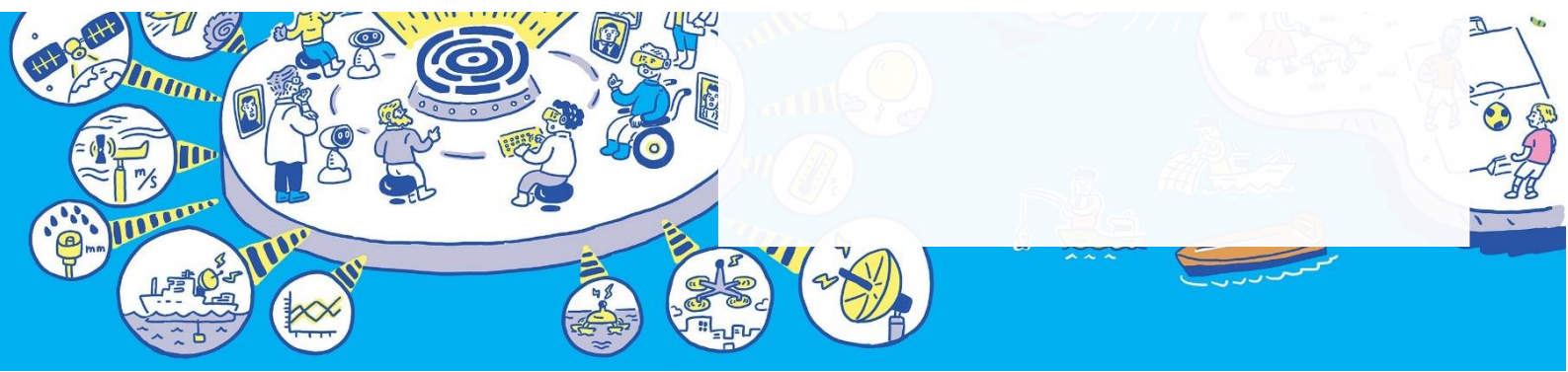


MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



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

本プロジェクトでは、小さな外力で大きく気象の未来を変えるための気象制御理論の構築と、制御実施を合意形成するために必要な極端風水害の社会インパクトの精緻な予測能力の獲得を達成する。それにより、2050年には、民主的な社会的意思決定に基づく気象と社会の制御で極端風水害の恐怖から解放された社会の実現を目指す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

各研究開発課題が設定した当該年度のマイルストーン達成に向けて、着実に研究が進捗し、多くのマイルストーンが達成されている。研究開発項目 A-1 については大規模アンサンブル台風再解析/再予報データセットに基づいて、台風中心付近の個別の積雲対流への介入をまず行い、その効果がスケールアップしていくことで台風全体の行く末を変化させようという台風制御戦略の軸を明確にすることができた。一方で、具体的な工学的アプローチを想定した実験では適切な介入の位置とタイミングをうまく決めることが困難であるとわかった。

このような困難を数理的なアプローチで解決するため、研究開発項目 A-1 と A-2 の共同でアンサンブルカルマン制御という新しいデータ同化を用いた制御数理の理論・応用研究を展開した。気象に特徴的な大自由度・強非線形・不確実性の大きいシミュレーションと観測という環境にうまくフィットした手法で、トイモデルから実際の気象モデルまで幅広い制御問題を解くことができると実証できた。台風制御のための数値実験の枠組みも完成しており、来年度以降最適化を進めることで制御に役立つ小さい外力の探索・精緻化を進めていける体制が整った。

研究開発項目 A-2 においては気象モデルのシミュレーションに内在する不確実性を定量化するための開発が進んでおり、概ね理論的・数理的な枠組みは当該年度において確立した。ベトナム水文気象庁との協力による現業メソアンサンブル気象予報の改善や、衛星レーダと組み合わせた結果の解釈などが進み、説明可能性を保ったままデータ駆動的なアプローチで気象予報の改善とその不確実性推定が実現している。前述したアンサンブルカルマン制御と組み合わせることで、シミュレーションの不確実性を陽に考慮した制御外力の自動最適化が可能になる。

