

気候レジリエンスと持続可能性の支援にむけた 水文モデル開発戦略

玉川勝徳・アブドゥル・ワヒド・モハメッド・ラスミ・久保田啓二郎・小池俊雄

1. はじめに

近年、気候変動の影響による大雨・少雨の極端化が顕著になっている。気象庁のアメダス観測データを基にした統計によると、統計期間(1976～2021年)において、大雨では、全国の日降水量400mm以上の年間日数が最近10年間で最初の10年間の約1.8倍に増加している。渇水では、日降水量1mm以上の日数が最近30年間で最初の30年間の約0.9倍に減少、すなわち無降水日数の増加を示している。「日本の気候変動2020」では、将来“大雨や短時間強雨の発生頻度や強さは増加し、雨の降る日数は減少する”とされており、今後ますます大雨による災害や渇水が懸念される。

気象の極端化に対しては脆弱性を改善・強靱化し長期的な気候の変化に適応する（気候レジリエンス）と将来にわたり対策に取り組む持続可能なシステムの構築が必要である。国土交通省では2020年に水害対策政策を河川流域全体のあらゆる関係者が協働し流域全体で水害を軽減させる「流域治水」へと転換した。

このような状況下で今後、気候の変化に伴う流域ベースでの治水、利水の施策を行うためには、大きく4つの検討すべき課題があると考えられる。

(1) 気候の変化に伴って洪水や渇水がどのように変化するか、将来の観測データがない中で河川流量等の水文要素を推定しなければならない。

(2) 気候の変化によって激甚化する洪水や渇水などの極端現象に対応するために、事象の予測能力を高めなければならない。

(3) 気候の変化は世界各地で生じており、各地域での対応への支援が必要である。

(4) 気候の変化による洪水や渇水の激甚化に対し、持続可能な開発、特に水と関わるエネルギー、食料の安定供給が必要である。

そこで本稿では、今後気候の変化に伴う流域ベースでの治水、利水の施策を考える上で求めら

れる水文モデルの性能、国立研究開発法人土木研究所 ICHARM（以下「ICHARM」という。）での水文モデル開発戦略、さらには、これらの水文モデルを使った研究・適用事例を紹介し、今後の取り組み・展望について整理する。

2. 水文モデルに求められる性能

水文モデルは流域に降った雨が河川に集まり流下する流量や氾濫を流域一体で表現する数値モデルである。本章では、第1章で列挙した4つの検討すべき課題解決に求められる水文モデルへの性能について整理する。

2.1 将来の観測データがない中での流量推定

将来の観測データは存在しない。そのため、過去～現在のデータで開発、較正、検証した水文モデルが再較正なしに、将来の気象・気候予測データを入力して安定し動き続けることが必要となる。すなわち、気象・気候予測データのような大気強制力（風向・風速・気温・湿度・日射・長波放射・降水量等）を入力可能とした物理的な水文モデルの開発が必要となる。ここで、過去～現在のデータは全球長期再解析が有効である。これは気候変動予測と基本的に同じ大気大循環モデル(GCM)の最新版を用いて、取得可能な様々な観測データを同化しているため、観測値に近い値が全球で得られる。ただし、雨量は時空間ともに局所性が強いので観測データを用いる方が望ましい。

したがって、全球長期再解析と観測雨量を入力して平時から極端事象までシームレスに長期安定的に作動する水文モデルを開発し、観測流量やその他の水文量で較正、検証することが有効である。

2.2 極端現象の予測能力の向上

極端現象の予測は、2.1で開発、較正、検証した水文モデルを用いる場合、初期値である流域の水文量（土壌水分、地下水、積雪量）の推定と、入力値である大気状態予測の精度に依存することが大きい。後者の大気状態予測は気象学、気候学の進歩によって精度向上や、不確定性の定量化が行われてきている。そこで、水文モデルとして

前者の初期値である流域の水文量を予測時にリアルタイムで精度よく推定できることが求められる。

2.3 全球への適応性

2.1で説明した全球長期再解析は、2.2の初期条件推定のために必要な熱・水収支に関わる全ての要素を全球で提供する。降水量の全地球リアルタイム観測も、衛星降雨プロダクトと限られた地上観測データとの統合によって推定精度が向上している。したがって、2.1、2.2で構築される水文モデルは、検証のための流量観測が得られる地点では、全球どこでも適応可能となる。

