

河川仮締め切り工の越水管理を目的とした 石狩川流域におけるリアルタイムレーダ雨量 データ等を用いた出水予測警報システムの 開発と現地検証

DEVELOPEMENT AND FIELD VERIFICATION OF A FLOOD FORECASTING
ALARM SYSTEM BY USING A REAL-TIME RADAR RAIN DATA FOR
PREVENTING A CLOSURE WORK FROM THE OVERFLOW IN THE ISHIKARI
RIVER BASIN

石野和男¹・本田隆英²・伊藤一教²・宮田康一³
Kazuo ISHINO, Takahide HONDA, Kazunori ITO and Koichi MIYATA

¹正会員 工博 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 博(工) 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 大成建設株式会社 札幌支店 石狩川頭首工共同企業体工事
(〒068-1213 北海道岩見沢市北村赤川586番地40)

The Ishikari-gawa head works is under construction. An alarm system with the flood forecasting is desired in the construction site in order to minimize the damages on the site from the flood. The flood alarm system is developed by using three algorithms of a) the threshold of accumulated rainfall in the basin, b) distributed runoff model, c) estimated water level at the site from the water level at several observation stations in the basin. The alarm system gives alarms in stages several hours before the flood recording the head works site. The system is applied for the field site from Apr. 2008. This report shows the field verification of the system for the flood occurred in Jul. 2009. Actually workers and construction machinery in a closure work could be evacuated without any damages, receiving alarms from the flood alarm system before overflowing. Furthermore the system includes the effect of the snowmelt in the spring season. It is shown that the flood alarm system could be worked effectively in order to minimize the damages on the construction site.

Key Words : Flood forecasting, alarm system, distributed runoff model, overflow, radar rain data, snowmelt, Ishikari river basin

1. はじめに

現在, 石狩川河口から約55kmの地点に石狩川頭首工(堤長252.5m, 堤高4.62m, 計画最大取水量37.493 m³/s)を建設中である。施工位置を図-1に示す。本体工事は平成15年度に着工し, 施工中の河積阻害や工期および工費を考慮し, 工事を右岸部, 中央部, 左岸部の3期に分割し, 二重仮締め切工法より施工されている。これまでに1, 2期工事が完了しており, 平成23年度の完成予定を目指して現在は左岸部の3期工事を施工中である。

仮締め切工の天端高は, 既往の河道内水位等を考慮し,

EL+9.14mに設定されている。出水により仮締め切工内に浸水すると工事に甚大な被害が生じるため, 現地水位が仮締め切工天端を上回ると予想された場合は, 事前に仮締め切工内の作業員や資機材を退避させる。この時, 十分な退避時間を確保するために出水による水位上昇をできるだけ事前にかつ正確に予測できるシステムの構築が求められる。また, 一般に堰・頭首工等の建設工事は渇水期に施工されるが, 近年は渇水期においても異常出水が多発している¹⁾ことから, 当該工事において工事中の異常出水によるリスクを最小限に抑えることが重要である。

近年, 計算機処理能力の向上やリアルタイムの気象・河川情報の取得が可能になってきたことから, 分布型流

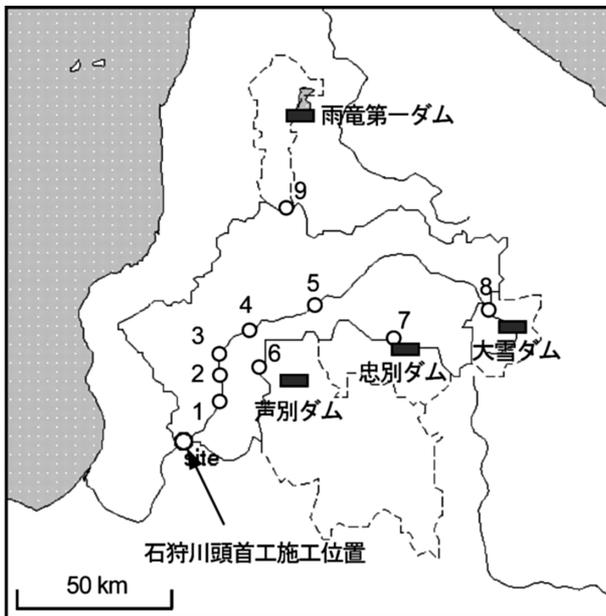


図-1 石狩川流域位置図 (○：観測所，1：奈井江大橋，2：砂川橋，3：橋本町，4：妹背牛橋，5：伊納，6：赤平，7：江卸，8：層雲峡，9：幌加内)

