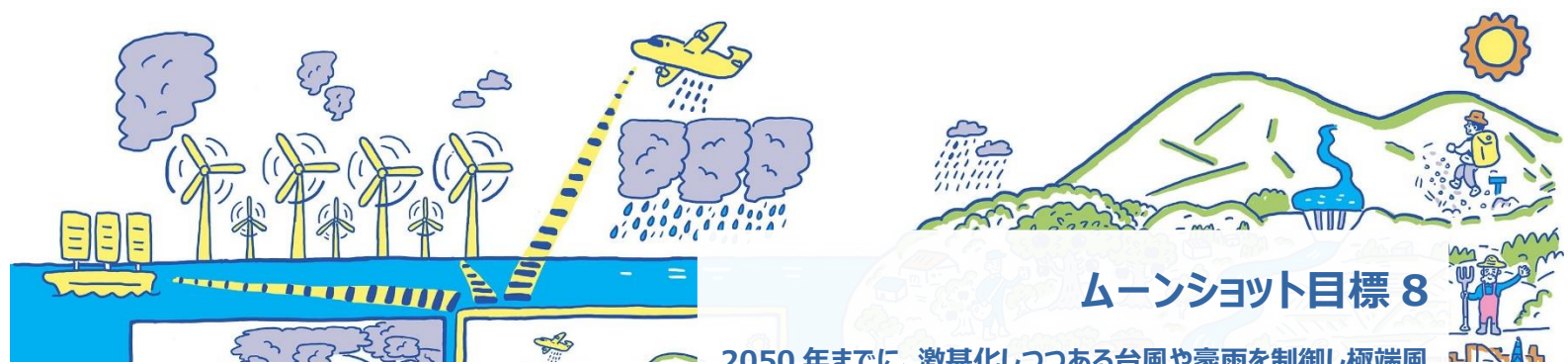




ムーンショット目標 8

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

終了報告書

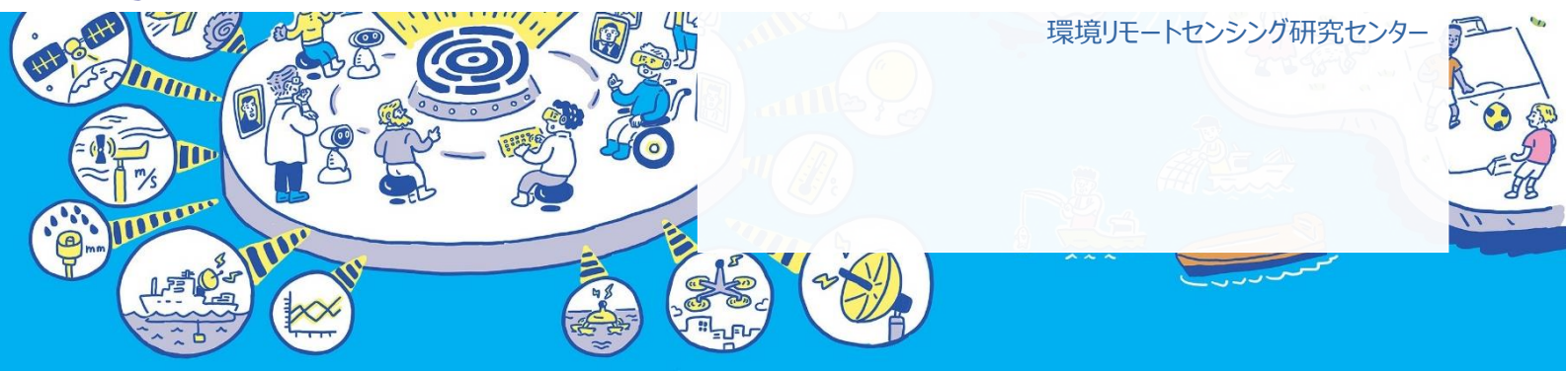
気象制御のための制御容易性・

被害低減効果の定量化

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

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



1. 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

気象制御の意思決定には、制御によって得られる被害低減の効果と、制御を実施するために必要なコストの比較が必要不可欠となる(図 1-1 左)。より現実的な意思決定のためには、被害低減効果の最大化が必要になるが、その過程の中で想定されるボトルネックとして、図 1-1 右で示すような課題が考えられる。

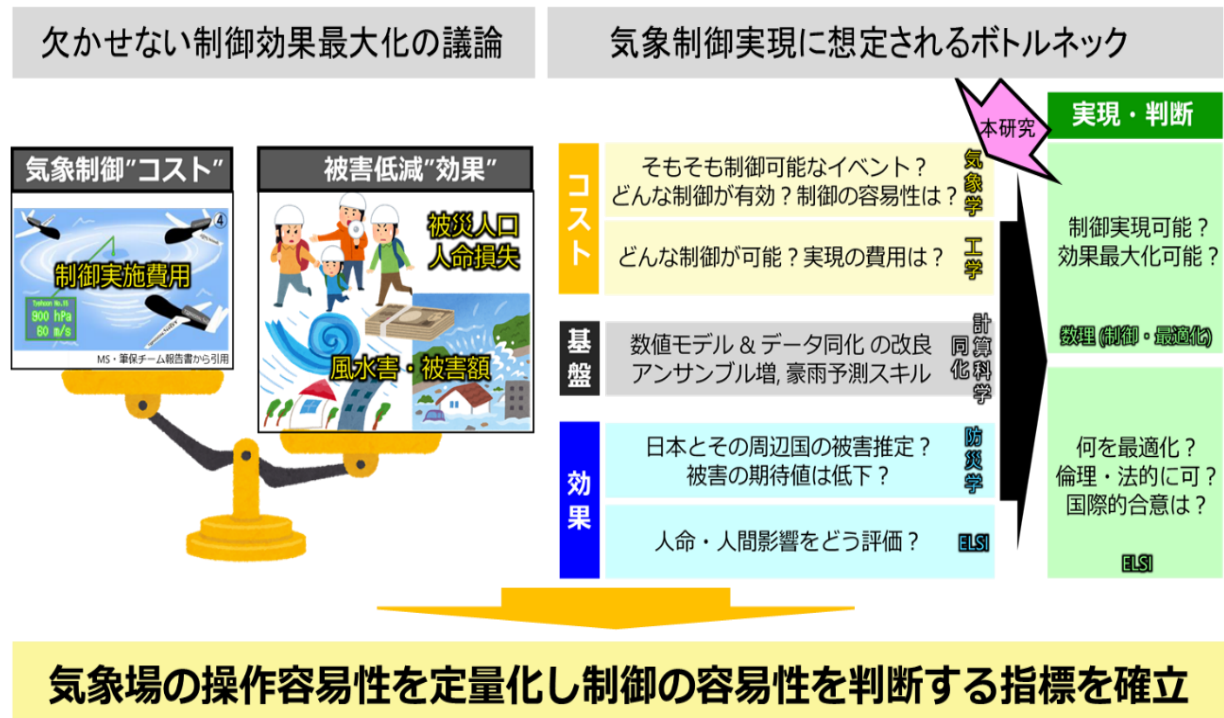


図 1-1: 本研究のムーンショット目標達成への貢献

本プロジェクトの目的は、想定されるボトルネックである「そもそも制御可能な気象なのか、どんな制御が有効なのか、制御の容易性をどう定量化するのか」といった問いに回答するための技術を開発し、気象の制御容易性を定量化することで、制御の容易性(実行可能性)を判断する指標を確立することである。それらを実現するために、本プロジェクトでは次の3つの研究項目を推進する(図 1-2)。

