

四国地方の河川特性を反映した新しい洪水予測システムの構築

此島健男子¹・銭潮潮²・中安正晃³

¹一般財団法人河川情報センター 研究員

²一般財団法人河川情報センター 主任研究員

³一般財団法人河川情報センター 河川情報研究所研究第三部長

従来、洪水予測システムは、各々の河川を管理する国土交通省の事務所等が個別に構築・管理してきており、システムの予測精度には大きなバラツキがあった。また、一貫した検討体制や統一的な検証手法が確立されていなかったことで、全国のシステムの予測精度を統一的に改善することも困難であった。

国土交通省は、このような状況を改善するため、手法を統一して全国の洪水予測システムを一斉に更新した。本稿では、更新の一環として四国地方8水系の洪水予測システムを構築した成果を報告する。

Key Words :洪水予測システム, 分布型流出モデル, データ同化, 水害リスクライン

1. はじめに

洪水予測で得られる水位・流量の予測は、水防活動や避難判断に用いる情報として極めて重要なものである。

一斉更新が行われる前の平成28年度の時点で、国土交通省が管理する一級水系の数が109であるのに対して、洪水予測計算を行うシステムは、国土交通省が有するものだけで約260にのぼっていた（図-1参照）。これは、単一水系の上流と下流で別々のシステムが稼働していた事例や、同一水系を対象とする複数のシステムが並存していた事例があることに起因する。

洪水予測計算の手法は、流出解析タイプ、水位直接評価タイプの2種類に大別される。流出解析タイプは、降雨（実績及び予測）を入力値として河川への流出量を算出し、算出された流量をH-Q式で水位に変換するものであり、入力する降雨データとしてレーダのメッシュ雨量を用いる分布型モデル、サブモデルの集水域に対応した降雨量を用いる集中型モデルに細分される。

水位直接評価タイプは、流域の予測降雨や上流水位観測値との相関をとるなどの手法で、対象地点の水位を予測するものであり、具合的な計算手法としては重相関やニューラルネットワーク等がある。

河川毎に異なる洪水予測モデルが並存している状況は、例えば、ある河川において予測精度の向上に寄与する有用な知見が得られても、それを他の流域に活用することができないという、精度管理サイクルが有効に機能していない状態と言える。

このような状況を改善するため、国土交通省は平成25年度に、洪水予測技術の高度化に向けた「洪水予測技術の研究開発」を設定し、委託研究を公募した。公募に採択された京都大学（研究代表：立川康人¹⁾）は、粒子フィルタと呼ばれるデータ同化技術の洪水予測への適用に関する研究開発を進め、これが洪水予測の計算値と観測値の調整を図る有望な手法であることを示した。京都大学の研究成果を踏まえて、国土技術政策総合研究所²⁾は、粒子フィルタを用いた洪水予測手法の実用化の研究を進め、水位観測所の観測水位を上流から粒子フィルタで順次データ同化する手法を開発し、さらに、この手法がそれまでのモデルよりも高い予測精度を有し、かつ、降雨予測精度の影響を受けにくいことを確認した。

国土技政策総合研究所で開発された手法を全国で統一的に適用するため、平成30年度から国土交通省は各地方整備局の洪水予測システムを一斉に更新した。本稿では、この一環として四国地方における洪水予測システムの更新を行った成果について報告する。

2. 粒子フィルタを用いた新しい洪水予測手法

一斉に更新された洪水予測システムでは、流出計算に土研分布型モデル、河道内の水理計算に一次元不定流モデル、データ同化技術に粒子フィルタが用いられている。これらのうち、土研分布型モデルと

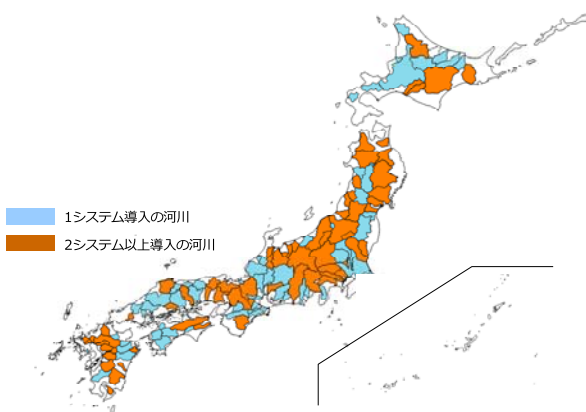


図-1 洪水予測システムの導入状況 (H28 時点)