出モデルを用いた洪水予測技術が現場でも適用され始めている^{2) 3)}。本報告では石狩川頭首工工事を対象に仮締切工の越水管理を目的とし、現地適用の観点から安定性に優れ、より早く洪水警報を発令できるシステムを構築することとした。具体的には、リアルタイム気象データ等を使用した分布型流出解析による出水予測に加えて、流域内の累積雨量による越水判定、観測所水位を用いた水位予測モデルで構成される多段階の警報予測システムを開発した。本報告では、その開発内容と現地適用結果を報告する。

2. 出水予測警報システムの概要

(1) 概要

本システムは、1) 流域平均の累積雨量の閾値（警戒値）による越水判断、2) 分布型流出解析モデルによる頭首工位置の水位予測、3) 流域内における複数の観測所水位による頭首工水位予測の3つの予測手法から構成される。流出解析モデルによる予測のみでも工事位置の水位予測は算定できるが、既往の気象・河川データと出水時における頭首工水位の相関関係を調べたところ、累積雨量や観測所水位を用いた予測も十分可能であることが分かった。そこで、これらの予測手法を流出解析モデルによる予測と併用することで、工事現場において出水時の対応を総合的に判断することが可能となる。また、流出解析モデルにはリアルタイム雨量データを入力値として用いるが、受信障害等でリアルタイムデータが取得できない等で流出解析による予測が不能となった場合、

表-1 多段階の警報発令と警報予測手法および現場の対応レベル

警報発令段階	リードタイム	警報予測手法	現場の対応レベル
0次	15～29hr	流域平均の累積雨量	退避準備
1次	13～20hr	分布型流出解析モデル	退避開始
2次～6次	3～18hr	観測所水位 (図-1中1～5の5ヶ所)	仮締切内に注水

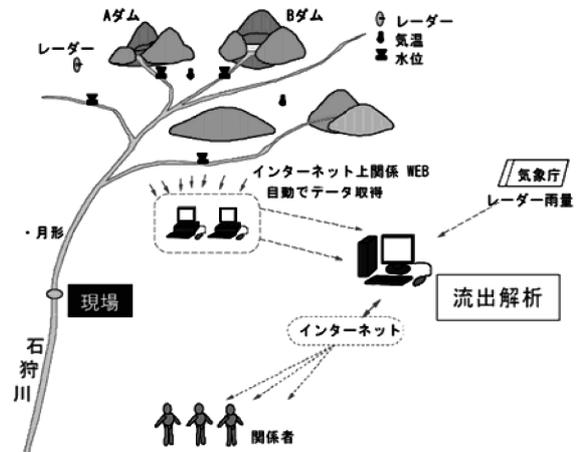


図-2 出水予測警報システム概念図

累積雨量や観測所水位による予測により洪水予測警報システムの機能性を確保することが可能である。

各予測手法による警報発令時刻と実際に仮締切工が越水する時刻の時間差（リードタイム）に応じて、累積雨量による警報を0次警報、流出解析モデルによる警報を1次警報、図-1のうち1～5の5地点の観測所水位による警報を2次～6次警報とし、警報を多段階で発令できるシステムとした（表-1）。リードタイムは、支川毎の降雨量により異なり累積雨量による方法で15～29時間、流出解析による方法で13～20時間であり、最大で越水の15～29時間前に警報を発令することが可能である。表-1には現場の対応レベルも示す。なお、本システムは2005年9月に開発着手し、2008年4月から運用開始した。

(2) 入力データ

システムに入力するデータは、リアルタイムデータとして、(財) 気象業務支援センター発信の1kmメッシュレーダ雨量解析補正データおよび短期間予報降水、国土交通省が公開している「水文水質データベース」から石狩川頭首工より上流にある5地点（図-1のうち1～5）の観測所水位を用いた（図-2）。雨量データ、観測所水位データの取得間隔は、それぞれ30分および10分である。予測解析に要する時間は、いずれの手法においても5分程度である。

