斐伊川水系下流域を対象とした水位予測手法の検討

FLOOD FORECASTING MODEL IN THE DOWNSTREAM BASIN OF THE HII RIVER

荒木　健 *・蛭田啓久 **・中川和男 ***・陰山　建太郎 **・一言正之 ****・邱騁 *
Takeru ARAKI, Hirohisa HIRUTA, Kazuo NAKAGAWA, Kentaro KAGEYAMA, Masayuki HITOKOTO and Cheng QIU

Lake Shinji-ko, the 7th largest lake in Japan, is connected to the Sea of Japan through Nakaumi Lagoon. They are located at the downstream basin of the Hii River, and are linked by the Ohashi River, in Shimane prefecture. River improvement measures have been undertaken to protect the area from flooding.

In our realtime flood forecasting system for this area, we present an integrated flood forecasting model, which combines distributed runoff model and relational expression based on observed data. Using tide level, velocity of wind and inflow and outflow discharge as input data, the integrated model can forecast water level in lakes Shinji-ko and Nakaumi.

We simulated past floods using this model, and the predicted data showed good agreement with observed data.

Keywords：*Flood Forecasting System, Shinji-ko, Nakaumi, Radar Rainfall, Distributed Runoff Model, Relational Expression*

1. はじめに

斐伊川水系下流域は、宍道湖および中海という広大な湖が大橋川によって連なる特殊な地形となっている。宍道湖周辺では、大橋川の断面が小さい上に勾配が非常に緩いため水はけが悪く、一度洪水が起きると水位の高い状態が長時間に及ぶ。また中海周辺では、高潮による浸水被害がたびたび起こっている。こうした被害の軽減のためには、湖水位の予測が非常に重要である。

湖水位の予測手法として二次元不定流解析などがあるが、当該流域の複雑な水理過程をモデル化するうえでは計算時間やリアルタイムで得られるデータの制約から、これまでリアルタイム水位予測は実用化されていない。

そこで、斐伊川水系を管理する国土交通省中国地方整備局出雲河川事務所では、平成 22 年度に構築した灘分までの斐伊川水系上流域を対象としたリアルタイム分布型洪水予測システムに続き、平成 24 年度に下流域の湖におけるリアルタイム水位予測システムの整備を行った。

本稿は、弊社が受託し水位予測システムを構築した成果のうち、宍道湖および中海におけるリアルタイムでの水位予測手法の検討成果について報告するものである。

*　コンサルタント国内事業本部 社会システム事業部 統合情報技術部
**　コンサルタント国内事業本部 流域・防災事業部　河川水工部
***　コンサルタント国内事業本部 大阪支店　技術第一部
****　技術本部 中央研究所 総合技術開発部

