2.7.3 水循環（水資源・水防災）

（1）研究開発領域の定義

水循環の観測・監視や解析・評価、予測に係る研究開発の領域である。水の時間・空間的な分布の動的な偏りから生まれる水資源としての側面と、集中による洪水災害としての側面をともに含める。空間として平面方向は全球から流域圏まで、鉛直方向は対流圏の降水から表層水、地下水までとする。観測・監視は衛星や地上観測、センサネットワーク、同位体分析等を扱う。解析・評価は水循環の自然変動に加え、気候変動に伴う変化、産業化や人口動態などの人間社会の変化が与える水循環への影響も含める。予測は、様々なスケールの水循環モデルや統合モデルの開発を扱う。応用として、ダム洪水調節操作、観測データ連携活用などの水防災への活用についても記述する。基盤的研究を元にした、水資源の持続可能な利用と管理として河川管理支援やデータ配信、デジタル化等の具体的取り組みに加え、ウォーターフットプリント等の概念の提示も含める。

（2）キーワード

気候変動適応、SDGs、超高解像度水文学、気象水文連携、ダム事前放流、アンサンブル予測、フェーズドアレイ気象レーダー、データ同化、準実時間予測、危機管理型水位計、短時間降雨予測、レーザー分光分析法、同位体分析、地下水枯渇、河川流域統合マネジメント、水循環基本法

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

水は生命維持と健康で文化的な暮らしに不可欠である。産業や食料生産も大量の水消費に支えられている。一方、洪水や渇水は甚大な被害をもたらす。世界では風水害が地震などよりも主要な自然災害であり、日本でも発生頻度や損害保険金の支払額からみて最も深刻な自然災害は風水害である。温室効果ガス（GHGs）排出による気候変化が水循環の変化をもたらし、風水害や干ばつの災害強度や発生頻度増加に影響する。このように水循環とそれにともなう物質循環の測定、理解と予測は豊かで安全な社会の構築に不可欠である。国際的な観点からも、SDGsには水や衛生の利用可能性と持続可能なマネジメントの確保の目標をはじめ、貧困の撲滅、食料安全保障と農業、健康、エネルギー、女性の平等の実現など水と密接に結びついた目標が多く設定されている。水は国際的な戦略物質として利用されつつあり、水資源開発や水の輸出入、水処理など水ビジネスが国際的に拡大している。 ESG投資を通して水リスクの概念も、企業経営に急速に浸透している[1)]。

［研究開発の動向］

水循環研究は、主に水文学を中心とした素過程を探求する基礎的研究と、洪水警戒情報の発信やダムの運用などのより人に結びついた応用的研究に粗く分けることができる。さらに、基礎的研究にはリモートセンシングに代表される観測技術関連研究と全球モデルに代表されるような数値計算関連研究とに分けることができる。これらの区別は明確でなく、各分類をまたがる研究も多い。

❶ 水循環に関する観測技術関連研究

降水の観測技術として、降雨観測用レーダーの開発が進んでいる。現在では電気系統、通信系統の技術開発が進み、ネットワーク化された降水量推定および短時間降雨予測が行われている。人工衛星を用いた観測も活発で、世界初の衛星搭載降雨レーダー（Precipitation Radar：PR）を搭載した熱帯降雨観測衛星（Tropical Rainfall Measuring Mission：TRMM）は、長期運用（1997–2015）により海陸問わず均質な長期降水観測データを提供し、鉛直分布の観測により降水システムの理解を飛躍的に高めた。

その後継機として二周波降水レーダ（Dual-frequency Precipitation Radar：DPR）を搭載した全球降水観測（Global Precipitation Mission）計画主衛星が2014年から運用中である。様々な衛星観測をもとに、JAXAが全球衛星降水マップ（Global Satellite Mapping of Precipitation：GSMaP）を発信している。衛星観測による積雪分布の把握については、可視近赤外センサーによる積雪面積の抽出に加え、受動型マイクロ波センサーによる積雪深・積雪水量の推定も試みられ、降水と同様な全球・長期間をカバーするデータセットが作成・公開されている[2)]。地域・流域スケールでは、航空レーザー測量に基づく詳細な積雪分布の把握も試みられている。

河川の観測技術として、河川流量観測法について、低水流量観測では流速計法、高水流量観測では浮子法が古くから実務に利用されてきている。粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry：PIV）や粒子追跡法（Particle Tracking Velocimetry：PTV）、LSPIV法（Large Scale PIV）、STIV法（Space-Time Image Velocimetry）が実用化されている。3次元流速観測が可能な超音波流速計（Acoustic Doppler Current Profiler：ADCP）も広く用いられている。最近では、河床変動計測と一体となった流量観測手法や電波式流速観測、横断計測の技術開発が進んでいる。また、電波式流速計の風速による影響評価は大きな課題の一つである。 TPOに応じた観測手法の適用が進んでいるものの、各手法の不確実性評価、適用判断の基準設計や統計データの連続性等の課題を解決しなければならない。流体力学の数値解法やシミュレーション技術の高度化が進む中、特に河川の実現象の計測、モニタリング技術のさらなる高度化が必要である。

