

低平地河川を対象とした内水・外水を 一体化した氾濫解析手法の提案

沖 岳大¹・中津川 誠²

¹正会員 北電総合設計株式会社 技術研究所 (〒060-0031 札幌市中央区北1条東3丁目1番地1)
E-mail:oki-take@hokuss.co.jp

²正会員 室蘭工業大学大学院 工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)
E-mail: mnakatsu@mmm.muroran-it.ac.jp

近年、日本各地で極端な豪雨が発生し、土砂災害や堤防決壊などの災害が頻発している。本研究では、北海道最大の経済拠点である札幌及びその周辺市町、交通の要衝である新千歳空港を抱える石狩川水系千歳川流域を対象に、①流域を貯留関数法、②河道を一次元不定流、③氾濫原を平面二次元不定流、で氾濫解析モデルを構築し、最大規模の降雨を想定した浸水予測について研究を行った。なお研究に用いた解析モデルは、千歳川が石狩川の背水影響を30km以上にわたり受ける低平地河川であり、支川・運河・排水路まで背水影響が及ぶことを勘案し、内水・外水を一体化した氾濫解析モデルを構築した。解析モデルの検証には、石狩川水系における観測史上最大の洪水である昭和56年洪水と、平成以降の大規模出水である平成13年洪水を再現した。

Key Words : Chitose River, iRIC SRM, back water, landside water, unsteady flow, flood analysis

1. はじめに

近年、気温、降雨等において極端な気象現象が顕著で、平成26年8月の広島豪雨や平成27年9月の鬼怒川では、線状降水帯による局地豪雨で、土砂災害や破堤被害が生じた。また、地球温暖化¹⁾に伴う降雨強度の増大が予測され、極端現象に対する適応策が必要と指摘されている。

このような中、平成27年11月に水防法²⁾が改正され、ハード・ソフト両面の対策を基本として、避難体制等を充実・強化する方向性が示された。改正水防法では、これまでの浸水想定区域図が河川整備の降雨で作成していたのに対して、改正後は最大規模の降雨を想定した外水、内水に係る浸水想定区域を公表する制度が創設された。

本研究が対象とする石狩川水系千歳川流域(図-1)は、平成26年9月に上流の支笏湖周辺に線状降水帯に伴う豪雨が発生し、札幌で約90万人に避難勧告が発令された³⁾。この豪雨により筆者らは、局地豪雨や最大規模の豪雨に対し、実時間の洪水・浸水予測を行い、避難や河川管理施設の操作・運用の備えが急務であると考えた。

上記のような問題に対する先行研究として、吉見・山田ら⁴⁾は、大規模洪水を想定した流出予測を行い、降雨の増加倍率よりも流出量の増加倍率が大きくなる危険性

を指摘した。次に佐伯・鈴木ら⁵⁾は、石狩川の大規模出水の浸水予測を行い、内水氾濫や計画規模以上の氾濫を地域で把握しておく必要性を指摘した。国総研では、下水道管やポンプを考慮した浸水予測モデル⁶⁾(NILIM)を開発し、都市の内水被害を軽減することに役立てた。近年では、関根・浅井⁷⁾が神田川流域を対象に、地上・下水道・河川を一体的に取り扱う精緻な浸水予測を示した。また佐山・建部ら⁸⁾は、降雨-氾濫一体モデル(RRLモデル)を開発し、チャオプラヤ川流域を対象に予測降雨情報を活用した氾濫予測手法を示した。

本研究は、低平地河川を有する大規模流域を対象に支川・運河・排水路の背水影響による越水や、樋門及びポンプ排水操作の施設運用までを考慮した内水・外水を一体化した氾濫解析モデルを構築しており、このようなモデルで既往洪水を検証した事例は少ない点が特徴である。現在、千歳川は6つの遊水地群の整備が進むことから、今後、本モデルを拡張することで、豪雨時における遊水地やポンプ排水等の統合的な管理に有効になると考える。

解析方法については、次の点に留意した。①千歳川は、低平地を流れる緩流河川で、図-2に示すように千歳川中流の約3.0kmの区間に3支川(輪厚・旧夕張・島松川)が合流し高低差が定めづらいエリアがある。そのため、流

