

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・倫理的な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。

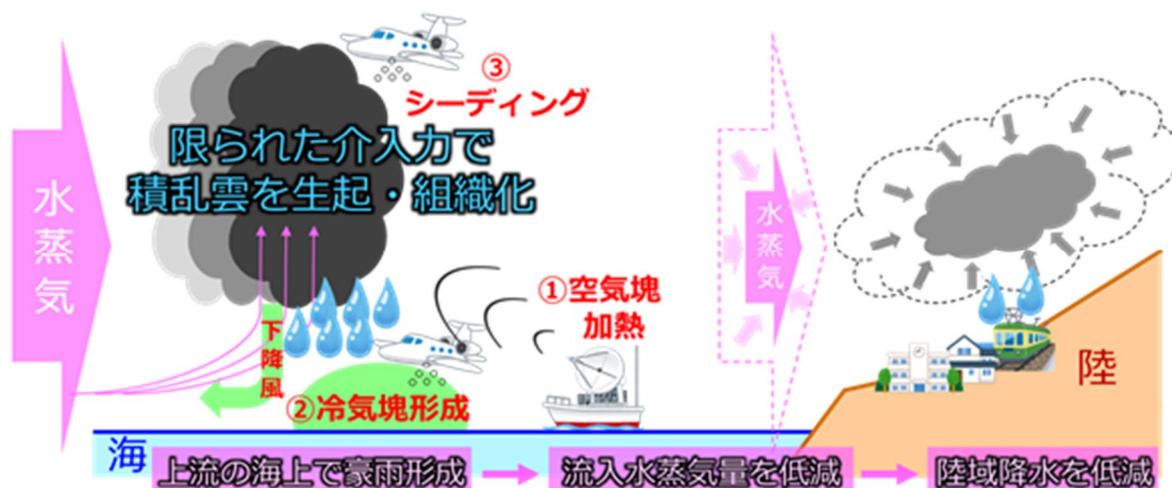


図 1-1: 本研究開発プロジェクトの豪雨緩和戦略。

①空気塊(マイクロ波)加熱、②洋上冷気塊形成・海面水温冷却、③シーディング、および洋上ドーム形成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

最初に、データ駆動型の制御数理を用いた気象制御手法の開発に有用であると考えられる数値気象予測モデル、およびそれらモデルへ適用し得るデータ駆動型制御数理の一覧を作成し、特に有望であると考えられる①深層展開を用いたモデル予測制御と②Expensive Optimization の評価を行った。

次に、数値気象予測モデルのシミュレーションに必要な計算機環境を整備した。まず、数値気象予測モデルは領域大気モデル SCALE-RM を選定し、計算環境としては、汎用 PC および京都大学情報環境機構スーパーコンピュータシステムを使用することとした。続いて、SCALE-RM の大気状態を修正するプログラムや、シミュレーション結果を可視化するプログラムを MATLAB および Python で開発した。

研究開発項目2: データ駆動型気象予測手法の開発

気象予測に関する代理モデル開発に関して 26 個の調査対象項目を抽出し、調査した。

この結果に基づき、領域スケールの降水量予測モデル化を①領域スケールの代理モデル開発、②気象場データから降水量データへの変換、③全球-領域結合代理モデル開発、④アンサンブル予測への拡張、⑤モデルの軽量化といった流れで行うこととした。また、気象予測に向けた代理モデルの多くが Vision Transformer (注意機構を持つ代表的な画像処理モデル) を元に構成されていることを確認し、特に ClimaX に着目してそこで行われている変数圧縮の改良を試みた。

研究開発項目3: 気象情報の潜在空間表現

深層学習による静的なデータの低次元化技術とレザバー計算による非線形時系列予測手法に関して、それぞれ最新の技術動向を調査し、気象制御に資する技術開発に繋がる可能性があり重要だと思われる文献を複数リストアップした。また、クープマンモード分解 (Koopman Mode Decomposition; KMD) と動的モード分解 (Dynamic Mode Decomposition; DMD) に関する技法を 6 つ選定し、数値的適用による性能評価を行った。さらに、ランドスケープ構造から分水嶺を特定するために、等高線がポテンシャル流れの軌道を描く直交ポテンシャル (流れ関数) を導入し、その計算アルゴリズムを流れ関数・渦度法に基づいて開発した。

研究開発項目4: 気象情報の潜在空間表現

制御入力 (洋上ドーム形成) を数値気象予測モデル SCALE-RM で扱えるよう実装し、制御入力の有無によるシミュレーションを行うことにより、洋上ドーム形成の効果を評価した。また、大アンサンブル予測情報について 16 パターンのマルチ物理アンサンブルを作成し、アンサンブル同化によるアンサンブル予測生成も行った。さらに、計算負荷が低く高速な計算を可能とする制御入力計算手法として、気象を低次元化し探索次元を絞るモデル予測制御や、変分オートエンコーダによる次元圧縮、量子アニーリングによるデータ同化手法の開発、アンサンブル気象予測情報を用いた台風進路のランドスケープ解析を行った。

研究開発項目5: 豪雨生成に有効な介入操作の検討

気象介入操作の手法として噴水による水滴の散布、シーディング、マイクロ波加熱、ドライアイス散布による直接冷却、凧のような抵抗物による風の弱体化を選定し、モデル化と数値実験を行ない、凧のような抵抗物による介入が最も有望であることを明らかにした。また、気象庁 Web サイトに掲載されている「災害をもたらした気象事例」から、介入操作の候補となり得る豪雨事例として「2021 年 8 月 12-13 日にかけて九州地域で発生した豪雨」を選定し、再現実験 (シミュレーション) を行って、計算領域やパラメータ感度などに関する知見を得た。

さらに、再解析や数値モデル出力の気圧面データから各種の不安定度指標を求めるプログラムを作成して約 20 種類の指標を抽出し、その内の 5 つが 3 時間積算降水量と比較的良好な関係にあることを見出した。

一方、ベクトル型スーパーコンピューター AOBA-S (東北大) 上に数値気象モデル WRF をインストールし、①人工構造物の設置、②海水面温度の低下、③噴水による加水、④大気加熱の 4 つの気象介入手段をシミュレートすることに成功した。

研究開発項目6: 気象介入手段の工学的実現

マイクロ波照射による大気加熱シミュレーションに利用するため地上気象レーダシミュレ

ータモジュール POLARRIS のソースコードを解析したが、マイクロ波減衰を考慮しない設計であることが分かったため、大気加熱シミュレーションに利用することはせず、新規に大気加熱シミュレータを開発することとした。その実現のためにまず、マイクロ波による大気加熱の理論式を導出した。

研究開発項目7: 法的課題の解決

気象制御の関連法制の整備として、主に①気象庁長官の予報業務許可の法的性質、②災害対策基本法(災対法)における地方公共団体の法的地位、③水防計画の現状について文献調査を行った。

これと並行して、補償制度の創設に係る国家補償関係の規定を置く個別法の網羅的なリストアップを試み、各個別法の立法趣旨、仕組み、運用等を確認しつつ、気象制御との類似点、相違点を確認することで、気象制御における補償制度の特徴を抽出するという研究の方向性を確認した。また、気象制御の具体的実施に関するルール作りについて類似と考えられるダム操作のルールを調査した。さらに、火災保険水災補償の現状と課題について検討した。

一方、水害リスク管理の観点から河川法の改正過程や水防法を中心とする関連法制を調査し、これまでの治水計画が6つの時代に分類してとらえることができることを示した。

研究開発項目8: 経済被害推定

洪水リスクの定量化のため、氾濫パターンや氾濫水挙動に大きな影響を与える人工構造物である河川合流点の逆流(背水)防止水門を全国でデータベース化し、取水堰や不連続堤防等の各種構造物についてはデータベースを試作した。さらに、ベースモデルで計算可能な越流氾濫に加えて破堤氾濫を再現可能とするため、既存のモデル群をレビューして破堤プロセスや破堤部氾濫流の数値計算手法を整理し、実装候補とする手法をリストアップした。また、降雨流出氾濫モデル(Rainfall-Runoff-Inundation Model; RRI)における破堤プロセスの実装方法の決定のため、河道・氾濫原間のインタラクションおよび破堤の取り扱いを整理した。

水害被害推定のモデル化については、暴露資産(Exposure)データベースの構築し、台風による洪水イベント2事例について被災世帯数の推定を試み、良い結果を得た。

研究開発項目9: 気象制御におけるRRI

翌(2024)年度から実施予定のため、当該年度の実施はない。

研究開発項目10: 情報科学を活かした社会調査・発信

集中豪雨の生成過程や介入効果の可視化を目的とし、気象数値モデルにおける3次元空間中の物理量の時間変化(4次元データ)を表現する幾何変換に関して、雲領域の抽出、接平面への射影、対応点推定、幾何変換の推定を行った。また、大規模ボリュームデータの可視化技術を調査し、代表的な4つのカテゴリを抽出した。

(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等で研究開発の状況を共有するこ

となどにより、PI や研究者間の健全な競争と協働を推進した。

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、その成果を適宜社会へ還元していく計画である。また、情報発信の手段・手法の検討も成果が得られ次第、利用していく。

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等については、来年度の実施に向けて計画を策定した。また、気象関係で海外に展開している企業である株式会社ウェザーニューズとの協力関係の検討を始めた。

広報、アウトリーチ

シンポジウムや市民対話の会合等の具体的な案件はなかった。専用 Web サイトについては、専任者を 1 名採用し、来年度での改修を計画した。

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 20 件登録した。ただし、NII 研究データ基盤や zenodo などのデータリポジトリの使用、Github や Gitlab によるプログラム/アルゴリズムの共有などの具体的な事案はなかった。

なお、PI 等から要望が強かった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 700TB)について、来年度の運用開始に向け、購入手続きを開始した。

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:

