

研究開発項目

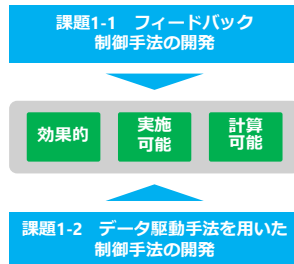
1. 気象制御手法の開発

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

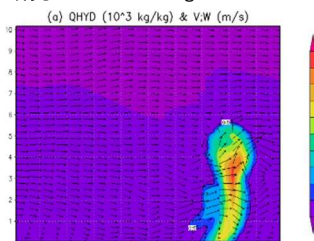
複雑かつ大規模な現象である気象を操るにあたってハードルが三つあります。まず、気象への**効果的**な介入を見つける必要があります。闇雲な介入では我々が望む気象を実現できるとは限らず、介入の仕方を注意深く選択する必要があります。また、介入は**実施可能**でなければいけません。気象は大規模なので制御には膨大なエネルギーが必要と考えられますが、一方で我々人類が費やすエネルギーにも制約があります。この制約内で介入を実施する必要があります。最後に介入は素早く**計算可能**である必要があります。気象現象の大規模性を克服して、豪雨被害が予測されてから発生するまでの短時間で介入を計算しなければなりません。これら三つのハードルを克服するために、モノとコトを思い通りに操るための理論である制御理論は必要不可欠です。しかしながらこれまでの制御理論では気象のような大規模現象は取り扱われていません。

これらハードルをクリアするために本項目では二つの研究課題を設けています（右図）。課題1-1「**フィードバック制御手法の開発**」では、制御理論において基礎的パラダイムであるフィードバック制御の考え方を発展させ、上記のハードルを克服できるような制御理論を構築します。この項目を補完するために課題1-2「**データ駆動手法を用いた制御手法の開発**」では、人工知能技術に加えてアンサンブル予測等のデータ技術を活用し、既存の制御理論の枠を超えた気象制御手法を開発します。これら課題の推進と相乗効果を通じて本項目では、海上豪雨生成を通じた陸域豪雨緩和の実現可能性を計算機上で示します。



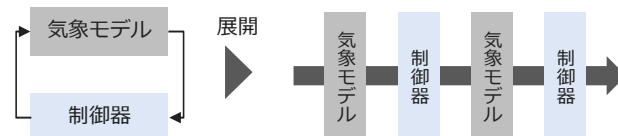
2. これまでの主な成果

【手法開発のための数値モデル選定 (1-1)】 気象制御手法の開発と評価にあたっては、取扱いの容易さと気象現象の本質を併せ持つ気象数値モデルが必要です。従来は Lorenz モデルが用いられていましたが、その次元は高々数十程度であり気象ならではの大規模性が欠けていました。そこで本研究では SCALE Regional Model と呼ばれる気象気候ライブラリに付随する**理想大気実験**（右図）と呼ばれるモデルを選定しました。このモデルは上記特徴を両方有していることから、気象制御研究の加速に大きく資することが期待されます。

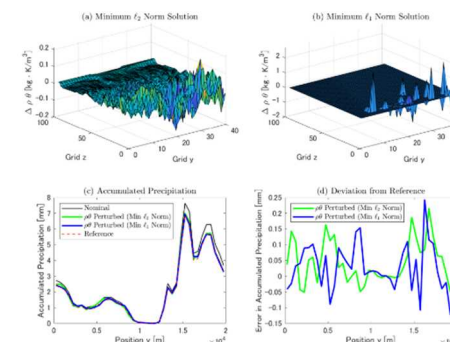


【既存制御手法の評価 (1-2)】 研究基盤を確固とするために、気象制御研究における従来の介入発見手法 [Miyoshi and Sun, 2022] の性能評価を行いました。従来手法には、予測区間と呼ばれるパラメータの大きさによっては効果的な介入が見つからないという課題がありました。この課題に対して本研究では、モデル予測制御と呼ばれる介入発見手法との比較を通じて、上述の課題が**従来手法の限界に起因**することを定量的に確認しました。この評価は制御数値に基づく介入発見手法開発の必要性を示唆しています。

【データ駆動手法の開発 (1-2)】 上記評価にあたって使用したモデル予測制御では**深層展開**と呼ばれる技術を組み込みました（下図）。深層展開は Beyond 5G の無線通信アルゴリズム開発等で盛んに用いられている機械学習技術です。この深層展開を組み込むことで、モデル予測制御における介入の最適化を効果的に進めることができることを確認しました。



【大規模性の克服にむけた理論開発 (1-1)】 気象現象は大規模であり、制御理論で提案されてきた従来型フィードバック制御手法の直接的な適用は計算量の観点から困難です。そこで本研究では凸最適化と呼ばれる高速な最適化フレームワークを用いた介入計算手法を開発しました。摂動解析と呼ばれる準備を予め行うことで、数千の次元を有する理想大気実験においても**数秒で介入が求められる**ようにしました。また、得られた介入が確かに有効であることもシミュレーションで確認しました（下図）。



3. 今後の展開

今後は上記の技術開発を基礎として、2024 年度マイルストーンとして我々が掲げている目標である**理想大気実験における降水量10%低減**を目指して研究をさらに推進していきます。特に課題1-1では、現在の手法を**連続的なフィードバック介入の計算へ適用**できるように発展させうえて、理想大気実験における網羅的な評価を行います。また課題1-2では、深層展開を用いたモデル予測制御に加えて、大規模現象へのスケーラビリティを有すると期待される**サンプルベースのモデル予測制御**に基づく介入発見手法の開発にも取り組みます。この介入発見手法のスケーラビリティを補強するために**ベイズ最適化**のようなヒューリスティックな最適化手法を組み込みます。

