

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

実施状況報告書

2023 年度版

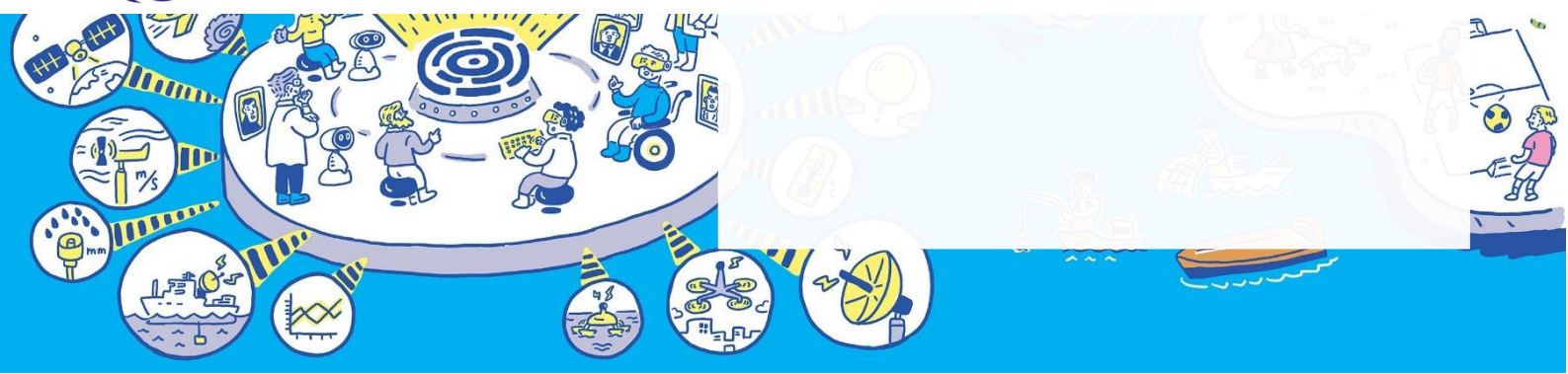
ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる

気象制御

山口 弘誠

京都大学 防災研究所

 **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、ゲリラ豪雨と線状対流系豪雨の強度を抑制するための研究開発に取り組む。数値気象モデル・現地観測・室内実験をベースとして、効果的にインパクトを与える工学的手法を複数開発する。それらを多時点・多段階に実行し、かつ、豪雨制御による影響評価と社会受容性を考慮した制御システムを構築する。それにより、2050年には、豪雨制御技術が自然と緩和する未来社会の形成に貢献する。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

研究開発項目1：数値計算に基づく工学的手法の開発

ゲリラ豪雨と線状対流系豪雨の制御効果を評価するための数値気象モデルのさらなる継続開発を行うだけでなく、それらの数値モデルを用いて介入する変数を変化させる感度実験等を行い、環境場や積乱雲や豪雨の発達に与える影響を示すことを目標とした。また、介入する変数の種類や現象のスケールによって複数種類の介入手法を想定し、それぞれに適したアプローチから検討を行った。本項目内容が本年度のマイルストーン達成に大きく関与するため、できる限り多くのアプローチから検討した。

ゲリラ豪雨に関しては2008年神戸都賀川豪雨を対象にLESモデルを用いた風速場の操作シミュレーションを実施し、ピーク降雨強度が27%抑制することを示した。線状対流系豪雨に関しては2009年中国九州北部豪雨を対象にメソモデルを用いた氷晶核数の操作実験を実施し、時間積算雨量が6~18%抑制することを示した。また、風を操作する制御デバイスとして想定している風車について、風車の後流の気象場に与える影響を工学的手法の観点から評価し、豪雨制御シミュレーションと合わせて工学的アプローチと気象学的アプローチの両側面から制御デバイス開発を推進した。さらに、縮尺模型実験の実施に向けて複雑な流れの3次元可視化装置であるtomographic PIVシステムの要求性能を設計した。

