSI の観点から、関連する法制度・環境リスク評価・倫理的研究などを実施する。これらの研究開発を推進することによって、陸域の集中豪雨被害を緩和することを目指して、社会が受容可能な気象制御技術を 2050 年までに確立する。

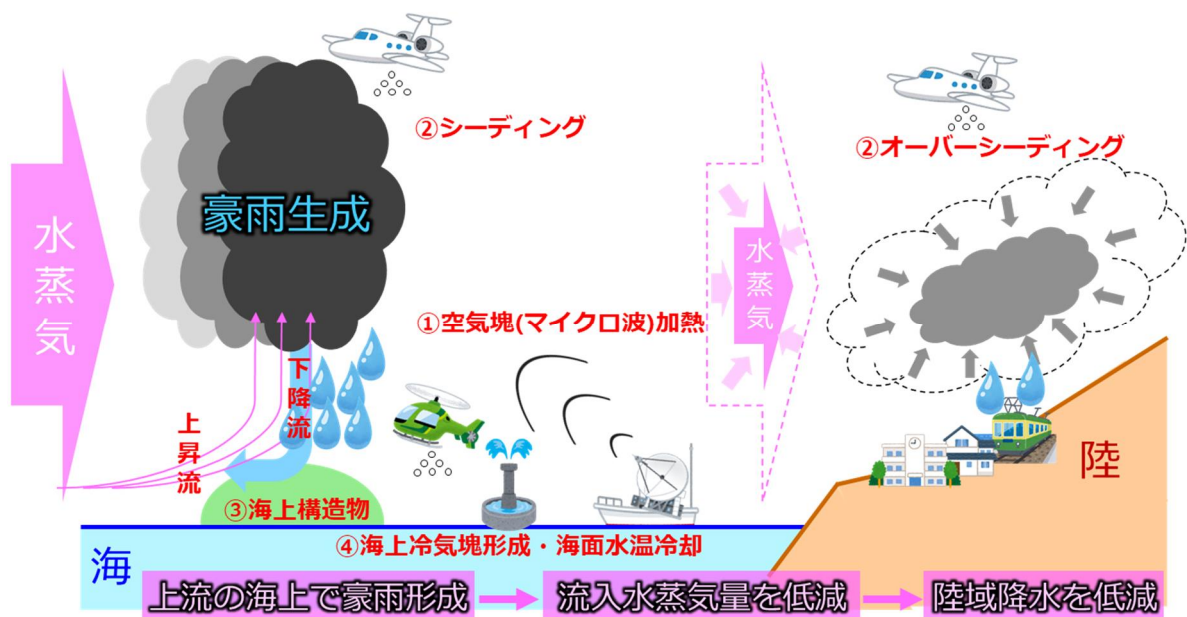


図 1-1: 本研究開発プロジェクトの豪雨緩和戦略

①空気塊（マイクロ波）加熱、②シーディング、③海上構造物、④海上冷気塊形成・海面水温冷却などの複数を組み合わせて介入手段とし、海上で積乱雲を生起・組織化して豪雨を形成する。これにより、陸域に流入する水蒸気を大幅に減らし、陸域での降水量を低減する。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

研究開発項目1: 気象制御手法の開発

数値気象予測モデルの感度解析に基づいた状態摂動設計手法を数秒程度で求解可能な凸最適化問題へ帰着させることに成功し、獲得した初期摂動による所望積算降水量分布の実現を確認した。また、網羅的な文献調査を通じて有望なデータ駆動型制御手法（TDU-MPC、EO-MPC、Sample-MPC）を特定し、気象制御問題へカスタマイズすることで降雨量の低減を確認した。更に、上記の状態摂動設計手法とデータ駆動型制御手法それぞれの開発を推進して、Warm bubble 実験における降雨量の 10%低減を系統的な評価を通じて確認した。

研究開発項目2: データ駆動型気象予測手法の開発

既存の気象予測代理モデルの調査と学習用ベンチマークデータを作成し、日本周辺領域

に特化した代理モデルのプロトタイプを開発した。また、Variable Aggregation 機構の高度化と効率的な訓練法の設計により、従来より高精度かつ短時間・省メモリでの学習を実現し、複数ステップの予測結果の統合と現業予測モデルを比較検討した。

研究開発項目3: 気象情報の潜在空間表現

気象場の潜在空間表現における時間発展の予測の手法として、オートエンコーダとレザバー計算を組み合わせたアーキテクチャを提案して実装した。これを用いて潜在空間表現に適用可能な動的モード分解(DMD)を選定し、Sparsity-based method による低次元化の有効性評価した。さらに、台風進路のアンサンブル気象予測データに適用し、台風の本質的軌道を表すランドスケープを抽出して、その分水嶺(separatrix)を特定した。

研究開発項目4: 気象制御計算システムの開発

気象予測システム SCALE-LETKF に制御のための複数のアクチュエータ機能を実装し、制御の有無を評価した。また、カオス力学系の性質を活かした MPC 手法を考案して実装し、その効果を評価した。さらに、モニタリング手法を検討する観測シミュレータを開発した。

研究開発項目5: 豪雨生成に有効な介入操作の検討

数値気象モデル SCALE や WRF を用いて、特定の豪雨事例(2021 年 8 月の九州北部豪雨と 2014 年広島豪雨)を再現すると共に、降水システムが発達する前に対流の発生・発達を早めるような介入手法を数値モデルに組み込み、それを用いた試験的な介入の数値実験を行った。また、数値実験データを用いてアンサンブル感度解析を実施し、海上降雨と陸上降雨の負相関、および大まかな介入候補地点を見出した。さらに、複数の事例のアンサンブル実験を実施し、気象介入の効果を定量的に評価した。

研究開発項目6: 気象介入手段の工学的実現

当初に計画した「POLARRIS モジュールへのマイクロ波吸収係数ライブラリ移植」については、POLARRIS ソースコードを精査した結果、マイクロ波大気加熱シミュレーションに不可欠な大気吸収項を計算するモジュールを装備していないことが判明したので、これを実施せず、マイクロ波大気加熱シミュレータの理論的基礎となる物理方程式を独自に検討し導出した。初期数値実験として、水平一様の理想大気モデルに対し加熱シミュレーションを実施し、放射機の近傍(直上の高度 500m 程度)では、積雲対流の潜熱加熱に匹敵する数 K/h 以上の加熱効果が期待できることを見出した。一方、放射機からの距離と共に加熱効果は急激に減少することを確認した。さらに、大気モデルの精緻化による技術的実現性評価を深め、放射機の仕様決定に資するシミュレーションを実施した。

研究開発項目7: 法的課題の解決

各 PI の専門毎に、以下を実施した。

- 気象業務法における予報業務許可の法的性質の解明、水災害対策法制における市町村長の法的地位に係る検討した。
- 気象制御と予防接種法・公害健康被害補償法との相違点・参照点などを検証した。
- ダム操作に関する、法令からガイドラインまでに至る具体的なルール of the 調査・検討した。
- わが国の火災保険水災補償条項、とりわけ水災料率の細分化に関する議論の現状および課題を検討した。
- わが国の治水政策の変遷を分析し、大きく6つの時代に分類できることを提示した。

研究開発項目8： 経済被害推定

人工構造物による氾濫への影響のモデル化について、逆流防止水門の日本全国データベース構築・モデル導入・氾濫への影響を検証し、流量再現性検証、破堤スキームの導入、浸水深に基づく被害関数を構築した。暴露資産データベース(Exposure DB)の構築については、人口・民間資産(住宅・企業物件)・企業資産を統合しDBを構築した。さらに、斜面崩壊確率モデルの試行に向けた日本全国の数値地図情報の収集し、流量再現性検証・破堤スキーム導入・浸水深に基づく被害関数を構築した。

研究開発項目9： 気象制御における RRI

気候工学の倫理をめぐる国内外の研究動向の調査し、文献を追加するとともに、典型的な事例(成功失敗・倫理的観点)を取り込んだ。また、国内外の研究者からのインタビュー調査をおこない、ELSI 項目の選定の前提となる文献ネットワークのマッピングをおこなった。さらに、気候工学の倫理の調査を通じた重要 ELSI 項目を特定した。

研究開発項目10： 情報科学を活かした社会調査・発信

小槻 PM や平賀 PI(研究開発項目 5)等と協働で、4 次元可視化のプロトタイプングとして、平成 26 年 8 月広島豪雨について制作した。また、WRF の混合比(Q_i , Q_c 等)に着目し、クラウドシーディングによる変化も可視化した。なお、これらの可視化では、プロジェクト共同利用 GPU 資源として契約した ABCI (AI Bridging Cloud Infrastructure; AI 橋渡しクラウド)を使用した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握では、大学との協力関係を維持するとともに、マネジメントチームに 1 名増員した。また定例会を開催したり、チャットやメール、ファイル共有を複合的に利用したりすることで、情報共有を徹底した。さらに、Slack を主な情報共有環境と位置づけ、研究開発の状況などの共有漏れを極力少なくし、PI や参加者間の健全な競争と協働を推進した。また、社会実装への取り組みでは、法的課題や RRI に係る検討を継続的に行っていて、その成果をシンポジウムやワークショップ、メディア(新聞やテレビ)等を通じて適宜社会へ還元した。

研究成果の展開方法

知財戦略に係る知財運用会議を設置したが、当該年度で対象となる案件はなかった。外部機関による技術調査については、海上の軽量な構造物(通称「凧」)の実現可能性について、それらの技術に経験と知見を有する企業(株式会社岩谷技研)と、将来の展開について検討を行った。

