

河川工事の安全管理に用いる 「出水警報システム」の長期適用と 予測精度の向上に関する検討

LONG TERM APPLICATION OF FRESHET PREDICTION SYSTEM FOR RIVER
WORKS AND INVESTIGATION OF THE SYSTEM IMPROVEMENT

大野剛¹・永野雄一²・本田隆英²・高山百合子²・伊藤一教²

Go OHNO, Yuichi NAGANO, Takahide HONDA, Yuriko TAKAYAMA and Kazunori ITO

¹正会員 修(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)

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)

Large-scale overflow could inflict serious damage on river work in terms of safety, cost and schedule control. Freshet prediction system was developed and applied to a river work for three years. Applicability of the system was discussed in this paper. The system used three prediction methods in order to gain long-term prediction and robustness operation. The results show that the system was effective performance practically. Input data for the system are time series data of analyzed rainfall distribution and forecast rainfall data. It was figured that not only accuracy of the distribution and the forecast but also spatial rainfall distribution patterns such as the line precipitation zone affect performance of the system.

Key Words : freshet prediction system, river works, long-term prediction, the line precipitation zone, analyzed rainfall data

1. はじめに

河川工事では施工中に大規模な出水が発生した場合、工事従事者の人命の損失や怪我の発生など安全が脅かされたり、重機や建設資材の流出などによる建設資産への損害の発生など、多くの被害が生じる可能性がある。そのため、安全管理の観点から早い段階で出水の規模を把握し、工事関係者に周知することが重要となる。工事の規模にもよるが、重機の避難完了まで10時間程度かかる場合もある。著者らは河川工事の安全管理を目的とした「出水警報システム」(以下、本システム)を開発した¹⁾²⁾³⁾。本システムは、河川の観測所水位や解析雨量を用いて3つの予測手法により工事地点の河川水位を予測するもので、予測水位が施工者側の設定水位を超えた場合、工事関係者にメール等で警報を配信するものである。

本稿では、本システムを約3年間適用した旧石狩川頭首工撤去工事(以下、撤去工事)を事例に、予測精度の検証を行った。撤去工事は2014年9月~2017年7月の約3年間であり、2015年4月~5月と8月~9月、2016年4月~9月、

2017年4月~5月は工事を一時中断したが、本稿では中断期間も含めて検証した。適用期間中、3回の大規模出水が発生したが本システムが事前に警報を配信しており、工事の安全管理に寄与した。また本システムの適用中に、予測値の誤差が発生する場合があります。これら誤差要因についても検討した。

2. 出水警報システムの概要

本システムは、工事地点より上流域の雨や河川水位のデータをインターネットから自動で取得し、3種類の予測手法(回帰モデル、数値モデル、累積雨量モデル)により工事地点の水位を予測する。入力データは、気象庁が配信している解析雨量データ(1kmメッシュ)、降水短時間予報データ(1kmメッシュ、1~6時間後の予測)と国土交通省が公開している「水文水質データベース」の観測所水位である。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。水位予測に要する時間は、手法によるが最大で5分程度であり、予測結果は専用のウェブサイトにて10分ごとにアップロードされる。そのため工事関係者はリアルタイムで予測水