数値気象予測モデルについて調査し、モデルの規模や計算ライブラリの可用性などの観点から制御手法開発に適したモデルとして、理化学研究所計算化学研究センターで開発された領域大気モデル SCALE-RM を選定した。計算環境としては、汎用 PC および京都大学情報環境機構スーパーコンピュータシステムを使用し、いずれにおいても SCALE-RM が実行可能なことを確認した。

続いて、モデルの状態に摂動を加えたシミュレーションを実行するための設定やプログラムの修正方法を調査し、SCALE-RM の大気状態を修正するプログラムやシミュレーション結果を可視化するプログラムを Matlab および Python で開発した。気象シミュレーションの事例としては、鉛直面内で地形を考慮しない Warm Bubble 実験を選定した。すべての計算格子における初期条件を順番に摂動させるシミュレーションを行い、初期条件の摂動に対する累積降水量の感度行列を差分近似によって求めた。選定した事例では、摂動を加える箇所が水平 y 方向 40、鉛直 z 方向 97 で合計 3880 箇所である。累積降水量は水平方向 40 点に対して得られるので、感度行列のサイズは 40×3880 となる。

線形性を仮定すると、複数の初期条件を同時に摂動させたとき生じる累積降水量の摂動を感度行列によって予測することができる。たとえば、元のシミュレーション結果における累積降水量をすべての地点で 90%に減らす場合、10%の摂動を生じさせるために必要な初期状態の摂動を逆算することができる。そのような初期状態の摂動は一意ではないが、最小自乗法でノルム最小解を得ることができる。図 1-1-1 は、そうして求めた摂動を初期状態に加えたシミュレーション結果(青実線)を目標値(赤破線)と比較したグラフであり、良い一致が得られている。したがって、感度行列によって降雨量摂動を予測できることが示された。

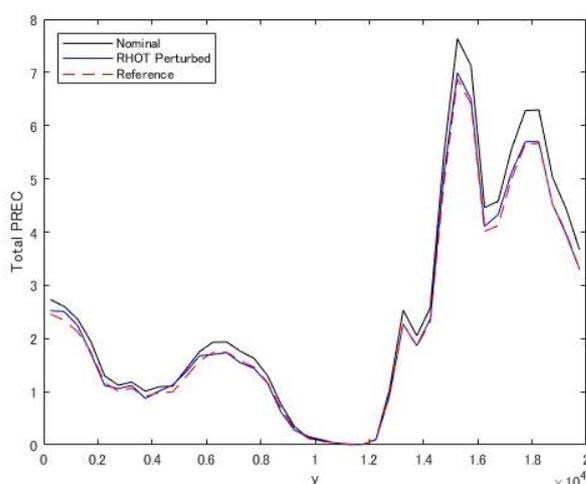


図 1-1-1: 水平位置 y における累積降水量が元のシミュレーション結果(黒実線)の 90%(赤破線)になるよう、感度行列を用いて初期条件を修正した場合のシミュレーション結果(青実線)

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:

データ駆動型の制御数理を用いた気象制御手法の開発に有用であると考えられる数値

気象予測モデル、およびそれらモデルへ適用しうるデータ駆動型制御数理の一覧を作成した。多角的、俯瞰的な観点から文献調査を行うことで、当初想定していなかった Expensive Optimization ならびにサンプルベースモデル予測制御という二手法を把握し、一覧に加えることができた。

本一覧に含まれる制御数理のうち、特に有望であると考えられる1) 深層展開を用いたモデル予測制御と2) Expensive Optimization の評価を行った。前者は Miyoshi らの設定を踏襲して Lorenz 63 モデルへと適用し、評価を行った。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 程度と Miyoshi らの結果と比較して困難性の大きいと考えられる場合においても、深層展開を用いたモデル予測制御は高い制御成功率を呈した。このことから、深層展開を用いたモデル予測制御の気象制御へ向けた有効性が示唆された。

また本評価の副産物として、Miyoshi らが提案した制御アルゴリズムの適用限界が明らかとなった。後者については Expensive Optimization の代表的な手法であるベイズ最適化を SCALE-RM における warm bubble 実験に対して適用し、評価を進めている。網羅的な評価は未完であるが、評価を開始するに十分な実装は既に完了している。また予備的な評価からはベイズ最適化を用いることで warm bubble 実験における降水量を有意に小さくするような初期摂動を、比較的小さな計算量で獲得可能であることを確認した。

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想手法の開発

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:

現時点で出版または公開されている代理モデルに関する論文の調査を行った。調査対象の論文は全て2020年以降に公開されたものであり、計21編である。各論文において、「機械学習手法」「対象とする現象」「パラメータ数」「対象エリア」「空間分解能」「リードタイム」「時間分解能」「入力値の時間ステップ」「予測の時間ステップ」「初期条件」「境界条件」「学習データセット」「訓練/検証/テストデータの分け方」「前処理」「入力値となる物理量」「出力値の物理量」「誤差関数」「評価指標」「比較対象」「予測精度」「計算リソース(学習時)」「計算時間(学習時)」「計算リソース(テスト時)」「計算時間(テスト時)」「議論・今後の課題」「その他特記事項」を調査対象項目とした。

既存モデルのほとんどが全球スケールを対象としたものであり、ECMWF の大気再解析データ(13気圧レベル、水平0.25度~1.4度、6時間間隔)から学習したものであった。また、多くが入力1ステップかつ出力1ステップであり、出力データを自身への入力とする自己回帰モデルであった。入力データと同じ物理量を出力するものであった。多くのモデルでは、入力および出力データとして東西風、南北風、気温、気圧、比湿等を用い、降水量を直接的に入力または出力するモデルは少数であった。調査結果から検討された、本研究開発におけるモデルの概要を表2-1-1に示す。

表 2-1-1: 開発予定のモデル

ML architecture	CNN (Attention R2U-Net), Vision Transformer (Swin Transformer)
Loss function	Latitude-Weighted MSE, Pressure-weighted loss, MAE , CRPS (, PSNR, DSSIM?)
Preprocessing	Z-score normalization for each 2D data
Input variables	3D: U, V, T, Q, RH, Z 2D: U10m, V10m, T2m, MSLP, Total precipitation (TP), OLR Fixed: Sea/land, Geopotential height
Output variables	Same as input (excluding fixed variables) -> Precipitation
Pressure level	13 level
Temporal resolution	1 h, 3 h, 6 h, 24 h
Forecasting approach	Direct forecasting, Continuous forecasting, Iterative forecasting
Training data	GPV-MSM, DSJRA55
Training approach	Base model + Fine-tuning (precipitation)

本研究開発課題において対象とするのは、上記とは異なり領域スケールの降水量を予測するモデルである。そのため、①領域スケールの代理モデル開発、②気象場データから降水量データへの変換、③全球-領域結合代理モデル開発、④アンサンブル予測への拡張、⑤モデルの軽量化といった流れで令和 6 年度以降の開発を進める。また、現実的に利用可能な GPU 計算機の性能を考慮し、気圧面については 4 レベル(1000、925、850、700 hPa 面)からスタートし、予測精度とモデルサイズとのトレードオフを考慮しながら順次増やすこととする。

課題推進者: 松岡 大祐 (JAMSTEC)

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:

① 気象予測のための代理モデルの調査

気象予測に向けた代理モデルが近年様々提案されている。これに関する調査を行い、多くのモデルが Vision Transformer (注意機構を持つ代表的な画像処理モデル) を元に構成されていることを確認した。特に ClimaX (およびその後継である Stormer) は Vision Transformer に最小の修正を施し気象予測タスクに取り組んだものであり、気象予測におけるモデル構成の方針に重要な指針を与えるものである。

気象予測における入力データは、全世界の各点における(ある変数の)測定値/再解析値であるため、行列(2次元配列)として考えることができる。画像の場合は RGB の 3 変数があるが、気象データの場合は温度や風速などの多くの変数があり、また各変数の持つ情報は大きく異なる。ClimaX ではこの性質を踏まえ、多数の変数を学習を通じて 1 変数に圧縮することで効率化を図っており、また結果として高精度の気象予測を実現している。この変数圧縮の過程が大きな役割を果たしており、この圧縮の後には比較的標準的な Vision Transformer モデルにより高精度の気象予測が可能である。この調査結果に基づき、変数圧縮の改良を試みた。

② ClimaX モデルの改良

ClimaX モデルの変数圧縮では、入力の多変数を一つの代表変数(に対応するベクトル)に圧縮している。しかし、60 程度の変数の情報を一つの代表変数に圧縮することは原理的に元の入力情報を大きく損なっているはずである。それにも関わらず良い予測精度が達成できているということは、この一つの代表変数に対応するベクトルには複数の代表変数が同居していることを示唆する。この考えに従い、明示的に複数の代表変数に対応するベクトルへの圧縮を設計した(図 2-2-1)。

