

### (3) テーマⅣ：災害時や危機的渇水時における非常時地下水利用システムの開発

#### 1) 研究内容

関係機関の協力の下、災害時の緊急的な水源の確保や渇水被害の軽減のため、非常時における水需要と表流水・地下水全体の水供給を含めた水源の確保状況をリアルタイムで把握し、利用可能な地下水の量と場所を特定する非常時地下水利用システムを開発する。本システムはテーマⅠで開発する「避難・緊急活動支援統合システム」と有機的・統合的にシステム化することを前提として開発する。

#### 2) 技術的目標

災害時や渇水時の地下水利用を阻む最大の要因は、地下水の現状把握や将来予測ができていないことである。このため新たに衛星やUAVを活用した地盤沈下等モニタリング体制を構築するとともに、三次元水循環モデル等を用いて地下水賦存量や取水可能量を把握し、地下水位を予測するような解析技術を開発する。

4 年次は、非常時地下水利用システムの入力条件となる非常時の揚水シナリオに関して、引き続き定常シナリオの確定に向けた以下の検討を実施する。具体的には、2020 年度に調査・検討した「非常時における水供給の実態・実績」、「非常時に想定される水利用方法やそこで求められる水質」、「非常時に地下水へ代替・切替可能な水利用方法の選択」、「各地における非常時・災害シナリオにおける水利用原単位」等の各種成果をもとに、

- 「地下水管理の実態」「揚水量が不足する場合の調整方法」「揚水調整した場合における社会的影響評価」等の社会・制度的検討
  - 「揚水ポンプ能力を考慮した揚水時間・期間・運転方法の検討」「断水や停電等の復旧速度を考慮した揚水ポンプ運転シナリオの策定」等の揚水シナリオ検討
  - 「非常時シナリオとして用いる水利用方法別の原単位算定」「井戸毎の需要に基づく揚水負荷算定」「メッシュ単位揚水量の算定」等の解析入力データ検討
- の各定常シナリオの策定を実施し、検討を非常時地下水利用システムの入力データとして順次三次元水循環解析モデルに組み込む。

地下水利用可能量評価のための技術開発としては以下を実施する。

- 2020 年度までに構築した遮断、蒸散、林床面蒸発の各コンポーネントを考慮した平年時・渇水時森林域涵養量評価の高度化を行うとともに、現地観測データを用いた検証を行う。また多様な林分にも対応できるモデル構造やパラメータの信頼性向上を図る。さらに森林簿や森林計画図からの森林情報を高度化するため、航空機レーザー計測及びドローンによる立木密度の手法を用い、2020 年までに構築された森林 GIS データを高度化する。
- 2020 年度に引き続き、関東平野・濃尾平野全域三次元水循環モデル(GETFLOWS)の地質情報、森林情報、地下水利用情報、地下水位観測情報などを利用し継続的に信頼性の向上を図る。さらに森林モデルとの連携により平年時・渇水時涵養量評価のための上流域モデルの改善を行い、3 次元モデル信頼性の向上を目指す。また濃尾平

野において空中電磁探査による地下水調査手法の実証実験を行い、解析ソフトの改良等により地盤・地下水位情報の取得を試みる。

- 水循環モデル GETFLOWS と地盤沈下解析 LS3D の連携システムを改良し、境界条件や物性等のモデルパラメータのやりとりをスムーズにする。また局所三次元地盤沈下解析により平年時・渇水時の面的沈下量分布の計算を試行する。さらに GNSS 地盤沈下観測により武蔵野台地(東京都府中市)及び沖積低地上(埼玉県川島町)の地盤沈下観測所近傍に設定された GNSS の観測データを対象に、実データを用いた基礎的な解析を行う。
- サブテーマ 1 において整理される気象シナリオ、社会的シナリオ等に沿って必要なケースのモデル解析を行い、揚水量と地下水位、地盤沈下量の関係を整理する。

また社会実装の早期実現・加速を図るため、濃尾平野を中心とした「災害時地下水利用システム開発連絡会」(岐阜県、大垣市、大同大学、国土交通省、水資源機構)の議論を基に非常時地下水利用システムに対するニーズを把握する。あわせて、消防・病院等大規模地下水利用の想定される施設等からも継続的にニーズ聴取を行い、社会実装後の活用を見据えた改良の方向性検討に資する情報交換を継続する。

最終年次は、非常時地下水利用システムの開発・社会実装に向け、制度設計については、防災井戸及び防災体制に関するアンケート調査の解析、災害時・危機的渇水時の海外事例収集・調査・分析を行うとともに、社会実装先との情報交換を反映したより現実的なシナリオの策定に向け、2021 年度に策定した定常シナリオを活用・発展させた、「時空間を組み合わせた複合シナリオ」「気候変動シナリオ」等の検討を実施し、社会実装用の複合シナリオとして三次元水循環解析モデルに組み込む。さらに揚水規制や地盤沈下の際の社会的影響の評価やその表現方法についても検討し、社会実装時における利用者の意思決定を支援する機能として付加する。

環境影響を考慮した地下水利用可能量評価技術については、地下水涵養量や湧水量の評価を考慮した森林モデルを含む関東平野・濃尾平野三次元水循環解析モデルの信頼性の検証を行い、様々な災害時・渇水時シナリオの下で、社会実装に必要な時空間的表流水・地下水ポテンシャル情報を提供可能な三次元水循環解析モデルを開発する。さらに、地盤沈下解析と合わせた地下水利用可能量情報を作成すると共に、付随する基盤情報(気象・地質・植生・人間活動)等と合わせデータベース化する。また空中電磁探査による地下水調査手法及び GNSS による地盤沈下観測手法の整備・提案を行う。

### 3) 課題目標の達成度

#### ① 国際競争力

世界的に見て先端的な水循環モデルと地盤変動の連成、過去の非常時の社会調査などに基づく現実的な非常時シナリオのナラティブの定量化など先端的な研究開発が進められていて、グローバルベンチマークについても適切に実施し、国際的な優位性が十分に確保されている点が確認されている。

サブテーマ1：非常時地下水利用システムの社会実装インターフェースの開発  
サブテーマ1は内容・予算額から見て、グローバルベンチマークの実施の必要は無いものの、サブテーマ2が開発する3次元水循環モデル（コア技術）が国際的な優位性を持つよう、精度の高い入力条件（気象外力・揚水）の作成を、国内の複数災害事例及び大規模アンサンブル気候モデル予測実験の結果に基づいて実施した。

サブテーマ2：非常時地下水利用システムに適合した3次元水循環モデルの開発

世界的に見て先端的な地圏水循環モデル、地盤沈下の解析技術を利用しており、グローバルベンチマーク（GB）についても良い評価が得られている。

GB評価対象外であった森林調査・解析技術、衛星測位GNSS沈下監視技術、空中電磁法による地下水探査技術も先端的なものである。

## ② 研究成果で期待される波及効果

コアとなる水循環シミュレータのみならず、上流涵養域である森林における観測とモデル化、ドローンを利用した新たな地下水位変動探査技術の開発、水循環と連成した地盤変動モデルの構築と衛星測位を用いた検証など、科学技術の進展によって、非常時における地下水の適切な利用のみならず、健全な水循環の実現や今後社会的需要増が見込まれる海外での地下水の新規利用の事前検討などを通じた社会貢献が期待できる。

サブテーマ1：非常時地下水利用システムの社会実装インターフェースの開発  
温暖化影響を踏まえた水文現象の将来予測と実績に基づく水需給予測に基づいた災害シナリオに加え、海外・国内の事例収集で得られた災害時の地下水利用実績や関連する国内法案の想定及び実績から判明した先進的な防災井戸の利活用自治体への聞き取り調査を行った。これにより、自治体・企業・自治会など様々な主体による防災井戸の設置やその維持管理を促進するための官民連携のあり方を提案できる。これらの持続可能性・法令遵守姿勢を踏まえた開発は、地下水を資源をとして扱う自治体・企業にとって、今後のスタンダードになりうる。

サブテーマ2：非常時地下水利用システムに適合した3次元水循環モデルの開発

一般に陸域地下情報はきわめて疎であり不確実性が高いため、対象地域の地下水状態を推定するためにはボーリングなどの局所の観測情報を集め、専門知と数理モデルによりつなぎ合わせ3次元的に捉える必要がある。本プロジェクトは、

大領域での地下水系把握に向けた挑戦的試行例であり、新たな調査・モニタリング技術の開発も含んだきわめて先端的ものと考えている。

これらの技術の組み合わせは、国内の他地域の非常時・平時地下水利用計画にも適用可能であり、さらに海外での地下水開発（乾燥地等）や、温暖化にともなう渇水時の状態予測などにも展開可能と考えられる。

### ③ 達成度（1）

サブテーマ1：非常時地下水利用システムの社会実装インターフェースの開発  
4年次までに、関東平野及び濃尾平野において、首都圏直下地震、南海トラフ巨大地震が発生した際の地下水を含めた水供給シナリオを作成し、同シナリオに基づき、開発した3次元水循環モデルを用いて地盤沈下への影響を確認した。また、実装先の意見を踏まえた非常時地下水利用システムの全体設計（各モデルの連携手法も含む）を行うとともに、ユーザーインターフェースとしての入力値を定め、具体的な画面設計を行った。また、過年度の成果である日本全体における防災井戸の普及状況を基礎に、近ごろ大規模地震で被災した北海道札幌市、宮城県仙台市、熊本県熊本市の防災井戸登録者（合計436団体）、高齢者関連施設（合計2216施設）を対象に行ったアンケート調査結果の解析を行った。また防災井戸利用のアンケート調査と同時に、昨年度に実施した基礎自治体へのアンケート調査結果をもとに、被災経験のある都市部住民の防災意識等の把握と、地域コミュニティレベルの防災計画である地区防災計画に関する取組状況の把握のためのアンケート調査を行った。さらに、3次元地下水流動モデルの解析結果の有効性を実データから担保し、かつ非常時にも地盤に影響を及ぼさないなど持続可能な地下水利用の検討に必要な情報を得る目的で、観測データに基づく地下水流動の解明と統計・公開データに基づいた水需給状況の推計を進めた。

最終年度は、2021年度に検討した複数のシナリオから季節により地震発生時の不足量が変動することが確認できたため、関東平野、濃尾平野においてインターフェースに入力するデータとして冬季及び4月～10月の9ケースのシナリオの計算を行った。更に、震度分布が変化した場合における地下水揚水量推定手法を検討した。検討に当たっては、震度が変化した場合における断水率の推定方法を検討した上で、水需要量及び供給量の変動の推定方法を水利用項目毎に整理した。また、需要水量に対して使用可能水量が不足した場合における経済被害の原単位を、既往文献や工業統計等の統計を参照して設定した。水道事業の費用対効果分析マニュアルでは、水道事業による便益を算出するための減・断水被害額の算定方法について記載している。そのため、家庭用水の原単位については給水制限率を20%とした場合の原単位として6,640円/m<sup>3</sup>を原単位とした。また、消火用水は建物1棟あたりの固定資産税評価額を消火に要する水量で除した127,074円/m<sup>3</sup>とした。都市活動用水及び工業用水は、域内総生産額に平常時の水需要量を除して求めた値に途絶係数（工業用水：0.458 都市活動用水 0.349）を乗じて算出した。農業用水については、農業センサスに基づく市町村

別農業出荷額を平時の水需要量で除して算出した。また、災害時や危機的渇水時に国や自治体や流域協議会が一定の地盤沈下量以下に維持する基準を元に地下水供給可能量を算出し、経済等への影響を踏まえた効率的な水供給計画を立案すること目的に、インターフェースをAWS Cloud上に作成し、濃尾平野・関東平野の3次元水循環モデルと連携する形とした。検討ケースとしては、①地震発災前（シナリオに基づく揚水量算出）②地震発生前（防災井戸設置）、③地震発生後、④渇水の4つとした。インターフェースの入力項目としては、a 地震発生月、b 災害発生前後の気温及び雨量、c 平時の地下水利用量（平成30年地下水利用比等）、d 災害発生時の地下水利用量（不足量に対して地下水で対応する割合等）、e 許容沈下量 等とした。なお、①地震発災前（シナリオに基づく揚水量算出）及び③地震発生後の検討のケースについては、自動的に水利用規制に伴う被害額が算出する機能を配備した。また、出力機能としては用途別揚水量（家庭用水、都市活動用水、工業用水、農業用水、消火用水、全用水）及び地盤沈下量の時系列の分布を表示する機能を配備するとともに許容沈下量の超過箇所の分布を重ねられる機能も配備した。さらに基盤情報として、泥質層厚分布（沈下しやすさの目安）、透水量係数分布（揚水の可能性（地下水量）の目安）、病院（名称、病床数）、避難所（名称、施設の種類、収容人数）を表示する機能を配備した。

今回開発した災害時のシナリオは、公開されている中央防災会議の被害想定調査結果や各自治体の地域防災計画を基に作成しているが、各自治体では公開されていないデータを活用して災害対応に当たっている場合や今後想定される科学技術イノベーションによって大きく変わること考えられる。また、今回のシナリオでは井戸の設置状況や揚水能力を考慮していない。そのため、これらの点についてどのようにシステムに反映していくか、定期的な見直し（5年ごとあるいは10年ごとなど）や災害時の連携の強化など、社会情勢の変化にも対応する必要がある。引き続き検討、開発が必要である。更に、非常時に地下水を利用できる施設や体制を確保した上で、予め立案した水供給計画を具体的に運用する際には、各井戸の取水量を管理する等の地下水の取水量制限の実効性を確保する必要がある。特に農業用水に関しては、個人で保有する井戸等も多くあり、農業用水の取水量の多くなる渇水時において水供給計画の具体的な運用については課題がある。これらの点を解決するため、実運用する際には引き続き自治体と調整していく必要がある。

また、本研究では自治体の災害対策の基本計画である市区町村地域防災計画に基づき、防災井戸の全国普及度調査を行ったが、それは地域内で利用可能な全ての井戸を網羅しているわけではない。たとえば寺社仏閣等の宗教施設は広い敷地や井戸を有することから、自治体が臨時の避難所として位置付けるケースが増えている。こうした災害時協力寺院については市区町村地域防災計画に記載されているとは限らず、その実態調査はまだ端緒にすぎたばかりである。井戸を持つ災害時協力寺院の普及状況調査は今後の大きなテーマとなる。また本研究プロジェクトでは地下水を主眼とした応急給水体制のあり方を検討したが、被災者へのグループインタビューにより、学校のプール、雨水タンク、マンションの貯水槽なども活用されている実態が明らかとなった。今後はこうした多様な地域水源と公的な応急給水を結び付けた総合的な応急給水のあり方を検討していく必要がある。

## サブテーマ 2：非常時地下水利用システムに適合した 3 次元水循環モデルの開発

4 年次までに、3 次元水循環モデル (GETFLOWS) と地盤沈下解析モデル (LS3D) を結合して解析する手法について検討を行った。具体的には、3 次元水循環モデルで一層で表現されている地層を、砂泥比の情報を元に再分割した地層モデルを構築し、3 次元水循環モデルで計算された帯水層の水頭を再分割されたモデルの帯水層部分に境界条件として設定し計算する解析手法を構築した。また、東京都府中市や埼玉県川島町に設置した 2 重管式の GNSS 受信機より設置が簡単な簡易可搬型 GNSS 測器の開発を行った。国と県で個別管理をおこなっていた森林簿情報を統合し森林 GIS を活用した森林域水循環モデルを構築した。森林の水循環解析及び山地森林域における地下水涵養量の評価を行った。航空機レーザー計測、ドローンレーザー計測、現地計測を組み合わせた解析を行い森林域水循環モデルに必要な森林 GIS の高度化とその精度検証を行った。関東平野全域モデルに、局所詳細モデルを組み込み、現況再現解析を行った。1920 年から現在に至るまでの月単位の長期の再現解析を実施し、地下水位全 558 地点の観測データや関東地下水盆の地下水位図を用いて、水理地質パラメータの同定とモデル検証を行った。濃尾平野では、社会実装情報の試作として、南海トラフ巨大地震発生時の水需要と供給量の差（不足量）を地下水で対応した場合を想定し、2020 年度までに構築した水循環解析モデルを用いてシナリオ解析を行った。

最終年度は、三次元水循環モデル (GETFLOWS) と地盤沈下解析モデル (LS3D) を結合して解析する手法について検討を行った。地盤沈下解析モデルでは、難透水層内の間隙水圧変化の時間遅れを考慮しつつ圧密の進行を計算する必要があるため、三次元水循環モデルよりも鉛直方向の解像度が高い地質モデル・グリッドを用いる必要がある。そこで、地盤沈下解析モデルでは、三次元水循環モデルで一層で表現されている地層を、砂礫/泥比及び平均層厚の情報を元に再分割した地層モデルを構築することが求められる。この再分割にあたって、砂礫層と泥層の厚さや深度の分布の不確実性を考慮するため、遷移確率地球統計学を用いた複数のリアライゼーションを用いてアンサンブルを構成する手法を構築した。また、2020 年度に東京都府中市の東京都水道局府中武蔵台ポンプ所構内及び埼玉県川島町にある埼玉県川島地盤沈下観測所に設置した 2 重管式 GNSS 受信機の観測について、東京都府中市については 2022 年 12 月 15 日まで、埼玉県川島町については 2023 年 3 月 1 日まで観測を継続し、受信機は観測終了後、撤去した。さらに、東京都府中市や埼玉県川島町に設置した 2 重管式の GNSS 受信機より設置が簡単な簡易設置型 GNSS 測器を 2 式試作し、茨城県古河市諸川の旧茨城県立古河産業技術専門学院敷地内に 2022 年 6 月 18 日から 12 月 28 日まで、千葉県柏市の東京大学柏キャンパス構内に 2022 年 7 月 27 日から 12 月 28 日まで、それぞれ試

験設置して、観測データを収集した。

関東平野における3次元水循環モデル開発に関して、水平解像度250m、鉛直層数60層、総格子数4,700万の関東平野全域モデルに、下記③の局所詳細モデルを組み込み、現況再現解析を行った。1920年から現在に至るまでの長期年単位再現解析及び1945年から現在に至る長期月単位再現解析を実施し、地下水位全558地点の観測データや関東地下水盆の地下水位図を用いて、水理地質パラメータの同定とモデル検証を行った。昨年度まで局所的な水位再現性に課題が残っていたが、揚水外力や雨水排水量を追加調整することで、当該地域の再現性も向上した。また、森林域における樹冠遮断・蒸散・林床面蒸発を評価できる森林モデルSIP-Forest Ver2.0を、3次元水循環解析シミュレータGETFLOWSへ組み込んだ。樹種、樹高、立木密度などの森林状態に関するパラメータ、気象データを読み込み、水循環解析に反映できるようにした。組み込んだモデルについて、桐生川ダム流域にて詳細な検証を行い、再現性が向上していることを確認した。さらに、3次元水循環モデルにより計算された地下水流動の解析結果に基づき、地盤沈下解析を行う手法について検討を行った。特に層序・物性・水頭計算結果の不確実性を考慮した地盤沈下解析を行うため、アンサンブル解析を行う手法を構築した。層序の不確実性については、遷移確率地球統計学に基づき帯水層と難透水層の厚さ・深度分布に関する複数のリアライゼーションを生成する手法を構築した。特に、理論的検討に基づき、帯水層(砂礫層)と難透水層(泥層)の2値に単純化してモデル化する場合には、存在比率と平均層厚の情報から遷移確率モデルを構築可能であることを明らかにし、比較的容易に得られる単純化した地質情報から遷移確率モデルの学習を可能とするとともに計算を高速化することに成功した。これにより、平野スケールのモデルへの適用性を向上させた。物性の不確実性については昨年度まで構築してきた地盤沈下観測井での進化的マルチモーダル解析によって推定した頻度分布に基づいたリアライゼーションを生成するようにした。3次元水循環モデルからも推定の幅として複数の計算結果が得られた場合には、それも考慮してアンサンブルを構成することとした。さらに、平野スケールでのさまざまなシナリオ条件での解析を可能とするため、GETFLOWS計算結果からLS3Dの境界条件への割り当てをアンサンブルに対して行う機能を自動化するとともに、リスタート解析機能も実装した。そして、収集データや構築したモデル、解析結果を、基盤情報として第三者が利用できるように整理し、webサイトにて公開を行った。また、その精度や利用可能範囲を明確にするため、品質説明書を作成した。そして、昨年度までに構築した地点ごとの不確実性可視化手法(EMOS)と、上述の構築した手法を用いて、関東平野を対象としてGETFLOWSとLS3Dの連携解析を行った。