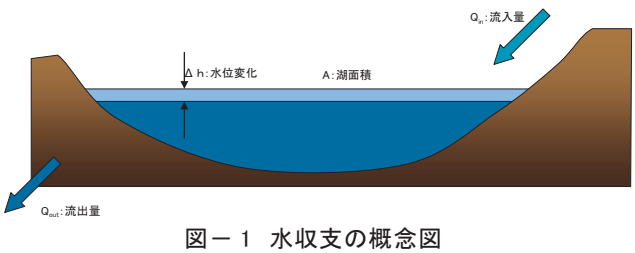
2. 水位予測手法の検討

(1) 水位予測式の設定方法

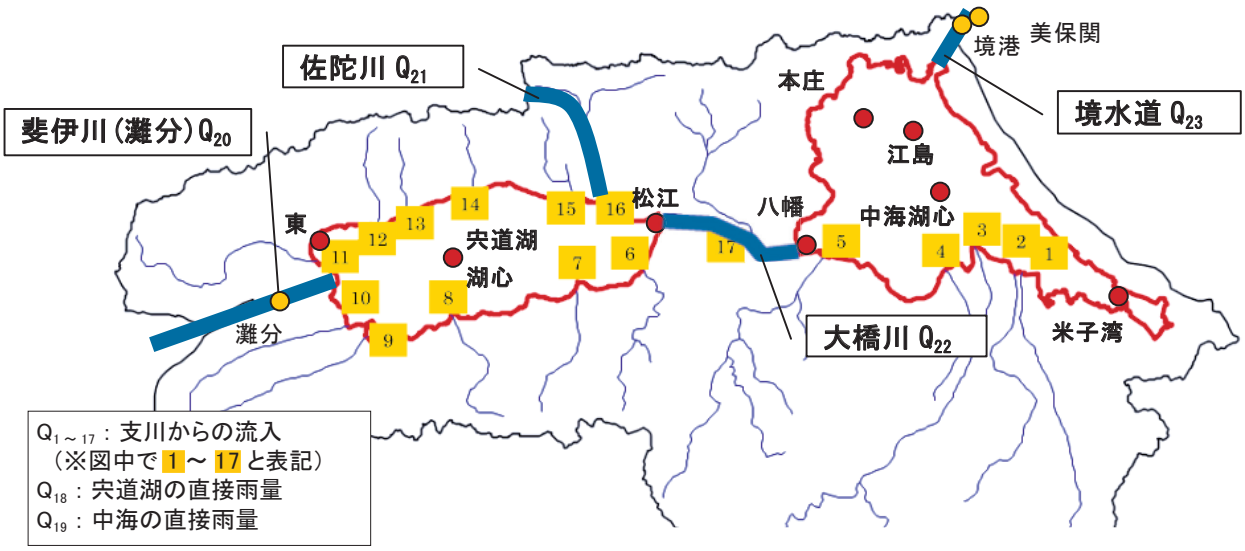
リアルタイム水位予測システム（10 分ごとに 6 時間先まで予測）の要件から、高速に計算を行う必要がある。本検討では、湖水位及び大橋川、佐陀川、境水道の流量には計算が簡易な相関式を利用し、流入河川には既存のリアルタイム分布型流出モデルを適用することで、精緻で高速な複合型モデルを構築した。構築したモデルは、①斐伊川本川の流入量予測モデル（分布型モデル）、②残留域からの流入量予測モデル（分布型モデル）、③大橋川・境水道・佐陀川の流入出量予測モデル（相関モデル）、④風向・風速を考慮した水位予測モデル（相関モデル）から構成されるが、本稿では特に相関モデルに着目して検討手法を述べる。

(2) 水位算定の基本的な考え方

中海は境水道、宍道湖は佐陀川を通じてそれぞれ日本海と通じており、潮位に応じて逆流（塩水の流入）が起こる。そこで、宍道湖および中海の水位変化は、**図－1** のように流入量と流出量の収支から算出する。



図－1　水収支の概念図



図－2　対象流域の予測対象水位観測地点と河川の位置関係

これを式として表わすと、(1) のようになる。

$$\Delta h = \frac{(Q_{in} - Q_{out}) \times \Delta t}{A} \qquad (1)$$

ここで、Δ h は水位変化量（m）、Q_{in} は湖流入量（m^3/s）、Q_{out} は湖流出量（m^3/s）、Δ t は計算時間間隔（s）、A は湖面積（m^2）である。

水位が違っても湖面積はほぼ変わらないため、湖の容量から水位を把握できる。よって流入量と流出量を算出すれば、水位変化量、すなわち次ステップの水位を求めることができる。例えば中海の場合、流入出量が $1000m^3/s$ とすると、10 分間での水位上昇量は、約 7mm（$1000[m^3/s] \times 600[s]/86200[m^2]$）となる。

ただし、宍道湖や中海のような広大な水域では、水収支以外に風による局所的な水位上昇や気圧変化などによる潮位変動などの外的要因からも影響を受け、水位変動が起こる。これらの影響を考慮し、宍道湖および中海の基準水位は、風波による影響を受けにくい湖心水位とし、その他の各地点の水位予測は、基準点水位との相関式を設定し、算定するものとした。宍道湖および中海の基準水位の設定方法および、風向・風速条件の設定方法については 3.で後述する。

