

特集：国際社会における水災害リスク軽減の取組み

半乾燥山岳地域における水文解析モデルの適用性評価並びに 気候変化影響評価 ～イラン国カルン川流域を例として～

菱沼志朗

1. はじめに

世界の陸地の約30%を占める乾燥・半乾燥地域では、人口増、経済発展圧力の下、多くの国で活発な国土開発が進められている。特に山岳地帯に積雪資源を持つ半乾燥山岳地域では、その基本は水資源開発であり、融雪による地表水並びに地下水の開発が中核を占める。

水文解析モデルによる流域内の時間的・空間的な水資源量の把握並びに予測は、水資源開発政策の提言のための重要な役割を担ってきた。しかしながら、半乾燥山岳地域における水文解析は主に3つの課題に直面している。1つ目は水文素過程の複雑さである。具体的には、半乾燥地域では表層の浸透能が極めて低いため、降雨時に土壌へ浸透しない余剰分が表面流（ Horton型地表流）として洪水流出の主要な成分となる。また、融雪による季節性の流出も特徴である。2つ目は観測網整備の困難さである。半乾燥山岳地域では地形の影響により狭い範囲で短時間に高強度の降雨が生じる。そのような降雨の観測には密な観測網の整備が必要であるが、山岳地へのアクセスが困難であることや資金不足により実現できていない。3つ目は気候変化影響評価である。半乾燥地域では気候変化による水資源量の減少が予測され、特に半乾燥山岳地域では温暖化による融雪の早期化も予測されている¹⁾。そのような地域で気候変化適応策を検討するためには、将来の降水量だけでなく地表面気温も用いた水文解析による気候変化影響評価が必要である。そこで、本研究では半乾燥山岳地域に位置するイラン国カルン川を対象に、水文解析モデルの適用性評価並びに気候変化影響評価を行い、上記課題の解決策を提示した。

2. 対象流域

イランは南西アジアに位置し約165万km²の国土を持つ。国の持続的発展には水資源開発が不可欠で、

特にダムによる水資源開発は水力発電、灌漑用水、工業用水、都市用水の供給に貢献している。2012年時点で414のダムが運用中で総貯水量429億m³、49のダムが建設中でその数は中国に次ぎ2位であり、さらに50のダムを計画している²⁾。

カルン川流域はイラン国西部に位置し、流域面積約62,000km²、総延長約720kmの国内大河川のひとつである(図-1)。カルン川はザグロス山脈に源を発し、平野部を流下した後、イラクとの国境付近でチグリス・ユーフラテス川と合流し、ペルシャ湾に注ぐ。山岳地帯の年平均降水量は約600mmである。雨季は11月から4月で、特に12月と1月の降水量が多く、その大部分が積雪である。この積雪が気温の上昇に伴い融雪流出となり、カルン川は乾季も河川流を有する。ダム建設に適した地形・地質を活かし流域内に計15のダムを有し（運用中6ダム，建設中3ダム，計画中6ダム）、その総貯水量は約270億m³である。水力発電潜在量はイラン国内の7割を占めるほどの重要な河川である。