濃尾平野における3次元水循環モデル開発に関して、2021年度までに構築した水循環解析モデルについて継続的に現況の再現計算を行った。特に森林からの

涵養・流出条件の精緻化を図り、解析モデルの精度を向上させた。また、水循環解析モデルの精度向上に向けて、2020年度までに開発したドローンを用いた空中電磁探査手法について、2021年度に行った実証実験を通して解析ソフトに改良を加え、より精緻な地盤・地下水位の情報の取得が可能な探査手法を確立した。確立した手法については、2023/2/15に開催された「濃尾平野地盤沈下防止等対策要綱推進協議会」にて報告した。そして、社会実装情報の作成として、南海トラフ巨大地震発生時の水需要と供給量の差（不足量）を地下水で対応した場合を想定し、2021年度までに構築した水循環解析モデルを用いて6ケースについてシナリオ解析を行った。いずれも発災時期は7月を想定し、地下水位の水位低下量を予測した上で、地盤沈下量を予測した。また、沈下による被害額も算出した。これらのシナリオ解析の結果は、「災害時地下水利用システム開発連絡会」の第7回会議にて報告した。

関東平野の3次元水循環モデルは、過去から現在にかけての関東平野の地下水位変遷の概略を再現できているが、局所的に見ると再現性の低い地域も存在する。特に、月変動が大きく解析されると、算出される地盤沈下量の精度も低下する。こういった再現性の低い地域について、地下水取水の量や空間配置・深度等の情報不足が大きな原因の一つと考えられるため、今後は揚水条件の精緻化を進めて、モデルの精度を向上させる必要がある。さらに、地盤沈下モデリングにおける不確実性評価のためのアンサンブル解析の大規模化と、不確実性が高いと推定された地域の不確実性の原因把握及び不確実性低減のための調査・検討が期待される。また、関東平野・濃尾平野のみでモデルを開発してきたが、他地域への水平展開を行うことも肝要である。

#### ④ 達成度 (2)

濃尾平野においては、令和3年5月20日に開催された南海トラフ地震対策中部圏戦略会議で、非常時地下水利用システムの活用を提案し、名古屋大学の辻本名誉教授から「水供給の問題は発災直後の問題だけでなくその後長期間我々が対応していかなければならない問題」、中部大学の林教授からは「断水すると最悪の場合1190万人あると、そういうところから逆算して何やるか、どういう支援をするか検討していただけるとよい」とのコメントを頂いた。

また、中部地方整備局、岐阜県、大垣市などの行政機関及び学識者から構成される「災害時地下水利用システム開発連絡会」を11月8日、1月11日と2回開催し、システムへの技術的アドバイス及び活用ニーズの把握を行った。

関東平野については、東京都と協議を行い東京都の令和3年度地下水対策検討委員会のまとめに「SIPの研究と地下水に関する情報共有を行うなどお互いに協力していく」旨明記された。

林野庁で開始された森林水源涵養機能評価への取組へのインプットを行うと

ともに、SIP で得られた知見をもとに水源涵養機能評価手法の実装への検討を進めた。SIP で得られている手法を都道府県などの技術者への技術展開としての手引書作成等を検討した。神奈川県や山梨県の森林関係者と森林管理と水源涵養機能についての意見交換を行った。スマート林業実証試験が行われている愛知県においての技術活用について検討した。

サブテーマ1：非常時地下水利用システムの社会実装インターフェースの開発  
第6回災害時地下水利用システム開発連絡会では、非常時地下水利用システムの様々なケースのシナリオの解析結果を提示するとともに、インターフェースのプロトタイプを提示し有効性の高いシナリオ設定やインターフェースについて意見交換を実施した。具体的な意見としては、防災井戸設置個所に関する入力について地図上からできるようにしてほしいといったことや、システムの背景図に対して意見があったためシステムに反映した。

第7回災害時地下水利用システム開発連絡会では、第6回の意見を踏まえたシナリオ解析結果、インターフェースを提示するとともに非常時地下水利用システムの利用料金等について提示した。

また、非常時地下水利用システム完成後は、濃尾平野地盤沈下防止等対策要綱推進協議会（令和5年2月）、関東平野北部地盤沈下防止等対策要綱推進協議会（令和5年2月）で完成した非常時地下水利用システムの紹介を行った。更に、内閣官房水循環政策本部事務局が設立した地下水マネジメント推進プラットフォームで、非常時地下水利用システムが掲載され、地方自治体の取組を支援する仕組みを構築するとともに、非常時地下水利用システムのマニュアルを作成し公益財団法人リバーフロント研究所のホームページで紹介を行うとともに、利用料金等のシステム利用に当たっての注意事項を明記した。また、これまで国土交通省は2009年に『震災時地下水利用指針（案）』を公表し、震災時の水の確保に関する危機管理を充実させる地下水の有効活用方策と事例を示していたが、その後、2011年の東日本大震災、2016年の熊本地震、2018年の西日本豪雨などの大規模災害が相次いで発生した。これを受け本研究プロジェクトでは新たに『非常時地下水利用指針（案）』を作成し情報の更新を行った。『震災時地下水利用指針（案）』は地域防災計画（給水計画）の課題と地下水利用の効果、地下水利用の検討に必要な情報と検討手法など19のトピックをまとめたものであるのに対し、『非常時地下水利用指針（案）』は一部のトピックを踏襲しつつもトピック数を32に増やした。この成果は災害時地下水利用の社会実装を後押しすべく、内閣官房水循環政策本部事務局及び公益財団法人リバーフロント研究所のホームページを通じて広く公開された。

今後、非常時地下水利用システムの利用者を増やすため、SIP終了後は濃尾平野については、第14回南海トラフ地震対策中部圏戦略会議（令和5年5月開催

予定)で完成した非常時地下水利用システムの紹介を行うとともに、地下水マネジメント推進プラットフォーム等を通じて個別に問い合わせがある自治体等に対して具体的な社会実装を進めていく予定である。また、必要に応じてインターフェースの修正等を行う。

また、『非常時地下水利用指針(案)』は内閣官房水循環政策本部事務局及び公益財団法人リバーフロント研究所のホームページを通じて一般公開されたが、こうしたデジタル資料に加え小冊子を100部作成した。今後は適宜、自治体や市民団体に小冊子を配布し、災害用井戸の普及啓発を行う。また同指針(案)には災害用井戸に関する問い合わせ先(大阪公立大学)も明記しており、それを通じて災害時の地下水利用の追加情報を集めるほか、災害用井戸に関する各種相談にも応じる体制を整えている。また必要に応じて『非常時地下水利用指針(案)』の更新を行う予定である。

#### サブテーマ2：非常時地下水利用システムに適合した3次元水循環モデルの開発

東京消防庁の抱える課題は、都内に点在する木造住宅密集地域における消防水利であり、特に問題となるのは河川や大容量消防水利がない地域の消防用水源開発にある。世田谷区、渋谷区にまたがる地域は今後消防水利の開発が必要になる地域で、深井戸による消防水利が厳しい場所と認識している。こうしたことから東京消防庁としては世田谷区、渋谷区にまたがる地域の水源開発に向けて、SIPにより構築した3次元水循環モデルが多少なり寄与できないか興味を持つ状況であった。しかしながらここ数年都内の水道管路の耐震化が進められており、震災時に断水は発生せず消防水利は使用可能な位置づけとなって来た。そのため3次元水循環モデルに興味はもったものの積極的な活用に至らなかった経緯がある。他方、東京消防庁から消防井戸の深井戸情報を提供いただき、関東平野の3次元水循環モデルに反映できた。また既存の消防水利利用深井戸を対象とし、実際に揚水をした場合の地下水位と地盤沈下の解析を行った。この消火用水の揚水量を仮定したシナリオ解析の結果は、東京消防庁にとって心強いデータであった様子で、今まで数値的に保持していなかった消防水利利用時の安全性に根拠を与えることができた。なお本業務により、東京消防庁防災部水利課とパイプを構築できたため今後継続的に情報交換を行い、3次元水循環モデルの社会実装に向けて活動を行っていく予定である。

国土交通省水管理・国土保全局水資源部は、地下水の適正な利用と保全の推進に向けてのSIPで構築した3次元水循環モデルの利用を前向きに考えている。具体的には、関東平野北部の地盤沈下防止等対策要綱地域を対象に、平成6年の雨量、地下水位、地盤沈下のデータをベースとした表流水と地下水一体の水循環解析及び地盤沈下解析によるシミュレーションを行い、地盤変動を極力生じない揚

水量・地下水位変動を把握する業務が想定できる。今後は、数値的な情報が少なかつた関東平野北部の地盤沈下防止等対策要綱地域について、広域のかつ科学技術的に説明のつく情報が整ったことになるため、同地域の地下水マネジメントに3次元水循環モデルが利用されていく可能性がある。また国土交通省水管理・国土保全局水資源部内部において、3次元水循環モデルの存在が知られてきたこともあり、今後、水資源部からの委託業務に3次元水循環モデルを利用する可能性もある。

#### ⑤ 知財戦略，国際標準化戦略，規制改革等の制度面の出口戦略

三次元水循環解析モデルに対しては、非常時のみならず健全な水循環の復元・維持といった観点からも潜在的な需要が大きいため、そうしたニーズも取り込める将来性・柔軟性を有したシステムとなるよう配慮するとともに、国際標準化に向け ISO の登録に関する調整を行っている。地下水利用の規制改革については、地下水条例の適用除外規定の調査を進めており、社会実装時において生じると予想される法的課題を把握した。

サブテーマ1：非常時地下水利用システムの社会実装インターフェースの開発  
地下水利用の規制改革については、既存の地下水採取規制と非常時地下水利用の両立をいかに調和させるかという法的課題があるが、各地の大規模自治体を例に地下水条例の適用除外規定の調査を行っている。想定社会実装先の一つである名古屋市を含む複数の政令指定都市で取水深度規制等を例外的に緩和することで公設の防災井戸が利用可能であることを確認するなど、国内制度に関する調査成果も得られている。

サブテーマ2：非常時地下水利用システムに適合した3次元水循環モデルの開発

三次元水循環解析モデルに対しては、非常時のみならず健全な水循環の復元・維持といった観点からも潜在的な需要が大きいため、そうしたニーズも取り込める将来性・柔軟性を有したシステムとなるよう配慮するとともに、国際標準化に向け ISO の登録に関する調整を行っている。

#### ⑥ 成果の対外的発信

研究成果は国内外の学術雑誌に速やかに公表している。2021年6月に改正された水循環基本法に「地下水の適正な保全及び利用」に関する規定されたこともあり、機会を通じて発信した。

サブテーマ1：非常時地下水利用システムの社会実装インターフェースの開発  
研究成果は国内の学術雑誌・専門誌への投稿・寄稿，国際学会での発表等を通  
じ，速やかに公表するよう努めている。

サブテーマ2：非常時地下水利用システムに適合した3次元水循環モデルの開  
発

国内学会・シンポジウムにおける成果発表，2022 計算工学国際会議における発  
表をおこなった。

#### ⑦ 国際的な取組・情報発信

研究に係る成果は学術論文として国際学術雑誌に発表している。世界水フォー  
ラムやアジア太平洋水サミットなどの場を通じて国際的な情報発信を進め，特に  
途上国の地下水開発のための連携を進めた。

サブテーマ1：非常時地下水利用システムの社会実装インターフェースの開発  
研究に係る成果は8月に開催された国際学会（国際計算工学会）にて発表を行  
っている。その他，熊本市で4月に開催されたアジア太平洋水サミットなどの場  
で情報発信を行った。

サブテーマ2：非常時地下水利用システムに適合した3次元水循環モデルの開  
発

研究に係る成果は，第9回世界水フォーラム（セネガル），第4回世界水サミ  
ット（熊本），2020～2022 危機管理産業展などの場を通じて国際的な情報発信を  
進め，特に途上国の地下水開発のための連携を進めている。

#### (4) テーマV：線状降水帯の早期発生及び発達予測情報の高度化と利活用に関する研究

##### 1) 研究内容

関係機関の協力の下、線状降水帯により発生する水害・土砂災害からの避難エリアの指定や避難勧告・指示のタイミングの判断のため、適切な観測と分析を組み合わせた線状降水帯観測・予測システムを開発する。本システムは、線状降水帯の観測データにより地域のリスクを評価し確実な避難につなげ、また線状降水帯の発生可能性を数時間から半日前に予測すること、積乱雲の発達可能性を発生直前や発生後に予測することを目標とする。また本システムはテーマIで開発する「避難・緊急活動支援統合システム」と有機的・統合的にシステム化することを前提として開発する。

##### 2) 技術的目標

線状降水帯により発生する水害・土砂災害からの早期避難を阻む最大の要因は、事前に線状降水帯を把握できていないことと、それにより十分なリードタイムの確保ができないことである。このため新たに、観測と分析を組み合わせて線状降水帯を数時間から半日前に予測する技術を開発する。

4年次は、2020年度までに実施した早期予測手法の精度検証と実証実験ヒアリング調査に基づき、早期予測の運用に必要な予測精度の向上を図る。九州地方の自治体との実証実験を2021年暖候期に実施し、高度化された自動検出技術による線状降水帯の現況把握情報、半日先と2時間先までの線状降水帯の発生・発達予測情報、さらに気象庁の危険度情報を組み合わせて自治体に提供することで、自治体の防災体制における線状降水帯情報の活用方法や適切な提供方法・表現方法等を継続して検証し、自治体毎の要望を踏まえた、社会実装可能な情報提供のカスタマイズ法を提案する。

これまで九州地方で進めてきた水蒸気観測網を強化し、地デジ観測、水蒸気ライダー観測、マイクロ波放射計を活用したマルチセンシング観測を2021年暖候期に実施する。観測されたデータをサブテーマ3の2時間先予測シミュレーションの入力情報としてリアルタイムで提供し、線状降水帯の予測精度向上に貢献する。九州地方における地デジ観測整備完了後、観測点構築費、運営費などの算出を行い、1観測点あたりの配信費を確定させるとともに、社会実装にむけたクラウド配信の試験運用を開始する。関東域での2時間先予測の精度向上に寄与する豪雨の直前予測は、2020年までの実証実験におけるステークホルダーの要望を反映したWeb表示システムの改修を行い、2021年に実施されるオリンピック・パラリンピックでの情報配信を行う。東京都下水道局との実証実験を継続し、MP-PAWRの最適仰角を利用した雨量配信システムと、東京都下水道局が運用する現行システム(東京アメッシュ)を比較することで、MP-PAWRの有意性を確認する。

3年目までに構築した線状降水帯の予測最大可能積算雨量と地域の脆弱性から

避難エリアを特定するシステムのプロトタイプの精度検証を行い、自治体のニーズにカスタマイズすることで高度化を図る。開発した予測システムを民間クラウド上の HPC (High Performance Computing) 環境で実現する社会実装版プロトタイプの高度化と、予測技術の性能とコストの評価に基づくビジネスモデルの立案を行い、民間気象会社の試験運用を行うことで、民間気象会社への技術移植のメドをつける。

最終年次は、早期線状降水帯予測情報の利活用として、これまでの発生危険度レベル情報から各地の脆弱性を考慮した水災害の危険度への変換をめざす。数値予測で半日程度先の予測精度の悪化（雨量の過小評価や位置ズレ）を考慮した予測雨量の補正法を開発し、実際の雨量との比較を行い、精度検証を行う。さらに地域の脆弱性と組み合わせることで水災害危険度情報推定手法を開発し、社会実験の中で精度を検証する。2030 年までに気象庁が実装を目指している「大雨となる確率メッシュ情報」に早期予測技術に関する SIP の成果を実装するために、SIP 終了時まで早期予測のプロトタイプを完成させる。SIP 終了後に十分な時間をかけ、その性能を検証した後、気象庁で運用することを目標とする。

水蒸気マルチセンシング観測網（地デジ水蒸気観測、水蒸気ライダー、マイクロ波放射計等）を関東及び九州に整備し、降水予測に資する対流圏下層の水蒸気観測の手法を評価する。地デジ水蒸気観測データはメッシュ情報やポイント情報での配信を可能とさせる。また実証実験でのステークホルダーのニーズを踏まえた上で、MP-PAWR の高度利用法を評価し、現況雨量及び予測雨量の更なる推定精度向上をめざす。特に地デジ水蒸気観測においては、災害時だけでなく平時における水蒸気情報の有効性の検証を行い、コスト評価を踏まえた確実な収益性を確保できるビジネスモデルを考案し、SIP 後の事業化をクローズド戦略でめざす。

ナウキャスト法と数値予測法を結合するブレンディング予測を水平 1km 分解能で実施し、10 分毎に 2 時間先までの 3 時間積算雨量情報を予測誤差を考慮した最大可能積算雨量に変換する技術を開発する。九州で高解像度・高精度積算雨量予測と雨量統計解析に基づく危険度に加えて、他の地域毎の脆弱性（標高や斜度）を考慮し、避難エリア特定手法の高度化を図り、降雨予測・避難エリア特定システムのプロトタイプを完成させる。降雨予測・避難エリア特定システムのプロトタイプの精度評価を自治体が参加する九州社会実験で行い、自治体の避難勧告・指示の判断支援への効果を検証する。その上でプロトタイプのシステムの自治体への導入可能性（可能な費用負担など）に関するヒアリングを行い、確実な収益性を確保できる実現性の高いビジネスモデルを考案し、SIP 後の民間気象会社での事業化につなげる。事業規模に応じた柔軟なスケーラビリティを生かせる民間クラウドコンピュータを用いた高解像度・高精度積算雨量予測を可能とし、全国広域展開の可能性を視野に民間気象会社の参入を促進する。

### 3) 課題目標の達成度

#### ① 国際競争力

地上デジ水蒸気観測は、NICTが独自開発した世界初の手法で、地表付近の2地点間の水蒸気量を測定できる。1点の地上観測に比べて、空間代表性、観測コスト、センサーの耐久性の3点で優位である。日本アンテナに技術移転を進めて展開を実施しており、国際的には先発優位を確保できると見込んでいる。データ同化研究の成果により、地上付近の水蒸気分布の水平勾配も推定することが可能であり、1地点の水蒸気観測に比べて、面的な水蒸気分布推定に有利であることが判明した。ドローンを用いた検証を進め、地デジ水蒸気観測の定量的評価を行い、信頼性の高い情報を提供可能であると判明した。

#### サブテーマ1：線状降水帯の早期予測の高度化と利活用

亜熱帯湿潤域（西日本）で梅雨期という、日本特有の環境場で線状降水帯が発生する。従って線状降水帯に特化した早期予測は国際比較が困難である。一方で、線状降水帯に特化した早期予測法の開発は

気象庁に先駆けて行っており、見逃しが無い、線状降水帯インデックスを用いた予測と、空振りを低減した気象庁メソアンサンブル雨量予測を組み合わせることで、自治体の避難判断支援に貢献するための予測情報の提供方法のあり方について、自治体とともに検討し、当初の目標を前倒しで達成した。

#### サブテーマ2：水蒸気・降水マルチセンシング技術開発

地上デジ水蒸気観測は、NICTが独自開発した世界初の手法で、地表付近の2地点間の水蒸気量を測定できる。1点の地上観測に比べて、空間代表性、観測コスト、センサーの耐久性の3点で優位である。日本アンテナに技術移転を進めて展開を実施しており、国際的には先発優位を確保できると見込んでいる。今年度のデータ同化研究の成果により、地上付近の水蒸気分布の水平勾配も推定することが可能であり、1地点の水蒸気観測に比べて、面的な水蒸気分布推定に有利であることが判明した。ドローンを用いた検証を進め、地デジ水蒸気観測の定量的評価を行い、信頼性の高い情報を提供可能であると判明した。

#### サブテーマ3：線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発

亜熱帯湿潤域（西日本）で梅雨期という、日本特有の環境場で線状降水帯が発生する。従って線状降水帯に特化した2時間先予測は国際比較が困難である。2時間先雨量予測技術は、国内特許を出願し、民間気象会社による国内事業化を検討しているが、世界屈指の予測技術を持つ気象庁の予測技術に対して、特に線状降水帯発生初期における精度で十分な優位性を示せたと考える（検出率を12%改善した）。

## ② 研究成果で期待される波及効果

開発した線状降水帯の自動検出技術は 2021 年暖候期から気象庁に実装され、これまで8回線状降水帯の発生を国民に周知でき、全国民の安全安心に貢献した。また、早期予測は SIP 後に気象庁で実装されることで、日没前の避難を実現し、全国民の安全安心に貢献すると考えられる。実際に 2022 年度から気象庁は半日先予測を開始したが、予測精度の改善の余地があるため、SIP の早期予測手法については継続的に支援を進める。地デジ水蒸気観測はクラウド配信サービスを行い、民間気象会社が不快指数など付加価値を与えた情報提供する新たな市場を創出する。

### サブテーマ 1：線状降水帯の早期予測の高度化と利活用

開発した線状降水帯の自動検出技術は 2021 年暖候期から気象庁に実装され、これまで8回線状降水帯の発生を国民に周知でき、全国民の安全安心に貢献した。また、早期予測は SIP 後に気象庁で実装されることで、日没前の避難を実現し、全国民の安全安心に貢献すると考えていたが、前倒しで 2022 年度から気象庁は独自の半日先予測（特別警報級の大雨となる確率メッシュ情報）を開始した。しかし、予測精度の改善の余地が十分にがあるため、SIP の早期予測手法については継続的に支援を進める。