同位体を利用した水循環のモニタリング研究の歴史は古く、世界規模の降水同位体モニタリングが1961年から実施されている。水分子を構成する水素・酸素の安定同位体をトレーサー（追跡子）として用いる手法が降雨流出・地下水流動・蒸発散・大気水循環などの各過程について適用されている。水素や水中溶存炭素・塩素などの放射性同位体も年代測定に用いられている[3)]。これらの同位体利用研究により水の起源・流動経路・滞留時間などの情報が実測値にもとづいて得られるようになっている。質量分析法に代わる新たな世界標準としてレーザー分光分析法が普及し、航空機観測や衛星リモートセンシングなどに応用されるとともに、観測値を時空間的に補間して同位体マップを描くアイソスケイプ手法が2000年代以降大きく進展した。沈み込む海洋プレートからの脱水やマグマによる水輸送など、大深度地圏水循環に関する知見も蓄積されつつある。

蒸発散の観測研究の手法として、植物の茎や幹内を流れる樹液流速の測定により、あるいは年輪に含まれる炭素の安定同位体比の情報から、それぞれ森林樹木による単木蒸散量を見積もる安価な技術が普及しつつある。さらに酸素や水素の安定同位体比から、降雨中の雨水の動態を解明する技術が開発されつつある。これらの技術は、森林管理による蒸散量や森林内の水移動の変化を予測する技術を開発する上で、非常に有効な技術である。全体として、より短い時間スケール、より広域を対象とした蒸発散量の評価へ進むとともに、蒸発散の構成成分を蒸散、地面蒸発や遮断蒸発に分ける努力が続けられている。

❷ 水循環に関する数値計算関連研究

降水の数値計算研究として、温暖化に伴う降雪・積雪量の減少や融雪流出の早期化だけでなく、アンサンブル気候予測データベース（database for Policy Decision making for Future climate change：d4PDF）を用い、将来気候のもとでの豪雪の規模や発生頻度の変化に関する検討事例も報告されている[4)]。特に全球気候モデル（Global Climate Model：GCM）を用いた研究は急速な発展を続けている。統計的ダウンスケーリングや力学的ダウンスケーリングによる高分解能化技術やバイアス補正の技術の発展が顕著で、従来の地域的な分析から、さらに小さい都市街区規模の範囲の詳細な水文分析が進んだ。複数のGCMや温暖化シナリオ、社会シナリオを組み合わせたデータを用いた分析、予測について、確率手法を用いた不確実性分析を取り込み、将来の経済評価や適応策の検討を行う手法がいまや一般的になってきた[5)]。渇水や洪水などの極値分析にとどまらず、水循環が環境や産業に与える将来の影響にまで研究対象を広げ

ている[6)]。

河川の数値計算研究として、降雨から流量を推定する手法は、数値地図情報を用いた分布型物理流出モデルが現在の主流になっている。日本発の無償ソフトウェアiRIC（International River Interface Cooperative、河川の流れ・河床変動解析ソフト）や、RRIモデル（Rainfall–Runoff–Inundation、降雨流出氾濫モデル）、CaMa–Floodモデル（Catchment–based Macro–scale Floodplain、全球河川流下モデル）は、現象解明や予測に関する科学研究のみならず、洪水解析・予測の実務にも応用されている。モデルが対象とする範囲も、これまでの流出モデルが主に対象としてきた流域単位から、全国規模、全球規模に拡大してきた。多地点の観測情報を活用した広域俯瞰的な研究によって、この分野の目標の一つである、観測情報の不十分な河川流域における水文予測（Prediction in Ungauged Basins: PUB）の実現も現実味を帯びてきた。さらに、リアルタイムの水位観測データを利用したデータ同化手法の導入や長時間アンサンブル降水予測の応用研究も進む。

地下水の数値計算研究として、IIASA（International Institute for Applied Systems Analysis、国際応用システム分析研究所）が地下水を含めた地球規模水循環水資源モデルを開発し、人間活動のデータ、GRACE衛星観測データ等を駆使して、地下水の枯渇化を視覚化している[7)]。表流水と地下水を統合したモデルは、水と熱の循環過程をモデル化するとともに、様々なセクターの水利用もモデルに反映することによって、水資源の短期・長期予測にも応用されている。

❸ 洪水災害防止・軽減への応用研究

応用研究では、近年の水災害の激甚化を背景として、上記の気象・水文予測研究成果を活かした洪水災害の防止・軽減への応用への期待がますます高まっている。例えば、既に述べた洪水予測の精度向上とともに、その気象・水文予測技術を活かしたダム貯水池運用の高度化である。1990年代頃からは初期の人工知能技術を活用したダムのリアルタイム操作支援に関する研究が始まり、2000年代には既存貯留施設の有効活用によって大規模な出水への対応や利水安全性の向上を図るダム貯水池運用の高度化に関する研究が行われてきた。その中で、2019年に政府が設置した「既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議」において、「既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針」が策定された。これは近年高度化が進展している降雨予測情報を利用し、治水容量に利水容量の一部を加えて洪水調節に活用できるようにするために、あらかじめ事前放流を行うことによって洪水調節のための空き容量を増大させることにより、約570基の治水ダムはもとより、本来治水目的を有しない約900基の利水ダムも含めた既存ダムの洪水調節機能の強化が目的であり、2020年の出水期から社会実装が始まっている。一方で、ダム操作支援のみならず大河川での洪水予測にとって、中長期（3時間～数日スケール）降雨予測精度は未だ十分とは言えないため、EUや米国、日本などで提供されている現業アンサンブル気象予報を活用し、洪水予測にも信頼性情報を付与するアンサンブル予報を導入する研究も行われている[8), 9)]。急峻な河川が多く、雨水の流出時間が短い傾向にある我が国ではこうしたきめの細かい操作が必要なこともあり、この研究分野では世界をリードしている。

