

気候変動を考慮した 将来気候下における川幅の推定

ESTIMATION OF CHANNEL WIDTH OF A RIVER UNDER CLIMATE CHANGE

舩屋繁和¹・井上卓也²・岩崎理樹³・清水康行⁴

Shigekazu MASUYA, Takuya INOUE, Toshiki IWASAKI and Yasuyuki SHIMIZU

¹正会員 (株) ドーコン 水工事業本部 河川部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

²正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³正会員 北海道大学大学院工学研究院 准教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴フェロー会員 北海道大学工学研究院 教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Understanding the effect of climate change on natural disasters is an important social concern to prevent and mitigate the damage of the disasters. We herein focus on the response of channel width of the Pekerebetsu River to changing the discharge characteristics, which might be caused by future climate change. First, current and future water discharge characteristics are evaluated using a massive ensemble climate dataset, d4PDF, and a lumped runoff model. By using the discharge data estimated, we then predict channel width of the river using a discharge - channel amplitude relation, which was obtained from a physics-based river meandering model. The results show that under a future climate condition (more specifically, +4K scenario), the channel width expansion caused by huge flood could be 20% larger than the one of the current climate condition.

Key Words : Climate change, meandering, channel width, discharge - channel amplitude relation

1. はじめに

平成28年8月, 北海道において観測史上初めて1週間に3個の台風が上陸し, さらに台風10号の接近により, 全道各地で記録的な大雨が発生した. このとき, 北海道東部に位置する十勝川水系では, 国管理の一次支川札内川等において堤防の一部が流失した他, 北海道管理河川のペケレベツ川等において, 蛇行発達に伴って生じた河岸侵食で川幅が拡大し, 橋梁や住家に大きな被害が発生した(図-1).

一般に, 国管理河川においては高水敷を有する河道が多い. そのため, 国管理河川においては低水路の河岸侵食が発生しても, 高水敷のみが侵食されて堤防侵食に至らないケースも多い. 一方で, ペケレベツ川のような都道府県の管理河川では, 河岸に住家が隣接している場合も多く, 河岸侵食が発生すると川幅が拡大し, 河岸に隣接している住家が流失するなどの直接被害が発生する.

このような被害を防ぐためには, 護岸等による河岸保護が有効であるが, 都道府県管理河川の総延長は長大で



図-1 ペケレベツ川市街地付近の状況¹⁾
(2016/9/2, 北海道河川財団撮影)

あることから, 河岸を全て保護するのは現実的ではなく, 川幅の拡大量を事前に推定し, 危険箇所を周知することが有効である. また, 気候変動の影響により将来の流量増加が予想されることを考慮すると, 将来気候下における川幅拡大量を推定したうえで, 危険箇所を周知する必要がある.

気候変動を考慮した将来気候下における川幅拡大の推



図-2 ペケレベツ川流域

定にあたっては、将来気候下における流量を推定するとともに、急流河川における川幅拡大と密接な関係がある蛇行振幅量を推定する必要がある。これまで、気候変動を考慮した将来気候下における流量の推定については、d4PDF²⁾（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）を用いた様々な研究が行われている。立川ら³⁾は、荒川流域、庄内川流域、淀川流域を対象とし、d4PDFから得られた雨量データを用いて局地降水量の再現性を確認したうえで分布型流出モデルによる流出計算を実施し、年最大流量の確率分布の変化を分析している。戸村ら⁴⁾は、d4PDFから得られた雨量データを用いて十勝川流域における流出計算を実施し、北海道帯広市街地を対象に氾濫計算を実施し、気候変動の影響による想定死者数の変化を示している。蛇行振幅量については、永田ら⁵⁾が斜面崩落を考慮した数値計算モデルを用い、流量規模に応じて蛇行振幅量が増大することを示している。旭ら⁶⁾は、Parker et al.⁷⁾が提案した河岸侵食速度式や近藤ら⁸⁾が提案した陸地化モデルを加味した自由蛇行モデルを構築し、流量規模に応じて川幅が広がり、砂州や蛇行形状が下流側へ伝搬していくことを示している。著者ら⁹⁾は、旭ら⁶⁾が構築した自由蛇行モデルを用いて実河川に即した数値計算を多数実施し、蛇行振幅量－流量の関係式を示している。

以上のように、気候変動下における流量の変化や蛇行振幅量－流量の関係については、それぞれ様々な研究が行われているが、これらの研究では将来気候下における蛇行振幅量は推定されていない。

本研究では、平成28年8月出水において、蛇行の発達による川幅拡大によって大きな被害が発生したペケレベツ川を対象として、d4PDFと著者らが示した蛇行振幅量－流量の関係式を用いて、現在気候下・将来気候下での流量と蛇行振幅量を推定し、将来気候下における川幅の変化を推定する。