### サブテーマ 2：水蒸気・降水マルチセンシング技術開発

地デジ水蒸気観測はクラウド配信サービスを行い、民間気象会社が不快指数など付加価値を与えた情報提供する新たな市場を創出する。SIP 第 2 期の枠外ではあるが、NICT では世界に 4 つある地デジ規格のうち欧州方式に対応した観測装置の開発を進めており、同方式を採用している欧州や台湾をはじめとするアジア諸国への展開の可能性を検討している。

### サブテーマ 3：線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発

2 時間先予測も民間クラウド HPC で実現することで、民間気象会社による自治体の避難判断支援という新たな市場を創出する。また地デジ水蒸気観測のリアルタイムデータ同化システムを日本アンテナに導入し、面的な水蒸気分布提供サービスを可能とする技術開発を行った。面的な水蒸気分布提供サービスの実現により、民間気象会社が不快指数など付加価値を与えた情報提供する新たな市場を創出する。

## ③ 達成度 (1)

### サブテーマ 1：線状降水帯の早期予測の高度化と利活用

4年次までに、線状降水帯インデックスを用いた早期予測法の精度検証結果と自治体との実証実験におけるヒアリング調査に基づき、早期予測の運用に必要な予測精度の向上を図った。具体的には、9割を超える空振率を低減させるために、線状降水帯インデックスの閾値の見直しや九州地域に特化した見直しを検討した。また、気象庁のメソアンサンブルモデルの降雨予測量の活用に基づき、予測精度向上の可能性を検討した。九州地方の自治体との実証実験を暖候期に実施した。線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発（サブテーマ3）と連携し、2時間先までの予測雨量を新たに自治体に提供することで、自治体の防災体制における線状降水帯情報の活用方法や適切な提供方法・表現方法等を検証した。気象庁や気象研究所と協力し、災害発生の際が迫る線状降水帯の自動検出技術を開発した。この技術を気象庁に実装し、気象庁の「顕著な大雨に関する気象情報」として2021年6月17日から運用が開始された。半日前予測については、線状降水帯インデックスと気象庁メソスケールモデルの降雨予測量を組合せた手法（3年次に検討した見逃しは少ないが空振りが9割を超える情報）に加えて、4年次にメソアンサンブル予測雨量を活用した見逃しは許容するが空振りの少ない予測情報を作成した。時空間スケールの大きな線状降水帯（例えば令和2年7月豪雨）の場合、現業のメソアンサンブル予測（5km格子、21シナリオの予測）においてもいくつかのシナリオにおいて、線状の降水域が予測されていることを確認したが、発生時刻や場所、降水量などには大きなズレがあるため、これらのズレを許容する高度化を行うことで、見逃しと空振りを最適化することが可能となった。

最終年度は、九州地方における計11自治体との社会実験を、2022年6月1日から10月30日にかけて実施した。半日前予測については、線状降水帯インデックスと気象庁メソスケールモデルの降雨予測量を組合せた見逃しは少ないが空振りの多い情報（以下「インデックス版」という。）に加えて、メソアンサンブル予測雨量を活用した見逃しは許容するが空振りの少ない情報（以下「メソアンサンブル版」という。）を提供した。全ての自治体に対して空振りの少ないメソアンサンブル版を提供した一方で、より多くの情報を必要とした、いくつかの自治体に対しては、インデックス版や電話通報サービスも提供した。自治体によって空振りをどの程度許容するのかなど要望が異なるため、活用を進めるためには予測の精度を踏まえたカスタマイズが重要であることがわかった。線状降水帯の半日前予測については、令和4年6月から気象庁による運用も始まった。気象庁の予測は、地方予報区単位（九州の場合は、九州北部と九州南部の2つ）と非常に広い範囲での発表となっている。一方、SIPによるメソアンサンブル版予測では、県単位で絞り込むことが可能となっており、大規模な線状降水帯に着目すれば検出率（捕捉率）が50%以上と気象庁の予測よりも見逃しなく予測することができた。実証実験中におけるインデックス版とメソアンサンブルの精度について、インデックス版は捕捉率が100%に近く見逃しがほとんどない予測であることがあ

らためて確認できた。一方、期間中の線状降水帯発生率 0.8%に対して、半日前予測の発表頻度（発令率）が 17.2%（発生率の約 20 倍）と非常に多かった。メソアンサンプル版は捕捉率が低下するものの、発令率が発生率の 2 倍に収めることができた。各自治体担当者からも、メソアンサンプル版の発表頻度は適切であったとの評価が得られた。2022 年 7 月 18 日深夜から 19 日未明における線状降水帯発生事例について、SIP 及び気象庁による半日前予測結果比較すると、気象庁の予測は九州全域を対象としたものであった。一方、SIP の予測は九州北部に絞り込むことができ、自治体担当者からは線状降水帯の発生危険度が高い地域を絞り込むことができ有用であるとの評価を頂いた。また、自分の自治体に楕円がかかっている場合でも、隣接自治体にかかっている場合は警戒するとの貴重なコメントが得られた。自治体担当者へヒアリングをした結果、有効であったと評価された情報の上位 2 つは、メソアンサンプル版の半日前予測と 2 時間先予測（サブテーマ 2 及び 3 の成果）であった。2 時間先予測から線状降水帯の発生可能性がわかれば、市民への通知のための構えや線状降水帯の発生を文言に反映することなどが考えられるとのことであった。

#### サブテーマ 2：水蒸気・降水マルチセンシング技術開発

4 年次までに、九州地方の地デジ観測網（以後、地デジ観測）の整備を完了し、水蒸気分布をリアルタイムで把握した。具体的には、九州地方に設置した地上デジタル放送波を用いた水蒸気観測（以後、地デジ観測）を実施し、線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発（サブテーマ 3）へ提供した。こうした観測網の整備とともに、データ配信のためのクラウドシステムの試験運用を 4 年次に開始した。2 年次に開発した水蒸気ライダーを 3 年次に九州地方に設置し、4 年次以降、対流圏下層の水蒸気の高高度分布を連続観測し、データ同化による予測へ活用させた。4 年次までは過去の航空機データを線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発（サブテーマ 3）へ提供しデータ同化実験を行った。3 年次以降、2 台のマイクロ波放射計を九州で運用し、連続観測を実施するとともにデータ同化による予測へ活用させた。2 年次以降、マルチパラメータ気象レーダー（MP-PAWR）のリアルタイム配信を継続し、表示システムを稼働し、首都圏の自治体（東京都板橋区）や防災関連事業者（東京都下水道局など）と実証実験を実施した。MP-PAWR の空間的に高密度な観測機能の特徴を生かし、都市部のビル群や山岳域の地形などがある遮蔽環境下において、最適仰角で雨量を解析できる技術の高度化を図った。4 年次までに MP-PAWR のデータを活用した機械学習に基づく予測法の高度化を図った。4 年次には、オリパラ期間中に関係機関と実証実験を実施し、観測・予測プログラムの精度を検証し、80%以上の的中率があることを実証した。

最終年度は、昨年度に引き続き、鹿児島県下甕島と長崎市野母崎の観測サイトで、水蒸気ライダーを用いた水蒸気鉛直プロファイルの観測を出水期に実施した。

観測で得た水蒸気観測データを、リアルタイムデータ同化を実施するサブテーマ3の研究グループに提供した。さらに観測データを気象庁大気海洋部にリアルタイムで提供し、大気海洋部の実況監視に貢献した。2022年6月16日から1月の長期にわたるゾンデの頻回観測を下甕で実施した。このゾンデ観測で得たデータに加えて、気象研究所が実施したゾンデデータを用いて、水蒸気ライダーとの比較検証を実施した。下甕、長崎の水蒸気ライダーは共に、日中で高度200mから2km程度、夜間で5km程度まで観測できていることを確認した。またゾンデとの精度検証により下甕、長崎共に1.2g/kg程度の十分高い精度で観測できていることが確認できた。水蒸気ライダーのデータ同化への統計的なインパクトを確認するために、2022年6月15日から1月間の下甕及び長崎の水蒸気ライダーのデータ同化を行った。データ同化で得た3時間の予報値と解析値を3地点のゾンデ観測（下甕、野母崎、福江）と比較した。その結果、700hPa高度以下で水蒸気混合比の予報値・解析値における改善が確認された。線状降水帯の予測精度向上には、大気下層での水蒸気量の精度向上が必須と考えられているため、今回の統計結果は水蒸気ライダー観測が線状降水帯の予測精度向上に有効であることを示した。一方で、風向風速に関しては水蒸気プロファイルのデータ同化は中立であるものの、大気下層では気温の予報値・解析値について若干の改悪がみられた。今後気温の改悪を抑制する手法の開発を進めていく予定である。2022年7月15日に発生した線状降水帯事例について、風上側の水蒸気鉛直プロファイルの連続観測に成功した。この事例は熊本県、宮崎県、鹿児島県の3県にわたり発生した線状降水帯であった。当該事例において、線状降水帯の風上に位置する下甕の水蒸気ライダーは、線状降水帯発生前に湿潤な大気を観測することに成功した。さらに、気象庁現業で用いられているデータ同化システムを用いて、水蒸気ライダー観測のデータ同化実験を実施した。水蒸気ライダーデータを同化しない実験では、降水量予測を過大評価し鹿児島県北部に存在しない強い降水を予測していた。一方で、水蒸気ライダーデータを同化した実験では、この存在しない降水を低減し、観測値に近づくことを確認した。2021年7月10日の未明に鹿児島県北西部で発生した線状降水帯事例の解析を進めた。線状降水帯を引き起こした大気下層の湿潤なインフローの内部と外部を下甕、長崎のそれぞれの水蒸気ライダーで観測することに成功した。両者の比較解析から、湿潤なインフローでは高度2km以下に湿潤な層が集中しているなど、これまで得られなかった湿潤なインフローの詳細な内部構造が明らかとなった。さらにこの事例に対して水蒸気ライダーのデータ同化を実施した。水蒸気鉛直プロファイルのデータ同化は、線状降水帯の風上側の大気下層の水蒸気分布に加えて、風向風速も大きく変化することが分かった。さらに、水蒸気データを同化しない実験と水蒸気ライダーデータを同化した実験において9時間予測雨量の比較を行った。その結果、水蒸気ライダーデータを同化した予測では、降水量、降水域ともに改善が見られた。前年度までの水蒸気ラ

ライダーデータ同化実験の結果に加え、今年度のデータ同化実験の結果から、水蒸気ライダーのデータ同化による線状降水帯の予測精度向上を確認することができた。

また、海洋に周囲を囲まれた日本では、線状降水帯の大雨をもたらす水蒸気が海洋上から流れ込む。2018年の西日本豪雨が発生した際には、九州・四国付近に流れ込む空気塊は、数100kmも遠方の海上、沖縄本島の南西～南東海上から流れ込んでいた。つまり12時間前から線状降水帯の大雨を予測するためには、このような数100km遠方の海上の大気状態、特に水蒸気の鉛直分布と大気の安定度のデータが必要ということの意味している。そのようなデータを取得するためには航空機を用いた観測が不可欠である。最終年度は、ダイヤモンドエアサービス社のガルフストリームIVというジェット機を使用し、2022年7月5日に日本の南の太平洋から東シナ海にかけて高度13.1kmからのドロップゾンデ観測を実施した。鉛直積算水蒸気量の分布を見ると、このとき弱い台風4号が九州北部にあり、その南東側に水蒸気の流れ込み（大気の河）が発生していた。この事例はあまり顕著な大気の河ではなかったが、5日未明には高知県で、線状降水帯が発生し約1時間40分続いた。これにより多い所で3時間降水量が約260mmに達した。7月5日に実施した航空機観測では、大気の河を東西に横切っており、その水蒸気の鉛直分布を観測することができた。これによると九州の南西付近は水蒸気が少なく、大気の河がやや途切れた状態にあるが、四国から紀伊半島付近には多くの水蒸気があり、大気の河が関東地方沿岸まで延びていることが分かった。等間隔で連続的にドロップゾンデ観測を行うことで、測線上の水蒸気の空間分布を得ることができ、特に四国から紀伊半島付近では大気下層に多量の水蒸気が存在していることが示された。一方で上空には乾燥した空気の流れ込みが部分的にあり、大気対流不安定度が大きくなっていった。ドロップゾンデ観測のデータは、飛行中の航空機からリアルタイムで名古屋大学を經由して、気象庁に送信され、数値予報モデルに同化されることで、実際の気象予測に利用された。さらにそのデータは世界中の気象予報機関に送信され、それぞれの機関の数値予報モデルに同化され、各国の気象予報に用いられた。得られたドロップゾンデ観測データは、クオリティーチェックを進めており、その後データ解析とシミュレーション実験に利用される。特に数値予報実験では観測データを同化することで、降水量の量的予報の高精度化を図る。加えて、線状降水帯の大雨の12時間前予測を検討する。

さらに、日本アンテナとNICTが協力し、九州地方での地デジ観測を実施した。加えて地デジ水蒸気観測の検証の一環として、ドローン観測を防災科研が実施した。一般向けのニーズが高い面的な水蒸気情報の配信を行うための「地デジ水蒸気データ配信クラウドシステム」の開発をこれまで行ってきた。地デジ観測網で観測したデータは1分値としてMicrosoft Azureに構築した観測データ配信用

クラウドに集約している。集約されたデータは登録されたユーザーに対しリアルタイム配信を行うとともにアーカイブのダウンロードも可能としている。また、日本アンテナの Web サイトにて観測データを提供し地図上に可視化を行った。観測データはクラウドとの親和性を重視し JSON フォーマットにて受け渡しするよう構築した。そして、地デジ水蒸気観測の検証のために、熊本県阿蘇市において、2022 年 8 月から 9 月の 2 ヶ月間にわたって、防災科研が複数回ドローン観測を実施した。ドローン観測と地デジで推定された遅延量を比較すると、ドローン観測点が地デジの反射体と同じ場所となっており、2 点間の遅延量をドローンで検証したことになる。午前 8 時においては、地デジの遅延量(距離 1km に相当した量)は 1125 pecs (ピコセカンド: 10-12 秒)であったが、10 時には 1090 pecs, 12 時に 1080 pecs, さらに 16 時までで一時的に 1070 pecs まで下がった。遅延量が下がることは、気温が上がるか、もしくは、水蒸気量が下がる時に見られる。すなわち、相対湿度が下がる場合に遅延量が下がることになる。8 月 29 日においては、実際に、日射とともに気温があがり、相対湿度が下がったことがアメダスなどの地上観測で確認された。ドローン観測では、どの高度で見ても、朝 8 時から 16 時にかけて、遅延量相当量が減少していることが確認でき、地デジ観測とよく整合している。ドローン観測で高度別に遅延量を測り、どの高度の遅延量が地デジ遅延量と一致するかを調べると、概ねどの時刻(午前 10 時を除いて)も高度 50m の遅延量がよく一致した。この結果から、これまで本予測システムのデータ同化において、地デジ水蒸気観測結果を予測モデルの最下層高度にあたる高度 50m で同化を行っていたことが妥当であることが示された。

2020 年 10 月以降長崎県五島市(福江島)にマイクロ波放射計を防災科研が設置し、連続観測を実施してきた。また、2021 年 7 月以降熊本県天草市(牛深地方)においても、マイクロ波放射計の連続観測を継続してきた。2021 年 7 月以降、リアルタイムで、マイクロ波放射計が観測した可降水量をデータ同化によって初期値改善に貢献してきた。2022 年 6 月中旬以降、2 台のマイクロ波放射計データをリアルタイムで気象庁へ配信し、気象庁及び気象研究所の協力により、地方気象台の予報官が、リアルタイムでマイクロ波放射計による観測結果を閲覧することができるようになった。SIP 等のこれまでの気象予報研究の成果により、マイクロ波放射計の有効性が確認されたため、2021 年の気象庁の補正予算で 17 台のマイクロ波放射計が導入されることになった。SIP 終了後においては、こうしたマイクロ波放射計のデータを活用した予測精度向上に関する開発が気象庁や気象研を中心に進められることになる。

2021 年と同様に甕島の水蒸気ライダー観測施設に、ドップラーライダー観測機器のレンタル契約による、低高度の風向風速観測を 5 月 30 日から 9 月 30 日まで実施した。概ね高度 1 km までの風向・風速を連続的に取得することができ、客観解析による初期値と整合する結果を得た。

マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダ（MP-PAWR）に関して、信号処理と機械学習法の開発を行うとともに、2022年7月4日から9月30日に実証実験を行い、注意アラームの発報精度を評価した。前年度43%を占めていた空振り率は、当年度21%まで改善し、的中率も56%から76%まで改善することができた。

### サブテーマ3：線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発

4年次までに、地デジの観測データを同化する機能を開発し、気象庁のアメダス水蒸気観測データを同化する機能を開発した。水蒸気ライダーに関しては4年次までにリアルタイム予測へ活用し同化インパクトを明らかにした。予測した雨量を確率雨量情報へ変換し、線状降水帯の早期予測の高度化と利活用（サブテーマ1）の実証実験の中で、九州の自治体に配信を3年次以降継続した。これまで開発してきた降雨予測を民間クラウド HPC 環境で実施する社会実装版システムの高度化を図り、計算コストを大幅に引き下げる改良が4年次までに完了した。

最終年度は、開発した Web-API において、予測の位置ズレの影響を考慮し、自治体毎に適切な対応をするための改修を行った。具体的には、スネーク曲線の作成において、①アンサンブル予測の利用、②位置ズレを許容した予測の利用、を可能とした。①アンサンブル予測の利用については、予測雨量の不確実性を考慮するために、決定論的予測である SIP で開発した2時間先ブレンド予測に加え、アンサンブル予測（気象庁メソアンサンブル及び気象庁メソアンサンブルガイダンス）を利用可能にする開発を行った。アンサンブル予測を用いることで、自治体毎に適切な対応が可能になると期待される。例えば、予測の見逃しを極力避けて安全側に運用したい自治体であれば最も危険なアンサンブルメンバーを用い、見逃しはある程度許容しつつも空振りを少なくして効率的に運用したい自治体であればアンサンブルメンバーの中央値を用いる、等の利用が可能である。②位置ズレを許容した予測をするために、周囲 L(km) × L(km) 四方の領域において、土砂災害の危険度が最も高くなる地点のスネーク曲線を抽出可能にした。予測精度や自治体のスケールを基に位置ズレを許容するスケール(L)を適切に設定することにより、安全側・危険側のどちらの運用も可能となった。さらに、スネーク曲線を可視化するための Web ページを作成した。様々なアンサンブル予測に対してスネーク曲線を描画できるため、予測の不確実性の度合いを直感的に把握することが可能である。このような Web ページを自治体の方に利用していただき、ヒアリングを通じて生の声を聞きながら、さらなる改良を行っていきたい。

クラウド HPC (AWS) を用いた2時間先予測システムの高度化に関して、全国どこでも予測ができるように(1)気象庁 MSM と地形データを AWS への転送、日本全国の地形データの転送、日本全国の土地利用データの転送、気象庁アメダス等の観測データの転送に関する機能を実装し、(2)2022年7-8月に東北地方、北陸

地方、四国地方、九州地方に発生した複数の線状降水帯事例で、リアルタイムを模した環境（現在時刻を過去に設定し、現実の時間進行に沿ったデータの転送や計算の実施、出力結果の取得）で計算を実施した。また、2022年9月23日に静岡県でも線状降水帯が発生したため、追加で計算を実施した。特に宮城県で発生した大雨は水平スケールの大きさでは線状降水帯を満たさない面積であり、狭い範囲での記録的な大雨となり、予測が極めて難しい事例であったが、本AWS予測では、こうした線状降水帯よりも小さいスケールの大雨も正確に捉えることができた。山形県や静岡県の線状降水帯も局地的な大雨であるが、高精度に予測することができた。

線状降水帯の2時間先予測に関して、SIPで開発した予測システムを用いて、線状降水帯形成初期の予測に対する有効性について検証した。本予測システムは、補外型の気象庁高解像度降水ナウキャストと数値予測を合成するブレンディング予測手法を採用しており、数値予測には気象庁の現業予報モデルよりも高解像度である雲解像数値モデルCReSS（水平解像度1km）を用いている。それにより、2時間先のブレンディング予測において、気象庁の速報版降水短時間予報よりも大きな重みを数値予測に割り当てていることが特徴である。もう一つの特徴は、予測された雨域の位置ズレによる積算雨量の過小評価を防ぐために、各格子点の雨量を周辺の最大値で置き換える最大値フィルターをそれぞれの予測に適用していることである。最大値フィルターの空間スケールは、過去の大雨事例に基づいて、ナウキャスト7km×7km四方、数値予測11km×11km四方としている。また、数値予測の初期値には、気象庁局地数値予報モデル（LFM）の予測値にXRAINの動径風と気象庁アメダスの風向・風速を同化したものを使用した。定量的な検証により、自治体による早期の避難意思決定に向けた本予測システムの優位性を実証することができた。