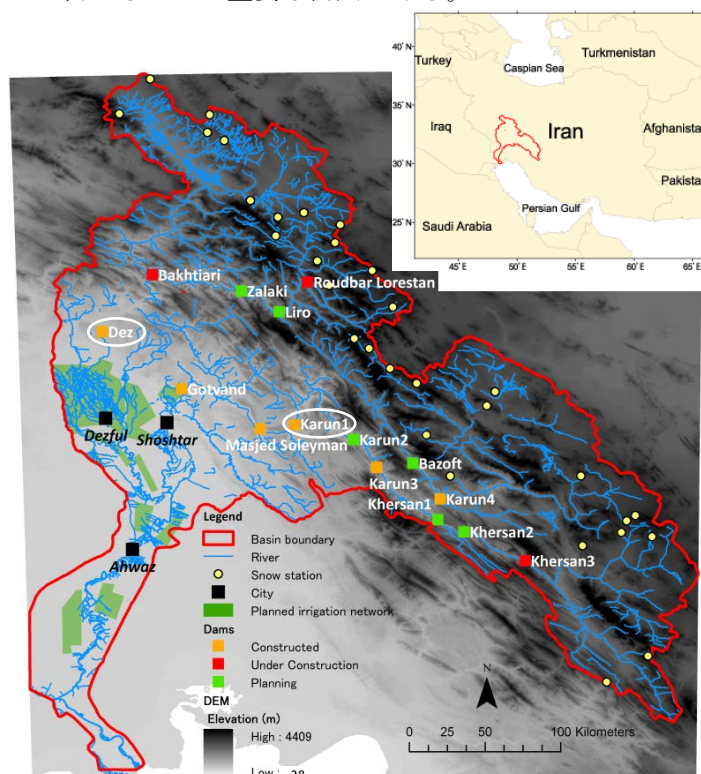


図-1 イラン国カルン川流域図

Assessment of Hydrological Model Applicability and Climate Change Impact in Semi-Arid Mountainous Regions: A Case Study in Iran

3. 水文解析モデルの適用性評価

3.1 水文解析モデルの選定

半乾燥山岳地域での水文解析においてモデルが有すべき条件として、①狭い範囲、短時間、高強度という特徴的な降雨特性による流出を時間的・空間的に表現できる分布型モデル、②複雑な水文素過程を表現できる物理モデル、③水資源開発の観点から数ヶ月から年単位の長期の流況を再現・予測できる長期流出モデル、④水文観測や地理情報に関する現地観測データが不足している場合に全地球規模で整備・公開されているデータを利用でき、かつ、⑤モデルの同定パラメータが少なく実用性が高いことが挙げられる。上記条件を満たすモデルとして、本研究では Block-wise use of TOPMODEL using Muskingham-Cunge Routing³⁾ (広域対応TOPMODEL+マスキングム-クンジ河道追跡法、以下BTOPMC)を選定した。

3.2 表層浸透過程の改良

BTOPMCでは表層の浸透能を土壌分類から設定しているが、浸透能が比較的大きく設定され、半乾燥地域での洪水流出の主要な成分となるホートン型地表流を表現できない。そこで、乾燥パラメータを新たに導入し、表層の浸透能(図-2の Inf_{max})を調整してホートン型地表流(図-2の q_{ofh})を発生させ、洪水流出の再現性向上を図る。

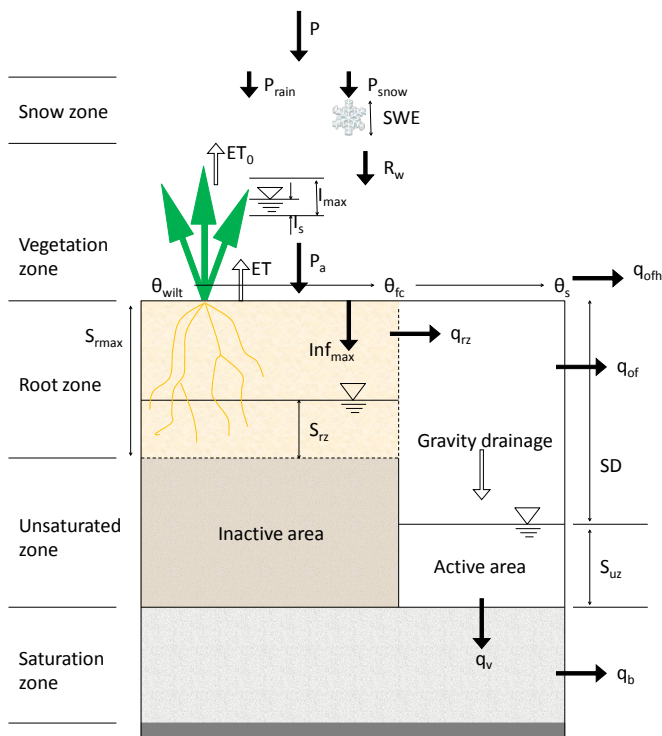


図-2 BTOPMCの各グリッドにおける流出過程模式図³⁾

3.3 データ並びに検討手法

カルン川流域では地理情報や水文観測の現地観測データが不足している。そこで、全地球規模で整備されている標高データや衛星リモートセンシングデータによって作成された土地被覆データなどを用いて流出モデルを構築した。モデルの水平方向解像度は5kmとした。また、降水量データには、地上雨量計観測データをもとに数値モデルによって空間的内挿がなされた日降水量グリッドデータ⁴⁾を用いた。気温など気候場に関するデータは再解析データの月平均値を用いた。蒸発散量は Shuttleworth-Wallace modelで推定し、融雪過程は積算温度法によりモデル化した。

