

研究開発プロジェクト概要

気象制御を実現するためには、意思決定のボトルネックである「制御効果最大化」の議論を可能とする必要があります。その議論に不可欠な「気象制御にかかるコスト」と「気象制御による被害低減効果」の比較検討を行うため、本プロジェクトでは下記の技術開発を行います。

1. 気象制御容易性の定量化

過去の災害事例に対し「少しの操作で災害を回避できる、災害/非災害の分水嶺が存在するか？」を機械学習により明らかにします。

2. 気象制御による被害低減効果の定量化

制御・非制御シナリオの被害金額・影響人口を日本全域で算出することを目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal8/84_kotsuki.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
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	教授
徳田 慶太	筑波大学 システム情報系	助教
小林 亮太	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	准教授
簿 良彦	京都大学 大学院工学研究科	准教授
小蔵 正輝	大阪大学 大学院情報科学研究科	准教授
井元 佑介	京都大学 高等研究院	特定助教
岡崎 淳史	弘前大学 大学院理工学研究科	助教
山田 進二	SOMPO リスクマネジメント株式会社 デジタル事業本部 アナリティクス第2部	部長

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

気象制御を実施するためには、意思決定のボトルネックである「制御効果最大化」の議論を可能とする必要があり、その議論に不可欠な「気象制御にかかるコスト」と「気象制御による被害低減効果」の比較検討を行うため、本プロジェクトでは下記の技術開発を実現する。

- 気象制御容易性の定量化

過去の災害事例に対し「少しの操作で災害を回避できる、災害/非災害の分水嶺が存在するか？」を機械学習により明らかにする。

- 気象制御による被害低減効果の定量化

制御・非制御シナリオの被害金額・影響人口を日本全域で算出することを目指す。

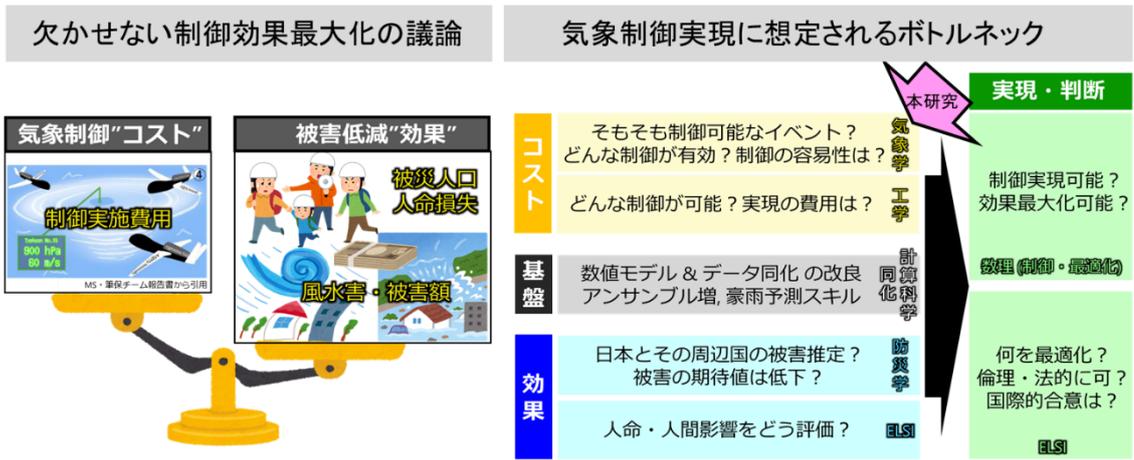
定量化によってコストと被害低減効果が数値情報として比較検討可能となり、より現実的かつ効率的な気象制御の意思決定が可能となる。激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会の実現に向けて、気象・数理・情報・産業界の連携チームで技術開発を進めていく。

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状況

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、本研究では被害低減効果の最大化を目指す、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。

