

広域分布型洪水流出モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用

立川康人・佐山敬洋・可児良昭*・宝 馨・松浦秀起・山崎友也

*京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

要 旨

リアルタイム水文・気象観測データを利用し、広域分布型流出予測モデルを予測エンジンとする広域分布型実時間流出予測システムを開発する。これにより中小河川流域を含む任意の流域の洪水予測情報の実時間での提供を目指す。デモンストレーション流域として淀川流域(枚方上流域 7,281km²)を対象としてシステム開発を進める。予測モデルには著者らが開発を進めている広域分布型流出予測モデルを実時間予測対応に改良したモデルを用いる。リアルタイム水文・気象観測情報は、京都大学防災研究所と国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所との間に開通した光ファイバー専用情報通信網を介して時々刻々収集するとともに、(財)日本気象協会から提供される現況・予測降雨情報を用いる。

キーワード：広域分布型流出モデル，実時間流出予測，中小河川，淀川流域

1. はじめに

2005 年 9 月 4 日から 6 日にかけて、台風 14 号により宮崎県を中心として大量の降雨がもたらされ、地点によっては 1000 mm を越える豪雨が発生した。2004 年にも新潟・福島豪雨、福井豪雨、台風 23 号など計画規模に匹敵する、あるいはそれを上回る極めて大きな洪水が発生している。こうした豪雨によってもたらされる洪水を流域一体として中小河川も含めて適切に予測することが洪水災害を軽減する基本である。平成 16 年度の豪雨災害を受けて、国土交通省は豪雨災害対策緊急アクションプラン(2004)を策定し、その中で洪水予測に関連して中小河川における洪水予測等の高精度化や既存ダムの有効活用を重要施策として挙げている。洪水流出予測シミュレーションモデルの中にダム貯水池による流水制御の効果を陽に取り入れ効果的な貯水池制御ルールを定めること、流域一体として中小河川も含めた実時間流出予測システムの構築・運用が緊急の技術的課題となっている。

こうしたことを念頭に置き、本研究では実時間気象・水文観測・予測情報を利用し、広域分布型流出予測モデルを予測エンジンとするリアルタイム高度水防災情報提供システムを開発して、中小河川流域を含んだ任意の流域の洪水予測情報の提供に寄与することを目的としている。このシステム開発を具体的に進めるために、淀川流域(枚方上流域 7,281km²)をデモンストレーション流域とし、ダム制御の効果を陽に考慮した広域分布型流出予測システム(佐山ら、2005, 2006)を導入して、それを予測エンジンとするリアルタイム流出予測システムを開発する。

2. 広域分布型流出予測システムの概要

2.1 淀川流域

淀川流域(8,240 km²)は、大阪、京都、兵庫、奈良、滋賀、三重の近畿 2 府 4 県に広がり、国内最大の琵琶湖(湖面面積：670 km²)が流域内に存在する。流域は琵琶湖流域(3,848 km²)、木津川流域(1,596 km²)、宇治

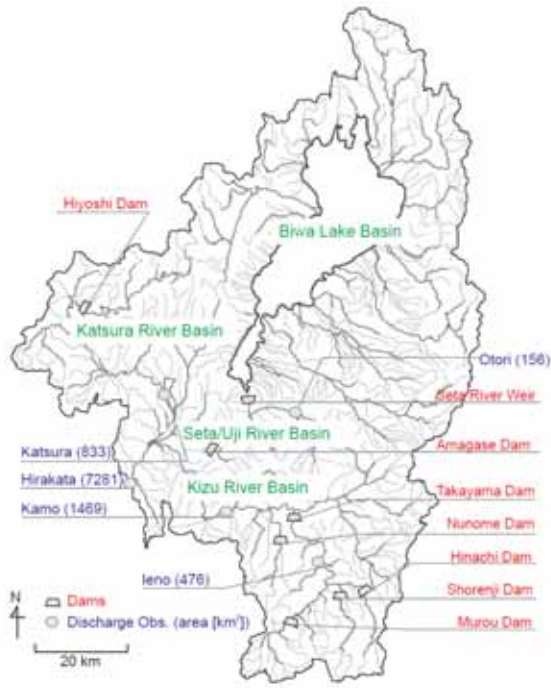


Fig. 1 Yodo River basin and the locations of main discharge stations and dam reservoirs.

川流域(506 km²), 桂川流域(1,100 km²), 淀川下流域(807 km²), 猪名川流域(383 km²)の6つの流域で構成される。琵琶湖から流れ出た河川流量は宇治川を通して、淀の地点で木津川、桂川と合流する。この地点を三川合流と呼び、その下流が淀川本川となる。ここで開発する流出予測システムは下流端を淀川本川に位置する枚方地点(7,281 km², Fig. 1)に設定する。淀川流域は高度に流水制御が行われており、高山ダム、青蓮寺ダム、布目ダム、室生ダム、比奈知ダムなど主要なダムは主に木津川流域に存在する。また、琵琶湖からの流出は瀬田洗堰で制御され、さらに下流の天ヶ瀬ダムで制御される。桂川流域には日吉ダムが存在し、これらの淀川流域のダムは統合的に管理されている。

2.2 広域分布型流出予測モデル

流出モデルは市川ら(2001)が開発した分布型流出モデルを用いる。そのために椎葉らによる流域地形の数値表現形式(椎葉ら, 1998, 1999)を採用し、国土地理院が発行する数値地図 250m メッシュ(標高)を用いて250m分解能で斜面要素の流れ方向を一次的に決定する。Fig. 2に流域モデルの一部を示す。次に、流れ方向に従って、すべての斜面要素での流れを逐次追跡して河道への流出量を算定する。また、河道における流れを追跡して、流域下端での河川流量を算定する。流れの追跡計算には斜面部、河道部ともキネマティックウェーブモデルを用いる。斜面部の土層はFig. 3に示すように重力水が発生する大空隙部分と毛管移動水の

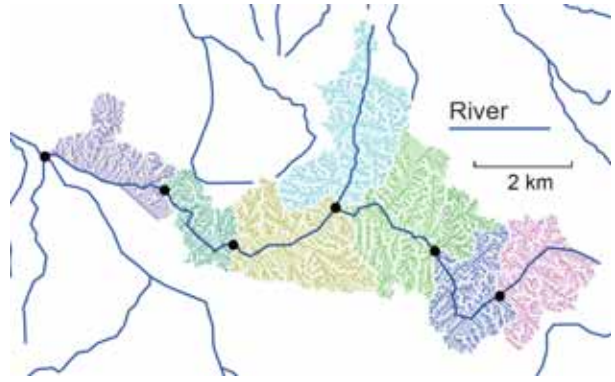


Fig. 2 Watershed model developed with DEMs and a steepest flow direction algorithm.