研究開発項目

2. データ駆動型気象予測手法の開発

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

2023 年度中においては、データ駆動型の気象予測モデルの調査や予備実験に基づく基礎検討を行い、次年度以降に開発予定のプロトタイプおよびマイルストーンの詳細化を行いました。特に研究目的から想定される予測精度、学習データ量および利用可能な計算リソース（並列 GPU 計算機）から、Vision Transformer をベースとした代理モデルを開発することとしました。また、既存モデルをベースとして用いたいくつかの予備実験の結果から、当項目における開発の指針として、モデルの軽量化と予測精度のトレードオフを考慮可能な手法への拡張を検討することとしました。また、モデルの学習において必要なベンチマークデータの検討および準備を行い、複数の項目間で共有しました。

2. これまでの主な成果

2020 年以降に発表された 21 件の関連論文から、各モデルにおいて用いられている要素技術（機械学習手法、アーキテクチャ、前処理、誤差関数等）や使用データセット（物理量、時空間解像度等）、評価指標に加えて使用計算リソースや学習時間等を体系的に調査し、研究動向の把握に加えて分析を行いました。その結果、次年度以降に開発を進める代理モデルプロトタイプとして、表 1 に示すように、Swin Transformer 等のシンプルな構造をもつ Vision Transformer に加えて、同様に注意機構を有する畳み込みニューラルネットワークを基本的なアーキテクチャとし、大気再解析データの主要な 8 つの物理量 1 時間ステップ分のみを入力および出力値としてもつ自己回帰型のモデルとする方針が定まりました。

また、入力時の変数圧縮に関する検討と予備実験を実施しました。特に、既存モデル（ClimaX）のように全入力変数を 1 つの代表変数に圧縮するアプローチに対して、図 1 に示すように、明示的に複数の代表変数に圧縮する手法を提案しました。小規模モデルを用いた予備実験の結果、既存手法と比較してモデルのパラメータ数を約 50%削減しつつも予測精度を向上させることに成功しました。また、モデル開発に共通のベンチマークデータとして、現業気象予報において用いられるメソスケールモデル MSM に加え、

ダウンスケーリング版大気再解析データ DSJRA-55 によるデータセットの準備を行いました。

表 1: プロトタイプ開発における機械学習手法、要素技術および学習データ（一部抜粋）

Component	Detail
ML architecture	CNN (Attention R2U-Net), Vision Transformer (Swin Transformer)
Loss function	Latitude-Weighted MSE, Pressure-weighted loss, MAE, CRPS
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)

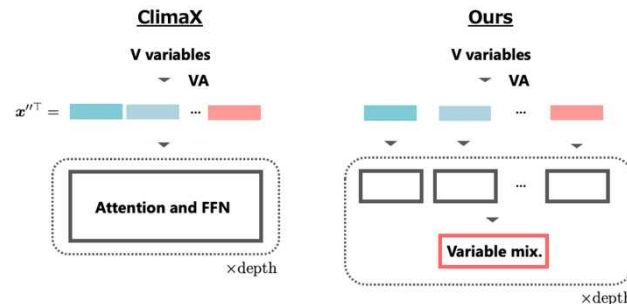


図 1: 既存モデル（ClimaX）と提案手法における入力変数の扱い方における違い

3. 今後の展開

予備検討および予備実験の結果に基づき、日本周辺域の豪雨現象の予測に特化した予測モデルの開発を継続します。特に、異なる時間解像度（例えば 1 時間、3 時間、6 時間、12 時間）の予測モデルの統合や、全球から領域スケールをシームレスにつなぐ予測モデルの開発を推進し、軽量かつ高精度な代理モデルの基盤技術を整備します。

また、共通ベンチマークデータに加えて、ベンチマークイベント（平成 26 年 8 月豪雨、平成 29 年 7 月九州北部豪雨、平成 30 年 7 月豪雨等）を設定し、代理モデルによる予測（項目 2）や分析（項目 3）、可視化（項目 10）等において協調して研究を進める予定です。

研究開発項目

3. 気象情報の潜在空間表現

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発プロジェクトでは、海上豪雨を生成することにより、陸上における集中豪雨被害を避けることを目標としています。そのために、気象の運命を、避けるべき陸上での豪雨に向かうシナリオから、海上豪雨の発生により大気中の水蒸気

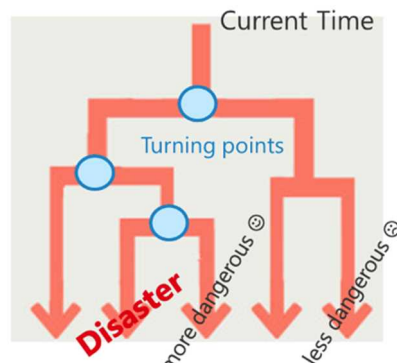


図1: 気象場の発展の潜在表現のイメージ

量が減少し、豪雨被害がなくなるというシナリオにうまく誘導する必要があります。ところが、例えば各地点での気温、湿度、風向きといった気象データを網羅的に記述すると、超高次元のデータとなり、予測や制御を行うための取り扱いが難しいものとなることが考えられます。一方で、例えばもし、似たような気象場の状態から進化した先の気象場が、いくつかの典型的なパターンに分かれて行き、そのうちの1つのパターンが避けたいシナリオ、というようなことがあるならば、そのような抽象化された気象場の運命をうまく記述することで、制御の効率化が期待できます。そこで本研究項目3においては、そのような、運命の分かれ道に関して重要かつ有効となる、本質的な低次元の自由度を抜き出す、ということを目指として設定し、研究を進めています。この本質的な自由度のことを、潜在空間表現、と呼んでいます。項目3は、気象制御に資する可能性のある潜在空間表現を獲得する手法として、大きく、レザバー計算、クーブマンモード分解、ランドスケープ解析の3つのアプローチを用いて検討を進めています。