(3) 予測結果の出力

各予測手法による予測解析が完了次第、結果は専用

ウェブにアップロードされ、工事関係者はインターネットを通じて現場でリアルタイムで頭首工の予測水位および実測水位等を確認することが可能である(図-2)。また、警報が発令された場合は、関係者の携帯電話等に警報発令メールが自動配信される。

3. 出水予測モデルの構築

(1) 累積雨量による予測モデル

2005年9月8日に、仮締切天端を0.14m上回る出水(工事地点流量 $2,800\text{m}^3/\text{s}$)が発生した。この出水イベントを対象に、頭首工位置のすぐ上流に位置する月形観測所および石狩川上流域に位置する伊納観測所のそれぞれの地点より上流域に対する流域平均雨量の累積値を、各観測所流量とともに時系列で図-3に示す。なお、ダムより上流域の雨量は、流域平均雨量から除外した。各観測所に対して、流域平均の累積雨量と最大観測流量が対応すると考え、図-3では縦軸を累積雨量の最大値と観測流量の最大値がほぼ一致するように図示している。同時に各観測所について、頭首工越水に対応する観測所水位(図-4で後述)から流量を推定し、同図にあわせて示す。同図より、各観測所の越水流量に対応する累積雨量は、伊納で 3.74mm 、月形で 9.81mm であり、それぞれのタイムラグは伊納で4時間、月形で10時間であることが分かる。後に示すが伊納から頭首工位置までの洪水到達時間はおよそ11時間であることから、伊納上流の累積雨量を用いた場合、15時間前に越水の判定が可能となる。他の複数の出水イベントに対する累積雨量を同様の方法で算出したところ、同等あるいはやや大きな累積雨量が確認されたので、本システムでは図-3の結果を採用し、流域平均

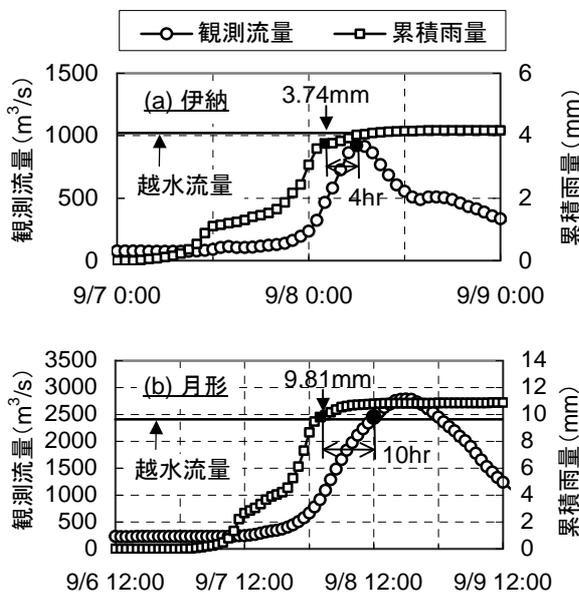


図-3 各観測所における累積雨量と流量の関係

雨量の48時間累積値が以上の値を上回った場合、仮締切工は越水する可能性が高いとして0次警報を発令することとした。

(2) 分布型流出モデル

出水時における河道内の流量および水位の算出は、一般に流出解析モデルが用いられる。ここでは、市川ら⁴⁾による分布型流出モデルを本システムに適用した。なお、上流域には4つの大型ダムがあり(図-1)、ダム上流の降雨の河川流入はダム操作の影響を大きく受ける。そこで、流出解析に使用する解析領域は図-1の実線で示すダム上流域を除外した流域を対象とし、ダム直下にある観測所(図-1中6~9)の流量を流出解析の流量境界条件として与えた。適用結果は次章で示すが、試行計算の結果から解析終了から仮締切越水までの時間(リードタイム)は13時間であることが分かった。分布型流出解析から出水時の頭首工水位を予測し、予測した頭首工水位が仮締切天端 $\text{EL}+9.14\text{m}$ を上回った場合、1次警報を発令することとした。