粒子フィルタの概要について以下に示す。

(1) 土研分布型モデル

土研分布型モデルは流域メッシュ（タンクモデル）、及び河道メッシュ（タンクモデル+kinematic wave モデル）で構成される多段タンクモデルである（図-2 参照）。多段タンクモデルであるため様々なパターンの出水に対応できること、計算負荷が軽くリアルタイム演算に適していること等が特徴である。さらに、メッシュ毎にパラメータを設定することで、土地利用・土壌・地質特性に応じた貯留～流出の物理的特性を、簡潔に反映することができる。

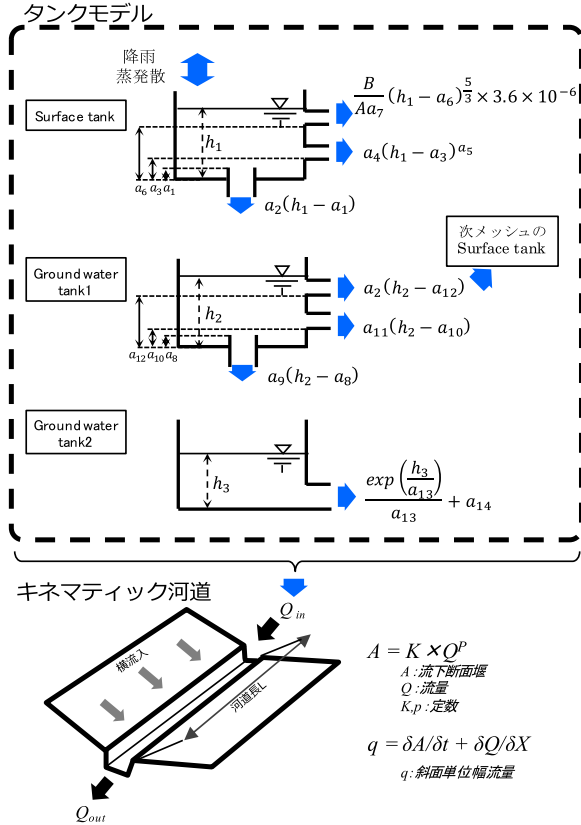


図-2 土研分布型モデルの概要

(2) データ同化（粒子フィルタ）

a) データ同化について

リアルタイムで稼動する洪水予測システムでは、現時刻の観測値と予測計算値の間にずれが生じる（図-3 左図参照）ことは避けられない。しかし、ずれが生じたままでは、予測の信頼性が損なわれるため、観測値と予測計算値が極力合致するようにパラメータ等を補正する（図-3 右図参照）。この技術をデータ同化という。

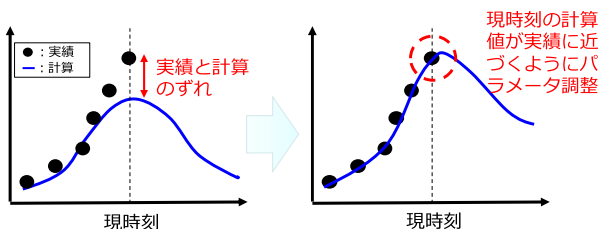


図-3 データ同化のイメージ

データ同化は、上流から水位観測所ごとに行う。具体的には、図-4 に示すように、まず水位観測所 A において、土研分布型モデル+次元不定流モデルによる現時刻の予測計算値と実測値のずれを確認し、そのずれが小さくなるように、流域 A におけるパラメータ（タンクの貯留高及び粗度係数）を調整して計算値をフィルタリングする。次に、水位観測所 A で同化した計算値を上流端境界条件として、同様の手順で水位観測所 B, C と順に同化していく。

この様に、多地点の水位データを同化し、現時刻の河川水位縦断の計算値を下流に伝搬させていくことで、予測雨量の精度による影響を受けにくく、かつ、これまでの「点」の水位予測を改善し、河道に沿って縦断的に水位を予測することが可能となった。