研究開発項目2：制御システムの構築

制御手法の特徴(特に、実施判断のよりどころとする現象、その観測方法、判断から実施までに要する時間、効果を見極める現象、その観測方法)、制御によって生じる影響(豪雨に直接的に関連する影響と社会的な影響)の連関、意思決定問題で対象とする範囲に基づいて、意思決定グラフを作成した。他の研究開発項目と連携して、プロジェクト全体として優先すべき目的変数について、全体議論を行って意識統一を図った。

意思決定問題の定式化に必要な4要素(目的関数、制約条件、取り得る手段、意思決定に関与するランダム現象)について、意思決定グラフを作成した。ゲリラ豪雨制御に関しては、基本方針が降雨強度を単純に抑制するところにあるためリアルタイムの意思決定事項は少なく、制御デバイスの最適配置や操作を発動するモニタリングの基準を決めておくことが重要であるとわかった。線状対流系豪雨制御に関しては、効果とそのバラツキ、効果が現れるまでの時間、複数の制御の複合的效果などをパラメータ化することで意思決定問題を定式化し、意思決定問題とその最適解について俯瞰的に理解を深める方針を立てた。

研究開発項目3: 豪雨制御の影響評価と社会受容性の研究

豪雨制御を実施した際における自然への影響を推定する第一歩として、豪雨制御シナリオをたてて豪雨制御による洪水流制御効果を評価した。多くのダムで採用されている一定量一定率方式をモデル化した貯水池操作スキームを開発し、流出・水資源評価モデルに導入することに関して、多くのダムで採用されている一定量一定率方式をモデル化した貯水池操作スキームを新たに開発した。また、豪雨制御による影響評価の実施に向けて、豪雨制御の程度を複数設定したシナリオに基づく豪雨制御シナリオデータを作成するための数値モデルとして、都市域を表現した気候モデルおよび気象モデルを適用した。さらに、親水空間の都市河川における人的被害のリスクを考慮して、制御の程度によって、河川内の流速や水深、水位上昇速度、単位幅比力といった物理量を評価指標によりリスク軽減効果を見積もった。降水抑制によって避難の時間的余裕が生まれることを示した。

地域住民が新しい制御技術を通して気象資源を主体的に活用・保全しながら、豪雨と共に暮らしていくための協働のしくみを「気象コモンズ」として捉える概念モデルを構築すると共に、その成立要件を示した。その考え方に基づき ELSI 課題に対する社会的・制度的対応シナリオを構築した。加えて、気象コモンズの考え方を基盤にして、技術開発担当者とのインタビューや国外先行事例の調査、気象制御をめぐる未来社会に関するシナリオ分析を実施し、気象制御に関わる ELSI 課題や課題解決に向けた社会的・制度的対応策を明確化した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

今年度、学内にプロジェクトオフィスを立ち上げたことによって、マネジメント業務を効率的、効果的に実施している。加えて、将来の特許取得を想定して、学内の知財部1名に本プロジェクトの担当者として加わってもらった。

年3回の全体会議だけでなく、制御システム構築に向けた共通テーマ議論会も実施した。現場を感じるということを大切に、今年度は風車見学を行い、PI や参加者の臨場感を高めることにも注力した。来年度の間評価に直結するために研究項目間・研究課題間の有機的連携を強く意識するように何度も繰り返し伝えた。

その他、広報活動として、ホームページや SNS を用いて研究の進捗をアップデート、発信を行った。大学のキャンパス公開の機会を利用して一般の方と対話をしながら、住民目線の意見を聞いた。その際にアンケートを実施して本プロジェクトの目標に対する社会の反応を得ることができた。