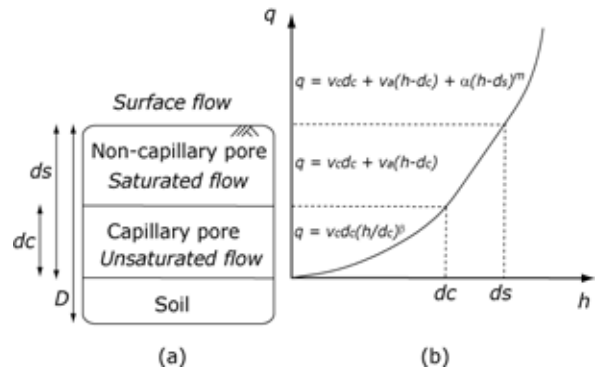


Fig. 3 Soil structure (a) and discharge stage relationship (b) in the kinematic wave model for hillslope flow modeling.

流れの場合であるマトリックス部分から構成されると考える(立川ら, 2004)。土層厚を D とし、マトリックス部の最大水分量を水深で表した値を d_c 、重力水を含めて表層土壌中に存在し得る最大水深を d_s と考え、流量流積関係式(1)を仮定する。この流量流積関係式と連続式(2)を用いて上流の斜面要素から順次、雨水を追跡する。河道においては、矩形断面を仮定し土層厚をゼロとして表面流のみを考える。

$$q = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta, & 0 \leq h \leq d_c \\ v_c d_c + v_a (h - d_c), & d_c < h \leq d_s \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^n, & d_s < h \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = r \quad (2)$$

ここで

$$v_c = k_c i, v_a = k_a i, k_a = \beta k_c, \alpha = \sqrt{i}/n$$

であり、モデルパラメータは流量流積関係式を決定す

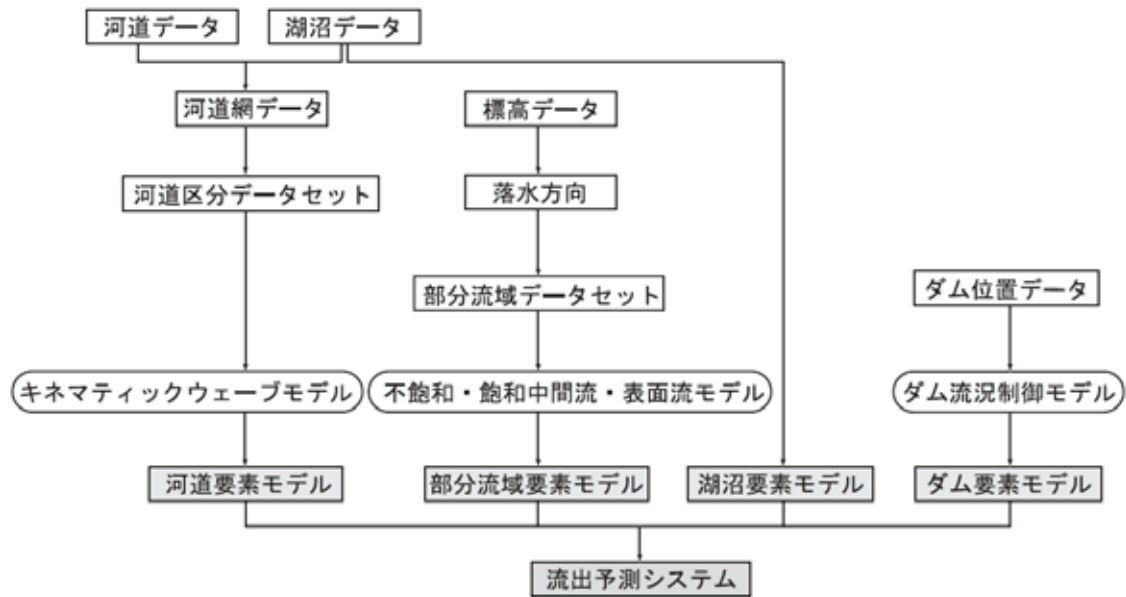


Fig. 4 Entire structure of distributed hydrological simulation model

る n ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$), k_a (m/s), d_c (m), d_s (m), β (-) となる。 n は地表面流が発生する場合のマニングの粗度係数, k_a は重力水が卓越する A 層内の透水係数, β は重力水部と不飽和水部との飽和透水係数の比である。

この分布型流出モデルを 7,000 km^2 を超える淀川流域に適用する。そのために、構造的モデリングシステム (高棹ら, 1995) を利用し、全体の流出予測システムを河道要素モデル, 部分流域要素モデル, 湖沼要素モデル, ダム要素モデルの集合として構成する。流出予測システム構築の手順は以下のようであり, Fig. 4 にその構成図を示す。

- 1) 国土数値情報の河道データ (W15-52L) と湖沼 (面) データ (W09-50A) を接続し、琵琶湖の湖岸線を含む河道網データを作成する。
- 2) 河道網を約 3 km 毎に分割して河道区分データセットを作成する。河道, 湖岸線を約 3 km に分割する理由は, そこに寄与する部分流域の大きさを 9 km^2 程度にするためである。この大きさは, (財) 日本気象協会の超短時間降水予測や国土交通省深山レーダの空間分解能に対応しており, 降雨の空間分布情報を失わずに計算効率のよい流出予測システムを構築することができる。
- 3) 標高データから落水方向を決定し, 約 3 km ごとに分割した河道区分に流入する部分流域を抽出する。部分流域の要素モデルは, 空間分解能 250m の落水線型の分布型流出モデルである。河川に流入せずに琵琶湖に直接流入する流域については, 湖岸線区分に流入する部分流域を抽出する。
- 4) 部分流域は異なる勾配, 落水方向, 面積を持つ矩

形斜面の集合であり, それぞれの矩形斜面に不飽和・飽和中間流・表面流モデルを適用して, 分布型の部分流域要素モデルを構築する。

- 5) 各河道区分には, キネマティックウェーブモデルを適用して河道要素モデルを構築する。河道幅に関しては, 淀川流域内の木津川流域, 琵琶湖流域, 桂川流域において 22 地点の河道幅 (起底流量時の河道幅) と集水面積の関係から指数関数式を作成し, すべての河道区分に対する河道幅を算出する。
- 6) 琵琶湖に対しては, 流入量, 降水量, 瀬田川洗堰からの放流量の連続関係から琵琶湖の水位変化を算定する湖沼要素モデルを構築する。琵琶湖からの放流量は, ダム流況制御モデルを瀬田川洗堰に適用した瀬田川洗堰のダム要素モデルによって算定する。
- 7) 淀川流域内の主要 8 基のダムを対象に, 流況制御を表現するダム要素モデルを構築する。
- 8) これら全ての要素モデルを接続して, 流域全体の流出予測システムを構築する。

淀川流域全体の流出予測システムは, 複数の河道要素モデル (1707 個), 部分流域要素モデル (1707 個), 湖沼要素モデル (1 個), およびダム要素モデル (8 個) によって構成される。対象とする淀川流域の流出予測システムは 3,000 個以上の要素モデルが全体のシステムを構成している。河道区分データセットをもとにそれらの要素モデルの接続関係を自動的に記述するシステムを開発し, 任意の河道区分を指定すると, その上流の流出予測システムを自動的に構築することが可能となっている。