水文解析モデルの適用可能性は、流出の基本特性(年流出、季節流出、洪水、低水)の再現性から検証した。検証地点は、カルン川中流域に位置し、実測流量データが整備されているカルン1(Karun1)ダム並びにデズ(Dez)ダム地点とした(図-1)。モデル同定期間は3年間(2000~2002)、モデル検証期間は2年間(2003~2004)とし、計算は日単位で実施した。モデル適合度指標には Nash-Sutcliffe係数並びに総量偏差を用いた。総量偏差は対象期間での総流出量の実測値に対する計算値と実測値の差分の割合を示す。

3.4 水文解析モデル適用結果並びに考察

表層浸透過程を改良したBTOPMCによる流量の再現性(モデル適合度指標)を表-1に示す。カルン1ダム地点での同定期間の再現性が最も良い。このケースの結果を、モデル改良前の結果も併せて図-3に示す。表層浸透過程を改良したことで、上流域平均で約40mm/日以上降雨が観測された場合、ホートン型地表流による洪水流出を良く再現できた。さらに、乾季の無降雨時における流量の低減も良く再現できている。それに加え、積雪・融雪過程による季節流出も月流量を別途整理し、よく再現できることを確認した。以上より、BTOPMCは必要な改良を加えることで半乾燥山岳地域に適用可能であることが示された。

表-1 BTOPMCによる流量の再現性(モデル適合度指標)

ダム地点	同定期間(2000-2002)		検証期間(2003-2004)	
	NSE	VB(%)	NSE	VB(%)
カルン1(Karun1)	0.73	-12.4	0.48	-19.7
デズ(Dez)	0.27	-33.9	0.04	-46.9

※NSE : Nash-Sutcliffe係数、VB : 総量偏差

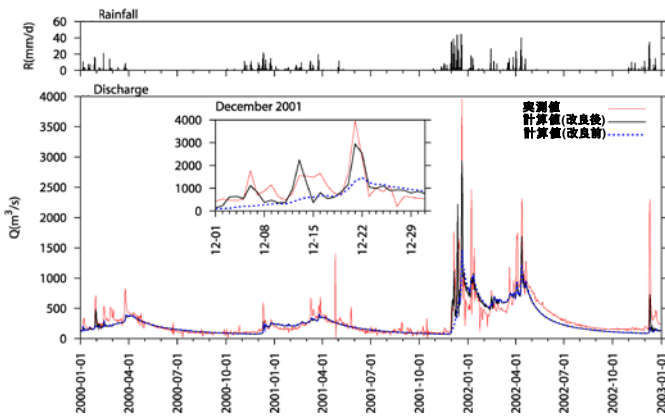


図-3 BTOPMCによる計算流量の再現性の例
(カルン1ダム地点、モデル同定期間2000~2002)

一方、デズダム地点では同定期間、検証期間ともに再現性が悪く、特に計算値が実測値を大きく下回っている(表-1の総量偏差)。このような過小評価についてまずは年流出の観点から検証する。年降水量と実測年流量の比較を図-4に示す。2002、2003並びに2004のデズダム地点データは他とは異なる傾向を示し、降水量が過小もしくは蒸発散量が過大であったと考えられる。しかしながら、蒸発散量の大きな年変動は気候場の大きな変化を意味すること、また、隣接するカルン1ダム流域に比べてデズダム流域のみで蒸発散量が過大であったことは考えにくいことから、計算流量の過小評価はモデル入力データの降水量が過小であったと推察される。

