

⑤-2 総合的な洪水・水資源管理に資する基盤システムの開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：深見和彦、鍋坂誠志、佐山敬洋、
宮本 守、杉浦 愛

【要旨】

これまで水災害リスクマネジメント国際センター（以下、ICHARM）は、精緻な水文情報を得ることが困難な開発途上国の流域において洪水予警報の住民への提供を実現した。すなわちそのような地域に対する洪水被害の軽減を目指して、総合洪水解析システム（IFAS）の開発を行い、実行形式ファイルの公開・研究・研修の取り組みを行ってきた。IFAS によって洪水予警報システムを組み上げることは可能であるが、精緻な水文情報を得ることが難しい流域において IFAS のモデル定数調整には課題がある。一方、渇水の被害も途上国の発展を妨げる要因の一つであり、水資源管理に関わる対策が望まれている。これらの状況を打開するため、当該研究では、IFAS の、解析精度を向上させるためのモデル定数設定手法を標準化すること、低水流出解析・長期流出計算に適した解析エンジンの開発、高度な治水・利水施設操作を反映するモジュールの構築、CommonMP（Common Modeling Platform）を活用した拡張性の高い降雨－流出－氾濫解析システムの構築、総合的な洪水・水資源管理の基盤システムを開発することを目標としている。平成 24 年度は、精緻な水文情報が得ることが困難な巨大国際河川であるインダス川流域を対象としてモデル定数設定におけるキャリブレーション手法の検討、インドネシア国ソロ川流域を対象とした低水解析・長期流出計算モデル構築、高度な治水・利水操作を反映するモジュールの構築について検討を行った。

キーワード：分布型流出モデル定数、統合水資源管理、IFAS、CommonMP

1. はじめに

ICHARM は、洪水流出解析モデルを基盤とした洪水予警報システムを組み上げることができる IFAS を開発してきた。この IFAS を基本として、洪水対策と併せて統合水資源管理あるいは渇水対策にも資するため、総合的な洪水・水資源管理を支援する基盤システムの開発を目指している。平成 24 年度は、IFAS におけるモデル定数設定手法の標準化に際して、精緻な水文情報が得られない流域で、洪水を対象としたモデル定数の設定手法について検討を行った。また低水解析、長期流出計算、高度な治水・利水施設操作を反映するモジュールの土壌水分量初期値が水文情報に影響する期間について検討を行った。併せて、高度な治水・利水施設操作を反映するモジュールの開発を行い、IFAS への登録を試みた。

れまでもモデル定数の設定が行われ、良好な解析結果が得られている。ICHARM は、主に水災害の多い、水文情報が十分に得られない開発途上国の流域を対象として、ある程度の精度が確保された流出解析の実現を目指している。

モデル定数設定手法の標準化を検討するための対象流域としてインダス川を選定した。インダス川は、中国、インド、アフガニスタン、パキスタンの 4 ヶ国を流下する巨大国際河川であり、標高約 7,000m 級の高山地帯から、海拔 0m の海までを流下する。そのため、本河川は、様々な水文過程を含んでおり、解析では多様な要素を考慮する必要がある。平成 24 年度は、インダス川中上流域（流域面積約 40 万 km²）を IFAS によってモデル化して解析し、精緻な水文情報が得られない流域でモデル定数設定を行う手法について検討した。

