

技術研究開発テーマ名	高度レーダー雨量情報と分布型流出モデルを用いた河川水位・流量の実時間予測システムの開発
研究代表者	
氏名	所属・役職
立川 康人	京都大学大学院工学研究科・准教授
共同研究者	
氏名	所属・役職
金 善攻	京都大学大学院工学研究科・講師
萬 和明	京都大学大学院工学研究科・助教
<p><b>背景・課題</b></p> <p>計画規模に匹敵する、あるいはそれを上回る豪雨により、各地で甚大な洪水被害が起きている。平成 23 年 8 月後半から 9 月にかけて、紀伊半島を襲った台風 12 号は熊野川流域に既往最大を上回る大洪水を引き起こした。このような大洪水に対しては、治水施設の整備のみに依存した対策には限界があり、詳細で確度の高い洪水予測と、それに基づく的確な治水施設の運用や水防活動、住民避難が被害を軽減するための重要な対策となる。そのためには、流域全体の任意の地点での洪水予測を目的とする実時間での分布型流出予測システムが重要となる。</p> <p><b>技術研究開発の目的</b></p> <p>X バンドMP レーダを用いた実時間洪水予測システムを構築する。具体的には、分布型流出モデルと河川水位予測システムとを組み合わせ、X バンドMP レーダ雨量情報を用いて河川流量・水位を予測するシミュレーションシステムを淀川（枚方上流域）を対象として開発する。実施した項目は以下の通りである。</p> <p>1) 分布型流出モデルの予測精度の向上に関する検討</p> <p>過去に経験したことのない大洪水を再現・予測できることが重要となる。通常、モデルパラメータを決定するときに、計画規模に相当するような水理・水文データは存在しない。平成 23 年に紀伊半島を襲った台風 12 号では、過去最大級の豪雨がもたらされた。そこで、分布型流出モデルの予測精度向上の一環として、本研究で用いる分布型流出モデルの台風 12 号洪水に対する適用性を確認した。</p> <p>2) 淀川流域（枚方上流域）を対象とした流出予測システムの構築</p> <p>淀川流域（枚方上流域）を対象とし、X バンドMP レーダデータを入力とする分布型流出モデルを構築した。構築した分布型流出モデルを用いて X バンドMP レーダによる流出予測結果を分析するとともに、C バンドレーダ雨量データや解析雨量による河川流量との再現性を比較した。また実時間予測計算に用いるレーダ雨量の時空間分解能の分析および重み付き合成レーダ雨量データによる流量予測計算の精度向上の可能性を検討した。</p> <p>3) 水位予測システムの高度化</p> <p>分布型流出モデルで得た予測流量を予測水位に繋げるために、二次元の河道水位予測計算モデルを構成し、それに粒子フィルタを適用した河川水位予測システムを構成した。これを桂川下流域に適用し、水位予測精度の向上を検討した。</p> <p><b>技術研究開発の内容・成果</b></p> <p>-1 分布型流出モデルの予測精度向上に関する検討</p> <p>平成 23 年 8 月 25 日から 9 月 5 日にかけて発生した台風 12 号により紀伊半島の熊野川に記録的豪雨がもたらされ、未曾有の洪水が発生した。平成 23 年台風 12 号は大型で動きが遅く上陸後もそ</p>	

の勢力を保ったため、長時間にわたり台風周辺の非常に湿った空気が流れ込み大雨をもたらした。特に熊野川流域を含む紀伊半島では8月30日17時からの総降水量が広い範囲で1,000mmを超え、一部の地域では1,800mmに達し記録的な大雨となった。

こうした過去に経験したことのない大洪水を再現・予測できることが重要となるため、台風12号に対して本研究で用いている分布型流出モデルの適用性を分析した。具体的には、熊野川流域を対象として、淀川流域で適用する分布型流出モデルとまったく同じ流出モデルを構築し、平成23年8月後半から9月にかけて紀伊半島を襲った台風12号による大洪水の再現性をモデルパラメータの感度の点から分析した。

### (1) 分布型流出モデル

分布型流出モデルは市川ら[1]が開発した分布型流出モデルを基本とする。流出モデルはOHyMoS[2]を用いて構成され、水文要素を表現する要素モデルの集まりとして全体の分布型流出モデルが構成される。熊野川を対象とする分布型流出モデルは、河道要素モデル、部分流域要素モデルからなり、淀川を対象とする分布型流出モデルは、河道要素モデル、部分流域要素モデルに加えて琵琶湖を介した流出を表現する湖沼要素モデル、流域内部に存在するダム貯水池による流水制御過程を表現するダム要素モデルから構成される[3]

河道流れのモデルは、国土数値情報の河道データをもとに作成する。河道は合流点、流量観測所地点、ダム地点で分割する。河道幅に関しては、河道幅と集水面積の関係から指数関数式を作成し、全ての河道区分に対する河道幅を算出する。それぞれの河道区分にキネマティックウェーブモデルを適用し、河道要素モデルを構築する。このモデルの流量と流積の関係式は(1)式で表され、(2)式の連続式と組み合わせて河道流量を計算する。

$$q = \alpha A^m \tag{1}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \tag{2}$$

ここで、 $Q$ は流量、 $A$ は流積(通水断面積)、 $\alpha$ はパラメータ( $\alpha = \sqrt{\sin\theta}/n$ 、 $\sqrt{\sin\theta}$ は勾配、 $n$ は粗度係数)、 $m$ は定数(=5/3)、 $q_i$ は分布型流出モデルから与えられる単位長さ当たりの側方流入量である。

斜面流れのモデルは、国土数値情報の標高データ(空間分解能:250m)をもとに最急勾配法で落下方向を決定し、各河道区分に流入する部分流域を抽出するて構成する。部分流域は勾配、落水方向、面積の情報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・飽和中間流モデル・表面モデル[4]を適用し、分布型の部分流域要素モデルを構築する。このモデルでは、土壌中のマトリクス部を流れる不飽和流、土壌中の空隙部の重力水として流れる飽和中間流、そして地表を流れる表面流の3種類の流れを考え、土層厚を $D$ 、土壌中の最大水分量に対応する水深高さを $d_s$ 、マトリクス中の最大水分量に対応する水深高さを $d_c$ とする。 $k_c$ をマトリクス部の飽和透水係数、 $k_a$ を大空隙での飽和透水係数とし、 $v_c = k_c i$ 、 $v_a = k_a i$ として、単位幅流量 $q$ と水深 $h$ の関係を

$$q = \begin{cases} v_c d_c \left(\frac{h}{d_c}\right)^\beta, & 0 \leq h < d_c \\ v_c d_c + v_a (h - d_c), & d_c \leq h < d \\ v_c d_c + v_a (h - d_a) + \alpha (h - d)^m, & d \leq h \end{cases} \tag{3}$$

とモデル化する。ここで、 $\beta$ はマトリクス部において含水率の減少に伴う透水係数の減少の大きさを表すパラメータで、マトリクス部と大空隙部の流量流積関係の連続性から $\beta = k_a/k_c$ とする。この流量・流積関係式と連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \tag{4}$$