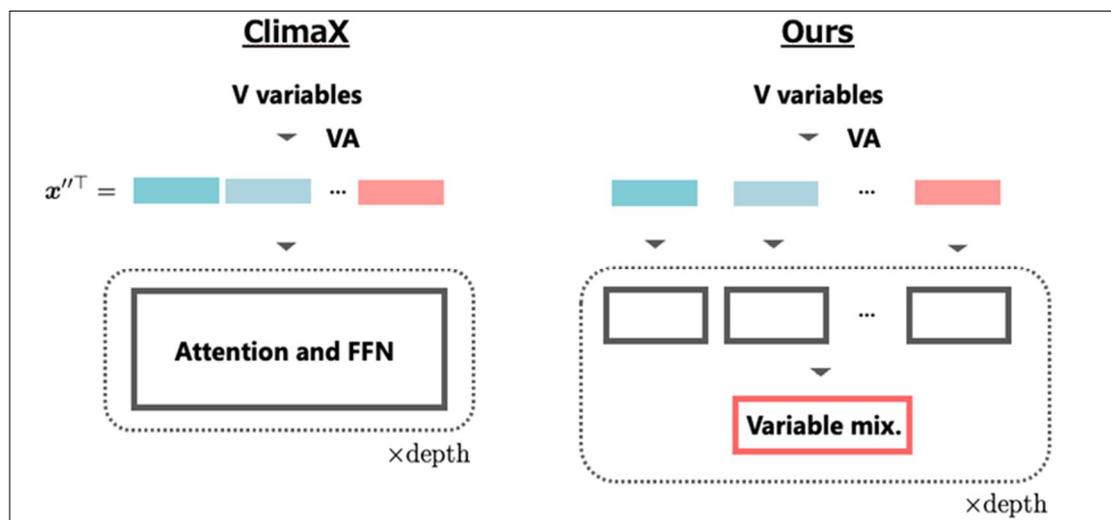


図 2-2-1: ClimaX と提案モデルの構成を比較する概要図。ClimaX では一つの代表変数(を表現するベクトル)を扱っているが、おそらく内的に複数の変数が同居している。提案手法ではこれを明示的に分離し、その代わりに要所要所で代表変数の相互作用を行っている(図中の Variable mix.に対応)。

各代表変数に対応するベクトルは短くて良い。例えば、代表変数を n 個準備した場合、ベクトルの長さは従来の $1/n$ になり、これはモデルのパラメータ $1/n^2$ に減らす。これにより、ClimaX(約 1 億パラメータ数)を約 50%削減することに成功し、また気象予測の精度を大きく向上させた。

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:

深層学習による静的なデータの低次元化技術とレザバー計算による非線形時系列予測手法に関して、それぞれ最新の技術動向を調査し、関連する技術・手法を把握し、比較検討の対象に加えるかを検討した。その結果、気象制御に資する技術開発に繋がらう可能性のある、重要だと思われる文献を複数リストアップすることができた。

深層学習を用いた動的な場の時間推移の低次元化に関しては、オートエンコーダを用いて時空間データから背後にある力学系を潜在空間に再構成できる事を示している研究、位相幾何的に正しいアトラクタの再構成となっていることを絡み数(Linking number)と呼ばれる保存量を計算することで示した研究、convolutional autoencoder echo state

network (CAE-ESN)を提案し、乱流のダイナミクスを予測できる事を示した研究、オートエンコーダで次元削減し、Sparse identification of non-linear dynamics (SINDy)で潜在空間のダイナミクスの予測モデルを立てている研究、などがある。

また、レザバー計算による非線形時系列予測手法に関して重要と考えられるものとして、気象における対流現象の生成や消失が非線形微分方程式モデルにおいて分岐現象として現れうる場合に、分岐現象そのものが観測された訓練データに存在しない場合においてもそれを予測することがレザバー計算の枠組みにおいて可能になることを示した研究がある。

以上に挙げた先行研究の手法や結果に基づいて、新たな手法開発や数値実験を次年度から取り組む計画で、対流の流れの場という高次元なデータから抽出された低次元な潜在変数のダイナミクスのレザバー計算による抽出や、対流に対応する分岐現象のレザバー計算による予測など、が行える見込みである。

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:

クープマンモード分解 (Koopman Mode Decomposition; KMD) と動的モード分解 (Dynamic Mode Decomposition; DMD) に関する技法を6つ選定した(図 3-2-1)。

<p style="text-align: center;">Original method</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schmid (2009) • SVD and POD-based • Initially applied to fluid data 	<p style="text-align: center;">Arnoldi-type method</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rowley et al. (2009) • Companion matrix-based • Initially applied to fluid data
<p style="text-align: center;">Exact method</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tu et al. (2013) • SVD-based • Widely used in literature 	<p style="text-align: center;">Prony method</p> <ul style="list-style-type: none"> • Susuki & Mezic (2016) • Hankel matrix-based • Delay embedding utilized
<p style="text-align: center;">Kernel-based method</p> <ul style="list-style-type: none"> • Williams et al. (2014); Kawahara (2016) • Gaussian kernel normally used • Applied to SST data in Navarra et al (2021) 	<p style="text-align: center;">Sparsity-based method</p> <ul style="list-style-type: none"> • Jovanovic et al. (2014) • L1 norm-based penalization • Initially applied to fluid data

図 3-2-1: KMD および DMD に関する技法

各技法について、DMD の研究事例の把握を行うだけでなく、その数値的適用による性能評価も行った。数値的適用のためのデータセットとしては、データ同化の評価などでよく用いられる、Lorenz96 モデルから生成する時系列データ(状態変数の次元は 40)とした。また、Sparsity-based method を除く 5 つの技法を時系列データに適用し、KMD として得られた時系列の線形モデル(潜在空間表現の一種)の予測精度を評価することで、周期的データには Prony method が有効である一方、準周期的なデータには Original、Exact、Arnoldi-type methods が有効であるという結果を得た。定常系列を表すアトラクタの種類(前者はリミットサイクル、後者はトーラス)に依存した結果は、次年度以降の潜在空間表現の開発において、モデルないしは現実大気ダイナミクスを扱うにあたり示唆的である。

また、Kernel-based method の予測精度はどちらのデータに対しても他技法に劣った結果となった。

以上の数値的適用による性能評価と文献における DMD の研究事例の把握をふまえて、評価した 5 技法においては、パラメータの調整が必要である Kernel-based method を除く 4 技法を今後活用する技法としてリストアップすることとした。また、集中豪雨という現象に対するデータセットが空間サンプル数と比較して時間サンプル数が極めて少ないという特性を想定し、この状況で効率的なデータの低次元化が期待できる Sparsity-based method も今後活用する技法として加えてリストアップすることとした。

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：

ランドスケープ解析手法を台風進路のアンサンブル気象予測データに適用し、実際の現象と矛盾のないポテンシャル流れ（本質的軌道）と回転流れ（ノイズや微小摂動）に分解されていることを確認した。次に、ランドスケープ構造から分水嶺を特定するために、等高線がポテンシャル流れの軌道を描く直交ポテンシャル（流れ関数）を導入し、その計算

アルゴリズムを流れ関数・渦度法に基づいて開発した(図 3-3-1)。

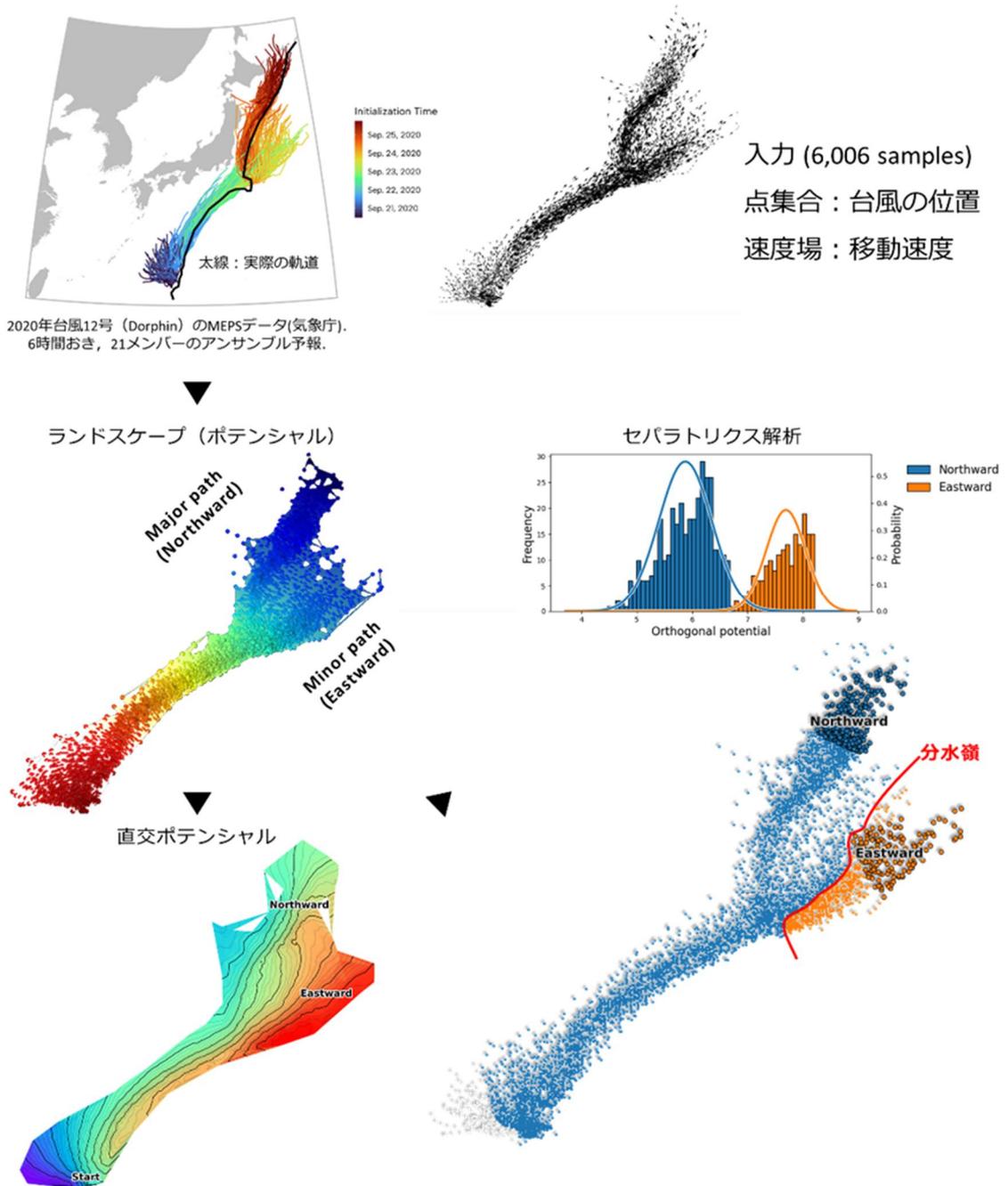


図 3-3-1: 2020 年における台風 12 号 (Dolphin) のランドスケープ解析

さらに、あらかじめクラスタリングによって定義された終端領域 (Northward/Eastward) に対し、それぞれの上の直交ポテンシャルの分布をガウス分布で近似し、そこから得られる 50% 閾値で、それぞれの終端領域に向かう確率的境界を定めた (セパトリス解析)。この境界の左側/右側はそれぞれの終端領域に行く確率が高いことを示すため、この境界は分水嶺 (Separatrix) と解釈できる。