2. これまでの主な成果

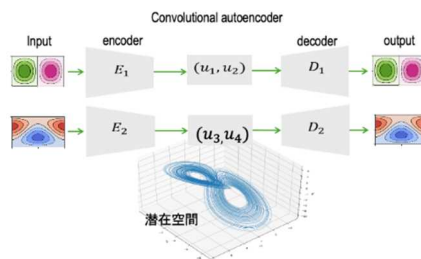


図2: 深層学習とレザバーを用いた潜在空間の時間発展の学習

学習を用いた気象場の低次元化技術を検討しました。Autoencoder や Convolutional Network など調査し、気象制御に資する技術開発のために重要な文献を複数リストアップしました。これらを踏まえた2024年度における検討で、レザバー計算の枠組みで非線形対流現象の予測技術を検討し、初期的な結果を得ることにつながっています(図2)。クーブマンモード分解を用いたアプローチでは、クーブマンモード分解や動的モード分解を用いた気象情報の低次元化技術を検討しました。さらには、気象データへの適用可

Original method - Schmid (2009) - SVD and POD-based - Initially applied to fluid data	Arnoldi-type method - Rowley et al. (2009) - Companion matrix-based - Initially applied to fluid data
Exact method - Tu et al. (2013) - SVD-based - Widely used in literature	Prony method - Susuki & Mezic (2016) - Hankel matrix-based - Delay embedding utilized
Kernel-based method - Williams et al. (2014); Kawahara (2016) - Gaussian kernel normally used - Applied to SST data in Navarra et al. (2021)	Sparsity-based method - Jovanovic et al. (2014) - L1 norm-based penalization - Initially applied to fluid data

図3: クーブマンモード分解の技術

能性を評価しました。周期的データに対してはProny method、準周期的データにはOriginalやExact methodsが有効であることを確認し、気象データへの適用に有効な技法をリストアップしまし

レザバー計算を用いたアプローチでは、深層学習による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の調査を行いました。特に、線状降水帯の発生予測において、深層学

習を用いたランドスケープ解析を用いたアプローチにおいては、グラフ・ホッジ分解を用いて、気象場の時間発展をポテンシャル流れと回転流れに分解し、ポテンシャル流れから気象場の潜在的な流れを表すランドスケープを可視化しました。台風進路のアンサンブル気象予測データにランドスケープ解析を適用することで、台風の本質的な軌道とその終着点のシナリオを分ける分水嶺を抽出することに成功しました(図4)。

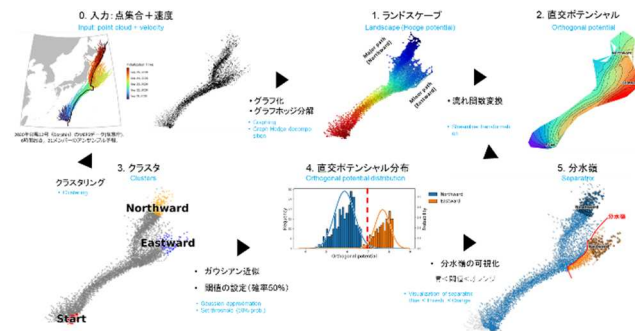


図4: 気象場のランドスケープと抽出された分水嶺

3. 今後の展開

次年度からは、初年度の調査によって得られた知見を用いることで、気象現象の潜在空間表現の獲得を行う手法のより具体的な定式化や、現実の気象データを含むより複雑なデータへの適用を進め、手法の有効性を検証する予定です。

研究開発項目

4. 気象制御計算システムの開発

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

気象制御の実現には、制御入力を与えた時に気象がどのように応答するかを予測し、いつ・どこで・どのような制御を行えば望ましい気象を実現できるかを推定する必要があります。しかし、現時点ではこれらを扱うことができる計算システムは存在しません。項目4では既存の数値天気予報システムをベースに、制御入力気象に及ぼす影響をシミュレートするとともに、最適な制御入力を推定することができる気象制御計算システムの開発に取り組みます。

また、項目4では、予測・制御計算の高速化にも取り組みます。気象制御の実現には、上に述べたような計算を、災害が発生する前に、適切な制御のタイミングを逃す前に、解き終えねばなりません。しかし、気象予測に使われる数値モデルの実行には一般に多くの計算コストが求められます。現在の計算資源と主流の計算アルゴリズムでは、現実的な計算時間で計算を終えることは困難であることが想定されます。そこで、項目4では、数値研究や深層学習により得られる代理モデルや潜在空間表現技術を、予測・制御計算システムに導入し、これにより、現実的な計算時間で制御入力の算出を実現すると共に、気象制御計算に有効な要素技術の評価を進めます。最新の計算技術である量子コンピュータも活用し、モデル予測制御やデータ同化の最適化計算をイジングモデルに帰着させ、量子アニーリングにより計算を高速化することを目指します。