出解析は集中型流出モデルとし、札幌開発建設部資料を参考に $10^1\sim 10^3\text{km}^2$ のオーダーに分割した流域面積と流域平均雨量を一段タンク型貯留関数モデルに入力し、本川、支川等の流出量を算出した。②千歳川は、石狩川の背水影響を長時間受け、さらに千歳川支川や支川に合流する運河や排水路まで背水影響を受けるため、支川の越水・破堤を考慮した内水・外水を一体化した氾濫解析モデルを構築した。なお、計算モデルの検証は、石狩川の主要洪水である昭和56年洪水、さらに近年の出水として平成13年洪水で検証した。

2. 研究方法

2.1 研究対象流域

千歳川流域は、上流端に支笏湖を水源とした石狩川の1次支川である。流路延長が108km、流域面積が1,244 km^2 で一級水系に比肩する規模の河川である。千歳川流域は、江別市、千歳市、恵庭市、北広島市長沼町、南幌町の4市2町が存在し、流域人口は36.7万人（平成17年国勢調査）である。主な産業は、水田、畑作、食品製造業などで、新千歳空港の一部も流域内に含まれる。また、千歳川流域は、新千歳空港や苫小牧港から物資輸送の経路である高速道路、国道36、274号線がある。特に、石狩地方と道東地方の東西を連結する国道274号線は、千歳川の近傍を交通し、ひとたび洪水となれば、サプライチェーンが寸断するリスクがある。