研究開発項目 A-3 では、既存のヨウ化銀と試験管レベルでは同等程度の氷核性能をもつ、生物由来のクラウドシーディング候補物質の探索ができた。候補物質の実験室レベルでの解析をさらにすすめて、氷核能の解析を行っている。また研究開発項目 A-2 との協力の下で、この候補物質を用いることでどこまで湿潤対流を変化させられるかを、シミュレーションを通じて定量的に推定する体制を整えた。

研究開発項目 B-1 においては、全球河川モデルにおいて堤防・ダムによる洪水防護効果を表現する新しいスキームの頑健性を確認したり、大アンサンブルの計算のための高速な高潮・高波計算を開発したりして、水害ハザードの先端的な推定手法が順調に構築されている。研究開発項目 A-2 との連携により、これらの手法を用いた多地点・多セクターへの水害のインパクト予測の実行も始まっている。

研究開発項目 B-2 においては、気象予測、ひいては気象制御の効果の予測が減災行

動をどのように変えるのかという問いにモデリング・実証・心理実験の多角的なアプローチで挑み、具体的な成果を得ている。警報の空振りが人々の減災行動に影響を与えうるという「オオカミ少年効果」の存在を実証するなど、顕著な成果がみられる。VR を用いた災害予測(あるいは制御)の情報発信の最適化の実験も順調に進行し、来年度以降大規模実験の結果を解析できる見通しである。ELSI 研究については、市民対話の実施を通じて、既往のアンケート調査では言及されていなかった論点を抽出し、責任ある研究活動のための重要な指針を提供している。これらの ELSI および社会科学的な研究成果を活用し、プログラム全体での ELSI 基盤ユニットへも積極的に貢献している。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

PM 支援チームに、2名のムーンショット専任スタッフを配置している。1名は PM 補佐として事務・広報担当、もう1名は技術担当としている。

研究開発プロジェクト内の連絡調整等については、各課題推進者の研究時間最大化を PM 支援チームの使命と位置付け、各種書類作成を PM 支援チームで引き受け効率化している。非同期・同期のコミュニケーションをうまく使い分け、月ごとの研究進捗のモニタリングを行い研究活動にあたってのボトルネック解消に取り組んでいる。対面で PM、全課題推進者、PM 補佐が一堂に会する課題推進者会議を 2024 年 7 月 19 日、および 2025 年 3 月 31 日に東京大学において課題推進者会議を対面開催し開催した。データ共有用のサーバを整備し、プロジェクト間のデータマネジメントに生かしている。

数理研究についてはインフォーマルな会議体 “Mathematical Weather Control Meeting” を運営し、学生・研究員も参加可能な形で数理研究の進捗を共有するリモート会議を月 1 回程度開催し、プロジェクトで行われている多様な研究を有機的に結び付けている。

国際連携については米国 NASA JPL、ベトナム水文気象庁との共同研究が行われている。また PM は国際会議での招待講演をするなど、さらなる国際的な発信や連携強化に取り組んでいる。

広報活動としては研究開発プロジェクトのホームページで進捗報告や課題推進者へのインタビュー動画を公開している。また、2カ月に1回のペースで研究開発プロジェクト内のコロキウムを外部公開する形で誰でも自由に参加できる研究会 WeSCoS Colloquium (<https://www.wescos.t.u-tokyo.ac.jp/category/colloquium/>) を引き続き実施している。研究開発課題9を中心に市民参加型ワークショップを複数回開発し、深いレベルでの台風制御研究の普及に取り組んでいる。

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 A-1: 「制御可能性」を導く新しい気象データの構築・解析と制御手法設計 研究開発課題1: 「制御可能性」を導く新しい気象データの構築・解析と制御手法設計

当該年度実施内容:

台風内部の対流活動による台風発生への影響について、数値実験を用いて示し、積雲対流から台風につながるアップスケールのマルチスケール相互作用を通じた、エネルギー効率の良い介入手法の可能性について明らかにした。また、界面活性剤や大気造水といっ

た既存技術による人為的介入方法の効果について、数値シミュレーションにより検証した。
課題推進者:南出将志(東京大学)

研究開発課題2:データ駆動型気象制御器の設計

当該年度実施内容:

研究開発課題3において、台風を中心気圧などの状態量を効率的に変化させるデータ駆動型制御介入手法として、アンサンブルカルマン制御が提案された。そこで令和6年度では、この介入手法を改良したモデル予測経路積分制御の実装や、アクチュエータ配置手法と組み合わせることで、少ないエネルギー(外力)で効率的に気象状態量を大きく変化させる新たな枠組みを検討した。

課題推進者:橋本和宗(大阪大学)

(2) 研究開発項目 A-2:制御のための不確実性定量化

研究開発課題3:気象-社会結合系の不確実性定量化

当該年度実施内容:

気象シミュレーションに内在する不確実性を精緻に考慮した気象制御理論の確立と効率的な制御介入手法の提案に貢献するため、当該年度においては気象シミュレーションの不確実性定量化手法の基礎的な開発に加えて、複数の台風事例に対する応用を行った。また、シミュレーションの不確実性を陽に考慮した上で、最適な制御入力を少ない計算コストで求める新手法である Ensemble Kalman Control (EnKC)を開発し、低次元モデルおよび台風シミュレーションでその有効性を評価した。

加えて、極端気象の社会インパクトの精緻な予測能力の獲得に貢献するため、前年度に示した基本的な複合災害解析の枠組みに立脚しつつ、当該年度においては、最先端の氾濫予測モデルを組み合わせた包括的なリスク予測の枠組みを示し、少数の事例解析を通じて社会インパクト予測を行うためのフレームワーク構築を行った。

課題推進者:澤田洋平(東京大学)

研究開発課題4:気象物理過程の不確実性の解析

当該年度実施内容:

数値気象モデルによる極端気象再現性を雲物理的な観点で評価するために、研究開発課題 1、3 から提供される大規模モデルアンサンブル実験データと衛星観測データの比較解析を実施した。この中で、雲と降水に関する衛星観測データの解析を昨年度に引き続いて実施し、降水生成に関わる雲微物理プロセスを観測的に診断する統計手法を提案した。この成果は国際専門誌に査読付きの論文として出版された。また、衛星観測から得られる雲微物理に関する統計をモデルアンサンブルデータから得られるものと比較することによって、数値気象モデルの計算結果を雲の微物理過程の観点から評価検証した。特に、研究開発課題 1、3 でベイズ推定されたモデルパラメータ設定を雲物理過程の観点で衛星観測と比較解析した。

課題推進者:鈴木健太郎(東京大学)

(3) 研究開発項目 A-3:海上における湿潤対流の変化技術の開拓

研究開発課題 10:植物・菌類等由来の氷核活性による降雨制御

当該年度実施内容:

個別の積乱雲の発生を制御することを目標として、台風等の上空に有効な氷核活性素材を散布する介入手法がある。その実現にむけて最適な氷核活性素材の選択・設計を目指す。本課題では、地球にやさしい氷核活性素材候補として、生物起源の氷核活性素材の探索を行い、氷核活性の特性・機能解析や氷核活性機構の解析をヨウ化銀(AgI)やドライアイスと比較することで、それらを性能面で上回る、あるいは異なる機能を示す、地球環境にやさしい氷核活性素材の選択と設計を実現する。

本目的のため、2024 年度は、引き続き、すでに植物の氷核活性物質として単離されたシュウ酸カルシウム一水和物(COM)の特性解析を行った。また、液相氷核活性 Assay 系を用いて新たな生物起源の氷核活性素材の探索を行った。これらの氷核活性素材の特性解析は、利点・欠点、他の物質との違いなどの情報を提供し、実用素材候補の選択・利用に重要である。生物起源の新素材探索は、氷核活性素材の選択・設計において地球環境に優しい素材の提案など、引き出しを多様化・拡充することに貢献する。

課題推進者:石川雅也(東京大学)

研究開発課題 11:台風・豪雨等の極端気象を抑制する海面からの蒸発抑制技術の開発

当該年度実施内容:

本研究課題では、台風制御のための工学的アプローチとして、海洋水面に作製する水面単分子膜によって、台風の発生や強大化に必要となる水蒸気量を抑制することで、介入を行うことを想定した。研究課題 JPMJMS2282-14 では、海洋水面からの蒸発抑制効果の高い水面単分子膜を作製するための、界面活性剤の選定、適切な散布密度などについて検討が行われたが、本研究課題では、候補となる界面活性剤について、海域の生態系に悪影響を与えないことを確認した。また蒸発抑制のために必要なコストを確認した。