- 研究開発項目1(数値研究班): 気象制御容易性の定量化
過去の災害事例についての分水嶺の有無・制御容易性の定量化する。また、データ同化研究班が開発するより長期の大アンサンブル気象予測を活用し、より精度の高い低次元化技術の開発を進め、分水嶺のある気象については、トラジェクトリ間の特徴量の差を気象場に逆変換することにより湿潤エネルギーの観点から制御容易性を定量化する。さらに、特徴量空間の解析により気象に有効な制御入力を特定し、データ同化研究班に提供する。
- 研究開発項目2(データ同化研究班): 大アンサンブル・データ同化実験
現実的な気象モデルを用いて大アンサンブルデータを作成する。気象モデルおよびデータ同化システムには、岡崎 PI が開発に携わり、扱いに長ける SCALE-LETKF を

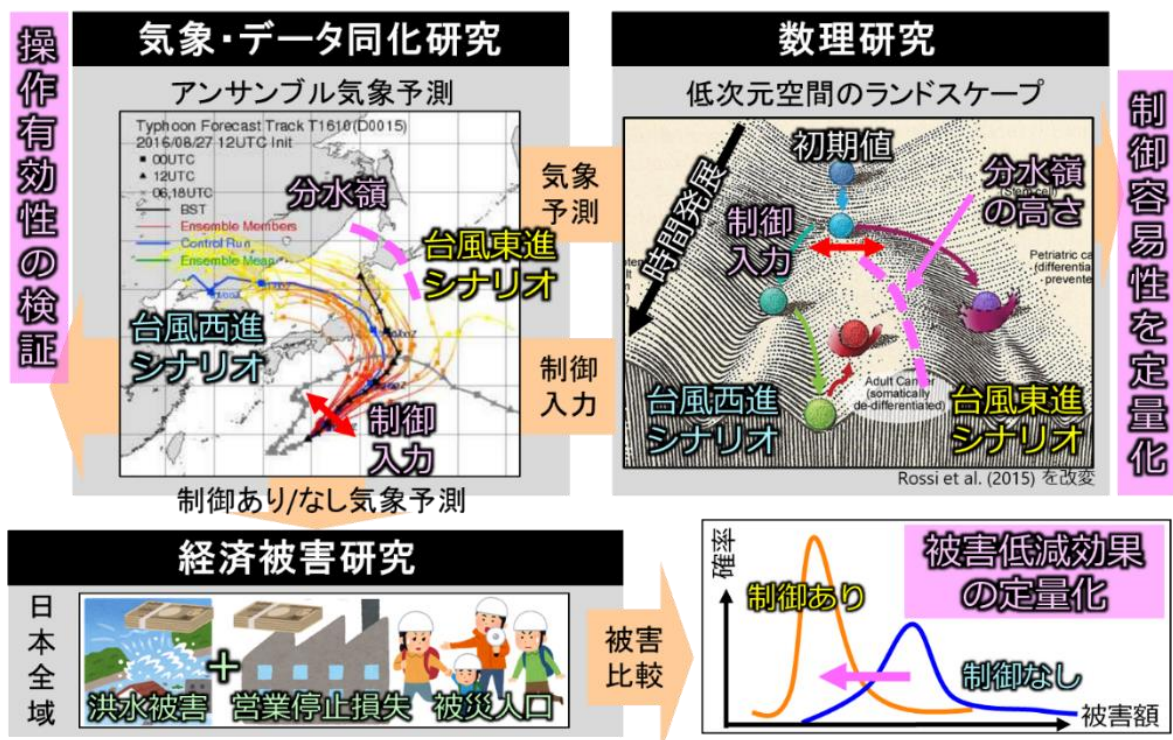


図 1-2: プロジェクトの全体像

使用し、過去に甚大な被害をもたらした複数の気象災害について学習用および検証用の大アンサンブルデータを作成する。観測には従来型観測を想定し、これを同化する。アンサンブルサイズは 1,000 メンバー以上を見込む。

また本研究開発項目により作成される大アンサンブルを数理研究班および経済被害研究班に提供し、それぞれの研究を推進する。また大アンサンブルをもとに数理研究班が特定する気象制御操作を気象モデルに入力し、その効果を評価する。

- ・ 研究開発項目3(経済被害研究班): 被害低減効果の推定
間接被害(企業の事業停止)に関わる Exposure データベースを構築し被害推定モデルを高度化すると共に、浸水深と被害割合(被害額÷評価対象の価値)の関係を示す被害関数を構築する。またデータ同化研究班で計算を実施する豪雨事例の大アンサンブル実験の降水量を使用し、SOMPO リスクマネジメント社の保有する洪水氾濫シミュレーションモデルによる浸水ハザードを計算し、アンサンブルメンバー毎の経済被害・被災人口推定を開始する。

これらの研究項目を推進することによって、コストと被害低減効果が数値情報として比較検討可能となり、より現実的かつ効率的な気象制御の意思決定が可能となる。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の実現に向けて、気象・数理・情報・産業界の連携チームで技術開発を進めていく方針とした。

また、こうした新しい技術が開発された時、我々はその技術が社会で実装可能なように、倫理的・法的・社会的課題の研究も進める必要がある。本プロジェクトでは、理学・工学的アプローチによる災害予測・制御研究を推進すると共に、人文社会研究についても文理横断研究を進めていく。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

本プロジェクトの初年度である令和4年度は、数理研究班による気象制御容易性の定量化技術の開発、データ同化研究班による大アンサンブル・データ同化実験の準備、経済被害研究班による経済被害低減効果の推定技術開発について実施した。各研究班では、研究計画に対する開発項目を整理して問題の定義を明確にすることにも重点を置いた。特に、数理研究班による「アンサンブル気象予測の機械学習による低次元化」と「対象現象に災害・非災害を分離する分水嶺が存在するかを判断する」技術開発に向けて大きな進展を得た。

本プロジェクトの2年目である令和5年度は、初年度の成果を元にして、数理研究班では、過去の実災害事例についての分水嶺の有無・制御容易性の定量化、低次元化技術の高精度化を進めた。データ同化研究班では、実気象モデル SCALE-LETKF を用いた大アンサンブルを作成した。さらに、大アンサンブルデータを経済被害研究班に提供し、経済被害の推定に活用できるようにした。経済被害研究班では、日本全国を対象に本研究開発項目で分析対象とする被災人口、民間資産(住宅および企業物件)、洪水被害に伴う間接被害(企業の事業停止)に関わる暴露資産(Exposure)データベースを構築した。また、Exposure データベースについて洪水被害推定を行なうため、被害関数の構築を行なった。さらに、データ同化研究班から受領した豪雨事例の大アンサンブル実験の結果(降雨データ)を用いた洪水氾濫計算および被害計算に着手した。

本来の要素研究は3年間の予定であったが、コア研究に採択されたことにより、本要素研究は令和5年11月で終了し、コア研究を令和5年12月から開始した。要素研究課題における数理研究・データ同化研究・経済被害研究は、いずれもコア研究に引き継がれ、今後も研究開発が進められる予定である。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

令和4年度は、代表機関のマネジメント支援体制を構築すると共に、PM 班の採用手続きを進めて体制を整えた。当該年度中に計6回の課題推進者会議を主催し、研究課題の進捗管理や情報伝達を進めた。千葉大学の枠組みも活用して株式会社ウェザーニューズやアクセントチュア株式会社の AI 部門との新たな産学連携に向けた議論を実施した。プロジェクトの HP のリニューアルを開始し、令和5年3月に完了した(4月より運用開始)。学会、シンポジウム等を活用したプロジェクトの広報活動を展開するとともに、ICIAM 2023、AMS 等の国際学会での発表を機会に、国際連携の加速に向けた活動を進めた。