(3) 観測所水位による予測モデル

2005年および2006年の2年間において、頭首工水位が $\text{EL}+7.1\text{m}$ を上回る出水イベントが計7回あった。これらの出水イベントに対して、頭首工位置から上流域における伊納、妹背牛橋、橋本町、砂川橋、奈井江大橋の5地点の観測所における最大水位と頭首工最大水位の比較を図-4に示す。同図より、いずれの観測所においても出水時の頭首工最大水位と観測所水位に相関係数 $R=0.9$ 以上の高い相関があることが分かった。同図から推定した1次式あるいは2次式による近似予測式を表-2に示す。この予測式から観測所水位を用いて出水時の頭首工水位を予測し、頭首工水位が仮締切天端 $\text{EL}+9.14\text{m}$ を上回った場合、各観測所の洪水到達時間に応じて2次から6次警報を発令することとした。

各観測所から頭首工までの洪水到達時間は、同期間の出水イベントに対する水位履歴分析から図-5のように定めた。なお、対象とした出水イベントは計7回あり、同図ではプロットが重なっているものがある。これをふまえて観測所ごとに洪水到達時間の平均をとると、おおむね同図で示される推定値となる。

4. 現地検証結果

2009年7月19日から20日にかけて、頭首工位置で仮締切工天端の 0.13m 下りまで水位が上昇する出水が発生した。この出水イベントに対する本システムの適用結果について報告する。この出水イベントでは、頭首工位置で最大水位が発生した時刻の29時間前に流域内の平均累積雨量が警戒値を超えて0次警報が発令され、現場は重機