とを組み合わせるて矩形斜面からの降雨流出の計算を行う。 $r$ は降雨強度である。斜面部には飽和・不飽和流れを考慮したキネマティックウェーブモデルを、河道部には地表面流方のキネマティックウェーブモデルを適用し、分布型流出モデルを構成した。流域地形情報データの作成には流域地形情報を基盤とした水文モデル構築システム GeoHyMoS[5]を利用した。250m空間分解能の国土数値情報を用いて相賀地点上流を対象に作成した流域地形モデルを図1に示す。

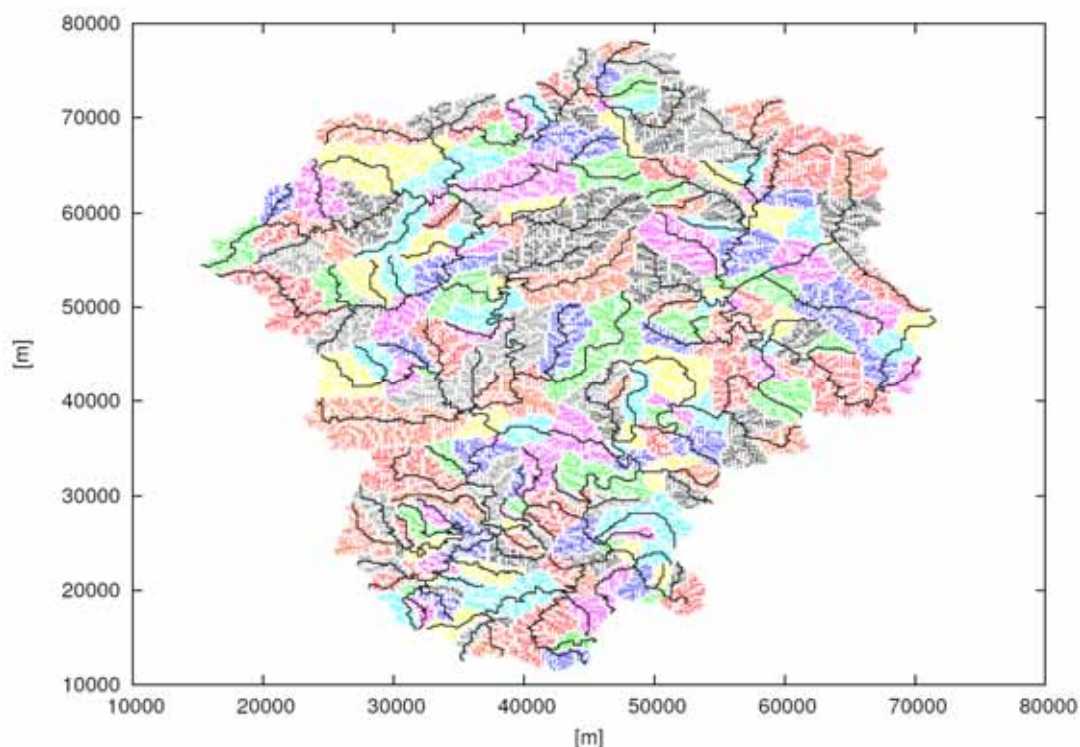


図 1: 熊野川流域の流域地形情報データ。横軸と縦軸は東経 135.375、北緯 33.583 を原点としたときの UTM 座標。黒線は河道を、色分けされた線分は個々の斜面要素の繋がりを表す。

### (2) 平成 23 年台風 12 号洪水および既往洪水の再現

熊野川流域の 7 つの既往洪水データを利用して分布型流出モデルのパラメータを同定し、その再現性を確認した。対象流域は小森ダムおよび二津野ダムの下流域(594km<sup>2</sup>)とし、小森ダムおよび二津野ダムの放流量を対象流域の上端に与えた。降雨データは同流域内の電源開発(株)が管理する地点雨量をもとに作成した 5km 分解能のメッシュデータ(以下、地点雨量)と気象庁の解析雨量 2 種類を用いた。パラメータの同定には SCE-UA 法[6]を用いた。表 1 に、解析雨量を用いた場合に、既往洪水を用いて最適同定したときの再現性と、そのパラメータを他の洪水に適用した場合の再現性を Nash 指標を用いて示す。Nash 指標はいずれの場合も 0.8 以上で洪水の再現性は高かった。同定したパラメータを用いた場合の計算結果の一例を図 2 に示す。平成 2 年の相賀地点での計算流量と電源開発(株)による観測流量、国土交通省(水文水質データベース)による観測流量、解析雨量を用いた場合の流域平均雨量を表している。観測流量はともに水位流量曲線から推定された値である。この計算結果と観測結果をみると、電源開発(株)と国土交通省による観測流量はほとんど一致していること、地点雨量と解析雨量による計算流量はほとんど一致していること、観測流量が計算流量を大きく上回ることがわかった。この結果は対象とした 7 つの洪水すべてでそうであった。

### (3) 再現結果と考察

すべての既往洪水の再現でハイドログラフの概形、ピーク生起時刻は概ね一致しているものの、計算流量は相賀での観測流量よりも小さくなった。原因として考えられる SCE-UA 法の目的関数の設定、土層パラメータの感度、降雨データの不確かさ、洪水期間の水収支を分析した。その結果、SCE-UA 法の目的関数を変えても計算結果に違いはないこと、土層厚パラメータを 0 としても計算結果にほとんど変化はないこと、地点雨量による計算結果と解析雨量による計算結果にほとんど違いがなく、雨量が過小で計算結果が観測値より小さくなっているとは考えられないことが明らかになった。これらの結果、水位流量曲線から推定される流量が過大である可能性がわかった。

その後、平成 20 年に国土交通省が水位流量曲線を見直していることが分かり、新たに見直された

水位流量曲線による流量推定値と計算流量とがよく対応することが分かった。図3は得られたモデルパラメータを用いて再現した平成23年台風12号による相賀地点の計算流量である。ピーク流量は解析雨量を用いた場合24,000~26,000m<sup>3</sup>/s、地上雨量を用いた場合23,000m<sup>3</sup>/sとなった。

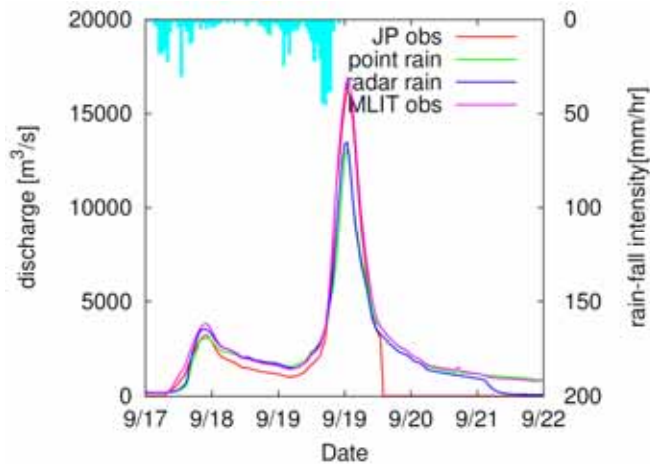


図2: 相賀地点の河川流量の再現結果(平成2年洪水)