令和5年度は、代表機関のマネジメント支援体制を強化するため、PM 班の追加人員の採用を進めた。課題推進者会議を継続主催し、研究課題の進捗管理を進めた。また、ウェザーニューズ社やFixstars Amplify社など、気象制御に関係する技術をもつ機関との産学連携に向け議論・検討を行い、今後の方針や当該技術の使用について相互に理解を深めた。Web ページ、学会、シンポジウムを活用し、マスメディアの取材依頼にも積極的に対応し、ムーショット目標8についての広報を行うと共に、ICIAM 2023 で立ち上げた気象における逆問題・情報圧縮についてのセッションなどを通じ、国際連携の加速を推進した。要素研究 PI 間の情報交換会を月1回主催し、将来的な共同に向けた情報交換を進めると共に、河川法の専門家と将来的な ELSI 課題設定に向け事前調査を開始し、コア研究へと発展的に引き継いだ。

2. 研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1: 数理研究班

研究開発課題1-1: 気象制御容易性の定量化

実施内容:

数理研究班で実施している研究は、①「アンサンブル気象予測を用いた有効な操作入力の特典(図 2-1 上から黄色枠へ方向)」と、②「既存の制御手法の気象への発展(図 2-1 下から黄色枠へ方向)」に大別される。ここで②については、当初の研究計画では検討していなかったが、プロジェクトの将来的な発展を視野に予備的検討として令和4年度の研究を開始した。

- ① 低次元化技術については、Lorenz-96 モデル、SPEEDY、MEPS、全球の海面水温 (SST, Sea Surface Temperature) データなど、数理研究班の PI ら(小槻 PI、徳田 PI、小林 PI、薄 PI、小蔵 PI、井元 PI) の適用実績のある現象をそれぞれ選択して技術開発を開始した。また固有直交分解で低次元化したアンサンブル気象予測の特徴量をクラスタリングし、有向グラフを作成する技術の開発を進めた。ここで、チューニングパラメータの少ない安定的なクラスタリング手法として知られる Hierarchical Density-based spatial clustering of applications with noise (HDBSCAN, Campello et al. 2013) を使用し、得られたクラスター間にアンサンブル気象予測の時系列情報を当てはめる事で有向グラフを作成した。
- ② Control Simulation Experiment (CSE, Miyoshi and Sun 2022) に着目し、CSE における制御の実施における誤差成長ベクトルを調査した。Lorenz-63 モデルを用いた CSE において、誤差成長ベクトルの成長率に応じて制御入力を変更する動的入力を導入することで、既存手法よりも少ない制御入力で見込みのレジームに誘導可能であることを初期結果として得た。さらに、非線形力学制御として工学的にも技術が確立されているモデル予測制御

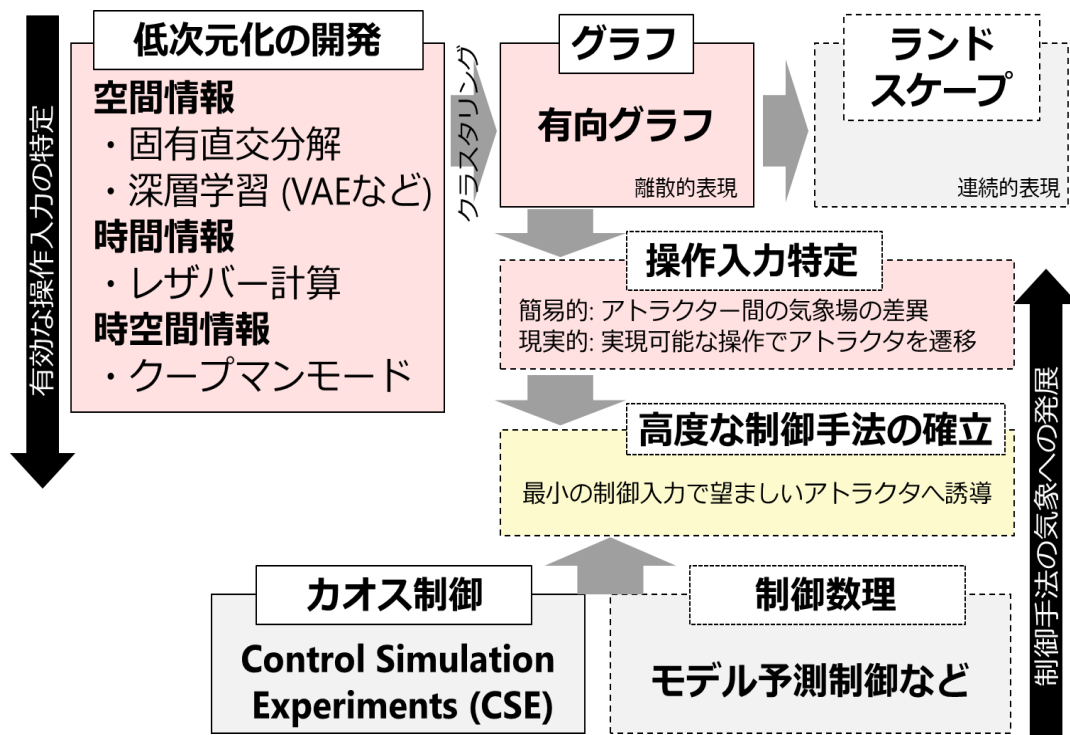


図 2-1: 数理研究班の研究開発計画。実線枠: 着手済み開発項目、点線枠: 将来的な開発項目。薄赤: ミニマムサクセス、黄色: 本研究の発展課題。

御 (MPC; Model Predictive Control)に着目し、データ同化と組み合わせることで非線形力学系を望ましい未来に導くための数理手法の開拓を進めた。

令和5年度は、令和4年度に開発したアルゴリズムを用いた過去の実災害事例についての分水嶺の有無・制御容易性の定量化、低次元化技術の高精度化、トラジェクトリ間の特徴量差の気象場への逆変換による湿潤エネルギーの観点からの制御容易性の定量化を行った。各課題について他の研究開発課題の推進者と協力・共同して実施したので、各課題推進者の実施内容と重複する部分もあるが、それらも含めて以下に記す。

- レザバー計算を用いた CSE の高度化
物理ベースの数値モデルをレザバー計算 (RC, Reservoir Computing) で代替する手法は、数値モデルの振る舞いのある程度精度よく高速で模倣できるので、CSE と解析値の精度向上に必要な高精度で十分な数のアンサンブルの確保が可能になる。そこで、RC を Lorenz-96 モデルに適用し、数値モデルによる真の時系列とよく一致していることを確認した。
- クープマンモード分解による時空間データの次元圧縮
クープマンモード分解 (KMD, Koopman Mode Decomposition) を、エルニーニョに関連する領域全体に対して適用した。KMD を適用する対象期間は 1891 年から 2019 年の合計 1548 か月のデータであり、Vector Prony Analysis により対象期間の前半 (1891 年 1 月から 1955 年 6 月) に対してフィッティングしたモードが得られるため、その前半期間をエルニーニョ指標の計算に用いる。また、エルニーニョ指標の計算には過去 30 年の月毎の平均海面水温が必要となるため、エルニーニョ指標の計算は 1921 年 1 月から 1955 年 6 月までの 414 か月を対象とする。その 414 か月のうち、合計 57 か月にわたってエルニーニョが発生していたと判定された。その対象期間において、KMD によって分解されたモードを分析した結果、周期がおおよそ 2~7 年のモードが、エルニーニョの発生に大きな影響力を持つことが分かった。KMD による級数からエルニーニョの発生に大きな影響力を持つ 6 モードを差し引くと、エルニーニョが 57 か月発生したうちの、17 か月分のみエルニーニョしか再現されなくなることが示された。
- モデル予測制御 MPC を用いた CSE
制御実験フレームワークである CSE にモデル予測制御 (MPC) を適用し、制御入力についての拘束条件を考慮しつつ、適切な制御入力を求めることが可能であることが確認できた。
- クラスタリングを用いた台風の分岐シナリオ検出
熱帯低気圧 (TC, Tropical cyclone) の位置を予測することは重要であるが、アンサンブル数値気象予測 (ENWP, Ensemble Numerical Weather Prediction) システムによって予測された TC の進路には、しばしば分岐が存在する場合があります。TC がどの進路をとるかによって意思決定の結果が大きく左右される。したがって、TC の進路の予測値から分岐するシナリオを検出することの意義は大きい。また気象制御の観点から、分岐シナリオが検出できることは制御可能性の診断に有効なツールにもなり得る。分岐シナリオが発生するということは、適切な操作が行われることで、望ましいシナリオに誘導しやすいことを示唆する可能性がある。