広報、アウトリーチ

専用 Web サイトについては、専任者を 1 名採用し、リニューアルをおこなった。また、毎日新聞にて2件の記事が掲載された他、BS テレ東においてプロジェクト紹介の取材を受けた。

データマネジメントに関する取り組み

数値計算用データセット、シミュレーションデータ、実験データ等を 5 件登録した。また、GitHub にてプログラム1件を開示した。なお、プロジェクト内でのデータセット等の共有のためのストレージサーバ(容量約 500 TB)の運用を開始した。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1: 気象制御手法の開発

研究開発課題1-1: フィードバック制御手法の開発

当該年度実施内容:

前年度に開発した領域大気モデル SCALE-RM の感度解析プログラムを拡張し、シミュレーション途中の複数時刻で大気状態を摂動させ感度行列を構築するプログラムを開発した。Warm Bubble 実験を対象として、すべての計算格子における状態を一定時間間隔で摂動させるシミュレーションを網羅的に行い、各時刻の摂動に対する積算降水量の感度行列を差分近似によって求めた。

続いて、感度行列を用いた摂動時系列(フィードフォワード制御)の最適化技術を開発した。所望の積算降水量を実現する摂動時系列の決定は制約付きノルム最小化問題という凸最適化問題に帰着でき、効率的に解くことができる。たとえば、 ρ_θ の摂動時系列を求める問題を、制約付き ℓ_2 ノルム最小化問題として解いた場合、わずか 12 秒で 46,560 個の摂動量を決定することができた。また、制約付き ℓ_1 ノルム最小化問題として解いた場合でも 22 秒で決定できた。計算の結果、 ℓ_1 ノルム最小化の解は摂動が疎であり、わずかな場所で摂動を加えればよいことがわかった。また、摂動後の積算降水量の分布は目標分布に近く、複数時刻の大気状態を摂動させるフィードフォワード制御によって降雨量を低減させられることが示せた。

課題推進者: 大塚敏之(京都大学)

研究開発課題 1-2: データ駆動手法を用いた制御手法の開発

当該年度実施内容:

3 つの予測モデル(Lorenz-63, Warm Bubble Experiment, SCALE-RM)と 3 つの制御手法(Temporal deep unfolding-based MPC, Expensive Optimization, Sample-based MPC)の 9 つの組合せについて、定量評価を進めた。以下に制御手法ごとに分けて結果を述べる。

Temporal deep unfolding-based MPC (TDU-MPC)

Lorenz-63 モデルの制御へと適用し、その有効性の定量評価を行った。この結果、モデル予測制御における主要パラメータである予測区間の長さが 20 程度の場合においても、TDU-MPC は高い制御成功率を呈することを見出した。一方で、TDU-MPC は制御入力計算に要する時間は非常に大きく、したがってスケーラビリティに乏しい懸念も判明した。Warm Bubble Experiment について、乏しいスケーラビリティの懸念に加え、TDU-MPC の動作に必要なモデルの勾配情報の取得が難しく、適用が難しいとの結論を得た。同様に SCALE-RM についても適用が難しいとの結論を得た。

Expensive Optimization

Warm Bubble Experiment への適用を行った。実装された Expensive Optimization 手法はベイズ最適化(BO)、ランダムサーチ(RS)、粒子群最適化(PSO)、遺伝的アルゴリズム(GA)の 4 つである。結果は、全体とし PSO と BO が優れた性能を示し、次元数やフィードバック有無等の問題設定が制御効果に影響した。また、BO は最悪ケースでも安定した性能を示した。一方、PSO は一部で高い削減率を示したが、初期サンプリングに依

存するランダム性の影響が大きいことが示唆された。

次に SCALE-RM 中の現実大気実験における評価を行った。結果は、BO が他手法よりも常に高い最小削減率を維持し、再現性の高い制御性能を示した。特に BO の中央値と最大値が一致しており、最適解への高い収束性が確認された。これらの結果から、BO の有効性が強く示唆された。

Sample-based MPC (SBMPC)

本手法は数値気象予測におけるアンサンブル予測との高い親和性が期待され、多大な計算量を劇的に小さくしながら有効な制御を実現することができる。一方、その性能は基盤となる気象モデルの精度に大きく依存する。例えばモデルと実際の大気ダイナミクス間に不一致があると、安全性を損なう結果を招くおそれがあり、それに対処するために新たな Control Barrier Function (CBF) モジュールを提案した。SCALE-RM を用いたシミュレーションでは、モデルに不確かさが存在する状況下で、CBF モジュールを導入した場合と導入しなかった場合の 2 つの制御シナリオを比較し、CBF モジュールを使用しない場合には降水量が安全閾値を超過したが、CBF を組み込んだ制御では降水量が安全な範囲内に収まった。

これらの結果より、Expensive Optimization におけるシミュレーション結果から陸域豪雨緩和の実現可能性を示すことができ、更に SBMPC を組み合わせることでモデル不確かさに頑健な制御手法の開発が強く示唆された。

課題推進者: 小蔵正輝(大阪大学)

(2) 研究開発項目 2: データ駆動型気象予測手法の開発

研究開発課題 2-1: 潜在変数モデルによる気象予測計算

当該年度実施内容:

日本周辺領域の気象予測に特化した予測モデルの候補となるモデル(深層学習アーキテクチャ、前処理手法、損失関数、時系列予測アプローチ等)を策定し、その組み合わせによって 5 つのプロトタイプを開発した。深層学習アーキテクチャとしては Swin-Unet または AR2U-Net を採用した。学習用データとして、領域再解析データ RCDSJRA-55 のデータ 20 年分を用い、入力変数として気圧レベル面毎の東西風、南北風、温度、比湿、ジオポテンシャル高度、地上面の東西風速、地上南北風、海面校正気圧、降水量を用いた。

最も精度のよかったモデルである Swin-Unet ベースの予測モデルは、Swin-Unet を用いて時間発展を予測する Predictor と、拡散モデルを用いることで予測結果に対して補正を行う Corrector から構成される。特に Corrector では予測結果に対してガウスノイズを付与し、拡散モデルを用いたノイズ除去を実施することで、予測によって消失した高周波成分を再現した。2019 年 10 月 25 日の豪雨事例に対して、初期値から 6 時間後の予測し、領域内の 1 時間雨量の最大値は 83.5 mm であったのに対し、Predictor 単体による予測結果では 1 時間あたり 55.6 mm であり、Corrector も併用することで 63.1 mm へと結果が改善された。また、925 hPa 面の風および混合比の予測結果からは、降水帯に見える風の収束帯が Corrector を用いることでよく再現された。

課題推進者： 松岡大祐(海洋研究開発機構)

研究開発課題 2-2: 注意機構をもつ気象予測学習器の開発

当該年度実施内容:

昨年度に開発した改良 ClimaX モデルの再検証と訓練法の調整を行なった。ClimaX は、初期化において Variable Aggregation の部分だけを切断ガウス分布でして、予測対象に多くの気象変数を含めた時に有用であった。一方、深層学習モデルの標準的な初期化である一様分布は、気象変数の数が少ない場合に有効であった。

次に、将来の気象場を自己回帰により段階的に予測するが、深層気象予測モデルにおいてほとんど用いられていないため、これを検証した。結果として、直前までの予測が正確な場合、次のステップの予測がより正確になることがわかった。しかし繰り返し予測の誤差の蓄積もあり、総合すると、自己回帰予測が即座にモデルの精度につながることはなかった。

さらに、気象予測モデルの振る舞いをより詳細に理解するため、入力の変動に対して予測がどのように変化するかを検証した。興味深いことに、性能が良いとされている Pangu モデルに関して、他のモデルや元のデータと異なる傾向があることが明らかになった。今後はこのような傾向を明示的に学習に取り込むことで、予測性能の向上や信頼性に結びける。

課題推進者： 計良宥志(千葉大学)

(3) 研究開発項目 3: 気象情報の潜在空間表現

研究開発課題 3-1: レザバー計算を用いた気象情報の潜在空間表現

当該年度実施内容:

低次元化表現の獲得手法の一つとして、軌道に対する摂動が発展する際に不安定方向に選択的に広がることを利用した手法を開発し、実装した。

摂動の時間発展が線形で近似できる範囲まで時間が経過したのちに、アンサンブルの分布に対する主成分分析を行い、その主な主成分スコアを低次元な潜在変数として用いることができると考えた。さらに、レザバー計算による回帰を組み合わせることにより、摂動の発展に強い非線形性が出てきても予測がある程度可能になる。これにより、潜在変数でアンサンブルの分布の非線形な変化を捉える枠組みができた。これを Lorenz-96 モデルにより検証した。

また、深層学習手法の一つである畳み込みオートエンコーダとレザバー計算の代表的手法である Echo State Network (ESN) を統合した構成を提案し、実装した。具体的には、空間的構造を持つ高次元な気象場の状態を時系列画像として捉え、これに対して畳み込みニューラルネットワークを用いたオートエンコーダを構築した。

さらに、この潜在表現の時間的な推移を Echo State Network (ESN) によりモデル化する手法を検討した。検証用のデータとしては、ベナール対流系をモデル化し、流体の空間的状态に対してフーリエ変換を施し、その最大モードが Lorenz-63 モデルに従うようなシミュレーションデータを用意した。この構成を用いた結果、オートエンコーダによって