位や実測水位等を確認できる。また、施工者が設定する「危険水位」を予測水位が超えた場合、工事関係者の携帯電話等に警報メールが自動配信される。

回帰モデルは、工事地点上流の各観測所において過去の出水時のピーク水位と工事地点のピーク水位の関係から回帰式を作成し、各観測所水位から工事地点の水位を予測するものである。数値モデルは、分布型流出解析により解析雨量データを入力値として工事地点の水位を予測するもので、解析パラメータは過去の複数の出水イベントに適合する値をキャリブレーションにより決定する。累積雨量モデルは、集水域の累積雨量が閾値（危険値）を超えた場合、警報を配信するもので、閾値は過去の出水イベントから決定する。本システムの特徴は、ロバスト性と信頼性を確保している点である。各モデルは異なる入力データから水位を予測しているため、何らかのトラブルなどによりデータ配信が滞った場合もいずれかのモデルが予測を継続することができる（ロバスト性）。また、各モデルが予測する時刻と予測結果の配信時刻との差や予測精度は異なるが、補完しあうことで予測の「信頼性」を確保している。なお、本稿では、予測時刻と予測結果の配信時刻との差を「リードタイム」とする（例えば、予測時刻を本日18:00、予測結果の配信時刻を本日12:00とした場合、リードタイムは6時間となる）。

撤去工事における危険水位と閾値、リードタイムを表-1に示す。回帰モデルは頭首工の上流にある5観測所（図-1の▲）で回帰式を構築した。回帰式は、2005年～2014年を対象に頭首工の水位が二重式仮締切工の天端高であるE.L.+7.5m（危険水位）を超えた38の出水イベントを用いて構築しており、各観測所と月形観測所の水位ピークの時間差をリードタイムと設定した（3～11時間）。なお、月形観測所と頭首工の水位差は0.14mであったため、頭首工水位は月形観測所水位より0.14m低い値とした。数値モデルは過去の出水イベントを対象とした再現計算結果からリードタイムを13時間とした。累積雨量モデルは危険 $Y_{Tc-wss-01}Y_{43}$ 水理研究室 $Y_{\star}$ 進行中プロジェクト Y_{2014} 石狩頭首工撤去 Y_{80} 発表 Y_{2018} 河川シンポジウム $Y_{論文}$ 査読後値を39.3mm/48hとし、過去の出水イベントからリードタイムは21時間（解析雨量データを48時間分使用した場合）～27時間（6時間後までの降水短時間予報と42時間分の解析雨量を合わせて48時間分使用した場合）と設定した。

3. 出水警報システムの適用結果

(1) 適用期間における水位変動

撤去工事中の頭首工水位の変化と頭首工近傍の月形観測所における降水量を図-2に示す。頭首工水位が危険水位（E.L.+7.5m）を越える出水イベントが3回発生しており、1回目は豪雨によるもの（図-2のA）で、北海道土

表-1 各モデルの危険水位・危険値・リードタイム

予測手法	危険水位・閾値	リードタイム
①回帰モデル	E. L. +7.5m	3～11 hr
②数値モデル	E. L. +7.5m	13 hr
③累積雨量モデル	39.3mm/48h	21～27 hr



図-1 石狩川旧頭首工および観測所の位置

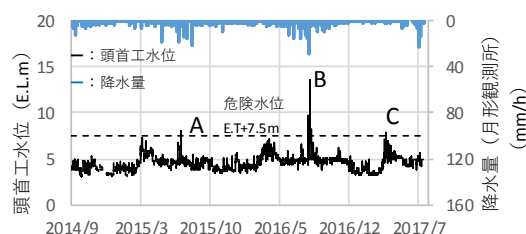
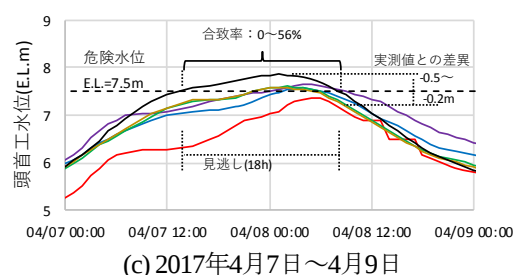
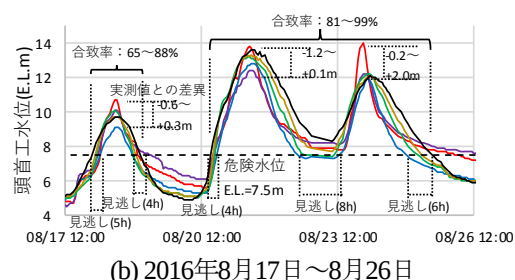
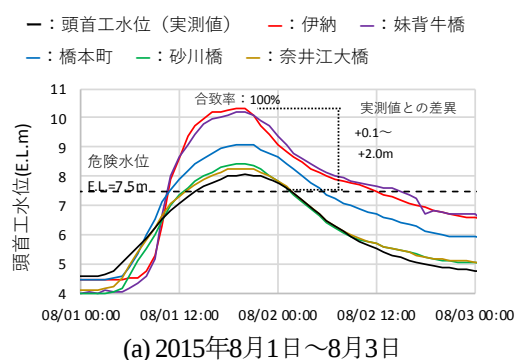