課題推進者:生方俊(横浜国立大学)

(4) 研究開発項目 B-1:水害の複合ハザードの統合的確率予測

研究開発課題5:洪水氾濫ハザード確率予測

当該年度実施内容:

気象制御の意思決定ツールとしての洪水氾濫インパクト評価では、河川からの氾濫が発生した際の浸水域を精度よく広域でシミュレーションすることが求められる。令和 6 年度は、昨年度から開発している堤防およびダムのパラメータの整備を地球全域に展開して全球河川モデルに統合し、地域ごとの洪水防護特性を考慮できる形で洪水防御スキームを実装した。ダムおよび堤防を表現した広域洪水氾濫シミュレーションを実施し、計算結果を河川流量・水位・浸水域などの観測データやハザードマップと比較することで、開発した洪水防護スキームの妥当性を評価した。また、観測データとの詳細な比較分析により、ダムおよび堤防のパラメータや計算スキームをよりロバストかつ高精度にするための改良を行った。

課題推進者:山崎大(東京大学)

研究開発課題6:高波高潮ハザード確率予測

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、海洋モデルの高度化と機械学習等のデータ駆動型アプローチを組み合わせ、全球的な汎用性がありながら、地域レベルの海岸における高潮・高波を高精度に解く手法を開発する。前年度までに、生成した台風データに基づき、任意の対象地点において高潮偏差を高速で推定する手法を構築した。これに続き、当該年度には沿岸域ハザードの確率評価に適用可能な、高速かつ十分な推定精度を有する波浪推算モデルの構築を試みた。

課題推進者:田島芳満(東京大学)

(5) 研究開発項目 B-2:社会インパクトの予測・制御と気象制御の社会的意思決定

研究開発課題7:災害社会ダイナミクスの予測・制御

当該年度実施内容:

当該年度は、前年度に実施した水害予報の社会的影響に関する理論的および実証的分析の知見を査読付き論文として国際学術誌に出版した。さらに、実際の気象水文データと社会統計データを収集し、客観と主観の両面から、予報がもたらす社会的帰結を包括的に明らかにした。一方、家計間相互作用の理論研究に関するレビューを実施し、エージェントベースモデルの構築に必要な要素および枠組みを明らかにした。

課題推進者:小谷仁務(東京科学大学)

研究開発課題8:水害経済被害額予測と意思決定のための不確実性推定

当該年度実施内容:

極端気象がもたらす災害ハザード(洪水・高潮・高波)による浸水被害がどのような社会的インパクトをもたらすかを明らかにするために、気象－河川－海岸アンサンブルシミュレーションによる氾濫解析の結果から経済被害額を算出した。昨年度までに、仮想的な台風による浸水氾濫被害の経済評価モデルを構築したモデルを用いて、研究開発課題5の河川氾濫のアンサンブルシミュレーション結果を用いて極端気象事象による浸水被害リスクの経済評価を行った。それにより、不確実性下における現実を反映した氾濫解析の経済被害算出手法を構築した。

また、極端気象事象による被害状況を人々に適切に理解してもらうメタバース技術開発として、昨年度は台風による浸水氾濫の仮想現実(VR)のプロトタイプを作成した。本年度は、その浸水氾濫のVRが、人々のリスク認知や減災行動意図に及ぼす影響についてWeb実験と脳画像(fMRI)実験を行った。その結果、水害危険性を浸水氾濫のVRにより実感を持って伝えることができ、減災行動意図が高まることが示された。

課題推進者:藤見俊夫(京都大学)

研究開発課題9:気象制御の社会的意思決定可能性の検討

当該年度実施内容:

気象制御の社会実装について議論の場を設計するにあたり、関与すべきステークホルダーの特定、彼らの認知構造の把握、適切な情報提供の内容および方法、さらに、有効な

議論の手法等を明らかにすることが重要である。

本年度は、これまでに市民対話をとおして得られた成果を踏まえ、若年層および海外にルーツを持つ留学生を対象とした市民対話およびアンケート調査を実施した。これにより、台風制御技術に対する受容性に影響を与える可能性のある情報要素の抽出を試みるとともに、文化的背景や台風被害経験の異なる対象からの潜在的な ELSI (倫理的・法的・社会的課題) およびステークホルダーの抽出を試みた。