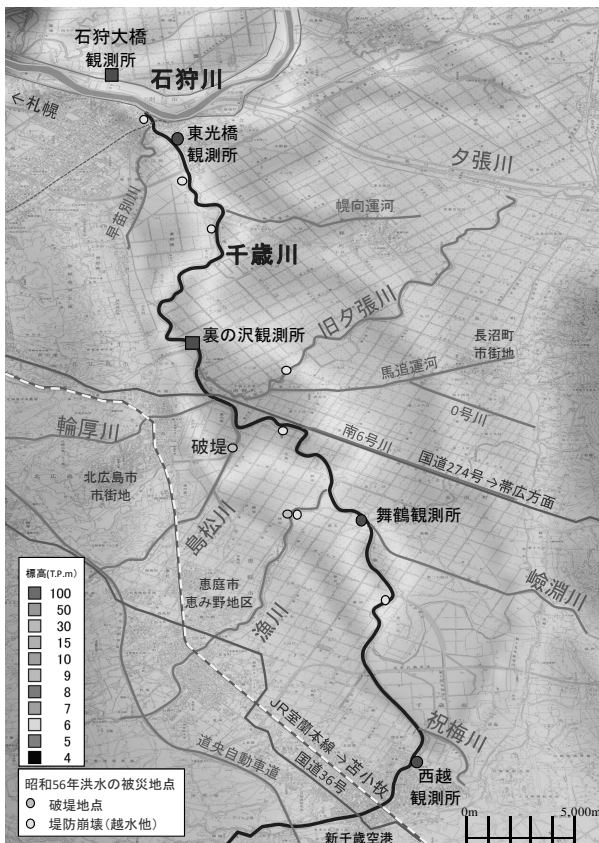


図-2 千歳川の地形図

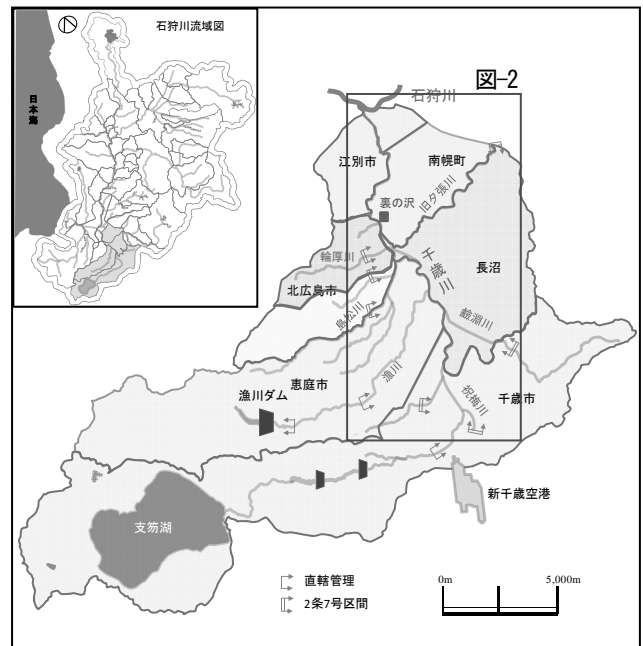


図-1 千歳川流域図

2.2 洪水被害と要因

石狩川流域の流域平均年降水量は、約 1,300mm/年であるが千歳川流域は約 1,500mm/年と比較的多雨地域である。昭和 56 年洪水は、8 月 3 日～6 日にかけて、北海道中央に停滞した前線と台風 12 号の影響で、北海道全域が大雨となり、千歳川流域の流域平均雨量は、330mm/3 日を越え、観測史上最高の記録となった。この洪水で、千歳川の水位が計画高水位を越え、浸水面積が 192 km^2 、浸水家屋が約 2,700 戸の洪水被害となった。また、平成 13 年洪水は 9 月 9 日～13 日にかけて、前線と台風 15 号により、千歳川流域における流域雨量は 180mm/3 日を記録し、平成以降における大規模出水であったが千歳川流域で大規模な浸水被害は生じていない。

2.3 解析モデル

内水・外水を一体化した氾濫計算モデルは、3つの要素モデルで構成される（図-3）。1つ目が流出解析で、千歳川本川および支川流量について一段タンク型貯留関数法により計算した。2つ目が千歳川の河道追跡計算で、一次元不定流計算により行った。支川の河道追跡計算は、6大支川（旧夕張川、輪厚川、島松川、漁川、嶮淵川、祝梅川）とその他の支川、運河、排水路について考慮し、千歳川の背水影響が伝搬するモデルとした。3つ目が氾濫計算で、平面二次元不定流により行った。氾濫解析モデルは、千歳川本川の越水を考慮するとともに、支川、運河、排水路の越水、破堤氾濫を考慮することで低平地河川の内水・外水氾濫を一体で考慮している。なお、モデル内においては、排水機場（ポンプ）や、氾濫原の道路盛り土についても、主要なものについて考慮した。

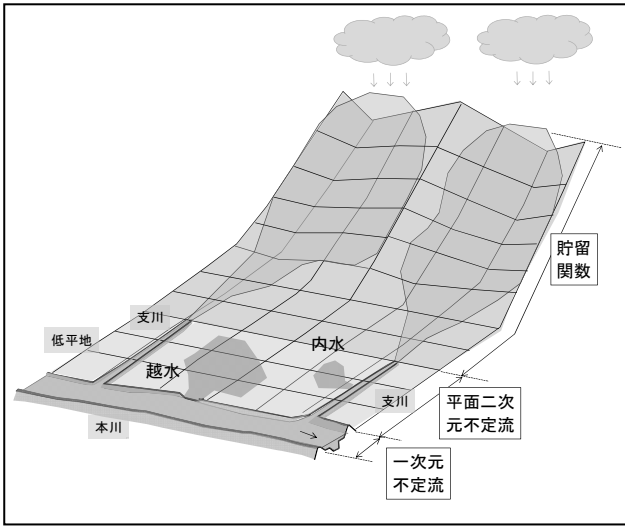


図-3 内水・外水氾濫モデル

(1)流出解析

流出解析は、(1)式に示す損失項を考慮した一段タンク型貯留関数法⁹⁾を用いた(図-4)。本手法は、(財)北海道河川防災センター(現(一財)北海道河川財団)の星⁹⁾により開発されたモデルである。現在は、中津川・臼谷らにより河川の流れ、流砂、河床変動計算などを行うインターフェイス iRIC の中に、SRM (Strage Routing Model)¹⁰⁾と呼ばれるソルバーとして組み込まれ、だれでも使いやすくなっている。ここで、(1)、(2)式で点線で囲んだモデルパラメータ k_{11} , k_{12} , k_{13} , λ は、星らが石狩水系の72洪水を対象に解析し求めた最適パラメータ値⁹⁾である(3)式とした。

$$\begin{cases} S = k_{11}q^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\ \frac{dS}{dt} = r - q - b + q_0 \\ q_0 = q_B \exp(-\lambda t), b = k_{13}q \end{cases} \quad (1)$$