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:数値計算に基づく工学的手法の開発

研究開発課題1:【ゲリラ豪雨の改変】熱に対する操作手法の開発

当該年度実施内容:大阪市における異なる街区、またこれら実在街区に基づき仮想的に建物高さ・分布を改変した街区を対象として、建物解像 LES モデル

による数値計算を実施し、都市の幾何学的形状を定量化するパラメータを用いて、都市の幾何学的特徴に応じた気流パターンを類型化した。また、都市の排熱に伴う熱効果による安定度への影響から、熱輸送のパターンを類型化した。これら数値計算の結果から、高層建築物が運動量輸送を促進し、排熱効果により熱輸送がさらに活性化されることを示した。また、街区内に風車を配置した数値実験により、乱流や熱輸送の変化は風車の設置位置に強く依存することを示した。さらに、メソ気象モデルにより夏季に急発達する積乱雲の事例を対象とした数値シミュレーションを実施し、都市部の地表面からの顕熱輸送量を制御することにより、降水量が減少することが可能であることを示した。

課題推進者: 竹見哲也(京都大学防災研究所)

研究開発課題2:【ゲリラ豪雨の改変】気流渦・水蒸気に対する操作手法の開発

当該年度実施内容:ゲリラ豪雨を表現する建物～対流圏シームレスLESモデルを用いて、2008年神戸都賀川のゲリラ豪雨事例を対象として、気流渦が積乱雲の発達にどのように寄与しているかを解析し、気流渦の強度を弱める感度実験によって、積乱雲の発達に与える影響を評価した。風車を想定して風速場を局所的に弱める実験により、27%のピーク降雨強度の削減効果があることを示した。さらに、風車の操作期間・操作時刻・サイズ・低減量・位置に関する感度実験を行い、特に風車の位置に関する感度が大きいことが明らかになった。

課題推進者: 山口弘誠(京都大学防災研究所)

研究開発課題3:【ゲリラ豪雨の改変】室内実験による工学的手法に対する要求性能の特定

当該年度実施内容:本研究開発課題で掲げている3つの課題のうち、「数値実験との相互検証のための縮尺模型実験」に関して、縮尺模型実験により都市域の風速場(3次元3成分)を計測するために Particle Image Velocimetry 技術を用いた計測機器の仕様を確定するとともに、ヘリウムソーブバブル(トレーサー)発生装置を発注し納品が完了した。「制御デバイスの効果の定量化」に関して、増風機を模擬した縮尺模型および熱源による上昇流を模擬する縮尺模型を製作した。さらに、ヘリウムソーブバブルを用いた風速場の計測における光源および撮影機材に関する最適な計測条件を検討するとともに、増風機を模擬した模型を用いて、建物および増風機模型周りの制御された風速場(2次元3成分)の予備的な計測を行った。

課題推進者: 西嶋一欽(京都大学防災研究所)

研究開発課題5:【線状対流系豪雨の改変】気流収束に対する操作手法の開発(風車群)

当該年度実施内容:これまでに開発してきた風車ウエイクLESモデル(アクチュエータラインモ

デル／ポーラスディスクウエイクモデル)の各風速に対応するモデルパラメータの最適化と、風車ウエイク LES モデルを大規模かつ高速に実行するための High Performance Fortran (HPF)に基づいたチューニングを行った。さらに前倒しにて仮想的な大規模洋上ウインドファームの計算を実施し、クラスターウエイク現象の視覚化と行った。新規に、風車ウエイク現象によって得られる、流入水蒸気量の低減効果を概算するために、風車の 1 次元運動量理論を用いて、流入水蒸気量の低減量と、このときに必要な風車基数を見積った。PLC 制御を追加導入し、風洞内の気流安定化性能を向上させた。その後、上記の風車ウエイク LES モデルの予測精度を検証するための風車ウエイク実験のパラメータ計測を実施した。

課題推進者:内田孝紀(九州大学応用力学研究所)

研究開発課題6:【線状対流系豪雨の改変】雲粒子形成に対する操作手法の開発(シーディング)