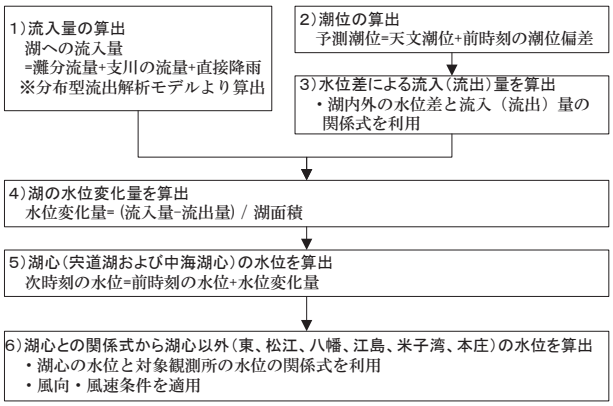


図 － 3　計算フロー

(3) 計算フロー

図－2 に対象流域の予測水位地点と河川の位置関係を示す。また、図－3 の計算フローで水位予測を行う。

観測水位のほか、上流側洪水予測システムによる宍道湖（灘分）流入量算定結果、分布型流出モデルによる支川流入量および湖への直接降雨量（湖直上での降雨）の算定結果、潮位予測を用いて、宍道湖および中海の水位を予測する。

(4) 対象出水の選定

関係式の設定に用いる出水を選定した。2002 年～ 2011 年の中から雨量、水位、流量、風速の観測データの品質が確保できており、総雨量およびピーク水位が大きな出水を選定した。まず、松江（はん濫注意水位 1.2m）地点の水位が高くかつ降雨量が多いものから 6 出水を選定し、さらに、高潮などに起因する中海特有の水位上昇事例を加えるため、中海湖心（はん濫注意水位 0.9m）を基準に 6 出水を選定した（表－1）。これらの中には、既往最大の出水（台風 14 号）

表－1　対象出水

要因	総雨量 [mm]	ピーク水位時刻	ピーク水位 [m]	備考
洪水起因	165	2011/9/4 2:00	1.39（松江）	
	221	2011/5/12 13:00	1.22（松江）	
	186	2010/7/15 17:00	0.90（松江）	
	157	2009/7/21 17:00	1.08（松江）	
	439	2006/7/19 15:00	1.96（松江）	7 月豪雨
	140	2004/10/21 10:00	1.10（松江）	
潮位影響	なし	2010/9/12 5:00	0.86（中海）	
	17	2010/8/12 4:00	0.92（中海）	
	95	2004/9/8 5:00	0.93（中海）	台風 18 号
	6	2004/8/20 4:00	1.03（中海）	台風 15 号
	1	2003/9/13 17:00	1.06（中海）	台風 14 号
	3	2002/9/1 10:00	0.97（中海）	台風 15 号

および、宍道湖周辺および中海周辺にて実際に浸水被害が起こった事例（表－1 備考に記載）も含まれる。

3. 水位予測モデルの構築

(1) 湖心の水位算定

1) 宍道湖の水位算定

宍道湖の水位変化は以下の式を用いて算定する。

$$\Delta h = \frac{(\Sigma Q_{in} - Q_{out}) \times \Delta t}{A} \qquad (2)$$

ここで、Q_{in} は、支川流入（Q_6 ～ Q_{16}）、宍道湖への直接降雨（Q_{18}）、斐伊川本川からの流入量（Q_{20}）、Qout は佐陀川からの流入出量（Q_{21}）、大橋川からの流入出量（Q_{22}）、A は宍道湖水面面積（76.1km^2）、Δ h は水位変化量（基準水面：宍道湖湖心）、Q_{21} は佐陀川の流量（宍道湖と潮位の水位差の関係より設定）である。

2) 中海の水位算定

中海の水位変化についても、宍道湖湖心と同様に式（2）を用いて算定する。

ただし、Q_{in} は、支川流入（Q_1 ～ Q_5）、中海への直接降雨（Q_{19}）、大橋川からの流入出量（Q_{22}）、Qout は、境水道からの流入出量（Q_{23}）、A は中海水面面積（86.2km^2）、Δ h: 水位変化量（基準水面：中海湖心）、Q_{23} は境水道流入出量（中海と潮位の水位差の関係より設定）、Q_{22} は大橋川からの流入量（宍道湖と中海の水位差の関係より設定）である。

(2) 水位差と流入出量の関係式の設定

湖－湖間、湖－日本海間の流れは水位差に比例すると考え、境水道（中海－日本海）、大橋川（中海－宍道湖）、佐陀川（宍道湖－日本海）のそれぞれについて検討した。

1) 境水道の流量算定

実際の境水道の流量は、ある水位差に対して一意に決まるものではない（たとえば、水位差が 0 となるときに必ずしも流量が 0 にならない）ため、事例によっては誤差が大きくなる場合がある。水防上問題となるのは中海の水位が上がる傾向にある場合であるため、中海への流入量が増加する 2011 年 9 月出水のデータを対象として流量算定式を設定した。