#### (4) まとめ

分布型流出モデルを用いて、異なる洪水に対して最適モデルパラメータを同定した。次に、同定されたパラメータを用いて、他の洪水を再現した。その結果、最適同定したパラメータを用いた再現結果と他の洪水で得られたパラメータを用いた場合の再現結果の違いはほとんどなく、最適同定したモデルパラメータは他の洪水の推定に用いることができることが分かった。次に、洪水規模が異なる平成23年台風12号の再現計算を実施した。その結果、土壌層厚のパラメータに対する感度は小さく、また既往洪水で同定されたパラメータによる再現結果の違いは小さいため、大洪水の再現・予測において、ここで用いる分布型流出モデルを用いることができると判断した。

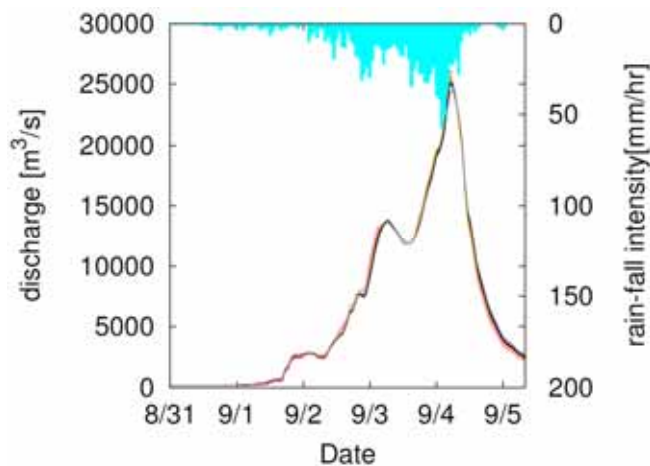


図3: 平成23年台風12号による洪水の再現結果

### -2 淀川流域(枚方上流域)を対象とした流出予測システムの構築

#### (1) レーダ雨量の違いと流出計算結果の分析

前節で示した分布型流出モデルを予測エンジンとし、淀川流域(枚方上流域)を対象として、XバンドMPレーダ雨量データ、Cバンドレーダ雨量データ、解析雨量データを入力とする流出予測モデルを構築した。次に、それらの異なるレーダ雨量データを用いた場合の流出計算結果の違いを分析した。

(1-1) 流出計算に用いるレーダ雨量データ

平成 23 年に淀川流域で発生した 3 つの降雨イベントを対象に、淀川枚方上流域を対象として構築した分布型流出モデルを用いて流量計算を行った。対象とした降雨を表 1 に示す。また、評価対象地点を表 2 に示す。対象とした降雨イベントのうち特記すべきは Event3 の台風 12 号である。前章で対象とした熊野川と同様、比奈知ダムでは、降り始めからの総雨量が 838.9mm となり、既往最大を記録した[7]。また、青蓮寺ダムにおいては、既往最大の降り始めからのひと雨総雨量が 315.0mm であったのに対し、台風 12 号では 693.7mm であった。

表 1: 分析対象降雨

番号	計算期間	洪水成因
Event1	2011 年 5 月 10 日 0 時～5 月 13 日 24 時	前線
Event2	2011 年 7 月 18 日 0 時～7 月 20 日 24 時	台風 6 号
Event3	2011 年 8 月 31 日 0 時～9 日 5 時 24 時	台風 12 号

表 2: 評価対象地点

地点	水系	流域面積 (km <sup>2</sup> )	観測項目
比奈知ダム	木津川	75.8	水位・流出入量
日吉ダム	桂川	283.1	水位・流出入量
室生ダム	木津川	134.9	水位・流出入量
布目ダム	木津川	78.6	水位・流出入量
青蓮寺ダム	木津川	100.7	水位・流出入量
依那古	木津川	175.4	水位 (暫定流量)
佐那具	木津川	157.4	水位 (暫定流量)
草津	鴨川	183.2	水位 (暫定流量)

(1-2) 入力降雨データの作成と流出計算結果

解析雨量、C バンドおよび X バンドのレーダ雨量データから、分布型流出モデルへの入力雨量データを作成した。各レーダ雨量データは、国土地理院の標準地域メッシュを用いて表されている。標準地域メッシュでは、まず、全国の地域を各度の経線と偶数緯度およびその間隔(120分)を3等分した緯度における各緯線とによって縦横に分割して第1次地域区画としている。さらに、この第1次地域区画の縦横をそれぞれ8等分して第2次地域区画としている。解析雨量およびCバンドはこの第2次地域区画を10等分してできる格子で雨量データを表現しており、一方、Xバンドは第2次地域区画をさらに40等分してできる格子で雨量データを表現している。

これらのレーダ雨量データを用いて、流出モデルへの入力雨量データを作成した。解析雨量およびCバンドレーダ雨量データは空間分解能を1kmとし、Xバンドレーダ雨量データは空間分解能を250mとした。入力雨量データを作成する際、流出モデルの入力雨量データの格子の中心点とレーダ雨量データの格子の中心点との距離を求め、その距離が最も近い4つのレーダ雨量データを用いて、

$$M = \sum_{k=1}^4 R_k w_k / \sum_{k=1}^4 w_k, w_k = \frac{1}{d_k^2} \quad (5)$$

で求めた。ここに、 $d_k$  は入力雨量データの格子の中心点とレーダ雨量データの格子の中心点との距離、 $w_k$  は  $d_k$  より求めた重み、 $M$  は入力雨量データの格子の雨量、 $R_k$  : レーダ雨量データの格子の雨量、 $k$  は隣接格子の添え字 1~4 である。モデルへの入力雨量データの作成イメージを図 4 に示す。また、この方式によって作成した時空間分布データを与えて計算した流量のうち、平成 23 年でもっとも流量の大きかった台風 12 号による Event3 での各レーダ雨量による計算流量と観測流量のハイドログラフを図 5 に示す。ここで、観測流量は各水位観測所の水位を、水位流量曲線を用いて変換した値を用いている。

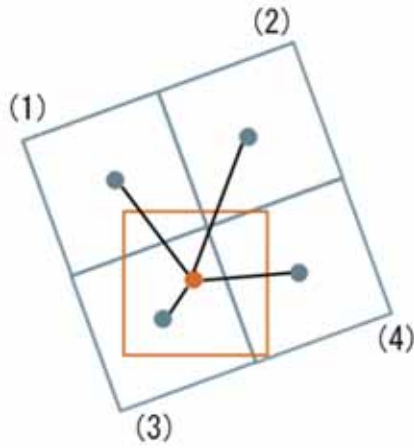
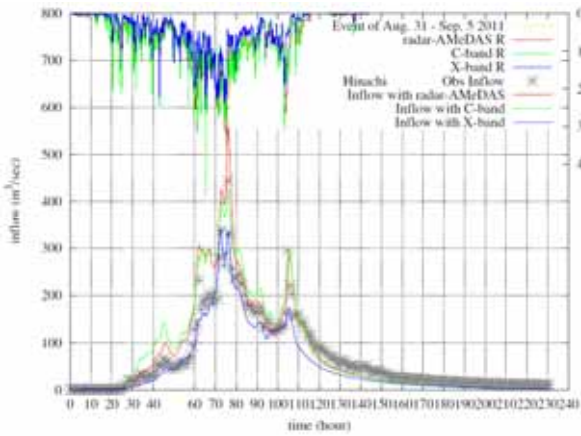
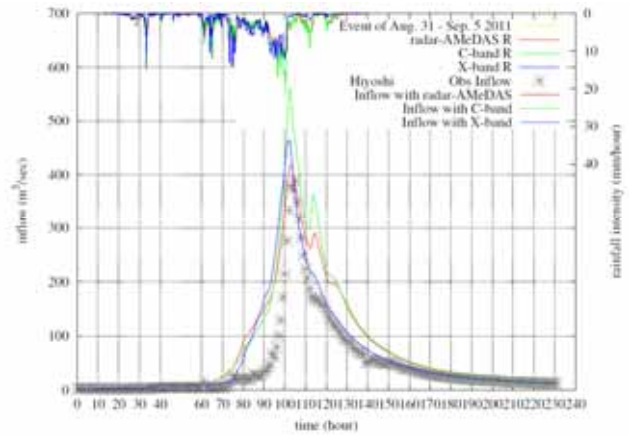