得られた潜在空間において、Lorenz-63 系のアトラクタが埋め込まれていると見られるような時系列が観察された。さらに、潜在表現の時系列を取り出して ESN で学習させたところ、高い精度での予測が可能であることが確認された。特にこの予測性能は、元の動的系のリアプノフ指数の約 9 倍の時間スケールまで有効であり、非常に高い再現性を実現している。

これらの結果から、ボトムアップ型の極端事象制御手法を提案し、一連の操作を逐次的に行うことにより、1 ステップあたり 1 グリッドのみに介入を行う場合でも 94%の成功率で極端事象を回避でき、先行研究の Sun et al. (2023)の結果と比較して大幅な改善が見られた。ただし、介入コストは増加した。

課題推進者: 徳田慶太(順天堂大学)

研究開発課題 3-2: クープマンモード分解による低次元化

当該年度実施内容:

(a) 気象予測データの低次元化技術のためのクープマンモード技法の開発

特異値分解をベースとする Original method と、それに sparsity に関わる L1 最適化を導入した Sparsity-based method の 2 つに着目し、気象予測データへの適用により、低次元化技術のための KMD/DMD 技法の有効性を検討した。具体的には、SCALE による Warm-Bubble シミュレーションを対象として、Original method と Sparsity-based method の比較検討を行った。Sparsity-based method ではモード数を Sparsity-level による制御できる点があり、再現時系列データは Original method に相当する DMD や元の時系列データに近づく。なお、Sparsity-based method のモード数は、低次元化の次元に対応しており、低次元化の精度とトレードオフの関係にある。このトレードオフの関係は、気象制御に求められる低次元化の精度(=再現性)に応じて次元(=効率性)が調整可能であることを示唆しており、低次元化技術の適用方針につながる。

(b) 低次元化が実現される数学的根拠に関する調査研究

KMD による低次元化は、対象とする力学系から誘導されるクープマン作用素のスペクトルに基づいている。本研究では、SCALE のような具体的な気象モデルを対象とするのではなく、1986 年 Edward Lorenz が気象モデルで議論された遅い多様体に関わる特異摂動系を対象に数学的議論を進めた。その結果として、遅い多様体に関わる極限として導入される力学系のクープマン作用素を数学的に厳密に導入し、そのクープマン固有関数の存在を証明した。これはクープマン作用素のスペクトルにより低次元化が実現されることの数学的根拠となることが期待される。さらに、気象モデルの状態に対して、遅い多様体に対応する非線形モードがどれだけ寄与しているかを定量化する方法として、非線形力学系に対する寄与率(participation factor)を開発した。

(c) アンサンブル気象予測データの低次元化技術の開発

アンサンブル気象予測データに対する低次元化技術の開発のため、2 つのアプローチを試みた。1 つ目は、拡張された DMD(extended DMD; eDMD)で広く採用されている、全ての軌道の時間発展を近似する線型写像(クープマン行列)を推定することである。これにより、推定に用いた解軌道上におけるクープマン固有関数(値)が近似的に得られることになる。ただし、従来の eDMD アルゴリズムでは計算時間が長くなるとともに、アン

サブルに共通する時間発展などの物理的に解釈が可能なモードを検討することが難しかった。そこで、2 つ目のアプローチとして、全ての軌道のアンサンブル平均(アンサンブル軌道)の時間発展を近似するクープマン行列を推定することにした。ここでの計算時間は(a)の場合と変わらないことから、KMD/DMD 手法と組み合わせた低次元化技術を複数個開発でき、DMD あるいは Sparsity-based method とアンサンブル平均とを組み合わせることで、アンサンブル気象予測データのクープマンモード分解に基づく低次元化技術を 2 個整備した。

課題推進者: 薄 良彦(京都大学)

研究開発課題 3-3: 気象情報のランドスケープ解析

当該年度実施内容:

(a) アンサンブル気象予測データに対するランドスケープ解析

4 つの台風のアンサンブル気象予測データ(2016 年台風 10 号、2020 年台風 12 号、2021 年台風 8 号、2022 年台風 8 号)に対してランドスケープ解析を実施した。いずれも予測が 2 つ方向へと分岐し、それぞれの方向に向かうポテンシャル(ランドスケープ)を可視化することに成功した。

(b) ランドスケープ構造に基づいた分水嶺検出手法の開発

ランドスケープの直交ポテンシャルに基づいて分水嶺検出手法を開発した。この分水嶺は直交ポテンシャルに基づいてランドスケープ上の軌道の分布を計算し、その軌道とユーザが設定したシナリオ(被害の大きさ)などを反映するクラスタに基づいて確率的境界によって得られる。本手法を上述の(a)と同じ 4 つの台風のアンサンブル気象予測データに適用し、分水嶺を推定することに成功した。

(c) 分岐を誘導する因子の検出方法の開発

分岐を誘導する因子を検出するために、生物情報学で用いられる 2 つの指標に基づく判定法を開発した。1 つ目は FC(フォールドチェンジ)で 2 つのクラスタ(シナリオ)の因子の大きさの比によって得られる。2 つ目は各クラスタにおける因子の有意差を表す統計的検定に基づく指標で、これらを組み合わせることによって、2 つのクラスタの差を支配する因子を検出することができる。ランドスケープ解析で得られた分水嶺の境界付近のクラスタをシナリオで 2 つに分離し、この判定法を適用することで分水嶺をまたぐ(制御する)ための因子を検出することができる。

課題推進者: 井元佑介(京都大学)

(4) 研究開発項目 4: 気象制御計算システムの開発

研究開発課題 4-1: 気象制御計算システムの開発

当該年度実施内容:

制御入力(風)を領域気象モデルで扱えるようアクチュエータ機能の実装を開始した。領域気象モデルとして SCALE を使い、風速時間変化項に抵抗物による効力を実装し、その効果を導入した。制御を行った場合と行わなかった場合の比較により制御の効果を検証し、風の風下側に雨域が形成されること、風向に沿って風を配置すると雨域形成

の効果が明瞭になることがわかった。

次に、簡易気象モデル Lorenz-96 にモデル予測制御 (MPC) を実装し、いつ・どこで・どのような制御をすべきかを推定するシステムを開発した。極端現象の制御可能性について調査を行い、小さな制御入力で高い制御成功率を達成することができた。また、MPC 計算量をアンサンブル近似により効率化する手法の開発も行った。

大アンサンブル予測情報生成については、アンサンブルデータ同化とマルチ物理アンサンブル予測を組み合わせた手法を用い、雲微物理スキーム、積雲対流パラメタリゼーションにおける降水関数・トリガー関数、スラブ海洋あり・なしの合計 16 パターンのマルチ物理アンサンブルを作成し、それぞれの組み合わせについて、アンサンブルデータ同化によって生成される 50 メンバーの初期値と組み合わせて、合計 800 メンバーアンサンブル予測を生成した。これにより、モデル不確実性と初期値不確実性の双方を考慮する予測を実現することができ、短期予報においてアンサンブルスプレッドを大きくできることなどが明らかになった。

課題推進者: 岡崎淳史(千葉大学)

研究開発課題 4-2: 気象制御計算の計算量削減

当該年度実施内容:

MPC がデータ同化の拡張として実現可能であることが示されたので、限られた介入で気象を誘導するための手法を検討した。長時間のアンサンブル予測を実施して望ましい気象場とそこに至るトラジェクトリを発見(予見)し、そのトラジェクトリに対してモデル予測制御をかける手法を考案し、低次元力学系モデル Lorenz-96 を用いた実験で、提案手法が良好に動作し、十分に小さい制御入力で制御可能である事を実証した。この提案手法を現実の気象制御に発展させていくためには、以下が必要である。

- ① 望ましいトラジェクトリを発見するアンサンブル生成
- ② 望ましいトラジェクトリを判断する手法の開発
- ③ 深層学習器を用いたアンサンブル降水予測情報の超解像
- ④ データ同化計算の高度化・高速化

以降に、これらの結果について記す。

① 望ましいトラジェクトリを発見するアンサンブル生成

制限付きボルツマンマシン (Restricted Boltzmann Machine; RBM) を用いたアンサンブルメンバー生成と変分オートエンコーダ (Variational Auto-Encoder; VAE) を用いたアンサンブル生成手法、AI 天気予報モデルの活用を検討した。

RBM では、解析雨量(一時間雨量)を学習させてアンサンブル生成ができるかどうかとその性能を検証した。生成結果は、様々な分布が表現され、特に 10 mm/h 以上の強い雨だと空間的に局所的な雨となり、弱い降水だと空間的に広がった分布になる傾向があった。今後、粗い解像度のデータの入力があった際に、それを解像度の高いデータに変換する超解像の処理も行えるかを検討する。

また、VAE を用いたアンサンブル生成についても、気象データを模した数理モデルを用いた検討を行い、台風の近似モデルとして利用されるランキン渦を、ドップラー風速計の観測データのみから深層学習に基づく生成モデルにより再構成する手法を提案

し、自己符号化器 (Autoencoder; AE)、条件付き変分自己符号化器 (Conditional Variational Autoencoder; CVAE) の 2 種類の学習器を用いて検討した。現実の大気観測データには必ず観測ノイズが含まれるため、観測データから予報データを再構成するよう学習された AEobs よりも CVAE の方が、現実の大気観測データに対する再構成に優れている可能性が高いと考えられる。