以上を元に、項目4では、2026年度までに、①最適な気象制御の推定と入力が可能な気象制御計算システムのプロトタイプを構築し、介入操作の最適化により陸域の集中豪雨が緩和可能であることを示し、②気象予測計算基盤から算出されるアンサンブル気象予測データに代理モデル・潜在空間表現技術・量子計算技術を適用し、制御入力計算を高速化させる技術を開発する、という目標を達成します。

2. これまでの主な成果

当研究プロジェクトが開始した2023年12月以降、項目4では、制御入力気象に及ぼす影響の予測を可能にするシステム開発に注力しています。初年度は、制御入力として洋上構造物を選択し、これ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行いました。領域気象モデルとして理研が開発を進めるSCALE (Nishizawa et al., 2015; Sato et al., 2015) を用いて、モデル内の地形を一部変更することで洋上構造物の効果を導入しました。これをスーパーコンピュータ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、制御の効果の検討を行いました。対象とする事例については、研究開発項目5と共同で調査を行い、項目4では平成27年9月関東・東北豪雨を対象に検討を進めています。検討の結果、洋上構造物を設置することにより、構造物の風下側に、12時間積算で30mm程度の強雨域を生成されることが確認できました。構造物の大きさに対する感度についても調査を行ったところ、大きい構造物ほど構造物風下の降水量が多くなる傾向が確認されましたが、大きくするほどその効果が弱まる様子も確認されています。さらに風下側で降水量が減少することが期待されますが、現時点での効果は不明瞭です。さらに検討を重ねていく予定です。

気象予測は、対象とする大気が強いかオス性を有するため、完璧であることはあり得ず、常に誤差を含みます。どの程度の誤差が予測に含まれているのかを正確に示すことが、良い予測の条件です。制御入力を推定する上でも、誤差の適切な表現が求められます。項目4では、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、誤差を適切に表現するアンサンブル予測手法の開発に着手しました。2023年度は、気象モデルが有するモデル誤差と初期値誤差を陽に扱い、それぞれの定量化を推進しています。現時点ではこれらは独立して推定されているが、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ります。次年度以降も引き続き当課題を継続し、予測高度化にも取り組みます。計算の高速化については、最新の技術動向を調査し、代理モデル・

潜在空間表現・量子計算技術に関連または準ずる技術・手法を把握し、新たに比較検討の対象に加えるか検討を進めています。気象庁の提供するメソアンサンブル気象予測情報などの気象予測情報を活用して、予測情報の低次元化研究を推進し、台風について制御の”ツボ”となり得る分岐点が存在する場合があることを見出しました。また、量子アニーリングマシンに関する最新の研究動向を調査し、データ同化計算を高速化する手法を開発しました。この結果、気象予測計算に量子アニーリングマシンを使うことで、従来の計算機を用いた場合に比べて100倍以上計算時間が速くできる可能性が示唆されました。低負荷計算方法開発の検討についても最新の技術動向を調査しています。具体的には、変分オートエンコーダやDiffusion Modelといった生成AI技術を中心に、気象情報を潜在空間で表現する手法を調査しています。

3. 今後の展開

制御入力気象に及ぼす影響について、引き続き検討を進めていきます。2023年度には、洋上構造物のみを対象としましたが、より多くの手法について検討し、また対象とする事例も増やしていきます。これにより、どのような制御が効果的であるのかを明らかにしていきます。

また、いつ・どこで・どのような制御を行うべきかを推定する手法の開発に着手します。まずは、扱いの簡単な低次元気象モデルを用いて手法を確立し、得られた知見を実大気モデルに反映させることで、気象制御計算システムの開発を進めていきます。

研究開発項目

5. 海上豪雨生成に有効な介入操作の検討

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

最近の地球温暖化の進行に伴って、世界の様々な場所で豪雨がより頻繁に発生するようになっていきます。日本も例外ではなく、「線状降水帯」とよばれる特定の地域に数時間にわたって停滞する細長い形状をもった降水システムによる豪雨が増えているとの指摘があります。こうした背景において、本プロジェクト「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」では、海上豪雨を人為的に強化することで、下流の陸上の豪雨を減少させることを狙っています。具体的には、「人が住む陸上ではなく、上流にあたる海上で“何らかの刺激”によって降水を生じさせて雨の種となる水蒸気を減らしてしまおう」というものです。

梅雨の時期に関して、上流に位置する東シナ海では暖かい海面からの蒸発や南西側からの大量の水蒸気の輸送によって積乱雲が容易に発達できるような環境が整っています。実際にこの時期の降水を注意深く眺めると、九州の西側の小さな島をきっかけにして、その下流で降水が連なって発達する様子が確認できます。こうした気象学的な知見から、項目5「海上豪雨生成に有効な介入操作の検討」では、(人間による)“少し”の刺激であっても海上での人為的な降水の生成・強化が可能ではないかと考えて、梅雨期の豪雨事例を対象に、陸上の降水の抑制につながるような介入操作について調べています。具体的には、「どのような場合に、どのような手法であれば有効な介入が可能か？」を明らかにすることを目標にして、過去に生じた豪雨事例を様々な物理量を用いて整理すると共に、数値気象モデルを使って再現して、そこに“現実的”と考えられる気象介入の手段を試して有効性を確認するという作業を進めています。