本研究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(図 1-2)。



気象場の操作容易性を定量化し制御の容易性を判断する指標を確立

図 1-1: 本研究のムーンショット目標達成への貢献

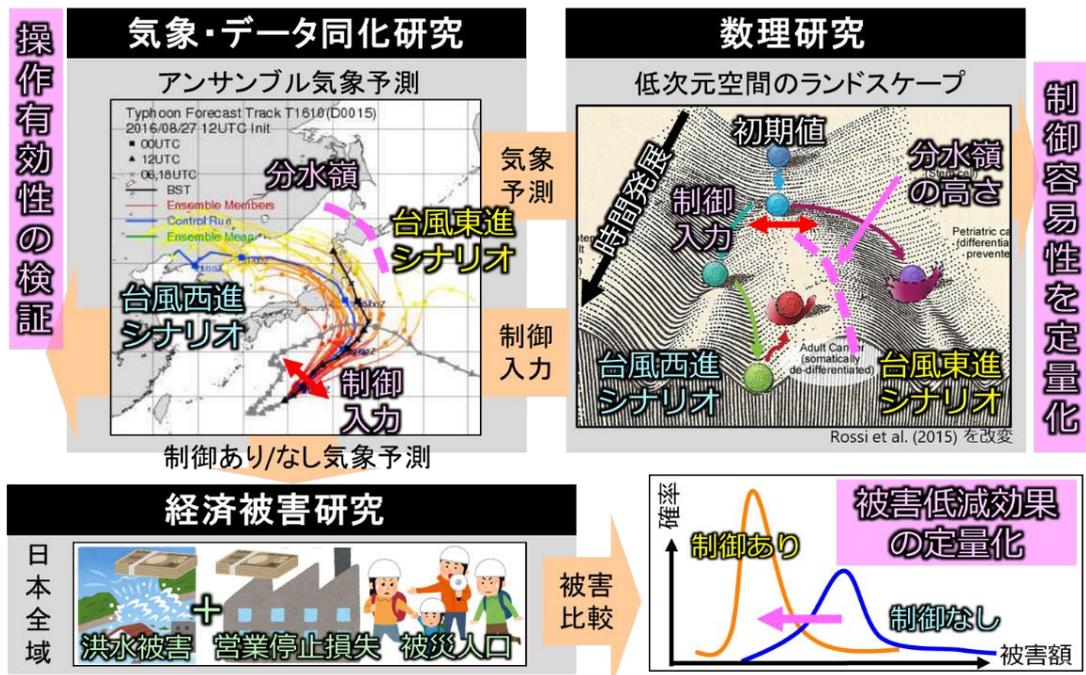


図 1-2: プロジェクトの全体像

当該年度は、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。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

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。2022 年度中に計 6 回の課題推進者会議を主宰し、研究課題の進捗管理や情報伝達を進めた。ま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 のリニューアルの準備を 2023 年 3 月に完了した(4 月より運用開始)。また、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。

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: 数理研究班

研究開発課題 1: 気象制御容易性の定量化

当該年度実施内容:

数理研究班で実施している研究は、「(i) アンサンブル気象予測を用いた有効な操作入力の特長 (図 2-1 右上から黄色枠へ方向)」と、「(ii) 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 (ii) については、年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、予備的検討として研究を開始した。

(i) 低次元化技術については、Lorenz-96 モデル SPEEDY、MEPS、全球海表面温度 (SST) データなど、PI ら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。

(ii) については、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 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めるレジームに誘導可能である事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 (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見込める未来に導くための数理手法の開拓を進めた。

