千歳川流域における降雨と背水影響の不確実性を考慮した

洪水リスクの推定

Research on flood risk considering uncertainties of rainfall and backwater effect in Chitose River basin

室蘭工業大学	○学生員	関洵哉(Junya Seki)
室蘭工業大学	正 員	中津川誠(Makoto Nakatsugawa)
室蘭工業大学	正 員	Nguyen Thanh Thu
北電総合設計(株)	正 員	沖岳大(Takehiro Oki)

1. はじめに

近年,日本各地で豪雨が多発しており,堤防の決壊や 越水による被害が毎年のように発生している.2018年7 月には台風7号と梅雨前線の影響により,岡山,広島, 愛媛などで断続的な激しい雨が降り,堤防の決壊や氾濫 など甚大な被害が発生した.この洪水では岡山県高梁川 と小田川の合流点などで本川水位が上昇し支川に水が逆 流する背水現象による氾濫が発生した¹⁾.また,2019年 10月には非常に強い勢力を持った台風19号が東日本に 上陸し,関東甲信,東北地方の広い範囲にわたる複数の 河川で氾濫・堤防の決壊などの被害が発生した²⁾.近年, 気候変動による豪雨の発生が懸念されているが,すでに その影響が出始めているような事例が相次いでいる.

本研究では、降雨というハザードの増大とともに低平 地で本川・石狩川の背水影響を受けやすいという脆弱性 を有する千歳川流域を対象に洪水リスクの推定を行う. まずは、平成以降の主要洪水である2001年9月洪水と、 北海道で初の大雨特別警報が発令された2014年9月洪 水の2事例について流出計算を実施し、流出モデルの再 現性を検証した.次に、低平地河川における洪水リスク を推定するため、地球温暖化対策に資するアンサンブル 気候予測データベース (d4PDF, database for Policy Decision making for Future climate change)の現在気候予 測結果の降雨量から流出計算・氾濫計算を実施した.こ



図-1 千歳川の地形図

のように、本研究は、最新の大量アンサンブルデータを 用いて不確実性を考慮した洪水リスクの推定を試みたも のである.

2. 研究方法

2.1 対象流域の概要

千歳川は、支笏湖を水源とした石狩川の1次支川であ り、流域内には江別市、千歳市、恵庭市、北広島市、長 沼町、南幌町の4市2町が存在する.千歳川流域は主要 部分が低平地を流れる上、石狩川の背水影響を30km以 上の長距離にわたって受ける河川であり、さらにその支 川も背水影響を受けるため、内水・外水ともに氾濫リス クが高いという特徴がある.また、千歳川流域には新千 歳空港や苫小牧港からの物資の輸送路である高速道路, 国道36号線、国道274号線があり、洪水が発生すると これらが寸断されるリスクが高い(図-1).以上より、 本研究では内水・外水を一体化した氾濫計算を行う上で 千歳川流域を対象とした.内水・外水を一体化した氾濫 計算モデルの模式図を図-2に示す.

2.2 解析方法

洪水リスク推定は、はじめに流出計算モデル(IFAS) の再現性を検証し、その後 d4PDF の現在気候に潜在す る洪水リスクを推定した。その推定は、図-2 に示すよ うに 1) d4PDF のダウンスケーリング(以降 DS) デー タによる現在気候予測結果の降雨量の設定、2)流出計 算による千歳川および支川群の流出量算出、3)氾濫計 算の手順で行う。具体的な解析方法を以下に整理した。

(1) d4PDF・DS データ

d4PDFとは、全世界および日本周辺でそれぞれ 60 km, 20 km メッシュの高解像度大気モデルを使用した高精度 モデル実験出力のことである.実験は全球実験と日本周



図-2 内水・外水を一体化した氾濫計算の模式図

辺の領域実験に大別され,過去の気候状態と,将来において全球平均気温が4℃上昇した気候状態でモデル実験が行われた.本研究では d4PDF から千歳川流域及び 石狩川流域で予測される降雨量を抽出するため,山田ら ³⁾が領域実験データの北海道周辺を,力学的手法で5 kmメッシュに DS したものを使用する.DS したデータ は過去3,000 年分(過去60 年×50 メンバー,以降現在 気候と称する)と4℃上昇時の5,400 年分(将来60 年 ×90 メンバー,以降将来気候と称する)が存在する. 本研究は現在気候に潜在するリスクを把握することを主 眼に,現在気候予測結果を適用した.また,降雨継続時 間は,既往最大洪水等を参考に72 時間とした.