当該年度実施内容:前年度に引き続き 2 つの雲解像モデル(領域気象モデル)WRF-ARW 及び SCALE-RM に詳細な雲微物理スキーム「精緻化されたバルク法」「ビン法の簡易モデル」を導入し、主にバルク法について豪雨事例(線状対流系豪雨、大規模線状降水帯)に関する事例再現性の向上やシーディング操作の導入に必要な計算条件の設定、スキームの改修等を実施した。また、WRF-ARW 及び SCALE-RM と「バルク法」を用いてシーディング操作に関する数値実験・感度実験を行い、豪雨抑制効果の定量化、抑制メカニズムの解明、新規操作手法の導入、最適実施条件の検討などを実施するとともに、豪雨制御の実現可能性に関する概算的評価を行った。

課題推進者:鈴木善晴(法政大学デザイン工学部)

(2) 研究開発項目2:制御システムの構築

研究開発課題1:多時点・多段階操作による意思決定支援手法の開発

当該年度実施内容:本年度は、「意思決定最適化に必要な十分な解像度で豪雨現象を模擬する数値解析モデルの開発」に関して、偏微分方程式の解法に関する機械学習の手法を用いて実時間での意思決定支援最適化に資する数値モデルの開発を開始した。「多時点・多段階で操作手法の最適解を導出する手法の開発」に関して、ゲリラ豪雨制御および線状対流系豪雨制御それぞれに対して、多時点・多段階操作手法に関する意思決定問題を定式化した。「実時間意思決定支援システムのプロトタイプ開発」に関して、意思決定問題を構成する変数(気象に関する変数、操作に関する変数、影響に関する変数)の関係および多時点・多段階操作のタイムラインを整理した。

課題推進者:西嶋一欽(京都大学防災研究所)

研究開発課題2:制御効果モニタリング手法の構築

当該年度実施内容:制御実施における観測すべき物理量や場所・タイミングの決定、制御方法の検討に寄与する豪雨のメカニズム解明を進めている。当該年度は、ゲリラ豪雨を引き起こす積乱雲について、その阻害要因として考えられる周辺空気の取り込み(エントレインメント)過程に着目した。この過程が有意にはたらいっているならば、降水域が小さい時は、周囲との混合によって積乱雲発達のための浮力の減少量が大きくなり、発達が阻害されやすいと考えられる。実際に、降水域の大きさと降水強度の関係を調べると、降水域が小さい時は領域中の最大降水強度が大きくなる示された。一方、降水域の面積が大きい時は、最大降水強度が大きい場合も小さい場合も存在する。最大降水強度が小さい場合は、積乱雲の衰弱期を多く含んでいると考えられる。発達ステージを考慮に入れることで、降水域の大きさと降水強度の大きさについてさらに高い関係性が得られることが予想される。

課題推進者:大東忠保(防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門)

研究開発課題3:偶然性・必然性概念の制御システムへの利用

当該年度実施内容:当該年度では、気象制御の場所やタイミングを特定することを目指して、線状対流系のデータベース作成及び線状対流系に水蒸気が供給される経路及び3次元構造の解析を行った。また、翌年度以降に予定している線状対流系及びそのメカニズムの地域性(異なる環境場条件での線状対流系支配メカニズム)や地球温暖化による支配メカニズムの解析に向けて、現在気候及び将来気候の線状対流系データベースの整理も開始した。

課題推進者:仲ゆかり(京都大学防災研究所)

(3) 研究開発項目3:豪雨制御の影響評価と社会受容性の研究

研究開発課題1:流出・水資源への短期的・長期的影響評価

当該年度実施内容:昨年度より開発している流出・水資源評価モデルに組み込まれている貯水池操作スキームについて、多くの貯水池で採用されている一定量一定率方式の操作を導入することで高度化するとともに、同スキームのパラメータ最適化手法も開発した。豪雨制御シナリオデータを作成するための数値モデルとして、都市域を表現した陸面過程モデルを気象庁気象研究所の大気大循環モデルMRI-AGCMに結合させた気候モデルと研究開発項目1で開発されている気候モデルを適用した。適用結果を元に、豪雨制御が実現した場合を想定して、貯水池において異常