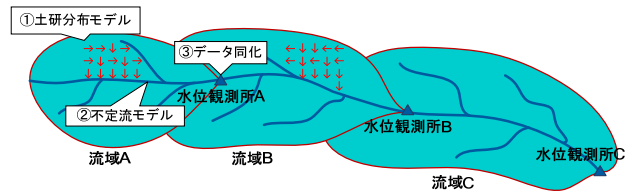


図-4 データ同化の流れ

b) 粒子フィルタの概要

粒子フィルタは、まず複数のパラメータの組合せである「粒子」を一定数準備し、粒子ごとに予測計算値を算出する。そして、観測値に対する確からしさ（尤度関数）をもとにフィルタリングを行うことで、確度の高い粒子を抽出していく手法である。「粒子」を構成するパラメータの組み合わせは、タンクの貯留高及び粗度係数としている。

粒子フィルタ手法の概要を図-5 に示す。

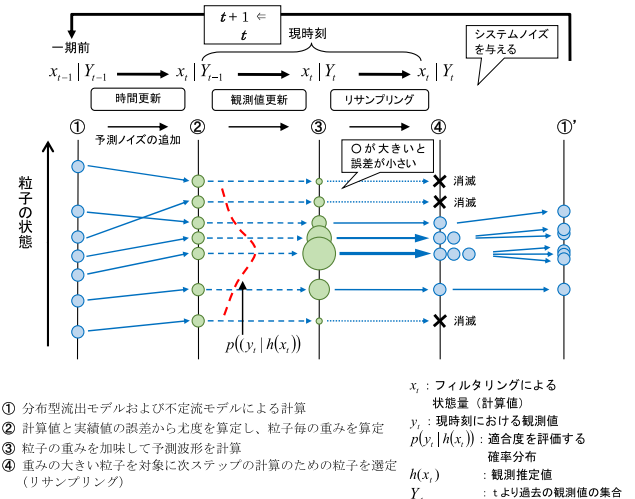


図-5 粒子フィルタの概要

3. 四国地方の河川特性を反映した新しい洪水予測システムの構築

前述した洪水予測手法を用いて、四国地方 8 水系（吉野川、那賀川、物部川、仁淀川、渡川、肱川、重信川、土器川）の洪水予測システムを更新した。本稿では、更新にあたって技術的に工夫した以下の

3点を紹介する。

- ① 四国地方の河川特性を反映したモデルの構築
- ② SCE-UA 法を用いた最適パラメータの探索
- ③ 過去の履歴誤差も含めたデータ同化の工夫

(1) 四国地方の河川特性を反映したモデルの構築

水位予測には、ダムや河川横断構造物等河道内に設置された施設や、内・外水氾濫が大きな影響を及ぼす。このため、まず、河川事務所及びダム事務所を対象に聞き取り調査を実施し、洪水予測を構築する上で配慮すべき事項に関する知見を収集した。

この成果を踏まえて、例えば、表-1に示すように国管理のダムだけでなく、本川の洪水予測に及ぼす影響が大きいと考えられる県・水資源機構管理のダム操作も、モデルに反映することとした。

表-1 洪水予測モデルに組み込んだダムの一覧

水系名	導入したダムモデル
吉野川水系	柳瀬ダム（国）、早明浦、富郷、新宮、池田ダム（水機構）、宮川内ダム（県）
那賀川水系	長安口ダム（国）、川口ダム（県）
物部川水系	永瀬ダム（県）
仁淀川水系	大渡ダム（国）、桐見ダム（県）
渡川水系	中筋川ダム（国）
肱川水系	野村ダム（国）、鹿野川ダム（国）
重信川水系	石手川ダム（国）
土器川水系	—