(2) 流出計算(IFAS)

IFAS は国立研究開発法人土木研究所 ICHARM で開発 された総合洪水解析システム(Integrated Flood Analysis System)の略称であり、数値標高モデル、土地利用情報, 地点雨量を駆使することで観測データの不十分な河川や 小支川でも流出計算ができる. IFAS での流出計算の模 式図を図-3 に示す⁴⁾. なお、IFAS では初期値として標 準パラメータが与えられているが、必ずしも最適値では ない.よって流出計算の精度を上げるため試行錯誤的に 調整して最適なパラメータを設定した.最終的に設定し た最適パラメータを表-1 に示す.

パラメータの検証は、千歳川本川は石狩川の背水影響 を受けるため、千歳川の主要支川でかつ自流区間にある 島松川の下島松流量観測所と漁川の日の出橋流量観測所 における流量の再現性の確認による.また、本研究では 石狩大橋流量観測所の流量から水位を換算する必要があ るため、石狩川流域での流出計算も IFAS で別途行った. 石狩大橋での計算では 1981 年洪水と 2016 年洪水時の降 水を石狩川流域に与え、パラメータの最適値を求めた.

流出計算の定量評価の方法としては(1)式に示す Nash-Sutcliffe 係数とピーク流量相対誤差を使用した.



ここで、*Q_M*:観測流量(m³/s),*Q*_C:計算流量(m³/s), *Q_{AVG}*:観測流量の平均値(m³/s),*Q_{MP}*:観測流量の最大



L: メッシュの長さ, N:地表面の祖度係数(m⁻¹₃(s), $h: 木位(m), S_{2}: 表層の最大貯留高(m), <math>a_{n}:$ 早い中間流の流出量を規定する定数(-). $S_{0}:$ 地下浸透が発生する高さ(m), $S_{1}:$ 早い流出 が発生する高さ(m), $f_{2}:$ 最終浸透能(SKF)(cm/s), $A: メッシュの面積, S_{2}:$ 不圧地下水が流出 する貯留高(m), $A_{n}:$ 不圧地下水の流出係数(1/mm/day)², $A_{n}:$ 被圧地下水の流出係数



表-1 各パラメータの標準値と最適値

No. 土地 利用	N	SKF			SNF			AUD		
	利用	No.	標準	最適化	INO.	標準	最適化	NO.	標準	最適化
1	山林	1	0.0005	0.001	1	0.70	0.70	1	0.10	0.05
2	草地	2	0.00002	0.000001	2	2.00	0.30	2	0.10	0.05
3	水田	3	0.00001	0.0005	3	2.00	2.00	3	0.10	0.05
4	市街地	4	0.000001	0.00001	4	0.10	0.10	4	0.10	0.05
5	水面	5	0.00001	0.00001	5	2.00	2.00	5	0.10	0.05

値(m³/s), *Qcp*:計算流量の最大値(m³/s)とし,計算 結果が *NS*>0.70 かつ*Ep*|<30%の場合再現性があるとした.

(3) 平面二次元氾濫計算

氾濫計算は、河道を一次元不定流計算、氾濫原は平面 二次元不定流計算により行った.ここで,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. さらに、氾濫計算モデルは千歳川本川の越水を考慮 するとともに、支川、運河の越水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 5). 氾濫計算モデル内においては、現在千歳川で整備中の 6 つの遊水地群, 樋門, 排水機場, 氾濫原にある高速道路 の盛り土等は主要なものを考慮した. 氾濫計算における 設定条件を表-2 に整理する. なお,境界条件である千 歳川の下流端水位は、石狩大橋での流量を H-O 式によ り水位に換算した後、合流点までの距離と河床勾配から 水位差を出しそれを加えて算出した. H-Q 式は, 今回入 手可能であったデータの内、最大流量・最大水位を記録 した 2001 年における石狩大橋観測所での流量・水位を もとに係数を設定した. H-Q 式を(2) 式に示す.