#### ④ 達成度（2）

##### サブテーマ1：線状降水帯の早期予測の高度化と利活用

開発した線状降水帯の自動検出技術は2021年暖候期から気象庁に実装された。4年次に開発し5年次に情報提供を行ったメソアンサンプル版半日前予測について、すべての自治体から「半日前予測は“気づき”で活用するが、その段階で、県以上の範囲に広く予測されると、緊迫感がない。メソアンサンプル版半日前予測で、県以下の絞り込みを行った上で、オレンジの楕円が集中的に表示されると、緊迫感があり、事前対応しようと思うきっかけとなった」、「情報の発表頻度は適切であった」との評価が得られた。一方で、線状降水帯情報は、警戒レベルと紐づいていないため、高齢者等避難や避難指示判断には直結せず、本情報もほとんど参考にしなかったとの意見もあった。今後も利用したいとの強い要望があった自治体には、「近年被災しており、様々な情報をもとに早めの避難を促している」

「常時大画面で本システムが表示されていた」との共通点があった。これらの成果より、常時表示できるシステムにプッシュ型配信システムを付加し、地域の絞り込み（空振り低減）を推進することが小～中規模の自治体に適した情報配信のあり方であることがわかった。警戒レベルと紐付けるためには当面は気象庁での実装が必要であり、今後は半日前予測精度の向上に貢献していくことになる。一方、警戒レベルに紐付かない情報の活用を検討する自治体には、民間気象会社や民間水蒸気観測網を有効活用した数時間先の予測精度向上をビジネスモデルの強化とともに実施していく必要がある。

気象庁に線状降水帯予測精度向上ワーキンググループが 2021 年に発足し、外部機関と連携しながら予測精度向上を図っている。本ワーキンググループに、本課題の代表者である、防災科学技術研究所の清水慎吾が委員として参加しており、SIP 後にもこれまで得られた知見を気象庁に提供することでフォローアップを継続する予定である。

#### サブテーマ 2：水蒸気・降水マルチセンシング技術開発

4 年次までに様々な水蒸気観測網を九州で整備し、予定通り観測体制が整った。4 年次以降、線状降水帯 2 時間先雨量予測を九州全域で高精度に実現する「クラウド観測・解析・配信システム」を完成させる見込みが立った。さらに防災科研から地デジ観測データをリアルタイムで面的な水蒸気分布に変換するデータ同化システムを日本アンテナへ移植する作業を着手し、ユーザーニーズに沿ったデータ提供を可能とした。地デジ観測について、九州における運用開始と試験的データ配信サービスに着手することで、1 年あたりのランニングコストを評価した。同時に災害時のみならず、リアルタイム水蒸気データの平時利用の可能性（不快指数算定への利用）を検討し、民間による事業化を行うための、確実な収益性を確保できるビジネスモデルを検討した。2022 年においては、気象庁の集中観測と連携し、リアルタイムでマイクロ波放射計と水蒸気ライダーのデータを提供し、予報現場において観測データが参考情報として活用された。SIP の観測網の整備完了と気象庁との連携について、プレス発表を行った。さらに、地デジ水蒸気観測のプロモーション動画作成を行い、販路拡大を進めた。SIP 終了後においては、日本アンテナにより地デジ水蒸気観測のデータ配信事業を継続する予定である。マイクロ波放射計については気象庁が 17 台導入し、水蒸気観測を継続すると考えられる。

#### サブテーマ 3：線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発

構築した線状降水帯の予測最大可能積算雨量に基づく避難エリア特定予測手法を、民間クラウド上の HPC 環境で実現する社会実装版プロトタイプシステムとして構築した。出力を 2 次元平面データに絞り込み、早期予測の成果を用いて計

算を抑制する機能を付加することで、事業継続性が担保できるシステムの低コスト運用方法（九州全域を3カ月運用することで1000万を下回ると試算）を明らかにした。全国で運用可能とするために、全国で利用可能な気象庁アメダス水蒸気観測データ等を同化可能なシステムに高度化を行った。2022年8月に発生した東北・北陸地方での線状降水帯の予測を行い全国で利用可能であることを実証した。SIPの成果を受け、気象庁の線状降水帯予測精度向上ワーキンググループにおいて、半日先と数時間先の予測をそれぞれ高度化させる2029年までの年次計画が策定され、それぞれ「日中避難の実現」と「直前避難の実現」の目標設定に繋がった。クラウドHPC環境における2時間先予測については日本気象協会による事業化を検討している。2029年には、気象庁が数時間先の雨量予測を市町村単位で予測する目標を策定したため、2029年までの限られた期間ではあるが、民間による線状降水帯の予測の実現をめざす。2023年度は九州地方での試験運用を実施し、その後、全国での運用を計画している。自治体からの収益には限度があるため、国民向けの配信を行うための改良を行い、日本気象協会の年間40億回の閲覧実績があるtenki.jpにて線状降水帯の予測情報の提供を計画している。tenki.jpは広告収入があり、その収入で運用できる計画である。

## ⑤ 知財戦略，国際標準化戦略，規制改革等の制度面の出口戦略

### サブテーマ1：線状降水帯の早期予測の高度化と利活用

計画立案当初の出口戦略として、「2030年までに気象庁「大雨特別警報級の大雨となる確率メッシュ情報」に線状降水帯の早期予測技術に関するSIPの成果を実装する」という目標に対して、計画を前倒しで2021年に自動検出法を気象庁に実装し、さらに2022年度に気象庁が運用を開始した「特別警報級の大雨となる確率メッシュ情報」にも成果を反映させるため、連携を継続している。気象庁への実装に規制改革は不要である。

### サブテーマ2：水蒸気・降水マルチセンシング技術開発

地デジ水蒸気観測は日本アンテナがフィールド実装及びデータ配信を事業化する。測器販売を想定せず、観測・解析データの配信事業を中心とし、クラウド戦略によるノウハウや技術の流出を防ぎつつ、全国展開に向けたコスト評価（必要な観測機器台数の把握、年間ランニングコスト）を行う。民間気象会社と連携した平時利用（熱中症予報アプリ）を進め、収益性を確保するビジネスモデルを構築する。

### サブテーマ3：線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発

線状降水帯の積算雨量予測に関する特許出願を行い、知財権を明確化した上で民間気象会社への技術移転を可能とさせる。民間クラウドコンピュータでの予

測の実現可能性を検証するための試作システムを構築し、そのベンチマークと運用コストを評価し、民間気象会社による事業化の実現可能性を検証し、全国広域展開を視野に、社会実装をめざす。民間気象会社の予報サービスにおいて規制改革を必要としない。

## ⑥ 成果の対外的発信

### サブテーマ1：線状降水帯の早期予測の高度化と利活用

令和2年7月豪雨等における本課題の観測・予測システムの紹介は、NHKスペシャルを含む、テレビ30件、新聞56件、ウェブニュース31件と、非常に多くの注目を集めた。プレス発表も2回行い自発的に対外的発信を行った。地デジ水蒸気観測のプロモーション動画作成を行い、販路拡大を進めた。2022年に国際放送であるNHKワールドJAPANがテーマ5の研究成果を英語で紹介する番組を作成し、国外へ情報発信を行った。

### サブテーマ2：水蒸気・降水マルチセンシング技術開発

令和2年7月豪雨等における本課題の観測・予測システムの紹介は、NHKスペシャルを含む、テレビ30件、新聞56件、ウェブニュース31件と、非常に多くの注目を集めた。プレス発表も2回行い自発的に対外的発信を行った。地デジ水蒸気観測のプロモーション動画作成を行い、販路拡大を進めた。2022年に国際放送であるNHKワールドJAPANがテーマ5の研究成果を英語で紹介する番組を作成し、国外へ情報発信を行った。

### サブテーマ3：線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発

令和2年7月豪雨等における本課題の観測・予測システムの紹介は、NHKスペシャルを含む、テレビ30件、新聞56件、ウェブニュース31件と、非常に多くの注目を集めた。プレス発表も2回行い自発的に対外的発信を行った。地デジ水蒸気観測のプロモーション動画作成を行い、販路拡大を進めた。2022年に国際放送であるNHKワールドJAPANがテーマ5の研究成果を英語で紹介する番組を作成し、国外へ情報発信を行った。

## ⑦ 国際的な取組・情報発信

### サブテーマ1：線状降水帯の早期予測の高度化と利活用

亜熱帯湿潤域（西日本）で梅雨期という、日本特有の環境場で線状降水帯が発生するため、国際的な情報発信や情報共有よりも、国内の情報発信を優先して行っている。最近の東京大学の研究で、線状降水帯が発生しやすい環境を全球モデルで調査した研究があるが、適した環境は、日本とマダガスカルの2か所（中緯度で、大陸の東側の洋上で、海流が暖流である）であり、日本特有の現象であるこ

とが分かってきた。

#### サブテーマ 2：水蒸気・降水マルチセンシング技術開発

亜熱帯湿潤域（西日本）で梅雨期という、日本特有の環境場で線状降水帯が発生するため、国際的な情報発信や情報共有よりも、国内の情報発信を優先して行っている。最近の東京大学の研究で、線状降水帯が発生しやすい環境を全球モデルで調査した研究があるが、適した環境は、日本とマダガスカルの 2 か所（中緯度で、大陸の東側の洋上で、海流が暖流である）であり、日本特有の現象であることが分かってきた。

#### サブテーマ 3：線状降水帯の高頻度積算雨量予測法の開発

亜熱帯湿潤域（西日本）で梅雨期という、日本特有の環境場で線状降水帯が発生するため、国際的な情報発信や情報共有よりも、国内の情報発信を優先して行っている。最近の東京大学の研究で、線状降水帯が発生しやすい環境を全球モデルで調査した研究があるが、適した環境は、日本とマダガスカルの 2 か所（中緯度で、大陸の東側の洋上で、海流が暖流である）であり、日本特有の現象であることが分かってきた。

## (5) テーマⅥ：スーパー台風被害予測システムの開発

### 1) 研究内容

関係機関の協力の下、気候変動により発生が懸念されるスーパー台風等による大規模水害時の大規模・広域避難等の適応策の構築のため、さまざまな観測データを利用し合理的なデータ処理を施すことで、スーパー台風の進路予測を用いた河川水位や高潮・高波、さらに氾濫エリアをリアルタイム予測するスーパー台風被害予測システムを開発する。本システムは、特にゼロメートル地帯での対策のために、長時間の河川水位を予測する機能や、被害を軽減するためのダムや水門を操作する機能も備えるものとする。また、本システムは、テーマⅠで開発する「避難・緊急活動支援統合システム」並びにテーマⅦで開発する「市町村災害対応統合システム」と有機的・統合的にシステム化することを前提として開発する。

### 2) 技術的目標

スーパー台風等による大規模水害時の大規模・広域避難を阻む最大の要因は、高潮・高波、河川水位や浸水発生の予測を、十分なリードタイムを確保しつつ実施できていないことにある。このため、長時間先の予測に伴う不確実性も考慮し避難判断に活用するため、アンサンブル台風・降雨量予測情報に、観測データを用いたデータ同化処理技術を組み合わせ、24時間先の河川水位予測技術、高潮・高波・浸水のピンポイント予測技術を開発する。

ダム管理の現場では、近年の雨の降り方の変化に伴い、異常洪水時防災操作など厳しい操作が増加しており、適切な予測に基づき利水容量の確保との調和を図りながら行う事前放流等の効果的な洪水時の操作が求められている。スーパー台風時においてもダムの容量を限界まで活用しダム下流の安全を確保することを可能とすべく、個別ダムや複数のダム群の放流操作を最適化するダム群連携最適操作シミュレータを開発する。

沿岸域及び河川中流域に多数設置されている水門・樋門・陸閘等は、目的・用途により施設の仕様や管理者も多岐にわたり異なっている。スーパー台風来襲時の動力源喪失等の最悪の条件下でも、確実に閉鎖できることを目的に、遠隔操作で水門等を閉鎖できるシステム及び水門の開閉状況を一元的に監視し多数の施設管理者間で確認できるシステムを開発する。

4年次は、高潮・高波ハザード予測システムについては、アンサンブル気象予報を用いた高潮・高波・越波量予測システムとリアルタイム高潮・高波浸水予測システムによる一連のプロトタイプシステム、越波・越流の自動画像監視システムとANN高潮・高波ハザード予測システムによる施設管理支援システムについて、実台風を対象とした継続的な検証及び社会実装を加速するための改良を進める。また2020年度に引き続き、川崎市での図上訓練を実施し、ユーザーニーズを踏まえたアンサンブル予測情報の活用方法と情報提供内容の改善を図る。プロトタ

イプ予測システムは、①見逃しゼロ（アンサンブル 27 メンバー⇒51 メンバー）、②リードタイムの確保（1 日 2 回提供⇒1 日 4 回提供）、③我が事に感じるリスク情報提供（最小解像度 3.3m⇒計算高速化）、④解析領域の拡大（大阪湾（瀬戸内海を含む）と東京湾の二つの解析モデルに伊勢湾・三河湾の解析モデルを追加構築）を達成目標とする。

河川・ダムの大規模洪水予測・防災支援システムについては、前線性豪雨も含めた長時間アンサンブル降雨予測システムの試行運用の継続と精度・スペックの検証・向上を行う。長時間/広域洪水予測システムでは、大規模出水時の防災行動の実態に沿った継続的なシステム改良を行うとともに、全国版 RRI モデルの精度向上を図る。統合ダム防災支援システムでは、ダムの最適事前放流予測モデル、ダム群連携最適操作シミュレータのプロトタイプを試行運用と改良を行うとともに実装版の構築を進め、長時間アンサンブル降雨予測情報を適用するダム操作ルールを立案し、被害の最小化を実現するシステムの構築を目指す。特に、電力会社等民間企業のマッチングファンドも活用して、事前放流による水位低下時の発電エネルギー利用の最大化のための早期かつ段階的な事前放流手法を検討するとともに、1 週間程度先までの洪水の発生の有無を見通した上で、平常時の水力発電計画における水力発電価値の最大化と防災効果の最大化を実現する手法の検討を行い、発電ダムの利水と治水のシームレスな結合を目指す。

危機管理型水門管理システムについては、水門陸閘等の一元監視システムについて、異なる管理者の水門等開閉状況を一元監視するための統一通信フォーマットを作成し、これが既存ガイドライン等において利用されることを目指す。また、統一通信フォーマットで収集した水門等開閉情報を一元表示するシステムを Web 上に構築、運用し、管理者等からの意見聴取を踏まえて機能要件等を整理するとともに、水門等の開閉状況の検知センサーの改良や、通信に関する機能・要件等について整理する。なお、水門開閉状況等の画像認識技術については、現場ニーズに対応した技術の現場実証と改善等を行い、導入ガイドライン作成につなげる。

水門の自重降下システムについては、関係行政機関との協議の下で、導入のためのガイドライン等の改定に必要な検討を行う。

最終年次は、高潮・高波ハザード予測システムについては、水防法における高潮水防警報の的確な発令に資するよう、波浪のうちあげ高簡易観測機器、うちあげ高予測システム、高潮・高波予測システムの社会実装・運用を行うとともに、浸水予測システム、ハザード予測システムに関する標準仕様・ガイドラインの検討を行う。

河川・ダムの大規模洪水予測・防災支援システムの長時間洪水予測システムについては、アンサンブル予測雨量を活用した洪水予測、不確実性が伴う予測結果の活用方法及び中小河川を対象とする洪水予測手法の社会実装を行うとともに、洪水予測・活用方法に関する標準仕様・ガイドラインの検討を行う。統合ダム防

災支援システムについては、ダム操作のための長時間アンサンブル降雨予測システムの開発・実装、ダム最適事前放流予測モデルを組み込んだダム群連携最適操作シミュレータの社会実装と普及方策（標準仕様・ガイドライン）の検討を行う。

危機管理型水門管理システムに関しては、前年度までに実施した現場実証の結果を受けてシステムの改良を行う。危機管理型水門の普及促進を図るため、水門や設備に関する標準仕様・ガイドラインの検討を行う。

### 3) 課題目標の達成度

#### ① 国際競争力

三大湾においてメンバー数 51 個、132 時間先のアンサンブル高潮・高波予測を実施する。大河川においては最大メンバー数 51 個、120 時間先までのアンサンブル水位予測を行う。広域洪水予測では 150m 分解能で日本全国の中小河川の流量・水位を 1 時間ごとに 6 時間先まで提供する。ダム操作へのアンサンブル降雨予測情報に関しては、メンバー数 51 個、解像度 1 時間、1km の 15 日予測を用いて事前放流及び複数ダムの統合操作を目標とし、世界的にも類がない。日本の河川流域を考慮すれば、時空間高解像度の必要性・優位性は明確である。水門一元監視システムで用いる LPWA 衛星通信ネットワークは独自の発想であり比較対象がない。

#### サブテーマ 1：高潮・高波ハザード予測システムの開発

波浪・潮位・越波・浸水に関する予測情報のインターネット公開状況を確認し、我が事に感じるリスク情報の最小解像度、見逃しゼロの観点からアンサンブルメンバー数、リードタイムの確保の観点から予測先時間を定量指標として設定し、それぞれ順位付けした結果、全ての項目で上位となり、開発技術の国際的な優位性を確認した。

#### サブテーマ 2：河川・ダムの長時間洪水予測・防災支援システムの開発

①長時間洪水予測は大河川において最大 51 メンバー、120 時間先までのアンサンブル水位予測を行い、広域洪水予測は、150m メッシュで国内の全ての河川で、1 時間ごとに 6 時間先までの流量と水位を予測する。こうした洪水予測情報の提供は、世界的に最も高解像度・高頻度な予測システムである。

②ダム操作へのアンサンブル降雨予測情報は、長時間(15 日)、アンサンブル(51 メンバー)、時空間高解像度(1 時間、1km)のダム流入量の予測情報を利用して複数ダムの統合操作までを可能としており、日本のダム流域の山岳地形を考慮すれば、時空間高解像度の必要性・優位性は明確であり、ASEAN 諸国への国際展開も期待できる。

### サブテーマ3：危機管理型水門管理システムの開発

LPWAを使った衛星通信ネットワークによる水門開閉状況等の情報収集技術は、大規模停電時を想定して、平常時にゲートウェイ（GW）として使っている装置を停電時に動作を切り替えて衛星通信の送信機としても利用するというユニークなものであり、比較対象となる技術を実装したシステムは存在しない。なお、通信方式には世界で広く使われているLoRAWANの使用が可能である。また、本研究で通信フォーマットを標準化しており、広域的な一元監視を容易に導入できる利点がある。その他、電源喪失等の危機的状況下でもLPWA通信を使って遠隔から確実に水門を閉鎖する水門自重閉鎖システムについても、これまで実用化されていない。

## ② 研究成果で期待される波及効果

SIPで開発した技術を用いて日本気象協会が「ダム の 事前放流判断支援サービス」を開始し市場創出を実現した。また、広域洪水予測システムは国が利用する洪水予測システムとして検討が開始され、都道府県でも広域洪水予測システムを採用した予測システムの開発が進められている。事前放流とダム群の連携操作によりダム の 洪水調節機能を最大限発揮させる技術は、治水だけでなく発電量を増加させることができ、更なる展開が期待できる。予測情報が持つ諸元の優位性は明確でありアセアン諸国への展開が期待できる。水門自重閉鎖システムは、更新期を迎える大量の水門施設に対して災害対応力向上の機能追加という新たな市場の創出が期待される。

### サブテーマ1：高潮・高波ハザード予測システムの開発

将来的に気候変動の影響による海面上昇や台風の強大化が予測されており、人口や資産が集中する沿岸域においては、今後さらに迅速かつ的確な防災行動が求められる。

本研究成果により「見逃しゼロ」、「リードタイムの確保」、「我が事に感じるリスク情報」としての台風予測情報を自治体や住民等にいち早く提供することで、人的損失ゼロ、浸水被害軽減の実現を目指しており、温暖化や安全安心等への社会的貢献が期待できる。

### サブテーマ2：河川・ダム の 長時間洪水予測・防災支援システムの開発

①長時間/広域洪水予測を用いた、長時間又は広域的な洪水発生 の 予測手法は「逃げ遅れゼロ」及び「社会経済被害最小化」の実現に大きく貢献する。

②個別ダム の 事前放流とダム群の連携操作によりダム の 洪水調節機能を最大限発揮させる技術は、治水だけでなく発電量を増加させることができる。

これらのSIPで開発された技術を用いて日本気象協会が「ダム の 事前放流判断

支援サービス」を開始し、市場創出を実現している。

### サブテーマ3：危機管理型水門管理システムの開発

水門自重閉鎖システムは、更新期を迎える大量の水門施設に対して災害対応力向上の機能追加という新たな市場の創出が期待される。この技術は災害から住民を守ることに同時に、操作員を危険から守ることに繋がるものである。LPWAに対応した統一通信フォーマットは、スマートシティ構想と連携することで幅広い使い方が期待される。衛星通信技術は、低軌道衛星を利用するユーザーの裾野を広げるものであり発展性がある。

## ③ 達成度 (1)

### サブテーマ1：高潮・高波ハザード予測システムの開発

うちあげ高簡易観測機器の開発に関して、4年次までに、兵庫県西宮市の動画カメラに加えて、新たに川崎市港湾局管内に現地適用試験を目的とした動画カメラを設置した。最終年度は、兵庫県西宮市及び神奈川県川崎市で現地適用試験を行ったが、台風の上陸が無く解析に適する動画を得られなかったため、令和元年度台風19号等のCCTV動画を用いて、動画解析及び判定技術向上のための検討を行った。