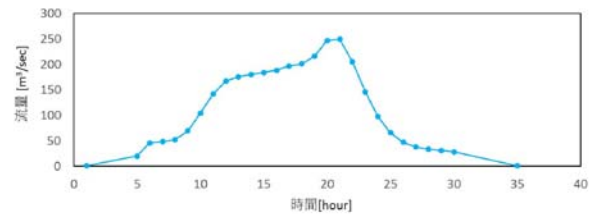


図-3 平成28年8月出水ペケレベツ川ハイドログラフ¹⁰⁾

2. 対象河川の概要

本研究では、平成28年8月出水時に蛇行の発達による川幅拡大で、家屋や橋梁等の流失被害が生じた十勝川水系1次支川佐幌川に合流するペケレベツ川を対象とした。ペケレベツ川は、北海道庁が管理する流域面積48.2km²、河床勾配約1/66、河床材料約90mmの急流河川である（図-2）。

平成28年8月出水時において、清水町市街地付近の被災区間では比較的直線的に整備された流路が、振幅が大きな蛇行流路へと発達し、市街地付近において左右岸が連続的に河岸決壊すると共に、落橋、家屋の流出、市街地の浸水被害が生じている。平成28年出水においては、分布型流出モデルを用いた推定によると、ペケレベツ川では388mm/72hの降雨により約250m³/sのピーク流量（図-3）が発生し、この出水により川幅が3～5倍（約35mから約150mなど）まで拡張したと報告されている。

3. 将来気候下における流量の推定

将来気候下における流量の推定にあたっては、木村の貯留関数法¹¹⁾により構築された流出計算モデルを用いた。同モデルは、十勝川をいくつかのサブ流域に分割してパラメータを設定したモデルで、観測流量データが多く得られる十勝川の芽室太地点（図-2）において再現性が確認されている。本研究では、サブ流域ごとに流域平均雨量を与えて流出計算を行い、ペケレベツ川を含むサブ流域からの流出量を比流量換算してペケレベツ川の流量を推定した。また、流出計算モデルに入力する降雨には、水平解像度20kmのモデルで算出されたd4PDFの過去実験および2℃上昇実験、4℃上昇実験の実験結果をもとに、星野ら¹²⁾が水平解像度5kmにダウンスケーリングした降雨量にバイアス補正¹³⁾を施した降雨量を用いた。

星野らは、d4PDFで公開されている水平解像度20kmの降雨データから、過去実験3000ケース（60年×50アンサンブル）、2℃上昇実験3240ケース（60年×6SST×9アンサンブル）、4℃上昇実験5400ケース（60年×6SST×15アンサンブル）について、十勝川流域帯広地点の年最大流域平均雨量が発生している期間を対象に、水平解像度