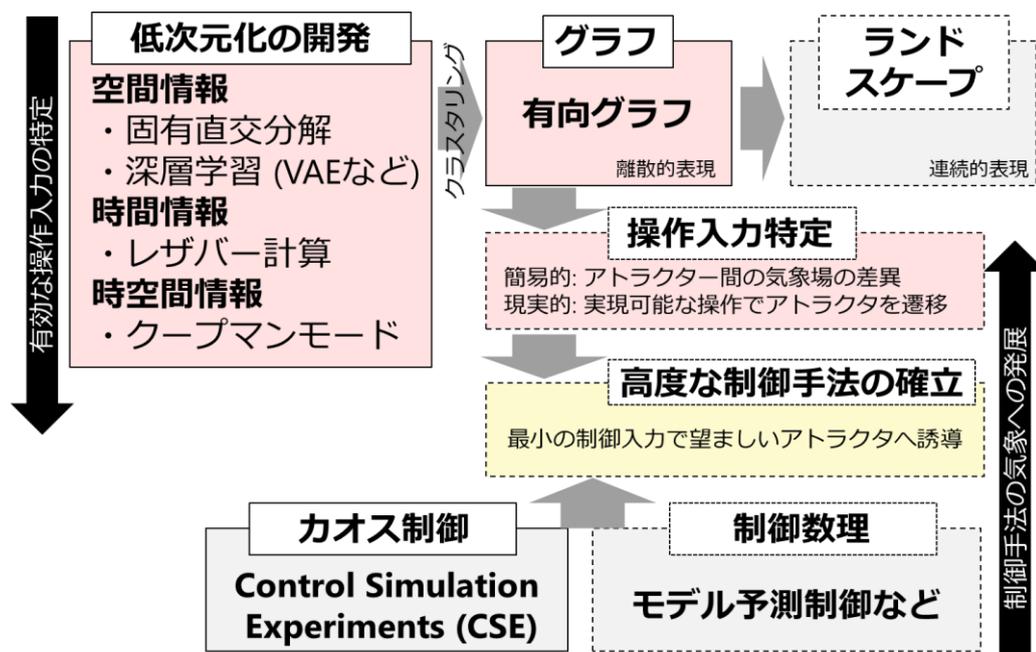


図 2-1: 数理研究班の研究開発計画。

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。

課題推進者:

小槻峻司(千葉大学)、徳田慶太(筑波大学)、薄良彦(京都大学)、
小林亮太(東京大学)、小蔵正輝(大阪大学)、井元佑介(京都大学)

以下、数理研究班における個別研究テーマに関する当該年度実施内容について記載する。

[個別テーマ1]: 固有直交分解による次元圧縮

[実施内容]:

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。

[課題推進者]: 小蔵正輝、小槻峻司

[個別テーマ2]: 変分エンコーダ (VAE) による気象情報の次元圧縮

[実施内容]:

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候モデル 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)。

[課題推進者]: 小林亮太、小槻峻司

[個別テーマ 3]: クープマンモード分解による時空間データの次元圧縮

[実施内容]:

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。

[課題推進者]: 薄 良彦、小槻峻司

[個別テーマ 4]: レザバー計算による時空間データの次元圧縮

[実施内容]:

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. (2022; JAMES) 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。

[課題推進者]: 徳田慶太、小槻峻司、井元佑介

[個別テーマ 5]: クラスタリングとランドスケープ解析

[実施内容]:

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。

[課題推進者]: 井元佑介、小槻峻司

[個別テーマ 6]: 低次元化されたアンサンブル気象予測からの有向グラフの作成

[実施内容]:

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、クラスター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ー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。

[課題推進者]: 井元佑介、徳田慶太、小槻峻司

[個別テーマ 7]: カオス指標を用いた CSE の高度化

[実施内容]:

Lorenz の 3 変数モデル(Lorenz-63)を対象として、カオス系における制御実験(CSE)を行った。CSEに基づく制御入力を行った際に、非安定方向、安定方向、周期的方向の3種類の CLV がどのように変化するかを調査した結果、気象制御においてより少ない制御入力で望ましいレジームに誘導可能であることが示唆された。この知見をもとにより少ない制御入力による制御実現について検討を進めている。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(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。

[課題推進者]: 小槻峻司、徳田慶太、小蔵正輝

(2) 研究開発項目2: データ同化研究班

研究開発課題1: 大アンサンブル・データ同化実験

当該年度実施内容:

当研究開発プロジェクト初年度である令和4年度は、a)簡易気象モデル SPEEDY を用いた大アンサンブルの作成、b)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。以下にそれぞれの課題の実施内容について記述する。

a) 簡易気象モデル SPEEDY を用いた大アンサンブルの作成

初年度は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)により擬似観測を同化することで作成した。

b) 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」である。

課題推進者：

岡崎敦史(弘前大学)

(3) 研究開発項目 3: 経済被害研究班

研究開発課題1: 経済被害低減効果の推定

当該年度実施内容：

a) 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。

b) 被害関数の構築

a)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。

課題推進者：

山田進二(SOMPO リスクマネジメント株式会社)

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：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済み。研究推進のための各種サポートを受けている。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、二名体制で PM 支援業務を担当している。
- 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)：運営会議は開催該当事案がなく未実施だが、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。
- 研究の進捗状況の把握: PM/PI 全員と PI の下の研究者・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ている。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・調整を行っている。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サイトビジットが実施され、研究現場における進捗状況の確認・共有が図られた。

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：数理研究班では、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に行うことで、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。
- 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：2022年度は該当事案無し。
- 国際連携に関する取組みについて：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・逆問題について主宰者として議論する予定であり、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。
- 社会実装に向けた取組みについて：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。