2. 主要な気候区分・土地条件に適応した水文過程のモデル定数設定手法の標準化

2.1 対象流域

水文情報が十分に観測されている流域においては、こ

2.2 水文観測状況

2.2.1 雨量観測

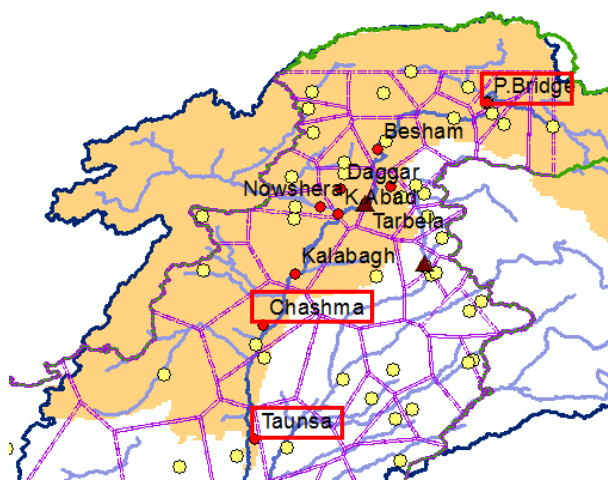


図-1 解析対象地域と雨量計、水位計配置図

インダス川での雨量観測は、Pakistan Meteorological Department (PMD)、Water and Power Development Authority (WAPDA) が実施している。WAPDA は 3 時間雨量データを観測しているが、データをチェックした結果、異常値、誤情報が多く含まれているものと見受けられた。このデータの欠測補完等の作業を行うと、もはや原型をとどめないほどの修正を要するため、使用を断念した。一方、PMD の観測する雨量データに関しては、インダス中上流域の約 40 万 km² の対象流域について 27 地点の雨量観測所データが使用可能であった。

インダス川上流域は標高 6,000~7,000m 級の高山地帯であり、地上雨量計あるいは、レーダ雨量計の設置が困難であり、たとえ設置されたとしても、主に固体降水である以上、正值を得ることは困難である。またアフガニスタン側は政情不安などによって雨量計の設置が困難であり、設置したとしても破壊、盗難の恐れが非常に高い。一方、日本の利根川の例では、約 1.6 万 km² の流域で、国土交通省河川事務所系列の 215 地点の雨量観測所でデータが入手できる。日本の流域と比較すると文字通り桁違いに降水の分布を把握することが困難な流域である。

2.2.2 流量観測状況

流量観測は、対象流域内の 9 カ所で行われている。Skardu、Partab Bridge、Besham、Nowshera は、河川の水位観測所、Tarbera、Warsak はダム、Kalabagh、Chashma、Taunsa は堰である。これらの地点での水位観測は洪水予警報を担当する PMD ではなく、WAPDA が担当している。パキスタン国内では、流量データが要所で観測されているものの、国境を超えると流量データのやりとりがされないため、十分な情報が得られない。

2.2.3 積雪深、降雪量観測

インダス川流域には、標高 6,000~7,000m 級の山岳からなる高山地帯が存在し精緻な降雨量、降雪量などの降水量観測を行うこと自体、極めて困難であり、現地での降雪量、積雪深の観測は行われていない。

2. 3 流出解析モデル構築

流出解析モデルは表層タンク、不飽和層タンク、帯水層タンクを備えた 3 段タンクの土研分布モデルを用いた (図-2 参照)。表層タンクは、地表面から 10cm 程度の表層を表現している。不飽和層タンクは、浸透過程で不飽和の領域を表現するタンクであり、帯水層タンクは、地下水の動きを表現するタンクである。