$$Q = a(H+b)^2 \tag{2}$$

ここで, Q:流量(m³/s), H:水位(m), a;112.66, b:1.65 で ある. また,石狩大橋と千歳川合流点の水位差は,距離 が約 1,400 m,河床勾配が約 1/5,000 であることから 0.3 mと見込んだ.よって,上記 H-Q 式の H に 0.3 を足した ものを千歳川下流端水位(起算水位)とする.

3. 結果と考察

3.1 d4PDF・DS データによる降水量と石狩川水位

d4PDF・DS データによる現在気候での石狩川流域平 均降水量と石狩大橋での流量,千歳川流域平均降水量の

	表-2	氾濫計算の設定条件			
	計算条件	ケース1 治水施設無し	ケース2 治水施設有り		
	河道断面	平成17年(2005年)	同左		
	粗度係数	0.025	同左		
河道	下流端最大水位	PC1957:11.3m PC2006:9.3m	同左		
計昇	考慮した支川	早苗別川、幌向運河、旧 夕張川、輪厚川、馬追運 河、島松川、漁川、嶮淵 川、長都川、祝梅川	同左		
	メッシュサイズ	250m	同左		
氾濫 計算	排水機場	無し	有り(概ね10m ³ /s以上の 排水能力を持つもの)		
	遊水地	無し	有り(江別太、晩翠、 東の里、北島、舞鶴、		

表-3 d4PDF による現在気候での降水量・流量予測 (左:石狩川、右:千歳川)

No.	年	流域平均雨量 (mm/72h)	最大流量 (m ³ /s)	No.	年	流域平均雨量 (mm/72h)
1	HPB_m043_2006	372	12,789	1	HPB_m043_2006	619
2	HPB_m004_1957	346	17,982	2	HPB_m004_1957	525
3	HPB_m063_1968	314	12,268	3	HPB_m007_1970	400
4	HPB_m010_1976	301	16,654	4	HPB_m063_1968	380
5	HPB_m089_2002	251	10,350	5	HPB_m046_1988	355
6	HPB_m065_2007	244	10,665	6	HPB_m043_1951	335
7	HPB_m045_1957	237	7,670	7	HPB_m089_2002	332
8	HPB_m086_1988	236	9,566	8	HPB_m004_2000	330
9	HPB_m004_2000	234	9,325	9	HPB_m066_1964	310
10	HPB_m007_1970	232	10,552	10	HPB_m002_1984	302

計算結果上位10位を表-3に示す.表-3より,現在気 候における石狩川,千歳川流域での平均降水量はともに HPB m004 1957 (以降 PC1957), HPB m043 2006 (以 降 PC2006) が2位,1位となっている.なお,データ名 の年号はシミュレーションのためのものであり実際の年 とは異なるため、Present Climate の PC を付して区別す る. 千歳川での治水計画において昭和 56 年 8 月上旬洪 水で観測された 339 mm/72 h の雨量を安全に流すことを 目標としていること考慮すると、 PC1957 で約 1.5 倍の 525 mm/72 h, PC2006 で約 1.8 倍の 619 mm /72 h の降水 が発生する予測となっている.また,石狩大橋での最大 流量も PC1957 に1位, PC2006 に3位となることが示さ れており、石狩川からの背水影響も大きいと考えられる.

以上より本研究では PC1957 および PC2006 での流出 氾濫計算を行うこととした. PC1957 および PC2006 にお ける合流点水位と千歳川流域平均降水量を図-4 に示す. 図-4より、PC1957では降雨と水位のピークがずれてい るが、水位が高いため背水の影響を強く受けると考えら れる. 対して PC2006 では降雨と水位のピークがかなり 近く、降雨、背水の両方の影響が大きいと考えられる.