波のうちあげ高予測手法の開発に関して、4年次までに、現場ニーズに応じた複数のモニタリングシステムの提案も念頭に、令和元年台風19号の越波動画素材を対象とし、既存の簡易的な手法を用いた越波検知解析を行い、検知率を検証するとともに課題等を整理した。最終年度は、昨年度構築した越波量算定モデルについて、2022年度実台風による検証を行った結果、有意な越波量の発生は予測されなかったことから、今後のANNを活用した沿岸域ハザードの早期予測技術との連携運用も念頭に、川崎市の代表地点を対象とした波の打上げ高予測モデルをシステムに組み込み実績台風による試行計算を行った。また、2022年台風第8号が関東地方に接近した際の予測データを用いて波の打ち上げ高の検証計算を行った。

高潮浸水危険度予測技術の開発に関して、4年次までに、実台風を対象としたアンサンブル事前予測情報提供の整理、川崎市水害図上訓練等を通じた社会実装先のニーズ等の整理を踏まえ、沿岸の越波危険度を可視化した表示システムを構築した。最終年度は、2022年に日本に接近した10台風（第1, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 14, 15, 18号）を対象に三大湾における高潮・波浪リアルタイム予測計算結果を用いた実証実験を実施した。また、昨年度に引き続き、川崎市水害図上訓練の一環として、社会実装先のニーズ把握、予測情報の改善及び活用リテラシーの向上を目的に、SIP高潮高波予測システム研修を実施した。さらに、三大湾において潮位・波浪のピンポイント予測システムとの連携による越波量計

算プログラムの実台風による動作検証と試行運用を行うとともに、ユーザーニーズに応じた高潮浸水危険度予測情報の提供を図るため、沿岸アラート情報の表示システムを検証した。

アンサンブル予測値を基にして、スーパー台風が最悪の高潮・高波をもたらすことが予想される台風経路を求める手法の開発に関して、4年次までに、予測回数やメンバー数の増強を図るとともに、現地実証実験を実施し、その結果を踏まえた手法の改良を行った。最終年度は、アンサンブル予測値を用いた気象予測情報の作成については、週間アンサンブルの高解像度化(格子間隔約60km→約40km)に対応するとともに、10台風(第1,4,5,6,8,11,12,14,15,18号)を対象に、1日4回の現地実証実験を行った。

潮位・波浪のピンポイント予測システムの開発に関して、4年次までに、高潮・高波予測については、簡易計算の範囲拡大、伊勢湾・三河湾の追加及びメンバー数と予測回数の増強を行い、プロトタイプシステムを改修した。また、プロトタイプシステムを用いて2021年に日本に接近した8台風(5,8,9,10,12,14,16,20号)を対象にリアルタイムの現地実証実験を行い、その結果を踏まえた問題点の改良及び情報の提供方法の検討を行った。最終年度は、AWSを予測計算に用いることによりリアルタイム予測の高速化を行うとともに、社会実装先への情報提供方法の改良を行い、10台風(第1,4,5,6,8,11,12,14,15,18号)を対象に、1日4回の現地実証実験を行った。さらに、荒川水系を対象に河川・ダム流出予測システムとの連携を行った。

実測値を活用した高潮・高波の予測値を高精度化する手法の開発に関して、4年次までに、実測値による高潮・高波予測の高度化については、データ同化後天文潮位を用いた現地実証実験を行った。また、新規追加海域(伊勢湾・三河湾)の高潮予測について、2020年度までに検討した手法の適用性を検討した。さらに、プロトタイプシステムを用いて2021年に日本に接近した8台風(5,8,9,10,12,14,16,20号)を対象にリアルタイムの現地実証実験を行い、その結果を踏まえた問題点の改良及び情報の提供方法の検討を行った。最終年度は、潮汐モデルで計算した2022年1年間の天文潮位を最適内挿法を用いたデータ同化により高精度化し、10台風(第1,4,5,6,8,11,12,14,15,18号)を対象に、現地実証実験を実施した。

高潮の河川遡上も考慮した浸水予測モデルの開発に関して、4年次までに、高潮の河川遡上及び越波量のアンサンブル予測を考慮した浸水予測モデルを開発した。また、スーパーコンピューターで最適化を進め、リアルタイム予測が可能となる計算速度を達成した。さらに、多様な社会実装の形態を考慮した最適化、非専門家による運用を見越したシステムのパッケージ化に着手した。最終年度は、TUNAMI-surgeシステムに関して、入力となる越波越流データ更新の検知とダウンロード、ソルバーの起動と監視、結果の可視化とSIP4Dへのアップロードを行う

ため、ジョブ制御兼可視化サーバの機能を開発した。その物理的実体は、ローカルの Linux システムあるいは AWS-EC の管理ノードを想定し、ジョブ制御デーモンと入力デーモンを常駐させる。計算サーバの実体は小規模クラスター又は AWS-EC の計算ノードで、ソルバーを実行し計算結果をジョブ制御兼可視化サーバに転送する。各デーモンの起動・停止と処理状況のログ出力機能、システム制御に用いる環境変数の設定機能も整備し、実運用における利便性を確保した。さらに、システムの頑健性を向上させるため、複数のジョブ制御兼可視化サーバによる冗長化を可能とする機能も開発した。冗長化システムは2つ（プライマリ、セカンダリ）又は3つ（プライマリ、セカンダリ、ターシャリ）のジョブ制御兼可視化サーバで構成され、プライマリサーバの状態を他のサーバが常時監視する。プライマリサーバが災害などによりダウンした場合、セカンダリ又はターシャリサーバが解析を実行する。また、社会実装時の運用環境の候補である小規模クラスターとクラウドコンピューティング環境を対象に、TUNAMI-surge システムのさらなる高速化を行った。計算コードについては、メモリ転送の削減、配列アクセスの最適化、重複する処理の除去、ループ組み換え、スレッド並列の適用を行った。さらに、非商用コンパイラ gfortran では、運動方程式中の非整数べき乗の計算が極めて遅いことが問題として明らかになったため、ニュートン法による反復計算で近似値を求める手法を導入して高速化し、非整数べき乗の計算にかかる時間を約 40%に短縮した。これらの最適化により、格子点数 4300x4474 で物理時間 3600 秒の計算を、小規模クラスター（最大 40 並列）は最短で約 1500 秒、AWS-EC（最大 576 並列）は同じく最短で約 260 秒で完了できる性能を達成した。数値計算においては、不正なデータの入力等を原因として計算が発散あるいは意図せずに終了する可能性がある。また、機能追加などのためプログラムに修正を加えた場合も、実装上の問題等により異常終了やハングアップが発生する可能性がある。そこで、実運用時に専門知識を持つ技術者でなくとも TUNAMI-surge システムの状態を適切に把握し対応できるようにするため、計算が正常に実行されているかどうかを検知・通知する機能を実装した。これは、システムの処理待ち時間にタイムアウトを設定し、計算開始後一定時間経過しても正常終了しない場合に異常が発生したと判断し、システムを正常状態に復帰させるものである。また、システムに「訓練モード」の機能を追加した。これを用いることで、データサイトからダウンロードした潮位データに補正を加えて越波越流が発生した状態を模擬するもので、オリジナルの実データでは浸水が発生する可能性がない場合でも、システムを動作させ浸水計算が実行されることを確認できる。TUNAMI-surge システムの完全自動化・パッケージ化と合わせ、小規模クラスター及び AWS-EC にインストールしたシステムで試験予測を実施した。外部データ更新検知・ダウンロードから計算結果の SIP4D へのアップロードまで一連の処理が安定的に実行され、完成したシステムが意図した通りに動作することを確認することができた。浸水予測システム

の機能を向上させるため、川崎市の防災担当者を対象とする聞き取りを行った。それによれば、海岸施設の防潮扉は設置主体が様々であり、防潮扉の開放又は閉鎖によって浸水状況がどのように異なるかを予測することは、実台風の際に管理者が開放・閉鎖の判断を下す上で有益であることが判明した。そこで、TUNAMI-surge システムに防潮扉の設定及び開閉機能を実装した。本システムでは、堤防は陸海境界に自動生成される。この堤防に対し、外部で作成した座標データに基づき、防潮扉を設定する。しかし、座標データの作成精度によっては堤防と防潮扉の位置にずれが生じることが考えられるため、防潮扉座標データに対する最寄りの堤防区間を自動で探索し、該当区間を防潮扉に設定するものとした。防潮扉を開放した場合の浸水予測では、閉鎖した場合よりも浸水箇所が増え、浸水深も増大することを確認している。また、実運用時の TUNAMI-surge システムの運用訓練や、実台風時にシステムを稼働させている際のサーバ監視のため、小規模クラスタ及びクラウドコンピューティング環境で完全自動化された TUNAMI-surge システムを遠隔から操作できるコンソールアプリを開発した。このアプリは、Excel VBA と Windows OpenSSH を用いたもので、Excel 2019 がインストールされている Windows10 で動作し、入力データ更新、環境設定、解析の開始・中止を操作できる。コンソール上では計算ジョブの状態及びシステムの実行状況のログをリアルタイムでモニタリングできる。また、計算結果確認のため、メンバごとの浸水深やスナップショットを表示できる。

ANN を活用した沿岸域ハザードの早期予測技術の開発に関して、4 年次までに任意時刻における台風の観測値及び予報値に基づき来襲する台風の経路及び中心気圧を無数に生成し、ANN を活用した高速高潮推算モデルを構築し、これらを組み合わせて任意地点におけるハザードを再現確率別に推定するシステムを構築した。さらにこのモデルを実装対象地点である川崎港に適用してその妥当性を検証した。最終年度は、高潮偏差確率予測システムにおいて、フローを整理し、計算フロー及びその結果を可視化して出力するフローを自動化したシステムをパッケージとしてまとめた。また、構築したパッケージをノート PC に実装し、python の環境下で全ての計算を実施できるように構成した。このシステムを用いて、2019 年台風 19 号に適用し、その動作確認を行った。1000 個の生成台風に対して高速に高潮偏差を計算し、計算された時々刻々の高潮偏差を確率別に求めて可視化して出力するまでのフローを自動で実施するシステムが問題なく動作していることを確認した。ノート PC の環境で、一連の計算が 10 分程度で実施することができた。さらに、高速計算された高潮偏差 (LSTM) の超過確率分布が物理モデルに基づくそれとよく一致することが確認され、モデル及びシステムの妥当性も検証できた。そして、構築したモデルの概要及び計算フローを川崎市に説明し、実際に活用する際の課題についてフィードバックを得た。

## サブテーマ 2：河川・ダムの大時間洪水予測・防災支援システムの開発

大時間/広域洪水予測システム開発に関して、4 年次までに、流域における降雨流出・氾濫を計算する RRI モデルと河川の水位を計算する次元不定流河道モデルを連携させ、現象を適切に反映できる大時間洪水予測モデルを開発した。また、メソ 2 種類のアンサンブル予測システム (MEPS) 及び全球モデル (GSM) による予測降雨を用いて、120 時間先までの大時間洪水予測ができるようシステムモデルの改良を図った。そして、洪水予測結果を WEB 表示できる試行版を作成した。さらに、全国の中小河川を含む広域洪水予測システムのプロトタイプ版を開発し、毎時刻 6 時間先までの河川流量と水位を予測するシステムの開発を進めた。全国約 120 のダムを対象に治水操作のモデル化を行い、広域洪水予測システムに反映した。また、水文水質データベースに登録されている全ての観測水文観測地点を対象に同システムの洪水予測精度を検証した。全国約 26,000 の計測断面情報を用いて、地域毎に集水面積と河道断面積の関係を分析し、計測情報の無い河川における断面の推定法を提案した。水文地形データの広域洪水予測システムへの反映が完了し、またエラー修正とデータ更新の流れも確立され、データの継続的なメンテナンスが可能になった。標高・水域・河道断面・ダム情報など、これまで個別に管理されていた地理情報を河川氾濫モデルで利用可能な形式で統合した水文地形データを構築することで、中小河川を含む日本全域を対象にした水位と浸水域のモデル予測を実現した。詳細な雨水流動モデルとの比較に基づく降雨流出モデルの不確実性に関する分析を行い、流量流積関係式を基礎とする降雨流出モデルの不確実性の程度と流出計算性能を評価した。また、前年度に開発したプロトタイプをベースに、飽和不飽和流と地表流を考慮した降雨流出モデルを開発した。

最終年度は、GEPS による 51 メンバーの予測降雨を用いて 120 時間先までの河川水位を予測するシステムに改良した。また、潮位の影響を受ける下流部の水位予測精度を向上させるため、高潮ガイダンスによる 39 時間先までの予測潮位に加え、天文潮位に潮位偏差を考慮した潮位を 120 時間先まで入力できるようにした。なお、サブテーマ 1 の「高潮・高波ハザード予測システム」による潮位予測結果と連結した計算ができることも確認できた。また、視認性が高く、予測結果を理解しやすいようにするため、各メンバーの河川水位予測結果をそのまま示すのではなく、パーセンタイル表示で色分けを行った。この結果、予測の最高値やばらつきが一目でわかるように改善された。あわせて、アンサンブル予測降雨の時空間分布を表示できるようシステムの改良を行うとともに、操作性向上のためにアンサンブル水位予測の幅表示に加え、河川及びダムの地図上への表示、画面操作レイアウトの変更等細部の改良を行った。そして、日本全国を 14 の領域に分けたうえで、空間解像度約 150 m で全ての中小河川を予測の対象とする広域洪水予測システムを開発した。最終年度は、表示システムを改良し、観測水位と計

算水位を直接比較できるよう、計算水位の高さ補正情報を読み込んで調整した。また、水位観測地点においては、洪水の危険度を示す指標（氾濫危険水位など）を表示できるように改良した。さらに、計算時間を短縮し、6時間先までの水位予測をなるべく完了させるように計算時間の短縮化を進めた。具体的には国管理河川の水系毎に予測計算を進めたうえで、結果を統合する方法を採用した。これにより、計算の並列化が効率的に行えるため、予測のリードタイムを長く取ることができるようになった。全国版 RRI モデルに関しては、国土交通省・水資源機構が管理する 121 のダム流域の洪水データを用いて、土壌分布に応じてパラメータを設定する方法を考案・適用した。これにより、黒ぼく土や褐色森林土など、土壌特性の違いによる洪水流出特性の違いを全国版 RRI モデルで反映できるようになった。モデルの精度は、全国 711 地点（2734 出水）で検証し、ピークの相対誤差は $-0.09$ （ $-0.28 \sim 0.13$ ）、Nash 指標は  $0.87$ （ $0.77 \sim 0.93$ ）となった。検証の対象としている全国の水位観測地点はパラメータ同定に用いた地点とは異なるため、観測情報の存在していない河道区間の推定精度とみなすことができ、全国版 RRI モデルの頑健性と再現性が確認された。また、全国版 RRI モデルの水位予測精度向上を目的として、国が直接管理する河道区間（直轄区間）の河道断面情報を整理し、約 26,000 断面の情報を RRI モデルに反映した。反映した約 26,000 の断面データを用いて、集水面積と河道断面積との関係を地域毎に分析した。その結果に基づいて、断面の計測情報が存在しない中小河川における河道断面積（及び、その川幅や最大水深）を推定する方法を提案し、全国版 RRI モデルに反映させた。この方法はクリーガ曲線の計上に基づいて集水面積に応じた河積を推定する新たな方法であり、そのパラメータを地域ごとに設定することによって、観測断面の情報が存在しない中小河川の河積（それに応じた川幅と深さ）を推定できるようになった。また、多数の河道断面情報を広域の降雨流出氾濫モデルに反映させるためのアルゴリズムを整理した。河道断面の的確な反映は広域での浸水推定精度にとっても重要であり、関東地方全体を対象にした 2019 年台風 19 号による洪水解析を通して、その効果を検証した。そして、リアルタイムで運用する広域洪水予測システムの解析結果を初期値と、気象庁による 21 メンバー、39 時間先のメソアンサンブル予報システム (MEPS) を入力とする、長時間のアンサンブル洪水予測システムを開発した。このシステムは、マイクロソフト社の Azure というクラウドシステム上で実装し、台風襲来が予見されたときのみ、地域を選択して、アンサンブル洪水予測を実行できる仕組みとなっている。4・5 年次は、結果を解析するような大型台風の襲来は無かったものの、同システムが適切に稼働するよういくつかのイベントで洪水予測実験を行った。具体的には、2020 年 7 月の九州球磨川豪雨を対象にして解析を実施した。その結果、アンサンブル平均では人吉地点の水位を過小評価するものの、21 メンバーのうち最悪シナリオのメンバーについては実際に発生した水位と同等の結果を示すことが分

かった。水文地形データの整備に関しては、水文地形データを河川洪水予測に継続的に活用していくために、データの継続管理手法を検討・確立した。本プロジェクトで開発した日本域表面流向データは、標高データや水面データをもとに自動計算によって河道網を抽出しているため、標高データの誤差や水面データの未整備によって河川ネットワークが適切に表現できない箇所が、特に小河川や都市域の複雑な水路網において発生しうる。日本域表面流向データはSIPプロジェクトでの活用のほかに、水文・水質などの研究を推進するために無償公開しており、ユーザーから河道網の間違い情報などが報告されている。また河川改修などにより現実の流路網が変更されるケースがある。洪水予測の精度を高めるには、表面流行情報を常にアップデートしていく必要がある。そこで、SIPプロジェクト終了後も継続的なデータメンテナンスを可能にするために、表面流向データの修正方法の手続きを整理した。表面流向にエラーが見つかった場合、河川のネットワーク構造を示すデータという特性上、問題のある範囲のみを手作業で修正するのでは不十分で、流域全体で再計算を行ってデータレイヤー間の整合性を保つ必要がある。そこで、河道網エラーの確認、エラーの原因特定、地形補正をすべきピクセルの特定、表面流向データのアップデートという一連の手順を整理した。エラーの要因については、標高データや水面データの誤差といった多様なケースに対応できるように、マニュアルとコードを整備した。これにより、表面流向データのアップデート作業にかかる時間が大幅に短縮され、データ継続管理の目処が立った。降雨流出モデルの不確実性の分析に関しては、詳細な雨水流動モデルとの比較に基づく降雨流出モデルの不確実性に関する分析を行い、流量流積関係式を基礎とする降雨流出モデルの不確実性の程度と流出計算性能を評価した。また、前年度に開発したプロトタイプをベースに、飽和不飽和流と地表流を考慮した降雨流出モデルを開発した。

統合ダム防災支援システムの開発に関して、4年次までに高梁川水系新成羽川ダム、荒川水系を対象にアンサンブル降雨予測システムのプロトタイプのリアルタイム運用を継続した。また、全国の多数のダム管理者等を対象に有償サービスを継続した。時間帯別に上位・中位・下位を計算し表示する機能をプロトタイプシステムに組み込んだ。発電ダムを対象とした長時間アンサンブルの過去データ検証とプロトタイプシステムの運用を行った。アンサンブル予測情報を考慮した事前放流について、高梁川水系新成羽川ダムを対象に、R3年8月豪雨を対象に実施判断の検討と、早期に事前放流を開始するメリットについての検討を行った。得られた成果として、新成羽川ダムでは、2021年台風第9号、その先の前線性降雨を同時に予測可能であることを確認した。大井川水系の3ダム連携による事前放流検討については、解析にはRRIモデルを使用し、2018年台風第24号における実績雨量と当時のJWAアンサンブル予測から、大井川における50年確率雨量と同程度の降雨波形を3つ作成して解析した。事前放流の開始時刻を洪水の3日

前と7日前、事前放流の目標水位をダムの最低水位と50%水位の2種類設定し、事前放流無しも含めて複数のダム操作を行った。各操作を治水面として各ダムのピーク放流量、利水面として畑薙第一ダムと井川ダムの無効放流量の変化を評価対象として比較・検討した結果、事前放流をしない場合よりも、空き容量を効果的に確保したことで合計無効放流量を約10%低減し、増電に貢献することを確認した。ダム群連携最適操作シミュレータについて、関係機関等との調整を図りつつ、淀川水系木津川ダム群の降雨の変化、ダム貯水位、下流河川の変化等を考慮しながら実施するダム操作の膨大な組合せの中から最適な操作を導き出す高速演算等に係る技術に適用したダム群連携最適操作シミュレータについて、試行運用の結果を踏まえて、3ダムから5ダムに拡張した形で構築した。5ダムによる運用は2022年度より実施。また、荒川上流ダム群においてもアンサンブル降雨予測を取り入れた連携操作支援システムを構築した。2022年度より試行運用を開始する。これらの構築により、シミュレータの基本機能・要求性能の仕様を確定した。