図-4 一段タンク型貯留関数モデル

$$\begin{cases} k_{11} = c_{11} A^{0.24} \\ k_{12} = c_{12} k_{11}^2 (\bar{r})^{-0.2648} \\ k_{13} = c_{13} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} c_{11} = 11.193, c_{12} = 0.144, c_{13} = 1.848 \\ \lambda = 0.025 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 S : 貯留高 (mm), t : 時間(h), r : 観測雨量 (mm/h), q : 計算流出高(mm/h), b : 損失高 (mm/h), q_0 : 基底流出高 (mm/h), q_B : 初期流出高 (mm/h), λ : 減衰係数, A : 流域面積(km²), \bar{r} : 平均雨量強度(mm/h), k_{11} , k_{12} : 貯留係数, k_{13} : 損失係数, p_1, p_2 : 貯留指数($p_1=0.6, p_2=0.4648$), c_{11}, c_{12}, c_{13} : モデルパラメータを示す。

(2)河道追跡計算

千歳川における河道追跡計算は、(4)式に示す一次元不定流¹¹⁾により実施する。計算は、水深方向に20分割した断面特性(水深 h , 断面積 A , 水面幅 B , 径深 R)を与えて計算する。支川は、水路モデルと呼ぶが、千歳川と同様に一次元不定流計算とし、断面特性は矩形断面に置換えている(図-5)。置換え方法は、最深河床高から堤防高以下の河積を求め、河積から矩形断面の川幅を算出した。千歳川本川の上流端流量は、西越地点(KP40.6)とし、支川等の流量は、各支川ごとに流出計算結果を与えている。河道及び氾濫解析の計算条件を表-1に、河道のモデル系統図を図-6に示した。

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{g} + h \cos \theta \right) = I_o - I_f \\ I_o = \sin \theta, I_f = n^2 u^2 / R^{4/3} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 A : 河川断面積(m²), Q : 流量(m³/s), q : 単位幅当たりの横流入量(m²/s), t : 時間(sec), g : 重力加速度(m/s²), x : 流下方向距離(m), u : 流速(m/s), h : 水深(m), $I_o = \sin \theta$: 水路勾配, θ : 水路傾斜角, I_f : 摩擦勾配, n : マニング粗度係数, R : 径深(m)を示す。

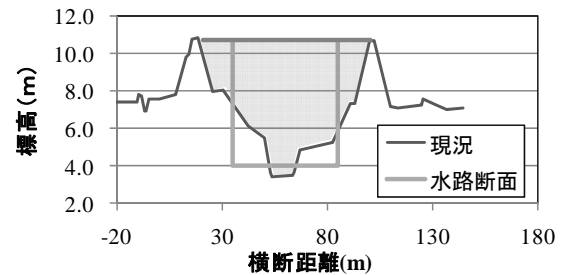


図-5 支川断面の置換え

表-1 計算条件

計算領域	計算条件	H13洪水	S56洪水	内容	
河道計算	千歳川	計算手法	一次元不定流(越水無し)	一次元不定流(越水有り)	
		河道断面	平成12年	昭和55年	一般河川断面
		下流端水位	Hp=6.28m	Hp=9.23m	千歳川の起算水位は、石狩大橋観測水位を河床勾配を用いて補正し算出した
	上流端流量	Qp=106m ³ /s	Qp=94m ³ /s	西越(KP40.6)	
	粗度係数	n=0.025~0.035	n=0.025~0.035	計画粗度(河川整備計画)	
	支川	計算手法	一次元不定流(越水無し)	一次元不定流(越水有り)	
河道断面	旧夕張川: H12年輪厚川: H12年島松川: H12年漁川: H12年嶮淵川: H12年祝梅川: H12年運河, 排水路: 5mメッシュ地形	旧夕張川: S53年輪厚川: H12年島松川: S55年漁川: S55年嶮淵川: H12年祝梅川: H12年	排水路: 5mメッシュ地形	矩形断面へ置換え	
氾濫原	計算手法	氾濫が小規模のため計算しない	二次元不定流(内水外水一体)	x方向: 80メッシュ y方向: 170メッシュ 合計: 13,600メッシュ	
	地盤高		250m(国土数値情報3次メッシュ)	横断面, 5mメッシュで一部補正	
	粗度係数		n=0.025	水田・畑に相当	
	破堤・越水		図-2に図示	写真, 資料より	