2.3 ダム流況制御モデル

ダムの操作規定と意思決定を定式化することにより、ダムによる流況制御の過程をモデル化する。ここで構築するモデルは、ダムへの流入量、ダム上流域の平均降雨量、および、連携操作の対象となるダムの操作過程を入力情報とし、ダムからの放流量とダム貯水池の水位を予測するモデルである。ここで対象とする淀川流域の主要な8基のダム（Fig. 1）は、全て洪水制御をその目的の一つとする多目的ダムである。それぞれは異なった操作規定に従って運用されているが、以下に示す6段階の操作過程は洪水制御を目的としたダムに共通した操作過程であり、一般化することができる（市川，2001）。

- 通常時の操作
- 洪水警戒体制中の操作
- 予備放流操作
- 洪水調節操作
- ただし書き操作
- 洪水調節後の操作

それぞれのダムの操作は常に上の6段階の操作過程のいずれかにあり、各操作過程にある場合の操作方法と、ある操作過程から別の操作過程に移行する条件をif-then形式で定式化する。Fig. 5はダム流況制御モデルの操作過程と移行の順序、および操作規定で定められた水位を示している。詳しいモデル化に関しては佐山ら（2005）を参照されたい。

2.4 モデルパラメータ

国土数値情報の土地利用データをもとにして流域全体を森林域、農地域、都市域に分割し、それぞれ異なる流出パラメータを使用した。琵琶湖を除いた流域全体に対する面積率は、森林域が63%、農地域が20%、都市域が17%であった。使用したパラメータの値をTable 1に示す。農地域と都市域は土層を考慮せず流量流積関係式の d_c と d_s をゼロとした表面流モデルを用いた。また、河道の粗度係数 n は $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ とした。

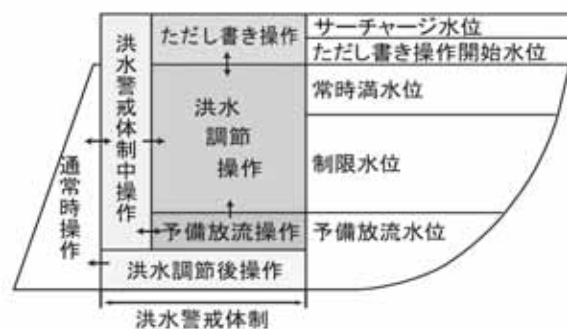


Fig. 5 Dam reservoir operation

3. 広域分布型実時間流出予測システムの開発

（財）日本気象協会によるレーダーアメダス実況雨量、超短時間予測（3時間先予測値まで）および気象庁による降水短時間予測（3時間から6時間先予測値）を入力データとし、2.で示した広域分布型流出予測モデルを用いる実時間流出予測システムを開発する。国土交通省の光ファイバーネットワークを通じた実時間観測データは、現システムでは予測計算には用いず、予測流量の比較に用いる。

本システムでは雨量データ取得から、その雨量データの分布型流出モデルへの入力、流出計算、計算結果のデータベース格納までの一連の作業を1時間毎に自動的に実行する。これにより、流域内の任意地点における流量を実時間で予測する。予測結果データベースは情報ネットワークを介して外部からアクセス可能とし、流量予測情報をインターネット上で閲覧可能とすることを念頭においている。本研究で開発した実時間流出予測システムの情報の流れをFig. 6に示す。

3.1 使用した水文データ

国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所の淀川水文観測データベースによる水位・流量観測情報と、（財）日本気象協会のMICOSによるレーダーアメダス合成実況雨量および予測雨量を使用する。以下に、各データの詳細を述べる。

Table 1 Model parameter values used for Yodo River distributed hydrological model

Land use	$n \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$	$k_a \text{ (m/s)}$	$d_s \text{ (m)}$	$d_c \text{ (m)}$
Forest (Kizu River basin)	0.6	0.01	0.25	0.1
Forest (Uji River basin)	0.6	0.01	0.25	0.1
Forest (Other than those above)	0.6	0.01	0.15	0.1
Agricultural areas	1.0	-	0.0	0.0
Urban areas	0.3	-	0.0	0.0

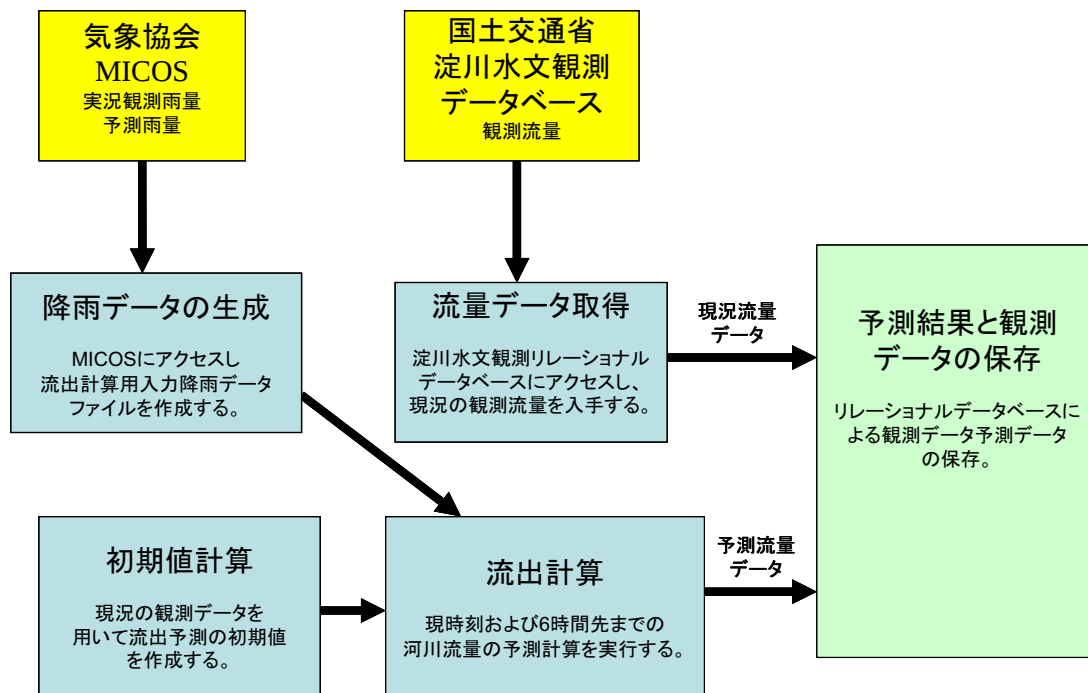


Fig. 6 Entire structure of real-time discharge prediction system

(1) 水位・流量データ

国土交通省では全国の主要河川において、10～60 分間隔で地上観測雨量および水位、流量、水質等の観測を行っている。その成果はデータベース化され国土調査等の基礎資料として幅広く利用されている。淀川流域内においても、39 地点の雨量観測所、50 地点の水位観測所、25 地点の流量観測所、7 地点の水質観測所でルーチン観測が実施されている。本研究では予測流量を比較検討するために、19 地点の観測流量データの速報値を利用する。ここで、本研究で用いた 19 地点の流量観測所とそれ以外の主要 10 地点、および流域内に存在する 8 基のダムの観測項目を Table 2 に示す。

