

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の構築が進むとともに、その解析により台風中心付近の個別の積雲対流への介入をスケールアップして台風全体の行く末を変化させようという基本的な戦略の有効性を示す結果が得られている。より基礎的な制御工学に基づいたデータ駆動型気象制御器の開発研究も順調に進行し、昨年度よりも気象に近い設定の問題に挑んだ。

しかし、研究開発項目 A-1 の現時点での成果は現実的な介入手法に基づいておらず、この点について研究の加速が必要になっている。そのため新研究開発項目 A-3「海上における湿潤対流の変化技術の開拓」の立ち上げを当初計画よりも前倒しして行った。2023年12月に研究開発課題10「植物・菌類等由来の氷核活性による降雨制御」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。新規課題推進者と研究開発項目 A-1 の連携をPMのリーダーシップで強化し、より現実的な介入手法に基づく制御シミュレーションの例示に取り組んでいる。加えて研究開発項目 A-2 内にも気象制御シミュレーションによって有望な制御手法の探索を行う研究開発課題を立ち上げ、次年度からの本格稼働を開始するための体制構築を行った。

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、特に理論研究では当初想定を超える複雑性を有する問題を解くことができることが分かるなど、顕著な成果を得た。実際のメソ気象予測に対する不確実性解析についても数値計算、および観測診断的なアプローチによる研究を進めた。

研究開発項目 B-1 においては、全球河川モデルにおける河川防護効果の再現が可能になるという顕著な成果を得た。また沿岸ハザード推定についても大アンサンブルの計算を極めて高速化する技術的な進展が見られ、マイルストーンを着実に達成している。

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。気象制御の経済的な便益推定を行う開発も進んでいる。ELSI 研究も特筆すべき成果をあげている。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。

(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 2023 年 10 月に開催した。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。

研究開発プロジェクト間の連携促進を目的として 2023 年 7 月 10 日、11 日にプロジェクト横断ワークショップを東京大学において開催した。プロジェクト内部での人材育成の在り方を考え、特に外国人研究者・若手研究者・学生に発表機会を多く提供した。

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 ESCAP/WMO 台風委員会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:大規模アンサンブル気象再解析/再予報データの構築と気象学的解析

当該年度実施内容:

極端気象や、その基幹プロセスである対流現象の「発生しやすさ」を解析するための台風の再解析/再予報データを準備した。それらを用いて、元来予定していた「発生しやすさ」の解析を実施し、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、小さな介入で大きな変化を起こしうる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。

それらに加えて、現状で利用想定が可能な具体的なアプローチ手法を用いた介入結果の見積もりという要請に応じ、界面活性剤や大気造水といったアプローチによる介入の影響可能性についてシミュレーションを実施した。

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:

低次元化手法である POD (Proper Orthogonal Decomposition) と DMD (Dynamic Mode Decomposition) 及び機械学習手法の一つであるベイズ最適化を組み合わせることで、高次元システムに対する制御器を効率的に学習するアルゴリズムの開発を検討した。特に、

制御器に用いるパラメータからコストまでをガウス過程回帰で学習し、その結果を元に最適制御を用いて制御パラメータのチューニングを行うアルゴリズムを検討した。提案法の有効性を、円柱周りの流体場制御および気象を模する Lorenz96 モデルに対して確かめた。また、上記に加え、深層強化学習を用いた Lorenz 96 モデルに対するコントローラの学習アルゴリズムを提案し、その有効性の検証も行った。

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。

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、大規模なアンサンブル予測を用いた過去の台風顕著事例の気象シミュレーションを数件行い、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:

極端気象再現性の初期値への依存性と雲微物理モデル化への依存性を系統的に調べるために、研究開発課題 1、3 から提供される極端気象現象に関する大規模モデルアンサンブル実験の出力データを気象学的・雲物理学的な観点で解析し、モデルで再現される降水過程が雲微物理プロセスのモデル表現にどのように依存するかを調べた。並行して、複数の地球観測衛星センサから得られる雲物理量のデータを複合的に活用し、降水過程に影響する雲微物理プロセスを観測的に診断する解析を開始した。

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、当該年度は、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) の特性解析を開始した。また、液相氷核活性 Assay 系を用いて生物起源の氷核活性素材の探索を開始した。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)

(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。当該年度は、全球河川モデルに昨年度実装した洪水防護スキーム(堤防とダム操作)を用いたシミュレーションに必要な、堤防パラメータおよびダムパラメータの広域マップの開発に取り組み、ダム操作と洪水防護を考慮した広域河川流量シミュレーションを実施できるようになった。また、過去の極端気象災害(2019年台風19号)についてのハインドキャスト実験を洪水防護を考慮したモデルを用いて行い、堤防の破堤も考慮した確率的な洪水氾濫ハザード予測サンプルデータ開発に取り組んだ。研究開発課題8、9に洪水ハザードに関するサンプルデータを提供し、インパクト評価と社会的意思決定に関する研究に着手した。