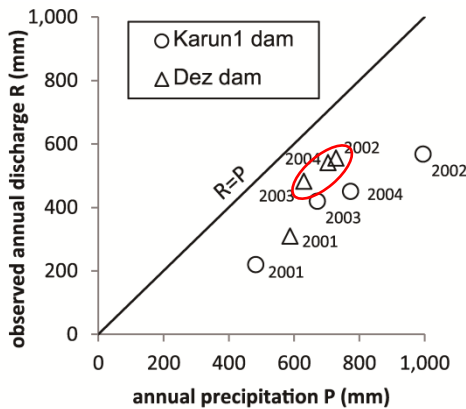


図-4 年降水量と実測年流量の比較

次に、検討に用いた降水量データを検証する。図-5に日降水量グリッドデータ⁴⁾の元となった地上雨量観測所の数を示す。これはデズダム地点流量が期間最大であったが上流域平均雨量が10mm/日以下と少なかった2001年12月15日のデータである。観測所の設置位置にばらつきが多く、WMOの基準(山地部では250km²ごとに1観測所を推奨)を広範囲で満足していない。特にデズダム流域では数千

km²にわたって観測所がない地域がある。このような雨量観測所数の不足により、降水量の過小評価さらには流量の過小評価となったと考えられる。半乾燥山岳地域のような気象条件の変化の激しいところでは、地上水文観測、特に雨量観測に十分な先行投資を行う必要がある。

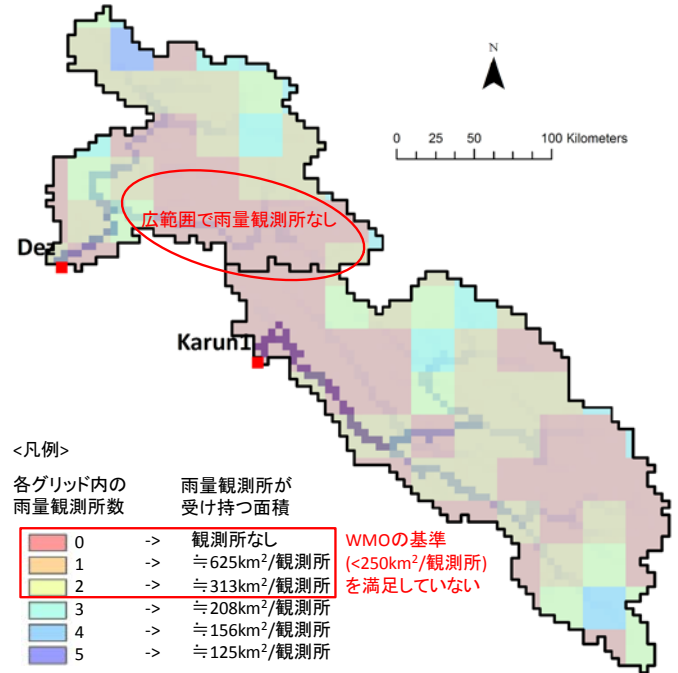


図-5 日降水量グリッドデータ⁴⁾の元となった地上雨量観測所の数

4. 気候変化影響評価

4.1 手法並びにデータ

カルン川における気候変化の影響を評価するため、前章で同定したBTOPMCを用いて将来の流況の変化を予測した。気象庁気象研究所が開発した3つの超高解像度全球大気モデル(MRI-AGCM3.1S、3.2S、3.2Hで、積雲対流スキームや水平解像度等が異なる)による現在(1979~2003)、近未来(2015~2039)、今世紀末(2075~2099)での日降水量並びに日平均地表面気温をBTOPMCへの入力値とした。なお、降水量は統計的バイアス補正法⁵⁾により補正されたデータを用いた。近未来並びに今世紀末における入力値は、将来の温室効果ガス排出量シナリオSRES A1B(すべてのエネルギー源のバランスを重視しつつ高い経済成長を実現する社会)での予測値である。将来の流況変化の評価地点は前章と同じくカルン1ダム並びにデズダム地点とした。