最終年度は、長時間アンサンブル降雨予測システムは、高梁川水系及び荒川水系、発電ダムなどでプロトタイプの試行運用を継続するとともにシステムの改善、予測精度に関する検証を実施した。最適事前放流予測モデルは、プロトタイプを構築している高梁川水系新成羽川ダム、猪名川水系一庫ダム等について引き続き試行運用を行い、モデル改良を進めた。アンサンブル降雨予測を考慮した利水ダム（発電ダム）の高度運用手法の検討を行った。さらに、河川に縦断に設置される上下流ダム（治水・利水ダム）の連携操作を考慮して、防災操作（治水協力）と再エネ運用（水力価値向上）についてシミュレーションを行い検証した。また、長時間アンサンブル予測を用いた多目的ダムの洪水調節後の後期放流についても検討を行った。ダム群連携操作シミュレータは、木津川ダム群・荒川上流ダム群でのプロトタイプの試行・改良を進めるとともに、荒川水系におけるリアルタイムデータ連携による全体最適を目指すシステム検討した。また、長時間アンサンブル降雨予測情報をダムの防災効果に適用するため、リスクと責任論を整理した上での、洪水の一気通貫の放流操作ルールを検討する。電力会社等民間企業のマッチングファンドも活用して、事前放流による水位低下時の発電エネルギー利用の最大化のための早期かつ段階的な事前放流手法を検討するとともに、1週間程度先までの洪水の発生の有無を見通した上で、平常時の水力発電計画における水力発電価値の最大化と防災効果の最大化を実現する手法の検討を行い、発電ダムの利水と治水のシームレスな結合の検証を実施した。

### サブテーマ3：危機管理型水門管理システムの開発

4年次までに遠隔監視・操作の通信技術としてLPWA（LoRaWAN）通信技術を採用したシステム構築について検討するとともに、管理者が異なる水門等の開閉状

況を統一通信フォーマットにより一元監視するプロトタイプシステムを構築した。実現場施設でのプロトタイプの実証実験（LPWA 通信による水門等開閉情報収集及び遠隔自重降下機能の実証試験）を継続・拡大し、一元監視及び遠隔自重閉鎖システムの安定性、確実性を検証した。また、システム導入ガイドライン（素案）について管理者等にヒアリングし課題の把握を行った。ワイヤロープウインチ式の大形水門に無動力遠隔自重降下機能を追加する検討を行い、改造試設計を実施した。水門作動状況を監視するための動体認識ソフトの試作と適用性の調査を行い、水門の開閉判別が可能であることや人検知技術の選定評価手法の知見等を得た。また、水門操作時の情報である流向の解析ソフトの試作と適用性を検証した。衛星利用を想定して、市場に流通する民生 LPWA 通信デバイスの宇宙環境試験結果に基づいて、衛星搭載受信機の実証用ボードを製作し、宇宙環境試験を実施した。また、衛星向け中継地上局の実証用ボードを製作し、実証試験の準備を整えた。

最終年度は、遠隔監視・操作の通信技術として LPWA（LoRaWAN）通信技術を採用して管理者が異なる水門等の開閉状況を統一通信フォーマットにより一元監視するプロトタイプシステムを構築し、川崎市・愛知県・大阪府等対象施設を拡大し実施した。実現場施設でのプロトタイプの LPWA 通信による水門等開閉情報収集及び遠隔自重降下機能の実証試験を継続し、一元監視及び遠隔自重降下機能の安定性、確実性を検証した。無動力遠隔自重閉鎖システムの改造設計ガイドライン（素案）について、実証実験及び大形水門の改造試設計の結果並びに施設管理者等へのヒアリングを踏まえて内容の精査を行った。水門等作動状況の監視では開閉判別の精度向上が可能であること、人検知技術では導入の手引きを取りまとめた。また、水門操作時の情報である流向の解析ソフトの判断精度の検証、精度向上手法の検討を実施した。衛星利用を想定して、衛星向け中継地上局を設計開発するとともに、市場に流通する民生 LPWA 通信デバイスの宇宙環境試験結果に基づいて、衛星搭載受信機を製作し宇宙環境試験を実施した。

#### ④ 達成度 (2)

サブテーマ 1：高潮・高波ハザード予測システムの開発

出口戦略として検討・整理すべき事項は、①法制度改正、②システムの運営主体、③知財、であるが、全ての出口戦略検討の基本となる①法制度の枠組み、②システムの運営主体について、国土交通省と継続的な協議を継続した。

具体的に、河川の洪水予測の枠組に習い法制度を構築することが現実的な対応の方向性であることを、所管省庁（国土交通省）の担当者レベルでは確認した。今年度は、運用主体として想定している国土交通省（担当者レベル）と具体的な意見交換と調整を進めた結果、社会実装の実現に向けて、①予測精度の検証、②予測情報の活用リテラシー、③法改正等制度設計に係わる課題を明らかにした。今

後は、予測技術確立後、ユーザーに混乱を引き起こさないように上記①②③を進めていくとともに、活用実績の積み上げ、SIP後のシステム暫定運用の調整を進めていく予定である。

なお、国によるシステム運用と情報提供の実現に向けた現実的な取り組み促進を目指し、SIP期間内をフェーズⅠ（技術確立段階）、SIP後をフェーズⅡ（フォローアップ段階）、フェーズⅢ（社会実装段階）の3つの段階的な目標を設定し、最終年度となるSIP期間内（フェーズⅠ）については、活用実績の蓄積（⇒R4年台風での有用性の確認）と活用普及展開（⇒導入に向けての技術仕様書の作成）を行った。SIP後の本格運用（フェーズⅢ）前に、暫定運用であるフェーズⅡ（フォローアップ期間）を設け、段階的に情報提供の社会実装を進めていく必要がある。

#### サブテーマ2：河川・ダムの大時間洪水予測・防災支援システムの開発

長時間/広域洪水予測システムの開発については、江東五区広域避難推進協議会において、荒川における2種類の長時間アンサンブル洪水予測情報は、非常に重要かつ有用な情報であるとの認識のもと、具体のオペレーションにどのように活かすのかの検討を行うこととなった。また、鉄道機関から他の河川でも長時間先の洪水予測ができないのかとの要望も受けた。今後、時間とともに予測結果が更新されていく2種類のアンサンブル洪水予測結果が有する特徴を理解したうえでタイムライン上の活用の仕方が検討・整理されることで、名実ともに社会実装となり、円滑な広域避難などの防災行動・避難行動に資することとなる。全国の中で最も広域避難の円滑な実施が難しいとされる首都圏荒川の下流域で具体的な検討・整理のステージにまで進んだ。長時間アンサンブル洪水予測システムについて説明した協議会には、内閣府や東京都も参加しており、類似の課題を抱える他地域でも同様の展開が期待される。

また、河川堤防の高さを考慮して流域と河道とで流出降雨を適切に処理することができる長時間アンサンブル洪水予測プログラムとその計算結果を分かりやすく表示できるシステムについては、令和5年3月に国土交通省でまとめられた「洪水予測モデルの運用方針の検討や今後の洪水時の危険性の伝え方に関する検討事項」に記載されており、全国の地方整備局に行き渡っている。現在、国の一部の河川で、84時間先までの洪水予測をアンサンブル予測降雨を用いて行う検討がなされている。こうした河川をはじめとして、長時間先の洪水予測を実施する河川ではSIPで開発した技術が活用されていくことが期待される。

広域洪水予測システムの結果をSIP4DやIDR4M等でも活用できるようテーマ1, 2, 6にもリアルタイムで共有した。そのほか、国土交通省が手掛ける先端的な洪水予測システム（水害リスクライン）の構築において、降雨-流出-氾濫を解析するモデルとしてRRIモデルが採用されることになり、広域洪水予測システムの基

礎技術（地形データの整備，リアルタイム運用のための技術，河道断面情報の反映方法，パラメータの設定方法など）が活用された。また，兵庫県と京都府においても，中小河川を含めた河川水位と浸水の一体型の予測システムが開発されることになり，上記の基礎技術が活用された。特に本研究で推定した全国版 RRI モデルのパラメータ値は，同モデルを洪水予測に実務に応用するにあたり，パラメータ設定の標準値を与える。また，広域の浸水予測の再現精度向上に際して，改良したプログラムを順次公開しており，それらの成果が実際の洪水予測で活用されている。そのほか，広域洪水予測システムで開発した全国版 RRI モデル（及びその一部）は，気象ビジネス，保険リスク評価，建設コンサルタント各社でも活用されるようになった。令和 5 年 2 月 24 日に「気象業務法及び水防法の一部を改正する法律案」が閣議決定され，民間事業者による予報の高度化を促進する動きが加速しており，全国版 RRI モデルの公開は一連の動向に沿うものとなっている。

なお，これまでに，120 時間先までの長時間洪水予測や水位予測をアンサンブル予測降雨で実施されたことはない。このため，こうした幅を有し，時間とともに変化・更新されていく予測結果を，自治体等が整理しているタイムラインの中でどのように活かすのかについての経験や蓄積は全くない。こうしたことから，大水害が発生する状況を想定して，長時間アンサンブル洪水予測結果を広域避難実施の協議・判断・実行にどのように活用するのかを検討整理する必要がある。そして，公共交通機関などの関係機関とも連携した訓練を行い，その結果をフィードバックすることにより，長時間アンサンブル洪水予測システムを活用した適切かつ円滑な広域避難を実施できるよう体制等を構築していくことが望まれる。

また，アンサンブル予測降雨を用いて長時間先までの洪水予測を行っているが，線状降水帯をはじめ降雨の予測精度が低い気象現象もある。洪水予測情報を安心して活用するためには，これらの気象現象と洪水氾濫への発展の可能についての分析も必要と考える。

総合ダム防災支援システムの開発については，ダム流域以外も含む全 72 流域，全国 50 ダム以上に長時間アンサンブル降雨予測を提供しているが，小規模からダム群まで，バランスを取りながら導入を進めてきた。個別の例として，高梁川水系，猪名川水系一庫ダムを対象にアンサンブル降雨予測システムのプロトタイプのリアルタイム運用を継続した。また，全国のダム管理者等を対象に有償サービスを継続した。また，発電ダムを対象とした長時間アンサンブルの過去データ検証とプロトタイプシステムの構築を行った。さらに，ダム群連携最適操作シミュレータのプロトタイプについて，木津川ダム群では 3 ダムから 5 ダムへ拡張，荒川上流ダム群においてはアンサンブル降雨予測を内挿し，実装した。

出口戦略で重要な位置づけである「ダムルールを策定」するために，「アンサンブル降雨予測及びダム群連携最適操作の標準仕様・ガイドラインの制定」にかか

る国土交通省・水資源機構、自治体のダム管理者を導入者として、本研究で開発したシステムを活用するために必要な施設の操作規則の改定、防災体制や防災計画の変更することを検討し、具体的な実施要領（案）の策定し、システム導入者のニーズ・導入条件の把握を行い、実装に向けて国土交通省やダム管理者等と協議した。また、令和4年度より事前放流に係るルール策定等の検討に当たってワーキンググループを立ち上げ、協議を重ね、成果を関係者と共有した。

アンサンブル予測を用いたダム運用による洪水調節能力の向上の検討を踏まえ、今後社会的に要請が高まっている「流域治水」・「カーボンニュートラル」など治水・発電に対するダムのポテンシャルへの期待が高まっていることから、これら治水・発電ポテンシャルの効果向上のために、「アンサンブル予測を用いたダム操作ルール具体化」と「アンサンブル予測の深化」をする必要があると考える。具体的には、長期降雨予測、流入量予測に高度技術を導入し、ダムの貯水池運用の高度化を図る。ダムの運用高度化により、治水機能の強化（確実な事前放流の実施、複数ダムによる連係操作）や水力発電の増電を図る。これらダム運用の高度化を異なる操作手法のダム・利水ダムに展開することにより、対象ダムの増、個別ダムの有するポテンシャルの最大限活用が得られ、流域全体の治水機能向上、カーボンニュートラル等の施策への貢献を果たす。あわせて操作ルールを変更することにより生み出される、新たな治水・発電ポテンシャルに着目した放流設備・発電設備の改造や新設を促すことにより、ダム再生、ハイブリッドダムなどの施策範囲の拡大、民間投資の拡大を促すものと考えている。

長期アンサンブル降雨予測の技術開発により多数のダムで実装し、ダム運用の参考情報として試行しており、今後、導入ダムをさらに拡大し、試行を重ねた上で、実際のダム管理において予測を用いたダム操作が実現できるよう、ルール作りを進め、試行・評価・改善により利水専用ダムや都道府県管理ダムなど多様なダムでの適用を促していく。並行して、個別ダムでのアンサンブル予測適用のための技術開発を進めたい。

### サブテーマ3：危機管理型水門管理システムの開発

2022年度の達成度合いとして、研究開発成果（水門開閉情報の通信フォーマットの標準化、LPWA（LoRaWAN）通信機の設置、技術基準への採用など）の社会実装については、LPWA（LoRaWAN）に対応した11バイトの統一通信フォーマット（案）を検討するとともに管理者が異なる水門等の開閉状況を統一通信フォーマット（案）により一元監視するプロトタイプシステムを構築し実証試験を継続した。また、遠隔地からの水門等の危機管理操作のため、LPWA（LoRaWAN）通信により一元監視システムからの遠隔操作の実証実験を実施した。

また、小形水門における無動力遠隔自重閉鎖システムのプロトタイプの実証実験を継続し安定性・確実性を確認するとともに、ワイヤロープウインチ式の中大

形水門に無動力遠隔自重降下機能を追加する改造試設計を行い、システム構築と課題検討を行った。それらの成果と課題を踏まえてシステム導入のための改造設計ガイドライン（案）を策定した。

さらに、社会実装に向け水門操作の基準となる操作規則等について水門操作に必要な情報に関してのニーズや、水門の特性に応じた運用条件（運用体制、操作規則等）の把握、プロトタイプによる実証のための候補地選定のため川崎市、愛知県、大阪府等と意見交換や調整を実施し、実証実験を行った。

本研究を参考に、大和川流域では、国が自治体と連携し LPWA 通信を使った施設管理者が異なる水門の一元監視の実証実験を始めるなど、社会実装の取組みが生まれている。

本システムのニーズ開拓として、ため池や用水路の管理など農業分野等の水門以外の異分野のニーズ調査も行い、ニーズの拾い出しができるとともに、国際展開として東南アジアを中心にニーズ調査を行った。

社会実装に向けた標準化戦略として、LPWA に関して国内規格開発を行い JSA 規格として公開した

一元監視システムや無動力遠隔自重閉鎖システムについては、国土交通省や農林水産省と調整を行った結果、「津波・高潮対策における水門・陸閘等管理システムガイドライン」等へ反映させる方向で調整が進んでいる。

水門・陸閘等の開閉一元監視システムについては、技術基準・ガイドライン等の整備が社会実装にとって重要であり、継続して関係省庁と打合せを実施している。

「津波・高潮対策における水門陸閘等管理システムガイドライン（国土交通省・農林水産省）」については、改定作業が進められている。河川関係についても、国土交通省の一部の直轄事務所で一元監視を導入しており、実績を着実に重ねることで、早期のガイドライン化に向けて協議を進めている。

また、開閉情報の通信に利用されるフォーマットは日本規格協会規格として令和 4 年度内に公表されており、普及を進めていく。

水門自重閉鎖システムについては、策定した導入ガイドライン（案）を平成 4 年度内に公開し、併せて「ダム・堰施設技術基準（国土交通省）」等の技術基準類の改定についても国と協議を続ける。

なお、民間企業による基準類に準拠した製品・サービスの市場化を促すため、共同研究を継続中である。また、水門自重閉鎖システムについては、様々な現場条件、仕様で事例を積み重ねることにより、更なる技術的発展が期待できることから、採用可能な現場には発注者に対して活用・事業化を促す。

## ⑤ 知財戦略，国際標準化戦略，規制改革等の制度面の出口戦略

SIP 技術による洪水予測情報を提供するため、法制度改正について国土交通省

と協議を進めてきた。気象庁・国土交通省による「洪水及び土砂災害の予報のあり方に関する検討会」においても SIP 技術を用いた洪水予測について情報を提供し、その報告書が令和 3 年 10 月にまとめられた。その報告書をもとに、令和 5 年度以降、SIP 技術による新たな洪水予測情報の民間からの提供が実現する可能性が出てきた。

#### サブテーマ 1：高潮・高波ハザード予測システムの開発

グローバルベンチマークから最先端・技術的優位性のある高潮・高波ハザードシステムの防災に関する ISO/TC268 への規格化に向けた検討に活用・協力している。

知財管理は、知財委員会設置運営要領及び運営規則を定め、適切に管理を実施している。

#### サブテーマ 2：河川・ダムの高時間洪水予測・防災支援システムの開発

河川・ダムの高時間洪水予測・防災支援システムの実用化において全国導入を念頭に、新たな予測情報提供やダム操作のルール化、法制度改正等の必要性について検討している。

洪水では気象庁・国土交通省が合同で開催した検討会の結果を踏まえた情報提供を始めている。知財管理は、知財委員会設置運営要領及び運営規則を定め、適切に管理を実施している。

#### サブテーマ 3：危機管理型水門管理システムの開発

本研究で開発した伝送フォーマットは、JSA 規格として公開することで誰でも自由に使える仕組みとした。LPWA を使った衛星通信ネットワークのコンセプトは、大規模停電、交通手段途絶時であっても遠隔地の情報を収集可能なシステムであり、台風、地震、津波など共通の課題を抱える東南アジア・南アジア諸国でのニーズに合致しており、国際標準化を実施する際の課題を抽出した。

### ⑥ 成果の対外的発信

土木学会海岸工学講演会、河川技術シンポジウム、JpGU、海洋開発シンポジウム、Coastal Engineering Journal、水文水資源学会で成果を発表した。ダム事前放流の高度化に関する取り組みは、日本大ダム会議が発行する「大ダム」に論文を発表した。また、一般財団法人国土技術研究センターに専用 HP を開設し、新情報を随時提供している。

#### サブテーマ 1：高潮・高波ハザード予測システムの開発

高潮・高波ハザード予測システムの関連技術について、土木学会海岸工学講演

会、海洋開発シンポジウム、Coastal Engineering Journal 等で発表した。また、JICE に専用 HP を開設し新情報を提供しているほか、研究機関においてもそれぞれ独自に情報提供を行っている。

#### サブテーマ 2：河川・ダムの高時間洪水予測・防災支援システムの開発

①長時間/広域洪水予測システムについては、河川技術シンポジウム、JpGU、水文水資源学会にて、モデルの検証・活用やアンサンブル情報の可視化方法について発表した。

②ダム事前放流の高度化に関する取り組みは、日本大ダム会議が発行する「大ダム」に論文を発表し、各研究機関の HP にも情報を掲示している。

#### サブテーマ 3：危機管理型水門管理システムの開発

海岸陸閘施設の開閉状態判別における画像 AI モデルの適用について、土木学会にて発表をして査読付き論文集に掲載するなど学術的な発信の他、HP での情報提供、危機管理産業展での合同セミナー実施、各研究機関における独自の情報提供を行っている。また、研究終了時には成果のリーフレットを作成予定である。

### ⑦ 国際的な取組・情報発信

ダムの事前放流による高度化の取り組みは、2022 年熊本市で実施されたアジア・太平洋水サミット（第 4 回）における熊本イニシアティブを受けた日本の国際貢献メニューに位置付けられた。また国際大ダム会議でも成果発表を行った。危機管理型水門システムにおいては、インドネシアの灌漑施設近代化プロジェクト実施担当部局と水門等の施設管理技術に関する意見交換を実施し、SIP 技術の情報発信を実施した。

#### サブテーマ 1：高潮・高波ハザード予測システムの開発

開発技術の成果の一部を Coastal Engineering Journal に投稿し、国際的な情報発信を行っている。

#### サブテーマ 2：河川・ダムの高時間洪水予測・防災支援システムの開発

①広域洪水予測システムは、国際誌「Progress in Earth and Planetary Science (PEPS)」で論文発表するとともに、AOGS2021 のセッションで招待講演を行った。

②ダムの事前放流による高度化の取り組みは、アジア・太平洋水サミット（第 4 回）における熊本イニシアティブを受けた日本の国際貢献メニューに位置付けられた。また国際大ダム会議でも成果発表を行った。

### サブテーマ3：危機管理型水門管理システムの開発

類似の防災課題を抱えていると思われるインドネシアの灌漑施設近代化プロジェクト実施担当部局と水門等の施設管理技術に関する意見交換を実施したが、その際の英語版の資料は、今後も活用可能である。また、伝送フォーマットは地域アドレス部に国際展開を想定したコードの検討を行った。今後、伝送フォーマットを規格化した文書である JSA 規格の英文作成を検討している。

## (6) テーマⅦ：避難判断・訓練支援等市町村災害対応統合システムの開発

### 1) 研究内容

関係機関の協力の下、災害時に大量の災害情報が発生する中で、市町村が適切な避難勧告・指示や緊急活動の優先順位付け等の判断を下せるようにするため、AI等を活用して災害情報を処理することで、避難対象エリアと避難タイミングの合理的な抽出を行うなどの判断の自動サポートやリスクコミュニケーションも意識し、訓練用の災害・被害シナリオの自動生成等を可能とする。市町村災害対応統合システムを開発する。また、本システムは広域・緊急避難等に必要となる災害情報についてテーマⅠで開発する「避難・緊急活動支援統合システム」と密接な連携を図るものとする。