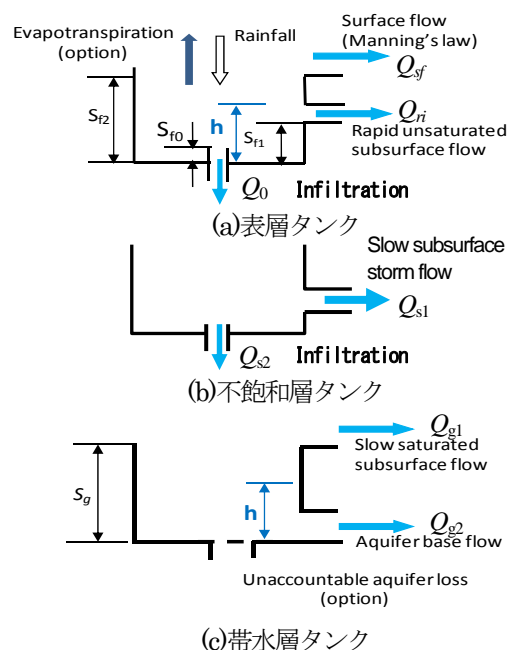


図-2 3 段タンク土研分布モデルの鉛直構造

ここで、図-2 に示す各流量は式(1)~(7)で与えられる。

$$Q_{sf} = L \frac{1}{N} (h - S_{f2})^{\frac{5}{3}} \sqrt{i} \quad (1)$$

$$Q_{ri} = \alpha_n \cdot A \cdot f_0 \frac{(h - S_{f1})}{(S_{f2} - S_{f1})} \quad (2)$$

$$Q_0 = A \cdot f_0 \frac{(h - S_{f0})}{(S_{f2} - S_{f0})} \quad (3)$$

$$Q_{s1} = D \cdot k_x \cdot i \quad (4)$$

$$Q_{s2} = A \cdot k_z \quad (5)$$

$$Q_{g1} = A_u^2 \cdot (h - S_g)^2 \cdot A \quad (6)$$

$$Q_{g2} = A_g \cdot h \cdot A \quad (7)$$

2. 4 パラメータ第一次近似値の推定

パラメータの第一次近似値の設定に、表層タンクには、Globalmap 土地被覆データ、不飽和層タンク、帯水層タンクは、FAO の Soil texture の Sand、Silt、Cray の構成比率から浸透性を区分してパラメータを設定した。

2. 5 雨量観測データのみを入力データとした流出解析結果

2.5.1 解析結果

図-3～図-5 に 2010 年洪水を含む雨量観測データのみを用いた Partab Bridge、Chashma、Taunsa 地点の解析結果を示す。図-3 上流域の Partab Bridge のハイドログラフから、観測結果と解析結果のピークのタイミングも一致しておらず、明らかに降雨パターンと異なる流出ハイドログラフが得られている。図-4 の Chashma のハイドログラフでは、流出ピークのタイミングは合っているものの、流量に大きな乖離が見られる。図-5 は今回の対象エリアで最下流の流量観測点の Taunsa である。洪水ピークのタイミングや時期的な増減傾向は上流域より適合する傾向はあるが、やはり観測結果と解析結果の乖離が大きい。雨量計の空間分布が粗いとはいえ、単に雨量データの観測精度が低いだけではなく、上流域の観測所ほど雨量のパターンと流出のパターンの乖離が大きく、

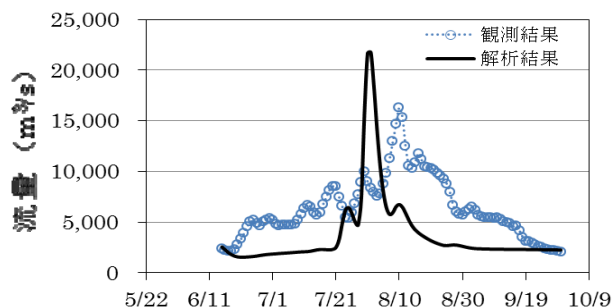


図-3 Partab Bridge 地点降雨流出解析結果
(縦軸流量:単位 m^3/s 、横軸:計算期間 2010/6/15～9/30)

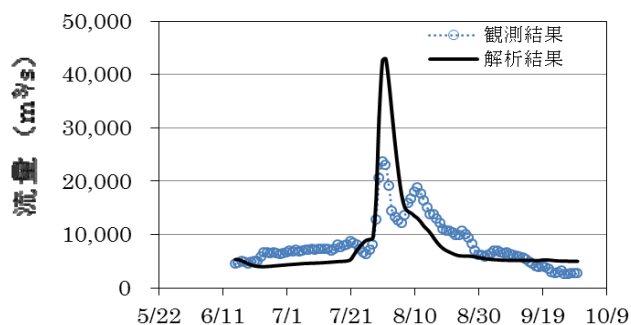


図-4 Chashma 地点降雨流出解析結果
(縦軸流量:単位 m^3/s 、横軸:計算期間 2010/6/15～9/30)