グリーンインフラについては、各国で多面的に注目されており、洪水防災施策としてはスポンジシティ等の呼称で研究や実装が行われている。

損害保険企業では洪水、台風など水災害に関する支払いが上位の多くを占めており、水災害リスクのより正確な情報は継続して求められている。

❹ 全球水循環変動推計

ローカルな洪水や渇水も、本をただせばエルニーニョ南方振動や気候変動などに伴う地球規模の水循環変動によって生じており、その観測と理解、予測技術の向上は国際連合教育科学文化機関（UNESCO）の「国際水文学十年計画」（1965～1974年）以来の主要テーマである。地球温暖化に伴う気候変動など

の地球環境問題が国際的な課題となった1990年代以降、大気モデルと陸面モデルによる全球水循環変動推計などによる世界の水需給バランス推計や気候変動が水分野を通じて社会に及ぼす影響の推計などにおいて日本が世界をリードしている。

2021年8月に公開されたIPCC第6次評価報告書第1作業部会報告書「気候変動 - 自然科学的根拠」では第8章で、「Water cycle changes（水循環の変化）」が設けられた。第5次評価報告書までの報告でも、水循環に関する内容は記述されていたが、単独の章での水循環は初めてであり、近年の研究成果が反映されている。2022年2月に公開のIPCC 第6次評価報告書第2作業部会報告書「影響、適応、脆弱性」では第4章で「Water（水資源）」が設けられているが、こちらは継続して水資源に関する章が設けられている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

❶ 流域治水

気象・水文予測情報などを水災害防止・軽減に応用する研究に関連して、社会的な課題として近年急速に重要性が高まっているのが流域治水の推進である。明治時代以降、西洋技術を導入して河川の洪水を河道から海へできるだけ早く流すとともに連続堤防で氾濫原を守る近代治水が推進されてきたが、近年の豪雨災害の激甚化・広域化と気候変動による更なる降雨外力（ハザード）の増大傾向に直面する中で、堤防・ダムといったハード整備のみでは水災害リスクを十分に軽減できないことが明らかになりつつある。このため、洪水予警報やハザードマップ等のリスク情報充実に基づく避難体制強化や住まい方・まちづくりの工夫などのソフト対策を含めて、ハード・ソフト一体で被害軽減・早期復旧・復興のための対策を多層的に進めようとする「流域治水」が、水防災・減災のみならず気候変動適応のためにも求められている。したがって、既述の洪水予測の精度向上に基づく避難判断支援やダム貯水池における洪水調節操作の高度化の研究[10)] に加えて、雨水・流水貯留機能の拡大（例：遊水地、かすみ堤、田んぼダムの効果の定量評価に関する研究[11)]）、洪水氾濫の制御、リスク情報に基づく災害に強いまちづくり等の取り組みに関する研究も注目されている。既存の河川・ダムインフラの最大限活用も大きな課題であり、大規模ダムの新設が難しい状況下で、既設ダムの再生と長寿命化に向けた技術開発も行われている。ディープラーニングを含む近年の機械学習の研究が進み、物理的な予測とのハイブリッド手法にも期待が高まる。

❷ 降水に関する観測

近年、水循環分野での雨量観測技術の進展が顕著である。 X帯に続き、C帯のレーダーも二重偏波ドップラー化されて雨量推定精度が向上した。インターネットとスマートフォンの普及に伴い、雨量推定、短時間降雨予測、3次元情報の利用、出水予測等の利用が促進されている。レーダー観測において、レーダーの仰角に起因して、レーダーから遠い高強度を計測する際に上空を探知することになるため、地上雨量と異なる降雨強度となる。降雨強度の鉛直方向変化（vertical profile of reflectivity：VPR）[12)] を勘案し、推定値を算出する解決策が検討されている。また、3次元で降水システムを測定するフェーズドアレイ気象レーダーが開発されている[13)]。30秒で天球内のレーダー反射因子（radar reflectivity factor）をすべて観測できる点が革新的である。レーダーで降水強度を推定し、短時間降雨予測を行う数値計算技術も進展している。スーパーコンピュータ「富岳」を使い、30秒ごとにフェーズドアレイレーダーのデータをデータ同化し、30分先までの局所ゲリラ豪雨を予測するビッグデータ同化手法も開発されており[14)]、今後の更なる計算能力の向上などにより30分以上の降雨予測に対しても期待が持てる。

衛星観測ではTRMMの後継ミッションである全球降水観測（Global Precipitation Measurement：GPM）の主衛星に2周波降水レーダーが搭載されたことで、雪や弱い雨も観測可能となった。流量観測においても無人航空機（Unmanned aerial vehicle：UAV）や設置カメラ画像を用いた観測、複数の観測

の様々な組み合わせが試行されている。一方で、情報量が膨大になり、解釈や理解を困難にしている事例もある。

観測データ利用について、河川管理（ダム管理を含む）分野だけでなく、道路や下水道の管理分野への利用研究も行われている。例えば、高性能レーダ雨量計ネットワーク（eXtended RAdar Information Network：XRAIN）のレーダー情報について、豪雪地帯での道路除雪支援[15]や吹雪による交通障害防止[16]への活用、都市域での道路交通情報と組み合わせた豪雨時の冠水等による交通障害検知への実装等が期待される[17]。

❸ モデル開発などを含むDXに関連するトピックス

水循環モデル開発では、ダム貯水池操作や運河導水、用途別取水、用途別水需要を推計するための人間水管理・水利用モデル、地下水の側方方向の流動も含む陸面過程モデルや、水温や貯水池操作を含めて氾濫を考慮可能なグローバル水動態モデルなどが開発され、現時点では日本が世界をややリードしている。水文量の推定値を実用に用いるための応用研究においても進展がみられる。

