

## 2.2.3 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、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。このように水循環とそれ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<sup>1)</sup>。

#### [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索する基礎的研究と、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。

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、降水システムの理解を飛躍的に高めた。様々な衛星観測をもとに、JAXAが全球衛星降水量情報 (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<sup>2)</sup>。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。TPOに応じた観測手法の適用が進むものの、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。

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<sup>3)</sup>。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きている。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ープ手法が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。

蒸発散の観測研究として、植物の茎や幹内を流れる蒸散流を測定する方法や同位体比を利用する方法などが、対象が限定的ではあるが導入されてきた。森林樹木による蒸散量を見積もる技術として、グラニエ法など、樹液流速の測定値から単木蒸散量を見積もる安価な技術が普及しつつある。単木蒸散量の見積もる技術は、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。

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<sup>4)</sup>。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<sup>5)</sup>。渇水や洪水などの極値分析にとどまらず、水循環が与える環境や産業に与える将来の影響研究にまで対象とする研究分野を広げている<sup>6)</sup>。

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りつつある。洪水対策や水資源計画のソフトウェアはデンマーク水理・環境研究所の流域水循環解析統合ソフトMIKE-SHEや米国環境保護庁の雨水管理モデルSWMM (Storm Water Management Model) などの欧米製の汎用ソフトが利用されてきている。最近では、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 (Catchment-based Macro-scale Floodplain、全球河川流下モデル) も国際的に高く評価され、国内外で利用され始めている。国内では、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数時間先の降雨データを用いた予測手法などの開発も進んでいる<sup>7)</sup>。安価な危機管理型水位計を全国に配置して、詳細な洪水予報も検討されており、その一部では洪水水面形の時間変化から流量を推定できた事例が報告されている。

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た結果を報告している<sup>8)</sup>。

応用研究では、ダム貯水池運用の高度化が洪水災害への対策として、期待をますます高めている。1990年代頃から気象・水文予測情報と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った。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機運が高まり、ダムの弾力的運用に関する研究が行われてきた。近年、頻発化している広域の洪水被害に対し、アンサンブル予報を導入する研究が行われている<sup>9)</sup>。社会実装に向け、2019年に内閣官房「既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議」が設置され、電力ダムや農業ダムのような利水ダムでも治水目的に適用できるよう治水強化方針が検討された。既存ダムのある河川水系を共有する地方自治体が「治水協定」を締結するなど、実利用に向けた取り組みも進んでいる。さらに、田んぼに水を貯める田んぼダムも多くの地域で検討されてきている<sup>10)</sup>。

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「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。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

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)<sup>11)</sup> を勘案し、推定値を算出する解決策が検討されている。牛尾らにより、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<sup>12)</sup>。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。三好らはスーパーコンピュータOakforest-PACS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を開発している<sup>13)</sup>。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、貯水池管理、河川管理と言った大規模施設の管理だけでなく、下水道の管理や、道路交通情報と高性能レーダー雨量計ネットワーク (eXtended RAdar Information Network : XRAIN) のレーダー情報を組み合わせた数値計算研究が行われており、冠水等による交通障害検知への実装が期待される<sup>14)</sup>。

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。

また、観測雑音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。

水文学の推定値を実用に用いる応用研究も進んでいる。都市およびその周辺域での大気環境の再現精度は、近年の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。従来の理想的な条件下でのシミュレーションから、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、より現実に近い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。今後は、実際に人間が往来する、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の開発が必要となる。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。

気象・水文予測情報などを活用し、出水が予測される場合に多目的ダムをあらかじめ放流し、貯水位を事前に下げて洪水調節のための空き容量を増大させる事前放流操作に関する研究が注目されている<sup>15)</sup>。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ることもあり、この研究分野では世界をリードしている。また、近年、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のダム運用への利活用に関する研究も各国で行われている<sup>16)</sup>。大ダムの新設が難しい状況下で、既設ダムの高経年化対策と長寿命化に向けた技術開発が主体である。

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技術継承支援システムなど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。また、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の向上が進んでいる。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。

他に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。10m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°Cから3°C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。