さらに、AI 天気予報モデルを用いたデータ同化システムの開発に着手した。具体的には、ClimaX (Microsoft 社) を AI 天気予報モデルとして活用し、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF を同化フィルタとして実装した。この ClimaX-LETKF システムにより PREPBUFR 同化実験を行い、2 年にわたる安定的なデータ同化サイクルの継続に成功した。これにより、AI 天気予報モデルは物理方程式を解くモデルを用いない、データ駆動型モデルと観測データによる純データ駆動気象予測を可能とした。

② 望ましいトラジェクトリを判断する手法の開発

適切な気象制御に向けては、「望ましいトラジェクトリ」を適切に評価する必要がある。過去の災害事例のアンサンブル気象予測情報を検討したところ、そこには豪雨の予測精度が大きく変わる予測のターニングポイントがある事が分かり、ランドスケープ解析を適用することで、この事例に対しては軌道の分岐や制御に対して感度の高い鞍点を獲得できる可能性が示された。そこで、気象場へのランドスケープ解析を適用し、その有効性について検討を開始した。

③ 深層学習器を用いたアンサンブル降水予測情報の超解像

トラジェクトリ解析は、気象場を見て軌道の近さ/遠さを判断する手法である。一般に、気象予測モデルが出力する気象場は低解像度であるので、降水量に関して超解像する手法を、深層学習モデルを用いて検討した。

二次元の降水量データを画像とみなし、最適輸送コスト (Wasserstein 距離) を損失関数として、深層学習によって超解像することで、降水量分布を高解像度化する手法を提案した。損失関数として Wasserstein Generative Adversarial Networks (WGAN) の枠組みを用い、気象庁が提供する解析雨量から低解像度化したデータを作成し、低解像度化したデータと元データのペアを用いて学習をし、低解像度の降水量分布データから高解像度の元データを復元するモデルを作成した。WGAN によって生成された降水量分布データは、元データのような空間的に細かい雨域の分布を再現することができた。また、WGAN モデルではほぼ全ての高周波成分の降水パターンを復元することにも成功した。以上より、Wasserstein 距離を損失関数として用いて超解像を行うことで、雨域の形状や構造を効果的に評価し、より現実に近い高解像度の降水量分布が得られることが示唆された。

④ データ同化計算の高度化・高速化

MPC をデータ同化の拡張として解くために、データ同化計算の高度化・高速化にも取り組んだ。量子アニーリングではトンネル効果によって大域的な最小値を求めることができるので、この利点を生かした量子データ同化法を開発した。これによって、局所的な最小点に陥った場合にはアンサンブルカルマンフィルタ (Ensemble Kalman Filter; EnKF) の解析値に置き換える方法 (EnKF replacement) と併用することにより、局所的な最小点に陥る頻度が大きく減少し、平均的な解析精度が上がることや、非線形性が

強い場合でも同化ウィンドウを伸ばすことによる精度向上を実現できることがわかった。また、データ同化手法の高度化として混合ガウス分布・局所粒子フィルタ研究にも着手した。まず、粒子フィルタの派生である局所粒子フィルタ(Local Particle Filter; LPF)と、LPF を混合ガウス分布によって拡張した LPF with Gaussian Mixture (LPFGM) について、それらの実運用に向けた基本的な挙動の調査を行った。LPF ではリサンプリングを行わない場合、当然同化は機能しないが、常にリサンプリングを行う場合も filter divergence を起こしやすくなる。実験の結果、全般に安定性や精度に影響が大きいのはインフレーションパラメータであった。なお LPFGM による同化の結果は全体として LPF より精度が高い。

課題推進者: 小槻峻司(千葉大学)

研究開発課題 4-3: 海上豪雨形成のモニタリングに向けた観測シミュレータの開発

当該年度実施内容:

(a) 観測シミュレータの開発

新しい観測手法(雲や大気中の塵といった散乱体の信号強度から水蒸気量分布を把握)を模擬する観測シミュレータを開発した。数値気象モデルの SCALE の数値実験結果をハンドリングし、観測シミュレータの入力データとした(基本機能 1)。また、その入力をもとに大気や水物質の散乱特性を計算しつつ任意の周波数のレーダ測器の位置を原点とした極座標系への変換を可能とした(基本機能 2)。そして、伝搬経路中の減衰量計算を行うようにした(基本機能 3)。

開発したシミュレータを利用して、雲や降水のモニタリング手法について検討をした。降雨レーダの場合 0 dBZ 以下となる雲の信号はセンサ性能(送信出力)の限界のため観測は難しい。一方で、雲レーダの場合は -20 から -30 dBZ 相当の雲の信号を検知可能であるが、観測値は伝搬経路上にある降雨によって減衰するため上空の雲の定量的な把握は難しい。また、上空(高度 10 km)から雲レーダでは手前側に電波を遮るものがないので、高高度の飛翔体からの観測が有用であるなどが、示された。

(b) 静止/小型衛星群による高頻度観測の利用検討

海上においても広域かつ高頻度観測に強みを持つ静止/小型衛星群のモニタリング利用可能性について検討した。小型衛星マイクロ波サウンダーとして TROPICS (Time-Resolved Observations of Precipitation structure and storm Intensity with a Constellation of Small satellites)の利用可能性を調査した。TROPICS は可降水量の空間分布を広域に把握することができるが空間分解能は 30~50 km 程度であり、現在のレイテンシーは約 12h 程度である。

また、詳細な空間分布の情報を把握するために、静止気象衛星(Himawari-9)赤外面像の調査をした。Himawari-9 の場合、赤外面像の空間解像度は 2 km、数時間以内のデータレイテンシーである。この場合、得られる情報は雲頂温度の情報となるが、高い時空間解像度を用いて雲の追跡をしたほうが、海上の豪雨をモニタリングするうえで有用と考える。

課題推進者: 金丸佳矢(情報通信研究機構)

(5) 研究開発項目 5: 豪雨生成に有効な介入操作の検討

研究開発課題 5-1: 気象モデルを用いた介入操作の有効性評価

当該年度実施内容:

数値モデルに組み込んだ 4 分類 7 手法の人為的介入について、2021 年 8 月の九州豪雨事例を対象に数日間の効果の検証を行った。その結果、凧のような形状の抵抗物が最も有望であることが確認された。これを踏まえ、本手法に焦点を絞り、初期値を 1 時間ずつずらした 25 メンバーのアンサンブル実験を実施し、抑制効果の定量的評価を行った。これら一連の実験により、抵抗物を模擬した人為的介入によって、数値実験内で最大 10% 強の降水量の抑制が確認され、顕著な効果が得られた。

さらに、水蒸気初期場にランダムノイズを付加した 100 メンバーのアンサンブル標準実験を実施し、介入地点に対する感度解析を行った。その結果、豪雨発生の 9~15 時間前に上流の海上において統計的に有意な負の相関領域が確認された。これは、降水を人為的に増加させることで、下流の豪雨抑制につながる可能性を示唆するものである。この知見に基づき、上記の領域に降水を促すことを目的とした人為的介入を含む 100 メンバーのアンサンブル実験を行った結果、対象領域の豪雨が実際に抑制される傾向が見られた。ただし、個々のアンサンブルメンバーの中には逆に降水が強化されたケースも存在し、人為的介入による豪雨抑制には抵抗物の設置のみでは十分でないことが示唆された。すなわち、抵抗物による物理的介入が局地的豪雨抑制に一定の効果を持つ可能性が示唆された一方で、その効果は初期場の不確実性や大気場の変動に依存することで、必ず抑制効果を持つわけではなく、単一の手法による介入には限界が存在することが分かった。今後は、複数の手法の組合せや、介入タイミング・位置に対する最適化手法の検討が求められる。

課題推進者: 安永数明(富山大学)

研究開発課題 5-2: 海上豪雨形成の可能性のある事例選定

当該年度実施内容:

気象介入操作が有効に働くと期待される候補事例を、気象庁メソ解析から算出した不安定指標に基づいて絞りこんだ。解析においては特に、可降水量、持ち上げ凝結高度 (lifting condensation level; LCL)、自由対流高度 (level of free convection; LFC)、対流抑制 (convective inhibition; CIN)、および対流有効位置エネルギー (convective available potential energy; CAPE) の 5 つの指標に着目した。

各事例について、豪雨発生の 24 時間前から直前までの 3 時間ごとに、上記の不安定指標を求めた。その結果、2021 年 8 月中旬に発生した「前線による大雨事例」(気象庁「災害をもたらした気象事例」に含まれている「前線による大雨 令和 3 年(2021 年)8 月 11 日~8 月 19 日(速報)」が、気象介入の効果が良く期待できる事例であると判断した。次に、数値モデルによる再現実験および介入実験を推進するため、SCALE 数値気象モデル実験データを用いた解析を進めた。低減を目指すターゲット変数を、2021 年 8 月 12 日 00 UTC から 6 時間の、熊本県北部および天草・八代海域での平均降水量とした。アンサンブル感度解析の結果、熊本県北部においては、豪雨の 24 時間前から、150~200 km 風上側の領域で、ターゲット降水と目的領域の降水量との間に統計的に

有意な負のラグ相関が認められた。この結果は、上流の負相関域における降水を増加させることで、下流のターゲット域における降水量を抑制できる可能性を示唆する。

天草・八代海域についても同様の相関関係が認められたが、熊本県北部域の結果に対し相関の符号が逆であった。このことは、介入候補位置が緯度経度に固定された地点ではなく、ターゲット域に対して相対的な位置関係で定まっていることを示唆する。