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ることで、グローバル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。昨年度には、研究開発項目 A-2 と連携して大量の気象アンサンブルデータから、高波および高潮推算に適用する台風情報の抽出手法の構築を行った。当該年度は、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。

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:

昨年度は社会水文モデルを用い、水害予報の帰結が地域社会の水害への対応能力へもたらす影響やその過程での地域間相互作用を仮想的なパラメータの下、数値実験により検証した。当該年度は、その影響や地域間相互作用を検証するために、実際の気象水文データと社会統計データを収集し、その基礎分析を行った。また、地域間相互作用の存在下での多様な地域のダイナミクスに関する基礎的実証研究を

実施した。その結果、客観と主観の両面から、予報の帰結と地域社会の対応能力との関係を明らかにした。

課題推進者:小谷仁務(京都大学)

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:

本研究開発課題では、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することを目指す。当該年度は、人的被害の推定に必要な統計的生命価値についてメタ分析により妥当な推定値を求め、それに基づく人的被害推計モデルの開発を行った。

また、極端気象事象による経済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に関しては、当該年度は VR の絵コンテをもとに、実際にヘッドマウント・ディスプレイにより VR 環境を体感できるまで技術開発を進め、そのリアリティや没入性、操作性に関して一般の方々を対象としたプレ実験を実施した。

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:

気象制御を社会的に意思決定する場を設計するためには、その場に巻き込むべきステークホルダー、提供すべき情報とその方法、そして適切な対話手法を明らかにする必要がある。当該年度は、台風が高頻度で上陸する地域の居住者を対象に、台風および台風制御にかかわるリスク認知・ベネフィット認知および ELSI 課題を把握するため、昨年度に高知県高知市および和歌山県和歌山市において実施した市民対話イベントの質問紙調査および発話データの質的分析を行った。結果、台風および制御技術の認知に影響を及ぼす条件や台風に対する懸念と恩恵、制御による被害軽減以外の利益享受への期待や多様な ELSI 論点を、認知マップおよび文脈リストの形式に整理して抽出することができた。さらに、この認知マップおよび文脈リストを精緻化するため、台風が高頻度で上陸する鹿児島県肝付町に加え、今後台風被害の甚大化が懸念される関東地方や東北地方の自治体からの参加者を対象に市民対話を重ね、幅広いステークホルダーによる対話データを得た。

並行して、目標8の他プロジェクトと連携して「ELSI 横断検討チーム」を結成し、各プロジェクトメンバーへのヒアリングを実施した。ヒアリング結果の共有・議論を進め、昨年度に作成した ELSI 論点の俯瞰図を補完するとともに、各コアプロジェクトの共通事項を抽出し、公開シンポジウムにて紹介した。

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。2023 年 10 月 31 日に課題推進者会議を開催し、各課題推進者の進捗状況報告、議論を行った。
- 2023 年 6 月 13 日にサイトビジットを京都大学防災研究所にて受けた。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・菌類等由来の氷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。上記の気象制御研究に関する新体制は来年度から本格稼働する。
- 国際連携に関する取組みについては、国際学会におけるセッション提案や海外研究機関の優秀な研究者の招へいなどを計画・準備を進めた。東京大学工学部社会基盤学科水圏環境グループと共に、Hannah Cloke 氏（レディング大学・教授）、Florian Pappenberger 氏（ヨーロッパ中期予報センター・副センター長）の招聘準備を進め、2024 年 5 月に WeSCoS Colloquium /Hydrosphere Science Seminar 開催を予定している。また、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、2024 年 3 月には 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。同様に東アジア地域においては PM が ESCAP/WMO 台風委員会での招待講演を行い本研究開発プロジェクトの成果の実利用について議論するなど積極的な国際発信を行

- っている。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 #06 においては ELSI を議題とし、歴史的な気象制御研究の負の側面を正面から議論する機会を得た。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 2023 年 10 月 11 日に行われた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たところである。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 # 05 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」を企画しており、本研究開発プロジェクトのメンバーはもちろんのこと、幅広い気象や防災分野における数理研究が紹介される予定である。このような学会活動を通じてコミュニティの拡大に励む。