観測ノイズのため精密な氾濫計算には利用が難しかった全球デジタル標高データの大幅な改良、国際共同による準実時間でのGSMaPの配信など境界条件情報の向上により、精度の良い実時間での全球水循環モニタリングが可能となりつつある。

都市およびその周辺域での大気環境の再現精度は、計算機の能力向上と、空間平均モデルやk–εモデルなどの乱流計算スキームの向上を背景に、飛躍的に向上しつつある。従来は理想的な条件下でシミュレーションされていたが、現在はより大規模な大気場の再現や、メソ気象モデルとのカップリング、データ同化などが行われ、現実に近づけた大気場でのシミュレーションに技術開発ターゲットがシフトしている。今後の開発課題として、複雑な3次元構造を持つ都市内部のストリートキャニオン（ビル間）における大気乱流や放射伝達など、実際に人間が生活し、往来する場の熱環境、放射環境の再現が課題である。そのためには、新たな乱流スキームや放射スキームがあげられる。人間の生活場としての快適な都市の大気/放射環境を実現するためには、大気場のシミュレーションに加え、大気場に対する人体の生理反応のモデリングが必要となる。

設備管理へのUAVやロボット、AI、IoT、ICT、AR、VR技術などを活用したデジタル・トランスフォーメーション（DX）やそれを通じたインフラ維持管理の効率化の推進等も最近のトピックスである。UAV活用に関して、平常時の河川の維持管理のみならず、豪雨時でも飛行可能な機器の開発を国が進めている。

様々な波長データの分析や複数機のデータ分析のためのソフト開発が進み、高分解能の標高データや地峡面分類データが容易に手に入るようになった。加えてAIによる入力データや誤差の補正が行えるようになり、水循環モデルの精度向上の試みが進んでいる。緑色レーザーによる水中内の情報も手に入れられるようになり、土砂や水質、河床データの取得も発展してきている。

❹ 地下水熱利用ヒートポンプシステム

地下水の恒温性を利用したヒートポンプシステム（地下水熱利用ヒートポンプシステム）が近年注目されている。10 m以深の地中温度は、年間を通じて一定であり、その温度はおおよそ平均気温プラス1℃から3℃である。この特性を利用して、夏には冷熱を使った冷房、冬には温熱を使った暖房が行われている。

❺ そのほか行政の取り組みや企業経営に関するトピックス

我が国で相次ぐ線状降水帯への被害低減を目指し、2021年度補正予算にて257億円が気象庁に配分され、水蒸気等の観測機器の整備や予測モデル高度化など「線状降水帯の予測精度向上等に向けた取組の強化・加速化」が進められている。まだ予測精度はかなり低いものの、社会のニーズに応えるため2022年6月から、気象庁による線状降水帯予測が開始している。

国際社会におけるトピックとして、2022年4月に熊本市で第4回アジア・太平洋水サミットが開催され、熊本水イニシアチブが発表された。アジア太平洋地域における水を巡る社会課題の解決と持続的な成長への貢献に向けて、我が国の水に関する科学技術や先進技術を生かした質の高いインフラ整備など今後5年で5,000億円規模の支援を行うとしている。

多雨地域に位置する我が国では近年は洪水災害への対策が中心だが、水資源不足で大河を共有する大陸国では渇水災害、干ばつへの関心も継続して高い。気候変動による水循環の変化が与える影響は各地域ごとに異なるため、IPCC第6次評価報告書においても、各地域での影響が記述されている。欧米が主導するESG投資では水に関する企業評価も見られている。我が国は水分野で多くの国際貢献を行っているが、ESG投資などでの国際社会での議論を主導できていない。水防災、水リスク分野には水害保険企業だけでなく、ビッグデータ活用企業のGoogle社が参入しており、これまでの行政、海外という範疇から、ビジネス、国内にも進展しつつある。水循環のリスク情報の視覚化ツールなどの研究成果を通した産学官協働の推進が重要となる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

■国内

・文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」（2022～2026年度、各課題1億円程度/年度予定）
・環境省/ERCA 環境研究総合推進費 S-18『気候変動影響予測・適応評価の総合的研究』（2020～2024年度、全体3億以下）
・国土交通省 革新的河川技術プロジェクト（2016年～）
・内閣府 SIP第2期『国家レジリエンス（防災・減災）の強化』（2018～2022年度、全体25億円予定）
・内閣府/JST ムーンショット型研究開発制度　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』（2022年度～、コア研究9～12億/5年度、要素研究5千万円/3年度）
・JST COI-NEXT地域共創分野【本格型】「流域治水を核とした復興を起点とする持続社会」（2021～最長2030年、2億円以下/年）
・科研費 基盤S「衛星地球観測による新たな全球陸域水動態研究」（2021～2025年度、全体5千万～2億）
・科研費 学術変革A「ゆらぎの場としての水循環システムの動態的解明による水共生学の創生（水共生学）」（2021～2025年度、全体5千万～3億）

■国外

・国際水文学科学会『万物流転』活動（IAHS：International Association of Hydrological Sciences）“Panta Rhei”（2013～2022年）
・温暖化影響評価モデルに関する分野横断型相互比較プロジェクト（ISIMIP：Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project）（2012年～）地球規模の温暖化の影響評価に関する国際プロジェクト

（5）科学技術的課題

❶ データ同化や推定精度の向上

降水観測ではフェーズドアレイ気象レーダーなどの高時空間分解能レーダーからの同化による力学的降雨予測手法の計算速度の向上と精度向上が課題である。降雪の推定精度の向上も望まれている。全球の降雨推定において衛星利用が実用化され、TRMM、GPM搭載のレーダは共に精度の高い降水観測を実施するが、時空間的カバー率が極めて低い。 GSMaPでは、マイクロ波放射計を利用した観測頻度の向上および長期プロダクトの作成を実現している。今後の課題として、陸上降水および固体降水を対象としたマイ