図-2 頭首工における水位変動

別市朝日町では39mm/hを記録した。2回目は3つの台風が2週連続で上陸した北海道豪雨（30～40mm/h）によるもの（図-2のB），3回目は気温上昇に伴う融雪によるもの（図-2のC）であった。以下、頭首工水位が危険水位を超えた期間を中心に予測結果を示す。

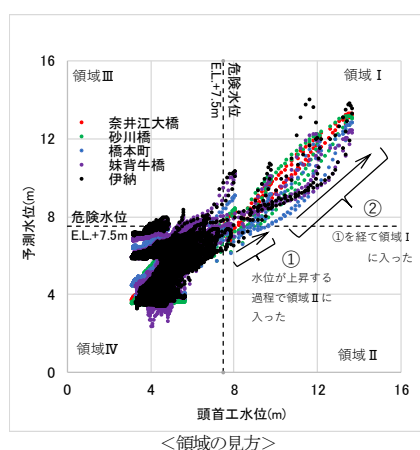
(2) 回帰モデルの予測結果

頭首工水位と回帰モデルの予測値との比較結果を図-3に示す。頭首工水位が危険水位を超えたとき予測値も危険値を超えていた割合を「合致率」として算定したところ、2015年8月2日（図-3 (a)）ではすべての回帰式で合致率が100%，2016年8月（図-3 (b)）では前半の8月17日から8月19日が65～88%，後半の8月20日から8月26日が81～99%であった。2017年4月（図-3 (c)）は0～56%と(a)，(b)に比べて低かった。リードタイム分さかのぼったときの予測値よりも頭首工水位が小さい場合を「空振り」，頭首工水位が大きい場合を「見逃し」とした。2016年8月と2017年4月では見逃しが発生しており，2017年4月のは見逃した時間が6～18時間であった。6時間以上の見逃しが発生した理由として、頭首工水位が危険水位をわずかに超えた程度であることと、回帰モデルは予測誤差を含むことが考えられる。2015年8月，2016年8月の頭首工水位は危険水位を2m以上超えており，回帰モデルの予測水位と頭首工水位の差が2015年8月は+0.2～+2.0m，2016年8月は-1.2～+2.0mであった（図-3 (a)，



合致率：頭首工水位が危険水位を超えた時、予測値も危険水位を超えていた割合のこと

図-3 頭首工水位が危険水位を超えたときの回帰モデルの予測値時系列



領域	頭首工水位	予測水位	備考
I	E.L.+7.5m以上 (危険水位以上)	E.L.+7.5m以上 (危険水位以上)	正解
II	E.L.+7.5m以上	E.L.+7.5m未満	見逃し
III	E.L.+7.5m未満	E.L.+7.5m以上	空振り
IV	E.L.+7.5m未満	E.L.+7.5m未満	正解

図-4 頭首工水位と回帰モデルの予測値の比較

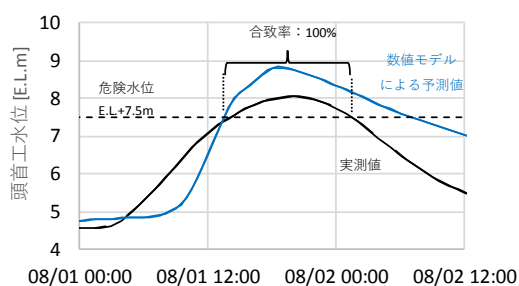
(b) . 2017年4月は予測精度が-0.5~-0.3mであり、頭首工水位は危険水位を35cm超えたのみであった (図-3