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(洋上ドーム形成)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-RM を用い、モデル内の地形を一部変更することで洋上ドームの効果を導入した。これを富岳上で実行できるように環境を整備し、制御を行った場合と行わなかった場合について実験を行い、シミュレーション結果を比較することで、制御の効果を検討した。対象とする事例は平成 27 年 9 月関東・東北豪雨とし、洋上ドームによりドームの風下側に 12 時間積算で 30mm 程度の強雨域が生成されることを確認した。ドームの大きさに対する感度についても調査を行ったところ、大きいドームほどドーム風下の雨量が多くなる傾向が確認されたが、降水の増加量はドームサイズ増分に比例せず、効果に上限があることも示唆された。しかしいずれの場合でも、降水量が増加した領域からその風下域における水蒸気量や降水量の減少は不明瞭であった。

また、大アンサンブル予測情報については、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により、性質の良いアンサンブルを生成する手法の開発にも取り組んだ。対象とする事例は、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨、令和元年東日本台風、令和元年 10 月 25 日の大雨とした。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・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た。並行して、アンサンブルデータ同化によるアンサンブル予測生成も行った。アンサンブル数は 100 である。

現時点ではこれらは独立して実行されているが、これらを組み合わせることで、モデル初期値だけでなくモデルバイアスを考慮した予測の生成が可能になる。

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:

① 低次元力学系モデルを用いたモデル予測制御研究

要素プロジェクトから引き継いだ Lorenz 3 変数モデルを用いたモデル予測制御研究を進めた。Miyoshi and Sun (2022, NPG) と同様に、ローレンツバタフライを正側に誘導する実験を行い、期待通りの結果を得た。

② 変分オートエンコーダを用いた次元圧縮

変分オートエンコーダ (Variational Autoencoder; VAE) を用いた、気象情報の情報圧縮について調査を進めた。理想的なランキン渦を対象にして、そのランキン渦からドップラー風速に相当する観測がサンプルされたときに、その観測値からランキン渦を推定可能か調査した。

ここでは、確率過程のないオートエンコーダ (Autoencoder; AE) と、確率過程を含む条件付き変分オートエンコーダ (Conditional Variational Autoencoder; CVAE) の比較を行った。その結果、変分オートエンコーダによりランキン渦の潜在空間表現を獲得できることが示された。両者を比較して、テストデータに対しては、確率過程を含む変分オートエンコーダにより、より効率的な情報圧縮が可能であることが示された。

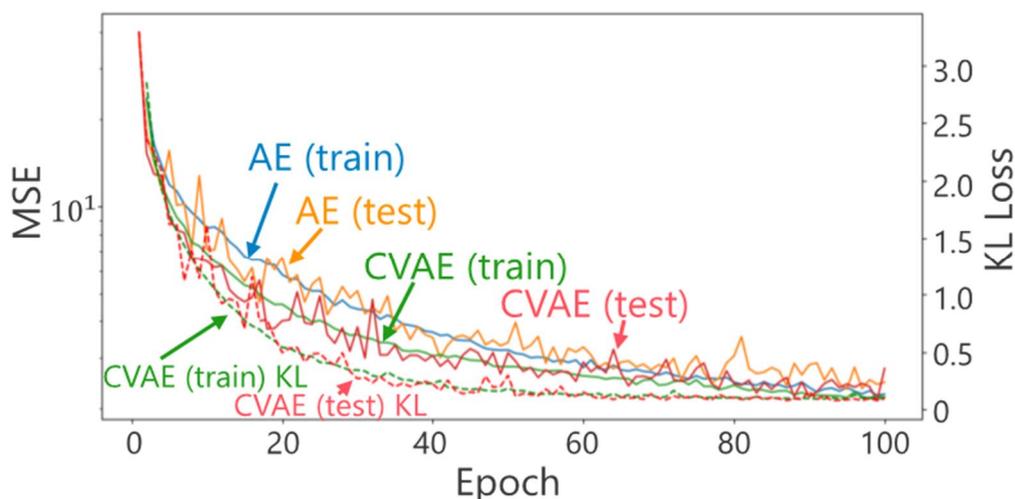


図 4-2-1: オートエンコーダ (AE) と 条件付きオートエンコーダ (CVAE) の平均二乗誤差 (実線)と Kullback-Leibler (KL) Divergence (点線)の推移の比較。投稿準備中の論文、井貫ら (2024) から引用。

③ 量子アニーリングを適用したデータ同化手法の開発

データ同化手法の一つである 4 次元変分法 (4DVAR) に、量子効果を利用することで最適化問題を高速に解くアルゴリズムである量子アニーリング (Quantum Annealing; QA) を適用した量子データ同化 (Quantum Data Assimilation; QDA) を開発した。特にノイズ耐性を持つ量子データ同化手法の検討を進めた。量子効果を用いるアニーリングマシンでは、結果は量子状態を読み出す度に变化する。この変化は、量子効果を用いる以上不可避であり、その変化に対して頑強なアルゴリズムを検討する必要がある。ここでは、読み出し回数を単純に増やすことで、計算結果の安定化を行った。読み出し回数を増やしても、計算時間は線形にしか増えないが、その一方で推定精度を改善できることを示した。

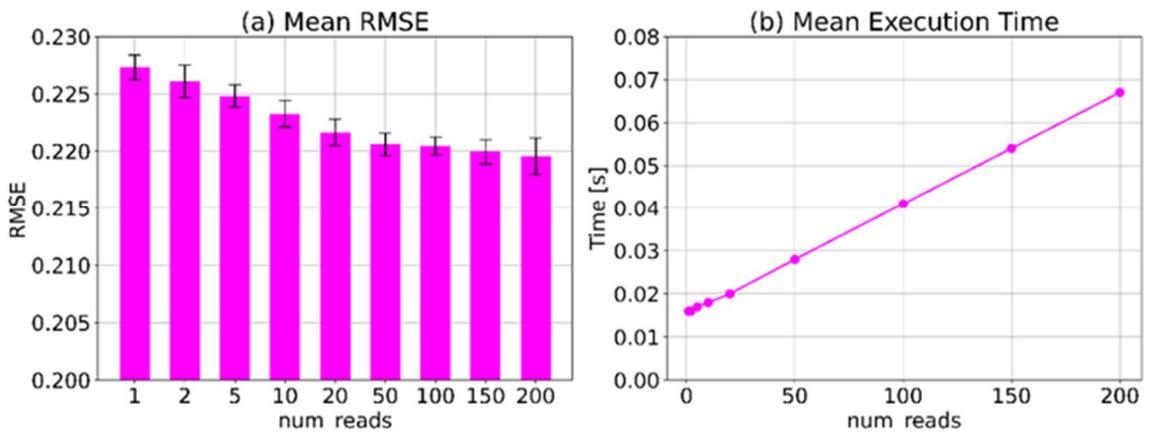


図 4-2-2: 量子アニーリングデータ同化における、読み出し回数を変化させたときの推定精度 (a) と計算時間 (b) の比較。印刷中の論文、Kotsuki *et al.* (2024; NPG) から引用。

ここまでの検討では、評価関数を接線形近似しているので、評価関数は 2 次関数であり、勾配法による最小値探索に大きな困難はない。しかし、非線形性が強い場合には評価関数に複数の極小値が存在し得る。量子アニーリングによれば大域的な最小値を求めることができるので、その計算方法を検討した。その結果、アンサンブル 4 次元変分法 (4DnEnVar) を利用することにより、最小値探索をアンサンブル空間で行なえるので、大規模問題では計算量を大きく減らすことができ、共分散局所化が必要ないほどアンサンブルサイズ N を大きくすれば、行列の計算に必要なアンサンブル時間積分は $N(N + 1)/2$ 個、行列を収納するメモリは nN^2 オーダーとなることが分かった。さらに、時間積分の計算時間については、機械学習による surrogate model が利用できれば大きく削減できる。

④ アンサンブル気象予測情報を用いた台風進路のランドスケープ解析

ランドスケープ解析は、1957 年に C. H. Waddington により生物学分野で開発された手法であり、細胞が分化する過程を標高の高いところから低いところへ転がり落ちるボール (potential flow) に例えて可視化し、細胞の分化プロセスを potential flow によって表現する。本課題では、ランドスケープ解析をアンサンブル気象予測情報に適用し、気象の取りうるシナリオの評価を試みた。

図 4-2-2 に、2021 年の台風 8 号 (NEPARTAK) に適用した事例を示す。MEPS から推定した熱帯低気圧の進路予報データを使用し、図 4-2-2b に表されるような Hodge potential を得た。ランドスケープ解析が、様々な台風に適用可能であることを示した。