さらに、表-2に示すように河道内の樹木・固定堰・可動堰や、洪水流出の遅れに影響を及ぼす外水氾濫及び内水氾濫をモデルに取り込んだ。

以下、外水氾濫と内水氾濫の影響を反映するための工夫について詳述する。

表-2 洪水予測モデルに反映した河川特性の一覧

水系名	狭窄部・樹木	固定堰	可動堰	内水氾濫	外水氾濫
吉野川水系	-	第十堰、柿原堰	-	-	-
那賀川水系	-	数多く存在（断面形状として考慮）	-	-	-
物部川水系	-	統合堰	-	-	-
仁淀川水系	-	八田堰	-	宇治川、日下川、波介川流域	越知地区
渡川水系	-	麻生堰	-	四万十川、後川、中筋川流域	-
肱川水系	狭窄部・樹木死水域を考慮	数多く存在（断面形状として考慮）	-	-	菅田地区、東大洲地区等を考慮
重信川水系	樹木死水域を考慮	数多く存在（断面形状として考慮）	-	-	-
土器川水系	-	数多く存在（断面形状として考慮）	潮止堰	-	-

1) 外水氾濫の考慮

肱川の菅田地区には、無堤地区や宅地のみ輪中堤で囲まれた地区が多く存在し、平成23年台風15号や平成30年梅雨前線など大規模洪水のたびに外水氾濫が発生している。外水氾濫が発生すると下流に到達する流量が減少し、水位・流量の予測値に影響を及ぼす。そこで、河道の不定流モデルに、外水氾濫モデルを組み込み、氾濫による流量の減少を反映することとした。具体的には、肱川全川の氾濫原を、同

一の氾濫特性を有する複数のブロックに分割した上で、ブロック毎のH-V関係や溢水氾濫条件を設定して、肱川の河道モデルとの氾濫水の移動を越流公式等によりモデル化した。外水氾濫モデルの概念図を図-6に示す。

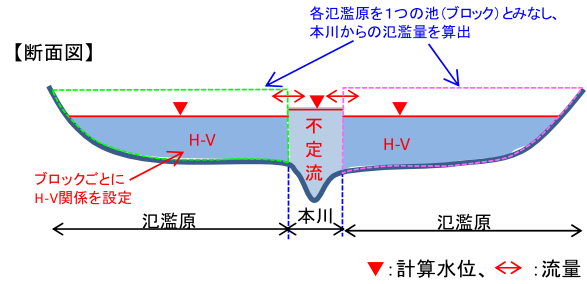


図-6 外水氾濫モデルの概念図(1)

- ①越流公式により流量の算定
- ②H-V式より浸水深の算定

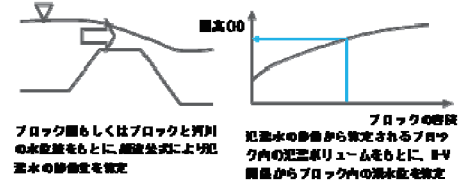


図-6 外水氾濫モデルの概念図(2)

2) 内水氾濫の考慮

仁淀川（高知県管理区間）の越知地区周辺や宇治川、日下川、波介川流域は、上流ほど堤内地盤が低くなる低奥型地形と呼ばれる形状を呈しており、頻発する内水氾濫が本川の流量に影響を及ぼしている。このため、河道不定流モデルに内水氾濫モデルを組み込み、本川流量に及ぼす影響を再現した。具体的には、外水と同様に、各内水氾濫地区の氾濫原を同一の氾濫特性を有する複数のブロックに分割し、ブロック毎のH-V 関係や溢水氾濫条件、ブロック間の結合条件（越流高）を設定して、河道モデルとの氾濫水の移動や氾濫ブロック間の氾濫水の移動を越流公式等によりモデル化した。さらに、これらの支川と仁淀川本川の間、排水機場や樋門、放水路の操作ルールを反映させることで、内水氾濫の影響を的確に再現するモデルを作成した（図-7参照）。

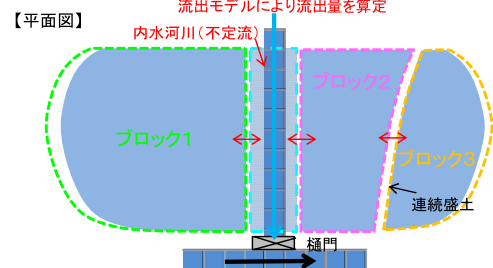
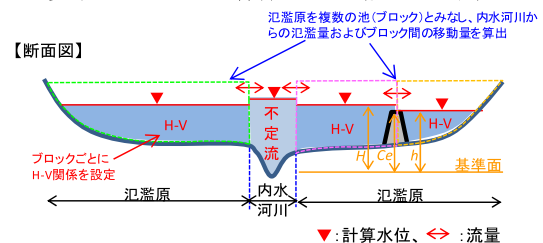