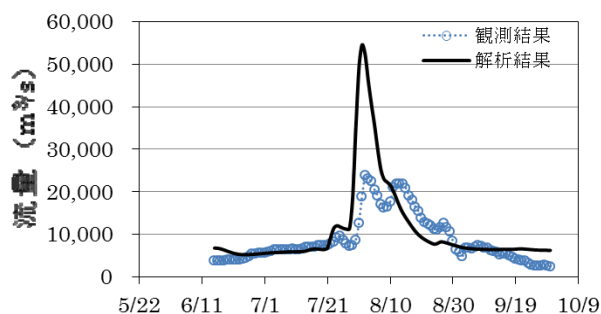


図-5 Taunsa 地点降雨流出解析結果

(縦軸流量:単位 m^3/s 、横軸:計算期間 2010/6/15～9/30)

降雨データ以外にも要因があると考えられる。

またパキスタン国外の領域については、雨量データが得られていないことから、非常に大きな降雨が観測されたパキスタン国内の雨量データをティーセン分割に従って降雨分布範囲を引き伸ばして与えるため、ピーク流量が過大評価になったものと考えられる。

2.5.2 考察

十分に水文情報が得られない流域では、時空間的に粗い観測密度で流域平均雨量を評価せざるを得ず、流域内の降雨量の時空間分布の信頼性も高くないことから、そもそも流域に入力された降水量を適切に把握することができていないと考えられる。また、6,000～7,000m 級の山岳地帯となると、通年で融雪出水の影響を無視することができないと考えられるため、降雪量、積雪深、雪密度や解析に必要な各種データが計測されていなければ、そこでの水の動態を正しくとらえることは不可能である。このような状態で土地利用、土壌データから推定される確からしいモデル定数を与えて流出解析モデルを構築したとしても、降水量観測値そのものが現実とは合っていない状態と推定されるため、流出解析結果は、実測流量値とは大きく異なる結果になったと考えられる。また、流出解析における入力値の信頼性が低いため、流出解析モデルの定数を最適値に調整することも困難である。

2. 6 水文情報が得られない流域でのパラメータ設定手法標準化の検討

2.6.1 モデル水分量補正のための流出解析モデルの改造

上記の結果・考察から、流出解析モデルに与える入力値の信頼性を高めなければ、流出解析モデルの構築・定数調整もままならないと想定された。このため流出解析手法について以下の変更・工夫を行った。

- ・水位観測地点のうち信頼性の高い6地点を選定し、流域を6つに分割する。
- ・それぞれの分割流域の内部のみで、独立した降雨流出解析を行う。すなわち、分割流域の上流端から流入する流量値は、上流側の降雨流出解析値ではなく、その水位観測地点の流量観測値を入力する。これにより、分割流域外部の広大な上流域雨量評価値の誤差の影響を排除した上で、分割流域（残留域）内の雨量観測値と、下流端の流量観測値との関係の解析を行う。
- ・分割した流域それぞれに対して、土地利用、土壌データを基にモデル定数を独立して推定・調整できるようにする。
- ・複数地点で得られる流量観測値を活用することによって、雨だけではとらえきれない水の動態を可能な限りの確に把握し、より信頼性の高い流出解析を行う工夫を加えた。