介入効果を定量的に評価するため、介入あり・なしでのアンサンブル平均降水量の差に見られる時空間特性を調べた。その結果、介入位置の下流域において平均降水量差が「正－負」の双極パターンを示すことが分かった。この結果は、降水量差が正となる領域を、非介入実験におけるアンサンブルラグ相関が負となる領域に重なるように介入を行うことで、ターゲット域の降水量を減少させられる可能性を示唆している。

課題推進者： 濱田 篤 (富山大学)

研究開発課題 5-3: アンサンブル気象予測実験

当該年度実施内容：

WRF モデルにおいて、(a)クラウドシーディング、(b)大気加熱、(c)大気加水(噴水)の気象介入操作を再現する手法を開発し、モデルへの実装を完了した。この手法を用いて2014 年広島豪雨を対象にそれぞれの介入を再現した数値実験を実施し、いずれも陸域の豪雨の緩和につながり得ることを示した。

本実験設定を基に、3 つの気象介入操作を再現する手法をそれぞれ適用した場合の結果について、以下に示す。

(a) クラウドシーディング

WRF モデルに使用した Morrison 雲微物理スキームの氷晶核数を決定する式(Meyer's equation)において、氷晶核数を人工的に増加させる係数を実装し、この係数により氷晶核数を強制的に増加させることによって、クラウドシーディングを模擬した。膨大な氷晶核に大気中の水分(主に過冷却水)が分散して凝結することにより、降水粒子の成長を抑制する「オーバークラウドシーディング効果」を狙い、比較的深い対流が存在するかつ過冷却水が存在する高度にシーディングを実施した。

当該シーディング実験により、主に豪雨域の降水を緩和し、その下流側において降水を促進させる結果が得られ、その傾向は上流側にシーディングの面積を拡げていくほど顕著に見られた。特に変化が顕著であった 24 km×24 km の範囲にシーディングを実施した実験では、3 時間累積降水量 100 mm を超える豪雨域において最大約 50 mm/3 時間の減少(>30%)が確認された。

一方、下流域において降水は増加したものの、斜面崩壊をもたらす程度の豪雨(>3 時間累積降水量 100 mm)には達していないことが確認できた。これにより、クラウドシーディングは豪雨を分散させることにより集中化を防ぐ効果があることが確認された。

(b) 大気加熱

WRF モデルに使用した Morrison 雲微物理スキームにおいて、予報変数である温位を強制的に上昇させ、大気加熱を模擬する手法を開発した。本手法の試験的な解析として、地表面から高度 1 km の大気境界層に対して、毎タイムステップに 0.1 K 温位を上昇させる実験を実施した。加熱実施時間は 1 時間である。結果として、温位の上昇に応

答して、地表面気圧が減少、海上豪雨の生成・陸域の豪雨の緩和が実現されることが分かった。

(c) 大気加水

WRF モデルに使用した Morrison 雲微物理スキームにおいて、予報変数である雨水比を強制的に上昇させ、噴水による加水を模擬する手法を開発した。本手法の試験的な解析として、高度 500 m と 1 km にそれぞれ 1.0×10^{-5} の雨水を 1 時間追加し、降水量への影響を調べた。加水の主な目的として、雨水の蒸発を促すことにより下層の大気を安定化させ、降水の抑制を狙うものである。結果として、加水により下層において相当温位が減少し、大気の安定化につながるが示された。更には、海上豪雨の生成・陸域の豪雨の緩和を実現するケースがあることが分かった。

課題推進者: 平賀優介(東北大学)

(6) 研究開発項目 6: 気象介入手段の工学的実現

研究開発課題 6-1: 大気加熱・シミュレータ

当該年度実施内容:

加熱シミュレーションを実施する大気モデルとして、水平一様の理想大気を仮定した。水蒸気混合比は地表で 20 g/kg とし高度に対し指数関数的(スケールハイト 2 km)に減少するとした。気温は地表 300 K から一定の気温減率 6.5 K/km で高度変化すると仮定した。気圧の高度分布は US 標準大気を採用した。放射機のマイクロ波出力は、普及している気象レーダよりかなり大出力だが現在の技術で実現可能な $P_t = 1$ MW、アンテナゲインは気象レーダで一般的な $G = 40$ dB を想定した。

22 GHz 帯は水蒸気の吸収帯にあたり、大気中の水蒸気により効率的な加熱が起こる。その半面、距離の二乗に反比例する効果と伝搬経路上のマイクロ波吸収による減衰項により、放射機から離れるにつれ加熱率は一方的に減少する。同様の傾向は、酸素分子吸収帯の 60 GHz 帯でも見られる。22 GHz 帯にくらべ吸収が強いため原点付近で加熱率が高くなるが、遠距離では強い減衰のため加熱効果はむしろ急激に弱まる。

積雲内の潜熱加熱として典型的な範囲(約 1~100 K/h)と同等の加熱が得られるかどうかを判断基準とする。シミュレーションの結果から、放射機の直上付近(x 軸でほぼ $x = 0$ km)の高度 0.5 km 前後までは、積雲の上昇流を駆動するに足る加熱率は原理的に達成可能と判断できる。一方、より遠い距離になるにつれ加熱効果は急速に失われる。

以上の結果は、マイクロ波加熱による積雲誘引は放射機近傍の高度 500 m 程度まで(大気境界層下部)であれば技術的に可能であることを示唆する。高度 500 m で豪雨をもたらす積乱雲発生を可能にするには、地表付近の気塊を自由対流高度まで持ち上げられればよい(自由対流高度を超えれば積雲気塊は自身の浮力で成長する)。

一方、放射機近傍ではマイクロ波ビームが十分な幅を確保しづらい課題が存在する。放射機から 1 km 離れた所でビーム幅は 40 m 程度であり、積乱雲のスケールが数 km 程度かそれ以上であることを鑑みると、加熱領域は空間的にかなり限られていることが示唆される。

課題推進者: 増永浩彦(名古屋大学)

(7) 研究開発項目 7: 法的課題の解決

研究開発課題 7-1: 気象制御への社会制度設計の検討

当該年度実施内容:

主に、①わが国の防災法体系の特徴、②気象制御に関するステークホルダー特定の留意点、③気象制御手段の 1 つである洋上風を実施する際の留意事項について、行政法学におけるオーソドックスな研究手法である文献(逐条解説書、学術書、研究論文、政府文書、判例など)調査を中心に検討を進めた。

①について、ELSI/RRI に係る議論において近年ますます重視されつつある市民参画の手法が必ずしも十分整備されていないことに加えて、ときに国と地方公共団体との間で責任と権限が複雑に分割された仕組みであるという特徴も有する。また、災害対策基本法は、異常気象発生から制御の実施判断までのスピード感をときに気象制御以上に重視しつつ、総合的かつ計画的な災害対策を追求している。したがって、気象制御の実施について既存の災害法体系の枠外で新たな法制度を構想することは、およそ現実的ではないことを確認した。さらに、タイムライン(防災行動計画)でも、市町村の役割の重要性が示唆されている。なお、現行の洪水タイムラインの一端では、発災 12 時間前に災害応急対応の人的体制が整備されるため、それまでに気象制御が効果を発揮すれば、市町村の災害応急対応負担を大いに軽減できる可能性があることなどを把握できた。

②について、気象制御の実装に向けた実験段階では、科学的実証に「必要な」実験区域の選定について、例えば、人的被害の発生しにくい僻地や島嶼部を選択する場合、かえって次のことに注意する必要があることを明らかにした。すなわち、そのような地域では、生活用水の少なくない量を雨水に依存していることがあり、水管理に関する市町村の法的義務を厳格化する傾向が日本では認められていて、人的被害リスクの回避がかえって水循環に係るリスクに強い関心を抱かざるを得ないステークホルダーの近接化を招きかねない。水循環に対する関心が強く、上記のような傾向の下にある市町村といった、単なる住民代表に尽きない典型的な地縁団体とのリスクコミュニケーションもまた、独自のルートを確保しておくことが重要であろう。

③について、その実施が想定される海洋では、従前から、生態系に影響を及ぼしかねないバラスト水の排出に係る厳格な規制が国連海洋法条約などによって要請され、わが国法としてもつとに海洋汚染防止法などが存在するところ、近年ではさらに、海洋プラスチック問題などを契機として、海洋廃棄物規制に係る国際的議論がますます強まりつつある。そのような議論動向を踏まえると、海洋環境保護について厳に留意する必要があるように思われる。

課題推進者: 重本達哉(同志社大学)

研究開発課題 7-2: 気象制御における国家補償

当該年度実施内容:

最初に、公害健康被害補償法を分析対象としたところ、公害健康被害補償法が対象とする公害は本来発生してはならない性質のものであり不法行為に属するのに対して、気象制御は法制化のうえ実施される予定のものであるから基本的な性格を異にする。

他方、①被害に地域的な偏りがみられる点、②健康被害との因果関係の証明には困難が伴うという点について、両者には近似する側面があることから、公害健康被害補償法が採用する因果関係の認定方法が気象制御の法制化において参照点となり得る可能性を認識できた。