図-7 内水氾濫モデルの概念図

(2) SCE-UA 法を用いた最適パラメータの探索

1) メッシュ毎のパラメータのグループ化

流域からの流出を計算する土研分布型モデルのメッシュサイズは250mとした。それぞれのメッシュ毎に図-2で示した3段タンクを設けることで、14のパラメータを設定できるが、全てのメッシュに異なるパラメータを与えるのは非現実的である。このため、土地利用・土壌・地質に応じてグループ化するカテゴリ分類を行った。牝川を例にカテゴライズした結果を図-8に示す。1段目タンクは7分類、2段目と3段目は3分類でグループ化している。

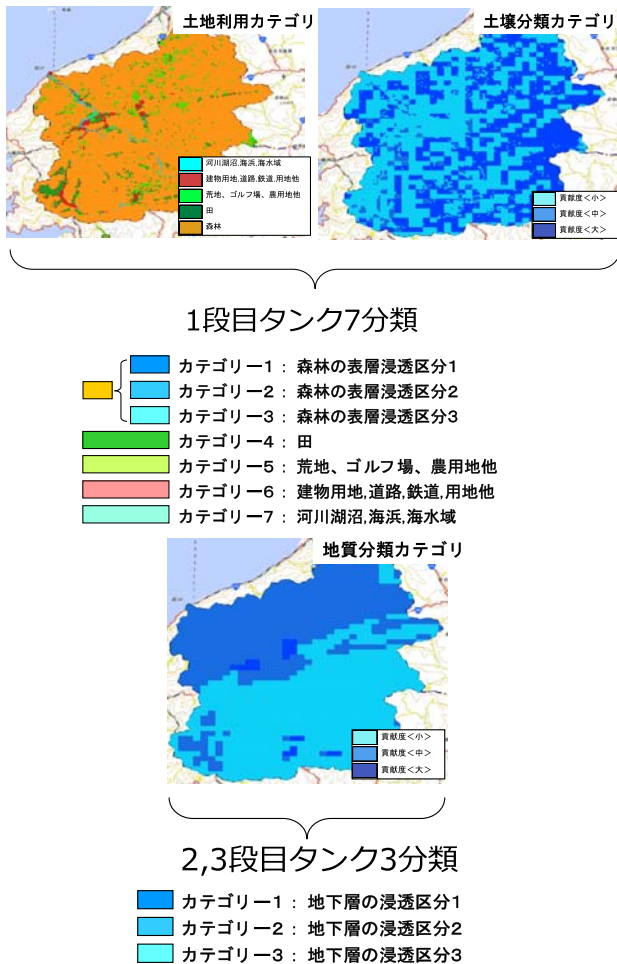


図-8 メッシュカテゴリ区分 (牝川の例)

2) SCE-UA法を用いた最適パラメータの探索

パラメータ調整は、上流から順にパラメータの最適化を行う (図-9の流域A→流域B→流域Cの順)。

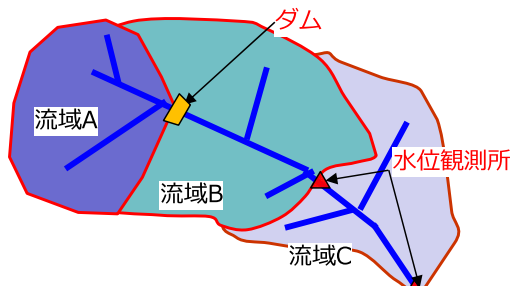


図-9 パラメータ調整の順序イメージ (A→B→C)

流域Aが21のグループに分類されたとすれば、流域Aに属するパラメータは、前述したタンク14パラメータ×メッシュカテゴリ21 (1段目7分類×2,3段目3分類) で合計294となる。

これら多数のパラメータを試行錯誤で変動させ、過去の複数洪水を最もよく再現できるパラメータの組み合わせを探索することは、多大な時間を要し非効率である。このため、パラメータの最適化には、客観的な探索手法であるSCE-UA法を用いた。SCE-UA法によるパラメータの探索の手順を図-10に示す。