2. これまでの主な成果

これまで本プロジェクトでは、2つの豪雨事例(2021年8月に九州で発生した豪雨と2014年8月に広島で発生した豪雨)を数値気象モデルで再現すると共に、人為的な介入手法を数値気象モデルに導入して、再現した豪雨事例を対象に介入の効果のみてきました。ここでは、表1にあげた5分類8種類の介入手法をモデル化して、それぞれについて仮想的な介入の実験を行うことで、その有効性を判断しています。

まず①の「噴水」は、海水をくみ上げて上空に散布することで、蒸発を通じた温度低下を狙ったものになります。ここでは、温度が低下した空気の上に、上流からの暖かくて湿った空気が乗り上げることをきっかけにして、海上で積乱雲が発達するのではないかと考えました。水を数100m上空に持ち上げること自体は、現在の技術レベルでも十分可能なのですが、現実的な電力の範囲内で引き起こすことができる温度変化は0.1℃程度で、生じる降水の変化は降水量の1%程度にしかありませんでした。ただし水の撒き方によっては、もう少し大きな影響がみられる計算結果もありましたので、手法の有望性としては中立(△)と判断しています。次に、②の氷の成長を促すような直接的な氷粒子の「種まき」ですが、小型の飛行機で一度に運搬可能な量は1000kg程度ということから、その影響は降水量の0.1%以下というやや残念な数値計算結果となりました。このことから手法の有望性としては、ネガティブ(×)と判断しています。また③の直接加熱・直接冷却ですが、これらの影響も降水量の0.1%以下という計算結果となっており、場所やタイミングをより精緻に調整しない限りは手法としてネガティブ(×)と考えています。次に④の障害物の設置では、高さ300m幅200mの風状の物体を100機程度海上に設置することを想定してモデル化しました。これは、東シナ海の小さな島がきっかけとなって降水システムが発達する、という自然を模したものとなっています。この介入手法は非常に有望で、5-10%程度の降水の変動をもたらすだけでなく、調整すれば下流の降水の制御も可能という計算結果が得られました。最後に、⑤の海水の攪拌による海面温度の低下ですが、降水を抑制する効果は十分に認められるものの、現実的なスケールの見積もりが甘い可能性があることから、現時点の有望性は中立(△)と判断しています。

表1: モデル化した介入手法

	方法	目的	有望性
①	噴水	冷気プールの生成	△
②	種まき 雲氷 雪 霰	氷の成長を促す	×
③	直接加熱・冷却 マイクロ波放射 ドライアイス散布	上昇流の生成 下降流の生成	×
④	障害物の設置	摩擦収束の強化	○
⑤	海水の攪拌	海面温度の低下	△

3. 今後の展開

これまでの取り組みによって「上流にあたる海上で人為的に降水を生じさせる」という点で、有望な幾つかの介入手法が明らかになってきました。一方で大気(特に降水過程)のカオス性を考えると、今回の結果が偶然に生じたわけではないことを明らかにしたり、どのような場合に制御可能かを示したりすることが必要です。このことから今後は、数値実験の数を増やして結果の違いを確かめると共に、他の豪雨事例での介入の数値実験や、制御可能性の良い指標となる物理量の探索、といった展開を計画しています。

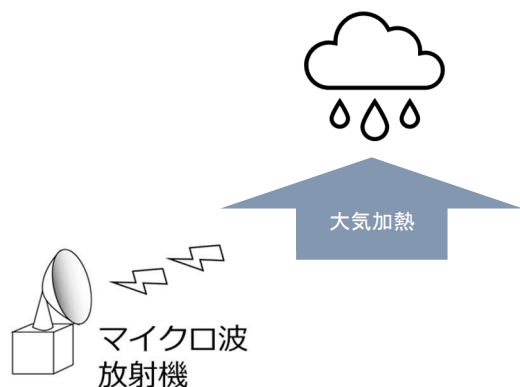
研究開発項目

6. 気象介入手段の工学的実現

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

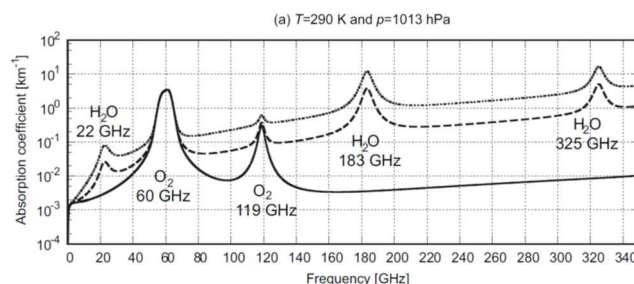
豪雨被害を未然に防ぐ工学的な気象介入は、人類史上本格的に取り組んだ経験のない未知のテーマであり、現在の科学技術を駆使しても決して容易な課題ではありません。仮に実現可能な方法であったとしても、安全面や倫理面に照らした慎重な事前検討が必要です。現在提案されている手法の一つとして、マイクロ波を上空の一点に照射することで大気加熱を促し、人口密集域から離れた地点に雨雲形成を誘発するマイクロ波大気加熱技術（下図）があります。この手法が気象学的な実効性を持ちうるのか、また安全性に問題がないのか、工学的な室内・室外実験に先立ち計算機上でシミュレーションを繰り返し、充分に確認を行うステップが欠かせません。