次に、原子力損害賠償法を分析対象とし、気象制御と原子力発電の共通点として、両者はともに国策として推進されている事業と位置付けられた。他方、原子力損害は万が一にも起きてはならないものであるのに対して、気象制御の場合、防災上の効果を大いに期待できる反面、渇水や漁業への影響など、場合によっては負の効果の発生も見込まなければならない。また、原子力損害が生命・身体への危害であるのに対して、前述したように、気象制御による損害は渇水や漁業への影響など多岐にわたる。わが国の法体系においては生命・身体よりも下位に位置付けられる財産権の侵害が主として想定される点で、両者は大きく異なる。原子力損害賠償法の特徴の中でも、原子力事業者が無過失責任を課すとともに、賠償責任を原子力事業者に集中させている点が注目される。これは、原子力事業が最先端の科学技術によるものであることから、被害者に原子力事業者の故意・過失を立証させることは酷であり、被害者からの賠償請求を容易にするという被害者保護の観点から、被害者が加害者に故意・過失があったことを立証する義務を不要としていると説明される。最先端の科学技術を応用したものである点は気象制御にも妥当することから、賠償責任の性格付け、賠償主体の特定という点で参考に値すると考えられた。

課題推進者： 近藤卓也(北九州市立大学)

研究開発課題 7-3：気象制御実施に関するルール策定

当該年度実施内容：

ダム操作のルールについて調査を継続し、利害調整に関するルールづくりの手がかりとして、リスクコミュニケーションに関する研究が参考になるのではないかと考え、その文献を収集した。また、計画を超える異常洪水が発生した場合について、通常時とは異なる操作の余地があるとして「異常洪水時防災操作」が定められていたほか、近年の水害の頻発化・大規模化に対応するための事前放流などが制度化され、従来よりも弾力的な対応が目指されるようになってきている。気象制御についても、このような弾力的な対応が必要であるかについて検討することができると考えられた。

最後に、小規模屋外実験の実施に関する ELSI 課題の抽出を行った。方法として、気象制御の ELSI 論点を挙げ、小規模屋外実験においてそのうちその課題を検討する必要があるかどうかを検討した。検討の際には、リスクに関する課題、社会の価値や変革に関する課題、気象制御のガバナンスに関する課題に分けて検討した。その結果、①リスクに関する課題としては、実験の態様から、地域レベルのリスクが生じる可能性があること、②社会の価値や変革に関する課題については、実験が社会の関心を高め、CO₂ 削減策への関心が薄れてしまう可能性があること、③気象制御のガバナンスに関する課題については、実験の場となることを忌避する者がいることが指摘され得た。

課題推進者： 福重さと子(岡山大学)

研究開発課題 7-4: 気象制御への保険制度

当該年度実施内容:

リスク・ファイナンスとリスク・コントロールを結びつけた保険制度を採用するアメリカの洪水保険制度 (National Flood Insurance Program; NFIP) について、特に NFIP の創設時の議論やその後の展開に着目した検討を行った。

NFIP は、一般のホームオーナーズ保険では免責とされている洪水リスクについて、連邦政府が保険者となり補償を提供する。連邦議会は、NFIP の趣旨説明において、NFIP が洪水リスクに対して適切な保護を提供し、財産の暴露 (exposure) を最小限に抑えて健全な土地利用を促すことにより、公共の利益を促進することができるとしている。このような規制には、少なくとも2つの重要な機能が存在すると認識されていた。すなわち、①洪水リスクにさらされた土地の開発を制限し、洪水被害を最小限に抑えること、②将来予定される建築物の開発を可能な限り洪水リスクにさらされている場所から遠ざけるように誘導すること、が可能となることである。しかし、様々な要因から、規制の努力は阻まれることになったと指摘されている。第1に、洪水に対する国家全体の財産の暴露は増加傾向にある。第2に、NFIP の氾濫原管理規制は、将来予定される建築物を洪水リスクの高い地域から遠ざけるのに不十分であることが明らかになっている。第3に、最低基準の内容は拡大する洪水被害に対応するには不十分と指摘されている。

NFIP の仕組みはわが国の水害に関する保険制度の研究にとって有益なものであると思われる。ただし、具体的に何をどのように学ぶのかは慎重に判断しなければならない、NFIP の失敗がどのような要因でどのように発生しているのかなどの負の側面についても掘り下げて検討することが、今後のわが国の水害に関する保険制度の議論をより有益なものにする。

課題推進者: 嘉村雄司(島根大学)

研究開発課題 7-5: 水害リスク管理における気象制御の位置づけ

当該年度実施内容:

いわゆる大東水害訴訟最高裁判決 (昭和 59 年 1 月 26 日、事件番号: 昭和 53(オ)492) 以降に、最高裁判所で判決が下された水害訴訟事件 4 件を取り上げて、その争点、特に損害賠償を求めた住民側の論点に着目してその特徴を探った。各事件とも原告側の主張は様々な項目、観点からなされているが、最高裁で直接検討の対象となった内容については、大別して

- a) 河川の改修の遅れ、未実施を管理上の瑕疵と主張するもの、
- b) 現に存在する河川構造物がその予定する安全性を有していなかったことを主張するもの、

の二種類が見られた。a) の河川改修の遅れや工事の未実施を問題とする主張では、河川の改修には予算的、社会的制約やリスク転嫁を避けるために下流から実施する必要があるといった制約があることを認めたうえで、現実浸水被害が発生していることを根拠にその緊急性を指摘するものが多い。

一方、b) に該当する主張が中心であった事件では、工事実施基本計画において新規の改修の必要が無いと判断された河川区間が、計画に定める規模の洪水に対する安

全性を有していなかったことを主張したり、破堤後に設置された仮堤防の断面・構造を決壊した堤防と同等としたことと築堤材料が堤防の材質の基準を満たしていないことを管理上の瑕疵と主張したり、工事実施基本計画において新たな整備の必要が無いと判断された施設については、改修が完了したものとみるべきで、河川全体としては改修中であつたとしても、その施設は計画が対象とする規模の洪水に対して安全でなければならないとしたりした。

以上のように、一定の合理性を有する河川整備計画が存在する場合、水害の発生について河川管理上の瑕疵が認められることは無いこと、ただし、計画に従って設置された構造物の安全性については、厳格にその機能が保たれているか審査されることが明らかになったと言える。今回は、最高裁判所への上告が受理された事件について、その論点を分析したが、住民の河川の安全性に対する意識や期待を読み取るためには、第一審での主張を分析することも必要と考えられる。

課題推進者：堀 智晴(京都大学)

(8) 研究開発項目 8: 法的課題の解決

研究開発課題 8-1: 洪水リスクの定量化

当該年度実施内容:

上流においてダム等による人為的な流量の変更や、堤防を伴う河道区間における氾濫等の自然的な流量変化が生じていないと考えられる国管理・水資源機構管理のダム流域を対象に、流域内の土壌・地質の分布に基づき多地点・多イベントでのパラメータ組の尤度推定から最もロバストなパラメータ組を決定する手法である条件付確率法を適用し、我が国の土壌・基盤岩地質をそれぞれ 10 種・6 種に分類したうえで、各土壌・地質に対して流出パラメータを決定した。続いて、昨年度構築した日本全国の合流点水門データベースを導入した日本全国 RRI モデルに決定された流出パラメータを統合し、流量観測点における流量再現性を、2010 年度以降の各地方上位 10 位までの豪雨洪水イベントにおいて検証した。この結果、このモデルについて全体的な再現精度は検証できたと考えられた。一方で、水門を導入していない従来モデルと比較して、水門を導入した本課題での開発モデルでは精度指標が悪化していることから、水門併設の排水機場等のより現実的なモデリングによる改善が必要と考えられる。

一級水系に存在する主要な不連続堤防、及び排水機場のデータベース化を行った。霞堤については、河川整備計画等の河川管理者資料、及び霞堤の分布に関する既往の研究論文に基づき、2024 年度時点で連続堤化されずに残存している全 45 水系の 220 箇所をリスト化した上で、堤防の開口幅に合わせて河道セルの堤防を除去し、氾濫原セルに霞堤の請け堤(不連続部の下流側堤防)を地形として再現することで、霞堤をモデル内に実装した。また、排水機場については、河川管理者より国・都道府県の河川管理部局管理排水機場の一覧、及び農林水産省より 1ha 以上の受益面積を持つ基幹水利施設系統に属する排水機場の一覧を取得し、距離標情報・住所情報と地図情報・航空写真に基づいて合流点へのジオレファレンスを行った上で、モデル内で対象となる合流点が存在する計 944 箇所(国管理 287・県管理 145・農水系 512)を、合流点に付

随した排水機場としてモデル内に実装した。

破堤機構の実装について、国内の既往災害における破堤長が本研究のベースモデルである RRI モデルのセルサイズ(150m)とほぼ同等もしくは下回ることから、河道断面における堤防標高の切り下げと、切り下げられた標高上での越流公式に基づく河道・氾濫原間の水の授受として実装を行った。

河川構造物・破堤機構を実装した流出氾濫モデルを用いて、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨における利根川水系鬼怒川での破堤氾濫事象を対象とした再現計算を行った。現実においては、破堤地点から約 3 km 上流の左岸堤防においても大規模な越流が生じており、国土地理院提供の浸水領域輪郭線は 2 つの要因による浸水領域をまとめて示している。再現計算においては、破堤地点上流部では小規模な越流が生じているものの、実際の浸水領域内では浸水を生じさせていなかった。一方、鬼怒川本川河道からの氾濫水による鬼怒川・小貝川に挟まれた氾濫原の滞留型浸水が再現されており、破堤機構の導入により、モデル上でも現実的な破堤氾濫事象が再現できている。