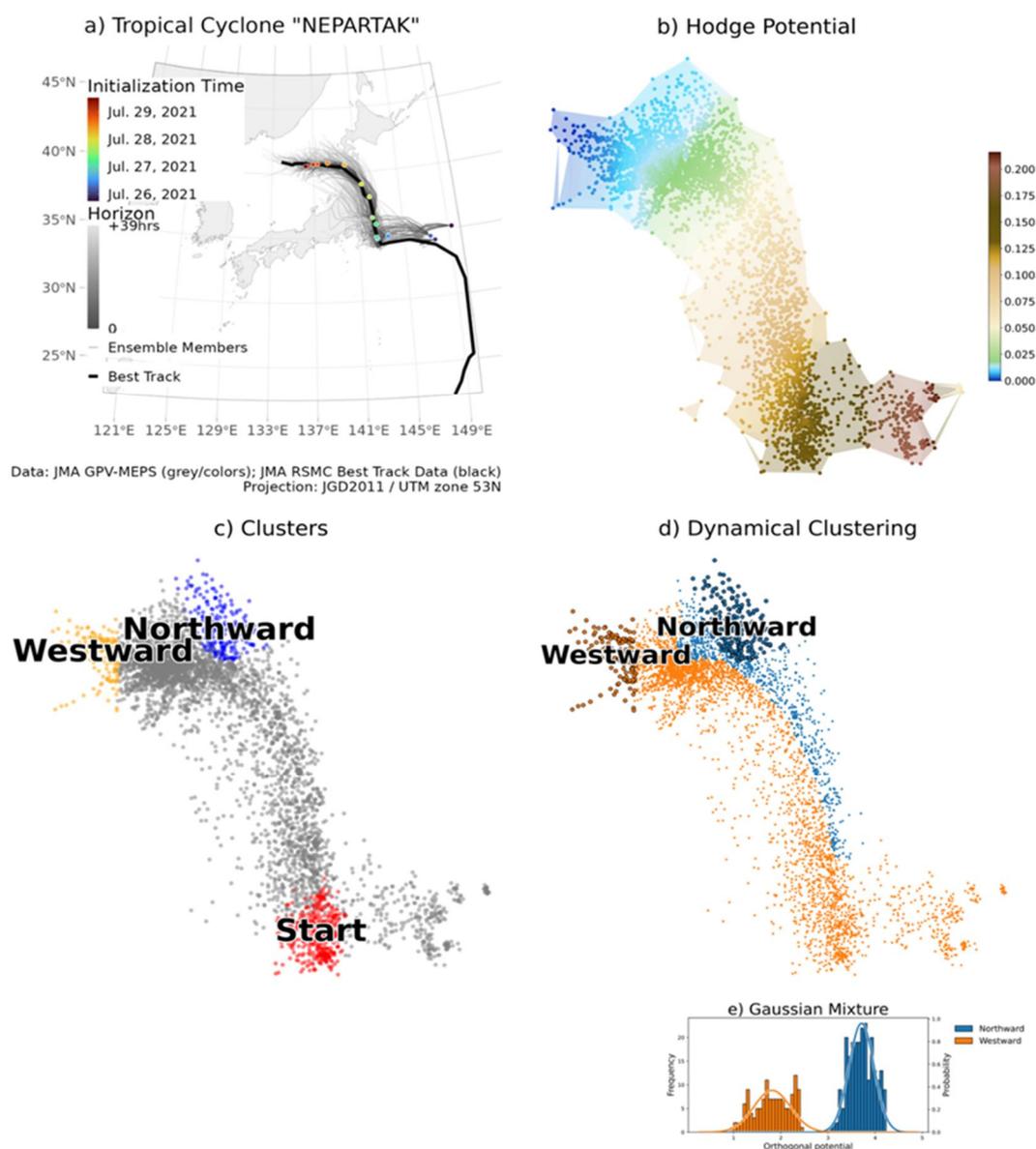


図 4-2-2: ランドスケープ解析のワークフロー。a)はランドスケープ解析の入力データ、b) は Hodge ポテンシャル、c)と d) は、台風進路を北向きと西向きに区別した場合の台風が向かう進路を分ける分水嶺を示す。投稿準備中の論文、Oettli *et al.* (2024) を改変。

課題推進者: 小槻 峻司 (千葉大学)

(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:

① 豪雨事例の再現に関して

2021年8月12~13日にかけて九州地域で発生した豪雨事例の再現を行った。鉛直解像度に関しては、最下層で20mから徐々に大きくしていき最上層で200mとなるように設定した。モデルの計算領域に関しては、チベット付近までカバーするような広い領域の場合か、対象とする降水帯を中心とした総観規模(2000 km)程度の狭い領

域の場合に豪雨の再現性が相対的に良くなることが分かった。また解像度に関しては、計算機リソースの観点から 800 m 程度までの高解像度化が可能であることが分かった。雲微物理過程に関しては、1 モーメントのバルクモデルである Tomita (2008) を用いているが、雪やあられに関しては数密度を大きくするようにパラメータを調整すると、可降水量の再現性が良くなることが分かった。

② 介入手法の数値モデルに組み込みとそれを用いた試験的な介入実験に関して介入手段として、

[A] 地表からの噴水による水滴の散布

[B] 航空機による (B-1) 雲氷、(B-2) 雪、(B-3) あられに対する種まき

[C] (C-1) 地表からのマイクロ波の放射による直接加熱、(C-2) 航空機によるドライアイス散布による直接冷却

[D] 地表における凧のような抵抗物の設置による地表風の弱化

の 4 分類の 7 手法のモデル化と数値実験を行った。

[A] では、電力上限を 100MW と仮定して海上に設置した 100 台の揚水機から 600m 程度上空に 100kg/s で雨水を散布するモデル化をして介入を試みたところ、1%程度の降水の変動を起こす効果が確認できた。

[B] では、ジェット機 1 台あたりの積載量を 1000kg として、10~15 分程度である領域に上空から 2 台のジェット機を用いて氷を散布するモデル化をして介入を試みたところ、(B-1) 雲氷、(B-2) 雪、(B-3) あられ、いずれの種別に関しても最大で 0.1%程度の降水の変動しか引き起こせなかった。

[C] (C-1) 地表からのマイクロ波の放射による直接加熱に関しては、電力上限を 100MW と仮定して、海上に設置した 1MW の出力の 100 台のジャイロトロンにより下層空気を直接加熱するモデル化をし、(C-2) に関してはジェット機 1 台あたりの積載量を 1000kg として 10~15 分程度である領域に上空から 2 台のジェット機を用いて散布するモデル化をした。どちらの介入においても、最大で 0.1%程度の降水の変動しか引き起こせなかった。

[D] に関しては、幅 200m×有効高さ 300m の凧を 100 枚設置するようなモデル化をして介入を試みたところ、最大で 10%程度の降水の変動を引き起こすことが可能であることが示唆された。

以上をまとめると、当該年度に取り組んだ 4 分類の 7 手法のモデル化と数値に関しては、凧のような抵抗物が最も有望であることが明らかになった。ただし、材料の実現性についての調査は行っていない。

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：

再解析や数値モデル出力の気圧面データから、各種の不安定度指標を求めるプログラムを作成した。求めた不安定度指標は、対流有効位置エネルギー (CAPE)、エントレインメントを考慮した CAPE (ECAPE)、対流抑制 (CIN)、持ち上げ凝結高度 (LCL)、自由対流高度 (LFC)、鉛直積算水蒸気フラックスおよびその収束、など約 20 種類である。

2021年8月中旬に発生した「前線による大雨事例」を対象に、SCALE-RM 数値モデル実験を多数実施したが、現時点では介入を行う地点は主観的に決定されている。豪雨生成に有効な介入操作の検討を効率的に推進するためには、豪雨事例を増やすことよりも特定の豪雨事例に焦点を当て、介入操作を行う地点およびその効果の評価に注力したほうが良いとの判断に至った。

そこで、数値実験結果に不安定指標計算プログラムを適用し、各地点での3時間積算降水量と、降水積算開始時刻における不安定度指標との関係を調べた。各種の不安定度指標と3時間積算降水量との関係を調査した結果、CIN、LCL、LFC、可降水量、鉛直積算水蒸気フラックス収束の5つが、3時間積算降水量と比較的良好な関係にあることが分かった。一方で、CAPEやECAPEとは良い関係が見られなかった。これら5つの不安定度指標の地理分布から、介入操作に適した地点を客観的に選定できることが期待される。

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：

ベクトル型スーパーコンピューターAOBA-S(東北大)上に数値気象モデルWRFをインストールし、高解像度の数値気象計算に適用可能なWRFモデルを実装することに成功した。これを検証するため、気象介入操作実験の対象とする近年の豪雨イベント、および全球再解析データERA5を用いた豪雨時の水蒸気の流入を解析による多量の水蒸気の流入に起因するイベントを調査し、2014年8月広島豪雨、2022年8月東北・北陸豪雨、2023年7月秋田豪雨を選択した。これらのイベントについてAOBA-S上にインストールしたWRFモデルを用いて降水量の再現計算を実施し、降水量の再現性に与える影響を解析した。2014年8月広島豪雨については、初期境界条件としてGFS-FNL、物理スキームとして雲微物理Thompson・境界層MYNN2.5、計算開始時刻として2014年8月19日6AM(UTC)とした際に最も降水量の再現性が良くなることを確認した。

さらに、WRFモデルを用いたアンサンブル計算における初期・境界条件への摂動操作手法を調査・検討し、大気加熱や加水などの実際に想定する気象介入手段を数値気象予測モデルに反映させる手法について検討し、①人工建造物の設置、②海水面温度の低下、③噴水による加水、④大気加熱の4つの気象介入手段の再現を実施することに成功