2023 年度 12 月より開始された本項目では、マイクロ波大気加熱の実現可能性を、数値シミュレーションにもとづく机上検討を通じて検証します。2023 年度内にはまずシミュレータ・プログラムを構築する上で欠かせない理論的背景を検討し、大気加熱率を定量化する物理方程式を導出しました。2024 年度以降シミュレータを用いた検討を順次実施していく計画です。

2. これまでの主な成果

マイクロ波大気加熱は、大気中の水蒸気や酸素分子、ないし大気に浮遊する雲水や雨水がマイクロ波を吸収する物理過程を利用します。適切なマイクロ波周波数帯を選択することにより、大気は電磁波から効率的に熱エネルギーを受け取ることができます。大気加熱シミュレーションにあたり、まず望ましい周波数の選択が最初の検討事項となります。



上図は、地球大気マイクロ波吸収スペクトル（気体成分のみ）を示します（『Satellite Measurements of Clouds and Precipitation: Theoretical Basis』 by H. Masunaga, Springer, 2022 より）。本研究では、22GHzの水蒸気吸収線と60GHzの酸素吸収線とくに着目します。これらの周波数における大気吸収係数を σ_{abs} とすると、電力 P_t でアンテナゲイン G をもつマイクロ波放射機から距離 r 離れた大気中での加熱率を求める方程式を次のように導出しました。

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

ここで、右辺の指数関数項は大気中を伝搬するマイクロ波が経路上で減衰する効果を担っています。この減衰項に加え、距離と共に波束が広がりマイクロ波強度が弱まる効果（ r^2 に反比例する項）により、大気加熱効果は放射機から離れば離れるほど急激に弱まっていくことが予想されます。

3. 今後の展開

2024 年度からは、導出した物理方程式をもとにマイクロ波大気加熱の数値シミュレーションを実施し、加熱効果の実現可能性の机上検討を開始します。当初は水平一様の理想化された大気モデルを想定し、現実的なマイクロ波放射機の想定下で十分な加熱効果が得られるか、大局的に目処を立てる解析を実施します。自然界に発生する雨雲中では、水蒸気から雲に凝結する際に典型的には1-100℃/時間程度の凝結潜熱加熱が解放されていることが知られています。当面の研究方針として、この程度の加熱率がマイクロ波照射により達成可能か否かを実現可能性の目安として考慮します。

梅雨時から夏場にかけて日本近海の湿潤な環境場では、海面から持ち上げられた気塊は500mから1km程度の高度で凝結を始め（すなわち雲になり）、さらに上空まで上昇すると自身の浮力で急激に積乱雲へと成長します。従って、この高度範囲をターゲットに十分な強度のマイクロ波加熱を与えることができるかどうか、数値シミュレーション検証の暫定的な目標になります。

研究開発項目

7. 法的課題の解決

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発テーマは、気象制御手段の実験および実装をめぐる法的障壁を洗い出し、気象制御手段に特有の条件を法制度に反映させるための方法や、気象制御手段の負の影響に対する補償の仕組みなどを立案するために、主に文献調査に依拠しながら、災害対策関連法制およびそれらをめぐる理論的思潮について、整理ないし検討を行っています。具体的には、①水災害対策関連法制における手続法上・組織法上の論点整理、②水災害応急対策の個別的検討、③わが国の治水政策をめぐる理論的思潮の明確化、④気象制御に資する保険制度の検討、⑤気象制御に資する国家補償の仕組みの省察などを実施しています。これらの成果を踏まえて、気象制御に関する法的課題の解決にとって必要なアクションプランの策定を目指しています。

2. これまでの主な成果

① 水災害対策関連法制における手続法上・組織法上の論点整理
主に、(a) 気象業務法における予報業務許可の法的性質、(b) 水災害対策関連法制における市町村長の法的地位について検討しました。(a) について、国等が行う予報を補完する局所的ニーズの高まりなどを踏まえて行われた最近の許可基準の改正を経てもなお、国際機関における気象業務の均質性確保、確実な実施を当該許可制度の趣旨とすることに揺らぎはないことを確認し、気象制御の国際的調整における気象庁（長官）の一定の役割について示唆を得ました。他方で、(b) について、今世紀における水防法の逐次改正を受けて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害対策基本法上の仕組みにおける市町村長の権限などに照らせば、気象制御が求められるような大規模水害事案においても、市町村長の権限との調整が不可欠であることを確認しました。その他、(c) 理論研究の蓄積が少ない各都道府県水防計画の比較検討を継続中であり、国土交通省の緊急災害対策派遣隊（TEC-FORCE）との連絡調整にかかる記述の少なさが明らかになっています。

② 水災害応急対策の個別的検討

緊急時に判断を的確に行うためのダム操作ルールについて、下流の状況や他のダムの状況を考慮しながら行う「統合操作」が近年実施されていること、事前放流による損失補償が行われていることなどを念頭に置きながら、河川法を起点として体系的に整理しました。その際、ダム操作規則／規程の策定に当たり、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になっている旨を特に確認しました。

③ わが国の治水政策をめぐる理論的思潮の明確化
明治以降の治水計画の変遷を整理し、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現在において、洪水リスク管理の関係主体を広範囲に捉えると同時に、その管理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、気象制御を一手法として受け入れる素地ができ始めていると言えることを明らかにしました。

④ 気象制御に資する保険制度の検討
わが国の火災保険水災補償条項、特に全国一律の水災料率の細分化に関する議論を分析しました。その過程において、保険料率のリスクアナウンスメント効果および減災の取組みを促すインセンティブ効果の不明瞭などを明らかにするとともに、私的自治の原則に基づいて運営される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」に接近しつつあるかもしれないという観方を提示しました。