流量算定式に用いる基準地点の整理にあたって、潮位については境港潮位観測所（気象庁）、中海を代表する水位としては、宍道湖湖心、江島、米子湾、八幡の 4 地点を対象に、それぞれの水位差と境水道流量との相関関係を整理した（表－2）。最も相関が高い江島地点および境港地点を流量算定式に用いる基準地点として採用した。

次に、江島 - 境港潮位の水位差と、境水道流量の関係について、H-ADCP 流量観測データおよび、二次元不定流モデルによる計算結果を用いて整理し、流量算定式を設定した（図－4、表－3）。

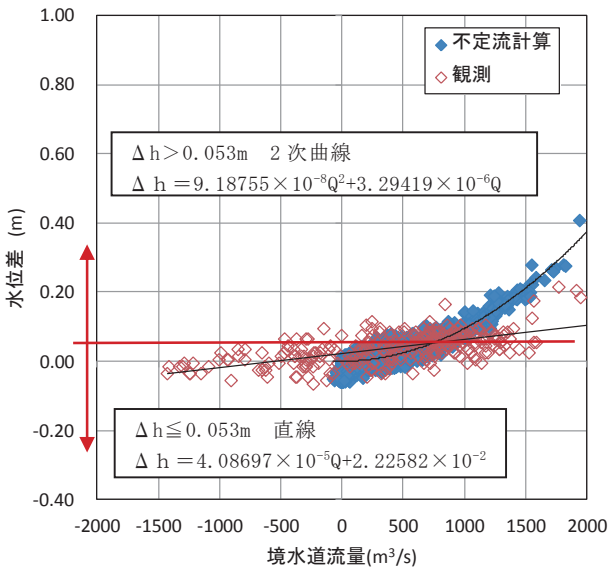
表－2 水位差と流量の相関係数

潮位 / 中海水位	境港（2011 年 9 月出水）	境港（全出水）
中海湖心	0.74	0.56
江島	0.81	0.39
米子湾	0.69	0.25
八幡	0.74	0.55

表－3 江島－境港の水位差と境水道流量の相関式

水位差条件	相関式
①Δ h>0.053	Δ h=9.18755 × 10^{-8}Q^2+3.29419 × 10^{-6}Q
②Δ h ≦ 0.053	Δ h=4.08697 × 10^{-5}Q+2.22582 × 10^{-2}

※Δ h= 江島水位－境港潮位

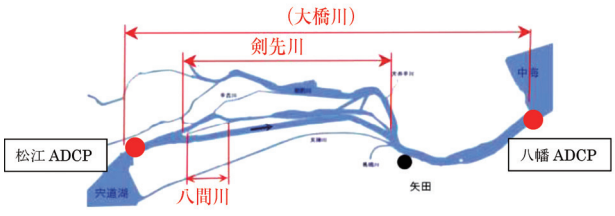


図－4 江島－境港の水位差と境水道流量の関係（2011 年 9 月出水）

なお、高流量時は低流量時に比べ観測データ数が少なくなるため、H-ADCP 流量観測データに加え、二次元不定流モデルによる計算結果を用いた。二次元不定流モデルの計算条件として、下流端に境港潮位を、上流端に灘分地点の観測流量を、支川流入及び雨量の直接流入として分布型モデルの解析結果を与えている。

2) 大橋川の流量算定

大橋川流量についても同様に、宍道湖と中海の水位差と大橋川流量の関係について整理した。大橋川流量は、図－5



図－5 大橋川の H-ADCP 観測地点

のように松江地点と八幡地点の 2 地点で H-ADCP 観測を行っているが、中海への流入量の把握を重視する観点から大橋川下流域にある八幡観測地点の H-ADCP を用いるものとした。

水位差算定に用いる水位観測地点について、中海では中海湖心と八幡の 2 地点、宍道湖では松江、宍道湖湖心、東の 3 地点を対象に、水位と流量の相関性を整理した（**表－ 4**）。最も相関が高い松江地点および中海湖心地点を流量算定式に用いる基準地点として採用した。