### 2) 技術的目標

市町村が適切な避難勧告・指示や緊急活動の優先順位付け等の判断ができない最大の要因は、大量の災害情報から判断に必要な情報を抽出できていないことである。このため、最先端のAI、IoT技術と既存技術を融合し、避難勧告等の発令に必要な情報を地区・校区等の小エリアで、かつ短時間で提供するとともに、発令情報が自動配信されるシステムを開発する。また、社会実装を促進するため、システム習熟度を向上させる学習モードの開発を行う。

4年次は、中間目標であった避難判断・誘導支援システム、緊急活動支援システムのプロトタイプ構築達成により、4年次はモデル自治体の実証実験を通じてシステムの改良・高度化を図る。

また、2021年と2022年でユーザーの実際の判断や行動との整合を検証し、確度を高め、実装をより確実なものとするため、4年次は防災・危機管理や避難行動等の専門家の経験的・科学的知見を集約・学習することを通じて、判断に資する支援情報を提供できる技術を開発する。あわせて、これらの変化を動的に可視化して総合リスクとして評価できる判断支援技術を開発・強化する。

さらに、IDR4Mを活用した市町村長の意思決定の支援をさらに強化することを目的に、市町村長の意思決定に資するハザード・脆弱性・リスク評価とその活用に関する妥当性・正当性の確保や、災害リスク評価・意思決定事項に関するリスクコミュニケーションの構築と信頼性の確保のため、地域のレジリエンスを劇的に向上させる研究に着手する。

最終年次は、避難判断・誘導支援システム、緊急活動支援システム、ならびに訓練用災害・被害シナリオ自動生成システムについて、各システムを統合したIDR4Mを構築する。全国1,700市町村へ開発したシステムの社会実装を順次進め、「必要情報の欠落ゼロ」「勧告等の出し遅れゼロ」「逃げ遅れゼロ」「対応できないがゼロ」の4つのゼロを実現し、円滑かつ効果的な災害対応の実現（「犠牲者ゼロ」）に貢献する。

### 3) 課題目標の達成度

#### ① 国際競争力

逃げ遅れゼロを目指し、地方自治体が設定する小エリア（学校区単位等）ごとにリードタイムを十分に確保した発令を支援するため、AI を活用した、ハザードと脆弱性を統合して避難所要時間をリスク評価に反映するシステム開発は、日本初の取り組みであり、また、市町村の特性に応じて、発令根拠や災害リスクを示し、避難判断の意思決定をサポートするモデルは国内外になく、ユニークなシステムと言える。

本テーマで主要システムと位置付けられるサブテーマ 1 の市町村災害対応統合システム (IDR4M) については、グローバルベンチマーク比較を行い、その妥当性を国際評価にて検証した。グローバルベンチマーク結果からも、個別のハザードを予測するシステムは国外にもあるが、ハザード予測だけではなく、AI を活用しハザードと脆弱性を統合することで避難のリスクを判断し、避難判断の意思決定をサポートするシステムは、国内外になく本システムが初めての取り組みであるとしている。各機能（避難判断支援、災害リスク評価、洪水ハザード予測、土砂災害ハザード予測、脆弱性評価）に関しても、分解能、予測時間ともに、他のシステムと比較しても明らかに優位である。また国際特許条約 PCT に基づく国際出願の出願も行っている。

国際評価会において、具体的に次のように評価された。

IDR4M システムは、日本の人口密集地域における迅速な災害影響評価と住民避難の問題解決に特に適している。IDR4M が開発した意思決定支援システムが更に洗練され採用されれば、将来のベストプラクティスシステムとして国際的に注目されるだろう。

IDR4M が提供するソリューションは、物理的な危険性だけではなく年齢や社会経済的状況などの地域の脆弱性を考慮して、自治体職員への意思決定支援を行うもので画期的なシステムである。

#### ② 研究成果で期待される波及効果

避難判断の意思決定に至るプロセスを 3 つの評価システムに分類し、適宜 AI 技術を活用しプロセスを定量化・見える化し、論理的に判断できる仕組みの構築を図っている。

即ち、AI 技術の活用で、ハザード評価では、ハザードを面的・時間的に分析し危険度を評価し、脆弱性評価では、静的な脆弱性評価及び動的な評価指標により多様な避難形態に対応させ、リスク評価では多種多様なリスク評価結果を 1 つの総合リスクとして評価している。さらに、判断支援の AI 技術では、判断発令に至るプロセスの妥当性の明確化を図り、小学校校区等の小エリアでタイムリーに

避難情報を出すことが可能となっている。こうした AI 技術を活用した避難判断の意思決定支援は、観測予測体制が不十分な諸外国において、高い潜在需要があると想定している。

### ③ 達成度 (1)

#### サブテーマ 1：避難判断・誘導支援システムの開発

データ収集・整理に関して、7モデル自治体における実証実験を進めながら、避難判断・誘導支援システムに必要なデータベースの拡充を実施した。

システムには AI を含む 4 つの評価システム（ハザード評価、脆弱性評価、災害リスク評価、避難判断）が含まれ、その高度化に必要となる基礎的な情報として、静的情報、動的情報を収集した。

静的情報としては、自治体における過去の災害履歴、浸水想定区域図、CL データ、地盤高及び治水地形分類図等の地形情報、土地利用状況及び道路情報等のインフラ情報、国勢調査等による静的な人口分布情報を収集した。

動的情報としては、水害リスクライン、高解像度降雨ナウキャスト及び降水短時間予報の雨量情報、気象庁発表情報等の災害予測情報及びリアルタイム位置情報の収集による動的な人口分布情報を収集した。また、SIP 国家レジリエンス（防災・減災）の強化テーマ V 及びテーマ VI との連携により線状降水帯情報、台風の進路予測情報を収集した。

動的情報データの授受においては、テーマ I の研究開発により構築された SIP4D の利用や API サーバ等の活用により、安定したデータ授受体制を構築した。

なお、自治体における実証実験について、サブテーマ 2（防災情報共有システムを基盤とした文理融合型の地域レジリエンス強化）で追加となった 11 モデル自治体も検討対象とし、データ収集・整理を併せて実施した。

昨年度からスタートした SIP 国家レジリエンス（防災・減災）の強化テーマ V 及びテーマ VI との連携について、その連携方法を改良し、安定したデータ授受体制を構築した。実際にテーマ VI から RRI モデルによる長期洪水予測をリアルタイム受信し、洪水ハザード情報として表示することに成功した。

避難判断支援システムの全体構成を、図 15 に示す。AI 分析によるリスクの抽出に関して、ハザード評価システムについては、前年度に構築した土砂災害ハザード評価システム及び洪水ハザード評価システムのプロトタイプを改良・高度化した。ハザード評価では、物理モデルと AI モデルを組み合わせたリアルタイム洪水予測システムの高度化を行った。氾濫予測 AI の汎化性能向上のために教師データ学習方法の再検討を行った結果、未学習河川への適用可能性が広がった。脆弱性評価 AI では、事前に評価した各地域の静的な頑健性及び脆弱性に、災害に応じて変化する避難経路の状況や各避難所の状況（開錠済、収容人数などの情報）を反映した動的な脆弱性を評価した。リスク評価 AI 及び判断支援 AI では、

個別の災害リスクを数理的根拠等に立脚しながら判断支援情報として統合した上、可逆的に根拠を説明可能な災害リスク説明モデルを開発した。加えて、その根拠情報を図や自然言語等により要約・説明するモデルを開発した。このうち、リスク評価 AI と判断支援 AI については、九州大学のマス・フォア・インダストリ研究所及び数理・データサイエンス教育研究センターの協力の基に開発を行った。



図 15 避難判断支援 AI システムの全体構成図

避難判断・誘導支援システムの開発に関して、実証実験により IDR4M の実用性について実証されたが、さらなる機能向上のため、訓練等により確認された課題や自治体から挙げられた要望を受けて IDR4M の改良をタブレット版（開発向け試行版）において実施、PC 版（本格運用版）への移植を行った。移植に際しては、全国展開を見据えて各機能の適用性・汎用性有無を考慮した。

また、サブテーマ 2 の 11 モデル自治体のうち、訓練による学習モード利活用を主な目的とした地震及び火山災害の 3 モデル自治体を除いた 8 モデル自治体について、PC 版開発を行った。

令和 4 年度における参加自治体数の増加及び社会実装後の導入自治体増加に迅速・柔軟に対応するため、システム拡張性があるパブリッククラウド（AWS）へ移行し、堅牢性・安定性の向上を併せて図った。

令和 4 年度に開発・改良したタブレット版及び PC 版の避難判断・誘導支援システムの全体概要を以下に示す。

### ハザードごとに分割した判断支援情報の表示

- 洪水や土砂災害など、災害のタイプによって避難情報の発令範囲が広域・局所などそれぞれ異なるのが実情
- 多種多様な災害リスクを1つの総合リスクとして評価することを目指しているが、**災害毎のリスク評価結果の表示も必要**



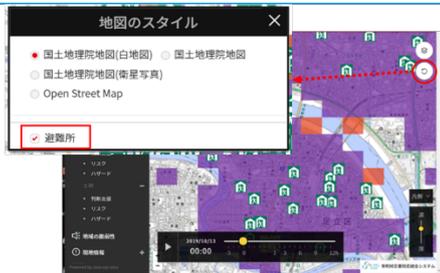
### 予測時間の見直し（6時間先⇒12時間先）

- 夜間の避難行動は危険が伴うため、**夜間の避難情報発令は避けたいのが実情**
- 午前4時に災害リスクが高まる場合、**12時間前**の前日午後4時にその予測を表示し、避難情報の発令判断を支援



### 避難所の位置情報の表示

- 避難所に関する情報をIDR4Mに組み込んでほしい
- 避難所の位置をIDR4M上で知りたい



### 地域特性に合わせた脆弱性の評価の見直し

- 足立区は区全域が人口密集地であるため、脆弱性評価の値が区全域で高く、災害リスクが過敏に反応
- メッシュ間で人口の粗差が極端に大きい場合、現状の相対的な脆弱性評価でなく**絶対的な評価が必要**

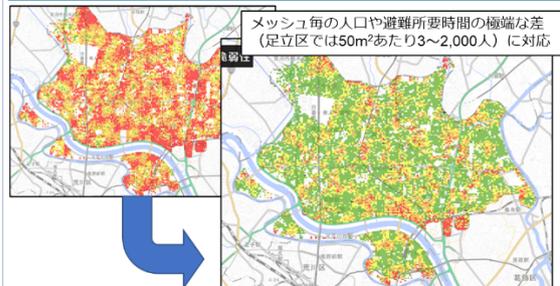


図 16 タブレット版（開発向け試行版）の主な機能改良

#### 【主なコンテンツ】

- 避難判断支援情報
  - 避難判断支援情報 凡例  非表示
  - 災害リスク 非表示
  - 地域の脆弱性 非表示
  - 洪水ハザード 非表示
  - 土砂災害ハザード 非表示
  - 人口動態 非表示
- 河川水位
  - 河川水位 凡例  非表示
  - 水位観測所 非表示
  - 危機管理型水位計 非表示
- 雨量
  - 降雨予測 非表示
  - 連続降水予測雨量 非表示
  - キキクル（危険度分布） 凡例  非表示
  - 台風情報 凡例  非表示
  - 洪水予報等 凡例  非表示
  - 浸水想定区域 凡例  非表示

#### 【定性・定量判定機能】

##### 災害リスクに基づく判断支援

観測・警戒情報による判定

【判定時刻表示機能】

判定時刻 16:37

##### 観測・警戒情報による判定

【過去データ表示モード】

- ✓ 過去にIDR4M上に表示された情報を再表示する機能
- ✓ ①過去3日分を自動保存・再表示 ⇒ 直近の災害の振り返り・確認に活用
- ✓ ②手動保存したデータを再表示 ⇒ 訓練等に活用

【タイムスライダーの伸縮機能】

通常時 09:00 18:00

縮小時 12:00

図 17 PC 版（本格運用版）IDR4M システム概要

ハザード推定の研究開発と実装に関して、IDR4M の場の脆弱性評価に使用する人流データ観測値、及び未来予測（定常変動モデル）と、緊急活動支援への活用を想定した人流異常検知について、リアルタイム処理の長期動作と対象エリア拡大を実施した。昨年度検証した異常検知、定常変動モデル構築の逐次実行処理について、2022 年度は対象エリアを 7 自治体から、1 次メッシュ 8 個分エリア（約百自治体）し、半年間リアルタイム処理を継続動作させ、長期動作における安定性について検証した。

長期動作検証範囲として下記に含まれる全 250m メッシュについて 15 分単位の異常検知処理を検証環境（CPU8 コア、メモリ 24GB）にてリアルタイムで逐次処理し、検証した。（1 次メッシュ当たり 10 秒程度）を継続実行可能である旨、検証した。今回の処理をもとに日本全国規模でも問題なく動作拡張できることを確認した

| 1 次メッシュ | 対象エリア             |
|---------|-------------------|
| 5339    | 東京都周辺             |
| 5340    | 千葉県北東部（香取市含む）     |
| 5439    | 埼玉県北部、茨城県西部、栃木県南部 |
| 5440    | 茨城県（常総市含む）        |
| 5030    | 福岡県（東峰村含む）、佐賀県一部  |
| 5132    | 広島県南西部他           |
| 5233    | 岡山県西部（高梁市含む）      |
| 5234    | 兵庫県西部（加古川市含む）     |

表 6 異常検知対象一次メッシュ

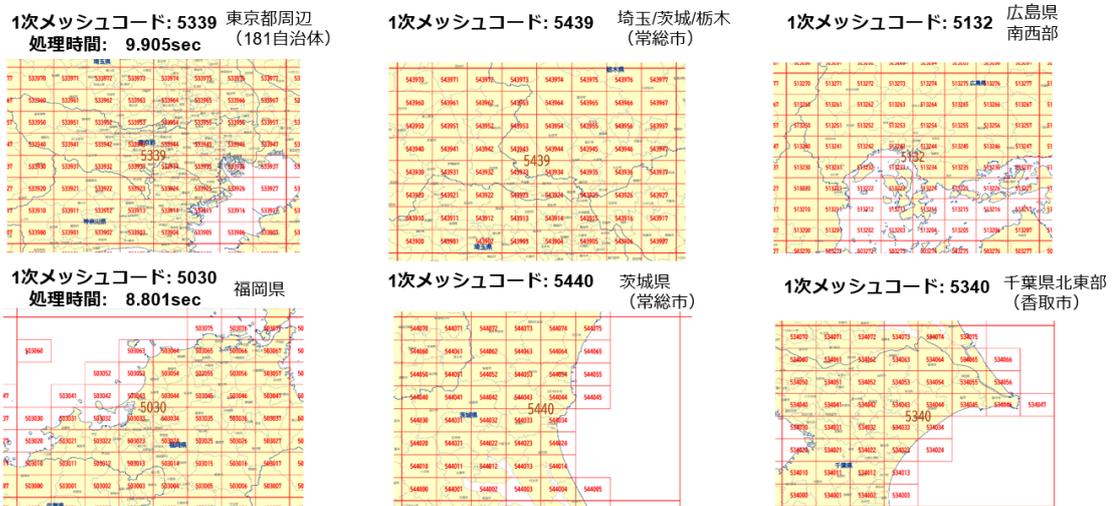


図 18 異常検知リアルタイム処理適用範囲例

2022年に発生した実災害（台風15号（9/23-24））を対象に人流異常検知の避難状況把握への有効性を検証した。避難発令後、安部川流域の増水に対して、周辺居住者の避難状況が深夜3:00から発令解除される14:00まで顕著に可視化できることを確認した。

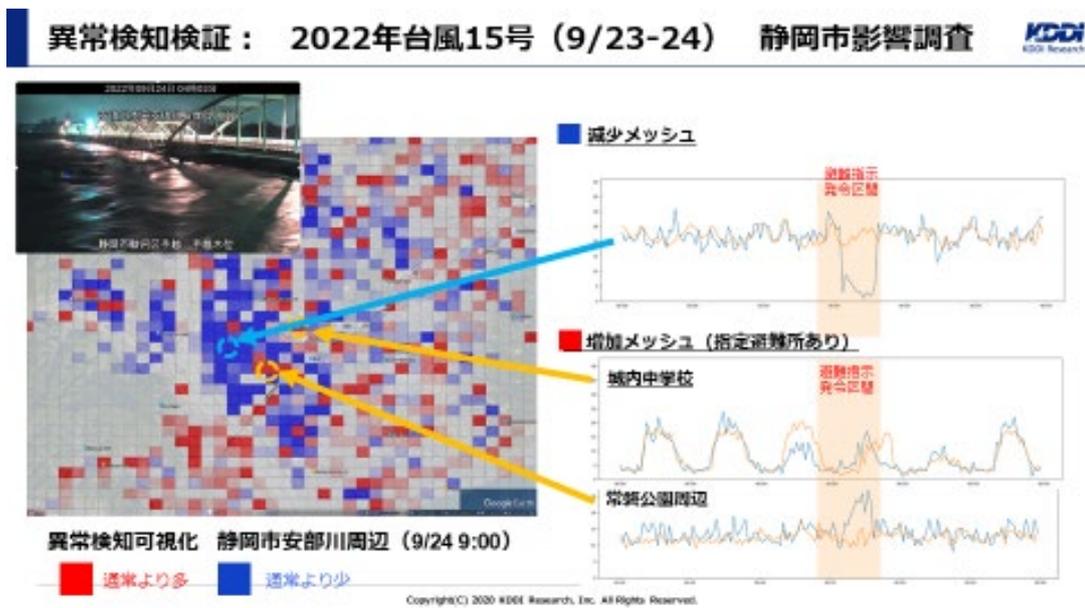


図 19 台風15号（2022年9月23日）時の静岡市の異常検知結果

土砂ハザード予測の実証実験を通じた改良・高度化に関して、構築したシステムを実装した7つのモデル地区、サブテーマ2で各大学が実施する自治体実証実験を通じてシステムの改良と高度化を図った。また、SIP第二期の最終年であるため、今後の国家レジリエンス（防災・減災）の強化のため課題を整理した。

イ) システムの検証と妥当性確認

当面の目標である50自治体運用の1.5倍に相当する負荷状況において、平均的なシステム負荷のモニタ値は約70%程度で安定稼働を確認した。

ロ) システムの調整

都市部の「土石流型」、「急傾斜崩壊型（都市部崩壊）」の土砂災害を同時評価できるようにシステム改修を行った。

ハ) 課題の整理

SIP第2期の成果としてAIを用いてゼロ次谷を抽出、47都道府県のマップを完成させた。今後、地形判読技術者による照査と教師データへのフィードバックなどPDCAスキームの構築が課題となる。

総合リスクコンター機能の開発に関して、災害に対する意識モードを変えるのに全ての情報をチェックするのではなく、地域の危険性を察知できるトリガー情

報を提供するものとして、災害リスクの状況を瞬時に総合的に視覚的に把握（リスク分布の拡大・縮小・移動・停滞などを見える化）できる表示機能を開発した。

常総市と東峰村を対象とした場合の総合リスクと個別リスクの関係について、

- ・常総市の災害リスクは主として洪水災害のため、洪水災害リスクと総合リスクは同じ扱いとし、
- ・東峰村の災害リスクは主として土砂災害のため、土砂災害リスクと総合リスクは同じ扱いとした。

以上より、現時点では総合リスクは個別リスクの中の最大値と同じものとして扱い、表示するリスクは1種類とした。

総合リスクのデータ仕様は、表示のスムーズ化のため250mメッシュ単位のCSV形式からPNG形式に変更し、現時刻の3時間前から1時間後は10分間隔、現時刻の2時間後から6時間後は1時間間隔更新で0(黄)、0.5(赤)、1(紫)の3段階表示とした。

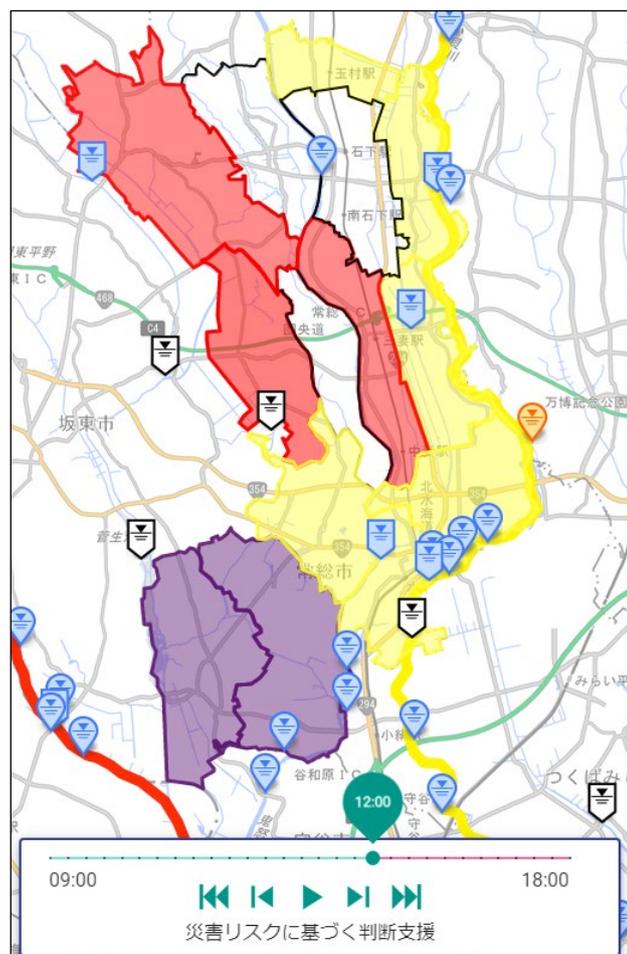


図 20 総合リスクコンターの表示画面（常総市の例）

ブルネラビリティ（場の脆弱性）変化の常時・常態監視の機能開発に関して、道路冠水や土砂崩壊等の原因で利用が困難な避難経路や、避難所の解説状況及び収容人数などのブルネラビリティ（場の脆弱性）に関する情報を簡便に取得、収集するための情報収集システムの開発を開発し、モデル自治体で実装した。