図-6 流域分割とパラメータの反映

ただし、この方法は、流域内の最上流側の分割流域では適用できないため、そこでは通常の降雨流出解析を行っている。

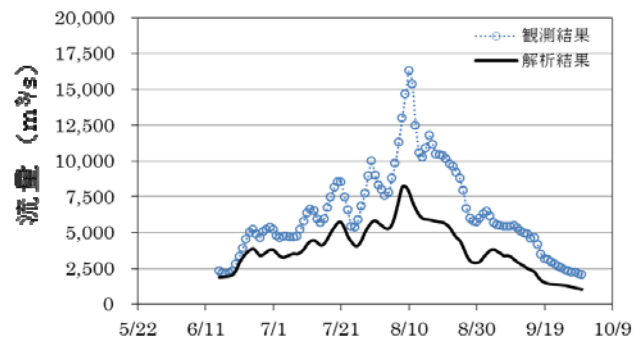
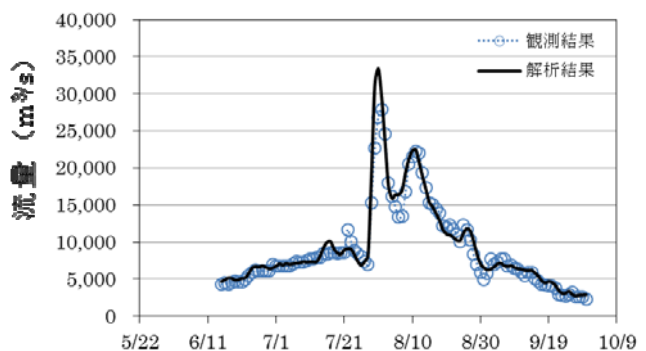
2.6.2 モデル定数設定手法標準化の一手法

流出解析モデル定数のキャリブレーションとしては、土地利用、土壌データからモデル定数の1次近似値を推定する。次に、降雨流出解析を行い、解析結果としての計算流量値と観測流量値を比較し、両者の差が最も小さくなるようにモデル定数を調整するのが一般的な手法である。

上記の議論から、分割流域毎に流出解析を行う手法では、下流に行くほどモデルに入力された水量の信頼性は高いと期待される。そこで、それぞれ分割された流域でモデル定数を設定し、それぞれの観測地点で観測流量と解析流量が合致するように解析する。最終的に最下流域の Taunsa、Chashma で調整した定数を上流域に反映させた上で、再度流出解析を行い、流量波形のタイミング

が合っていることを確認することで、モデル定数の最終調整を行った。

図-7～図-9に解析結果を示す。当初の雨量データだけを入力していた解析結果(図-3～図-5参照)と比較して、モデル定数を適切に調整することが可能となり、解析精度が向上した。表-1に過去の1988年、1997年の洪水及び他の地点も含めた解析モデルの評価について、Nash-Sutcliffe による評価を行った結果を示す。最上流域の Skardu は融雪の影響が大きく負の値であるが、他は全体的に1に近い値を示すところが多い。この手法が降水量分布情報を十分に得られない途上国流域でのモデル定数調整の一手法として有効であることを示した。今後、この手法を他流域にも展開し、その有効性を確認した上で、標準化したパラメータ設定のための一手法として整理していく予定である。

図-7 Partab Bridge 地点降雨流出解析結果比較
(縦軸流量:単位 m^3/s 、横軸:計算期間 2010/6/15~9/30)図-8 Chashma 地点降雨流出解析結果
(縦軸流量:単位 m^3/s 、横軸:計算期間 2010/6/15~9/30)

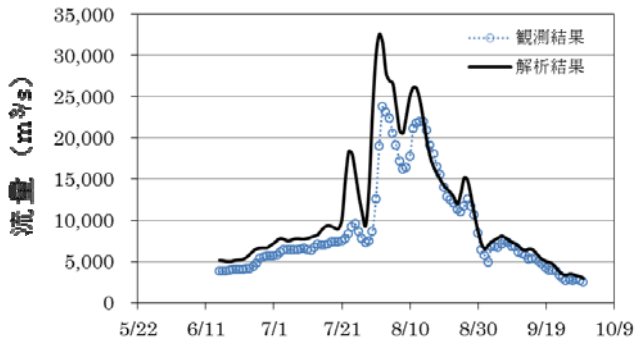


図-9 Taunsa 地点降雨流出解析結果
(縦軸流量:単位 m³/s、横軸:計算期間 2010/6/15～9/30)