(c) . 回帰モデルでは過去の複数の出水イベントについて、工事地点の水位と出水に伴う時間差を一定とした場合の上流の観測所水位から線形回帰式を作成している。回帰モデルは本来ばらつきがある時間差を一定としていることや、誤差が最小となるよう回帰式を作成しているため、予測値も誤差を含んでいる。2017年4月の予測値は、危険水位をわずかに超える頭首工水位を予測したため、回帰モデルの誤差が見逃しに繋がったと考えられる。

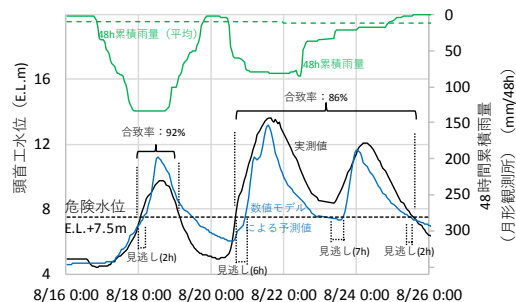
次に2014年9月～2017年7月の全期間を対象に、予測値と頭首工水位を4つの領域 (I～IV) に分けた結果を図-4に示す。「領域I」は頭首工水位、回帰モデルによる予測値ともに危険水位を超えた場合、「領域II」は「見逃し」, 「領域III」は「空振り」, 「領域IV」は頭首工水位、予測値ともに危険水位を超えなかった場合を示している。予測が外れた場合、領域IIの見逃し、もしくは領域IIIの空振りにプロットされるが、出水予測の観点では見逃しを低減することが安全上重要となる。見逃しが発生するタイミングを確認したところ水位が上昇する途中で発生していた (図-4の①)。すなわち、予測値は危険水位を超えるタイミングを危険側に予測していた。ただし最終的には領域Iに入り警報を配信していたことがわかる (図-4の②)。

(3) 数値モデルの予測結果

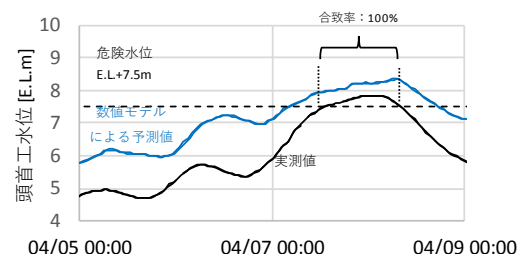
頭首工水位と数値モデルの予測値とを比較した結果を図-5に示す。見逃しが発生した時間はあるが、いずれも数値モデルは危険水位を超えた予測をしている。各イベントの合致率は、2015年8月2日 (図-5 (a)) が100%, 2016年8月 (図-5 (b)) 前半の8月17日から8月19日が92%, 後半の8月20日から8月26日が86%, 2017年4月 (図-5 (c)) が100%であった。2017年4月の融雪に伴う水位上昇を数値モデルで予測できた理由は、気温や日照時間、積雪深から熱収支法により融雪量を算出し、融雪量を雨量データに足し合わせて入力値とするモデルを組み込んでいるためである。見逃しは2016年8月に発生しており、8月17日～23日の1週間に3個の台風が上陸し大雨をもたらしたため (平成28年度8月北海道豪雨) と考えられた。図-5 (b)に頭首工近傍の月形観測所における48時間累積雨量と日平均降水量 (1981~2010年平均) より算出した48時間累積雨量を併記した。8月18日の出水時における累積雨量は133mmであり、累積雨量平均値の9.6mmと比較して約13倍であった。このときは2時間の見逃しが発生した。また2日後の48時間累積雨量は平均値の約8倍の81mmであり、6時間の見逃しが発生した。このような大雨では、土壌への保水量が限界値を超えてからは地表面に流出するが、数値モデルで設定している保水量のパラメータ値は、今回のような連続する大雨によるチューニングをおこなっていない。そのため計算では実際よりも多くの雨が土壌中に保水され、地表面に流出する雨量が減少し、河川水位が低くなったと考えられる。適用期間