そこで、Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) によるクラスタリングのアルゴリズムを利用することで、分岐シナリオが存在するかどうかの判定を、2020 年台風 12 号 (Dolphin) を対象として行った。台風 12 号では計 462 の進路の予報値が得られ(図 2-2)、このデータから DBSCAN によりクラスタ数を自動的に設定した上でクラスタリングを行った。図 2-2e においてクラスタ数が 1 と推定されている場合は、分岐シナリオが発生しない。一方で図 2-2e 中の 3 つの大きな四角の中に表されるように、台風の軌道が赤い矢印で示される異なる方向へ進む場合には、クラスタ数は1より大きくなり、分岐シナリオが発生したことを意味する。

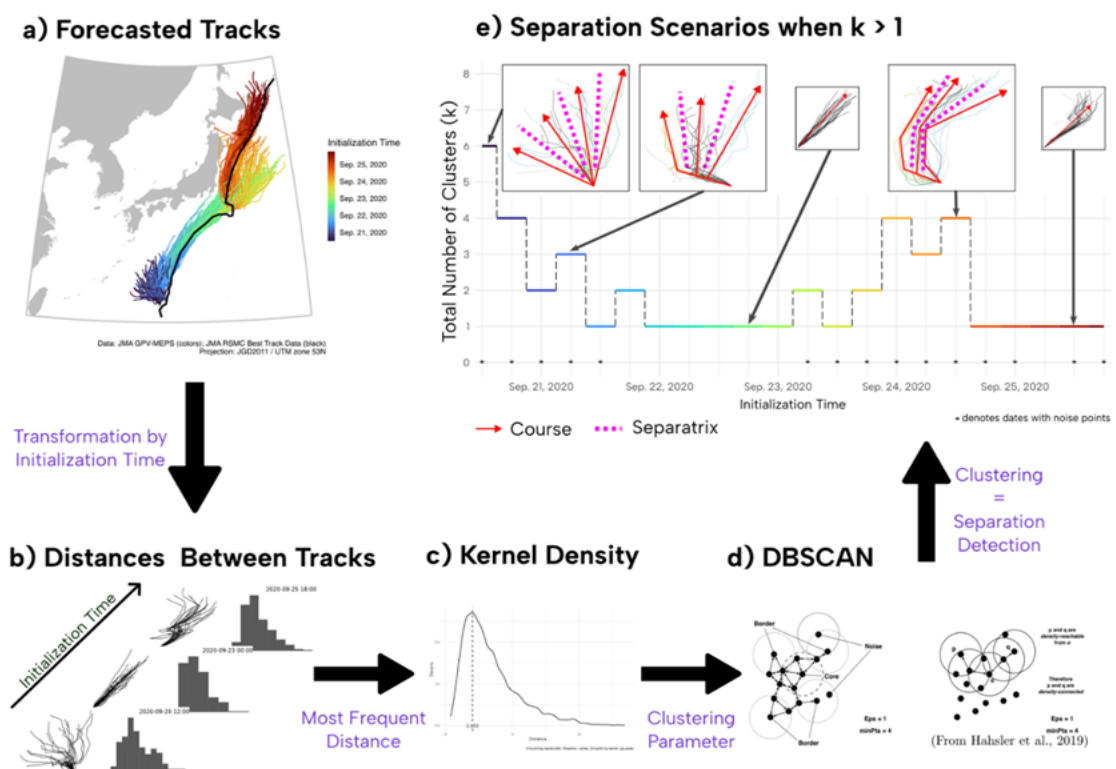


図 2-2: 分岐シナリオ判定のためのワークフローと実験結果。a)は本分析に使用した台風の進路予測値。また b)、c)、d)のプロセスを経て DBSCAN を適用し、e)に示される結果を得た。クラスタ数が 2 以上と判定された場合には、分岐シナリオが発生していることを表す。投稿中の論文、Oettli and Kotsuki (2024) を改変。

このように、客観的に台風の分岐シナリオを検出する手法の開発に成功し、気象制御を実施する適切なタイミングを判定することに資すると期待している。

- ランドスケープ解析のアンサンブル気象予報データへの適用

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。ランドスケープ解析におけるボールを熱帯低気圧とみなし、その進路を変更させるというエネルギー効率の高い制御入力地点を、ランドスケープの鞍点として求めることにより、気象学分野への応用が可能だと考え、その手法を開発した。

上記の「クラスタリングを用いた台風の分岐シナリオ検出」と同じ 2020 年台風 12 号を対象とし(図 2-3b)、MEPS から推定した熱帯低気圧の軌道予報データを使用し、図 2-3d に表されるような potential flow を得た。これから、北上と東進の 2 つの主要な経路(あるいはアトラクタ)が発見され、この 2 つのアトラクタの間にセパトリックス(赤い点線)の存在が確認され、セパトリックスの始点に鞍点(ピンクの星)が発見された。この点は、気象制御入力を与えるのに適する地点である可能性を示すものである。