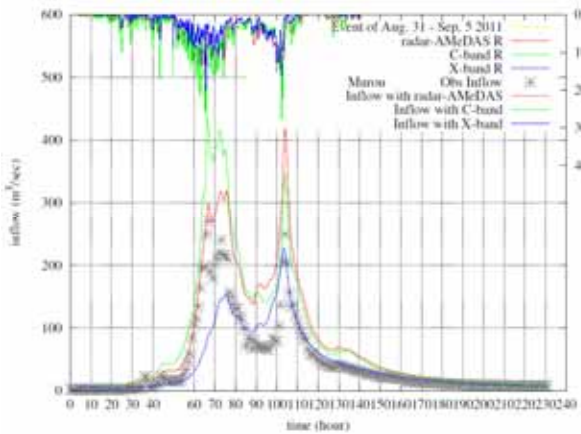
図4: 降雨データの作成方法 (オレンジ色の格子は流出モデルで用いる入力雨量格子、薄青色の格子は提供されたレーダ雨量データの格子)



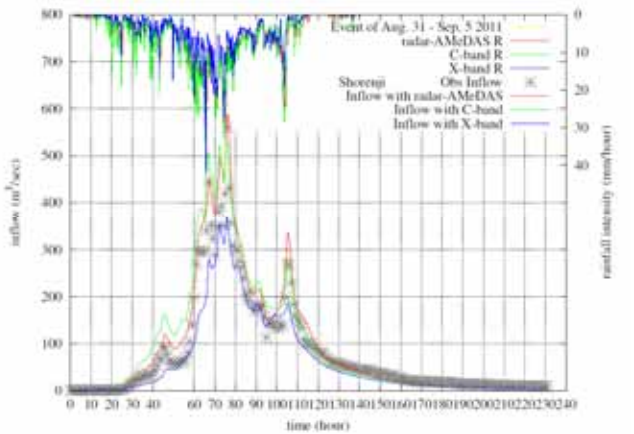
(a)比奈知ダム流入量



(b)日吉ダム流入量



(c)室生ダム流入量



(d)青蓮寺ダム流入量

図5: 平成23年台風12号を対象とした観測流量(水位流量曲線による暫定値)と計算流量の比較。赤線は解析雨量、緑線はCバンドレーダ雨量、青線はXバンドレーダ雨量を与えた場合の計算結果

(1-3) 降雨期間内総流出高によるレーダ雨量の比較

各レーダ雨量による計算流量と観測流量の期間内総流出高を比較した。期間内総流出高の差異を相対誤差で表した結果を表3にまとめる。これらの結果から、Xバンドレーダによる流量計算結果の相対誤差が一般的に最も小さいことが分かる。また、Event1, 2, 3でのすべての評価地点について、総流出高の観測値とそれに対する計算値との相対誤差を示した結果を図6に示す。総流出高が200mm以下の洪水では、解析雨量とCバンドレーダ雨量は計算流量が過大に算定される結果となった。ただし、この場合もXバンドレーダ雨量はもっとも誤差が少なかった。また、300mmを超えるような大洪水については、どのレーダ雨量データを用いた場合も、観測流出高とよく対応し、特に総流出高が400mmを超えた場合は、Cバンドレーダ雨量、解析雨量ともにXバンドレーダ雨量よりもよい結果を示した。また、すべてのケースで解析雨量とCバンドレーダ雨量は、Xバンドレーダ雨量を用いた場合の計算結果よりも大きくなる傾向にあった。

表3: 対象降雨期間内の総計算流量の比較(平成23年台風12号の場合)

地点	期間内総流量 [mm]			観測値	誤差 [%]		
	解析雨量	C-band	X-band		解析雨量	C-band	X-band
比奈知ダム	835.3	875.1	575.0	747.8	<b>11.7</b>	17.0	-23.1
日吉ダム	217.0	229.2	190.0	136.4	59.1	68.1	<b>39.3</b>
室生ダム	449.9	474.1	257.8	277.6	62.1	70.8	-7.1
布目ダム	308.4	310.0	217.3	139.5	121.1	122.3	<b>55.8</b>
青蓮寺ダム	767.9	795.0	515.5	666.2	<b>15.3</b>	19.3	-22.6
依那古	240.2	258.1	167.9	433.2	-44.5	<b>-40.4</b>	-61.3
佐那具	335.8	331.3	217.3	184.5	82.0	79.6	<b>17.8</b>
深草	181.9	184.5	156.4	84.2	116.1	119.3	<b>85.8</b>