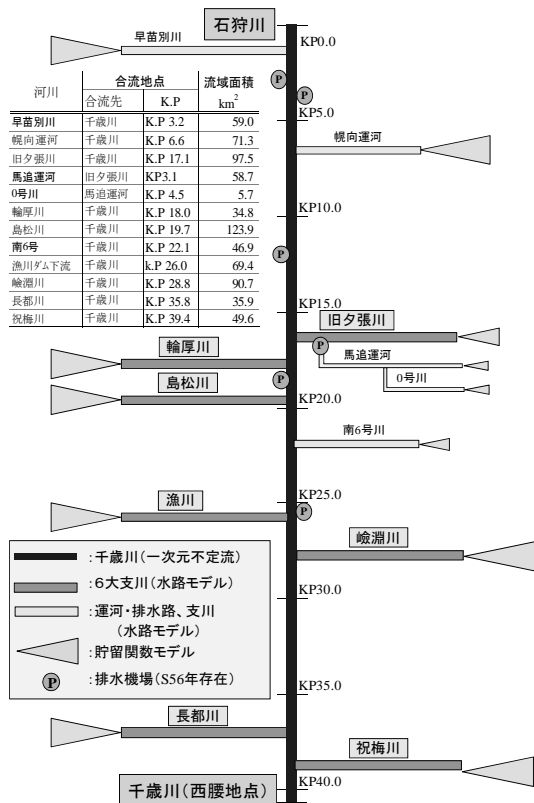


図-6 千歳川モデル系統図

(3) 氾濫解析

氾濫解析は、(5)式に示す平面二次元不定流¹¹⁾により計算する。地形データは、国土数値情報3次メッシュ(250m)を適用したが、堤防沿いの地盤高は、メッシュ標高が実際よりも高い場合に氾濫量を過少評価するため、横断測量データや5mメッシュの基盤地図情報で補正した。河道と氾濫原との接続は、概ね200mごとに計算される千歳川の不定流計算水位が堤防高を越えた場合に、本間の越流公式により越水量を計算し氾濫原に与える。破堤敷き高は、堤内地盤高か高水敷高の高い方とし、越水・破堤幅は、既存資料¹²⁾や写真¹³⁾を参考にした。

ここで、昭和56年洪水は、千歳川本川は破堤の報告は無く一部の越水と、支川の越水・破堤¹²⁾であるため、計算の再現確認は河道水位と浸水区域で行った。平成13年洪水は、千歳川流域で大きな浸水被害は生じていないため、計算の再現確認は河道水位で行った。

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 H : 水位(m), h : 水深(m), M : x 方向フラックス (m^2/s), N : y 方向フラックス(m^2/s), u : x 方向流速 (m/s), v : y 方向流速 (m/s), ρ : 水の密度 (kg/m^3), τ_{bx} , τ_{by} : xy 方向のせん断力 (N/m^2), g : 重力加速度(m/s^2) を示す。

表-2 氾濫解析モデルで考慮した排水機場

排水機場	竣工年 (年)	位置		排水最大 能力 (m^3/s)	運転開始 水位 (m)	運転停止 水位 (m)
		排水先	km			
上江別	1971	千歳川	左岸2.6km	16.0	6.36	5.86
江別太	1971	千歳川	右岸3.6km	4.26	6.15	5.30
登瀛湖	1972	千歳川	左岸12.3km	16.0	6.70	5.60
中の沢	1965	千歳川	左岸18.0km	4.33	4.15	4.15
南9号	1968	千歳川	右岸25.4km	13.0	4.80	4.30
馬追運河	1968	旧夕張川	左岸3.2km	40.0	4.30	3.80

表-3 水路モデルで考慮した支川

河川	合流点	モデル区間 km	水路幅	
			下流 (m)	上流 (m)
6 大 支 川	旧夕張川	右岸	12.0km	65m ~ 35m
	輪厚川	左岸	2.0km	27m ~ 15m
	島松川	左岸	5.0km	48m ~ 13m
	漁川	左岸	5.0km	56m ~ 44m
	嶮淵川	右岸	7.0km	36m ~ 25m
	祝梅川	右岸	3.0km	34 ~ 20
支 川 ・ 運 河	早苗別川	左岸	6.5km	20 ~ 10
	横向運河	右岸	6.0km	20 ~ 7
	馬追運河	旧夕張・左岸	8.0km	30 ~ 4.5
	南6号川	右岸	8.0km	12 ~ 5.5
	0号川	馬追・左岸	5.0km	6.5 ~ 5.5
長都川	左岸	2.0km	24.0 ~ 14.0	