洪水時防災操作を回避できるかの検討を開始した。

課題推進者: 萬和明(京都大学防災研究所)

研究開発課題2: 豪雨制御による浸水リスク変化の水文社会経済分析

当該年度実施内容: 本年度は、研究開発課題「都市河川流域における洪水インパクト評価モデルの構築」の前半部分の課題である「気象制御による洪水外力変化の分析」の2年目として、河道断面の自動抽出および検証とゲリラ豪雨制御の洪水流制御効果を神戸市都賀川を対象に実施した。また、「災害リスクに係る基礎情報の整理ならびに災害暴露人口とその特性の解明」の2年目として、災害リスクに係る基礎情報をデジタル化・解析した。

課題推進者: 田中智大(京都大学大学院工学研究科)

研究開発課題3: 豪雨制御の社会実装に向けた地域協働に関する総合研究

当該年度実施内容: 「豪雨と共に生きる気象制御」が目指す社会ビジョンとして、「気象コモンズ」の概念を提起し、既往研究の整理や関連分野の研究者との勉強会を通じて、気象コモンズの理念、位置づけ、成立要件、制度的枠組み、今後の実証実験に向けた気象コモンズづくりのロードマップを整理した。理論的な検討と併せて、気象コモンズのイメージを明確化・共有するための「気象コモンズデザインワークショップ」を実施し、気象コモンズのビジュアル化を進めた。また、アーティストと協働した「アーティスト・イン・気象コモンズ」の取り組みを始動し、人と気象との関わり合いについて創造的・批判的に問い直す芸術作品・ツールを制作した。加えて、気象コモンズの考え方を基盤にして、技術開発担当者とのインタビューや国外先行事例の調査、気象制御をめぐる未来社会に関するシナリオ分析を実施し、気象制御に関わる ELSI 課題や課題解決に向けた社会的・制度的対応策を明確化した。

課題推進者: 羽鳥剛史(愛媛大学社会共創学部)

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支援体制チームについて

本プロジェクトのマネジメント業務が効率的、効果的に実施できるよう下記の人材を雇用した。内2名は昨年度からの継続雇用、残りの2名がR5年度からの新規雇用である。

- ・PMの補佐として非常勤研究員1名
- ・主にプロジェクトの経費管理や各種会議開催のために事務補佐員2名
- ・主に広報活動担当する技術補佐員1名

- ・プロジェクトで雇用するわけではないが、大学の知財部から本プロジェクト担当 1 名
- 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)
 - プロジェクトの推進に関する重要事項について、PMおよび課題推進者が参加する運営会議を設置することを計画していたが、本年度においては開催の必要性がなかったため、運営会議は実施していない。
- 研究開発機関における研究の進捗状況の把握(サイトビジット、課題推進者会議等)等、進捗把握に関する実施内容について
 - 研究プロジェクトメンバー全体向けの研究連絡会を年 3 回実施した。PM-PI面談(オンライン会議を含む)を数ヶ月に 1 度の頻度で行い、進捗状況を把握した。PMが各研究開発項目・研究開発課題の実施サイトへのサイトビジットも実施した。全体向けの研究連絡会の内、2 回を PD (SPD/AD を含む) やアドバイザーにも参加していただく形で研究の進め方について助言をもらった。また、PDらのサイトビジット、数理モデル関連のサイトビジットを開催し、研究の進め方について助言いただいた。

研究開発プロジェクトの展開

当該年度は、プロジェクト全体として皆が関与することとなる“制御システムの構築”に関して、メンバー全員で目指すべき制御システムの要件について議論を深めることができた。さらに、研究を進めていく上で、現時点で足りない研究要素が何であるかを洗い出すことができた。具体的には、工学的制御手法の理論構築の研究課題設定や人材探しが必要であると考え、第一に AD の潮先生にサイトビジットしていただき、フィードバック制御について相談し助言をいただいた。第二に将来参画を期待する研究者(野々村先生)と議論を行い、将来的な連携について本プロジェクトに参画いただくことの合意をいただいた。