\* 最も観測値と値に近い場合を太文字で表す。

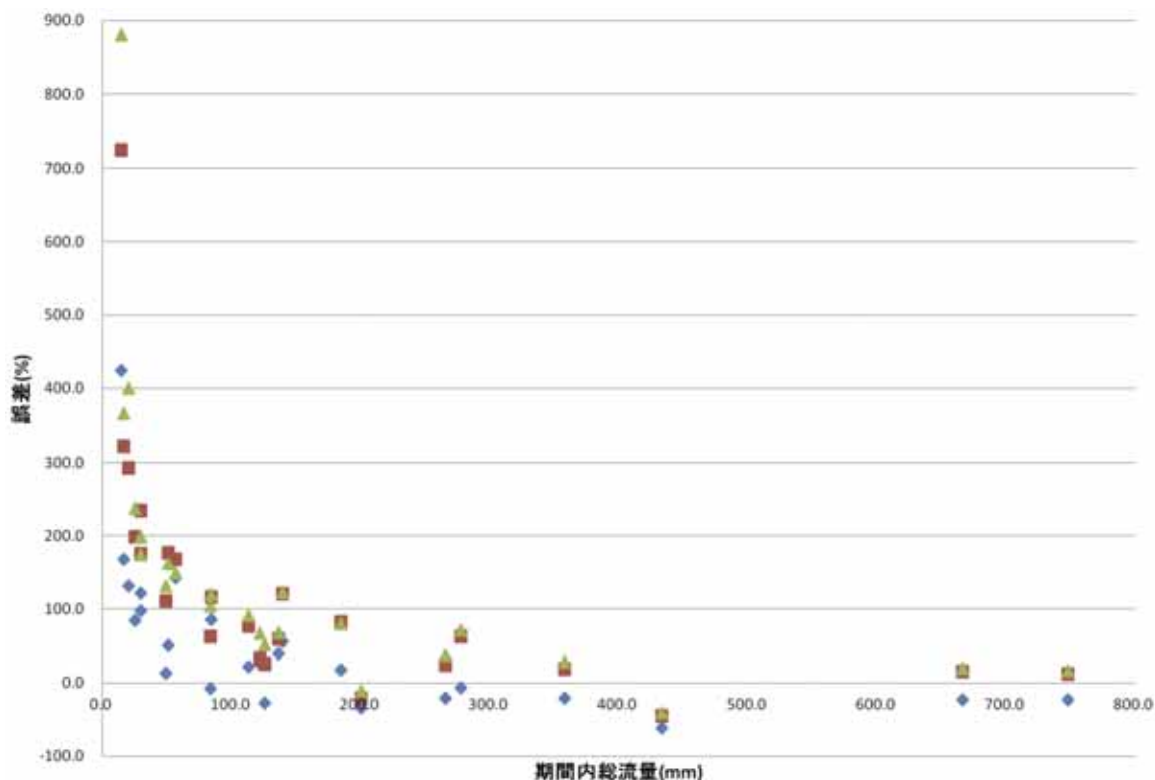


図6: 観測総流出高とそれに対する計算値の相対誤差の関係

(1-4) ピーク流量によるレーダ雨量の比較

上と同様の分析を洪水ピーク流量についてまとめた結果を図7に示す。総流出高の場合と同様に、全体的にはXバンドレーダ雨量データを用いた場合の誤差が少ない。ただし、特に総流出高が400mmを超えた場合は、Cバンドレーダ雨量を用いた計算結果がもっともよい結果を示した。

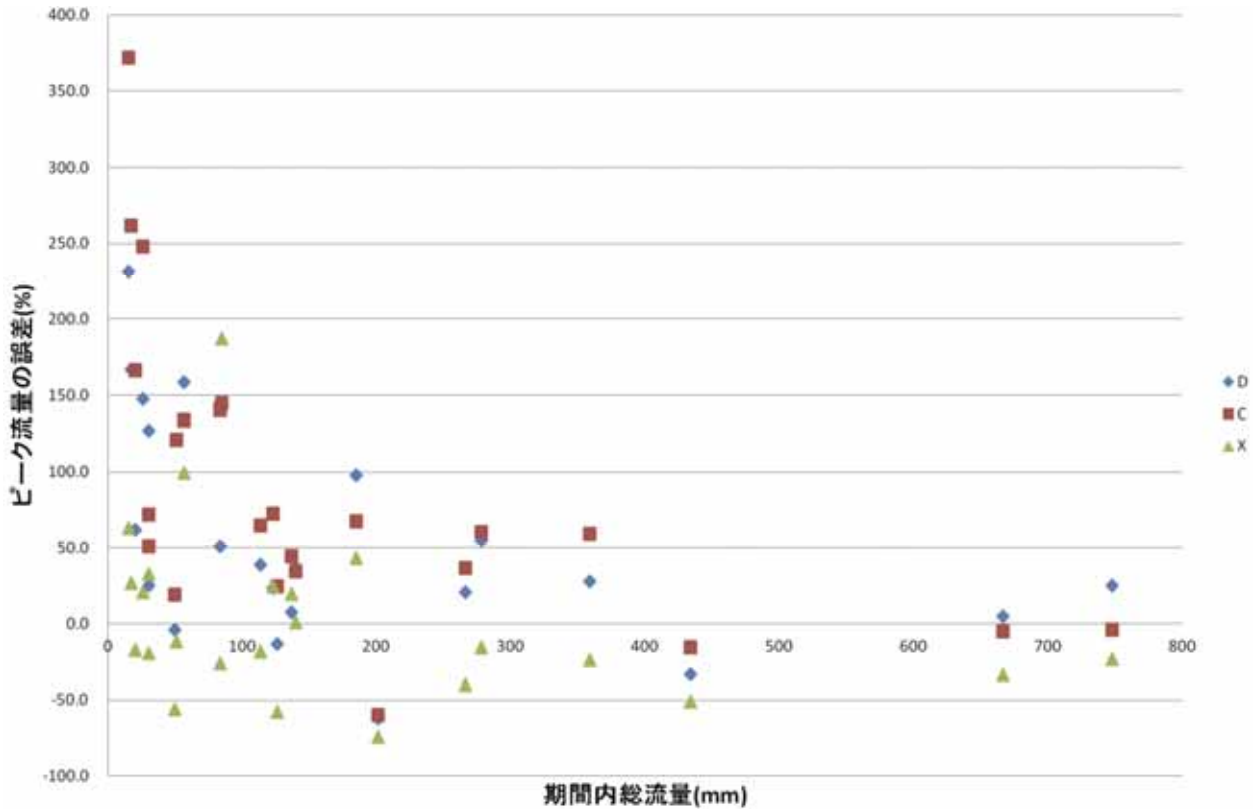


図7: ピーク流出高とそれに対する計算値の相対誤差の関係

(2) 入力降雨データの空間分解能が計算流量に及ぼす影響の分析

Xバンドレーダ雨量の時間空間分解能をそのまま用いた場合、広域の流出計算では読み取るデータ数が膨大となるため、250m空間分解能のXバンドレーダ雨量データを1km分解能に平均化した場合、また時間分解能を1分から30分に平均化した場合の違いを分析した。空間的に分解能を落とす場合は、1km格子を設定してそれに含まれる250m格子の降水強度を平均化することとし、時間分解能を落とす場合は、その間の降水強度を平均化することとした。表4に対象とする時間空間分解能を示す。また、計算結果の一例として、比奈知ダム流入量の計算結果の違いを図8に示す。計算流量の若干の違いは時間分解能の違いによるものであり、空間分解能の違いは極めて小さい。いずれにせよ、対象とする地点のダム流入量では、空間分解能1km、時間分解能30分で十分であることが分かる。

表4: 対象とする時間空間分解能

分解能番号	空間分解能 (m)	時間分解能 (min)
Resolution1	250	1
Resolution2	1000	1
Resolution3	1000	5
Resolution4	1000	30



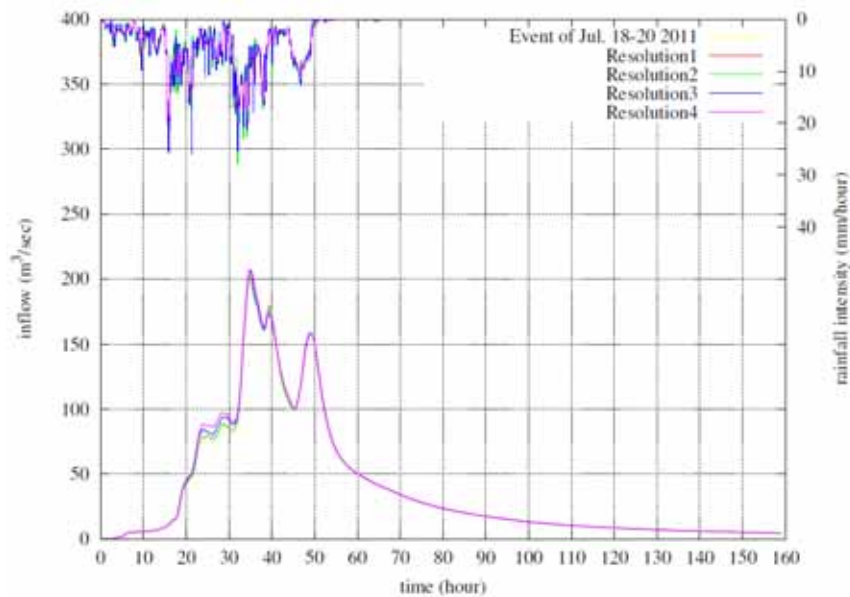


図 8: 平成 23 年 7 月洪水について入力降雨が流出計算結果に与える影響 (比奈知ダム流入量)