各地点の観測流量データは、国土交通省の光ファイバーネットワークを通して淀川水文観測リレーショナルデータベースにアクセスし、SQL 言語の SELECT 文でテーブル名および必要な流量データのコード番号を指定して必要なデータを取得する。取得した数値データは、計算機上にデータファイルとしてダウンロードすることができる。観測流量の取得により、流域内の主要な地点での計算流量と観測流量の比較を行うことが可能となり、予測結果の評価を行うことができる。さらに過去のある観測地点での予測流量と観測流量の比較を容易に行うことが可能となった。

(2) 降水データ

MICOS (Meteorological Information Comprehensive Online Service) システムは、気象データをオンライン

で取り込み、防災・報道・農業・運輸・エネルギー開発など、あらゆる分野のユーザへの気象情報提供を行っているシステムである。1977 年から運用が開始され、テレビやラジオの天気予報に、MICOS システムが利用されている。MICOS で取り扱う気象データは、アメダス、ひまわり等、数十種類に及んでいる。その中で本研究では、以下の 4 種類のデータを用いる。

レーダーアメダス解析雨量

気象レーダーは、空気中を落下する雨粒に電波を当て、その反射強度を測定することにより、地上に降ると考えられる雨量を推定し、降水地域や、その移動状況を観測する。一方、アメダス (AMeDAS) は気象庁が全国約 1,300 地点に設置した自動地上気象観測システムである。レーダーアメダス解析雨量は、気象レーダーによる推定雨量の誤差をアメダス地上雨量によって補正した空間分解能 $2.5\text{km} \times 2.5\text{km}$ の雨量データであり、10 分間隔で作成され実時間で配信されている。

超短時間降水予測

画像処理技術と移流モデルによる予測方程式を組み合わせた運動学的手法による降水予測である、空間分解能 $2.5\text{km} \times 2.5\text{km}$ を持つ。3 時間先までの予測データが 10 分間隔で作成・配信されている。

気象庁降水短時間予測

メソ数値予報モデルによって、空間分解能 $5\text{km} \times 5\text{km}$

Table 2 Discharge stations and dam reservoirs used in the system

地点	水系	流域面積 (k m ²)	観測項目	国土交通省 識別番号	淀川流出モデル 識別番号
枚方	淀川	6558.2	流量	3162	1770
高浜	淀川	6432.7	流量	3142	1867
八幡	木津川	1662.2	流量	3122	2348
飯岡	木津川	1589.1	流量	3182	1874
加茂	木津川	1469.4	流量	3322	1858
有市	木津川	1194.2	流量	3662	2662
家野	木津川	475.8	流量	3622	1873
上名張	木津川	190.8	流量	3602	1020
依那古	木津川	175.4	流量	3682	898
佐那具	木津川	157.4	流量	3702	2961
納所	桂川	1114.2	流量	3062	1864
桂	桂川	833.1	流量	3042	1876
天竜寺	桂川	813.8	流量	3202	1868
保津峡	桂川	671.7	流量	3462	408
亀岡	桂川	671.7	流量	3442	405
新町	桂川	540.9	流量	3422	415
淀	宇治川	3546.9	流量	3102	1880
向島	宇治川	3483.6	流量	3082	1862
深草	桂川	183.2	流量	3482	580
槇尾山	淀川	3415.5	-	-	1860
大鳥居	宇治川	156.7	-	-	1865
島ヶ原	木津川	521.8	-	-	1866
沖ヶ原	宇治川	84.4	-	-	2659
野洲	宇治川	373.5	-	-	1870
中郡橋	宇治川	358.9	-	-	1085
三雲	宇治川	287.4	-	-	1861
川合	宇治川	188.0	-	-	1523
菅並	宇治川	106.1	-	-	3085
安曇川	宇治川	303.5	-	-	1116
天ヶ瀬ダム	宇治川	3399.7	水位・流出入量	4101	-
比奈知ダム	木津川	75.8	水位・流出入量	4201	-
日吉ダム	桂川	283.1	水位・流出入量	4221	-
室生ダム	木津川	134.9	水位・流出入量	4121	-
布目ダム	木津川	78.6	水位・流出入量	4181	-
瀬田川洗堰	宇治川	3046.2	水位・流出入量	3721	-
青連寺ダム	木津川	100.7	水位・流出入量	4141	-
高山ダム	木津川	631.2	水位・流出入量	4161	-

降雨予測が行われている。メソ数値予報モデルとは、低気圧や高気圧などの大規模気象現象と、竜巻などの小規模気象現象の中間に位置するメソ気象現象を解析するために開発されたモデルである。主として、水平

規模が数km～10km程度の積乱雲による集中豪雨の解析などに用いられる。気象庁降水短時間予測では、6 時間先までの予測データが 1 時間間隔で作成・配信されている。

Table 3 Rainfall prediction data sets used for river discharge predictions

データ種別	内容	格子間隔	送信時刻
超短時間降水予測	実況値+180分後までの予測値 (10分間隔, 19個)	約 2.5km	10分間隔, 8分頃 (8分遅れ)
気象庁降水短時間予測	実況値+6時間後までの予測値 (1時間間隔, 7個)	約 5km	30分間隔, 毎時 20分&50分頃 (20分遅れ)
気象協会メッシュ予測	実況値+51時間後までの予測値 (1時間間隔, 52個)	約 5km	9時から 51時間先, 毎日 15時頃 21時から 51時間先, 毎日 3時頃

Table 4 Example to merge rainfall prediction data at 10:00am

予測データ (気象協会メッシュ予測の最終時刻のデータまで)		
10時00分の実況値		時間分解能 10分
10時10分の予測値	超短時間降水予測	空間分解能 2.5km 格子の UTM 座標に変換 (最近傍点を選択)
:		
13時00分の予測値		
13時30分の予測値	気象庁降水短時間予測	時間分解能 1時間 空間分解能 5km を 2.5km 格子に変換 (最近傍点を選択)
:		
15時30分の予測値		
16時の予測値	気象協会メッシュ予測	時間分解能 1時間 空間分解能 5km を 2.5km 格子に変換 (最近傍点を選択)
:		
翌々日 0時の予測値		
実況データ (過去 1 時間分)		
9時00分の実況値		時間分解能 10分
:	超短時間降水予測	空間分解能 2.5km 格子の UTM 座標に変換 (最近傍点を選択)
10時00分の実況値		

日本気象協会局地予報予測

(財) 日本気象協会のスーパーコンピュータによる局地予報モデル (ANEMOS: アネモス) により, 空間分解能 5km×5km の気象予測が行われている。ANEMOS は気象庁の数値予報モデルの風・気温・湿度などを入力し, 風・気温・湿度・降水などを, 気象庁数値予報モデルよりも時空間的にさらに細かい空間分解能で計算することを可能としている。このデータは 1 時間間隔で 51 時間先までの予測データが作成されており, 配信されるのは毎日 2 回 (3 時頃, 15 時頃) となっている。