表-1 Nash-Sutcliffe による流出解析モデルの評価

	1988	1997	2010
TAUNSA	0.89	0.86	0.96
CHASHMA	0.82	0.86	0.95
KALABAGH	-1.19	0.85	0.83
KABUL	0.34	0.69	0.28
TARBELA	0.38	0.78	0.73
BESCHAM	0.20	0.79	0.76
P.BRIDGE	0.71	0.85	0.52
SKARDU	-2.41	-0.43	-2.46

3. 低水流出・長期流出計算モジュールの構築

3. 1 低水流出解析・長期流出計算

低水流出解析・長期流出計算モデルとして、過年度に3段タンク土研分布モデルをIFASに搭載した。この解析エンジンについて、上記2.のとおりにモデル定数の設定手法を検討してきた。しかしながら、モデル定数(タンク内水位)の初期値設定の違い(低水位＝乾燥状態と高水位＝湿潤状態)により、解析結果が異なるはずである。この土壌水分量の初期値が、長期流出計算に及ぼす影響を把握するために3段タンクの帯水層タンクを飽和状態、乾燥状態について解析を行った。解析では、飽和状態と乾燥状態の解析流量の差を算出し、その差が限りなく0に近づく期間を算定した。

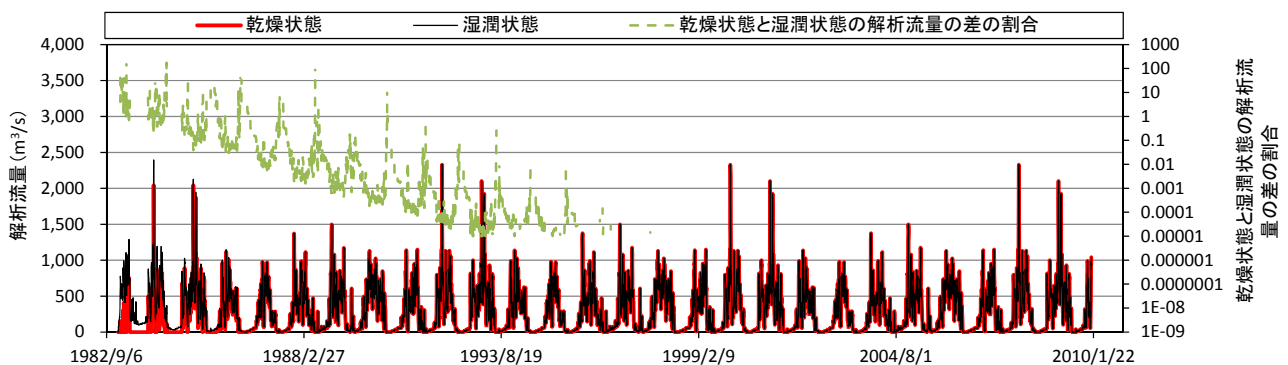


図-10 土壌水分量初期値の影響する期間

(データを入手できた2002～2009年の雨量データを繰り返し入力。1982～2001はダミーデータ)

式(8)に影響の度合いを見る指標とした式を示す。

$$D = \left(\frac{Q_s - Q_d}{Q_d} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (8)$$

D : 乾燥状態と湿潤状態の解析流量の差の割合

Q_s : 湿潤状態の解析流量 (m³/s)

Q_d : 乾燥状態の解析流量 (m³/s)

土壌水分量の設定が流出解析の最終的な結果に影響すると考えられるため、IFASに搭載した3段タンク土研分布モデルを用いて、影響期間を算定した。

3. 2 解析結果

図-10に乾燥・湿潤状態の解析流量の経時変化を示す。解析は、3段タンク土研分布モデルを用い、比較的流域全体で雨量データが確保できている、インドネシア国ソロ川を対象流域とした。ソロ川は、アジアの国の中では、比較的雨量観測が比較的高い空間密度で行われており、検証に適していると考えられるため選定した。図-10によれば、初期値の影響が無視できるレベルと考えられる流量差の比が0.1%となるのに7年9ヶ月かかることが分かった。