した。図 5-3-1 に噴水による加水を実施した際の気温低下を示す。

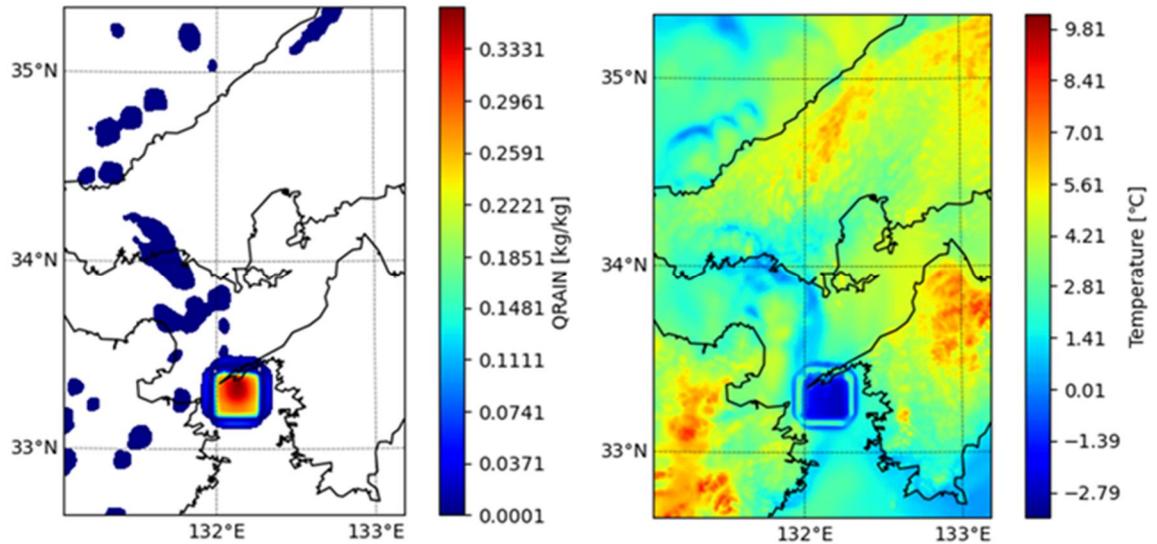


図 5-3-1: 豊後水道上の 24×24km (i-j 平面) × 700m (鉛直) の空間範囲に、0.01kg/kg の雨水比を 60 分間加えた際の、地表 500m 雨水比(左)と地表 500m 気温(右)。

また、豊後水道上における①人工構造物の設置、②海水面温度の低下について複数パターンを想定し、2014 年 8 月広島豪雨を対象に、海上豪雨の生成と陸域豪雨への影響評価を実施した。これによれば、海上における豪雨の発生については、大気の状態が非常に不安定(LFC<500m)な状況においても、数 100m の鉛直スケールの人工構造物の設置は必ずしも海上豪雨の発生につながらないことが示された。これは、流下方向の延長が不足しているために強い跳水現象につながったことが原因であることが解析された。陸域豪雨への影響については、人工構造物の影響は非常に大きく、強雨域において 6 時間累積降水量 50mm 以上の減少が見られたケースもあった。一方で、人工構造物を回り込むことにより、異なる地点で新たな強雨域が発生するケースもあり、人工構造物の鉛直高さと下流の降水パターンに非線形の関係が確認された。

海水面温度の低下については、0.1～10K の低下を反映したものの、海上豪雨の生成には殆ど効果がなかった。一方で、下流の陸域豪雨への影響は大きく、2.5K 低下させたケースでは陸域の降水量が全体的に減少した。海水面温度の低下の領域を更に限定した解析により、30×30km の領域における 2.5K 程度の海水面温度低下によって、下流の強雨域において約 100mm の 6 時間累積降水量の減少が可能になることが示された

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:

POLARRIS ソースコードのさらなる解析の結果、POLARRIS は一般にマイクロ波減衰が無視できる低周波レーダ (S バンドやC バンドなど) を想定しており、マイクロ波減衰を考慮しない設計になっていることを見出した。一方、減衰効果の算出は大気加熱シミュレータ設計に不可欠である。そこで、計画段階で想定した POLARRIS

ソースコードに減衰補正ルーチンを追加する方法と、大気放射シミュレータを新規に開発する方法とを比較・検討し、実作業量とシミュレータ設計上の柔軟性の観点からなどから新規にプログラミングする方法を採用した。
 そこでまず、大気加熱シミュレータ新規開発の理論的基礎の検討を行った。その結果、以下の物理方程式を導出した。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_t G}{4\pi\rho C_p r^2} \sigma_{\text{abs}}(r) \exp\left[-\int_0^r \sigma_{\text{ext}}(r') dr'\right]$$

ここで左辺は大気加熱率、右辺の各変数は次のとおりである。

P_t :マイクロ波送信電力, G :放射機アンテナゲイン, ρ :大気密度, C_p :大気比熱, σ_{abs} :大気マイクロ波吸収係数, σ_{ext} :マイクロ波消散係数, r :放射機からの距離

本物理方程式をもとに、大気加熱シミュレータの新規開発に着手した。

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令和5年気象業務法改正を受けた同法17条1項による気象庁長官の予報業務許可の法的性質、②災害対策基本法(災対法)における「基礎的な地方公共団体」である市町村の長が河川法その他の主要な水災害対策法制において認められている法的地位、③河川法と「車の両輪」として位置付けられることもある水防法における伝統的な仕組みである水防計画の現状について、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、令和5年気象業務法改正により一定の規制緩和ないし許可基準の変更が行われたものの、国際機関における気象業務の均質・確実な実施のために採択された技術規則等の実施を1つの制度趣旨とする点において他の国内法における許可制度と一線を画する予報業務許可の特徴に特段の変化は看取できなかった。

②について、市町村長の地位が水防法の逐次改正等により(水防管理者としての地位にとどまることなく)水災害対策法制上広範化していること、特に、福祉と防災を切れ目なく連結させる災対法上の仕組みにおける市町村長の権限(同法49条の10以下)のみならず、主要な水災害対策法である河川法上の河川において定めなければならない河川整備計画の策定または変更にあたって必ず関係市町村長の意見が聴かれなければならないこと(河川法16条の2第5項、同法施行令10条の4第1・2項)などを踏まえることを通じて、単なる住民代表にとどまらない市町村長(およびその補助機関)の法的地位がある程度明らかになった。これは、河川管理者の水防関係者に対する情報提供責任を肯定した裁判例(東京高判昭和56年10月21日判時1149号54頁など)、現場との近接性を要するという防災活動の特性、災害応急対策段階から復旧・復興段階への円滑な移行(災対法90条の2以下参照)、大規模災害に相当する事案に係る措置を定める関連

法令の仕組み(下図参照)等を併せて考慮すれば、気象制御が求められるような大規模水害のおそれが認められる事案においても、市町村長への連絡体制の整備、市町村長の権限との調整等が不可欠であることを示唆している。

③について、複雑な法令間ないし計画間において狭義の水防活動のみならず、管区気象台を含む関係機関との通信連絡体制の概要や河川管理者との協力等に関する事項も定めるべき都道府県水防計画では(水防法2条6項参照)、国土交通省の(気象庁職員を含む)緊急災害対策派遣隊(TEC-FORCE)による実施が想定されている特定緊急水防活動(同法32条)について何ら記載されていないこと、タイムライン(防災行動計画)との役割分担が明確でないことなどの課題が認められる。さらなる現状分析を要するものの、気象制御手段の実装化に際して調整が必要な関連法制自体に解決すべき課題が少なからず残されていることを示唆する結果である。

なお、以上の検討結果(の一部)を基に ELSI 研究体制の整備に努めた。

課題推進者：重本 達哉 (大阪公立大学)

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：

まず、気象制御との類似性は度外視したうえで、国家補償関係の規定を置く個別法の網羅的なリストアップを試み、各個別法の立法趣旨、仕組み、運用等を確認しつつ、気象制御との類似点、相違点を確認することで、気象制御における補償制度の特徴を抽出するという研究の方向性を確認することができた。

はじめの分析対象には、予防接種法を選定した。法学分野においてオーソドックスな研究手法である文献調査(コンメンタール、学術書、研究論文、判例など)を中心に考察を進めた。また、その内容について ELSI 法的課題グループとの質疑応答・議論を通じて内容を精査した結果、暫定的ではあるが下記のような見解が得られた。

気象制御と予防接種の類似性として、第1に被害が発生することを織り込んだうえで行われることが、第2に誰にどのような損害が発生するかが不明確な状況で行われることが挙げられる。気象制御の問題が国家賠償と損失補償の単純な二分法で説明できない領域であることを示しているといえる。他方、気象制御との相違点として、予防接種による被害が特定個人の生命・身体に対して発生するのに対して、気象制御の場合に想定される被害は、渇水、農業・漁業への影響、生態系への影響など多岐にわたることが挙げられる。したがって、予防接種の場合以上に、因果関係の認定、補償額の決定、審査会の委員選定などにおいて困難が予想される。

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、法律・政令等、一般に公表されている法令の収集を行った。ダム操作は、下流の水位を変化させ、また利水機能をもつダムについては、利水容量に影響を与え得ることから、河川流域の自治体、別の河川の管理者、利水の受益者らの公的・私的利益に影響を与える。このことから、ダム操作のルールの策定には、利害関係人

の意見を反映させるための協議手続を経ることとなっている。

このように、ダム操作においては、ダム操作によって影響を受ける複数の者の利益の間で調整が行われている。このような利益の調整は、気象制御においても必要となると考えられ、これが法的課題のひとつとなると予測される。

また、利益の調整の方法も課題となると考えられる。利益の調整としては、操作ルールを策定する段階で利害関係者の意見を反映させる手続の整備が考えられ、また、被害を受ける者を救済する損失補償制度の整備が考えられる。どのような方法が適切かということを検討する必要がある。これらの成果をまとめて項目 7 の PI 会合で紹介し、メンバーと共有を行った。

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：

わが国の火災保険水災補償条項について、とりわけ水災料率の細分化に関する議論の現状と課題について検討を行った。

火災保険における補償は、自然災害を含めた建物、家財等の損害を幅広く含めた保険商品となっているが、保険収支の面では、自然災害の多発、激甚化により厳しい状況が継続しており、近年は火災保険料率の引き上げが不可避となっている。