次に、中海湖心－松江の水位差と、大橋川流量の関係について、H-ADCP 流量観測データおよび、二次元不定流モデルによる計算結果を用いて**図－ 6** のように整理した。

水位差が 0 となる場合に流量が 0 となると仮定し、**表－ 5** の通り水位差 0 を境に 3 通りの流量算定式を設定した。

3）佐陀川の流量算定

宍道湖と潮位の水位差と佐陀川流量の関係については、観測データがないため二次元不定流モデルによる計算結果を用いて整理することとした。

二次元不定流モデルの計算結果をプロットすると、**図－ 7** のようになり、**表－ 6** のとおり傾きが変化する水位差 0.15m を境に 2 通りの流量算定式を設定した。

（3）基準水位点とその他予測水位点との関係式の設定

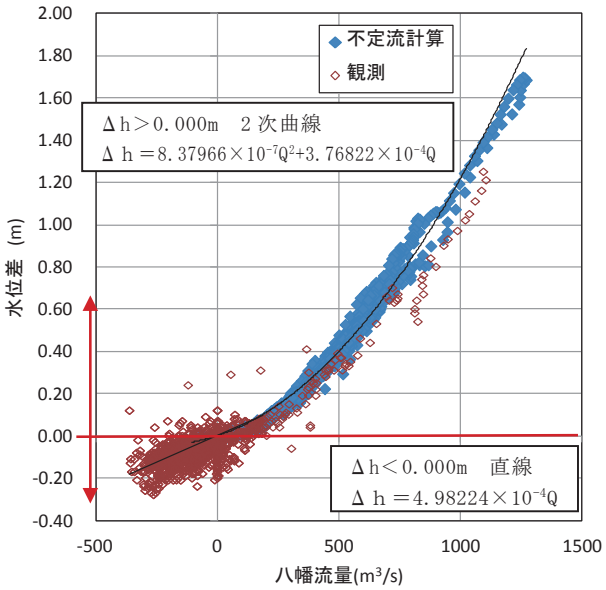
吹き寄せや局所的な地形の影響により、湖心地点と湖周辺の観測地点では、水位の差異が生じる。湖心（宍道湖湖心、中海湖心）の水位を基準とし、湖周辺の観測所（東、松江、八幡、米子湾、江島、本庄）の水位の相関式を観測水位および二次元不定流モデルの計算水位から設定した。なお、二次元不定流モデルの計算水位と観測水位に違いが見られる場合には、観測水位を重視して相関式を設定した。

1）宍道湖の水位算定

宍道湖の観測所については、宍道湖湖心を基準とした場合の松江、東の水位の相関式を設定した（**表－ 7**）。

表－ 4　各地点の水位差と大橋川流量の相関関係

宍道湖水位 ＼ 中海水位	中海湖心	八幡
松江	0.89	0.81
宍道湖湖心	0.86	0.79
東	0.83	0.78

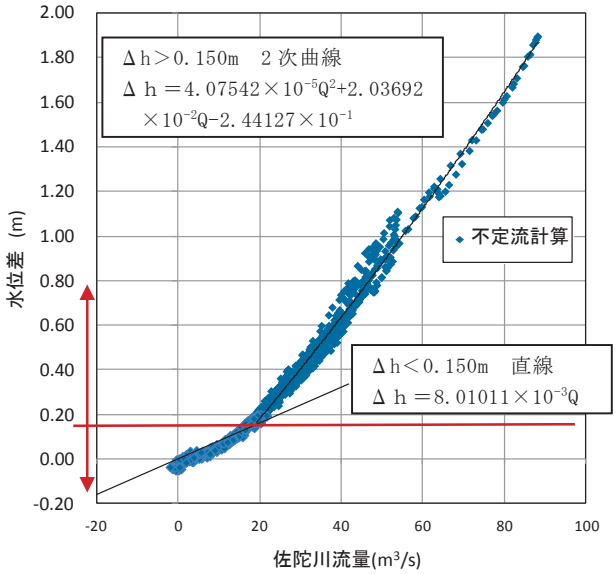


図－ 6　松江－中海湖心の水位差と大橋川流量の関係

表－ 5　松江－中海湖心の水位差と大橋川流量の相関式

水位差条件	相関式
①　Δ h>0	Δ h=8.37966 × 10⁻⁷Q²+3.76822 × 10⁻⁴Q
②　Δ h=0	Q=0
③　Δ h<0	Δ h=4.98224 × 10⁻⁴Q