⑤ 気象制御に資する国家補償の仕組みの省察
国家補償関係規定を置く個別法を網羅的にリストアップした上で、国家補償の谷間に関する予防接種法の立法趣旨、仕組み、運用等を分析しました。その結果、多岐にわたる被害が想定される気象制御の場合には、予防接種の場合以上に因果関係の認定、補償額の決定等に困難が予想されることを明らかにしました。

	国家補償関係の規定を置く個別法	
国家賠償	・原子力損害の賠償に関する法律 ・郵便法 ・鉄道営業法 ・日本国とアメリカ合衆国との間の相互協力及び安全保障条約第6条に基づく施設及び区域並びに日本国における合衆国軍隊の地位に関する協定の実施に伴う民事特別法	
損失補償	・土地収用法 ・都市計画法 ・都市再開発法 ・都市緑地法 ・農地法 ・自然環境保全法 ・森林法 ・種の保存法 ・特定空港周辺特別措置法 ・周辺整備法 ・米軍漁船操業制限法 ・古都保存法 ・消防法 ・河川法 ・海岸法 ・家畜伝染病予防法 ・植物防疫法 ・公共用地の取得に関する特別措置法	・地方自治法 ・景観法 ・土地区画整理法 ・都市公園法 ・土地改良法 ・自然公園法 ・鳥獣保護管理法 ・航空機騒音防止法 ・自衛隊法 ・米軍特別損失補償法 ・文化財保護法 ・災害対策基本法 ・水防法 ・砂防法 ・道路法 ・狂犬病予防法 ・国有財産法
国家補償の谷間	・予防接種法 ・刑事補償法	

3. 今後の展開

海外の関連法制、水災害に係る判例、各種条約に準拠した規制手段、損害賠償責任保険契約および損害賠償補償契約の特則等を定める宇宙活動法などを参照しながら、2. で挙げた検討をさらに深掘りしていく予定です。

研究開発項目

8. 経済被害推定

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発テーマは、気象制御を実施した際の経済被害低減効果を推定するために、日本国内全域を対象とした経済被害額の推定技術を開発しています。具体的には、①気象制御を実施した場合と実施しなかった場合での氾濫域や浸水深の変化を高解像度で推測できる、日本全国を対象とした洪水氾濫再現モデルの開発、および、②人口および民間資産・企業活動に関する各種統計データに基づく暴露資産データベースを構築し、日本全域の洪水被害を浸水深情報に基づき推定可能な経済被害額推定モデルの開発、の2課題を実施します。開発した洪水氾濫再現モデルと経済被害額推定モデルを活用し、気象制御による経済被害低減効果の定量化を目指します。



図1: 気象制御による経済被害低減効果の定量化の流れ

2. これまでの主な成果

① 人工構造物による氾濫への影響のモデル化
日本の河川は築堤や浚渫などの様々な人為的改変を受け続けているため、洪水氾濫再現モデルにおいても、河川の人為的改変を踏まえた現状を適切に反映する必要があります。

特に大河川と中小河川の間の合流点において、背水・逆流現象を防ぐために設置された水門は、氾濫の形態に大きな影響を与えます。本年度は、河川管理者資料や航空写真などから日本全国の水門位置に関するデータベースを作成し、開発している日本全国を対象とした洪水氾濫再現モデルへの導入を行いました。また、水門が適切に反映された新たなモデルと、水門が反映されていない従来モデルとの比較実験を実施し、水門の適切なモデル導入が再現される氾濫形態の蓋然性を向上させることを確認しました。

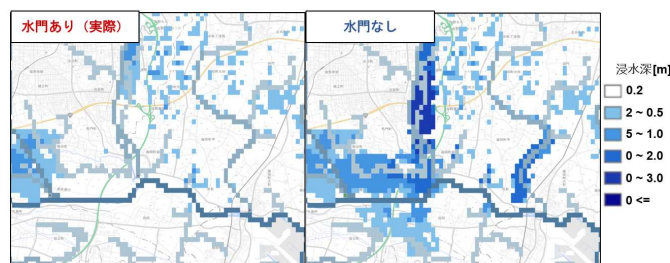


図2: 水門の有無による氾濫形態の比較
(背景: 地理院地図)

② 暴露資産データベースの構築

2020年頃の日本全国を対象として、被災人口・民間資産の直接被害および間接被害に関する暴露資産 (Exposure) データベースを構築しました。使用したデータは、国勢調査・経済センサスをはじめとする政府統計情報、民間企業の作成する有償空間統計、および損保料率機構が集計している保険統計情報です。

また、集計したデータベースに含まれる各情報の空間解像度は元となるデータによって都道府県レベルから100mメッシュ程度までとさまざまであることから、より高い空間解像度のデータを用いた高解像度化 (Disaggregation) を