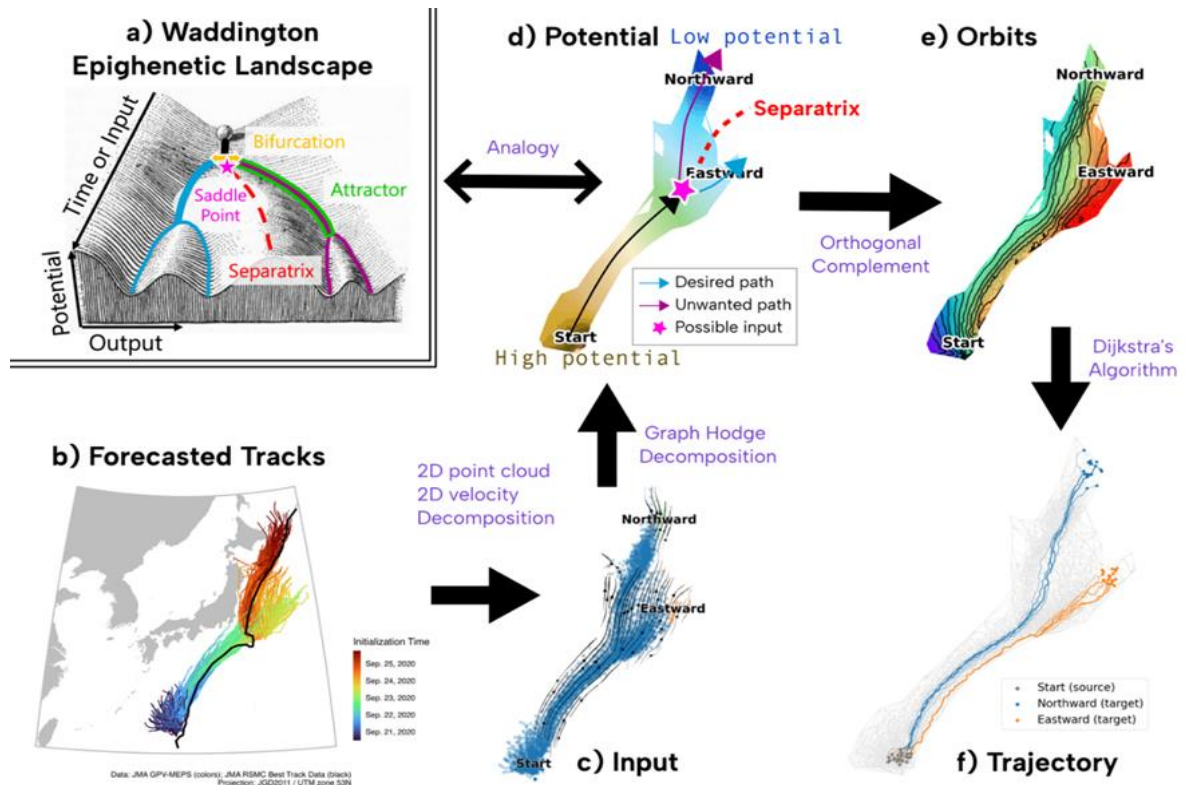


図 2-3: ランドスケープ解析のワークフロー。a)はランドスケープ解析が元々開発された際の細胞の分化に関する模式図。b)は使用したデータを c)の入力用に変換したデータ、d)は potential flow。d)から軌道を求める過程を e) 、求めた起動を f)に示す。投稿準備中の論文、Oettli et al. (2024) を改変。

- モデル予測制御 MPC を用いた CSE
制御実験フレームワークである CSE にモデル予測制御(MPC)を適用し、制御入力についての拘束条件を考慮しつつ、適切な制御入力を求めることが可能であることが確認できた(図 2-4)。

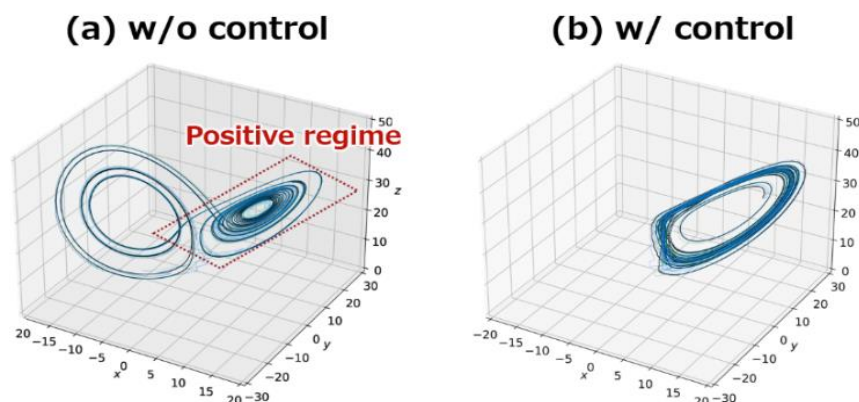


図 2-4: Lorenz-63 モデルの 3 次元図。(a) 制御なしの場合、バタフライアトラクタが現れる。(b) 制御ありの場合、MPC により Positive regime に誘導されている。印刷中の論文 Kawasaki and Kotsuki (2024; NPG) を改変。

- 深層学習に基づく超解像技術を用いた降水量データの高解像度化
近年、深層学習を用いた画像の高解像度化(超解像)が提案されており、従来の線形補間法を上回る性能が示されている。そこで雨量の空間分布を画像とみなし、深層学習に基づく二種類の超解像手法 Super-Resolution Convolutional Neural Network (SRCNN) および SwinIR により、高解像度の雨量データの生成を試みた。
具体的には、気象庁の解析雨量を用いて、深層学習を利用した超解像モデルに学習させ、粗視化された雨量分布からオリジナルの高解像度雨量分布を予測する学習器を開発・検証した。検証にはピーク信号対雑音比(PSNR, Signal-to-Noise Ratio)を指標に用いた。結果、訓練データ数が十分多い場合は、深層学習を用いない Bilinear 法より高い精度で雨量データの高解像度化が行え、特に Transformer を用いた SwinIR は、SRCNN を上回る精度で超解像を行うことができる有効な手法であることがわかった。
- 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, 4-Dimensional VARiational method)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(QA, Quantum Annealing)を適用し、新しい量子データ同化(QDA, Quantum Data Assimilation)を開発した。
QA を用いた 4DVAR の精度を評価するために、従来手法である準ニュートン法との比較を行った。4DVAR と併せる数理モデルには Lorentz-96 モデルを使用し、観測システムシミュレーション実験(OSSE, Observing System Simulation Experiment)を採用することで真

値と観測値を人工的に作成し、精度評価を可能とした。図 2-5 に結果を示す。QUO-NL は一般的なコンピュータで準ニュートンを用いて解くスタンダードな 4DVAR を意味する。QUO-L は QUBO に定式化するために、QUO-NL を近似した手法であり、これが QA を利用した 4DVAR と公平な比較対象となる。QUBO-Sim は QA を適用しているが、実際には一般的なコンピュータで量子効果を疑似的に再現した手法を意味する。QUBO-Phy が D-Wave 社の量子アニーリングマシンを用いた結果を表している。図 2-5 (a) より、解析精度を表す二

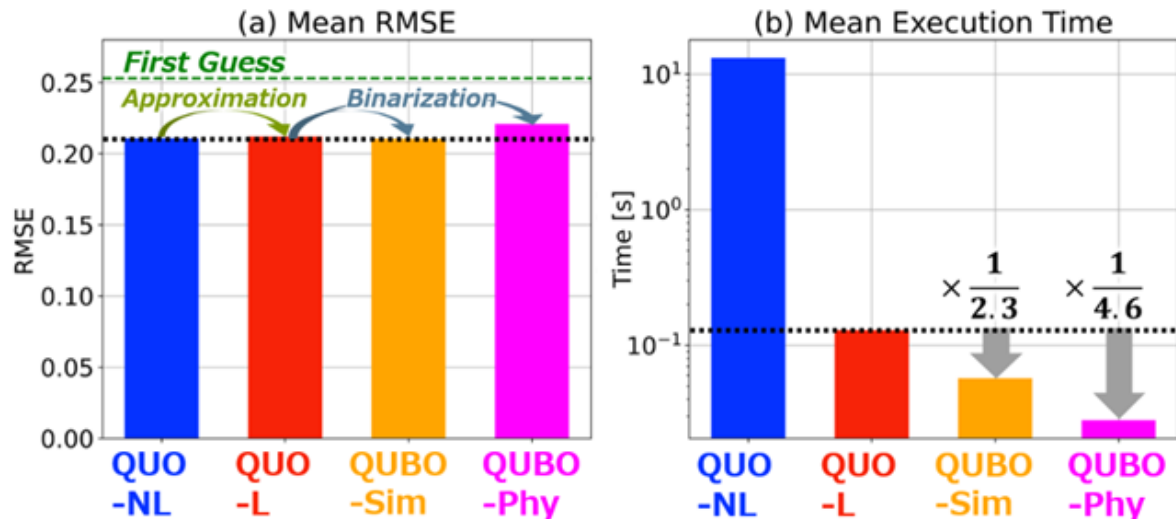


図 2-5: 準ニュートンを用いた 4DVAR と、QA を適用した 4DVAR による Lorenz-96 モデルの OSSE の結果。印刷中の論文、Kotsuki et al. (2024; NPG) を改変。