3.2 実時間流出予測計算の手順

実時間流出予測計算の全体の手順を Fig. 7 に示す。以下, 各項目について説明する。

(1) 降雨データの作成

Table 3 に流出予測計算で用いる雨量データを示す。

マイコスにより配信される雨量予測データは緯経度上で整備されている。一方, 流出予測システムは UTM 座標系で構築されている。そこで, まず雨量予測データの中心格子位置を UTM 座標に変換する。次に, 流出システムで用いられている UTM 座標系の格子 (東西 46 個, 南北 66 個の 2.5km×2.5km の格子) に最も近いマイコス雨量データの値を, その格子の雨量データとする。すべての雨量データをこのように座標変換して

- 1 時間前～現在時刻: レーダーアメダス解析雨量
- 現在時刻から 3 時間先: 超短時間降水予測
- 3 時間から 6 時間先: 気象庁降水短時間予測
- 6 時間から 51 時間先: 気象協会メッシュ予測

のそれぞれの雨量現況・予測データを合成し, 流出予測システムへの入力雨量データセットを作成する。雨量データの合成は 1 時間ごとに自動的に行う。Table 4 に午前 10 時に雨量データを合成する例を示す。なお, マイコスデータでは欠測値は 999.9(mm/h) となっているため, 合成時にこれを 0.0(mm/h) に置き換える。



Fig. 7 Flow of real-time discharge prediction

(2) 初期値および時刻の設定

流出計算を開始する前に、各地点における粗度係数・土層のパラメータ・初期流量・開始時刻の設定を行う。まず、無降雨時の時刻を選び国土交通省の淀川観測データベースから初期の河川流量を取得する。次に流域の雨水移動が定常状態にあることを仮定し初期土壌水分量を設定する。また、計算開始時刻については、現在時刻を計算機から取得し、さらにその時刻の年間の通し秒を計算する。

(3) 現況流出計算

現況流出計算を1時間前から現在時刻まで実行する。例えば、現在時刻が14時であれば、13時～14時に観測されたレーダーアメダス解析雨量データを入力し流出計算を実行する。この実況雨量データを入手できる

のは、14時08分以降であるため、時間的な余裕を持たせて14時15分に雨量合成データの作成と流出計算を開始する。流出計算に数分程度要するため、14時の現況計算流量が得られるのはその数分後となる。

実際のシステム運用では、実況雨量データの配信が遅れることがある。この観測システムの時間遅れに対応するために、解析雨量データは、毎時15分、35分、55分の3回に取得する機会を与え、既に解析雨量データが取得済みの場合は、以降の作業は実施しないようにする。例えば、14時15分にデータが取得できれば、35分と55分にはデータ取得および流出計算は行わない。現況流出計算の開始時の初期状態量は、1時間前の現況計算の計算結果を用いる。この場合であれば、12時～13時の現況計算による13時の状態量を13時から14時の現況流出計算の初期状態とする。

Table 5 Structure of the tables of relational data base to store simulated results

Year	Month	Day	Hour	Through time in second from the beginning of the year	Catchment ID No.248	Catchment ID No.249	...	Catchment ID No.1770
2005	12	8	0	29402400	7.5	3.6	...	80.2
2005	12	8	1	29466000	17.4	4.6	...	78.4
2005	12	8	2	29469600	15.3	4.7	...	74.3
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...

(4) 予測流出計算

予測流出計算では、現況流出計算によって得られた現在時刻の状態量を初期値とし、その上で6時間後までの予測雨量データを入力して予測流出計算を行う。このために現況流出計算で得られた計算終了時点での状態量記録ファイルを予測計算用の初期状態ファイルとして用いる。また、この初期状態ファイルは、1時間先における現況流出計算のための初期状態ファイルとしても用いる。

3.3 予測結果のデータベースシステムへの格納

予測計算によって得た結果をリレーショナルデータベースに格納する。ここでは、格納用のデータベースとしてPostgreSQLを用いる。以下の観測値および流出計算結果をデータベースシステムに時々刻々格納した。ここでは、それぞれの入力値および入力方法について説明する。

(1) 流域内の主要地点

流量観測が行われている地点を含む主要29地点について、以下の項目をデータベースシステムに格納する。

- 観測流量 (19 地点)
- 流域平均観測雨量 (29 地点)
- 流域平均予測雨量 (29 地点)
- 現況計算流量 (29 地点)
- 予測計算流量 (29 地点)

観測流量は、国土交通省の淀川水文観測データベースによる速報値をデータベースシステムに格納する。予測流出計算は毎時6時間先まで行われるので、1時間先予測流量から6時間先予測流量まで、1時間毎に別々のテーブルに格納する。つまり、現況計算流量と予測計算結果を格納するために、合計7個のテーブルを準備する。

テーブルの構造はすべて同じでTable 5に示す構造を持つ。テーブルには時刻とその時刻に対応する計算流量が地点ごとに格納されている。予測計算結果は、予測計算の実施時刻に対応して計算結果を格納するのではなく、予測対象時刻をキーとして計算結果を格納

する。例えば、現在時刻を13時とすると、この時刻に実施した予測計算の2時間先の予測流量は2時間先の予測計算結果を格納するテーブルの15時の行に、5時間先の予測流量は5時間先の予測計算結果を格納するテーブルの18時の行に計算結果を格納する。これにより、過去に遡って予測計算の正確性を評価したいときに、それぞれのテーブルから同一の時刻を検索することによって観測流量と予測計算流量との比較することができる。

流域平均観測雨量および流域平均予測雨量は、日本気象協会MICOSによる雨量データを用いて対象地点上流域の流域平均雨量を計算する。計算結果を格納するテーブルは、流量計算結果と同様、現況雨量および1時間先予測流域平均雨量から6時間先予測流域平均雨量に対して1時間毎に別々のテーブルに格納するため、合計7個のテーブルを準備する。

(2) 1707 箇所の部分流域の計算地点

計算結果が得られる部分流域については

- 現況計算流量
- 予測計算流量

をデータベースシステムに格納する。主要地点の流量計算と同様、現況流出計算と1時間先～6時間先までの7種類の計算結果が得られる。PostgreSQLでは同一のテーブルには1600列までしかデータを格納できないため、1707箇所ある全ての部分流域の計算結果を1つのテーブルに入れることは不可能である。そこで、枚方地点(1770番)を境にして、それ以前の識別番号を有する地点とそれ以降の識別番号を有する地点とで予測結果を格納するテーブルを分割することにした。つまり、現況計算流量と6時間分の予測計算流量の7種類の計算結果を2つに分割して格納するために、合計14個のテーブルを準備した。

(3) 8基のダムに関する観測値・予測値

天ヶ瀬ダム・室生ダム・青蓮寺ダム・高山ダム・布目ダム・比奈知ダム・日吉ダムおよび瀬田川洗堰の8つのダムを予測対象とし、以下の項目をデータベース

システムに格納する。

- 観測流入量・放流量・ダム貯水位など
- 現況計算ダム流入量・ダム放流量・ダム貯水位
- 予測計算ダム流入量・ダム放流量・ダム貯水位

観測流入量・放流量は、国土交通省の淀川水文観測データベースによる速報値をデータベースシステムに格納する。計算結果は、部分流域における計算結果と同様に、現況データと6時間後までの1時間間隔の予測データを別々のテーブルに格納する。