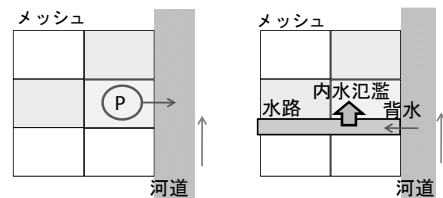


図-7 排水機場及び水路モデル

氾濫計算で考慮した排水機場を表-2、背水影響を受け水路モデルとした支川・運河・排水路を表-3に示す。排水機場は、昭和56年洪水時に存在したと考えられる箇所を考慮した。河道と排水機場(ポンプ)の接続、支川の内水氾濫の概念図は図-7に示す。ポンプ排水の計算は、メッシュの浸水位に応じて運転開始・停止し、運転中は最大排水能力で稼働することにした。支川の内水氾濫は、支川水位より本川水位が高ければ背水影響を受け、背水位が水路の堤防高を越えれば越水するモデルにした。

3. 結果と考察

3.1 河道の再現計算結果

千歳川の最高水位縦断面図を図-8, 9に示す。千歳川にある3箇所の水位観測所(東光橋, 裏の沢, 舞鶴)でみた再現性は良好である。観測値と計算値の誤差は、概ね1~15cm以内であった。計算では、千歳川に架る橋梁ピアの断面積を障害面積として考慮し再現性が向上した。

時系列水位の計算結果を図-10, 11に示す。3箇所の水位観測所で、概ね再現できているが、裏の沢, 舞鶴の洪水低減期において再現性がやや低下している。これは、入手可能であった雨量データが、洪水ピーク後5時間までであり、それ以降の降雨をゼロで流出解析したため、洪水低減期に差が生じたと考える。

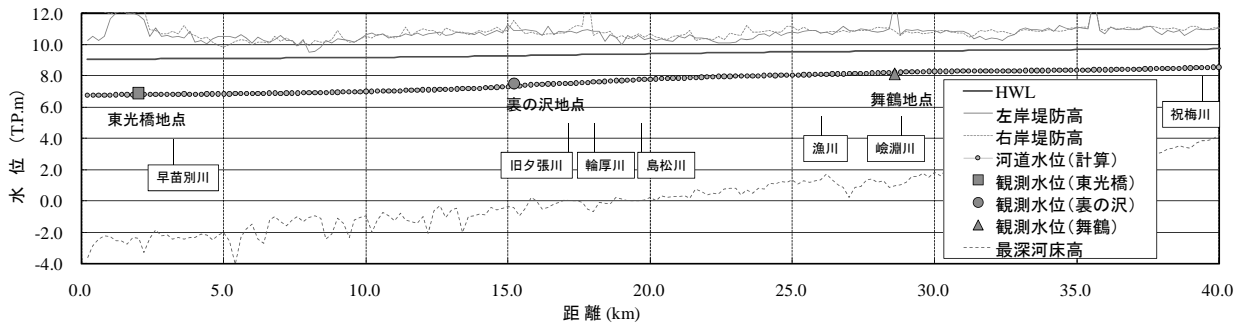


図-8 平成13年洪水 水位縦断面図 (最高水位)

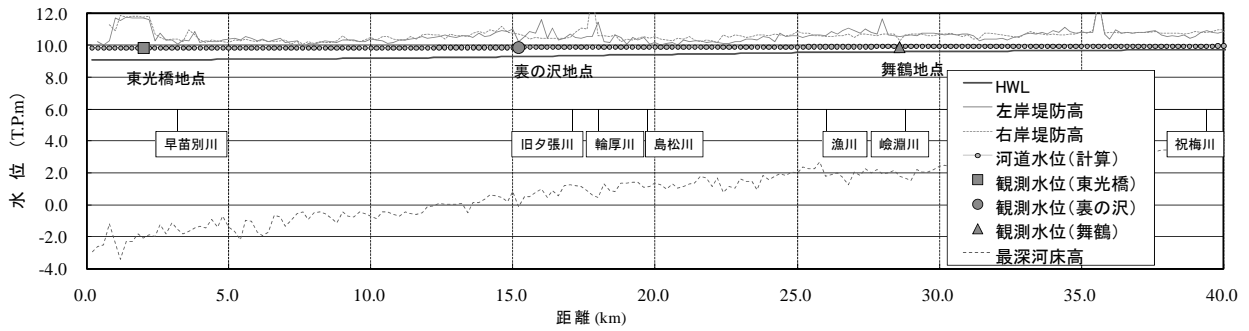


図-9 昭和56年洪水 水位縦断面図 (最高水位)