2.4 水、エネルギー、食料問題への適応性

水循環とエネルギーでは、特に水力発電ダムの最適運用による洪水被害の軽減と、発電量の増加による気候の変化への適応と緩和の両方への貢献が必要である。すなわち流出予測を用いたダム操作と、ダム操作による流域水循環の影響を表現できるシステムの開発が必要となる。水力発電ダムが融雪や氷河の融解を利用する場合には、特に降雪・積雪・融雪プロセスの水文モデルへの組み込みが鍵となる。水循環と食料問題では、農作物は根系から吸水し葉での光合成プロセスで蒸散することによって成長することを踏まえ、農作物の生長、施肥や灌漑等のモデルと水文モデルとの統合が必要となる。

3. ICHARMでの水文モデル開発戦略

第2章で列挙した水文モデルに求められる性能を有するモデルシステムを開発するためにICARMでは、大気-陸域結合系と斜面-河道流出系のモデル化とその統合化に取り組んでいる。統合化した水文モデルでは大気強制力（風向・風速・気温・湿度・日射・長波放射・降水量等）を入力し、河川流量や低平地での浸水深、また流域内における土壌水分、地下水位、積雪深、蒸発散量等の空間分布を出力する。本章ではこれらの出力を得るためのモデル開発戦略を整理する。

3.1 大気-陸域結合系のモデル化

気象学分野では大気と陸面での熱・水応答特性をGCMに組み込むために様々な陸面スキームが開発されてきた。Wang et al²⁾は、その陸面過程と土壌層の鉛直浸透過程を組み合わせた1次元モデルを開発し（以下「Hydro-SiB」という。）、分布型流出モデルに組み込んでいる。このHydro-

SiBを活用し、GCMおよびそのダウンスケーリング、降積雪・融雪モデル、植生モデルとの結合に関するモデルシステムを開発している。

3.1.1 GCMとそのダウンスケーリングとの統合

牛山ら²⁾は、領域気候モデルを用いたGCMの力学的ダウンスケーリング、また、気象庁や米国国立環境予測センターの全球予報モデルを境界条件とした短期(数日)、季節(数か月)のアンサンブル降水量予測を実施している。ICARMではこれらのモデル出力をHydro-SiBへ直接入力し、地表面での熱・水収支とともに、土壌水分や地下水位の変動を計算するスキームを開発した。

3.1.2 降雪、積雪、融雪、流出システムの開発

Naseer et al³⁾らは、大気モデルの出力を用いて流域内の標高に応じた3次元の気温分布を与え降雪の雨・雪の判別のための気温分布を精緻化させ降雪モデルを高度化した。さらにHydro-SiBと結合された3層の積雪・融雪モデルに導入し、雪水文過程モデルの精度を飛躍的に向上させた。

3.1.3 水稲の生長シミュレーションモデル(SIMRIW)との結合

ICARMでは東北大学と共同し、Hydro-SiBと水稲の生長シミュレーションモデル(SIMRIW)と結合させ、Hydro-SiBが出力する土壌水分データを入力し、大気-陸面での熱・水応答過程を共有し、稲の生育をリアルタイムに検討可能なモデルを開発中である。これにより、洪水、渇水や気候の変化が食料生産に与える影響を定量的に評価可能となる。

3.2 斜面-河道流出系のモデル化

山地では斜面、河道の勾配と水面勾配を同一と見なせる運動学波の近似が可能である。また、対象流域の末端までの洪水到達時間が勾配と河道距離で決まることを利用すると、同じ洪水到達時間領域を一度に計算するマクロ化の考え方の導入が可能で、計算時間の短縮が可能となる。そこで東京大学では分布型生物圏水文モデル(DBHM)を開発した(Yang et al)。

一方、低平地では水面勾配の影響が大きくなり、氾濫はもとより、河道流下においても拡散波近似の導入が必要となる。また降雨流出過程から氾濫までシームレスな計算が望まれる。そこでICARMでは降雨流出氾濫モデル(RRI)を開発した(佐山ら)。

3.3 大気-陸域結合系と斜面-河道流出系の統合

大気モデルと陸域水文モデルが結合され、河川流量観測データ等を用いてモデルパラメータを較正・検証することにより、渇水～洪水までシームレスに長期間実行しても途中で再度較正することなく安定的な表現が可能となる。リアルタイムに大気強制力を入力すれば極端事象予測に重要な流域の初期値をリアルタイムに得ながら流量や氾濫の計算が可能となる。さらに、気象予測や気候変動予測データを入力すれば将来予測も可能となる。