4. 情報ネットワークの構成

4.1 全体構成

情報ネットワークの全体構成をFig. 8に示す。雨量・流量データを取得するため、国土交通省水文観測データベースおよび気象庁気象観測・予測データベースを、専用回線により研究室内部のネットワーク(KUINS3)と結ぶ。KUINS3は外部からの進入を許さない一方通行のネットワークであり、京都大学情報環境機構によって設置されている。国土交通省のデータベースに関しては、セキュリティをさらに高めるためにKUINS3との間にファイアーウォールを設置している。

取得したデータをもとに、流出予測計算を実行し、その結果をデータベースに格納する。また、インターネットを通じて予測計算結果を閲覧できるように、データベースシステムに動的に条件を設定し、予測結果を

表示する予測計算結果表示システムを開発している。

4.2 観測情報自動取得システム

ネットワーク構成のうち、国土交通省に設置されている淀川流量に関するデータベース(Oracle)から必要なデータを自動取得し、そのデータをKUINS3内にあるデータベース(Oracle)に自動転送する。国土交通省のネットワークとKUINS3とのネットワークの間には厳重なセキュリティを設ける必要があるため、以下の手順でデータ転送を実施するシステムを開発した(Fig. 9 参照)。

- 1) 国土交通省管理の河川流量データベース(Oracle)からテーブル内のデータを抽出し、10分間隔で抽出したデータをCSV形式でデータ転送サーバに保存する。
- 2) 抽出したCSV形式の観測データを3分間隔で差分データのみDMZに設置されたデータベースサーバに自動送出する。
- 3) CSV形式の流量ファイルを用いて、DMZに設置したデータベースサーバの流量テーブルデータを3分間隔で自動更新する。

以上の3つの手順を得て、DMZに設置されたデータベースシステムが、国土交通省河川流量データベース(Oracle)のミラーサーバとしての役目を果たす。

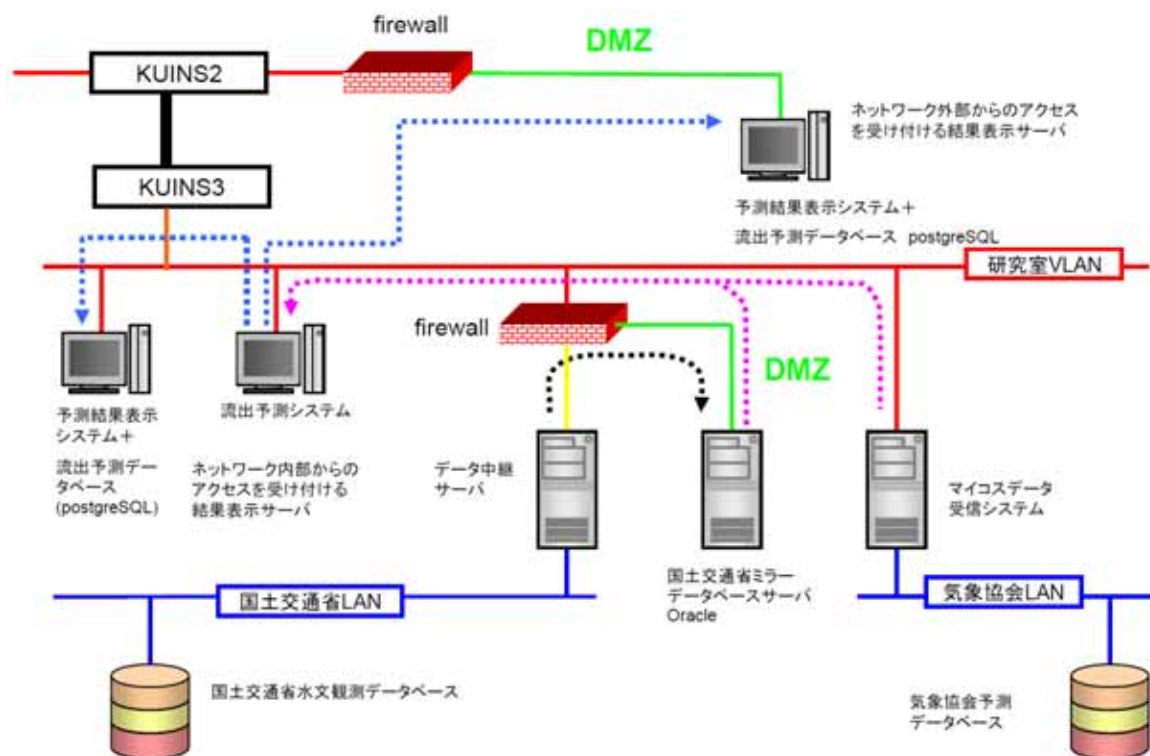


Fig. 8 Structure of information network

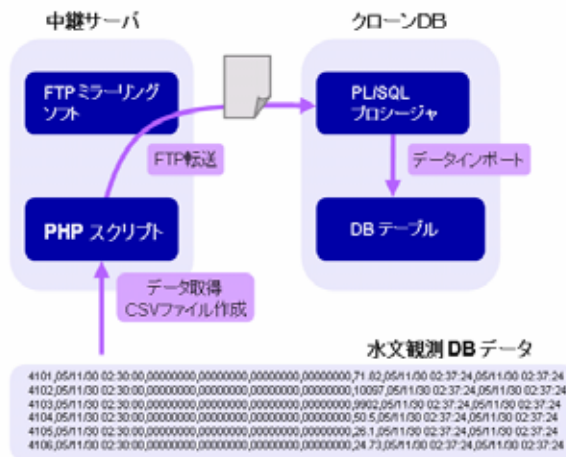


Fig. 9 Update procedure of discharge mirror database server

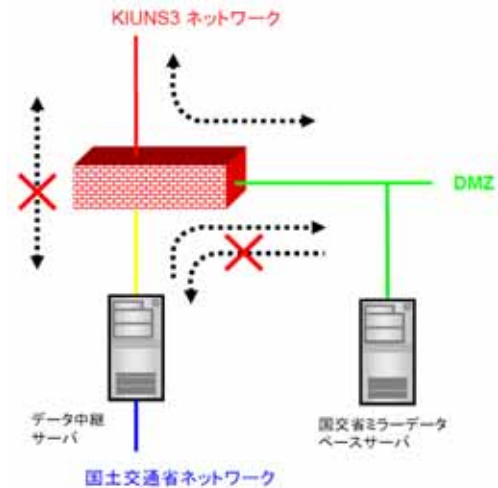


Fig. 10 Security measure to connect local network

4.3 セキュリティ対策

国土交通省ネットワークのセキュリティを向上させるため、以下の対策を施している。

- 1) 国土交通省ネットワークと KIUNS3 ネットワークとの間に FireWall を設置し、データ送受信ルールを決め、ポートフィルタリング、IP フィルタリングを実施する。Fig. 10 のように、同時方向データ送受信が可能なのは、KIUNS3 と DMZ 間の通信のみで、データ中継サーバとミラーサーバのある DMZ 間は、DMZ に向けての通信のみの一方向しか許さない。また KIUNS3 とデータ中継サーバ間はすべての通信を遮断する。
- 2) データ中継サーバ用計算機には、ネットワークを論理的に遮断する。また、データ中継サーバには指紋認証システムを付与し、特定の人物しか作業を許可しない。
- 3) データ中継サーバ自身にも IP フィルタリングとポートフィルタリングを実施し、不要なサービスによるセキュリティホールをなくす。