クロ波放射計降水量推定アルゴリズムの改良、ひまわり8号に代表される第3世代静止気象衛星データの降水量推定への活用、中長期的には静止気象衛星へのマイクロ波センサの搭載、が挙げられる。これらの技術的課題を現象理解および検証[18]も含め包括的、かつ連動性を高めることが極めて重要である。我が国ではJAXAの主導でGSMaPの開発改良・GPM後継機の開発を行っているが、国際競争と国際貢献の観点からも今以上の連動性が求められる。ゲリラ豪雨に見られるような洪水の局所化（鉄砲水など）に対応するため、簡易型水位計の設置が進められた。気象庁が出す河川の危険度分布と並んで中小河川における流量や水位、さらにはその周辺の浸水リスクまでを直接予測する技術の開発が課題である。粒子フィルターなどの同化手法による洪水予測の応用が進んだ[19]ものの主要河川に限られており、多地点の水位観測データを空間分布型のモデルに対して効果的に同化する研究開発も課題である。

❷ 実観測データの不足

水循環において、蒸発散は未知のことが多い。現在、理論、技術ともある程度定常的に蒸発散量を評価出来る体制が整ってきているが、測定に必要な機材が高額なため、研究目的以外では蒸発散量の測定が行われておらず、必要な場所、必要な時に蒸発量のデータが存在しないことが最大の課題である。このため、蒸発量の時空間的な分布や変化については、未解決な問題が残されている。蒸発と密接に関係する様々な現象、例えば、二酸化炭素（CO_2）の吸収・放出、農地の灌漑や水消費、気候変化などを蒸発散とともに取り組む必要がある。

地下水も観測データ不足が研究を妨げている。地下水の観測には、地下水の水位を測定するための井戸が不可欠であるが、限られた場所にしか存在せず、とくに、水源地として重要な山地などでは井戸はきわめて少ない。さらに、地下水の主たる流動場である帯水層や土壌中における物理特性は不均一性が強いため、観測された地下水の水位や帯水層の物理特性のみから地下水の流動方向や流速を理解することには限界がある。そのため、水の同位体などをトレーサーとして適用し、質的に地下水の涵養源、流動経路、流動時間などに関する情報を把握するアプローチ、あるいは数値シミュレーションにより地下水流動を推定するアプローチなども重要であるが、いずれにしろ観測データは必要不可欠である。今後は、様々な地質、地形、気候条件などにおいて、これら異なる複数のアプローチを統合し、地下水流動を把握する取り組みが益々求められる。

地下水の流動とならんで観測データが不足しているのが積雪情報である。受動型マイクロ波センサーによる積雪推定手法は、積雪の面的分布だけでなく積雪量（積雪水量）の把握も可能である一方、空間解像度が低いため地域・流域内の積雪量の把握は困難である。林床積雪や湿雪に対する推定精度の低下などの問題を克服するためには、積雪量推定アルゴリズムの改良や積雪を対象とした陸面データ同化手法の開発などが必要である。さらに、積雪・融雪モデルや衛星アルゴリズムの検証に利用できる地上観測データの不足も当該分野における課題のひとつであり、今後、湿雪地域を含む多様な積雪地域への検証サイト設置と長期データの取得・蓄積が望まれる。

台風は水災害をもたらす重大な気象現象の1つだが、中心気圧などの実観測データが圧倒的に不足している。地球上で発生する熱帯低気圧のうち、約3割もが集中する地域に我が国は位置し、さらに気候変動の影響により台風の強大化確率が高まっている。数km規模の積乱雲による線状降水帯と比較すれば、台風は長期大規模現象であり、予報しやすく水防災指針も立てやすいものの、実観測データ不足による予測不確実性の高さがその妨げとなっている。米国では海洋大気庁NOAA/空軍ハリケーンハンターズ[20]が航空機台風直接観測により、衛星や海洋観測で得られないデータを取得している。我が国でも航空機台風直接観測の基礎研究が行われている[21]が、より継続的な体制となるよう支援の充実が期待される。

多様な水文過程の理解に重要な同位体観測において、レーザー分光分析計の普及は大きなアドバンテージと言え、水蒸気同位体比や同位体フラックスの連続測定と原位置キャリブレーションがほぼ確立されつつある。アイソスケイプ手法についても、全球同位体循環モデル等の活用により高時間分解能のマッピングが

期待されており、今後実測値との比較検証によって高度化を図る必要がある。

❸ 水資源利用、水防災活用に重要なダム操作に有効活用するための研究

水循環研究の重要な目的である水資源利用、水防災活用においてダムの果たす役割は大きい一方で、課題は多い。気象・水文予測情報に基づいたダム事前放流により河川氾濫を緩和する治水防災操作の効果は高いと見込まれている。一方、予測情報の精度が不十分な場合、出水後の水位を十分に回復できないといった利水面でのリスクの増加などが懸念される。気象予測の不確実性を考慮した上での、ロバストな操作方法の開発が課題である。予測精度に関する情報が含まれたアンサンブル気象予測情報の活用が期待されているが、研究事例が不足している。アンサンブル予測に含まれる膨大な情報を、ダム操作に有効活用するための更なる研究が求められる。