(2) 研究成果の展開

- 知財戦略等について：2022年度は研究開始後の期間が限定されるため報告事項は無い。今後の継続検討課題とする。
- 技術動向調査、市場調査等について：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。
- 事業化戦略、グローバル展開戦略等の立案等：本研究では、SOMPO リスクマネジメント株式会社から課題推進者が参画しており、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。
- 技術移転先、将来的な顧客開拓に向けた対応について：上述の通り、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。今後の継続検討課題とする。

(3) 広報、アウトリーチ

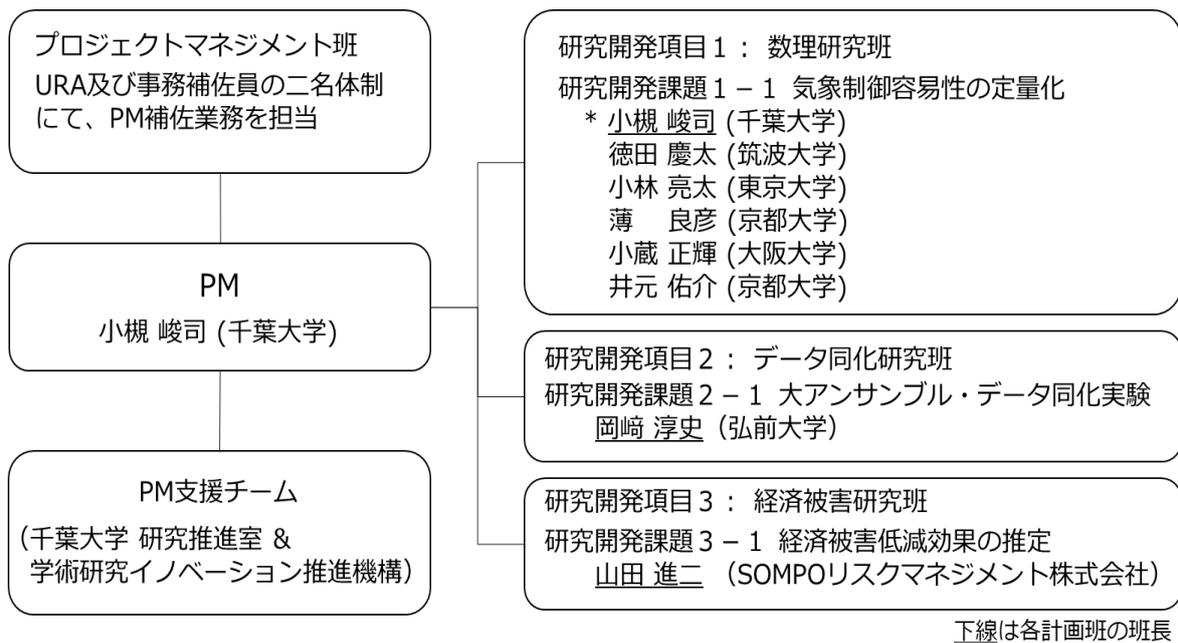
プロジェクトのホームページのリニューアルを実施した。従来の小槻研究室のサブ HP との位置づけから独立した HP へと格上げし、デザインコンセプトも一新した。3月中に準備は完了し、4月から公開済み。

小槻 PM が所属する千葉大学国際高等基幹のキックオフシンポジウム(2022年7月)、及び小槻 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、口頭発表8件、招待講演2件、ポスター発表2件、等々数多くの場面で積極的にプロジェクトの広報活動を展開した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

2022年度は1件の報告となった。今後は、各PIとも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。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を活用し、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、公開していく方針である。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



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する。
- ・ 気象制御容易性の定量化技術など、産業応用可能な技術について、知財出願の可能性・是非を討議する。
- ・ 2022 年度は開催該当事案がなく、実施実績無し。

運営会議 実施内容

- ・ PM 小槻と、各研究開班の班長 (PI 小槻、PI 岡崎、PI 山田)で組織する運営会議を設置する。
- ・ 4 ヶ月毎に進捗会議・重要事項共有を行う。
- ・ 2022 年度は開催該当事案がなく、開催無し。代替としてプロジェクト課題推進者会議を計 6 回開催した。

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	1	1	2
口頭発表	5	3	8
ポスター発表	2	0	2
合計	8	4	12

原著論文数 (※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	2	2
(うち、査読有)	0	2	2

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
2