(a) 2015年8月1日～8月2日



(b) 2016年8月16日～8月26日



(c) 2017年4月5日～4月9日

合致率：頭首工水位が危険水位を超えた時、予測値も危険水位を超えていた割合のこと

図-5 頭首工水位が危険値を超えたときの数値モデルの予測値時系列

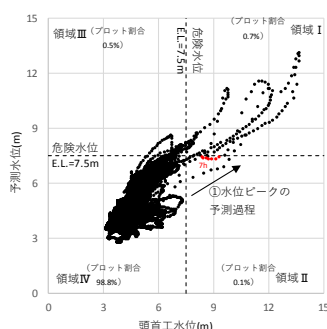


図-6 頭首工水位と数値モデルの予測値の比較

中の数値モデルの予測値と頭首工水位の比較結果を図-6に示す。回帰モデルと同様、4つの領域に分けて表示しており（領域の見方は図-4の下表を参照），全プロットに対する各領域のプロット数は領域Ⅰが0.7%，領域Ⅱが0.1%，領域Ⅲが0.5%，領域Ⅳが98.8%であった。領域Ⅱの見逃しは水位上昇途中に発生し最大で7時間であった（図-5(b)，図-6の①）。数値モデルのリードタイムは

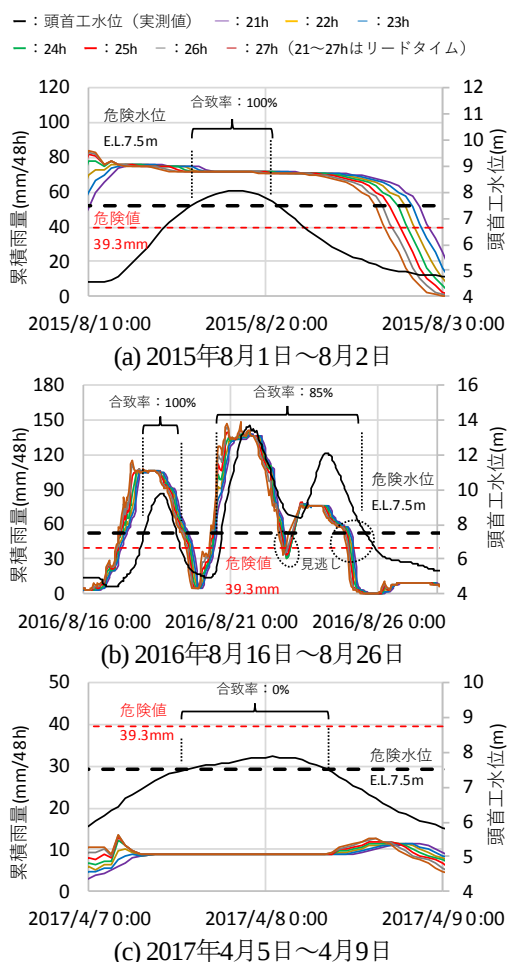
13時間であるため、頭首工水位が危険水位に到達する6時間前には予測値が危険水位を超えて警報を配信した。