4. 高度な治水・利水施設操作を反映するモジュールの構築

4. 1 ダム洪水調節機能の高度化

4.1.1 後期放流設定機能

従来のIFASは、短期間の洪水流出解析に主眼を置いて開発されており、ダムの洪水調節についても、ピークカット機能のみ備えていた。そのため、ダムに水を蓄え続けることになる。このため、ダム湖に貯めた後の貯留水を放流する機能を追加した。

4.1.2 ダム放流量機能高度化

ダムは、河川流量に与える影響が極めて大きい。このため、長期流出計算のみならず、洪水調節操作についても現場のルールに併せてより自在に設定できるようにしておくことが望ましい。ダムの洪水時の放流や利水放流などは、各現場におけるその場の状況によっては、あらかじめ設定したルールで放流量を規定することができないことがある。このため、ユーザーが自在に放流量を与えて操作することが可能となるよう放流量設定機能を搭載した。

4. 2 分派河川設定機能

分布型流出解析モデルは、河道に水が集まってくる過程を陽にきめ細かく再現する。しかし、実際の河川には、自然もしくは人工構造物（堰）による分派もある。そこで分派河川を再現する機能を搭載した（図-11 参照）。流量に応じて 10 段階で分派割合を設定できる機能と数式により分派割合を決定する機能を搭載した。

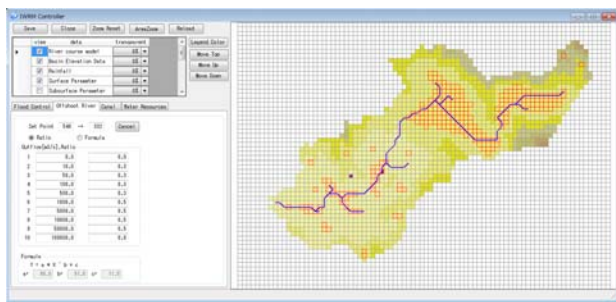


図-11 分派河川機能

4. 3 ダム利水運用再現機能

統合水資源管理を支援する基盤システムとするために、利水運用を再現することによってダムに貯留した水が増減する過程を明示する機能を搭載した。

この機能は、ダム下流の利水基準点における必要水量と自然流況から、ダムから下流への補給量を算出し、ダムからの放流を再現することによって、ダムの貯水量変化を図示し、渇水時に、ダムの水が枯渇する時期を明示することで利水者間の利害調整に資する情報を提供することを目指している。

4. 4 ダム貯水池利水容量検討機能

統合水資源管理を実施する上で、渇水被害を頻繁に受ける河川流域で水資源を有効に活用するには、ダム貯水池による流水の貯留機能が有効な手段である。

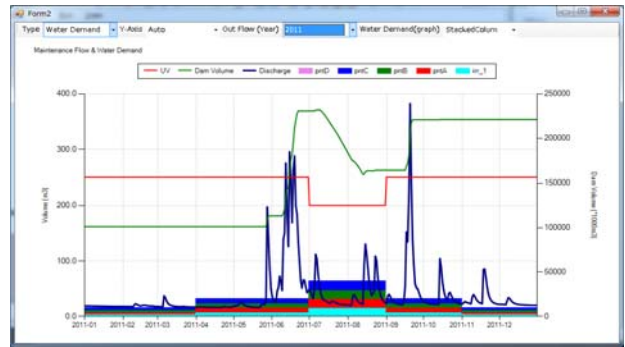


図-12 ダム貯水池運用曲線再現機能

このため、計算した自然河川流量と必要水量から、ダム貯水池に貯留しておくべき水量を逆マスカーブ法によって算出し、貯水池容量曲線を描く機能の追加を行った。これによって、洪水時の流下水量をどれだけ貯留すれば、水資源開発や渇水対策が可能となるのかを検討することが可能となる。渇水対策の検討ばかりでなく、将来の地球温暖化対策などの適応策を検討する有効な手法として期待できる。