### (3) 重み付きレーダ雨量を用いた流量計算

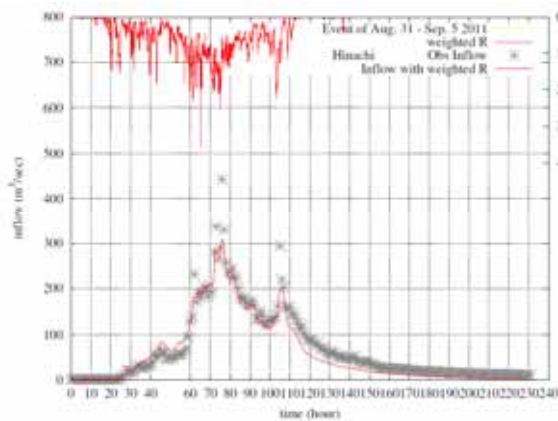
(1)での分析により、降雨レーダデータごとに特性が異なること、特に総流出高 200mm 以下では X バンドレーダ雨量の流量計算結果に対する推定誤差は小さく、400mm 以上の豪雨では C バンドレーダ雨量データが観測値とよい対応を示した。そこで、これらのレーダ雨量データを合成して、より精度の高い流量計算の可能性を分析した。ここでは  $n$  を降雨イベント数、 $m$  を評価地点数、 $C_{ij}$  を C バンドレーダ雨量によって計算された総流量、 $X_{ij}$  を X バンドレーダ雨量によって計算された総流量、 $O_{ij}$  を観測総流量とし、

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (C_{ij} \lambda_c + X_{ij} \lambda_x - O_{ij}) = 0 \quad (5)$$

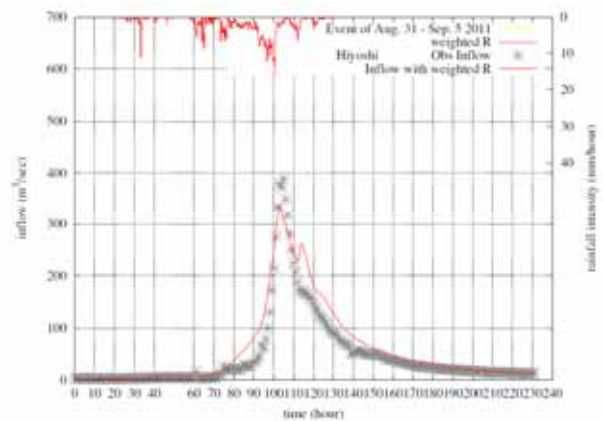
となるように重み  $\lambda_c$  と  $\lambda_x$  を定める。ここではそれらの値はそれぞれ 0.697 と 0.064 となった。この重みを設定した入力降雨を作成して得た計算流量による総流出高の誤差を表 5 に示し、計算流量を図 9 に示す。C バンドデータと X バンドデータを合成した重み付きの雨量データを入力とすることにより、総計算流出高は改善されていることが分かる。この例では洪水期間中の総流量が適合するように重みを設定することを考えたが、実時間計算では、時々刻々の流量に適合するように逐次、重みを修正しながら予測計算を実施することが考えられる。そのようにすれば、より精度の高い予測計算が実施できると考えられる。

表 5: 重み付き流量による総計算流量の改善(平成 23 年台風 12 号の場合)

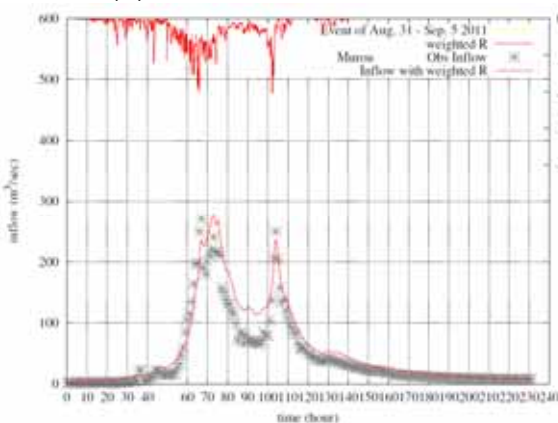
地点	解析雨量	誤差 [%]		
		C-band	X-band	重み付き雨量
比奈知ダム	11.7	17.0	-23.1	-13.1
日吉ダム	59.1	68.1	39.3	24.3
室生ダム	62.1	70.8	-7.1	25.6
布目ダム	121.1	122.3	55.8	66.1
青蓮寺ダム	15.3	19.3	-22.6	-11.5
依那古	-44.5	-40.4	-61.3	-56.3
佐那具	82.0	79.6	17.8	32.3
深草	116.1	119.3	85.8	63.0



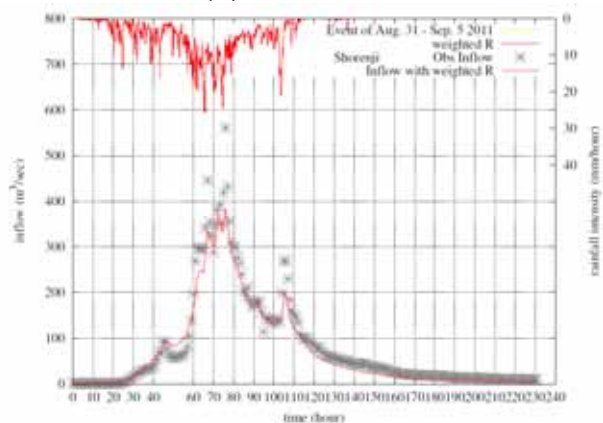
(a)比奈知ダム流入量



(b)日吉ダム流入量



(c)室生ダム流入量



(d)青蓮寺ダム流入量

図9: 平成23年台風12号を対象とした観測流量(水位流量曲線による暫定値)と重み付き降雨データによる計算流量の比較

### -3 水位予測システムの高度化

短時間の洪水予測は、数時間先までの予測降雨情報を降雨流出モデルに入力して流出計算を行い、対象流域地点での河川流量を予測することから始まる。また、河川堤防の安全性の確認および避難警報の発信などの予測水位情報が必要になる場合は、降雨流出モデルから計算された河川流量を河道モデルを利用して水位に変換する必要がある。降雨から流量、流量から水位へ予測計算を行なう際に生じる予測の不確実性を考慮するために、非線形・非ガウスシステムにも適用性が最も高い粒子フィルタを導入した次元ダイナミックウェーブモデルによる水位計算手法を考えた[8]。