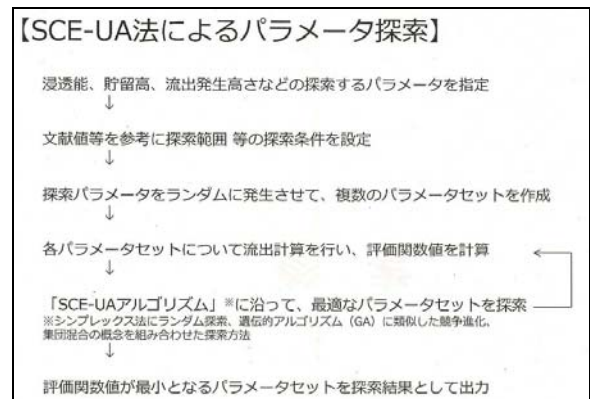


図-10 SCE-UAによるパラメータ探索フロー

SCE-UA法とは、数万通りにおよぶパラメータの組み合わせを自動的に作成し、その中から実測と計算値の誤差 (ピーク誤差, 相関係数, RMSE) が最も小さいパラメータを機械的に抽出する方法である。

牝川の野村ダム地点における計算結果の例を図-11に示す。黒点が実績値、緑色の線群がSCE-UA法による計算結果であり、赤線が全ての洪水に最も誤差が小さくなるパラメータの組み合わせを用いた計算結果である。

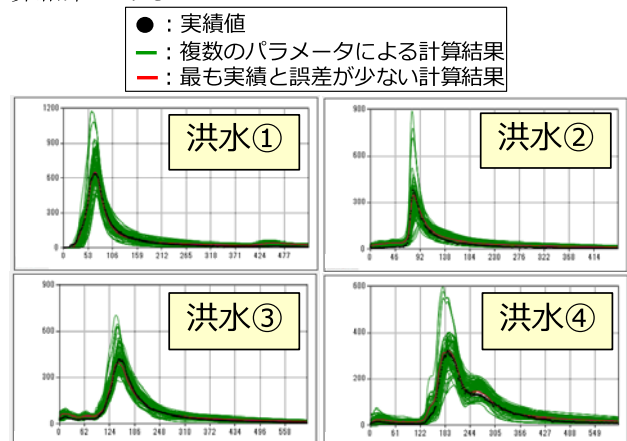


図-11 SCE-UAによるパラメータ探索結果
※パラメータの検索の段階では同化計算は実施していない。

(3) 過去の履歴誤差も含めたデータ同化の工夫

分布型+不定流計算した値が実績値と整合していればデータ同化は不要だが、実際にはずれが生じることは避けられずデータ同化が必要となる。

現時刻のずれを対象に誤差指標の最小化を図る一般的な手法 (図-12左図) では、現時刻における整

合のみが優先されるため、過去～現時刻～将来の一連の計算を毎時刻行う洪水予測においては、かえって予測精度を低下させる可能性がある。このため、過去（6時間程度前を想定）から現時刻までの履歴を考慮した指標を採用した（図-12右図）。これにより、現時刻におけるずれは比較的大きくても、過去の一定時間の履歴誤差が小さい粒子の方が尤度が高くなり、結果的に予測精度を高めることが期待できる。

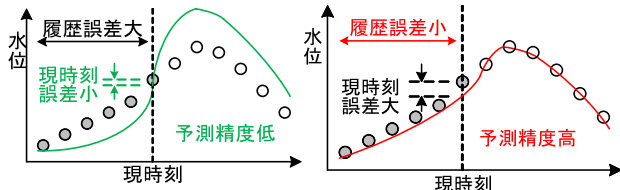


図-12 誤差の概念図

(左：現時刻誤差のみ、右：過去の履歴も含む誤差)