❹ 気候変動に関連する水循環研究

多くのアンサンブルメンバーを持つd4PDFに見られるような数千年のデータセットによって、大規模な確率統計分析が可能となった。特に非定常性についての研究が気候変動研究と同時に進められており、ジャンプやカタストロフィー現象の分析に注目が集まっている。従来、不得手とされていたGCMによる極値の分析や温暖化の寄与を分析するイベント・アトリビューション研究も可能となりつつある。一方、これらを証明するには、長期かつ多地点の実データが必要であり、モデルと観測の両輪が必要である。

気候変動の影響はほとんどが水を通じて人間社会に悪影響を及ぼしており、気候変動影響の経済的な定量化と、適応策の費用便益、さらには、人間のwell-beingに及ぼす影響を踏まえた最適な緩和策と適応策のバランスを求める研究が喫緊に求められている。

❺ 高解像度化

世界的IT企業による技術革新等を通じて、水文学における空間解像度が飛躍的に高まっている。これを受けて、全球水文モデリングにおいても、全球1 km程度の解像度に向けて着実に研究が進展している[22)]。ただし、衛星観測やモデル計算などでは時間空間解像度の向上が見込めるものの、地上観測には同様の飛躍は見られない。地上観測情報を最小限にして高精度の情報を得るための技術、高解像度化した時に無視できなくなる諸要素（人工的な水路など）の取り込みなど、研究対象が変化しつつあり、その潮流に対応していく必要がある。

❻ 超学際研究

水循環それ自体が分野横断領域であり、これまでに流域統合、地下水を含めた水大循環モデルなどの研究が開拓されてきている。近年、デジタル化の進展に伴う基盤技術の向上やSDGs等の社会の求めを背景に、さらなる異分野連携研究が進行している。情報学と水文学の連携により、水理データの不足をAIにより補う検討がなされている[23)]。水防災では激甚化、頻発化する水災害に対して気象学と水文学の連携が一層進展している[24)]。人間活動と水循環の相互関係を一体的システムの観点から解析する社会水文学の研究が立ち上がりつつある[25), 26)]。専門知見の深化とともに超学際研究に対応する視野が重要となる。

（6）その他の課題

❶ 水文学における23の未解決問題

国際水文科学会（IAHS）は、2019年に「水文学における23の未解決問題（Twenty-three unsolved problems in hydrology（UPH）- a community perspective）」をまとめた[27)]。7つの大枠として、時間変化（Time variability and change）、空間変化と大きさ（space variability and scaling）、極値の変化（variability of extremes）、境界水文学（interfaces in hydrology）、観測とデー

タ（measurements and data）、モデル化（modelling methods）、社会との境界（interfaces with society）に区分されている。23項目の全てが日本の水循環研究にも当てはまることであり、今後、これらの問題への資源投入が期待される。

❷ 健全な水循環の維持・回復のための流域の総合的かつ一体的なマネジメント

日本の水循環研究は政策的課題の影響を強く受けてきている。水循環基本法（平成26年法律第16号）は、多くの関係機関にまたがる水循環施策を総合的、一体的に推進することを基本的理念としている。2021年には同法の一部改正が行われ、「水循環に関する施策」に「地下水の適正な保全及び利用に関する施策」が含まれることが明記された。その上で内閣官房の水循環政策本部（本部長：内閣総理大臣）では、水循環基本法に基づき、政府が水循環に関して講じた施策を、通称「水循環白書」にまとめ、毎年国会に報告している。この白書で、科学技術振興の観点からは、①流域の水循環、②地下水、③水の有効利用、④水環境、⑤全球観測の活用及び⑥気候変動の水循環への影響に関して取り組まれたさまざまな調査研究プロジェクトの概要と成果が報告されている。健全な水循環の維持・回復のための流域の総合的かつ一体的なマネジメントを推進するために、関係する行政などの公的機関、事業者、団体、住民等が相互に連携して活動するために流域水循環協議会を設置し、流域の保全や管理、施設整備及び活動の基本方針を定めた「流域水循環計画」を策定して共有することになっている。計画の目標や目標達成のために実施すべき施策は、この計画を各地域の流域の関係者が共有し、相互に協力することによって森林、河川、農地、下水道、環境等、水循環に関する各種施策の連携のもと、効果的な課題解決が図られることになる。「水循環」に関するさまざまな活動の評価は「流域水循環計画」を策定し実行していく上で、何に貢献することにつながるのかをひとつのメルクマールにすべきである。

ここ数年、我が国では水災害が発生しているが、2022年も様々な事故や災害が耳目を集めた。2022年5月に愛知県豊田市を流れる矢作川の明治用水頭首工で起きた大規模な漏水により、工業用水と農業用水の給水が停止し、8月まで使用制限となった。これは多量の水が必要な企業や農業等のユーザー側の観点でも、インフラ老朽化などに伴う給水途絶という水資源リスクが顕在化した象徴的な事故であった。2022年9月には令和4年台風15号の大雨によって、静岡市清水区を流れる興津川の承元寺取水口に流木やがれきなどが流れ込み、6万を超える世帯で生活用水の長期断水が発生した。この2つの事例だけをみても、今後さらに進むインフラ老朽化、気候変動適応などに対して、我が国で流域の総合的かつ一体的なマネジメントの推進を加速する必要性を示したものといえる。

❸ 世界的な水資源不足に対する持続可能性に係わる課題

上記❷の取り組みは、わが国における健全な水循環を維持・回復に寄与するのみにとどまらない。世界各国がそれぞれの自然・社会条件のもとで抱えている水循環にかかる課題を解決する上で、わが国がこれまで蓄積してきた、また蓄積しつつある知恵と経験を活かして、国際社会の中で応分の役割を果たしていくための基盤形成につながる。さらには、いわゆる「水ビジネス」としてわが国の経済成長の原動力になることも期待される。