次に、水災保険料率は、ほとんどの損害保険会社の火災保険で全国一律のままとなっており、水災リスクの低い地域に居住する契約者が過大に負担しており、納得感が得られにくくなっていると考えられている。その結果、低リスク地域の契約者の一部は水害保険の付保を取り止めており、高リスク地域の契約者の割合が上昇しつつあると推測される。

続いて、水災料率の細分化には、保険料負担の公平性の向上によって、低リスク契約者の水災補償離れにブレーキをかける効果が期待できる一方で、保険契約者間の料率較差の拡大により、高リスク契約者の水災補償の購入可能性が損なわれ、必要な補償が得られなくなる可能性にも留意する必要があるという認識の下、社会全体として水害に対する経済的な備えを高めるための料率体系について提言が行われている。

最後に、水災保険料率の細分化が低リスク契約者の付保取り止めに与える影響、保険料率のリスクアナウンスメント効果、水災保険料率の調整方法、防災・減災の取り組みを促すインセンティブ効果についての課題を明らかにしたうえで、上記報告書の内容が伝統的な保険法理論に与える影響について分析を行った。

理論的には、公保険(国、地方公共団体、公企業主体などの政策目的達成手段として国等により運営される保険)と私保険(公保険のように国等の政策目的実現の手段ではなく、経営主体も保険会社などの私法人等により私人間における私的自治の原則に基づいて運営される保険)の交錯問題(公保険と私保険の「限界領域」にある保険)の一つに組み込まれつつあるものとして捉えることができるかもしれない。換言すると、純粋な私保険として捉えられてきた火災保険の水災補償が公保険としての性格を帯びつつある(公保険への接近)という見方も可能になるのかもしれない。

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:

河川法の改正過程や水防法を中心とする関連法制の改正、制定過程を整理するとともに、これまでに出されてきた河川審議会の答申、提言と、実際に起こった社会的インパクトの強い洪水災害およびその特徴を年代記的に整理することで、明治以降の洪水リスク管理制度がどのように変遷してきたかを、いくつかの時代に分類することができるかどうかを通じて明らかにすることを試みた。

その結果、我が国の治水計画は、

- ① 既往最大洪水を安全に流下させることを目的とした時代、
- ② 対象外力の評価に確率統計的手法を導入し、年最大一雨降雨の超過確率で計画の安全度として、洪水の処理方法をデザインした時代、
- ③ 計画の安全度に対する考え方は②と同じであるが、雨水が河道に流入した後に処理するだけでなく、河道に流入する雨水そのものを減少させることも治水手法として計画に取り入れるようになった時代、
- ④ 治水対策を長期の目標(河川整備基本方針)と河川整備計画(30年程度の期間に行う具体的な計画)にわけて策定するようになった時代、
- ⑤ ③の考え方をより進めて、流域における雨水浸透阻害行為に規制をかけるとともに、河川管理者が雨水貯留新施設の整備を行うことを可能とした時代、
- ⑥ 外力設定に地球温暖化に伴う気候変化の影響を取り込むとともに、河川管理者や下水道管理者だけでなく、国、流域自治体、企業等の協働を理念とし、河川整備だけでなく、雨水貯留浸透や土地利用規制、利水ダムの事前放流など実施主体の異なる洪水リスク管理施策の全体像をパッケージとして示すようになった時代、

といった6つの時代に分類してとらえることができることを示した。

現在は、⑥の時代に属するが、水害リスクの管理が行政上の所掌部署にとどまらず、あらゆる関係者が協働すべきことであるとの理念が公式のものとなり、雨水・洪水流の処理対策だけでなく、人間の住まい方や流域の保全も洪水リスク管理の視点から見直されることとなっている。この時代では、洪水リスク管理に関係する主体を広範囲にとらえると同時に、リスク管理の手法も網羅的に取り入れようとする考え方が芽生えており、その意味では、それまでの時代と比べて、気象制御をその手段の一つとして受け入れる素地ができ始めているとも言えることが分かった。

課題推進者: 堀 智晴 (京都大学)

(8) 研究開発項目 8: 経済被害推定

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:

合流点水門、取水堰や不連続堤防等の各種構造物について、その影響とデータベース化の可能性・手法を整理するため、河川整備計画・河川整備基本方針等の法定計画に加え、航空写真・地図情報・管理者資料等に基づき我が国の河道ネットワーク上に存在する人工構造物の情報収集を実施し、全国約21000箇所の水門の位置情報を含む水門データベースを作成した。さらに、逆流防止の目的を持った合流点水門であるか否かの

判別を目視で実施し、全国で約 3200 箇所合流点水門を抽出した。これら合流点水門について、位置情報を日本全国の河道ネットワーク上に投影し、合流点水門による逆流防止効果を再現可能な 150 m 角の流出氾濫モデルを構築した。

この構築したモデルを用い、関東地方を例に令和元年台風 19 号 Hagibis を対象とした合流点水門の On/Off 実験を実施したところ、合流点水門を導入したケースでは合流点水門を考慮しない場合と比較して浸水領域面積が 1/4 程度にまで減少し、また氾濫パターンも現実的な形態へと近づいたことから、水門の影響の適切な考慮は氾濫現象の再現性に重要である旨を確認した。

さらに、取水堰・不連続堤防について、一級水系の大臣管理区間について管理者資料に基づくデータベースを試作した。しかし、堤防そのものもしくは堤防の不連続箇所を対象としたデータベースを確認することはできなかったため、管理者資料に基づいた主要な不連続堤防の位置および形式の導入を行う方針を決定した。

最後に、破堤プロセスや破堤部氾濫流の数値計算手法を整理し、破堤プロセスや破堤部氾濫流の数値計算手法を整理し、実装候補とする手法をリストアップした。また、降雨流出氾濫モデル (Rainfall-Runoff-Inundation Model; RRI) における破堤プロセスの実装方法の決定のため、河道・氾濫原間のインタラクションおよび破堤の取り扱いを整理した。

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:

暴露資産 (Exposure) データベースの構築のために、人口および民間資産 (住宅および企業物件)、企業の事業停止に関する各種統計データ、国勢調査、経済センサス、住宅・土地統計調査、建築着工統計調査、ゼンリン建物統計データを収集した。これらデータを用いて、人口、住宅・企業物件の資産、企業物件への間接影響に関する Exposure データベースを試作した。現時点での空間解像度は 5 次メッシュ (250m メッシュ) 相当であるが、さらに 100m メッシュ相当に高解像度化する作業を進めている。

また、作成された Exposure データベースの妥当性を検証するため、2017 年台風 18 号および 2019 年台風 19 号 (令和元年東日本台風) による洪水イベントを対象に日本全国の被災世帯数の推定を試みた。その結果、一部の地域を除き概ね実際の被災世帯数に近い推定値を得ることができた。

課題推進者：山田 進二 (SOMPO リスクマネジメント株式会社)

(9) 研究開発項目 9: 気象制御における RRI

R6 (2024) 年度から開始する予定。

(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:

今年度は全球の輝度温度観測を提供している Global-merged IR product を対象として、以下の項目を実施した。

- ① 温度に基づく雲領域の抽出・前処理

雲領域に着目するため、今回は 150~280 K の範囲のみを処理対象とした。なお、inpainting と呼ばれる画像処理技術によって、異常値に対してその周辺の輝度温度により補完を行った。

② 空間的な歪みを抑えるための接平面への射影

処理対象としている画像は、北緯 60 度から南緯 60 度の輝度温度観測を正距円筒図法で表現しているため、特に高緯度部分で幾何的な歪みが避けられない。このような歪みを抑えるため、地球表面上のある点における接平面にその周辺の輝度温度を射影した画像を生成した。

③ 射影画像間での対応点推定

異なる時刻で得られた赤外画像に対し、同一点における接平面への射影画像を対象として対応点を推定した。対応点推定には、深層学習技術に基づいて開発された Superglue (DOI:10.1109/CVPR42600.2020.00499) を用いた。赤外画像が 30 分間隔で取得されているため、対応点推定の対象とする赤外画像は 30 分、1 時間、1 時間半、…と 4 時間間隔まで試みた。この結果、抽出された対応点数の分布の例を図 10-1-1 の左に示す。

④ 対応点群からの幾何変換の推定

各射影画像で得られた対応点を 3 次元球面上に再投影し、近傍にある点群クラスターから 1 つの 3 次元回転変換を推定した。点群クラスターの抽出には k-means アルゴリズムを用いた。図 10-1-1 の右に抽出された回転変換の数の分布の例を示す。

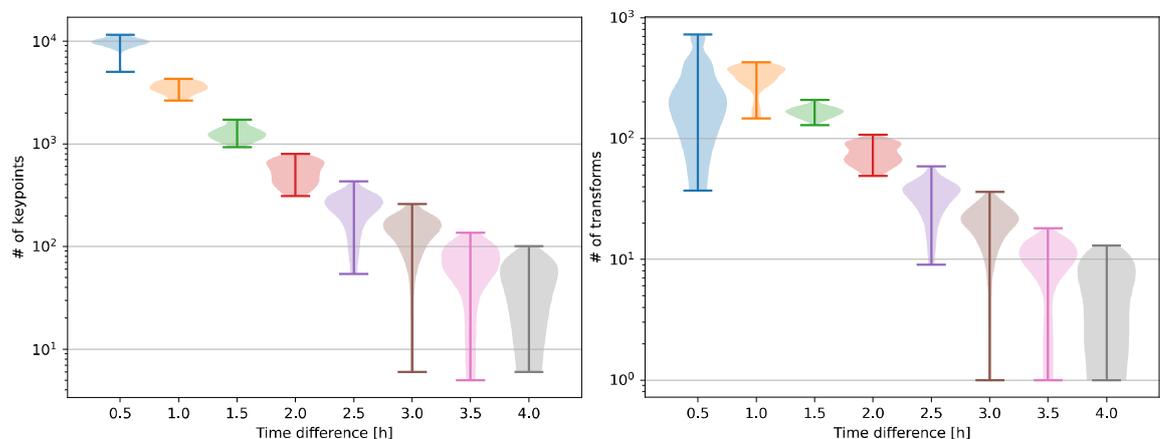


図 10-1-1: 時間間隔と推定された対応点・幾何変換数の分布

課題推進者: 船富 卓哉 (奈良先端科学技術大学)