### [注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・ 文部科学省 統合的気候モデル高度化研究プログラム (TOUGOU) (2017～2021年度)
- ・ 環境省/ERCA 環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクト S-18 『気候変動影響予測・適応評価の総合的研究』(2020～2024年度)
- ・ 文部科学省 気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology) (2015～2019年度)
- ・ 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program) 第2期 『国家レジリエンス (防災・減災) の強化』(2018～2022年)
- ・ 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

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。また、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共に正確な降水観測を実施するが、時空間的カバー率が極めて低い。未観測ギャップをカバーするためには高性能マイクロ波放射計シリーズに代表される観測頻度の向上および長期観測の実施、降水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による時間補完、ならびに静止気象衛星データによる降水推定手法の開発、が挙げられる。重要なことは、これらの技術的課題を現象理解および検証<sup>17)</sup>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まで詳細な洪水が予報されるようになりつつある。国交省も粒子フィルターを用いた同化手法によって高精度な洪水予報を行う準備を進めている<sup>18)</sup>。

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。また、蒸発と密接に関係する様々な現象、例えば、二酸化炭素の吸収・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。帯水層の不均一性は、地下水の流動を大きなスケールで見ただけには大きな問題にはならず、その流向や流速はおおよそ把握できる。しかし、小さなスケールが対象となる場合（例えば、土壌・地下水汚染サイトなど）には、帯水層の不均一性が地下水の流れや物質の輸送を複雑にしており、地下水位や地下水質の観測精度に影響を及ぼしている側面がある。

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、空間解像度が低い地域・流域内の積雪量の把握は困難である。また、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、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。ハリケーン大国である米国では海洋大気庁 NOAA/ 空軍ハリケーンハンターズ<sup>19)</sup> 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た<sup>20)</sup> が、より継続的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ます。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。アイソスケープ手法についても、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。

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。

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。

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1km程度の解像度に向けて着実に研究が進展している<sup>21)</sup>。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。

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<sup>22)</sup>。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<sup>23)</sup>。また、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<sup>24), 25)</sup>。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。

## 2.2 (6) その他の課題

国際水文学会 (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<sup>26)</sup>。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) に区別されている。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。

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。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。

これらの取り組みは、わが国における健全な水循環を維持・回復すること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

ための基盤となることにつながる。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意識するため、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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●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。</li> <li>●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。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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</li> <li>●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。</li> <li>●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。</li> <li>●広域の中小河川の流出予測の開発が進んでいる。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●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。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●NSFのINSPIREにおいて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。</li> <li>●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。</li> <li>●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。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●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。また、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。</li> <li>●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。</li> <li>●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。</li> </ul>

2.2 俯瞰区分と研究開発領域  
環境区分

	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 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。</li> <li>● 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。</li> <li>● 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。</li> <li>● 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。</li> <li>● オランダのコトレヒト大学、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。また、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。</li> </ul>
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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 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。</li> <li>● 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。</li> </ul>
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の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：特に顕著な活動・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 ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ その他の再生可能エネルギー発電（水力、海洋、地熱、太陽熱）(環境・エネ分野 2.1.7)
- ・ 地域熱供給（地域冷暖房）(環境・エネ分野 2.1.13)
- ・ 気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・ 水利用・水処理（環境・エネ分野 2.2.4）
- ・ 除去・浄化技術（大気、土壌・地下水）(環境・エネ分野 2.2.5)
- ・ 都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）(環境・エネ分野 2.2.11)
- ・ 農林水産業における気候変動適応・緩和（環境・エネ分野 2.2.12）
- ・ 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」『国立環境研究所地球環境研究センターニュース』, <https://www.cger.nies.go.jp/>