(4) 累積雨量モデルとの比較

頭首工水位が危険水位を超えた出水イベントについて、頭首工水位と予測値を比較した結果を図-7に示す。2015年8月2日（図-7 (a)）は頭首工水位が危険水位を超える前にリードタイム21~27hのすべての予測が危険値を超えて警報を配信しており、合致率は100%であった。2016年8月（図-7 (b)）では前半の8月17日から8月19日が100%，後半の8月20日から8月26日が85%であり、見逃しが発生した。累積雨量モデルは、平常時の頭首工水位（E.T.+4.5m程度）が危険水位に達するまでの累積雨量を危険値として設定して予測するシンプルなモデルである。降雨が無い場合は累積雨量が減少し、頭首工水位の値に関わらず警報は配信されない。そのため8月20日から8月26日の見逃しは、累積雨量が減少したが頭首工水位は危険水位以上を維持したことで発生したものである。なお、この見逃しは出水ピークを越えてから発生しているため、撤去工事の安全管理に対する影響は少ないと考える。図-7 (c)の2017年4月では合致率は0%であった。これは2017年4月の出水が融雪によるものであり、雨量のみで予測する累積雨量モデルでは予測ができなかったためである。

頭首工水位とリードタイムが21時間および27時間の予測値との比較結果を図-8に示す。累積雨量モデルは危険値を超えた場合に警報が配信されるため、頭首工水位は危険水位、累積雨量は危険値で領域を分割している。領域Ⅰ～Ⅳの見方は回帰モデル、数値モデルと同様である。全プロットに対する各領域のプロット数は、リードタイムが21hのとき領域Ⅰが0.6%，領域Ⅱが0.1%，領域Ⅲが1.9%，領域Ⅳが97.3%であった。リードタイムが27hのときは領域Ⅰが0.6%，領域Ⅱが0.2%，領域Ⅲが2.1%，領域Ⅳが97.1%であり、リードタイム21時間と比較して予測が外れた割合（領域Ⅱの見逃し，領域Ⅲの空振りの割合）が増加した。リードタイムが27hの予測値は、6時間先の予報と過去42時間分の解析雨量を用いて48時間累積雨量を算定している。これに対してリードタイムが21hの予測値は、過去48時間の解析雨量のみを累積している。そのため、リードタイム27hでは予報が有する誤差が累積し、予測が外れた割合が大きくなったと考えられる。ただし、領域Ⅱ，領域Ⅲとも0.1%の誤差しかないので、降水短時間予報の精度により累積雨量モデルの精度が大きく変化することはないと考える。

図-4，図-6，図-8を比較すると、累積雨量モデルは他のモデルよりも空振り（領域Ⅲ）のプロット箇所が頭首工水位の低水位側で多かった。これは3つのモデルの中で最も簡易なモデルであるほかに、累積雨量モデルで用いる解析雨量が誤差を含んでおり、過大評価されたためである。詳細は4. (2) に記す。



合致率：頭首工水位が危険水位を超えた時、予測値も危険水位を超えていた割合のこと

図-7 頭首工水位が危険水位を超えたときの累積雨量モデルの予測値時系列

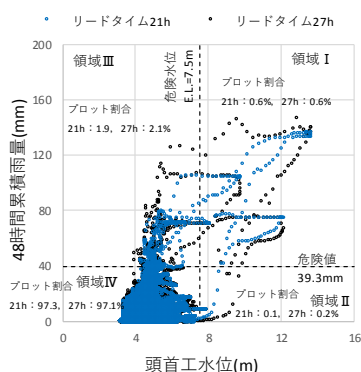


図-8 頭首工水位と累積雨量モデルの予測値の比較

(5) 出水警報システムの配信状況

頭首工水位が危険水位を超えた3回の出水イベントについて、出水ピークに達するまでの出水警報システム警報配信状況を表-2に示す。表-2では、設定したリードタイムの前に予測値が危険水位を超えて（見逃しなく）警報を配信した場合（◎），リードタイムは短くなった（見逃しは発生した）ものの頭首工水位が危険水位を超