3.3.1 山地を対象とした統合モデルシステム

Hydro-SiBとGBHMを統合した運動学波を基本とする水・エネルギー収支分布型水循環モデル(WEB-DHM)では流域内を複数のサブ流域に分割した後、フローインターバル(同じ洪水到達時間の領域)毎に流れを計算することで処理時間の短縮に貢献している。ICHARMではWEB-DHMに3.1.2の雪水文過程モデルを組み合わせ、サブ流域の最下流地点にダムを置く流域分割をし、水力発電効率の向上と洪水制御に資するモデルシステム(WEB-DHM-S)を開発している(図-1)。

3.3.2 渇水～洪水のシームレスなモデルシステム

ICHARMではHydro-SiBとRRIを統合しWEB-RRIを開発した(Rasmy et al⁴⁾)。対象流域を河道セルと斜面グリッドに分け、グリッドごとに

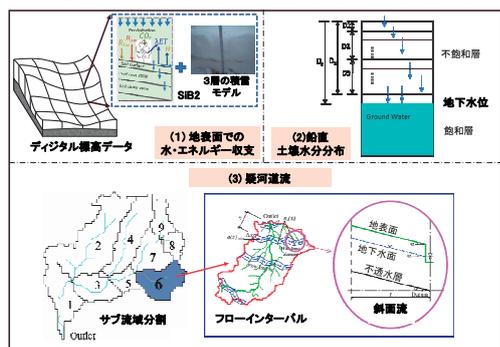


図-1 WEB-DHM-Sの概念図

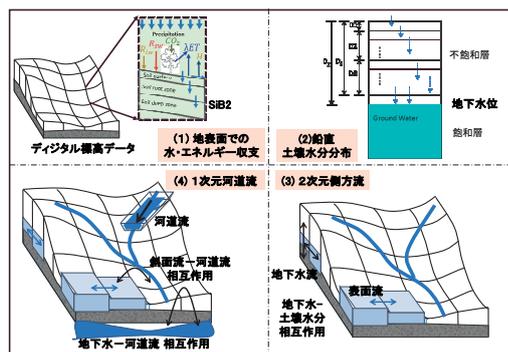


図-2 WEB-RRIの概念図

流量や浸水深を計算する。特に地下水位を負圧地下水層の空間分布を考慮し河道への地下水の流動が計算できるように高度化されている(図-2)。

3.1.3で示したSIMRIWとの結合は、具体的にはWEB-RRI上で開発されている。

4. 適用事例

本項ではWEB-DHM-S、WEB-RRIを用いた国内外における適用事例を紹介する。

4.1 大井川流域におけるWEB-DHM-Sの適用

大井川流域でWEB-DHM-Sを用いた洪水調節と発電効率向上のための最適ダム操作を検討した。中部電力より提供されたダムへの流入量データを用いて積雪域や流量を較正・検証した後、WEB-DHM-Sに牛山らのアンサンブル降雨予測データを入力し得られる32のアンサンブル予測流入量の幅を考慮した最適ダム操作を検討した。ダム放流量の制限値を超える流入量が予測された場合、その容量を均等に事前に放流する。その際、予測の不確実性を考慮し予測開始時点のダム湖の水位に応じて使用するアンサンブルを検討する。図-3は予測時のダム湖の水位が高い時の事例で、上位25%(高め)の予測流入量を使用し、事前放流することで貯水位を適時に下げ、流入量ピーク時のゲート放流量を既定の600m³/s以下に抑えることに成功している。詳細は小池ら⁵⁾を参照されたい。

4.2 西アフリカにおけるWEB-RRIの適用

西アフリカのような乾燥、半乾燥地域において降雨流出過程を適切に表現するためには、表面流出や浸透に影響する土壌水分や蒸発散量のような状態量をグリッドごとに長期的に逐次更新し与えることが重要である。これにより、流域における乾期での低水流量や出水期における洪水開始のタイミング、洪水のピーク流量や浸水深の推定精度の改善が期待される。そこでニジュール川、ボルタ川流域にWEB-RRIを適用し、リアルタイム