4.2 結果並びに考察

将来の流況変化の例としてカルン1ダム地点の月

流量を図-6に示す。図には現在、近未来並びに今世紀末におけるMRI-AGCM3.1S、3.2S、3.2Hの出力値を用いたそれぞれ25年間の計算結果の時間平均による月流量に加え、それら3期間でのアンサンブル平均による月流量を太線で示している。カルン1ダム並びにデズダム地点ともに、融雪期を含む4月から7月の期間で将来の流量減少が予測され、特に5月ではアンサンブル平均によると現在に比べて近未来で約30%、今世紀末で約60%の減少率を示した。この流量減少の主たる原因は、本検討で用いたMRI-AGCMがそもそも将来の冬季の降水量の大幅な減少を予測していることであり、さらに、地表面気温の上昇による積雪量の減少並びに融雪期の早期化も影響している。本検討結果は複数の温室効果ガス排出量シナリオによる気候予測値を用いておらず、不確実性を含むものの、カルン川では数十年先に向けた適応策を余裕をもって実施する必要があることを示唆している。

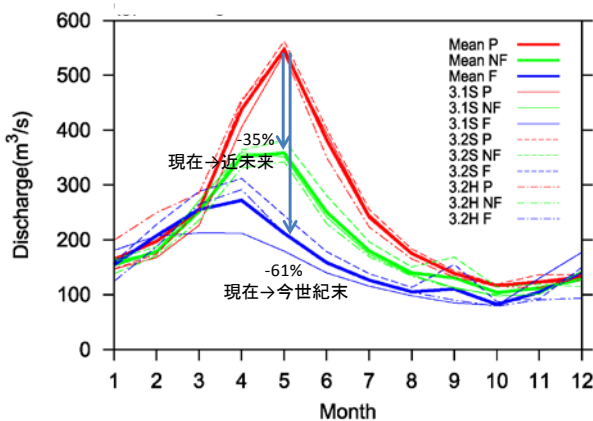


図-6 カルン1ダム地点における将来の流況変化 (Mean : 3.1S、3.2S、3.2Hのアンサンブル平均、P : 現在、NF : 近未来、F : 今世紀末)

5. まとめ

本研究では、イラン国カルン川流域を対象にした水文解析モデルの適用性評価並びに気候変化影響評価を行い、半乾燥山岳地域での水文解析が直面する課題に対する下記の解決策を提示した。

- (1) 水文解析モデルの表層浸透過程の改良により流量の再現性を大幅に向上させることができる。
- (2) 半乾燥山岳地域のような気象条件の変化の激しいところでは、水文解析モデルの適用には密な地上水文観測、特に雨量観測が不可欠であり、開発計画に先立って雨量観測網の整備に十分な先行投資を行う必要がある。
- (3) 将来予測される降水量と地表面気温を入力値

とした水文解析により、カルン川では、不確実性を含むものの、融雪期を含む4月から7月において流量の深刻な減少が予測される。

謝 辞

本報文は独立行政法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)が政策研究大学院大学と連携して実施する博士課程「防災学プログラム」での研究成果をまとめたものである。研究を進めるにあたり主指導教員の竹内邦良教授(ICHARMセンター長)、副指導教員並びにICHARM研究員の方々から多大なるご指導・ご助言を頂いた。また、イラン国水電力開発公社から流量データ等をご提供頂いた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) IPCC. (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- 2) IJHD. (2012). The International Journal of Hydropower & Dams 2012 World Atlas & Industry Guide. Surrey: Aqua Media International.
- 3) Takeuchi, K., Hapuarachchi, H. A. P., Zhou, M., Ishidaira, H., & Magome, J. (2008). A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins. Hydrological Processes, 22, 3236-3251.
- 4) Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N., & Kitoh, A. (2012). APHRODITE: Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges. Bulletin of the American Meteorological Society, 93, 1401-1415.
- 5) Inomata, H., Takeuchi, K., & Fukami, K. (2011). Development of a statistical bias correction method for daily precipitation data of GCM20. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 55, S_247-S_252.

菱沼志朗



日本工営(株) (前) (独)土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター、博士課程防災学プログラム学生) 博士 (防災学)
Dr. Shiro HISHINUMA