※Δ h= 松江水位－中海湖心潮位



図－ 7　宍道湖湖心－境港の水位差と佐陀川流量の関係

表－ 6　宍道湖湖心－境港の水位差と境水道流量の相関式

水位差条件	相関式
①　Δ h>0.15	Δ h=4.07542 × 10⁻⁵Q2 + 2.03692 × 10⁻²Q − 2.44127 × 10⁻¹
②　Δ h ≦ 0.15	Δ h=8.01011 × 10⁻³Q

※Δ h= 宍道湖湖心水位－境港潮位

表－ 7　宍道湖湖心と周辺観測所の水位変化量の相関式

	宍道湖湖心 水位条件	相関式
松江	T.P.+1.0m 未満	Δ h 松江= Δ h 宍道湖× 0.98915
	T.P.+1.0m 以上	Δ h 松江= Δ h 宍道湖× 0.84401
東	—	Δ h 東= Δ h 宍道湖× 1.00013

※「Δ h 観測所名」は、予測水位の時間変化量を表す。

2）中海の水位算定

中海の観測所については、中海湖心を基準とした場合の八幡、米子湾、江島、本庄の水位の相関式を設定した（**表－ 8**）。

(4) 潮位偏差発生時の水位予測

潮位影響起因の出水時には、潮位偏差の予測ができず、結果として水位を過小評価してしまう。そのため、偏差の増加量を考慮し、予測潮位は、天文潮位、潮位偏差、偏差増加量の和として求めることとした（**図－ 8**）。

なお、現状では気圧、風速や潮位偏差の予測が難しいため、安全側を考え、潮位偏差が増加傾向の場合、つまり湖の予測水位が高くなる場合のみ潮位偏差の増加量を考慮することとした。

(5) 風速風向影響時の水位予測

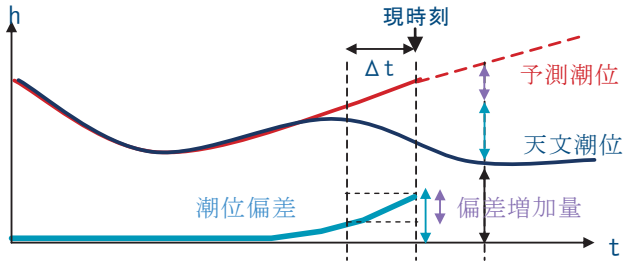
基準水位点とその他予測水位点との関係式の設定の際には、吹き寄せによる水位上昇および低下が起こる場合のデータも利用しているが、これらが全体に占める割合は小さく、その影響を十分に反映できていない。そこで、水位変化に吹き寄せの影響がみられる場合には、風向および風速を考慮して水位変化に反映させることとする。

中海湖心（**図－ 9**）および宍道湖湖心（**図－10**）の 2002 ～ 2011 年の観測データを整理し、東、松江については宍道湖湖心のデータから、八幡、江島、米子湾については、中海湖心のデータから、吹き寄せによる水位上昇および水位低下の条件を設定した。松江地点の設定例を**表－ 9** に示す。なお、本庄地点は観測データが少ないため条件式は設定しなかった。

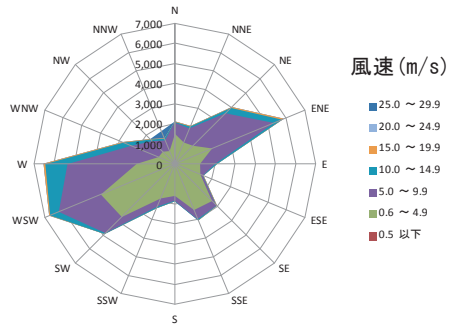
表－ 8　中海湖心と周辺観測所の水位相関式

	中海湖心 水位条件	相関式
八幡	T.P.+0.6m 未満	$\Delta h_{八幡} = \Delta h_{中海} \times 1.03464$
	T.P.+0.6m 以上	$\Delta h_{八幡} = \Delta h_{中海} \times 0.61626$
米子湾	T.P.+0.6m 未満	$\Delta h_{米子湾} = \Delta h_{中海} \times 1.00013$
	T.P.+0.6m 以上	$\Delta h_{米子湾} = \Delta h_{中海} \times 1.26269$
江島	T.P.+0.5m 未満	$\Delta h_{江島} = \Delta h_{中海} \times 0.99908$
	T.P.+0.5m 以上	$\Delta h_{江島} = \Delta h_{中海} \times 1.10340$
本庄	―	$\Delta h_{本庄} = \Delta h_{中海} \times 1.01626$