#### (1) 粒子フィルタを用いた実時間水位予測システム

河道モデルを用い水位計算を行うためには、上流端及び下流端の境界条件が必要である。ここで示す実時間水位予測システムでは、現時刻までの観測水位が下流端で収集可能であることを仮定し、上流端での入力になる降雨流出モデルからの計算流量と河道の粗度係数を実時間で推定しながら、対象地点での水位を推定する。図10に実時間水位予測システムのアルゴリズムを示す。まず、河道の粗度係数と河道モデルの上流端境界条件(計算流量)および下流端境界条件(観測水位)の値にノイズを加え、異なる計算粒子を設定する。ここでは、流量に対しては流量の10%、粗度係数に対しては0.01、水位に対しては0.1mの標準偏差を持つそれぞれの正規分布を仮定し、毎回の予測開始に最大500個の計算粒子を発生させた。多様性を持つそれぞれの計算粒子は次の観測水位データが得るまで水位計算を行い、計算された水位と観測水位の比較により、現時刻まで最もふさわしい粗度係数および上流端計算流量を推定する。その後、最適化された粗度係数および上流端の流量誤差の情報を用い次の計算粒子を発生させ、予測計算を行う。以下では、分布型流出モデルで対象とする淀川水系の中の桂川流域を対象とし(図11)、羽束師及び納所の水位観測所を対象区間としてダイナミックウェーブモデルでの水位予測を行なった。

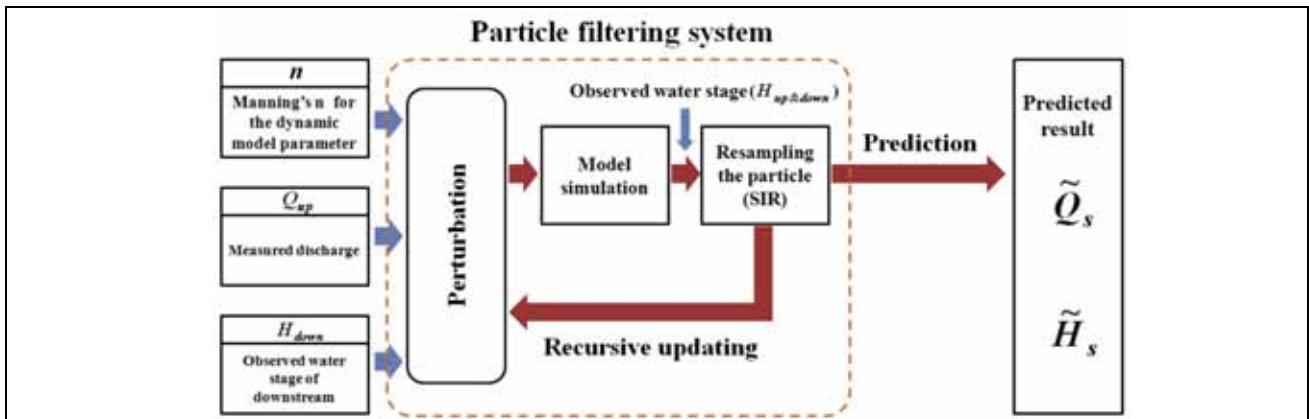


図 10: 粒子フィルタによる実時間予測計算のアルゴリズム

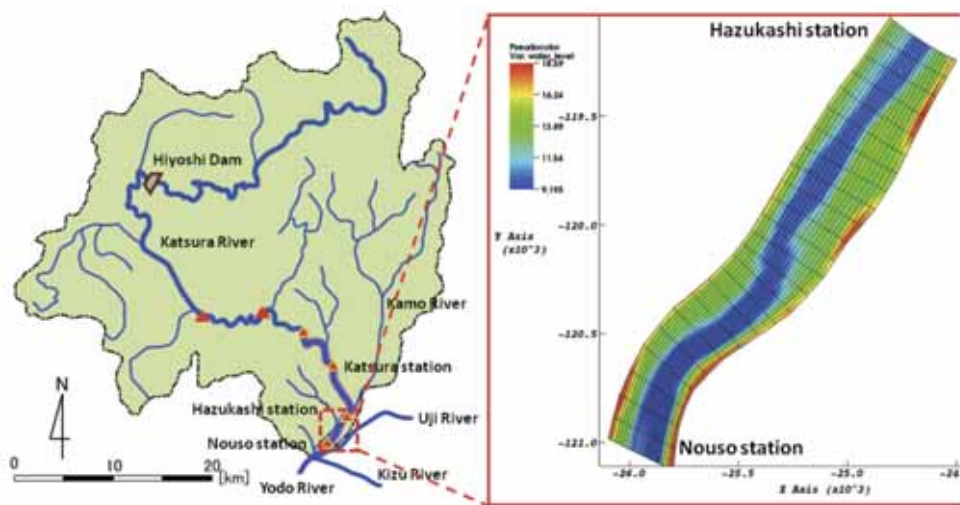


図 11: 水位計算の対象流域

## (2) 水位予測システムの計算結果

予測システムの検証のために、まず数値シミュレーションによって作成した模擬的な真値データに対するシミュレーション実験を行った。模擬的な真値データは、2004年10月の20日の洪水イベントに対して、上流端（羽束師水位観測所）での観測流量および下流端（納所水位観測所）での観測水位を境界条件として設定し、適当に発生させた河道の粗度係数（水位の変化により時間変化する）を利用して河道モデルの計算を一回行い作成した。その結果から得た上流端の流量を正しい値として設定し、またその正しい値に対して観測誤差を入れた仮想の観測流量を設定した。合成データによる実験では、このように作成した仮想の観測流量および観測水位データを用い、正しい上流端の流量および時間変化する河道の粗度係数を実時間で推定できるかを調べた。図 12 に示すように、数値シミュレーション実験の結果、粒子フィルタを用いた水位予測システムでは誤差を含んでいる上流端からの観測流量から正しい流量を推定することが可能であった。また時間により変化する河道の粗度係数も高い精度で推定可能であった。

次に、観測水位及び流量を用い6時間先までの水位予測を行い、本システムの実用での予測精度を検証した。ここでは、前述の疑似的な真値データではなく、実際の観測データを予測流量として上流端に設定し、時々刻々の粗度係数を推定しながら6時間先までの水位を予測することに設定した。図 13 に示している水位予測の結果を見ると、3時間先までの水位予測は高い精度で予測が可能であったが、6時間先の予測には大きな差が発生していることが分かる。この差は、最適化された粗度係数を固定して予測計算を行なうことにより発生したと考えられる。水位の予測精度を高めるためには粗度係数を水位および流量の関数として予測の際にも変化させる必要があると考えられる。