渡川水系の磯ノ川地点を例に、同化計算による一連の結果を以下に示す。

図-13は同化なしの予測計算値である。本事例では、ピーク水位手前あたりから実測値と予測計算値の間でずれが確認される。

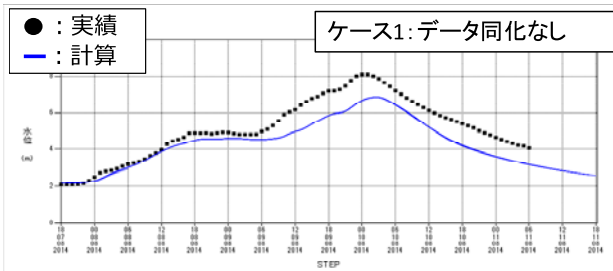


図-13 データ同化なしの計算結果

次に、1時間毎に同化計算を行ったヒドログラフを図-14に示す。各時刻から右方に伸びている線が、当該時刻における12時間先までの予測計算値であり、図には毎正時毎の計算値を重ねあわせて示している。同化後においても予測値と実測値が完全に一致しない理由としては、モデルの物理的な合理性を担保するため、調整を行うパラメータであるタンク貯留高、粗度係数の前時刻からの変動幅に上限を設定していることなどがあげられる。

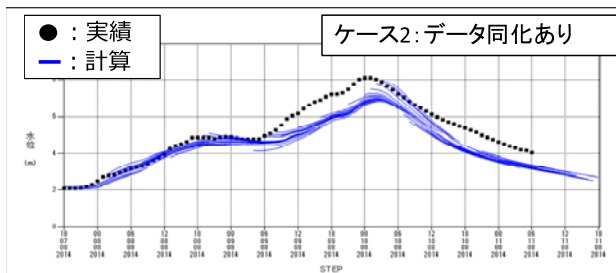


図-14 データ同化ありの計算結果

このように、同化計算を行っても予測計算値と実測値の間にはずれが生じるため、予測開始時刻の予測計算値を、実測値に合致するようにスライドさせ

た結果を図-15に示す。今回構築した洪水予測システムでは、この予測計算値を表示することとしている。

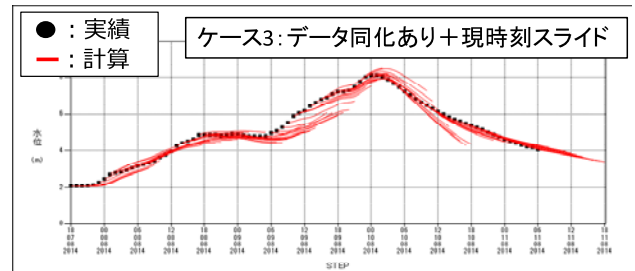


図-15 データ同化あり+現時刻スライドの計算結果

さらに、同化なし（ケース1）、同化あり（ケース2）、同化あり+スライド（ケース3）として、RMSE値を算定した結果を図-16に示す。ケース1,2,3の順に精度が向上していることが確認できる。

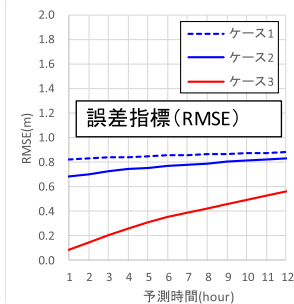


図-16 ケースごとの誤差指標

(4) 構築したモデルと既存モデルの比較

既往の洪水予測システムと本稿で紹介している洪水予測システムの予測計算値の比較を行った。

重信川水系湯渡地点の例を図-17に示すが、今回更新したモデルの予測計算値の方が既往のモデルよりも実測値と整合しており、誤差指標の値も良好であることが確認できた（図-18参照）。四国の他流域においても、既往システムと同等以上の結果が得られていることが確認されている。

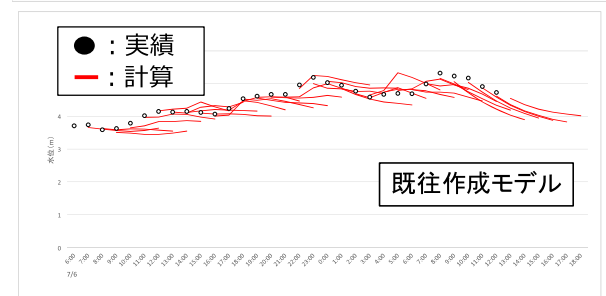
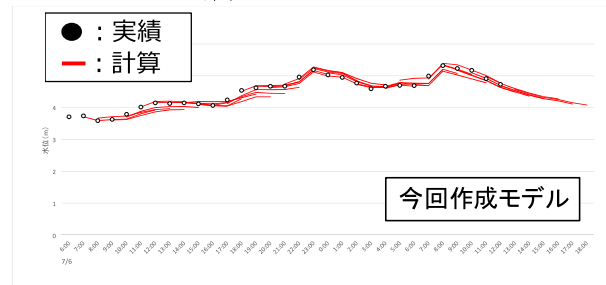