国際連携に関する取り組みについては、台湾の国立中央大の気象科学を専門とする教授と本プロジェクトに関する議論を行った。参画を打診しているところである。

ELSI/数理科学等の取り組みとして、研究開始後の研究連絡会を通して、気象制御の ELSI についてプロジェクトメンバーと議論し、本プロジェクトにおける ELSI/RRI の方針・位置づけを明確化すると共に、日本社会の伝統的な自然観に根差した気象制御を表す言葉として「気象を鎮める」という表現を提起した。今後、これまでに整理した ELSI 論点を踏まえて、10年後の実証実験の実施に向けて、ELSI 課題に対する社会的対応のアクションリストの作成や優先順位の明確化を進めていくことを企図している。

数理科学について、i) いかにかに小さい規模の介入で大きな効果を得るのか?かつ、その完全性(信頼性)、ii) 無限通りある介入の種類・時間と空間の規模・程度の組み合わせの中から、いかに最適解を導くのか?、という2つの大きな課題に対して、タイムスケジュールを考慮した数理的研究の計画を提案した。計画立案時には不明確であった具体的なアプローチ手法について、数理分科会やアドバイザーのご意見を踏まえて、ロードマップを作成することができた。また、これらの内容を強く推進してもらえ新たな PI の必要性についても検討を進めているところである。

(2) 研究成果の展開

当該年度は将来の知財運用に向けて、大学本部の知財部門の方に研究会に参加してもらって研究内容を理解していただいた。その結果、次年度あたりには特許出願の可能性があるという議論を行った。具体的に、我々の研究内容が公知の事実かどうかの検証を進め、問題がなければ、特許出願の申請を予定している。

また、豪雨とその災害に関するメカニズム解明や予測技術の向上に関する研究成果が期待できるため、学術的な発表を行った。加えて、将来関連すると考えられる企業(工学的手法の製作、防災情報の構築)との対話を開始し、民間会社 6 社とそれぞれ継続的な議論を行っている。カーテン、増風機、シーディング、システム構築に関連するものである。