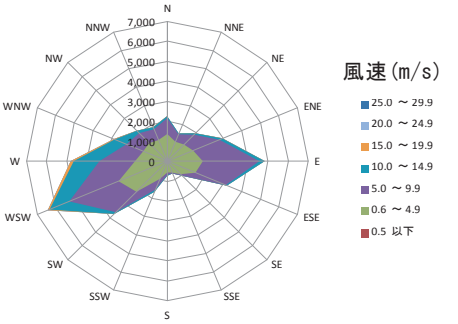
※「$\Delta h_{観測所名}$」は、予測水位の時間変化量を表す。



図－ 8　潮位偏差発生時の潮位予測方法の概念図



図－ 9　中海湖心の風速・風向観測実績



図－ 10　宍道湖湖心の風速・風向観測実績

表－ 9　風向・風速条件と水位変化の関係の例（松江）

風向条件	風速条件	水位変化
北　東～東南東	風速 15m/s 以上	－0.05m
西南西～西北西	風速 18m/s 以上	＋0.10m

4. 予測モデルの精度検証

近年の出水について再現計算を行い、構築したモデルの精度検証を行った。対象出水は、既設の斐伊川上流域の分布型洪水予測システムが稼働しており、レーダ雨量および予測雨量が取得可能な、平成 23 年 9 月出水とした。また、モデル構築の際に利用していない平成 24 年 9 月の出水も対象とし、未知の出水の予測精度も確認した。

平成 23 年 9 月出水は降雨によるもので、宍道湖側で大きな水位上昇がみられた。一方、平成 24 年 9 月出水は、低気圧によるもので、潮位偏差が大きく、ほぼ無降雨で宍道湖および中海の水位が上昇した事例である。

(1) 平成 23 年 9 月出水

1）流量の検証

図－ 11 および**図－ 12** に、境水道および大橋川の流量の再現結果を示す。流入、流出ともに概ね一致していることが確認できる。なお、安全側（水位が高めに予測される）の評価にはなっているものの、9 月 3 日 12 時前後の境水道流量は過小評価となっており、今後事例を積み重ねた上で精度向上の検討が必要である。

2）水位の検証

水位周知観測所である松江地点および中海湖心地点の水位予測結果を**図－13** および**図－14** に示す。松江地点でのピーク水位の誤差は、1 時間先予測で 0.01m、3 時間先予測で 0.04m、6 時間先予測で 0.11m となり、概ね精度よく再現できている。ピーク時刻は概ね 3 時間程度早く予測しているが、増加、減少傾向は良く再現できている。中海湖心でのピーク水位誤差は、1 時間先予測で－0.02m、3 時間先予測で－0.04m、6 時間先予測で 0.03m と、こちらも良く一致している。

(2) 平成 24 年 9 月出水

平成 24 年 9 月出水については、観測流量が得られていなかったため、水位のみ評価を行った。松江地点および中海湖心地点の水位予測結果を**図－15** および**図－16** に示す。松江地点でのピーク水位の誤差は、1 時間先予測で－0.01m、3 時間先予測で 0.02m、6 時間先予測で 0.03m となり、精度良く再現できている。中海湖心地点については、ピーク水位の誤差は 1 時間先予測で－0.02m、3 時間先予測で－0.05m、6 時間先予測で－0.04m となり、良好に再現できている。ただし、立ち上がりの予測で精度が落ちており、今後のさらなる検証が必要である。