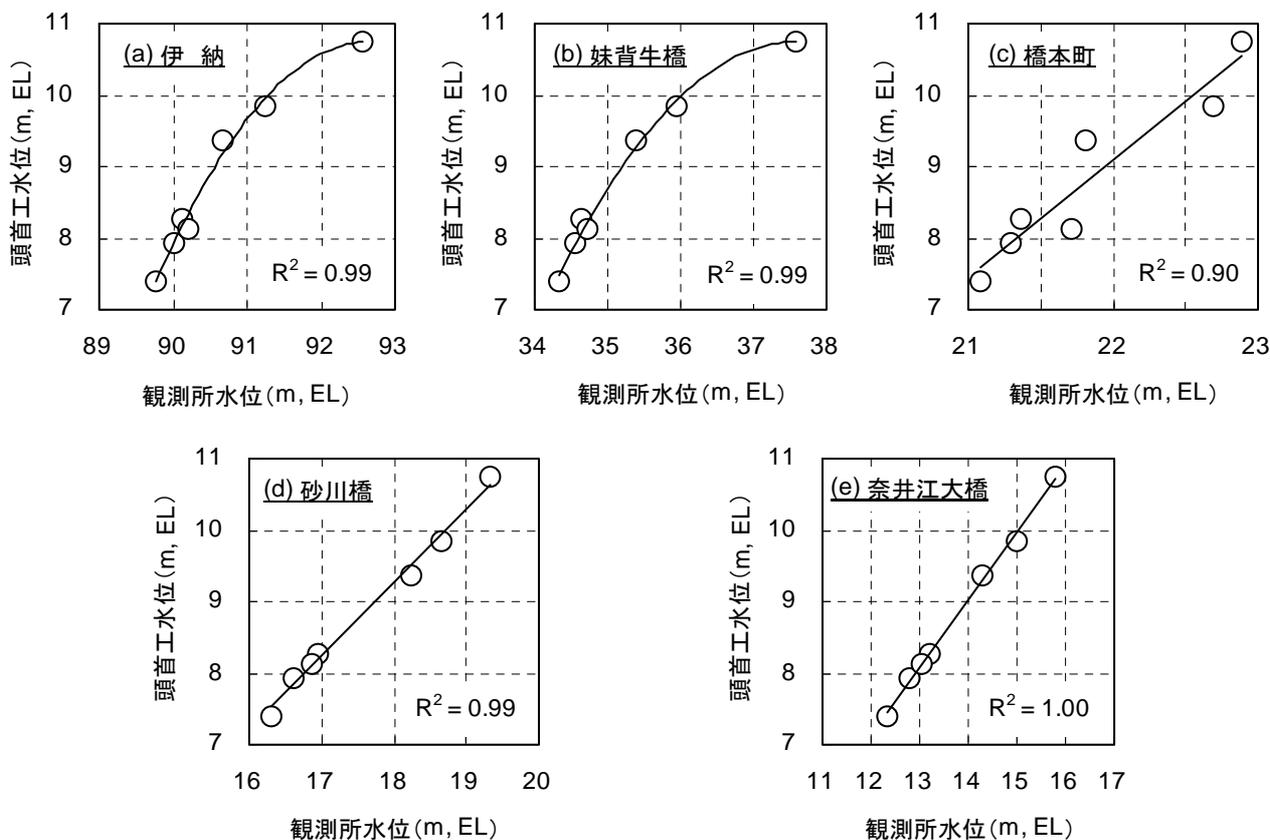


図-4 出水時における観測所水位と頭首工水位の関係

表-2 観測所水位 X (m, EL)による頭首工水位 Y (m, EL)の予測式

観測所	予測式
(a) 伊納	$Y = -0.4053X^2 + 75.09X - 3467.5$
(b) 妹背牛橋	$Y = -0.3112X^2 + 23.378X - 428.28$
(c) 橋本町	$Y = 1.6322X - 26.82$
(d) 砂川橋	$Y = 1.0288X - 9.2543$
(e) 奈井江大橋	$Y = 0.9441X - 4.1955$

を回避するなどの警戒態勢をとった。このときの出水予測警報システムの稼働状況と現場対応状況の時系列を表-3に、現地状況を写真-1に示す。

頭首工で最大水位発生時の18時間前には、伊納観測所による洪水予測から2次警報が発令された。ただし、分布型流出解析モデルでは、頭首工位置の最大水位は仮締切天端EL+9.14mを越えないとして、1次警報は発令されなかった。実際に出水予測警報システムの専用ウェブで公開された画面の一部として、7月20日AM12:20における頭首工位置の実測水位と各予測モデルによる頭首工予測水位を図-6に示す。観測所水位から予測した頭首工水位は、実測値に比べて0.0m~1.5m程度過大に算出されているものの、分布型流出解析モデルによる方法では頭首工水位EL+9.01mは実測最大水位EL+9.01mと合致した。また、それぞれのモデルによる頭首工予測水位の上昇の様子は、実測結果とほぼ一致しており、頭首工最大水位発生時刻

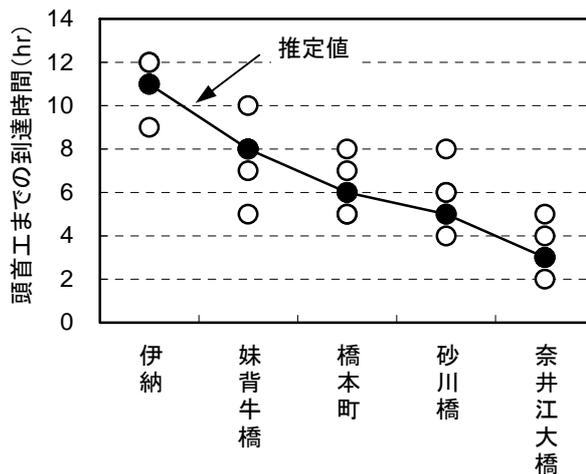


図-5 各観測所から頭首工までの洪水到達時間

も良好に再現できていることが確認できた。

以上から、各予測モデルを用いて多段階の警報システムを適用したところ、頭首工位置での最大水位および最大水位発生時刻を良好に再現でき、工事現場の出水による作業員の負傷や資重機の損失等の災害防止に大きく貢献できることが実証された。なお、他の出水イベントに対しても同システムは有効に機能することを確認している。

表-3 出水予測警報システムの稼働状況と現場対応状況

時刻	警報システム作動状況	現場対応状況
7/19 6:00 (29時間前)	流域平均累積雨量が警戒値を超えて0次警報発令	7/19朝から待機
17:00 (18時間前)	伊納観測所水位による予測結果により2次警報発令	重機の退避開始
21:00 (14時間前)	—	重機の退避完了
7/20 4:00 (7時間前)	—	仮締切工内に注水 (写真-1 (a))
11:00 (最大水位発生)	流出解析による頭首工予測水位と実測水位が一致	仮締切工天端0.13m下りの最大水位を計測 (写真-1 (b), (c))