首都圏一都三県を対象に実施するなど、実際の洪水氾濫経済被害額推定や気象制御による経済被害低減効果の定量化に必要なデータの高品質化を実施しています。

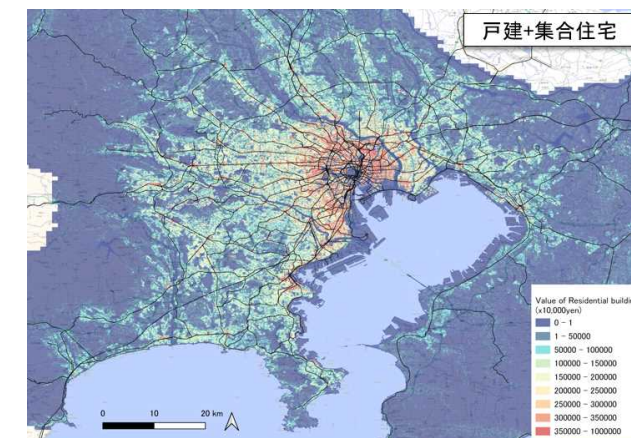


図3: 高解像度化実施後の建物資産額空間分布

3. 今後の展開

洪水氾濫再現モデルの開発では、堤防や堰など水門以外の河川人工構造物のモデル化を進めるとともに、洪水流量の全国的な再現性を向上させるために、斜面流出現象のパラメータ較正を実施します。
経済被害推定モデルの開発では、浸水深と暴露資産の位置・属性をもとに被害件数や被害額・被害率を算出する手法である被害関数の構築を実施します。

研究開発項目

10. 情報科学を活かした社会調査・発信

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発項目では気象制御を実現する上で必要となる社会調査・発信を、情報科学を活かして推進します。深層学習や視覚情報処理技術を用いて、集中豪雨の生成過程や介入効果を4次元で可視化し、気象介入の影響を解析することで気象制御研究の加速を図ります。更に、この可視化システムを用いて、プロジェクトのアウトリーチ推進にも貢献します。

2023年度は、今後、気象制御研究の加速を図ることを目的とし、集中豪雨の生成過程や介入効果の可視化に取り組みました。どのような気象現象をどう可視化するのがよいか、主に研究開発項目5の気象研究者との相互理解を進めながら取り組みました。また、個別の開発項目として、①集中豪雨の生成過程の可視化に資する気象観測データを選定し、その局所的な移流を抽出する技術として、数時間程度の範囲で局所領域の時間変化を表現する幾何変換を推定する技術を開発しました。また、②気象に関する4次元データの可視化技術およびデバイスの技術動向調査を行いました。

2. これまでの主な成果

① 集中豪雨の形成過程についての気象学的検討に資する可視化を目指し、まずは局所地域での移流モデリングを試みました。気象観測データとして、全球の輝度温度観測を提供しているGlobal-merged IR productを対象としました。赤外観測画像に写った雲の輝度パターンを用いて、数時間程度の範囲で局所領域の時間変化を表現する幾何変換を抽出しました。具体的には以下の手順で実施しました。

1. 温度に基づく雲領域の抽出・前処理による観測値欠損

補完

- 空間的な歪みを抑えるための接平面への射影（図1）
- 30分～4時間間隔で射影画像間での対応点推定（図2左）
- 対応点群からの幾何変換の推定（図2右）

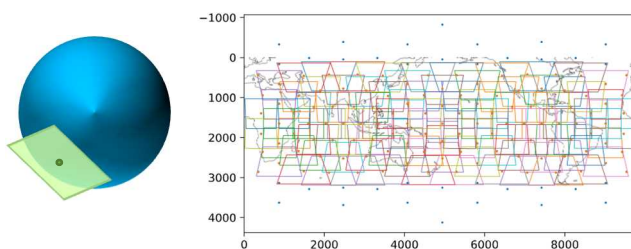


図1: 局所領域の接平面への射影

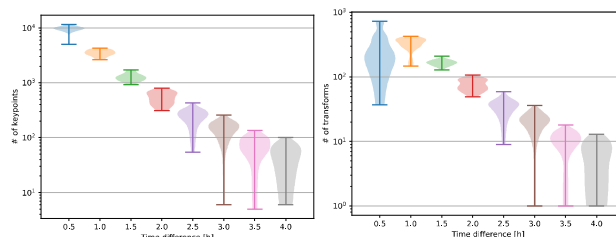


図2: 時間間隔と推定された対応点・幾何変換数の分布

② 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）をボリュームレンダリングによって表示するための視覚情報処理技術や表示デバイスの動向調査を行いました。具体的には、表示デバイスについて調査を実施し、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を行いました。さ

らに、得られた調査結果をグループ内で共有し、本研究課題において適した可視化技術および表示デバイスに関する議論を深めました。

また、研究開発項目5の気象研究者との情報交換を進め、集中豪雨の生成過程の可視化に資する気象データの検討を進めました。その結果、主に平賀優介氏（東北大学）が扱っているThe Weather Research and Forecasting (WRF) Modelの出力を受け取り、その中で降雨に関わる物理量の可視化に取り組むことになりました。

3. 今後の展開

2024年度までの目標として、気象介入の影響の解析に寄与することを目的とした可視化システムの構築を掲げており、これに向けて集中豪雨形成に関する4次元可視化技術の開発を進めます。可視化システムの活用を想定するユーザである気象研究者と定期的に情報交換を行い、対象とする気象現象および可視化手法について議論を行いながら進めます。可視化のアプローチとして、4次元ボリュームデータを直接可視化する方法と、3次元空間中の時間変化（移流）を抽出して可視化する方法の2種類を並行して進めます。まずは地域・時間を限定し、可視化システムのプロトタイプを作成します。

2024年度のマイルストーンとして、集中豪雨形成に関する4次元可視化システムのプロトタイプ・アプリケーションを開発し、限定的な地域・時間スパンにおける代表的な1事例について動画を作成します。