乗平均平方根誤差 (RMSE, Root Mean Square Error) に関しては、どの手法も同程度の値をとっていることが分かる。一方、図 2-5 (b) に示すように計算時間は基準となる QUO-L の計算時間に比較して QUBO-Sim では $1/2.3$ 、QUBO-Phy では $1/4.6$ に短くなっている。このように、QA をデータ同化手法に適用することで、解析精度を同程度に保ちつつ実行時間を高速化することが可能であることが示唆された。

課題推進者: 小槻峻司 (千葉大学)

研究開発課題1-2: 気象制御容易性の定量化

実施内容:

令和4年度は、レザバー計算や深層学習などのニューラルネットワークモデルを用いて、入力時系列を低次元化された特徴量のダイナミクスに変換する学習モデルの構築を進めた。具体的には、Penny et al. (JAMES, 2022) を参考に、低次元力学系 Lorenz モデルをレザバー計算で模倣することに成功した。

令和5年度は、小槻 PI と共に CSE に着目し、CSE における制御の実施における誤差成長ベクトルを調査した。誤差成長ベクトルの成長率に応じて、制御入力を変更する動的入力を導入することで、既存手法よりも少ない制御入力で見込みのレジームに誘導可能であるという結果を得た。また、台風進路のアンサンブル気象予測データの解析を小槻 PI、井元 PI と共に行い、台風の本質的軌道を表すランドスケープを抽出し、分水嶺を特定することができた。また、

SPEEDY モデルのシミュレーションデータに対して、レザバー計算を用いて低次元化することを試み、低次元化された空間において分水嶺の存在を示唆する分岐する軌道を特定した。

課題推進者： 徳田慶太(順天堂大学)

研究開発課題1-3: 気象制御容易性の定量化

実施内容:

令和4年度は、気象シミュレーションデータを低次元化するために必要となる機械学習技術の開発を行なった。まず、深層学習モデルの 1 つである変分オートエンコーダ (Kingma and Welling, ICLR, 2014) を実装した。次に、実装した技術を簡易気象モデル SPEEDY から得られたシミュレーションデータに適用した。また、ネットワーク構造を変えた深層学習モデルの実装も行い、気象シミュレーションデータに適用した。このようにして得られた低次元化の結果を比較することにより、気象データの分析に適したネットワーク構造の調査を行なった。

また、振動は対流など気象でも見られる重要な現象の 1 つである。対流現象については、シミュレーション (数値計算) ができる場合に低次元された数理モデル (縮約モデル) を得る方法についての研究が進んでいる (Taira and Nakao, Journal of Fluid Mechanics, 2018)。その一方、観測データのみから縮約モデルを得ることは難しく、十分に研究が進んでいない。この問題を部分的に解決するため、振動的信号から時系列の位相 (phase) を再構成する技術を開発し、論文発表を行なった (Matsuki, Kori, and Kobayashi, Scientific Reports, 2023)。

令和5年度では、気象シミュレーションデータを低次元化するために必要となる機械学習技術の開発を進め、変分オートエンコーダに基づく低次元化技術と、主成分分析を実装した。これら低次元化技術の性能評価として、気象制御容易性を評価する枠組みを開発した。Lorenz-63 モデルから生成された人工データを使用し、観測データ (台風発生から今までの観測) に対応する進路の一部のデータから左右どちらの進路に遷移するかを予測する問題を、教師なし分類の問題として定式化し、混合ガウスモデルを用いて予測を行った。その結果、2 つに進路が分かれる以前のデータから精度良く予測できる ($t=60$ ステップで正答率 98%) ことがわかった。さらに、時系列埋め込み (Takens, 1981) を使い、偏相関を基準として過去の情報 ($x(t-s), z(t-s)$) を追加して同様の予測を行なった。その結果、単一時点より早い時刻でどちらの進路となるか予測可能であることがわかった。

課題推進者： 小林亮太(東京大学)

研究開発課題1-4: 気象制御容易性の定量化

実施内容:

令和4年度は、クープマンモード分解 (KMD) のアルゴリズムの検討について研究を推進し、エルニーニョ現象を含む月平均の海面水温 (SST) データへ Vector Prony Analysis を適用した。1891 年から 2019 年までの 1548 ヶ月データへの適用により得られたクープマンモードの検討により、エルニーニョ現象を表現するモードを抽出する可能性を示した。本結果は Vector Prony Analysis が気象現象に適したアルゴリズムであることを示唆するとともに、気象に関わる大規模現象を少ないモードで表現する「モデル低次元」の可能性を示唆するものである。

令和5年度は、Vector Prony Analysis について災害をもたらす可能性のあった事例として 2020 年に発生した台風 12 号 (Dolphin) に関わるデータを小槻 PI グループより提供を受け、適

用に向けたデータの検討を進めた。また、現実大気のデータとなることを想定し、Vector Prony Analysis のロバスト化を目的として周波数領域 Vector Prony Analysis を提案した。

課題推進者： 薄 良彦(京都大学)

研究開発課題1－5： 気象制御容易性の定量化

実施内容：

令和4年度は、固有直交分解への習熟度をスモールデータにより効率的に高めるために、小規模非線形ダイナミクスから得られる疑似データを用いた検討を行った。この検討に基づき簡易気候モデル SPEEDY 出力を利用した技術開発を開始した。

令和5年度は、固有直交分解を用いた射影手法の有効性を評価するため、簡易気候モデル SPEEDY 出力および現実気象モデル出力における評価を試み、予備評価で射影手法の有効性を主観的ながら観察することができた。

また、深層展開を用いた Lorenz-63 モデルに対する制御手法を構築し、その有効性を示唆する結果を得た。また本結果は CSE の制御方策より良い制御性能を示していることから、当該制御方策の適用限界の把握にもつながった。

課題推進者： 小蔵正輝(大阪大学)

研究開発課題1－6： 気象制御容易性の定量化

実施内容：

令和4年度は、台風進路における制御点(分水嶺)を推定するために、ランドスケープ解析およびトポロジー解析に基づいて流れの分岐点の検出を行った。ランドスケープ解析は複雑なベクトル場から大域的な流れをポテンシャルによって表現する手法で、位置データ(台風の中心座標)と速度データ(台風の中心座標の時間変化)からグラフホッジ分解を用いて勾配流のポテンシャルを抽出する。さらに、その分岐点はランドスケープを3次元空間上の曲面とみなしたときの鞍点に相当する。さらに、この鞍点は、ランドスケープに対するレーブグラフの結合点とみなすことができる。データから構成される曲面のレーブグラフ化は宇田ら(2019)がパーシステントホモロジーに基づく計算手法を提案しており、本手法をランドスケープ曲面に適用することにより、ランドスケープの鞍点、つまり制御点(分水嶺)を検出するアルゴリズムを開発した。また、固有直交分析を用いて低次元化した後に、HDCBSCAN によりクラスタリングして、それらを有向グラフ化することにより、クラスタの時間経過の関係を表すことを試みた。気象庁の現業アンサンブル予測データに適用した調査の結果、気象の取りうるシナリオの変化を検知できる可能性が示された。特に、クラスタリングされるクラスタ数の推移を追うことで、シナリオ分岐に関する指数化に成功した。

令和5年度は、台風進路のアンサンブル気象予測データに適用して台風の本質的軌道を表すランドスケープ(ポテンシャル流れ)を抽出し、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。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、それぞれの終端領域に向かう確率的境界を定めた(セパトリクス解析)。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)

(2) 研究開発項目2: データ同化研究班

研究開発課題2-1: 大アンサンブル・データ同化実験

実施内容:

令和4年度は、①簡易気象モデル SPEEDY を用いた大アンサンブルの作成、②実気象モデルを用いた大アンサンブルの作成、という2つの研究開発課題に取り組んだ。

① 簡易気象モデル SPEEDY を用いた大アンサンブルの作成

扱いが容易な簡易気象モデル SPEEDY を用いて、数理研究班が取り組むアンサンブル気象データの低次元化に用いる学習用データおよび検証用データを作成した。それぞれのデータは、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF, Ensemble Kalman Filter)により擬似観測を同化することで作成した。