図-13 貯水池利水容量検討機能

5. まとめ

今年度は、IFAS をベースとした総合的な洪水・水資源管理を支援する基盤システムの開発を行い、以下の成果が得られた。

- 1) 水文情報が十分に得られない発展途上国の巨大国際河川において、雨量情報だけでなく流量情報も有効に活用することで、的確にモデル定数を設定・調整し、流出解析の精度を向上させる手法を提案した。
- 2) 長期流出計算用の 3 段タンク土研分布モデルにより、土壌水分の初期値が影響する期間を明らかにした。
- 3) IFAS に以下の機能を搭載した。
 - ・ダム洪水調節手法の高度化を図るモジュールを搭載した。

- 堰、分派河川を表現するモジュールを搭載した。
- ダム貯水池運用曲線について、3)の機能を反映した運用曲線を描く機能を搭載し、渇水時の利害調整を行うための情報共有基盤としての機能を搭載した。
- 渇水や統合水資源管理を検討し、適応策を検討するためのダム貯水池利水容量を検討する機能を搭載した。

次年度以降は、モデル定数について解析を行う流域の数を増やし、パラメータ設定手法の標準化を行うことや、新たに構築したモジュールや長期流出が可能な土研分布モデルを用いて実際の河川での検証に着手していく予定である。また、CommonMPを活用した解析システム構築を行い、より拡張性の高い解析システムを組み上げる必要がある。

参考文献

- 1) Walter J Rawls, Lajpat R. Ahuja, Donald L. Brakensiek, Adel Shirmohammadi, : INFILTRATION AND SOIL WATER MOVEMENT, HAND BOOK of HYDROLOGY, pp.5.1-5.51, 1992
- 2) 水資源開発公団：早明浦ダム工事誌, pp.57-107, 1979
- 3) 日本地質学会, 地下水シミュレーション : pp.79-104, 2010
- 3) 塚本良則, 森林水文学, pp.134-142, 1992
- 4) 小鯛桂一, 粒状堆積物の透水性, 間隙率と地質年代の関係, The Japanese Geotechnical Society, 1984
- 5) 小鯛桂一, 岩盤透水性のグラフ表示, 地質調査所月報, 第 35 巻第 9 号, p. 419-434, 1984
- 6) 山根一郎, 入沢周作, 細野衛, 松井健, 岡崎正規, 図説日本の土壌, 1978

DEVELOPMENT OF FUNDAMENTAL SYSTEM FOR INTEGRATED FLOOD MANAGEMENT AND INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY 2011-2015

Research Team : Water related disaster research group

Author : Kazuhiko FUKAMI

Seishi NABESAKA

Takahiro SAYAMA

Mamoru MIYAMOTO

Ai SUGIURA

Abstract : ICHARM has developed "Integrated Flood Analysis System: IFAS" to enable to execute run off analysis even in poorly-gauged river basins. In such insufficiently-gauged relatively large-scale river basins, the system should have not only flood analysis function, but also long-term low water analysis function. The research program aims to further develop the analysis system for integrated flood and water resources management. In FY2012, ICHARM has suggested parameter tuning method in insufficiently gauged basin such as upper Indus river basin. Then, ICHARM conducted long term runoff analysis and found the influence of initial condition of soil moisture in ground water tank of Public Works Distributed Hydrological Model. And ICHARM has developed fundamental components to build long term analysis system for Integrated Water Resources Management, such as dam operating function, offshoot river course setting function, dam operating mass curve function and designing function of dam reservoir for water use.

Key words : IFAS, integrated water resources management, runoff analysis, inundation analysis, model-parameter setting