3.2 IFAS での再現性の検証結果

12

IFAS による流出計算結果を図-5 に示す. 下島松観測 所では 2001 年, 2014 年ともに良好な再現結果が得られ

雨量(mm/h) 水位(m) 水位(m) 雨量(mm/h) 20 12 20 10 40 40 60 60 80 80 100 100 8/19 8/20 8/21 8/22 8/10 8/11 8/12 8/13 8/14 8/15 🛑 水位 雨量 図-4 PC1957(左)とPC2006(右)での合流点水位と 千歳川流域平均雨量 100 0 100 90 90 10 80 80 70 70 20 60 60 30 (l/m 流量(m^{3/s}) 2001年 下島松観測所 (s) 60 E 50 50 NS=0.79 40 画 40 熊 30 40 僻 $|E_p|=0.03$ 30 20 20 50 10 10 60 9/10 9/12 9/13 9/14 9/15 9/10 9/11 9/12 9/9 9/11 9/16 9/17 9/9 ■ 地点雨量 計算流量 — 実測流量 ■ 地点雨量 計算流量 — 実測流量 400 0 400 350 350 10 300 300 20 (€) (€) (100) (10 250 (^{Sy}c²⁵⁰ 200 画 150 20 30 m 2001年 日の出橋観測所 NS=0.73 <u>ب</u> آي ا 40 瞬 $|E_p|=0.14$ 売 100 100 50 50 50 0 60 9/9 9/10 9/11 9/12 9/13 9/14 9/15 9/16 9/17 9/9 9/10 9/11 9/12 ■ 地点雨量 計算流量 — 実測流量 ■ 地点雨量 义 IFAS での流出計算結果 -5 14 12 東光橋 12 裏の沢 12 舞鶴 10 10 10 8 8 8 米位(m) 米位(m) 大口 6 6 6 Δ 4 2 1/9/9 2001/9/10 2001/9/11 2001/9/12 2001/9/13 2001/9/14 2001/9/15 1/9/10 2001/9/11 2001/9/12 2001/9/13 200 ●計算水位 ● 実測水位 - HWL ● 計算水位 ● 実測水位 - HWI

図-6 2001年の千歳川本川における水位計算結果(東光橋, 裏の沢, 舞鶴)

た. 日の出橋観測所では 2001 年では再現性が良好であ るが、2014年は減水期での再現性がよくない.これは、 2014 年洪水時の漁川ダムにおける異常洪水時防災操作 を計算に反映していないためと考えられる.

3.3 河道の再現計算結果

2001 年洪水時の千歳川の時系列水位の計算結果を図 -6 に示す. 千歳川本川の3箇所(東光, 裏の沢, 舞鶴) で比較すると、全体的な波形やピーク水位の再現性は概 ね良好である. なお、舞鶴では再現性がやや低下してい るが、流量観測所のない支川で実測流量と計算流量の差 異が発生したためと考えられる.

3.4 d4PDFから推定される浸水範囲と治水施設の効果

(1) 現在気候に潜在する洪水リスクの推定

PC1957とPC2006のケース1での氾濫解析結果を図-7に、1981年、2001年、2014年、PC1957、PC2006での 下流端ピーク水位と千歳川流域平均雨量を表-4 に示す. 1981 年 8 月上旬洪水で公表された総浸水面積が 192 km² であるのに対し PC1957 の最大浸水面積が 212 km², PC2006の最大浸水面積が210km²と、いずれのパターン においても 20 km² 程度浸水面積が拡大していることが わかる.これは 1981 年の実測流域平均降水量に対し PC1957 において約 1.5 倍, PC2006 において約 1.8 倍の 流域平均降水量となっているため、本川や支川の流量が 増加したことに起因すると考えられる. また, PC1957, PC2006 のケース1 での氾濫計算結果を比較すると、千 歳川流域平均降水量が最大である PC2006 よりも 2 位の PC1957 のほうが、わずかではあるが浸水面積が広いこ とが確認できる.これは石狩大橋における流量が PC1957 のほうが大きく, また下流端水位も約2m高い ため背水の影響が大きかったためであると考えられる. 以上より、千歳川流域における氾濫計算を行う上では千