世界的に水資源の不足は深刻であり、灌漑用途などのため枯渇性の地下水の過剰な汲み上げなどの問題が発生しており、持続可能性に係わる課題として注目を集めている。先進国都市部などの生活において直接的に利用した水だけでなく、世界の多くの水資源を利用していることを可視化するため、製品やサービスの提供にどの程度水が使用されたかを示すウォーターフットプリントという概念や、食料や製品の輸出入にあたって、その生産に用いられた水資源をバーチャル・ウォーター（仮想水）として推計する手法などが提案され、欧州を中心に徐々に普及し、ESG投資における企業の評価指標への取り込みが話題となっている。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	●レーダーを用いた雨量観測の精度向上が進められている。衛星搭載降水レーダを世界で初めて開発するなど、世界をリードしている。 ●ダム有効活用に関する基礎研究で世界をリードしている。 ●地球規模の水循環や気候変動の影響解析に関する研究が体系的に実施されている。
	応用研究・開発	○	→	●水文モデルの生態、産業、人間活動などへの利用が急速に進んでいる ●ダム有効活用や柔軟運用、連携運用などの研究が世界をリードしている。 ●地方自治体と大学・国研との学官民連携や、気象分野などの異分野と連携により、水防災につなげる水文学分野の応用研究が行われている。 ●広域の中小河川の流出予測の開発が進んでいる。
米国	基礎研究	◎	→	●地球規模の水循環や気候変動の影響解析に関する研究が体系的に実施されている。 ●衛星を利用した全球スケールの基本データの構築で先行し続けている。
	応用研究・開発	◎	↗	●NSFのINSPIREで地球表面水文モデルの開発が急ピッチで進められている。 ●Water CouncilやWater Startなど、行政と大学の企業が連携して事業化する技術開発や研究開発の枠組みが構築され、応用研究や革新的な技術開発が進んでいる。 ●近年のエネルギー、食料、水の持続的な供給への関心の高まりにより、大学や研究機関などが急ピッチでモデル開発などを進めている。
欧州	基礎研究	○	→	●第7次フレームワークプログラム（FP7）からHorizon 2020を通して水の効率的な利用技術のイノベーション促進を図っている。 ●モデル開発やシミュレーション分析においては、ウォーターフットプリントなどの新しい基本概念の提唱と普及には圧倒的な伝統と力がある。灌漑農地分布地図など、独創性と重要性の高いデータを収集・公開するなど分野全体をリードしている。 ●英国でHyporheic帯（伏流帯）（HypoTRAIN）や応用統計水文学などの研究プロジェクトがEUのファンドで行われており、Brexit後の展開に懸念がある。 ●ドイツのハノーバー大学を中心とするグループが、躍進的な進歩を遂げている並列計算技術を生かした、大気乱流シミュレーションモデルの開発を行っている。近年では、実際の都市計画などへの貢献を念頭に、より現実に近い計算設定での大気乱流シミュレーションが可能になりつつある。
	応用研究・開発	◎	→	●Green Blue Cityの研究プロジェクトなど、都市雨水管理とグリーンインフラの応用研究が、多様な利害関係者を含めて展開されており、先駆的な取り組みが実施されている。 ●人間活動を含む全球水文モデルが複数、精力的に開発されている若く才能のある人材も引き続きこの分野に流入している。 ●英国ではUKCIPが洪水のソフト適応策を充実させている。渇水も同様で複数の事例研究、実施を行っている。 ●スイス連邦工科大学チューリッヒ校が大学世界ランキング（ARWU2020）の水資源分野で世界1位で、モデル開発で質の高い成果を出している。 ●オランダのユトレヒト大学、アムステルダム自由大学に傑出した全球モデル分野の若手研究者が集結している。デルフト工科大学が水文環境分野で質の高い研究を行っている。
中国	基礎研究	○	→	●全球スケールの水文研究にあまり関心を持っていないようである。
	応用研究・開発	○	→	●現政権が強力に開発を推進しようとしている雄安新区にかかわる水環境整備、水資源確保、都市洪水対策研究が急激に発展しようとしている。 ●モデル分野には優れた研究者が多く、予算が付けば大きく飛躍するポテンシャルは秘めている。

韓国	基礎研究	△	→	●全球スケールのモデルにほとんど関心を持っていない様子である。
	応用研究・開発	△	→	●研究者の絶対数が日本よりもさらに少なく、複数の分野を１人の研究者が担わざるを得ない状況である。

（註１）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

（註２）「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている　○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註３）「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・水力発電・海洋発電　（環境・エネ分野　2.1.6）
・気候変動予測　（環境・エネ分野　2.7.2）
・農林水産業における気候変動影響評価・適応　（環境・エネ分野　2.8.2）
・都市環境サステナビリティ　（環境・エネ分野　2.8.3）
・水利用・水処理　（環境・エネ分野　2.9.1）
・持続可能な土壌環境　（環境・エネ分野　2.9.3）
・地球環境リモートセンシング　（環境・エネ分野　2.10.1）
・社会システムアーキテクチャー　（システム・情報分野　2.3.3）

参考・引用文献

1）花崎直太「企業の温暖化適応策検討支援を目的とした公開型世界水リスク評価ツールの開発」『地球環境研究センターニュース』30 巻 7 号（2019）：346004.

2）D. K. Hall and G. A. Riggs, “MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 6（2016）,” NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.006,（2023年1月31日アクセス）.