5. リアルタイム予測情報表示システムの構築

前節までに開発してきた広域実時間流出予測システムの予測結果をインターネット上で閲覧することを可能とするリアルタイム予測結果表示システムを構築する。観測結果および予測計算結果は 3.3 で示したようにリレーショナルデータベースシステムに格納される。予測結果表示システムは、条件を設定しこのデータベースシステムにアクセスして予測結果をウェブブラウザ上に表示する。これにより、予測システムは一元的に管理し、ネットワークに接続する任意の計算機から予

測結果を閲覧することが可能となる。つまり水系一体とした予測システムを構築し、水系内で関心のある任意の地点を選択し、その予測内容を表示することができる。現在、用意している表示内容は下記の 4 種類である。地域の要求に応じて、特定の領域を拡大表示などのサービスを付加することも可能である。

- 1) 現況・予測降水量、現況・予測河川流量マップの動画表示 (Fig. 11)

レーダー観測による現況・予測降水量および本予測システムで得られた現況・予測河川流量のマップを動画で表示する。これにより、雨域の移動とともに河川流量の変動を容易に視覚的に把握することができる。

- 2) 地点別の予測結果の時系列グラフ表示

対象地点ごとに 6 時間先までの最新の河川流量の予測結果をグラフ表示する。グラフには予測流域平均雨量と予測河川流量が表示される。

- 3) 地点別の予測結果検証用の時系列グラフ表示

対象地点ごとに過去に遡って、予測システムの予測結果を検証する。1 時間先から 6 時間先予測流量までを任意に選択し、重ねてグラフ表示する。あわせて流域平均雨量についても同様に表示する。これにより、予測システムの計算結果が、どの時間までどのように信頼できる予測値を計算しているか、またどのように予測が外れているかを検証することができる。

- 4) 自動更新表示 (Fig. 12)

最新の予測結果を時々刻々、表示する。表示内容は降水量と河川流量のマップの動画と、主要地点の予測流域平均ハイトグラフとハイドログラフである。動画画面は現在時刻から 6 時間先までエンドレスに動画を表示する。主要地点のグラフ情報は、一定時間間隔ごとに表示場所を切り替え、全体の予測内容が把握できるようにしている。