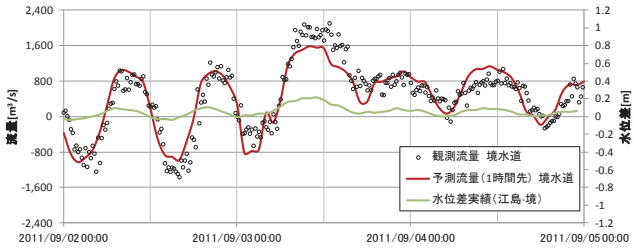


図 － 11　江島－境港の水位差と境水道の流量

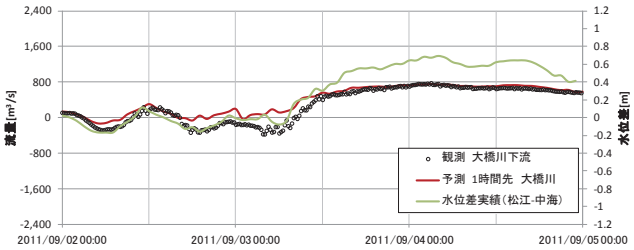
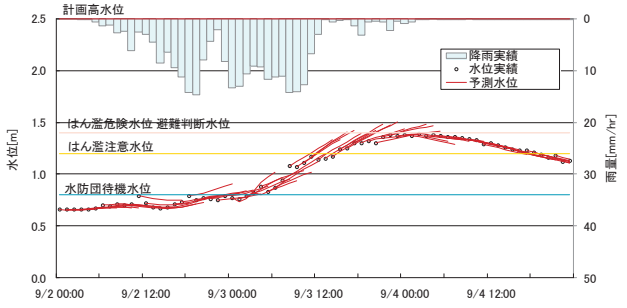
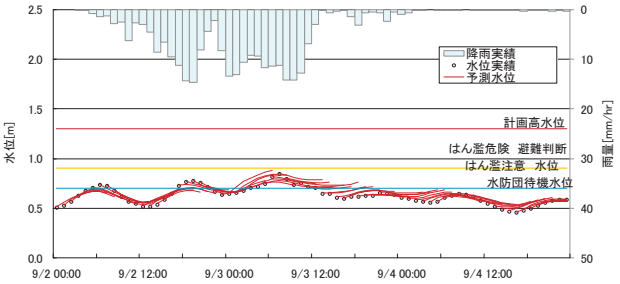


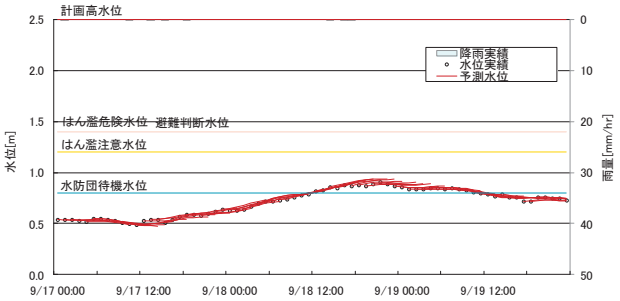
図 － 12　松江－中海湖心の水位差と大橋川流量



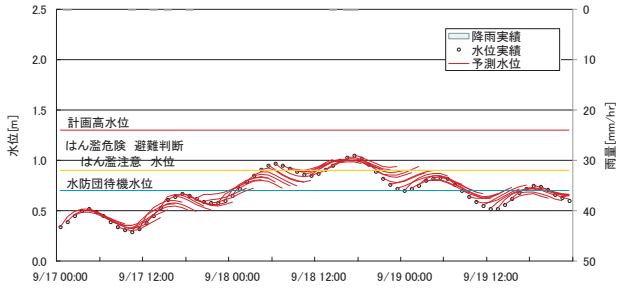
図－ 13　松江地点の水位予測（2011 年 9 月出水）



図－ 14　中海湖心地点の水位予測（2011 年 9 月出水）



図－ 15　松江地点の水位予測（2012 年 9 月出水）



図－ 16　中海湖心地点の水位予測（2012 年 9 月出水）

5. おわりに

分布型流出モデルと過去の出水データの相関関係から設定した水収支式を組み合わせたリアルタイム水位予測手法を構築した。

平成 23 年 9 月、平成 24 年 9 月の 2 出水について再現計算証を行い、大雨および高潮に起因する出水のどちらも概ね精度よく再現することができることを確認した。

課題としては、検証できた出水が 2 出水であること、現状では潮位や風速・風向の予測が難しいことが挙げられ、引き続き継続的な検証を行っていく必要がある。

謝辞：本稿の内容は、国土交通省中国地方整備局出雲河川事務所によるデータ提供などのご尽力を得て行われたものであり、ここに深く感謝申し上げます。