2014年 下島松観測所

NS=0.91

 $|E_p|=0.12$

2014年

NS=0.71

 $|E_{p}|=0.12$

9/13 9/14 9/15 9/16 9/17

- 計算流量

9/13 9/14 9/15

10

20

30 m

40篇

50

60

0

10

20

30

40 電電

50

(h/mu

9/16 9/17

日の出橋観測所

— 実測流量

計算水位 要測水位 — HWL



図-7 千歳川流域における氾濫解析結果

表-4 各年の下流端ピーク水位と流域平均雨量

年	下流端ピーク水位(m)	千歳川流域平均雨量(mm/72h)
1981	9.83	339
2001	6.58	185
2014	1.19	156
PC1957	11.28	525
PC2006	9 30	619

歳川流域の降雨パターンと石狩川からの背水影響の両者 を十分に勘案する必要があるといえる.

(2) 治水施設群の効果

治水施設に関しては、現在千歳川流域で整備が進めら れている6つの遊水地(江別太,晩翠,東の里,北島, 舞鶴,根志越)と,概ね10m³/s以上の排水能力を有す る排水機場を考慮し氾濫計算モデルに与えた⁶⁰.計算 結果を図-7に示す、ケース1と比較すると,PC1957で はおよそ70km²,PC2006ではおよそ80km²浸水面積が 縮小しているほか、広い範囲において最大浸水深が浅く なっていることがわかる.これは、本川・支川から氾濫 していた水が遊水地内に貯留されたことと、排水機場に より支川水位が下げられ内水氾濫が抑制されたことが要 因と考えられる.

本研究では現在気候においても以上のような洪水リス クが千歳川流域に潜在していることがわかった.将来で の気候変動を考慮すると、降水量の増加によりそのリス クはさらに増大することが予測される.従って今後の治 水計画には治水施設の整備・運用に加え、上記のような 氾濫計算結果を基にハード、ソフト両面を組み合わせた 総合的な対策を考えていく必要がある.

4. 結論

本研究で得られた結果を下記に記す.

- d4PDF による現在気候の降水量データを使用することにより現状の千歳川流域における洪水リスクを推定することができた.
- 2)内水・外水一体の氾濫計算を行うことで、背水の影響や内水氾濫による被害と治水施設の効果を可視化して比較することができた。
- 3) 現在においても、千歳川流域の降雨と石狩川の背水

影響の不確実性の中に大規模な氾濫が発生する可能 性が潜在していることがわかった.

今後 d4PDF の将来気候で千歳川の氾濫計算を行う場 合の課題として,千歳川流域の降雨分布や石狩川からの 背水などを多角的に考慮し,洪水の発生に大きく影響す る要因を見出すことが挙げられる.

5. 謝辞

本研究の遂行にあたり,文部科学省(MEXT)の事 業である気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)及び国土交通省河川砂防技術研究開発公募(地 域課題分野(河川生態))の助成を受けた.また,北海 道大学の山田朋人氏,星野剛氏ならびに北海道開発局札 幌開発建設部には,データ提供などで多大なご協力をい ただいた.ここに記して謝意を表する.

6. 参考文献

- 土木学会 社会支援部門:2018年7月 西日本豪雨 災害調査報告書の掲載について
 http://committees.jsce.or.jp/report/node/194
 (アクセス日:2019/11/30)
- 国土交通省 災害・防災情報 令和元年台風第 19 号 による被害状況等について
 https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_191012.html
 - (アクセス日:2019/12/01)
- 山田朋人ら、北海道における気候変動に伴う洪水 外力の変化、土木学会河川技術論文集、第24巻、 391-396,2018
- 4) ICHARM Public Works Research Institute, Japan, IFAS ver.2.0 technical manual, pp.247
- 沖岳大ら、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、土木学会論文集 G(環境), Vol.72, No.5, I_271-I_276, 2016
- 沖岳大ら,超過洪水による氾濫被害を軽減するための治水施設の総合的な効果分析手法の研究,土 木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I_367-I_372, 2017