- cgernews/201910/346004.html (2020年10月アクセス)
- 2) D. K. Hall and G. A. Riggs, *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6*, M. Roman, D. K. Hall and G. A. Riggs (contributors), (Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2016), doi: 10.5067/MODIS/MOD10A1.006.
  - 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) H. 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 F. Januriyadi et al., “Evaluation of future flood risk in Asian megacities: a case of Jakarta”, *Hydrological Research Letters* 12, no. 3 (2018): 14-22, doi: 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, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.109
  - 7) JST 未来社会創造事業, 「都市浸水リスクのリアルタイム予測・管理制御」『科学技術振興機構』, <http://www.recwet.t.u-tokyo.ac.jp/mirai/links.html> (2020年10月アクセス)
  - 8) 和田義英, 「地球規模の水資源研究の現状と課題」『CRDS 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」』(CRDS-FY2019-WR-04) (2020): 14-23, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/WR/CRDS-FY2019-WR-04.pdf>
  - 9) 日本気象協会, 「日本気象協会、「ダムの事前放流判断支援サービス」を開始～「最大15日先」「解像度が高い」「精度が高い」予測の提供により浸水被害低減を目指す～」『日本気象協会』, <https://www.jwa.or.jp/news/2020/03/9451/> (2020年10月アクセス)
  - 10) 宮津進 他, 「田んぼダムによる内水氾濫被害軽減効果の評価モデルの開発と適用」『農業農村工学会論文集』80巻6号 (2012): 479-488, doi: 10.11408/jsidre.80.479
  - 11) 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, doi: 10.3178/jjshwr.31.545
  - 12) 牛尾知雄 他, 「フェーズドアレイ気象レーダーによる超高速3次元観測リアルタイムデータを活用した局地的風水害の防災・減災対策支援」『地域防災対策支援研究プロジェクト』, [https://all-bosai.jp/chiiki\\_pj/index.php?module=blog&eid=10561&aid=10802](https://all-bosai.jp/chiiki_pj/index.php?module=blog&eid=10561&aid=10802) (2021年1月アクセス)
  - 13) 理化学研究所 他, 「30秒ごとに更新するゲリラ豪雨予報 - 首都圏でのリアルタイム実証実験を開始 - 」『理化学研究所』, [https://www.riken.jp/pr/news/2020/20200821\\_1/index.html](https://www.riken.jp/pr/news/2020/20200821_1/index.html) (2020年10月アクセス)
  - 14) 関根正人 他, 「リアルタイムな都市浸水予測が可能に」『早稲田大学』, <https://www.waseda.jp/top/news/64900> (2020年10月アクセス)
  - 15) G. 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, doi: 10.3390/w10030340
  - 16) D. Nohara and T. Hori, “Integrated Reservoir Operation Considering Real-Time Hydrological Prediction for Adaptive Water Resources Management”, *Sustainable Water Resources*

*Planning and Management Under Climate Change* (2016) : 101-132, doi : 10.1007/978-981-10-2051-3\_5

- 17) T. 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, doi : 10.2151/sola.2017-029
- 18) 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」『土木学会論文誌B1 (水工学)』72巻4号 (2016) : I\_181-I\_186, doi : 10.2208/jscejhe.72.I\_181
- 19) Office of Marine Aviation Operations (OMAO) , ”NOAA Hurricane Hunters”, OMAO, <https://www.oma.noaa.gov/learn/aircraft-operations/about/hurricane-hunters> (2020年10月アクセス)
- 20) 琉球大学 他, 「「2017年台風第21号の航空機観測を用いた強度解析と予測実験」の結果について」『琉球大学』, <https://www.u-ryukyu.ac.jp/news/509/> (2020年10月アクセス)
- 21) Jean-François Pekel et al., ”High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes”, *Nature* 540, no. 7633 (2016) : 418–422, doi : 10.1038/nature20584
- 22) 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> (2020年10月アクセス)
- 23) 東京大学生産技術研究所, 「日本中の河川をいつでも誰でもモニタリング! ~ 『Today’s Earth - Japan』を公開~」『東京大学生産技術研究所』, <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3193/> (2020年10月アクセス)
- 24) Y. 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, doi : 10.5194/hess-21-4169-2017
- 25) 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【超学際研究による水文・水資源学の新展開の探索】』: 88-89, doi : 10.11520/jshwr.32.0\_88
- 26) Gunter Blöschl et al., “Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective”, *Hydrological Science Journal* 64, no. 10 (2019) : 1141-1158, doi : 10.1080/02626667.2019.1620507

## 2.2

俯瞰区分と研究開発領域  
環境区分