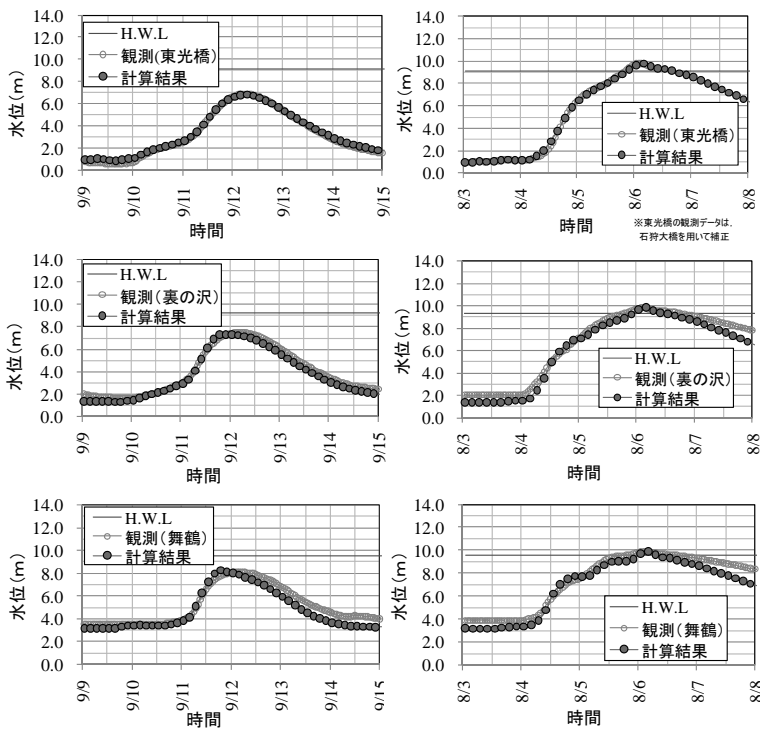


図-10 平成13年洪水時系列水位

図-11 昭和56年洪水時系列水位

3.2 氾濫原の再現計算結果

昭和56年洪水の再現計算結果を図-12に示す。計算結果から求めた浸水面積は209km²で、実績の浸水面積192km²を概ね再現できている。氾濫原の浸水深やその時系列の痕跡水位データは入手ができなかったが、記録写真¹³⁾から推定すると概ね良好な結果であった。

以上より、本研究の内水・外水一体の氾濫解析は、低

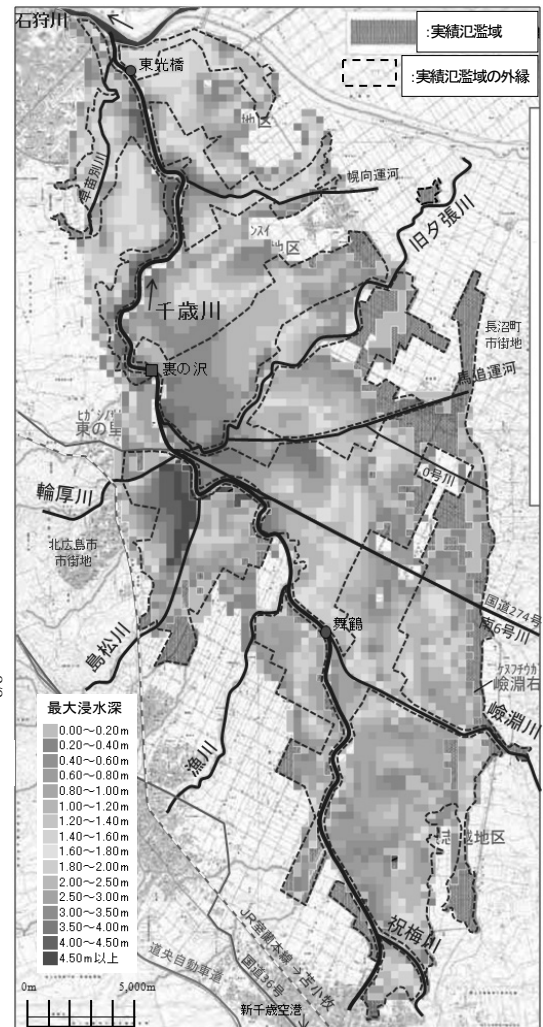


図-12 昭和56年洪水 再現計算結果 (最大浸水深)