表-2 警報の配信状況

	回帰	数値	累積雨量	システム
2015年8月	◎	◎	◎	◎
2016年8月	○	○	◎	◎
2017年4月	×	◎	×	◎

◎：リードタイムの時刻に危険水位を超える予測をした場合

○：リードタイムの時刻より遅れたが、頭首工水位が危険水位を超える前に予測値が危険水位を超える予測をした場合

×：頭首工水位が危険水位を超える前に予測値が危険水位を超える予測をしなかった場合

える前に予測値が危険水位を超えて警報を配信した場合（◎），頭首工水位が危険水位を超える前に予測値が危険水位を超えなかった場合（×）で評価している。回帰モデル、数値モデル、累積雨量モデルのいずれかが、事前に危険水位を超えることを予測しており、撤去工事の安全管理に寄与したことが確認できる。また各モデルの予測結果はお互いに補完しあい予測しているため、本システムへの信頼性を確保しているともいえる。さらに、2015年8月と2016年8月は累積雨量モデルのリードタイムである21時間前に、2017年4月は数値モデルのリードタイムである13時間前に、頭首工水位が危険水位を超えることを予測しており、建設重機の退避や建設資材の養生、移動など建設資機材を守る時間も確保できたため、本システムは人と資産を守るシステムともいえる。

4. 予測精度が低下する要因

(1) 集中豪雨

回帰モデルの予測値に見逃しが発生した原因を2016年8月20日の水位と雨雲を併せて比較、確認したところ線状降水帯に伴う集中豪雨が原因と考えられた（図-9、図-10）。解析雨量を確認すると、河道に沿うように発生した線状降水帯（集中豪雨）が頭首工から北西に向って移動していた。各観測所の水位上昇開始時刻と頭首工水位の水位上昇開始時刻の差は、回帰モデルで設定したリードタイムより短くなっていた（図-9）。回帰モデルのリードタイムは、過去の出水イベントから平均的な値を採用している。そのため、線状降水帯により急激に水位が上昇してリードタイムが短くなり、その結果「見逃し」が発生したと考えられる。なお図-9の観測所水位の上昇開始時刻と頭首工水位の上昇開始時刻の差は、図-11の見逃し継続時間とほぼ一致しており、図-11からも線状降水帯に伴う集中豪雨により水位が急激に上昇し見逃しが発生したと考えられる。このように豪雨では、設定しているリードタイムを用いると予測精度が低下する可能性があるため、降雨パターンに応じた回帰モデルの使い分けが課題である。