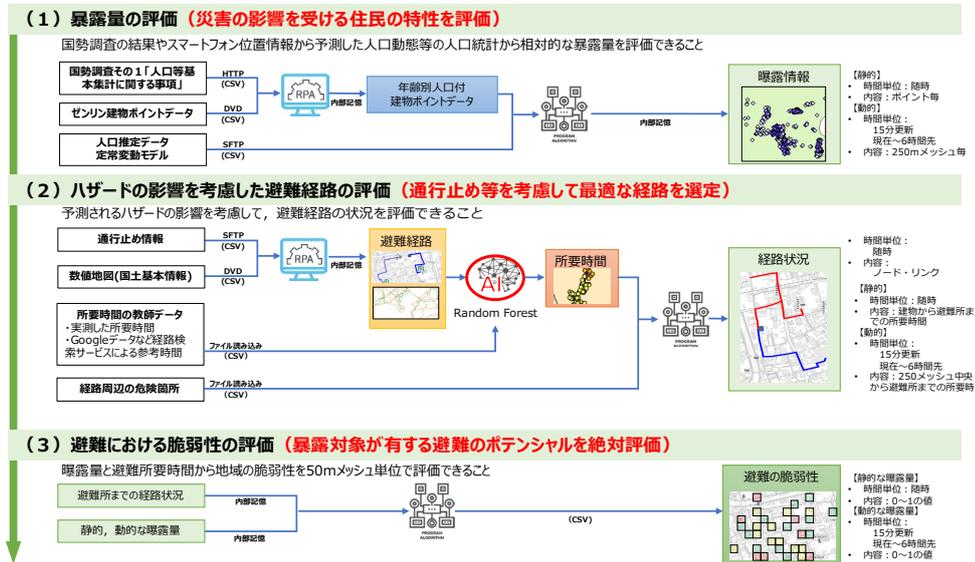


図 21 脆弱性評価システムの内容

災害リスク・避難判断の数理的根拠に基づいた説明モデルの開発に関して、4年次までに、個別の災害リスクを数理的根拠等に立脚しながら総合リスクコンターや判断支援情報として統合した上、可逆的に根拠を説明可能な災害リスク説明モデルを開発した。最終年度は、前年度に開発したシステムを改良し、個別の災害リスクを集約した総合リスクコンターとして提示する機能を実装した。

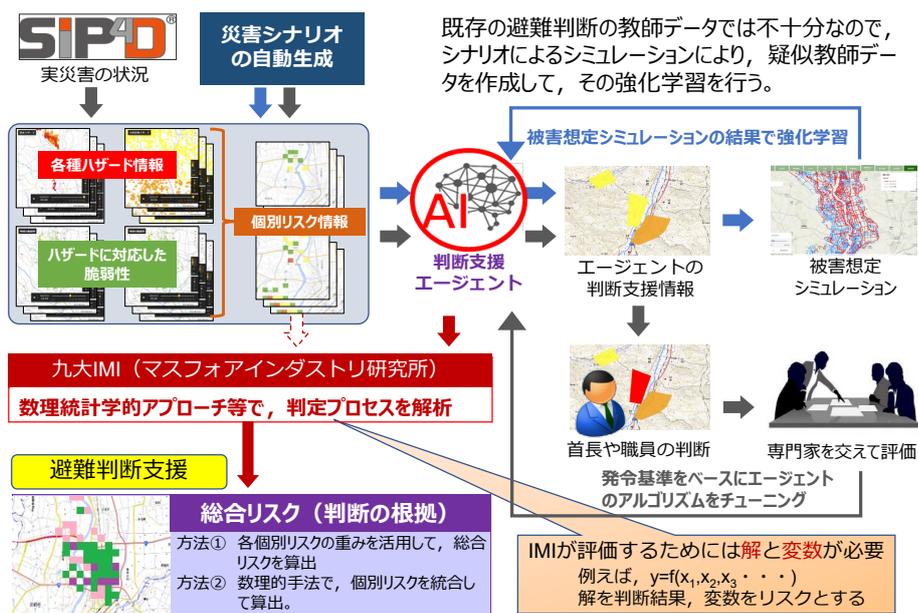


図 22 リスク評価・避難支援システム案の内容

判断支援エージェントの開発に関して、これまで開発してきた技術についてのシステム化を行った。グラフィカルユーザインターフェースを用いて災害シナリオの作成条件を入力し、自動生成技術により降雨量、土壌雨量指数、家屋等被害、道路冠水、避難困難地域などの災害シナリオデータセットを作成できるよう、システム化した。またこれにより作成されたシナリオをグラフィカルに確認できるようビューアを作成した。

前年に開発した被害想定と実務者の地域に関する知見を踏まえた判断支援エージェントの学習を行う仕組みをシステム化した。上述により作成された災害シナリオデータセットから避難困難地域のデータを取り出し、IDR4Mの洪水ハザードと土砂ハザードと共に入力することで初期の判断支援エージェントを作成するモジュールを構築した。さらに、実務者のワークショップを介してデータの追加と削除、タイミングの調整を行い、判断支援エージェントを学習させるシステムを構築した。これらによりシステムが完成した。

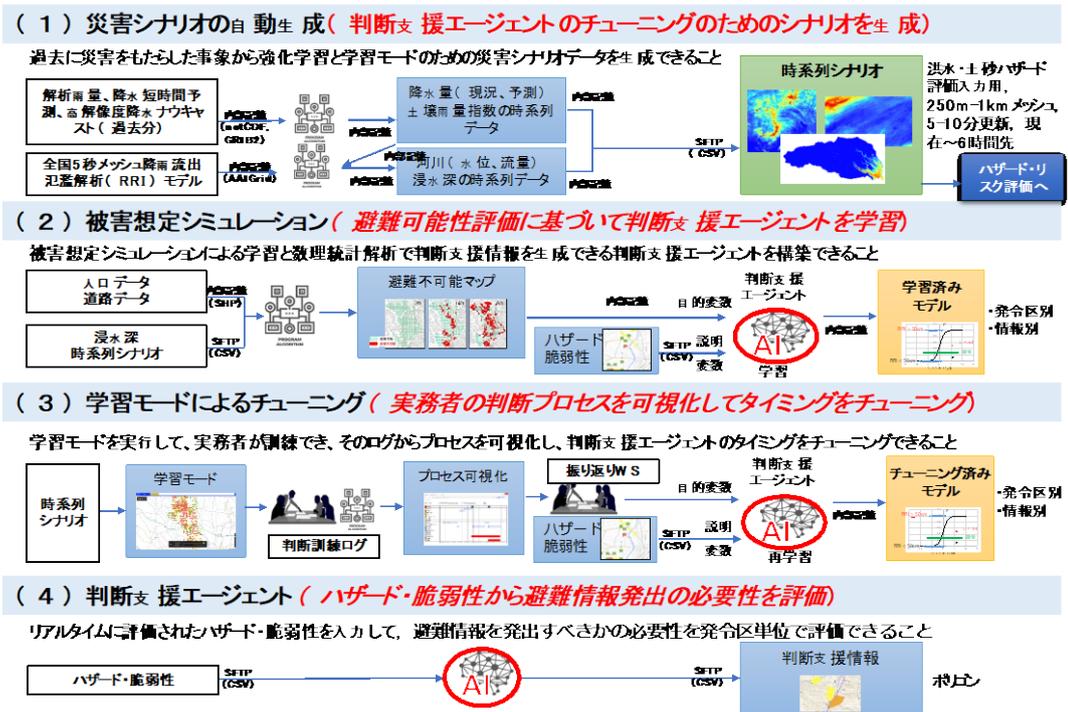


図 23 判断支援エージェントの構成

被害想定シミュレーションに基づく判断支援エージェントの構築に関して、2021年度にIDR4Mのモデル自治体の一つである兵庫県加古川市を対象としてチューニングした判断支援エージェントを、他のIDR4Mのモデル自治体である茨城県常総市、福岡県東峰村、岡山県高梁市、千葉県香取市で行ったワークショップによって評価した。脆弱性と洪水ハザードだけを説明変数として構築された判断

支援エージェント（チューニング前）よりも、人口及び高齢者率を説明変数に加えたチューニング後の判断支援エージェントの方がワークショップで得られた自治体職員の発令地域やタイミングを良好に再現した。判断支援エージェントの構築にあたり、ロジスティック回帰分析による機械学習と IDR4M のワークショップに基づくチューニングが有効な手段であると判明したため、社会実装を進めることを目的にこれらのアルゴリズムをモジュール化した。プログラミング言語は Python とし、チューニングする閾値等は外部入力可能とした。さらに、計算結果のラスタ出力モジュールを開発した。

近年、防災分野でも AI を使用した研究が多く発表されている。しかし、AI の多くの手法は、結果が導出された根拠が明らかにならないブラックボックスである。避難判断の意思決定には、人々の安全や安心という重要な背景が構えていることを考慮すると AI をできるだけホワイトボックスに近づける必要がある。そこで、IDR4M の学習モードの被害想定シミュレーションで用いている土砂崩壊発生地点の予測モデルに関して、説明可能 AI（Explainable AI, XAI）を適用し、モデルの解釈を試みた。SHapley Additive exPlanations (SHAP) による対局説明（図 24）では、土砂崩壊発生地点の予測結果には土壌雨量指数の最大値の影響度が最も強く、次いで傾斜角、標高、土壌雨量指数の差分最大値の順に影響度が高いことがわかった。

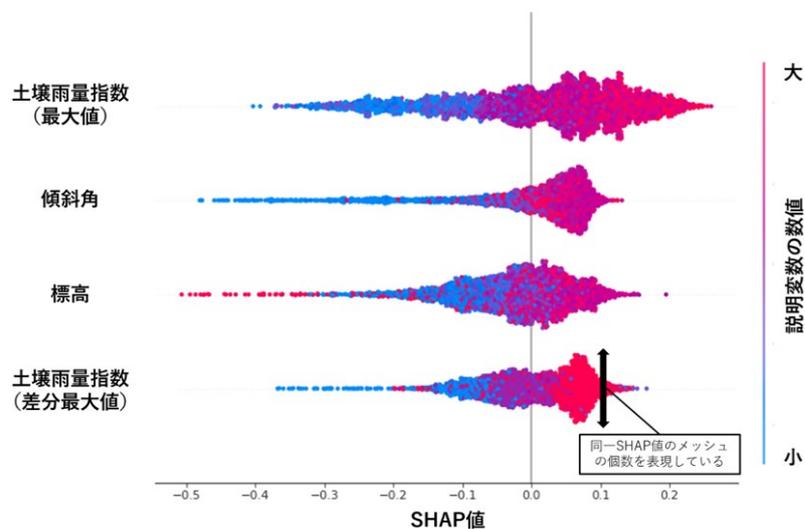


図 24 被害想定シミュレーションにおける土砂崩壊予測モデルの SHAP 値の蜂群図

避難判断支援システムのシステムログ可視化技術の開発に関して、複数実務者によるシステム操作ログ取得技術、判断プロセス・判断結果の可視化アプリケーションの開発・高度化を行った。さらに、自治体実務者及び専門家を交えた避難判断エージェントのチューニングのためのローカライズ情報抽出のためのローカライズワークショップを実施した。

- ・ローカライズワークショップの目的  
地域的な特徴等から発令判断に係わる実務者（3～5名／自治体）の考えや経験等をふまえ、判断支援エージェントをチューニングするための情報を抽出する。
- ・ローカライズワークショップの手法  
災害シナリオの設定、降雨データを作成し、IDR4M 学習モードへの搭載する準備を経て、IDR4M を活用し避難情報発令のプロセスをワークショップ形式で実施する。個別の発令結果・情報閲覧ログ・合意形成後の発令結果を収集する。
- ・実施自治体  
茨城県常総市(2022年9月20日)、福岡県東峰村(2022年9月22日)、岡山県高梁市(2022年10月3日)、千葉県香取市(2022年10月7日)

・ローカライズワークショップの概要と結果  
ワークショップには、複数の実務者の方々に参加してもらい、IDR4M を活用し、仮定の降雨シナリオをもとに避難情報レベル3相当ならびにレベル4相当の発令が予想される2つの時間断面において、実務者のそれぞれで避難情報発令判断を実施してもらった。システムログ可視化アプリケーションにどの情報をどのような順序でどの程度閲覧したのかが自動記録され、実務者には判断根拠を記録してもらった。そして、それぞれの判断結果と判断根拠について議論し、発令判断に影響した要因に関する合意形成を図った。

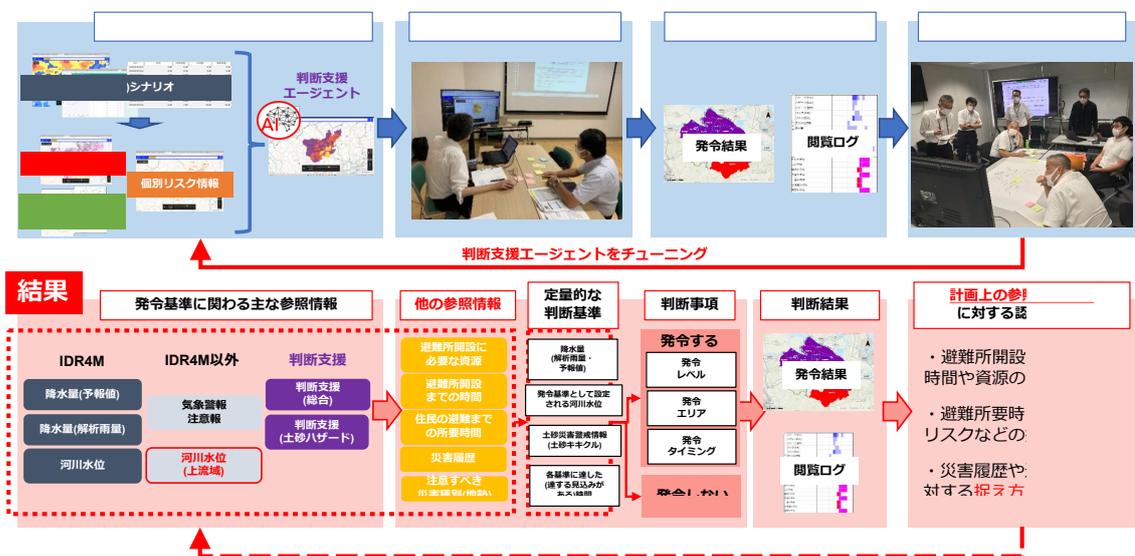


図 25 IDR4M ローカライズワークショップの概要

その結果、システム操作ログ取得技術、判断プロセス・判断結果の可視化アプリケーションを高度化し、4箇所でのローカライズワークショップにおいて、どのくらい情報を閲覧したのかが発令結果とともに知ることができる閲覧密度、情報を閲覧した順序を発令結果とともに知ることができる閲覧順序の解析結果を表示することができた。

実証実験による課題抽出，機能検証に関して，避難判断・誘導支援システムの機能向上のため，サブテーマ1の7モデル自治体及びサブテーマ2の11モデル自治体においてIDR4Mやその考え方をういた実証実験を実施した。

実証実験は，自治体職員による実務訓練の実施においてはタブレット版（開発向け試行版）を活用，災害発生時におけるIDR4Mシステム監視においてはPC版（本格運用版）を活用した。なお，災害発生時におけるIDR4Mシステム監視のために「IDR4Mの出水期対応マニュアル」を作成し，（一財）河川情報センター職員による監視体制を整備した。

また，IDR4Mのタブレット版（開発向け試行版）の機能や自治体ごとのインターフェースについて，（一財）河川情報センターにおいてPC版（本格運用版）を構築，機能を順次移行しながら実施した。

これらの実証実験により，具体的な改善点や課題点等を洗い出し，全国展開を見据えて各機能の適用性・汎用性有無を考慮し，システムにフィードバックすることとした。

## サブテーマ2：防災情報共有システムを基盤とした文理融合型の地域レジリエンス強化

各大学グループが掲げる避難における課題を解決するための方策として，サブテーマ1で開発されたIDR4Mを活用し，以下の項目を実施した。

- ✓ アンサンブル気候データの活用により未知の災害リスクを評価
- ✓ 火山噴火の静的・動的データを統合し，的確な避難情報を提供
- ✓ 地震直後の家屋等の倒壊リスクを評価し，避難情報を提供
- ✓ 公共交通機関の活用や避難準備時間を考慮した避難所要時間算出モデルを構築
- ✓ 適正な避難指示が可能となる情報の明確化と意思決定の判断プロセスを構築
- ✓ 事前訓練を通して広域避難における意思決定メカニズムを構築
- ✓ 構築されていない火山噴火，地震に対応したプロトタイプを新たに開発
- ✓ 避難における課題を解決するための方策の検討も開発した機能の確認，また新たな課題を抽出するため，これまでに延べ24回の実務訓練等による実証実験を実施
- ✓ 取り組みにより，サブテーマ1で開発されたIDR4Mのハザード及び脆弱性評価機能の強化，火山噴火及び地震災害への対応機能の拡張
- ✓ 広域避難や自治体の地域特性を考慮した意思決定における判断プロセスの解明により，IDR4Mの自治体への導入，活用における汎用性が強化

- ✓ IDR4M の全国展開を加速化

#### ④ 達成度 (2)

社会実装に向けた取り組みとして、最終年度は7モデル自治体と実証実験を通じた協議を重ね、課題点及び改善点を洗い出し、システムの容易な操作実現のために必要な改善を順次実施した。また、研究開発用環境として用いてきたタブレット版の諸機能について、SIP 期間終了後の本格運用に用いる PC 版への移植を実施した。

実用化に向けた取り組みとしては、SIP 期間終了後全国 1,700 の自治体で円滑かつ安定した運用体制を構築するため、システム冗長化に向けた対応策を検討した。

事業化に向けた取り組みとしては、研究開発後の全国自治体への水平展開につなげる方策として、サブテーマ1及びサブテーマ2のモデル自治体にシステムを実装した。今後、周辺自治体、流域及び広域避難の協定を結ぶ自治体に展開し事業の安定化を図るため、関係機関及び省庁等と引き続き調整を継続する。

予算化に関する取り組みとしては、運用費用の自立化を達成するため、関係者による運用費用の適切な分担を図るとともに、システム運用コストの圧縮等の方策を引き続き検討する。

SIP 第2期後の IDR4M 全国展開に係る社会実装に関する展望及び方向性としては、IDR4M の運用は河川情報センターが実施し、国土交通省、都道府県、流域内市区町村等が連携して推進する流域治水に IDR4M を活用し、流域治水の推進と相まって IDR4M の普及を図る。また、システムの改良・高度化は、九州大学（マス・フォア・インダストリ研究所、データサイエンスセンター（DSC）を含む）が研究課題として継続して推進する予定である。さらに、IDR4M による避難判断支援情報を、水防法に基づく市区町村長の避難判断の意思決定に資する情報として位置付けるよう関係機関と調整を進める予定である。

#### ⑤ 知財戦略，国際標準化戦略，規制改革等の制度面の出口戦略

知財戦略として、22年4,6月に国内特許取得（2件）、21年11月にPCT出願（1件）

開発システムの国際標準化による国際展開として、災害リスク評価技術について、防災に関する世界的なルール作り「防災ISO」への位置づけを目指す。21年8月にテクニカルレポート（TR6030）のDraftにIDR4Mが位置付けられた

#### ⑥ 成果の対外的発信

研究開発成果や実証実験がテレビ報道（13件）、新聞報道（27件）、に取り上げられ、論文発表（39回）、口頭発表（38回）、シンポジウム等招聘講演（20回）、

書籍発刊(2件), WEB サイト開設

21年10月10日「明日をまもるナビ～防災・復興～」にて逃げ遅れゼロへの取り組み事例として IDR4M を紹介

21年10月1日第17回世界地震工学会, 22年9月21日第9回アジア土木技術国際会議にて発表

**⑦ 国際的な取組・情報発信**

国際会議にて論文発表 7 件

特許申請を行うまでは知財戦略の観点から研究開発内容の公開は控え, 特許出願をした 2021 年度より国際会議, 国際学会等で積極的に情報発信を実施