(a) 避難後の注水状況 (AM4:00)



(b) 最高水位時状況 1 (AM11:00)



(c) 最高水位時状況 2 (AM11:00)

写真-1 出水に対する現場対応状況 (いずれも写真右側が仮締切工内側, 2009年7月20日)

5. 融雪期への適用

(1) 概要

石狩川流域は冬季に多量の積雪があるため、3月から6月にかけて融雪による出水が発生することがある。融雪による出水は、2006年5月11日には頭首工位置で仮締切工天端を上回るEL +9.88mの水位が観測されており、降雨による出水と同程度となることがある。よって、融雪期における工事現場の出水リスクを低減させるため、融雪機構を考慮した出水予測警報システムを構築する必要がある。ここでは、分布型流出解析に融雪の影響を考慮した。

融雪を考慮した分布型流出解析のフローを図-7に示す。流域内の各メッシュに対して、気象データから熱収支式に基づいて融雪量を算出し、融雪量を雨量データに足し合わせて分布型流出解析モデルに入力することとした。融雪量の推定には、積算暖度法 (例えば秀島・星⁵⁾) や熱収支法 (例えば臼谷・中津川⁶⁾) などの方法が挙げられる。ここでは、熱収支法によるプログラム⁷⁾を用いて融雪量を算出した。入力値は、気象庁が公開している旭川観測所における気温および日照時間、朱鞠内観測所における積雪深を用いた。気温については、気温の標高低減率を $-0.6^{\circ}/100m^8$ として、標高補正により流域内の各メッシュに気温を与えた。また、積雪分布については、気温と同様に標高による補正を行うこととし、流域内にある積雪深観測所でもっとも標高が高い朱鞠内観測所と

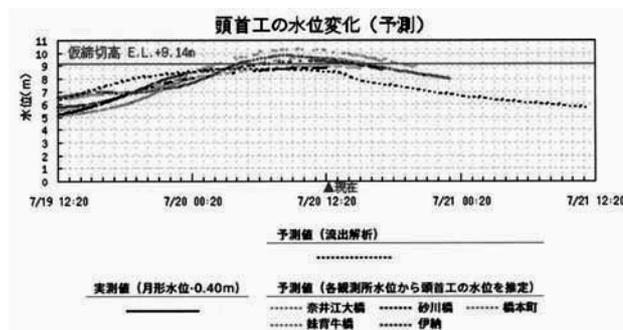


図-6 頭首工の実測水位と予測水位 (2009年7月20日12:20時点)

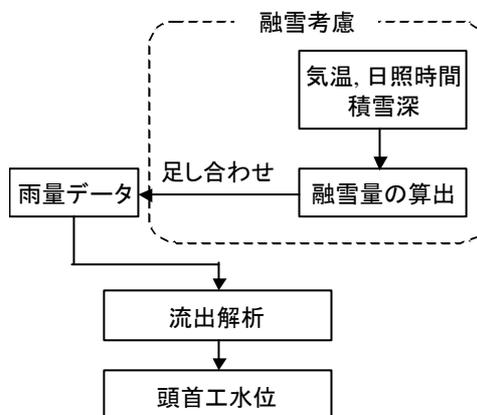


図-7 融雪期における分布型流出解析のフロー

流域内の他観測所に対して既往の積雪深データの比較から1次近似式を構築し、朱鞠内の積雪深から流域内の積

雪深空間分布を推定した。なお、このように日毎の観測値を入力して、長期間の水位予測は目的としていない。また、融雪の影響を追加した警報システムは2009年4月から運用開始した。

(2) 適用結果

2009年4月の運用開始から、仮締切天端を越えるような大きな出水は発生しなかったため、ここでは融雪期における本システム適用結果を2005年から2007年の3カ年に対して示す。融雪を考慮した分布型流出解析から得られる頭首工位置の水位を、実測結果とともに図-8に示す。同図より、3カ年の融雪期において解析結果は実測結果をおおむね良好に再現できていることが分かる。ただし、2005年および2006年の融雪期後半に発生した出水については、解析結果は実測結果を最大で2m程度過小に算出している。融雪期前半の出水は良好に再現できていることから、朱鞠内1ヶ所のみ積雪深を用いた積雪分布の推定がまだ不十分であることが過小評価の原因のひとつと考えられる。