平地河川の洪水・氾濫の様子を精度よく再現したと考える。また本解析では、CPUが3.4GHzの市販のPCにより、6日間の氾濫計算を約40分で終える。これは、モデルを過度に複雑化せず構築したためであり、実時間の洪水・浸水予測や現場実務に有利と考える。今後は地球温暖化や局地豪雨を想定し、ダム、遊水地等の操作を含めた総合的な操作の提案や、避難・水防の支援に発展させ、防災・減災に役立てたいと考える。

謝辞：本論文を作成するにあたって、対象流域の水文資料や河川横断データ等を提供して頂いた北海道開発局札幌開発建設部 河川管理課様、株式会社ドーコン 河川部 浅野様にこの場を借りて謝意を表したい。

参考文献

- 1) IPCC,2013:Summary for Policymakers.In Climate Change 2013:The Physical Science Basis.
- 2) 国土交通省：水防法等の一部を改正する法律，
<http://www.mlit.go.jp/river/suibou/suibouhou.html>
- 3) 北海道開発局 札幌開発建設部：「9.11 支笏豪雨災害」
- 支笏湖周辺の国道の被災・復旧の記録 -
<http://www.sp.hkd.mlit.go.jp/douro/shikotsusaigai.html>
- 4) 吉見和紘，山田正，土屋信行：利根川上流域における降雨パターンの違いが流出現象に与える影響に関する研究，
土木学会論文集 G (環境)，Vol.68, No.5, I_255-I_260, 2012.
- 5) 佐伯勇輔，鈴木英一，山口市美：石狩川流域の洪水被害特性，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.69, No.4, I_1615-I_1620, 2013.
- 6) 中村徹立，佐々木淑充，木草浩一：都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン (案) - 都市浸水 -，国土技術政策総合研究所資料，No.202, 2004.
- 7) 関根正人，浅井晃一：「神田川流域を対象とした豪雨による浸水・氾濫に関する数値予測」，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71, No.4, I_1429-I_1434, 2015.
- 8) 佐山敬洋，建部祐哉，藤岡奨，牛山朋来，萬矢敦啓，田中茂信：2011 年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.69, No.4, pp.14-29, 2013.
- 9) (財)北海道河川防災センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書，2004.
- 10) iRIC Project : <http://i-ric.org/ja/>
- 11) 栗城稔，末次忠司，海野仁，田中義人，小林裕明：氾濫シミュレーションマニュアル (案)，一シミュレーションの手引き及び新モデルの検証一，土木研究所資料，第3400号，1996.
- 12) 北海道開発局：千歳川放水路計画に関する技術報告，1994.7.
- 13) 石狩川振興財団：石狩川流域発展の礎2002.

(2016. 4. 7 受付)

A STUDY ON FLOOD ANALYSIS METHOD IN WHICH LANDSIDE AND FORELAND WATERS ARE INTEGRATED FOR RIVERS IN LOW-LYING AREAS

Takehiro OKI and Makoto NAKATSUGAWA

In recent years, extreme rainfalls have occurred and disasters that involve landslides and levee failures have frequently occurred in Japan. A flood analysis model was constructed for the Chitose River basin of the Ishikari River System, a basin that includes Sapporo, the largest economic base of Hokkaido; municipalities surrounding Sapporo; and New Chitose Airport. The model used 1) the storage function method for the basin, 2) one-dimensional unsteady flow for the river channel, and 3) planar two-dimensional unsteady flow for the flood plain. Examination was done for flood forecasting that assumes rainfall of the largest scale. A flood analysis model was constructed that integrated the landside and foreland waters, based on the consideration that the Chitose River flows through a low-lying area and is affected by back-flow from the Ishikari River for a distance of more than 30km and based on the consideration that the Chitose receives the influence of the Ishikari's back water in the branches, canals, and drainage canals. For verification of the analysis model, the 1981 flood, which was the largest observed flood in the Ishikari River System, and the 2001 flood, which is the large-scale flood in recent years were reproduced.