(2) 地上と上空の降水量の差異

数値モデルと累積雨量モデルの予測精度の低下要因として、解析雨量が含む誤差が懸念された。解析雨量は上

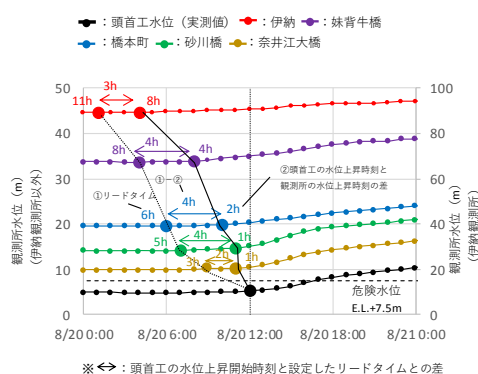


図-9 上流観測所の水位上昇開始時の時刻と設定したリードタイムをさかのぼった時刻との差

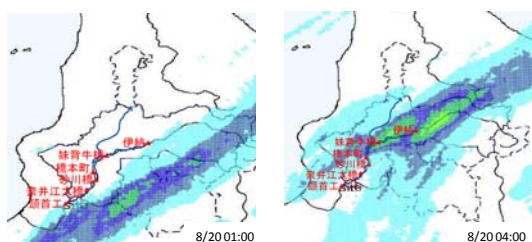


図-10 2016年8月20日に発生した線状降水帯

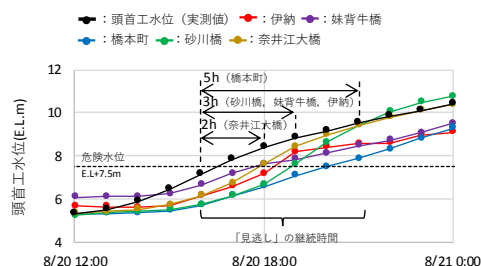


図-11 回帰モデルの予測値と見逃し時間

空3~10kmの雨雲レーダーや気象庁のアメダスで測定した地上の降水量などを同化し作成したデータである。誤差の程度を確認するために、旧石狩川頭首工の集水域内にある18地点のアメダス（図-1の●）について、2014年9月1日から2017年7月31日の降水量の累積値（mm/h）（以下、アメダス累積値とする）と、アメダス直上18地点の解析雨量の累積値（mm/h）（以下、解析雨量累積値とする）を比較したところ、全時間の95.9%でアメダス累積値より解析雨量累積値が大きくなった。またアメダス累積値が大きい4.5%については、すべて1mm/h以下であり、累積降水量が大きいほど差異が大きくなる傾向があった（最大51.8mm/h）（図-12）。頭首工水位と数値モデルの予測値を比較したところ、数値モデルの予測値が頭首工水位を上回った割合は全期間で58%（図-13 (a)），解析雨量累積値とアメダス累積値の差異が2mm/hより大きい場合は61%であった（図-13(b)）。頭首工水位が7.5m以下に着目した場合の割合も同じであったことから、頭首工水位が危険水位以下の場合、予測精

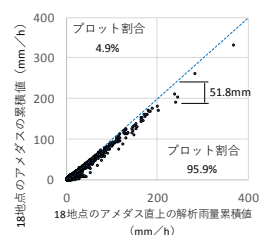


図-12 解析雨量累積値とアメダス累積値の比較

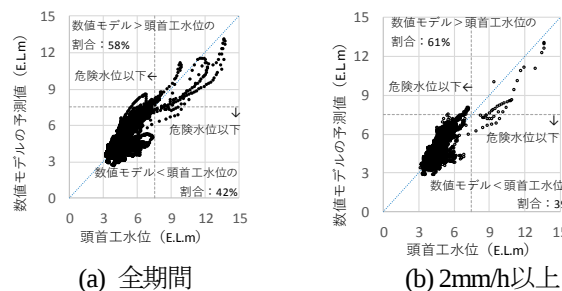


図-13 頭首工水位と数値モデルの予測値との比較

度が過大評価になっていたといえる。

このように解析雨量は地上の雨量との誤差を含むため、数値モデル、累積雨量モデルの予測精度が低下する要因となっていることを確認した。

5. おわりに

河川工事の安全管理を目的として3つのモデル（回帰モデル、数値モデル、累積雨量モデル）により工事地点の水位を予測する「出水警報システム」を開発し、旧石狩川頭首工撤去工事を事例に予測精度の検証を行った。約3年間の工事期間中、施工者が設定した危険水位を超える出水が3回発生したが、いずれかのモデルが危険水位を超える予測をしており、工事の安全管理に寄与した。また、回帰モデルは集中豪雨、数値モデルと累積雨量モデルは入力値の解析雨量が含む誤差により、予測精度が低下することを確認した。

参考文献

- 1) 石野和男, 本田隆英, 伊藤一教, 宮田康一: 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ー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, 河川技術論文集, 第17巻, pp.425-430, 2011.
- 2) 本田隆英, 大野剛, 伊藤一教, 遠山正恭: 出水警報システム「T-iAlertR River」の開発と河川工事への適用: 大成建設技術センター報 第50号(2017).
- 3) 本田隆英, 大野剛, 伊藤一教, 遠山正恭: 石狩川頭首工工事における出水警報システム T-iAlertR River の適用性: 第35回 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2017.

(2018. 4. 3受付)