6. まとめ

現在施工中の石狩川頭首工工事に対して、分布型流出解析モデルに加えて、流域内の累積雨量による越水判定、観測所水位を用いた水位予測モデルで構成される多段階の警報予測システムを開発した。2008年4月から運用しているが、特に2009年7月の出水イベントに対しては、頭首工位置でのピーク水位およびピーク水位発生時刻を良好に再現でき、工事現場の出水による作業員の負傷や資材・重機の損失といった災害の防止に大きく貢献できることが実証された。さらに、融雪による出水も同システムに導入し、融雪による出水予測を良好に再現できることが示された。ただし、融雪期後半の出水については、解析結果は過小評価する傾向があるので、積雪分布推定などを見直す必要がある。

今後は出水予測警報システムの運用を継続して行い、無事故・無災害で石狩川頭首工の平成23年度完成を目指す。

謝辞：分布型流出解析については、京都大学立川康人准教授に多大なご協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 石野和男, 斎藤貢一: 河川構造物にかかる河川工学の課題, 河川技術論文集, 第9巻, pp. 1-6, 2003.
- 2) 荒木千博, 米勢嘉智: レーダ雨量を用いた分布型流出モデルによる洪水予測システムの現状, 河川技術論文集, 第14巻,

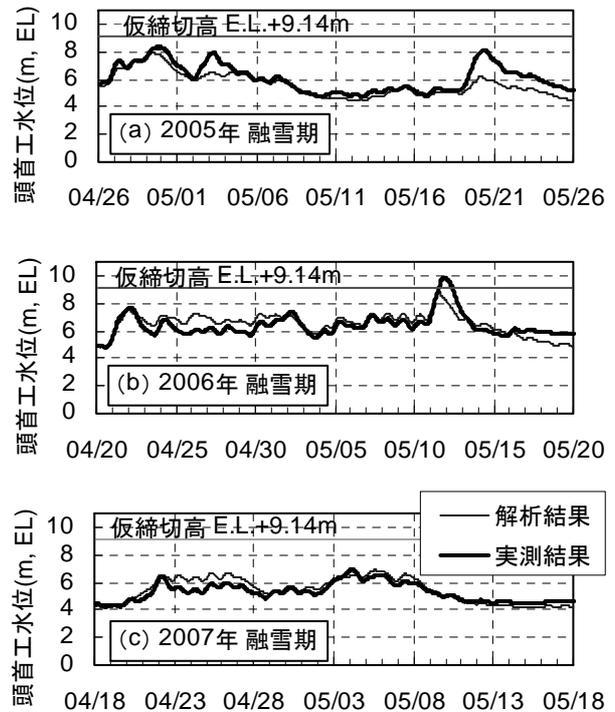


図-8 融雪期における分布型流出解析の適用結果

pp. 31-34, 2008.

- 3) 立川康人, 佐山敬洋, 宝 馨, 松浦秀起, 山崎友也, 山路昭彦, 道広有理: 広域分布型物理水文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, 自然科学災害, 26-2, pp. 189-201, 2007.
- 4) 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, 621/II-47, pp. 43-52, 2001.
- 5) 秀島好昭, 星 清: Degree-Day法にランドサットデータを活用した融雪流出解析—北海道の山岳地の融雪流出に関する研究(II)—, 農業土木学会論文集, 第148号, pp. 19-24, 1990.
- 6) 臼谷友秀, 中津川誠: 気象予報情報に基づいた融雪洪水の予測精度, 河川技術論文集, 第14巻, pp. 41-46, 2008.
- 7) 土木学会編: 水理公式集例題プログラム集[平成13年版], 例題1-10, 丸善(株), 2006.
- 8) 樋口敬二: 荒川流域の融雪水量及び流出量調査, 水資源調査所調査報告第9号, pp. 16-32, 1956.

(2011. 5. 19 受付)