また、ELSI 横断検討チームの議論に参加し、気象制御技術に関する ELSI 課題の整理および知見の統合を図った。特に、ELSI 関連論文の共同執筆に向けて、第 5 章「社会的判断・意思決定プロセスにかかわる課題」を担当し、執筆を進めた。

課題推進者: 松山桃世 (東京大学)

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 支援チームには PM の他、2 名のムーンショット専任スタッフを配置した。1 名は事務・広報担当で、各種書類作成支援、課題推進者間または JST との連絡調整、ホームページや取材対応等の広報活動を行っている。もう 1 名は技術担当で、本研究において整備する計算機等の研究資源の課題全体での供用、開発したプログラムやデータのオープンソース・オープンデータ化と公開体制の構築を行っている。
- 重要事項の連絡・調整方法として、課題推進者会議を設置し、各課題推進者と PM チームの間で連絡調整を行った。各課題推進者の研究時間最大化を図るため、事務的な連絡事項に関しては可能な限り Slack やメールなどによる非同期のコミュニケーションを主とした。研究そのものにかかわる重要事項については対面会議や Zoom などの同期のコミュニケーションにより行った。
- 課題推進者会議を月 1 回 Slack 上で書面開催し、その月の進捗や研究発表の状況、研究を進めるうえで課題となっていること等を PI のみならず各課題推進者の研究室で実働している研究者とも共有した。2024 年 7 月 19 日、および 2025 年 3 月 31 日に東京大学において課題推進者会議を対面開催し、各課題推進者の進捗状況報告、議論を行った。
- 2024 年 7 月 22 日にサイトビジットを東京大学にて受けた。PD、SPD、AD より多角的な視点から有益なコメントを受けプロジェクト運営に反映させている。

研究開発プロジェクトの展開

- 研究開発体制については一つ一つの課題が独立かつ目標達成に不可欠な問題に取り組むことを原則とし、単一の問題を複数のチームが解こうとするような競合関係は発生しないように各研究開発機関を配置した。一方で、ムーンショットの壮大な目標は一つの研究開発項目や研究開発課題のみでは到底達成できないため、各課題間の連携を積極的に促した。加えて、現状の研究開発体制では解決不可能なボトルネックがないか常に気を配り、必要に応じて体制を変更することによってより最適な研究資金の活用が行えるよう、各研究開発課題の進捗をモニタリングした。
- 研究開発の加速や研究開発プロジェクト全体の再構築については、研究開発項目 A-3「海上における湿潤対流の変化技術の開拓」を前倒しで開始し、2023 年 12 月に研究開

発課題 10「植物・菌類等由来の水核活性による降雨制御」が加わった。さらに 2024 年 4 月に研究開発課題 11「台風・豪雨等の極端気象を制御する海面からの蒸発制御技術の開発」を追加する準備を進めた。加えてこの研究開発項目 A-3 と既存の気象制御理論研究項目である研究開発項目 A-1 の連携を強化するとともに、気象制御シミュレーションに基づいた研究開発を加速させることを企図して、研究開発項目 A-2 内部にも気象制御理論の研究を行う体制を構築した。研究開発項目 A-1、A-2 で行われる気象制御研究を数理で結びつけるように体制を変更し、当該年度より稼働している。