再現された浸水範囲は観測範囲より狭く、観測浸水領域全体に対する再現計算での浸水領域面積は 44.7%、他の要因による浸水を除いた観測浸水領域に対しての再現計算での浸水領域面積は 69.2%に留まった。また、被害額について最大浸水深と治水経済評価マニュアルの手法に基づいて算出した家屋被害額は 88.7 億円であったが、本研究の経済被害推定での被害額は 293.7 億円であり、約 30.2%となった。

課題推進者：山田真史(京都大学)

研究開発課題 8-2: 水害被害推定モデルの開発

当該年度実施内容：

すでに公開されている洪水被害関数の収集整理を行った。収集した被害関数は、治水経済調査マニュアルを中心に、国内の洪水事例を対象とした研究論文および海外で使用されているモデル(HAZUS)や民間企業による調査報告書(IBI 社)などで公表されている関数群である。被害関数の説明変数にあたる所在地、構造、(企業資産を対象とする場合)業種、企業規模等の各種属性情報の選定は、利用可能な Exposure データベースや被害関数の区分や解像度を踏まえ、浸水深、資産種別(建物/内容物)、業種(大分類レベル)とした。

収集した被害関数の検証のため、平成 27 年関東・東北豪雨による鬼怒川の氾濫をモデルケースとして、実績浸水深並びに水害統計調査、自治体・内閣府の報告資料を収集した。実績浸水深と Exposure データベース、収集した被害関数により市区町村単位での被害額を算定し、被災世帯数や被災人口の推算に必要な浸水深の閾値の最適化や、同一の資産を対象とした被害関数が複数のデータソースにまたがって存在する場合、そのうち最も被害実績を説明できる関数を選出した。

企業の営業利益損失(間接被害)については、検証のための被害実績データとして ①内閣府による平成 27 年関東・東北豪雨時のアンケート ②令和 2 年 7 月豪雨などを対象とした被害状況ヒアリング・アンケート(原則非公開)をそれぞれ収集した。

これらの実績値をもとに間接被害推計のための被害関数の精度検証を実施中であるが、一般的に水害による間接被害に関するデータは極めて限定的であるため、多様な民間

企業群を網羅した正確な間接被害推計は現状困難である。さらに、サプライチェーンを介した被災地外への波及損害の推算については、産業連関表から被害推計を行う手法(内閣府)を実装する作業を進めている。

課題推進者: 山田進二(SOMPO リスクマネジメント株式会社)

研究開発課題 8-3: 斜面崩壊リスク評価と国際展開

当該年度実施内容:

斜面崩壊モデルの力学モデルと確率モデルについて最新の手法をそれぞれ複数のモデルをリスクアップした。そのうち我々が過去使用した SLIP モデルとロジスティックモデルを特に選抜し、実装した。この両モデルの差異を調査し、特にパラメータや地質の挙動について同一条件時の挙動について比較した。また、2014 年広島豪雨の実降雨に適用し、両モデルとも約 80%の精度を持つことが理解された。

特に SLIP モデルによる安全度とロジスティックモデルによる発生確率の定義や物理量について注目し、その関係性をまとめた。これにより、力学モデルと確率モデルの組み合わせ手法の提案を目指している。並行して、地質、土壌、標高、降雨等のモデルに必要なデータ整備を行った。広島豪雨を例に気象制御の降雨を入力し、斜面ハザードの変化を表現した。被害額の推定のための確率降雨は年発生確率とし、全国において再現期間毎の降雨データを作成した。2014 年広島豪雨に加えて 2004 年福島、2020 年長野の災害実績データを整備し、また、リスク計算のための人口分布と土地利用シナリオのデータを収集し、モデル入力可能な書式で整備を行った。

課題推進者: 風間 聡(東北大学)

(9) 研究開発項目 9: 気象制御における RRI

研究開発課題 9-1: 気象制御への RRI の推進

当該年度実施内容:

現代環境倫理学における気候工学の倫理の調査を通じた重要 ELSI 項目の特定を進めた。

前半は、環境倫理学分野における気候工学の倫理(ELSI of geoengineering)をめぐる国内外の研究動向の調査を、2 つの班に分かれて実施した。まず、海外班では、『The Oxford Handbook of Environmental Ethics』を手引きとした資料の包括的な整理として、同書に収められた関連論文(Gardiner 2015 や Kallhoff 2015 など)とそこで引用されている論文・報告書の調査を行った。また、海外の環境倫理学者に気象制御研究の ELSI 研究の動向についてインタビューを行った。また、国内班では、国内の気候科学の倫理に関して、関連書籍のサーヴェイを行った。事前の予備調査どおり、それほどまとまった資料が多くないことから、関連研究者として気候工学の倫理および科学技術社会論研究者へのインタビューを実施した。

後半では、現代環境倫理学における気候工学の倫理の重要な ELSI 項目の特定を、以下の 3 つの作業を通じて、実施した。まず、海外と国内の重要 ELSI 項目の比較検討・関連性の調査を実施し、重要 ELSI 項目の整理を行った。ついで、この調査結果を踏ま

え、整理された ELSI 項目を指標としながら、関連する社会合意プロセスについて複数事例について調査を行い、指標の修正を実施した。最後に、ここまでの調査・修正結果を踏まえ、現代環境倫理学における気候工学の倫理の重要な ELSI 項目の特定を行った。

最終的には 392 件の文献のサーヴェイに基づいて ELSI 項目を特定し、それらを観点ごとに分類するとともに、既存の ELSI 項目にはない新たな視点の必要性として「自然への愛」という観点の有効性の検討も実施した。

課題推進者： 立花幸司(千葉大学)

(10) 研究開発項目 10: 情報科学を活かした社会調査・発信

研究開発課題 10-1: 深層ニューラル場等による移流モデリング

当該年度実施内容:

地球上の空間座標・時刻を入力すると移流に対応する幾何変換を出力する関数を構成することで、局所地域の気象現象を対象とした移流モデルを得るために、以下の項目を実施した。

(a) 球面上でのカーネル関数の設計

ユークリッド空間を対象として用いられるガウスカーネルは、全球での気象現象を対象とした場合、その 2 点は球面上に拘束されているため、このユークリッド距離を使うことは不適切と考えた。そこで任意の点での接平面を考え、その対極な点を中心に、任意の点をその接平面へ投影したときの距離をカーネル関数として使うよう変更した。なおより強く局所性を持たせるため、距離の 2 乗ではなく 4 乗を用いることとし、カーネル関数を設計した。

(b) 幾何変換の時空間カーネル回帰モデルの構築

空間と時間でそれぞれカーネル関数を独立に用意し、それらの積によって時空間での近接性を表すこととした。空間については(a)で述べたカーネルを用い、時間については一般的なガウシアンカーネルを用いた。抽出した幾何変換とそれに対応する時空間について、幾何変換の指数重心に基づく回帰モデルの式を導いた。

(c) 時空間データを適切に扱うためのハイパーパラメータ調整

自明ではない、空間と時間の近接性を表すハイパーパラメータの組について精度検証を行い、最も精度がよいものを適切な値として選定した。その誤差は平均でおよそ 12km 程度であった。

(d) 回帰モデルを用いた画像の変形

上記で構成した回帰モデルを用いれば、任意の球面座標と時刻における移流として、3 次元回転変換が得られる。移流に対応する幾何変換の空間的な変化を示すため、南北±60 度、東西 360 度、1/60 度解像度の画像(3600×10800)に格子模様を描き、移流モデルで 30 分後に変形させた画像を生成した。

課題推進者： 船富卓哉(奈良先端科学技術大学院大学)

研究開発課題 10-2: 介入効果を評価する可視化手法の開発

当該年度実施内容:

大規模ボリュームデータの可視化技術の調査結果を受け、大規模ボリュームデータの可視化装置として空間再現ディスプレイを用いることにした。次に、気象数値データから特定の物理量に注目し 4 次元ボリュームデータを構築した。このとき、特定の時間帯や地域における 4 次元ボリュームデータを切り出し、部分ボリュームデータとした。さらに、ミドルウェアである Unity を用いて仮想シーンを作成し、独自に開発した専用の I/O スクリプトによって前述の 4 次元ボリュームデータの読み込みを行った。これによってコンピュータに接続した SONY 社製空間再現ディスプレイ ELF-SR2 で 4 次元ボリュームデータの可視化が可能となるプロトタイプ・アプリケーションを開発した。

本プロトタイプ・アプリケーションでは、4 次元ボリュームデータを可視化する領域や物理量、時間帯などを任意に操作可能であり、気象介入の効果の視覚的理解の深耕に寄与する。

課題推進者: 久保尋之(千葉大学)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

➤ 代表機関の PM 支援体制チーム:

- 代表機関である千葉大学において、その学術推進・イノベーション推進機構と研究推進室からの支援を受ける体制を維持した。
- プロジェクト推進経費によりリサーチ・アドミニストレーター及び補佐員を雇用し、研究会支援や研究資料収集・整備等 PM の補佐業務を担当させた。さらに前年度に迎え入れた気象研究所の OB の雇用を継続し、プロジェクトの方向を見定めるアドバイザーとしての役割を担ってもらった。
- PM 支援チームは、民間企業との将来の協業や PI になることを視野に入れた可能性について継続して検討し、特に制御手法の実現に向けて複数の企業と検討(打合せ)をおこなった。そのうちの 1 社(株式会社岩谷技研)については、海上にて上昇気流を生成するための構造物(通称「凧」)の実現可能性に係る基礎的な検討に必要な膜の素材の候補や中に充填する気体の候補等の調査を業務委託した。また、他の1社(株式会社産学連携研究所)には、同様の構造物を製造できる企業等の調査を業務委託した。