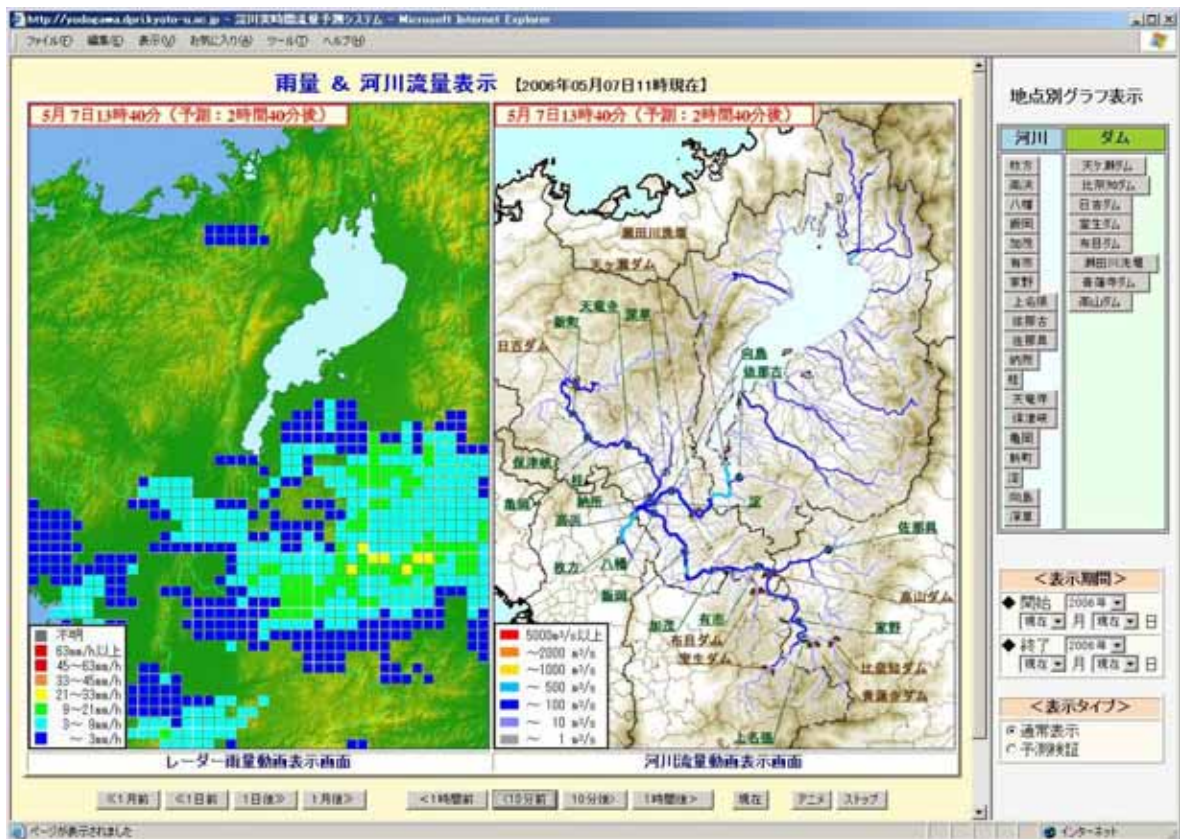


Fig. 11 Web based interactive window of real-time discharge prediction system

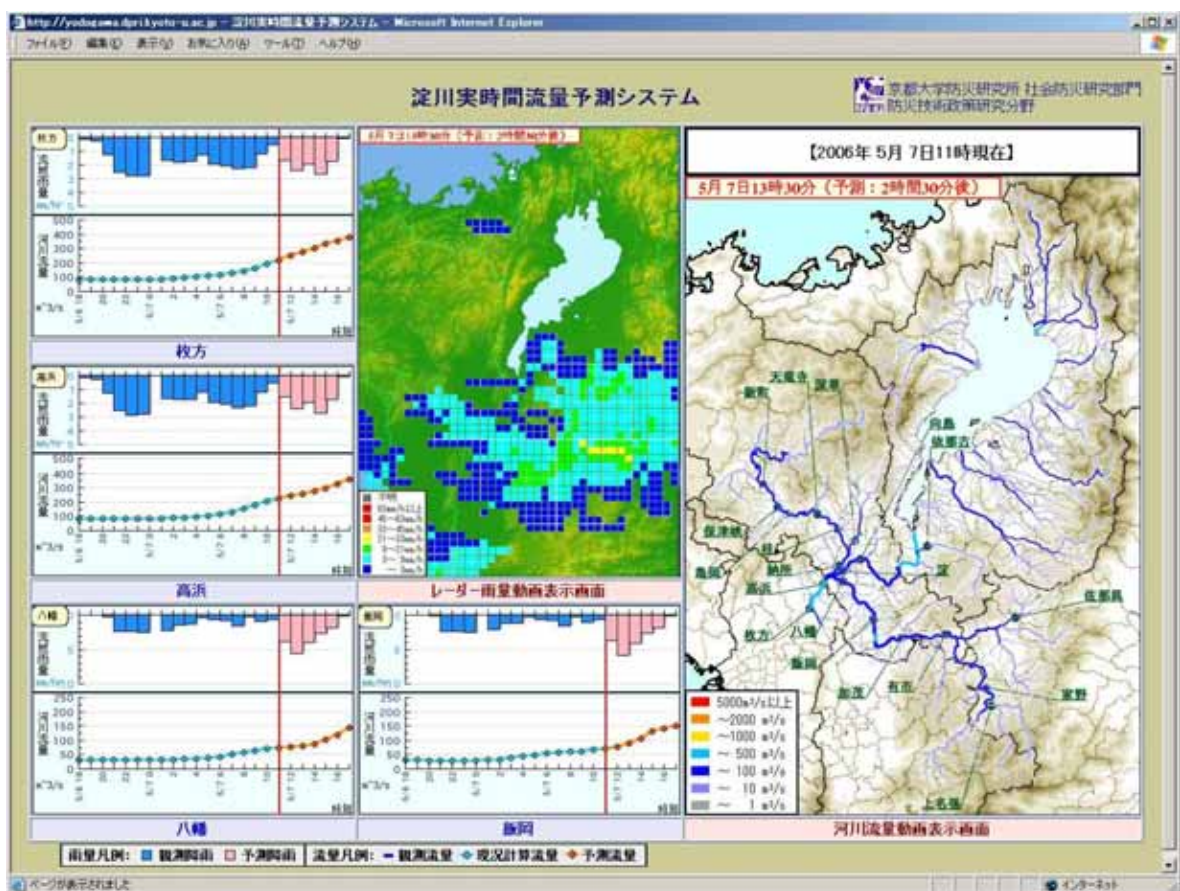


Fig. 12 Web based automatic window of real-time discharge prediction system

6. おわりに

本研究では、実時間気象・水文観測・予測情報を利用し、広域分布型流出予測モデルをエンジンとするリアルタイム高度水防災情報提供システムを開発して、中小河川流域を含んだ任意の流域の洪水予測情報の提供に寄与することを目的としている。本論では淀川流域(枚方上流域7,630km²)をデモンストレーション流域とし、本研究グループが開発を進めている広域分布型流出予測モデルを実時間予測対応に改良して、この予測モデルを核とする予測システムを構築した。実時間気象・水文情報としては、国土交通省淀川河川事務所と京都大学防災研究所との間に開通した光ファイバー専用情報網を通して収集される河川水位・流量情報、および(財)日本気象協会による短時間降水予測情報を用いた。また、これらの観測・予測結果を効果的に表示するために動的なインターネット技術を用いた予測情報表示システムを構築した。

基本的な実時間流出予測システムの枠組みは実現した。このシステムを基本とし、最新の技術レベルを有する河川流量予測システムに発展させることが今後の研究目標となる。具体的な研究項目として、これまでに開発した実時間広域分布型流出予測システムに蒸発散量・融雪量を推定するサブシステムを導入する必要がある。また、実時間河川流量観測情報によるモデル状態量の同化・初期値化サブシステムを導入して予測システムの精度向上を図ることが必要である。さらに、予測システムを通年で運用して時々刻々予測値の精度を検証するとともに、実時間予測情報表示システムを拡張して時々刻々、流量予測情報をインターネットを通じて発信する情報基盤を構築し、実時間流量予測情報提供システムに発展させる必要がある。

謝 辞

本研究は平成 17 年度 国土交通省 建設技術研究開発費補助金 第1号(代表:立川康人, 京都大学防災研究所)の補助を得た。国土交通省淀川河川事務所からは、光ファイバーケーブルを通して水文観測情報データベースにアクセスし、実時間で水文観測データの提

供を受けている。また(財)日本気象協会からは短時間降雨予測情報の提供および予測結果表示システムの開発において協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 池淵周一・椎葉充晴・宝 馨・立川康人(2006):エース水文学, 朝倉書店。
- 市川 温(2001):分布型流域流出系モデルの構成と集中化に関する研究, 京都大学博士論文。
- 市川 温・村上将道・立川康人・椎葉充晴(2001):流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, No. 691/II-57, pp. 43-52。
- 国土交通省(2004):豪雨災害対策緊急アクションプラン, 平成 16 年 12 月 10 日。
- 佐山敬洋・立川康人・寶 馨・市川温(2005):広域分布型流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価, 土木学会論文集, No. 803/II-73, pp. 13-27。
- 佐山敬洋・菅野浩樹・立川康人・寶 馨(2006):ダム群操作過程を考慮する広域分布型流出予測システムを用いた淀川流域の治水安全度評価, 水工学論文集, vol. 50, pp. 601-606。
- 椎葉充晴・立川康人・市川 温(1998):流域地形の新しい表現形式とその流出モデリングシステムとの結合, 京都大学水文研究グループ研究資料, No. 1, 142 pp。
- 椎葉充晴・市川 温・榊原哲由・立川康人(1999):河川流域地形の新しい数理表現形式, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 1-9。
- 高埴琢馬・椎葉充晴・市川 温(1995):構造的モデリングシステムを用いた流出シミュレーション, 水工学論文集, 第 39 巻, pp. 141 - 146。
- 立川康人・永谷 言・寶 馨(2004):飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, vol. 48, pp. 7-12。
- 立川康人編(2006):リアルタイム高度水防災情報提供システムに関する研究開発, 平成 17 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度(基礎・応用研究開発)報告書, 102 pp。

Development of a Real-time Distributed Rainfall-runoff Prediction System and its Application to the Yodo River Basin

Yasuto TACHIKAWA, Takahiro SAYAMA, , Yoshiaki KANI*, Kaoru TAKARA,
Hideki MATSUURA, and Tomoya YAMAZAKI

*Graduate School of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

Synopsis

A real-time distributed flood prediction system is developed for the Yodo River basin (7,281km²). The system provides 6 hrs-ahead predictions every hour. The predictions include dam reservoir inflows, outflows and reservoir stages located in the catchment and 1,707 places of river discharges at about 3 km intervals along the channel networks shown on 1:25000 topographic maps. Topography of the watershed is modeled with 250 m grid DEMs and water movement of mountainous slopes and rivers are routed using the kinematic wave model. To drive the prediction system, 6 hrs distributed rainfall prediction with 2.5 km grid resolution provided from the Japan Weather Association and the Japan Meteorological Agency is used. The interactive real-time web-based data displaying system is also developed.

Keywords : Distributed rainfall-runoff model, Real-time discharge prediction, small scale basin, Yodo River basin