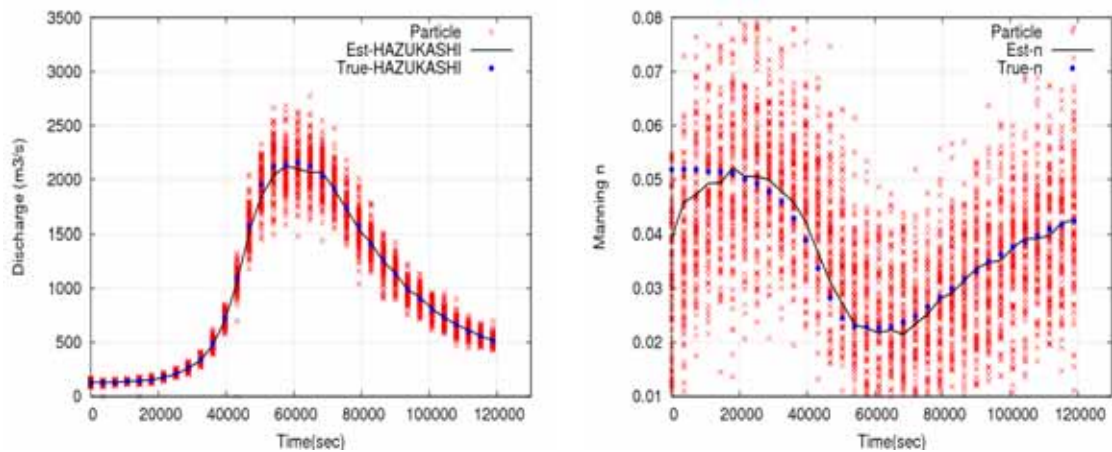


図 12: 合成データを用いた観測流量（左）と粗度係数（右）の推定結果

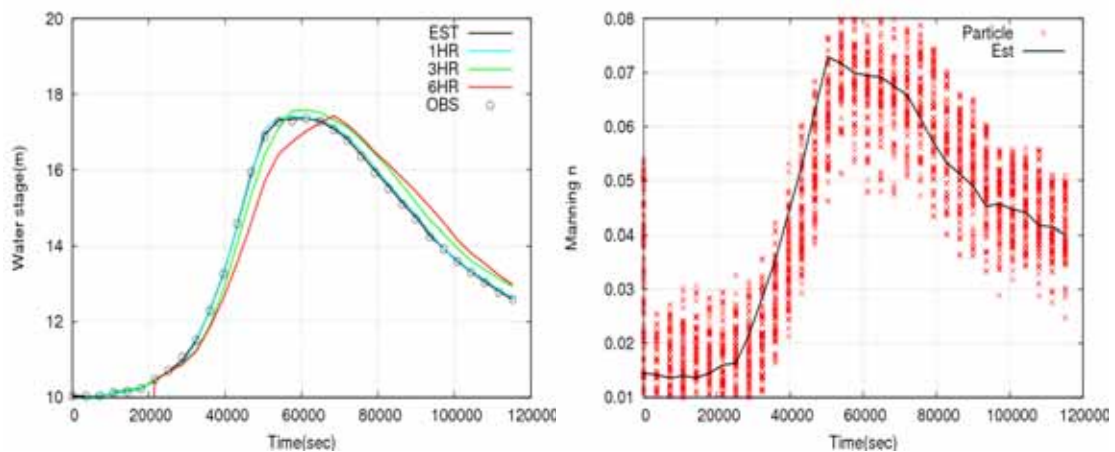


図 13: 観測データを用いた水位予測結果（左）と推定された粗度係数（右）

今後の課題・展望(本技術研究開発で得られた成果を踏まえ、成果のさらなる発展や河川行政への活用に向けた、今後の課題・展望等を具体的に記載ください)

過去に経験したことのないような大洪水を再現・予測できることが重要である。本研究で用いている分布型流出モデルの大洪水への適用性を把握するため、平成 23 年 8 月後半から 9 月にかけて紀伊半島を襲った台風 12 号を対象とし、新宮川流域に同じ分布型流出モデルを構築して、本モデルの適用性を調べた。その結果、最適同定したパラメータを用いた再現結果と他の洪水で得られたパラメータを用いた場合の再現結果の違いはほとんどなく、最適同定したモデルパラメータは他の洪水の推定に用いることができることが分かった。次に、洪水規模が異なる平成 23 年台風 12 号の再現計算を実施した。その結果、土層厚のパラメータに対する感度は小さく、また既往洪水で同定されたパラメータによる再現結果の違いは小さいため、大洪水の再現・予測において、ここで用いる分布型流出モデルを用いることができると判断した。

次に、この分布型流出モデルを淀川流域(枚方上流域)に適用して、XバンドMPレーダによる流出予測結果を分析した。また、多種類のレーダ雨量データによる河川流量の再現性を調べた。その結果、総流高が 200mm 以下の洪水では、解析雨量と C バンドレーダ雨量は計算流量が過大に算定される結果となったが、この場合も X バンドレーダ雨量はもっとも誤差が少ないこと、300mm を超えるような大洪水については、どのレーダ雨量データを用いた場合も、観測流出高とよく対応し、特に総流出高が 400mm を超えた場合は、C バンドレーダ雨量、解析雨量ともに X バンドレーダ雨量よりもよい結果を示すことがわかった。また、すべてのケースで解析雨量と C バンドレーダ雨量は、X バンドレーダ雨

量を用いた場合の計算結果よりも大きくなる傾向にあることがわかった。また、流出計算に必要なレーダ雨量データの時空間分解能を分析し、検討の対象としたダム地点では空間分解能 1km、時間分解能 30 分で十分であることを示すとともに、レーダ雨量の重み付き合成データによる流量計算の精度向上を図った。

最後に、分布型流出モデルで得られた流量計算結果を水位予測計算に適用するため、二次元の水位予測計算モデルを構成し、それに粒子フィルタを適用した河川水位予測サブシステムを構成した。これを桂川下流域に適用し、水位予測精度の向上を検討した。

#### 謝辞

国土交通省近畿地方整備局水災害予報センターおよび淀川ダム統合管理事務所から、データ提供や情報提供をいただいた。また、研究会を通して現場のニーズを把握することができた。記して謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 市川温, 村上将道, 立川康人, 椎葉充晴 : 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, 2001 .
- [2] 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 水文・水資源学分野 : 水文モデル構築システム OHyMoS, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/ohymos/index.html>, 2012.2.10 確認.
- [3] 佐山敬洋, 立川康人, 寶 馨, 市川温 : 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, 2005.11.
- [4] 立川康人, 永谷 言, 寶馨 : 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, 第 48 巻, pp.7--12, 2004.
- [5] 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻水文・水資源学分野 : 流域地形情報を基盤とした水文モデル構築システム GeoHyMoS, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/geohymos/geohymos.html>
- [6] Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, Journal of Hydrology, Vol. 158, pp. 265-284, 1994.
- [7] (独)水資源機構 : 台風 12 号に伴う出水と名張川上流 3 ダム ( 青蓮寺ダム, 室生ダム, 比奈知ダム ) の防災操作について, <http://www.kkr.mlit.go.jp/yodoto/pdf/kisya-hapyou/2011090601.pdf>, 2012.2.10 確認.
- [8] Yeonsu KIM, Yasuto TACHIKAWA, Sunmin KIM, Michiharu SHIIBA, Kazuaki YOROZU, Seong Jin NOH : Short term prediction of water level and discharge using a 2d dynamic wave model with particle filters, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 68, No. 4, I\_25-I\_30, 2012.