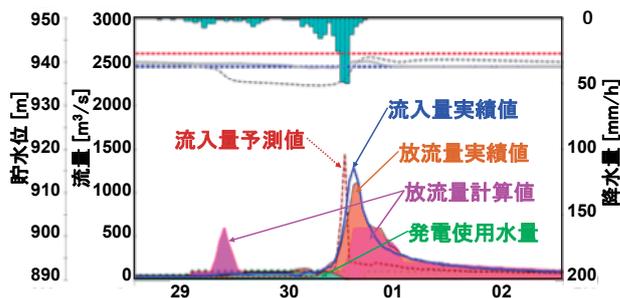


図-3 予測流入量を考慮した最適ダム操作検討事例

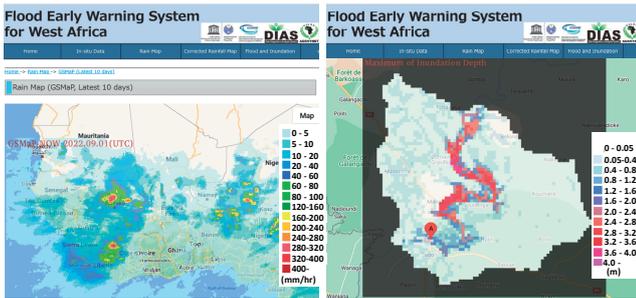


図-4 洪水早期警報システム(FEWS)の例

にGSMaPによる降雨とその他の大気強制力を全球長期再解析(JRA55)から入力し洪水早期警報システム(FEWS)を構築した。FEWSの一例としてリアルタイム降雨分布とトーゴ国マンゴー地域での過去の最大浸水深(推定値)を図-4に示す。このFEWSで提供される情報は、ニジェール川流域機構(NBA)、ボルタ川流域機構(VBA)および両河川流域11か国の代表の間で共有されている。

5. まとめと今後の展開

本稿では、気候変動の影響により大雨や渇水が懸念される状況において、流域ベースでの治水、利水の施策を考えていく上で求められる水文モデルの性能を整理し、ICHARMでの水文モデル開発戦略を示すとともに、水文モデルを適用した事例の一部を紹介した。引き続き、短期(数日)、季節予測(数か月)、長期(数十年)の予測を用いた渇水～洪水までシームレスな極端事象の予測研究を進める。また、WEB-RRIに雪のコンポーネントを組み込んだWEB-RRI-SやSIMRIWと結合し稲の生育や洪水氾濫による稲田の被害をリアルタイムに検討可能なWEB-RRI-SIMRIWの実装、さらには、都市排水、流域貯留、田畑その他の流域条件を反映できるコンポーネントを作成し組み込む予定である。また、種々の流域への適用を支援するユーザインタフェースの構築を予定している。

謝 辞

大井川の事例は、文部科学省 地球観測技術等調査研究委託事業「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム(水課題アプリケーションの開発)」、また、西アフリカの事例はUNESCO「西アフリカにおける気候変動を考慮した水災害軽減のためのプラットフォーム(WADiRE-Africa)」プロジェクト、それぞれ成果の一部を紹介した。これらの解析を「データ統合・解析システム(DIAS)」上で実施した。データや情報の提供等多大な協力を頂いた機関に謝意を表す。

参考文献

- 1) Wang, L., T. Koike, K. Yang, T. J. Jackson, R. Bindlish, and D. Yang (2009), Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), *J. Geophys. Res.*, 114, D08107, doi:10.1029/2008JD010800.
- 2) 牛山朋来、小池俊雄：大井川・犀川流域の効率的ダム操作支援を目的とした領域アンサンブル降雨予測の開発、*水工学論文集*第62巻、2018年74巻4号 p.I_103~I_108.
- 3) Naseer, A., Koike, T., Rasmy, M., Ushiyama, T., & Shrestha, M. (2019). Distributed hydrological modeling framework for quantitative and spatial bias correction for rainfall, snowfall, and mixed - phase precipitation using vertical profile of temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 4985-5009.
- 4) Mohamed Rasmy, Takahiro Sayama, Toshio Koike : Development of water and energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation model (WEB-RRI) and its verification in the Kalu and Mundeni River Basins, Sri Lanka, *Journal of Hydrology* Volume 579, December 2019, 124163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124163>
- 5) 小池俊雄、中村茂、Cho Thanda Nyunt、牛山朋来、Rasmy Mohamed、玉川勝徳、伊藤弘之、池内幸司、生駒栄司、喜連川優：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)* Vol.77, No.2, I_79~I_84, 2021.

玉川勝徳



土木研究所 水災害・リスク
マネジメント国際センター
専門研究員、博士(工学)
Dr. TAMAKAWA Katsunori

アブドゥル・ワヒド・モハメッド・ラスミ



土木研究所 水災害・リスク
マネジメント国際センター
主任研究員、博士(工学)
Ph.D. Abdul Wahid Mohamed Rasmy

久保田啓二朗



土木研究所 水災害・リスク
マネジメント国際センター
上席研究員、修士(工学)
KUBOTA Keijiro

小池俊雄



土木研究所 水災害・リスク
マネジメント国際センター
センター長、工博
Dr. KOIKE Toshio