3）山中勤『環境同位体による水循環トレーシング』(東京：共立出版, 2020).

4）Hiroaki Kawase, et al., “Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations,” *Climatic Change* 139, no. 2（2016）：265-278., https://doi.org/10.1007/s10584-016-1781-3.

5）Nurul Fajar Januriyadi, et al., “Evaluation of future flood risk in Asian megacities: a case study of Jakarta,” *Hydrological Research Letters* 12, no. 3（2018）：14-22., https://doi.org/10.3178/hrl.12.14.

6）Kei Nukazawa, et al., “Projection of invertebrate populations in the headwater streams of a temperate catchment under a changing climate,” *Science of the Total Environment* 642（2018）：610-618., https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.109.

7）和田義英「地球規模の水資源研究の現状と課題」『科学技術未来戦略ワークショップ報告書 環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター（2020）, 14-23., https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/WR/CRDS-FY2019-WR-04.pdf,（2023年

1月31日アクセス）.
8）野原大督「感染症指定医療機関の浸水想定状況と上流ダムの治水機能向上のための事前放流技術」『俯瞰ワークショップ報告書 感染症問題と環境・エネルギー分野に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター（2021）, 93-108., https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/WR/CRDS-FY2020-WR-08.pdf,（2023年1月31日アクセス）.
9）小池俊雄, 他「発電ダムの洪水調節と発電操作支援システム」『土木学会論文集B1（水工学）』77 巻 2 号（2021）：I_79-I_84., https://doi.org/10.2208/jscejhe.77.2_I_79.
10）Gökçen Uysal, et al., “Real-Time Flood Control by Tree-Based Model Predictive Control Including Forecast Uncertainty: A Case Study Reservoir in Turkey,” *Water* 10, no. 3（2018）：340., https://doi.org/10.3390/w10030340.
11）竹田稔真, 朝岡良浩, 林誠二「田んぼダムの洪水緩和効果による将来的な水害リスク上昇の抑制効果」『水文・水資源学会誌』34 巻 6 号（2021）：351-366., https://doi.org/10.3178/jjshwr.34.351.
12）大石哲「レーダ水文学の未来」『水文・水資源学会誌』31 巻 6 号（2018）：545-548., https://doi.org/10.3178/jjshwr.31.545.
13）牛尾知雄「降水をセンシングする技術」『俯瞰ワークショップ報告書 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター（2021）, 131-137., https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf,（2023年1月31日アクセス）.
14）Takumi Honda, et al., “Development of the Real-Time 30-s-Update Big Data Assimilation System for Convective Rainfall Prediction With a Phased Array Weather Radar: Description and Preliminary Evaluation,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 14, no. 6（2022）：e2021MS002823., https://doi.org/10.1029/2021MS002823.
15）増田有俊, 他「XRAINを用いた冬期降水量推定精度の向上」『土木学会論文集B1（水工学）』74 巻 4 号（2018）：I_85-I_90., https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.I_85.
16）大宮哲, 他「XバンドMPレーダによる地上吹雪の定量的把握の可能性」『雪氷』82 巻 3 号（2020）：145-156., https://doi.org/10.5331/seppyo.82.3_145.
17）早稲田大学「リアルタイム浸水予測システム（S-uiPS）2022年9月一般公開」https://www.waseda.jp/top/news/83042,（2023年1月31日アクセス）.
18）Toru Terao, et al., “Direct Validation of TRMM/PR Near Surface Rain over the Northeastern Indian Subcontinent Using a Tipping Bucket Raingauge Network,” *SOLA* 13（2017）：157-162., https://doi.org/10.2151/sola.2017-029.
19）辻倉裕喜, 田中耕司, 宮本賢治「水位予測における粒子フィルタ適用上の課題とその対応」『土木学会論文集B1（水工学）』72 巻 4 号（2016）：I_181-I_186., https://doi.org/10.2208/jscejhe.72.I_181.
20）Office of Marine Aviation Operations（OMAO）, “NOAA Hurricane Hunters,” https://www.omao.noaa.gov/learn/aircraft-operations/about/hurricane-hunters,（2023年1月31日アクセス）.
21）坪木和久「台風・豪雨の航空機を用いた研究」『俯瞰ワークショップ報告書 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター（2022）, 138-147., https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf,（2023年1月31日アクセス）.
22）Jean-François Pekel, et al., “High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes,” *Nature* 540, no. 7633（2016）：418-422., https://doi.org/10.1038/

nature20584.
23）富士通株式会社，株式会社富士通研究所「過去の少ない雨量・水位データで河川の水位を予測できるAI技術を開発」富士通株式会社，https://pr.fujitsu.com/jp/news/2019/08/16-2.html,（2023年1月31日アクセス）.
24）芳村圭「洪水予測、AI、歴史」『俯瞰ワークショップ報告書 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター（2022），171-180., https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf,（2023年1月31日アクセス）.
25）Yoshihide Wada, et al., “Human-water interface in hydrological modelling: current status and future directions,” *Hydrology and Earth System Science* 21, no. 8（2017）：4169-4193., https://doi.org/10.5194/hess-21-4169-2017.
26）中村晋一郎「社会水文学の世界的動向と日本での展開の可能性」『水文・水資源学会2019年度研究発表会』（東京：水文・水資源学会，2019），88-89., https://doi.org/10.11520/jshwr.32.0_88.
27）Günter Blöschl, et al., “Twenty-three unsolved problems in hydrology（UPH）- a community perspective,” *Hydrological Science Journal* 64, no. 10（2019）：1141-1158., https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507.