- 国際連携に関する取組みについては、研究開発プロジェクトの一部成果がベトナム水文気象庁との共同研究に発展しており、昨年度に続き、2025 年 2 月に PM が現地に訪問する機会も得、今後の国際的な展開が期待できる。また、本研究開発プロジェクトには、外国研究機関出身の研究者が多く参画しており、国際的な人材交流ネットワークの中に研究プロジェクトを入れることができている。
- ELSI 課題については、研究開発課題9を起点として、市民参加型ワークショップを行い、市民の意見を積極的に研究活動に取り入れる体制ができている。PM も当該ワークショップに参加すると同時に、そこで得た結果を課題推進者と共有することで、研究開発プロジェクトに参画しているすべての研究者が ELSI を意識して日々の研究活動に努める体制を作っている。また WeSCoS Colloquium #13 においては ELSI を議題とし、深刻な自然災害に対する対応力の格差の問題などについて議論した。このように気象制御研究がもたらすと想定される影響を包み隠さずオープンに議論する姿勢を研究開発プロジェクト全体として崩さないように今後も努める。
- 数理研究については数理分科会において、研究開発プロジェクト全体としての方針を示し、枠組みが認められた。2050 年までを見据えてさらに広範に数理研究の活用を目指して、以下の方策を打っている。
 - ・WeSCoS Colloquium # 09、10、12 では機械学習を中心として、気象予測革新のための数理研究について幅広く議論した。今後もこのような公開コロキウムで、新しい数理研究の芽を探していく。
 - ・研究開発課題2が中心となって、システム制御情報学会の学会誌『システム/制御/情報』において特集号「気象・災害の予測と制御に向けた取り組み」を企画し、数理を軸に気象学・社会科学・情報科学の多角的なアプローチで災害の予測と制御の取り組みが紹介された。
 - ・研究開発課題 2 と 3 が中心になり、インフォーマルな会議体 “Mathematical Weather Control Meeting” を運営し、学生・研究員も参加可能な形で数理研究の進捗を共有するリモート会議を月 1 回程度開催している。

(2) 研究成果の展開

- 研究成果の展開についてはオープンサイエンス・オープンイノベーションの考え方を主軸とする。既存のムーンショットの研究のみで目標が達成されるわけではなく、最終的にはより広い研究者コミュニティ全体で目標が達成されるはずであるという立場に立ち、研究成果やイノベーションの果実を本研究開発プロジェクトの研究者で独占せず、広く世界全体の財産とすることに努める。つまり研究成果はオープンにすべての人が利用可能なようにする。そのために、作成したデータやコード資源等を迅速かつ広く公開する仕組みを、PM チームを中心に整えた。技術情報を広く公開することにより、多くの研究開発アクターを呼び込み、研究領域全体の拡大に努める。

- 国内外の研究開発動向調査については PM が専任スタッフの補佐を受けながら全体をリードしつつ、研究開発プロジェクト全体にわたる多様な学域をカバーするため、適宜課題推進者に協力を要請している。