(3) 広報、アウトリーチ

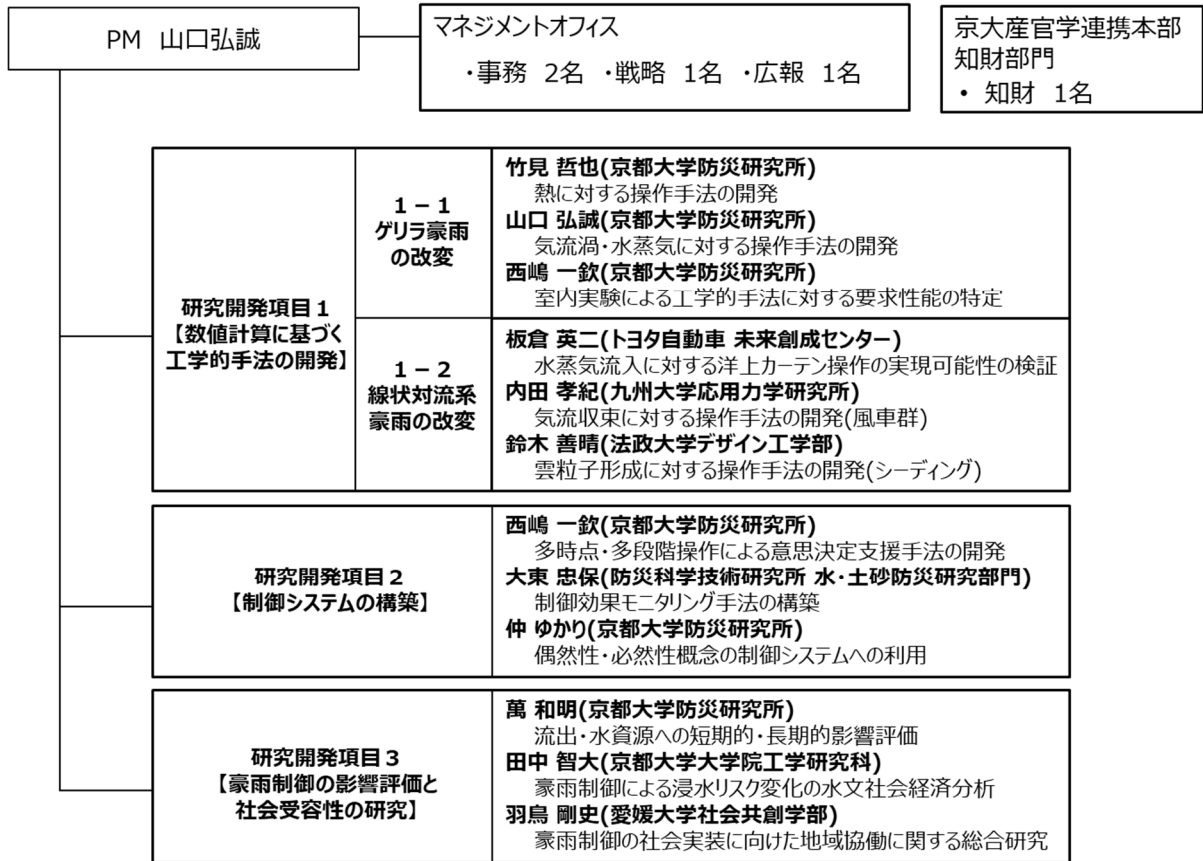
ホームページを公開し、研究の進捗をアップデートしている。大学のキャンパス公開の機会を利用して一般の方と対話をしながら、住民目線の意見を聞いた。その際にアンケートを実施して本プロジェクトの目標に対する社会の反応を得ることができた。また、SNS 等を用いた発信も行っている。プロジェクトの取り組みについて周知のためにパンフレットを日本語版、英語版と作成し、アウトリーチの際に配布した。報道については、新聞社5社、テレビ局1社の取材があり、本プロジェクトの取り組みが紹介された。海外でのアウトリーチも行っており、フィリピン気象局を対象とした JICA の技術協力プロジェクトにおける話題提供や台湾大学でも本プロジェクトの紹介をするなど、積極的に活動している。

次年度には GEWEX のプレイベントとして市民講座を計画している。

(4) データマネジメントに関する取り組み

PM もしくは課題推進者が主体的に研究データの保存と管理を行っている。研究創成期であり成果発表ができていないものがほとんどを占めるため、基本的には非公開とした。ただし、研究プロジェクト内での情報共有を推奨し、風車による抵抗体スキームを豪雨制御シミュレーションチームに渡したり、豪雨の制御シミュレーション結果を洪水や水資源評価のチームに渡したりするなどして、積極的にデータのやり取りをおこなった。

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

今年度は将来の知財運用に向けて、大学本部の知財部門の方に研究会に参加してもらって研究内容を理解していただいた。その結果、次年度あたりには特許出願の可能性があるという議論を行った。

運営会議 実施内容

短期・長期ビジョンを考慮した研究戦略、プロジェクト内の連携、国内外の関連研究機関との連携体制、人材育成について議論した。具体的に、ものづくりやシステムづくりに関連する民間企業と議論を始めた。プロジェクト内の連携として、各課題間連携の打合せの機会を働きかけて、多くの打合せを実施した。

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	4	1	5
口頭発表	24	5	29
ポスター発表	8	8	16
合計	36	14	50

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	6	1	7
(うち、査読有)	5	1	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	1	1

プレスリリース件数
0

報道件数
9

ワークショップ等、アウトリーチ件数
12