(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

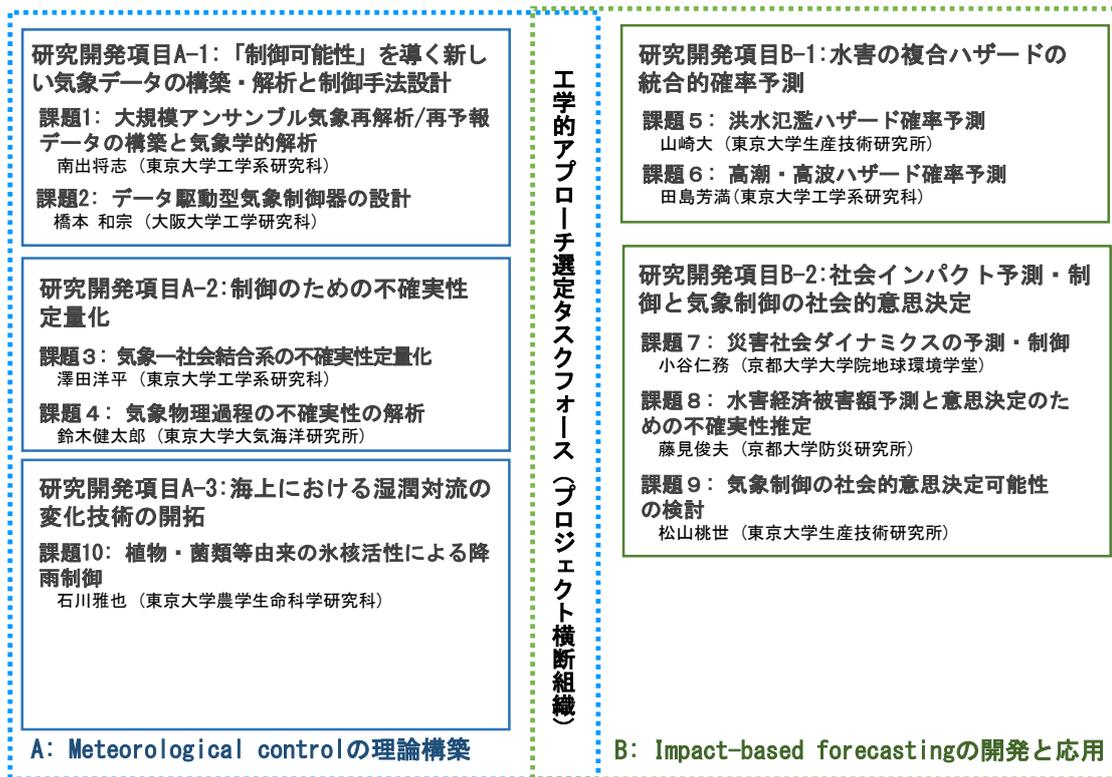
- 本研究全体のホームページ(<https://www.wescos.t.u-tokyo.ac.jp/>)を2022年度開設以来、国内外への広報活動の拠点として、日本語版と英語版を運用している。研究成果、コロキウム案内、公募情報、動画を活用した研究紹介コンテンツなど、適宜最新の情報を掲載している。
- 多様な分野の方々との議論を通じて今後の数値天気予報研究について考える WeSCoS Colloquium を2か月に1回程度のペースで開催している。コロキウムは一般公開しており、2023年度は3回開催し、合計68名の参加があった。

- 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、鹿児島県肝付町(2023年7月5日)と東京大学生産技術研究所(2024年1月24日)で開催し、合計82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、タイ・バンコクで開催された「ESCAP/WMO Typhoon Committee 18th Integrated Workshop / 4th TRGC Forum」にて講演した。
- JST主催のアウトリーチ活動にも積極的に参加している。2024年3月31日に日本科学未来館で開催されたムーンショット課題8イベント「天気をあやつる? ~E テレ映像と実験でのぞき見る気象研究の未来~」では、サイドイベント「研究者がガチ議論! ~数字で描く気象制御と防災~」を実施し、多数の参加者を得た。

(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ーを設置し、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。本サーバー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



↑
マネジメント
東大PMチーム

PM: 澤田洋平

特任専門職員A
 (事務/広報担当: ムーンショット専任)

特任専門職員B
 (技術/設備担当: 研究設備のプロジェクト内共用化やソースコード・データのオープン化を担当)

←
情報共有・運営支援

↓
課題推進者会議

- ・ 研究進捗モニタリング (月1回: 非同期)
- ・ プロジェクト内ワークショップ (年1-2回: 同期)
- ・ 連携のための会議 (適宜)
- ・ 各種シンポジウムや学会の特別セッションなどの企画・立案

知財運用会議 構成機関と実施内容
 2023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	11	19	30
ポスター発表	2	8	10
合計	14	29	43

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	1	9	10
(うち、査読有)	1	9	10

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
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
9