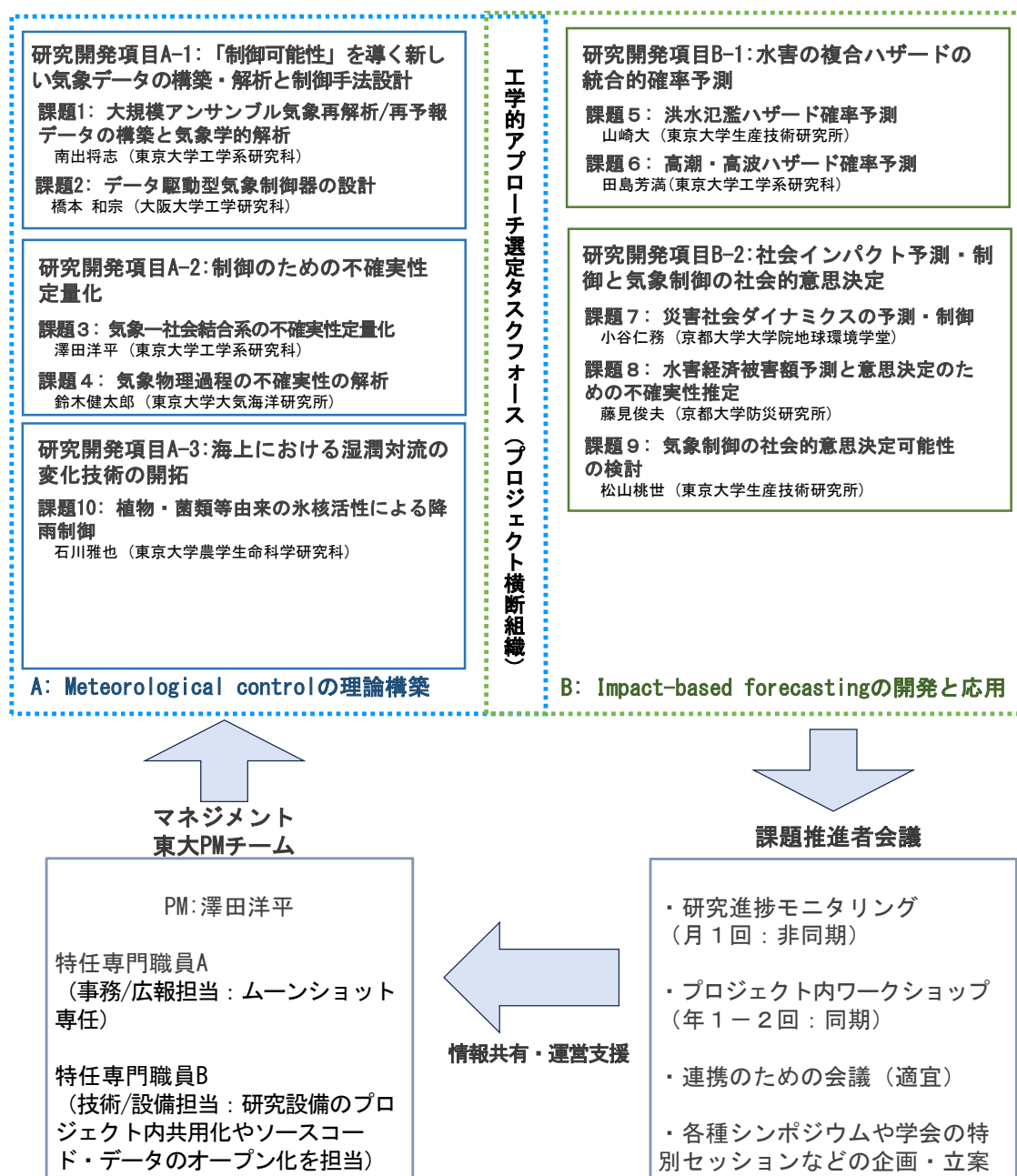
(3) 広報、アウトリーチ

- 本研究全体のホームページ(<https://www.wescos.t.u-tokyo.ac.jp/>)を2022年度開設以来、国内外への広報活動の拠点として、日本語版と英語版を運用している。研究成果、コロキウム案内、公募情報、動画を活用した研究紹介コンテンツなど、適宜最新の情報を掲載している。
- 多様な分野の方々との議論を通じて今後の数値天気予報研究について考える WeSCoS Colloquium を2か月に1回程度のペースで開催している。コロキウムは一般公開しており、2024年度は6回開催し、合計201名の参加があった。
- 研究開発課題9を中心に市民の研究開発活動への参画を企図したワークショップを、奈良県西大和学園中学校(2024年9月14日)、山梨県山梨英和高等学校(2025年1月21日)、および東京都東京国際交流館(2025年3月2日)に開催し、合計203名の参加者を得た。
- PM は積極的に招待講演をするなど、国内外のシンポジウム等で国際的な情報発信や連携強化に取り組んでいる。当該年度は、メソ気象研究会および GEWEX Early Career Researcher Workshop で講演した。また、プロジェクトが目指す impact-based forecasting 研究の在り方を日本語で平易に解説した記事を月刊海洋誌に掲載した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

- 原則としてデータは積極的に公開し気象制御研究という新たな研究領域への研究者の積極的な参入を促す。当該年度は、データセット構築用サーバを設置し、研究開発課題1で予定している大規模再解析データセットの構築と公開への準備を進めた。本サーバを今後有効活用しプロジサーバ内部および外部へのデータ共有・保全に生かしていく予定である。本研究開発プロジェクトで作成したコードのほとんどは論文投稿時に公開済みである。

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

2024 年度は該当する案件がなかったため、開催なし。

運営会議 実施内容

必要に応じて適宜非同期・対面等で開催した。

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	2	3
口頭発表	14	15	29
ポスター発表	1	5	6
合計	16	22	38

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	2	6	8
(うち、査読有)	1	6	7

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	3	1	4
書籍	1	1	2
その他	0	0	0
合計	4	2	6

受賞件数		
国内	国際	総数
2	0	2

プレスリリース件数
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
10