図-17 既往モデルと今回作成モデルの比較

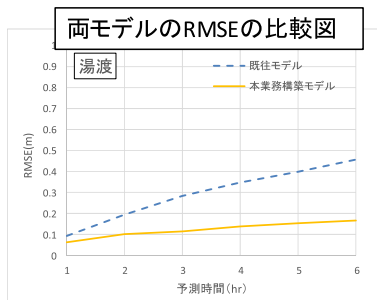


図-18 既往モデルと今回モデルの誤差指標の比較

4. 水位予測結果の利用

国土交通省は、令和元年8月から、災害の切迫感を分かりやすく伝える取組みの一環として「水害リスクライン」を構築し、概ね200m毎の水位の計算結果と堤防高とを比較表示することで、左右岸別に上流から下流まで連続的に洪水の危険度情報を提供している（図-19参照）。

更新された洪水予測システムの予測計算値は、この水害リスクライン上に表示されており、沿川の地方自治体などに情報提供されている。令和元年11月末時点で水害リスクラインには約50水系が登録されており、本稿で作成した四国地方整備局の8水系も登録済みである。

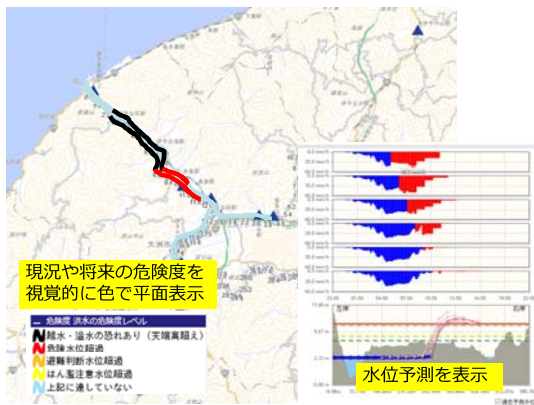


図-19 水害リスクラインの表示イメージ

A new flood prediction system that reflects the river characteristics in Shikoku region

Takehiko KONOSHIMA, Chaochao QIAN, and Masaaki NAKAYASU

Currently, the efforts to improve the accuracy of flood prediction systems are undertaken separately by various river offices in Japan. There is no uniform method of verification and no consistent process of development of flood prediction systems, thus an efficient management of the accuracy of flood predictions remains an issue. Furthermore, due to various different technological approaches that are being employed in flood prediction, it has proven difficult to improve the accuracy of the system as a whole. Due to the reasons mentioned above, the Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism has proposed a unified method of flood prediction to be used in flood prediction systems nationwide. Here we will introduce the system developed in Shikoku region as part of the national system.

5. おわりに

本年は全国各地で大きな降雨が観測された。本稿で紹介した洪水予測システムは、昨年度開発されたばかりであるが、本年の洪水を通じて多くのデータや知見が入手されたものと考えられる。全国の洪水予測モデルを統一した趣旨を踏まえ、本年度に得られた知見の集約と分析が行われるとともに、改良に向けた統一的な指針が示されることで、全国の洪水予測システムの一層の精度向上が、速やかに推進されることが期待される。

謝辞：本稿を取りまとめるにあたり、ご指導頂いた四国地方整備局の皆様、国土技術政策総合研究所の皆様、各水系の河川管理者、ダム管理者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン: 粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.67, No.4, I_511-I_516, 2011
- 2) 土屋修一, 川崎将生: 洪水予測の高度化と洪水危険度の見える化の取り組み, 雑誌「河川」, 第59巻12号, pp.14-17, 2017
- 3) 国土交通省: 九州北部豪雨から1年, 洪水時の逃げ遅れゼロ対策強化被災河川で水位計設置完了, 全首長とのホットライン構築, http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000954.html