② 実気象モデルを用いた大アンサンブルの作成

現実的な気象モデルを用いて大アンサンブルデータの作成に向けて、研究環境の構築に取り組んだ。気象モデルおよびデータ同化システムには、申請者が開発に携わり、扱いに長ける SCALE-LETKF を使用し、計算機はスーパーコンピュータ「Wisteria」および「富岳」を使用した。

令和5年度は、気象モデルおよびデータ同化システムには SCALE-LETKF を使用し、2020年台風12号(Dolphin)を対象に、2種類のアンサンブルデータ、気象モデルの物理スキームを変更した multi-physics による方法と、同化手法である EnKF による方法で、それぞれ32メンバーと50メンバー作成し、これらを数理研究班と経済被害研究班に提供した。なお、制御効果の評価については、コアプロジェクトへ持ち越すこととした。

課題推進者: 岡崎淳史(千葉大学)

(3) 研究開発項目3: 経済被害研究班

研究開発課題3-1: 経済被害低減効果の推定

実施内容:

令和4年度は、次の2つについて、実施した。

① 分析対象 Exposure データの作成

日本全国を対象に、本研究で分析対象とする被災人口や民間資産(住宅物件)に関わる暴露資産(Exposure)データベースを構築した。使用したデータは、政府統計情報(センサスデータ、住宅土地統計、住宅着工統計)および損保料率機構が公開している保険統計情報である。まず、住宅土地統計から市区郡単位での住宅戸数および構造区分を特定し、住宅着工統計から得られる工事費をもとに建物価格を推定した。次に、保険統計情報から得られる住宅物件の保険対象別保険金額をもとに、家財価格を推定した。特定または推定された各種属性情報は、町丁字～市区郡単位で整理した。

② 被害関数の構築

①で作成した Exposure データベースを対象とした洪水被害推定を行うための被害関数の構築に着手した。ここで言う被害関数とは、被害度合いとハザード強度の関係を表す関数であり、過去の被害データに基づく統計的な手法、或いは工学的な被害想

定やシミュレーションに基づいて作成されるものである。過去の水害による被害の実態を明らかにするため、国土交通省の水害統計調査や総務省消防庁の災害情報といった公的な被害実績データを入手した。

令和5年度は、Exposure データベースの構築のため、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を収集し、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 データベースを作成した。この Exposure データベースを使用した被害関数を作成とアンサンブル浸水ハザードの計算については、移行するコアプロジェクトでの実施課題とした。

さらに、2017 年台風 18 号(Talim)および 2019 年台風 19 号(Hagibis)を対象に浸水ハザードを計算し、被災世帯数の推定を実施した。一部の地域で推定値の過大評価傾向がみられるものの、多くの地域では概ね実績値に近い推定値が得られることを確認した。

課題推進者： 山田進二(SOMPO リスクマネジメント株式会社)

3. 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:

令和4年度は、千葉大学の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整え、定期的な面談を実施した。研究推進のための各種サポートを受けた。また、プロジェクト推進経費により URA と事務補佐員を雇用し、2 名体制で PM 支援業務を担当した。

令和5年度も、千葉大学の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、令和 4 年度と同様に定期・不定期な打合せを実施した。また、URA と事務補佐員の雇用を維持し、2 名体制で PM 支援業務を担当した。

○ 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等):

令和4年度での運営会議は開催該当事案がなく未実施だったが、後述の課題推進者会議の場で重要事項の共有及び必要な調整を図った。

令和5年度も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。ただし、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。

○ 研究の進捗状況の把握:

令和4年度は、PM と全 PI および研究者・学生が一堂に集うプロジェクト課題推進者会議を計 6 回開催した。会議では、3 つの研究班の班長より課題毎の進捗報告と、研究員・学生からの個別の研究進捗についての報告がなされ、報告をもとにプロジェクト内での議論を深めた。課題推進者会議での研究の議論の後に(同日)、PM/PI と PM 班メンバーによる会議を行い、重要事項の共有・調整を行った。さらに、2022 年 12 月 22 日の午後に、千葉大学西千葉キャンパスにてプログラム側によるサイトビジットが実施された折りにも、研究現場における進捗状況の確認・共有が図られた。

令和5年度も引き続き PM と全 PI および参加者(研究者、学生等)が参加できるプロジェクト内部会議を 2 回開催した。会議では、3 つの研究班の班長による進捗報告と持回りで PI の研究成果等についての報告を中心に、積極的な議論が展開された。また、不定期に PM と班長を中心とした Web 会議を行い、重要事項の共有・調整を行った。

研究開発プロジェクトの展開

○ 研究開発体制における競争と協働:

令和4年度は、数理・情報分野の専門家である小槻 PI 以外の PI と小槻 PI がタッグを組み、各 PI が研究開発する手法を気象・地球科学データに適用することで課題推進者間の協働を図った。また、課題推進者会議を定期的で開催することで、他の課題の進捗と自らのポジションを把握し、さらに会議で活発な議論を展開することで互いの刺激を高めた。

令和5年度は、各班で PI がその専門分野において研究開発を推進し、PI 間での成果共有等を通じて競争と協働をバランスよく進捗させた。さらに、班間で成果を共有し、例え

ば数理研究班とデータ同化研究班が相互に成果をフィードバックしたり、この成果を経済被害研究班へ提供したりするなどにより、より総合的な競争と協働を推進した。

- 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：

令和4年度は、該当する事案はなかった。

令和5年度は、2023 年 3 月のコア研究に係る PM 追加公募に応募し、同年 8 月に正式に採択された。これに伴い、本要素研究プロジェクトを発展的に解消し、当該プロジェクトでの PI および参加者をほぼそのまま維持して、コア研究の開始準備に取り組んだ。これにより、本要素研究プロジェクトでの研究そのものはある程度限定的となった。なお、コアプロジェクトを同年12月より開始した。このため、本要素研究プロジェクトは同年11月で終了となった。

- 国際連携に関する取組みについて

令和4年度は、2023 年 8 月に東京で開催予定の ICIAM にて気象分野における情報圧縮・逆問題についてミニシンポジウムを主催し議論する予定であったことから、この分野での第一人者である Steve Penny (アメリカ)、Craig Bishop (オーストラリア) 両博士の招致を決定する等、国際的な英知を集める取り組みを進めた。

また、2022 年 10 月 31 日から 3 名の大学院生 (小槻研究室) が 2 週間アメリカのメリーランド大学に滞在。同大学の Jon Poterjoy 博士 (非ガウスデータ同化に関する第一人者) の下、連携強化のために研究を推進した。

令和5年度は、令和4年度に準備を開始した ICIAM (2023/8, 東京) にてミニシンポジウムを主催し、気象分野における情報圧縮・逆問題での第一人者である Steve Penny (アメリカ)、Craig Bishop (オーストラリア) 両博士を招致し、国際的な英知の集約に貢献した。

- 社会実装に向けた取組みについて

令和4年度は、気象制御の特性から ELSI の中で特に重要である法的課題について、国家賠償・河川法等の専門家との第一回の意見交換の場を 2022 年 11 月に持ち、その後気象制御の法的課題の洗い出しと、それぞれの課題の位置づけの整理のための研究会を 2023 年 3 月に開催するなど、社会実装に向けた取り組みを行った。