➤ 重要事項の連絡・調整の方法

- 運営会議: PM と PI および JST で組織する運営会議を設置し、定期的に会議(オンラインを含む)を開催した。
- 研究戦略会議: PM と項目長(各研究開発項目の代表者)で組織する研究戦略会議を適宜行い(全てオンライン)、研究開発項目の進捗確認と重要事項共有を行った。
- 全体会議: 参加者の全員が集う会議(場合によって合宿形式)を3回開催した。項目長あるいは PI からの進捗報告と議論を行い、学生を主体とした参加者によるポスター発表も行った。

- 研究グループ会議：専門毎に PI および参加者とで構成する研究グループ会議を 32 回開催し(全てオンライン)、専門的に深く議論・検討した。
- 定例会：PM および全 PI で構成する会議を 7 回開催し。PM からの情報共有(JST との月例会の情報等)や研究開発項目や課題からの情報提供や議論を行った。
- 研究の進捗状況の把握：
 - 項目長が中心となりそれぞれの研究開発項目における進捗を把握し、定例会等により情報を共有した。また、特別な事案については、適宜 PM と PI が直接打合せを行った。
- 情報の共有
 - コミュニケーションツールとして導入した Slack の運用を継続し、研究開発の内容や進捗、締切りの設定されている書類(ファイル)の提出等の管理など、主要なツールとして活用を継続した。
 - オンラインストレージサービスの Dropbox(有料版)をファイル管理ツールとして引き続き運用し、全 PI とのファイル共有基盤とした。

研究開発プロジェクトの展開

➤ 研究開発の競争と協働

本研究プロジェクトの推進には、高性能な計算環境が不可欠である。そこで、本研究プロジェクト内で取りまとめる担当 PI を選定して使用申込や契約業務を整理、一本化し、理化学研究所計算科学研究センターの「富岳」、および国立研究開発法人産業技術総合研究所が構築し株式会社 AIST Solutions が運用する ABCI の利用を開始した。これにより各研究開発課題の進捗の効率化をおこなった。

また、制御手法の工学(モノづくり)研究開発に関しては、その有効性に関する数値シミュレーションとモノづくりの観点から基礎的なフーズビリティスタディを並行して進め、有効ではないと判断した手段の研究開発の中止、有効と判断される手段への研究開発の集中など、選択と集中を行った。

➤ 大幅な方向転換や研究開発課題の廃止・追加:

大幅な方向転換も研究開発課題の廃止・追加もなかった。ただし、介入手法および数値研究について、幾つかの修正があった。

- 介入手法として、本年度の開始時点ではマイクロ波加熱が有効であると捉えていたが、研究開発の過程で実現性が低いことが示されたため、他の介入手段も同時並行して検討した。具体的には、シーディングと海上構造物(通称「凧」またはそれに類する構造物)の検討を開始した。
なお、これら以外の噴水やヘリコプター等による冷水の散布による冷気塊の生成は、専門家へのヒアリング等により実現のための困難さが明らかとなったため、当面は研究開発の優先順位を下げることにした。
- 数値研究の体制構築は完了していたが、数値 SPD、AD からの指摘により、具体的な事案について、気象や数値シミュレーションの専門家ではなくても直感的に理解ができる形での研究開発を早急に進めることにした。
- 介入手段の研究開発においては、ガバニング委員会での指摘もあり、より具体的、実現手段やオペレーションを含めた検討を早急に進めることにした。

(2) 研究成果の展開

➤ 知財戦略等について

特許等の知財権の申請はなかった。

➤ 技術動向調査、市場調査等について

技術動向について、気象制御の介入手段に係る技術および工学的(モノづくり)な実現性・具体性等について調査を開始し、一部(海上構造物の実現性・具体性の調査)を外部の企業(株式会社岩谷技研)に委託した。

➤ 事業化戦略、グローバル展開戦略等の立案等

研究開発課題 8-2 の PI である SOMPO リスクマネジメント株式会社が、事業化を視野に入れた損害推定に継続的に取り組んでいる。

また、気象制御の具体的な技術(海上構造物や空気塊加熱、海上冷氣塊形成・海面水温冷却等)については、当該技術に秀でた企業等と協力(PI になることを含む)し、事業化を検討していく。

次年度において新たなグローバル展開戦略等を検討する。

➤ 技術移転先、将来的な顧客開拓に向けた対応について

特になかった。

なお、気象制御の具体的な技術が開発された場合には、事業化戦略に則って協力企業への技術移転を想定している。

(3) 広報、アウトリーチ

メディア(BS テレ東、毎日新聞)による広報活動を積極的に行った。また、プロジェクトの専用 Web サイトについては、専任者を 1 名採用し、デザインや内容の改善等を行った。

また、アウトリーチについてはリール大学にて舩富 PI が講演を行った。

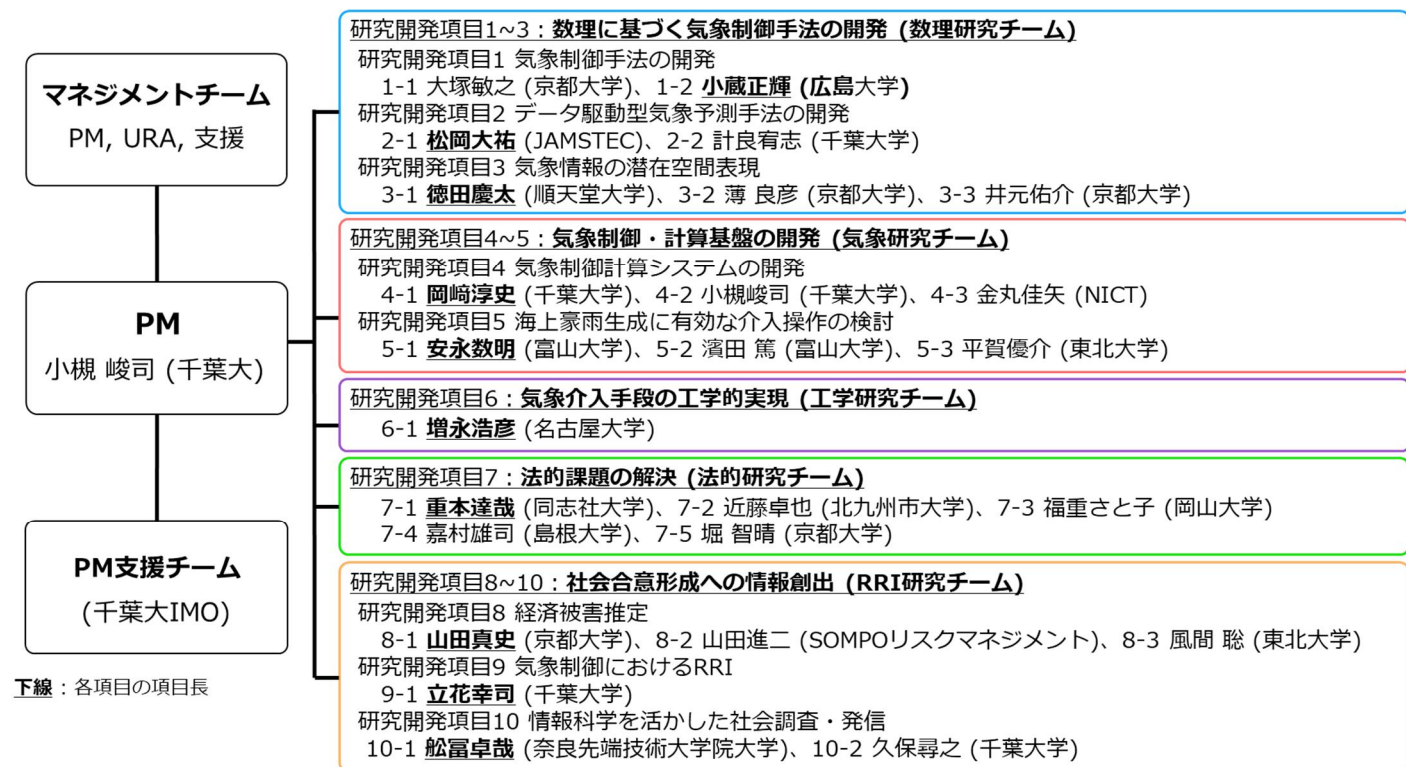
(4) データマネジメントに関する取り組み

数値計算用データセット、数値シミュレーションデータ等を計 29 件登録した。

ここには、4 件のプログラムが含まれた(非公開・非共有)。

なお、プロジェクト内でのデータ等の共有のため、ストレージサーバ(容量約 550 TB)の運用を開始し、16 名のユーザが登録して、約 40%が活用された。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT 含む)	国内	国際
未登録件数	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	5	3	8
口頭発表	25	11	36
ポスター発表	14	14	28
合計	44	28	72

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	4	17	21
(うち、査読有)	2	6	8

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	1	0	1
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	1	0	1

受賞件数		
国内	国際	総数
2	0	2

プレスリリース件数
1

報道件数
4

ワークショップ等、アウトリーチ件数
1