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:

最初に、大規模ボリュームデータの可視化技術を調査し、描画にかかる計算時間や必要なメモリ容量などの観点から代表的な 4 つのカテゴリ(構造化ボリューム、非構造化メッシュ、AMR、データ圧縮)に分類してリストアップした。

次に、表示デバイスについて調査し、代表的な 4 つのカテゴリ(非平面ディスプレイ、ヘッドマウント型ディスプレイ、空間再現ディスプレイ、超大型平面ディスプレイ)についてリストアップした。

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
要素プロジェクトで構築した千葉大学研究推進室および学術研究イノベーション推進機構から支援を受ける体制を維持し、定期・不定期な打合せを実施した。
また、マネジメントチームに 1 名増員し、3 名体制とした。
- 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)
運営会議は該当する事項がなかったため、実施しなかった。
- 研究開発機関における研究の進捗状況の把握(サイトビジット、課題推進者会議等)
定例会議は月 1 回のペースで開催し、JST から提示されるスケジュールや報告等の情報共有を行った。
さらに日常的には、Google メールグループの活用、クラウドストレージ Dropbox を用いたファイル共有、Slack(有料版)によるチャット、Zoom による Web 会議等を積極的に活用し、情報の共有に努めた。

研究開発プロジェクトの展開

- 数理研究の方向性の提示
コア研究では、令和 5 年度中に数理研究の方向性を提示することが求められている。本コア課題は、前身である要素研究の発展であり、モデル予測制御・カオス力学系・ランドスケープ解析などを活かして、「領域気象予測システム (SCALE-LETKF を想定)を基盤に、陸域豪雨を緩和する未来に気象場を誘導する、気象誘導・モデル予測制御 (MPC; Model Predictive Control) 手法を開拓する」ことを数理研究の方向性としていた。この方向性については、2023 年 10 月 4 日の数理分科会との協議も踏まえてプログラムからも承認を得られており、着実な進捗を得た。
- 研究開発体制における競争と協働
研究開発課題毎に PI がその専門分野において研究開発を推進し、関連する PI をまとめた研究開発項目で項目長を中心とした横断的な研究開発成果や情報の共有を行うことで競争と協働をバランスよく進捗させた。
さらに、参加者も交えた研究グループを設置し(7 グループ)、各々にグループ長とコミュニケーターを置くことにより、活発な議論を重ねる場を提供した。
- 研究開発課題の大幅な方向転換や研究開発課題の廃止・追加について・研究開発プロジェクト全体の再構築について
方向転換・廃止・追加はない。
再構築については、来年度初より研究開発項目 4 と 8 に PI を 1 名ずつ増員し、PI がいなかった研究開発項目 9 に PI を選定し、より詳細に拡張的に研究開発を進める体制を整える。
- 国際連携に関する取組みについて
期間が短かったこともあり、具体的な実績はなかったが、国外の研究者と積極的に連携していく予定である。
- 社会実装に向けた取組みについて

制御の工学的手段も加味したより具体的な数値シミュレーションを行うことにより、社会実装の実現性を検討しやすくすることを目指している。同時に、法的な検討、RRIに係る検討、気象制御の状況を直感的に簡単に把握するための表現手法の開発を進めている。

また、市民等との討論の場を積極的に設ける予定であり、これらにより、できるだけスムーズに社会実装が開始できるよう、現時点から積極的に取り組んでいる。

(2) 研究成果の展開

- 知財戦略等について
特許の出願等はなかった。
- 技術動向調査、市場調査等について
気象制御に係る技術、その工学的な実現性・具体性等について調査を開始した。来年度は外部へ調査を依頼する予定である。
- 事業化戦略、グローバル展開戦略等の立案等
PI の SOMPO リスクマネジメント株式会社が、事業的視点を加味した損害推定を主とした課題に継続的に取り組んでいて、当該研究開発成果を元にした事業化を視野に入れている。
更に、株式会社ウェザーニューズとの協力体制を整えつつあり、当社がコネクションを持っている東南アジアを中心としたグローバル展開を検討している。
- 技術移転先、将来的な顧客開拓に向けた対応について
本年度においては特にないが、気象制御の具体的な技術が開発された場合には、大手重工業会社、大手建築会社(スーパーゼネコン)、大手材料メーカーなどへの技術移転を想定している。

(3) 広報、アウトリーチ

期間が短いこともあり、特段の具体的な活動はなかったが、これまでと同様にメディアや市民活動の機会をとらえて、積極手に取り組んでいく予定である。

なお、当プロジェクトの専用 Web サイトが要素プロジェクトのままであるが、来年度に作りなおすことを計画していて、その担当者も採用した。

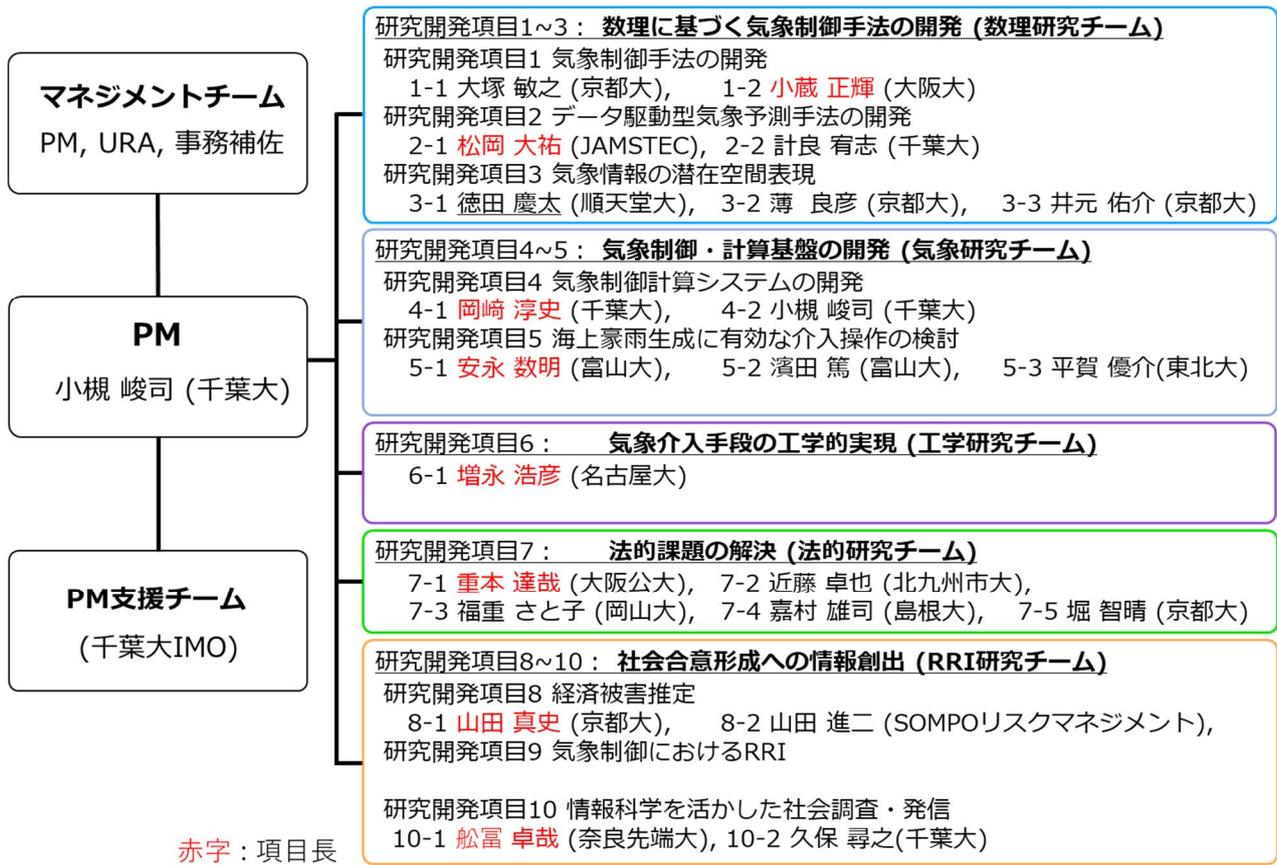
(4) データマネジメントに関する取り組み

要素プロジェクトからの継続で、積極的に取り組み、数値計算用データセット、シミュレーションデータ、実験データ等を計 20 件登録した。

今後も積極的に取り組み、データセット等の共有では NII 研究データ基盤や zenodo の活用、プログラムソースコードの共有では GitHub や GitLab の利用を検討していく。

なお、プロジェクト内でのデータセット等の共有のため、ストレージサーバ(容量約 700TB)の準備を開始し、来年度初には使用を開始できる予定である。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



運営会議 実施内容

- PMと各項目長で組織する運営会議を設置し、4ヶ月毎に重要事項共有を行うこととした。ただし、該当する案件がなかったため、開催しなかった。
- PMと全PIで組織する定例会議を設置し、月1回のペースで開催した。本会議体の主要な議事は研究開発の進捗状況の確認であるが、JSTから提示されるスケジュールや報告等の情報共有も行った。

知財運用会議 構成機関と実施内容

- 要素プロジェクトで設置した千葉大学・学術研究イノベーション推進機構との知財運用会議を継続している。ただし、特許等の出願の案件がなかったため、開催はしなかった。

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	2	0	2
口頭発表	0	1	1
ポスター発表	1	3	4
合計	3	4	7

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	0	0
(うち、査読有)	-	-	-

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

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
0

報道件数
2

ワークショップ等、アウトリーチ件数
0