令和5年度は、気象制御に係る法的課題について、法的課題の洗い出しと課題の社会的位置づけ等の整理などを、法律・社会学の専門家を交えて継続して実施した。

(2) 研究成果の展開

- 知財戦略等について：

令和4年度は、研究開始後の期間が限定されたため、報告事項は無かった。

令和5年度は、研究開発の主体が数値計算であり、特許技術とはなり難いので、出願等はなかった。今後、制御技術の具体的な構築等の研究開発において知財化が進展できるものと予定している。

- 技術動向調査、市場調査等について：

令和4年度は、気象学分野で、これまで主として研究がなされてきた「気象予測可能性」について最新の技術動向を調査した。一方で、気象学の中の「制御」にかかわる研究は、クラウドシーディング等の気象操作は実施されてきたが、極端気象による災害の緩和に

関する研究はほとんどなく、ムーンショット目標8のプログラムに集約されつつあることを確認した。

令和5年度は、気象予測可能性について引き続き最新の技術動向を調査した。また、気象制御に係り、旧来より行われているクラウドシーディングを初め、海水面温度や大気温度の制御、大気流(風)の向きの制御等に係る技術(材料を含む)の基礎的調査を開始した。

○ 事業化戦略、グローバル展開戦略等の立案等:

令和4年度より本プロジェクトには SOMPO リスクマネジメント株式会社が課題推進者として参画しており、産業界とは具体的な連携が進んでいる。また、株式会社ウェザーニューズとは気象分野の AI 研究に関する議論を展開した。さらに、アクセンチュア株式会社との共同研究や技術開発に関する議論を実施した。

令和5年度も、SOMPO リスクマネジメント株式会社が損害推定を主とした課題に取り組んでいて、直近ではないが事業化が視野に入っている。更に、グローバルに気象予測の事業を展開している株式会社ウェザーニューズとの気象分野の AI 研究に関する協力を検討し始めた。

○ 技術移転先、将来的な顧客開拓に向けた対応について:

令和4年度より産業界との連携や共同開発の議論は実施したが、技術移転・顧客開拓の議論にまで発展したケースはなかった。

令和5年度においても、本プロジェクトが数値計算を主とした研究開発であるという特質により、特段の技術移転は未だ難しいと考えている。

将来的な顧客についても同様であるが、気象制御の具体的な技術が開発された場合、技術移転先は大手重工業会社、大手建築会社(スーパーゼネコン)、大手材料メーカーなどが想定される。

(3) 広報、アウトリーチ

広報については、令和4年度にプロジェクトのホームページ(HP)のリニューアルを計画し、従来の小槻研究室のサブ HP との位置づけから独立した HP へと格上げしてデザインコンセプトも一新した。HP のコンテンツ等の作成を 2023 年 3 月中に完了し、翌年 4 月から公開した。それ以降、この HP を積極的に活用し、特に実績(論文等)を適宜開示した。

また、小槻 PM が所属する千葉大学国際高等研究基幹のキックオフシンポジウム(2022 年 7 月)、および小槻 PM が兼務する千葉大学環境リモートセンシング研究センターの第 25 回シンポジウム(2023 年 2 月)にて、MS プロジェクトの研究内容を紹介した。特に前者は、学内のみならず一般市民の参加も促すもので、日経新聞に事前の告知広告と事後の記事が掲載された。さらに、日本科学振興協会主催の「会いに行ける科学フェス」(2023 年 10 月)と千葉市科学館主催の「大人が楽しむ科学教室」(2023 年 11 月)で講師を務め、市民との対話に積極的に取り組んだ。

アウトリーチについては、「データ同化国際ワークショップ」(2023 年 8 月)を開催した。

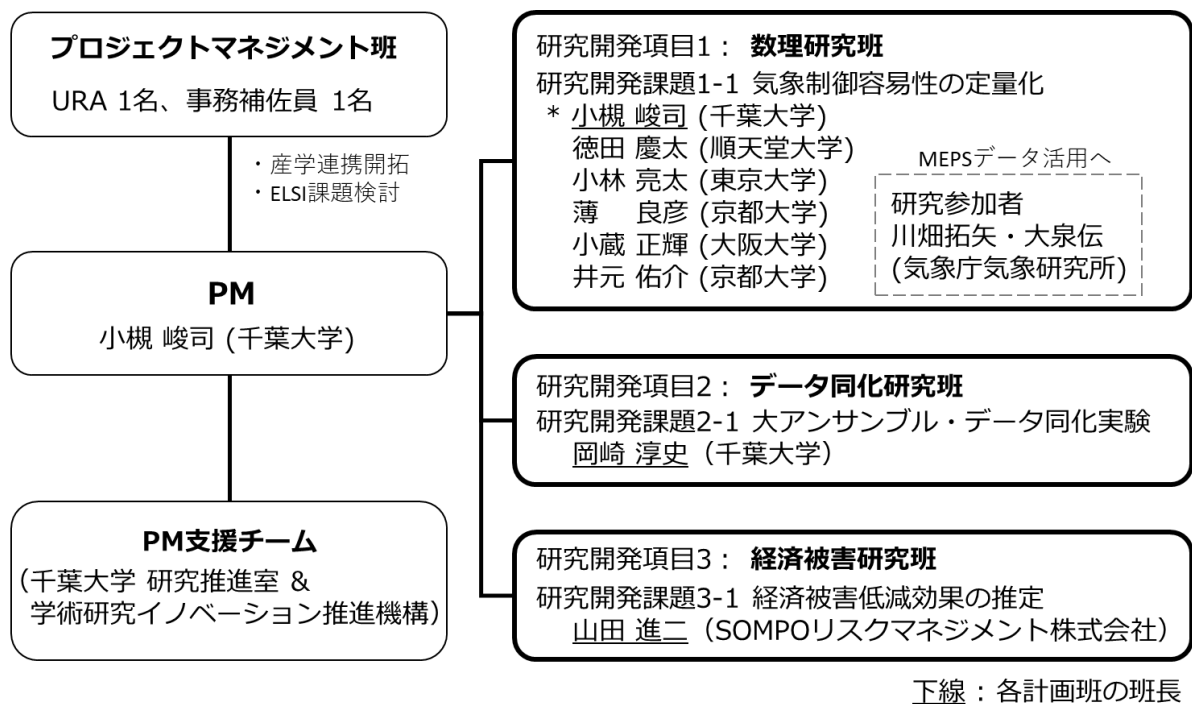
(4) データマネジメントに関する取り組み

令和4年度は1件の報告しかなかった。そこで、各 PI とともにデータマネジメントプラン(DMP)の重要性を共有の上、オープン・クローズ戦略に基づいたメリハリのある取り組みを目指すことを改めて確認した。アルゴリズム(プログラムのソースコードを含む)は、研究成果として確定し

たタイミング(例えば、論文執筆のタイミング)で GitHub などのオープンソース系開発プラットフォームで公開していく。一方で成果の基盤をなすデータ(大アンサンブルデータなど)は、zenodo などのオープンアクセスリポジトリを活用し、公開していく方針とした。

令和5年度は、DMP に積極的に取り組み、数値計算用データセット、シミュレーションデータ、実験データ等を各研究機関に計 12 件を登録した。今後は、引き継がれるコア研究課題において、必要に応じて公開クラウド(GitHub、GitLab、zenodo など)を活用していく予定である。

4. 研究開発プロジェクト推進体制図



運営会議 実施内容

- ・ 小槻 PM と、各班長 (小槻 PI、岡崎 PI、山田 PI)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。

知財運用会議 構成機関と実施内容

- ・ PM小槻と千葉大学・学術研究イノベーション推進機構からなる知財運用会議を設置した。ただし、特許等の出願はなかったため、開催しなかった。

5. 研究開発プロジェクト成果

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	3	2	5
口頭発表	12	6	18
ポスター発表	3	5	8
合計	18	13	31

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

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
3

ワークショップ等、アウトリーチ件数
3