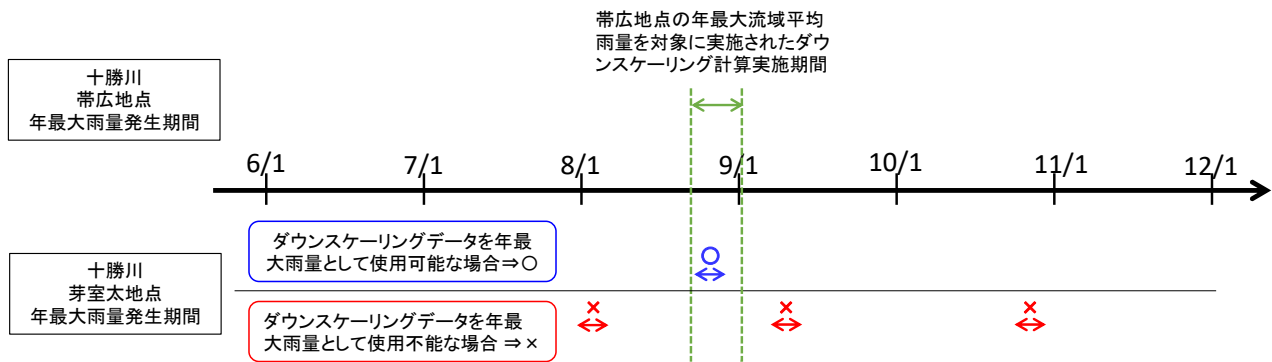
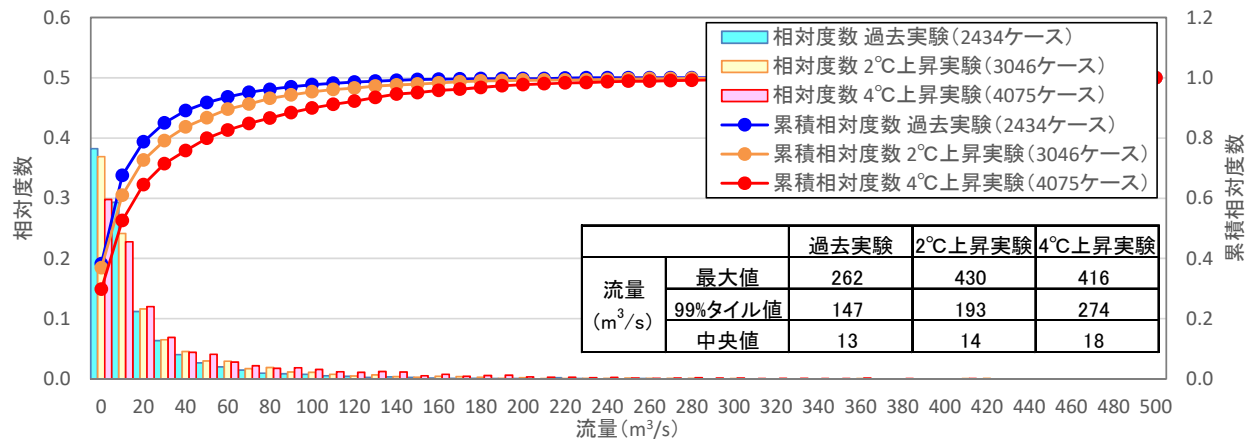
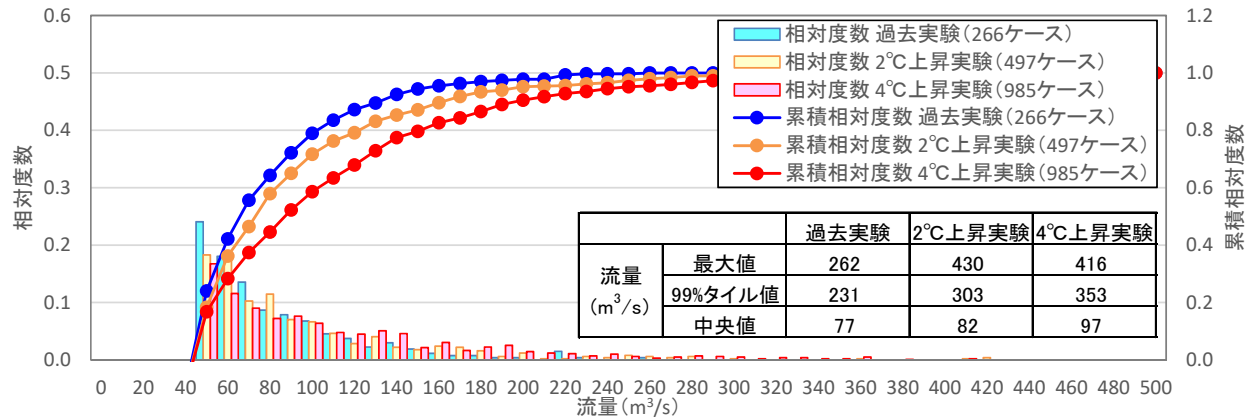


図-4 芽室太地点における年最大流域平均雨量ダウンスケーリングデータの抽出方法



a) 全ケース



b) 50m³/sを超過するケース

図-5 ペケレベツ川における年最大流量の度数分布

5kmへのダウンスケーリングを実施している。本研究では、d4PDFで公開されている水平解像度20kmの降雨データから、過去実験3000ケース、2°C上昇実験3240ケース、4°C上昇実験5400ケースについて、十勝川芽室太地点において年最大流域平均雨量が発生している期間を抽出し、星野らが帯広地点の年最大流域平均雨量発生期間を対象に実施した5kmダウンスケーリングの期間と一致（図-4）した過去実験2434ケース、2°C上昇実験3046ケース、4°C上昇実験4075ケースの雨量データを用いて流出計算を実施した。

過去実験2434ケース、2°C上昇実験3046ケース、4°C上昇実験4075ケースの全ケースの流出計算で得られたペケレベツ川のピーク流量の相対度数及び累積相対度数を図-5aに示す。流出計算で得られた流量の最大値は、過去実験で262m³/s、2°C上昇実験で430m³/s、4°C上昇実験で416m³/sとなっており、2°C上昇実験と比較して4°C上昇実験の最大流量が小さくなっている。しかし、図-5aをみると気候変動が進行すると大きな流量の発生頻度が増加傾向にあり、99%タイル値では過去実験で147m³/s、2°C上昇実験で193m³/s、4°C上昇実験で274m³/sである。

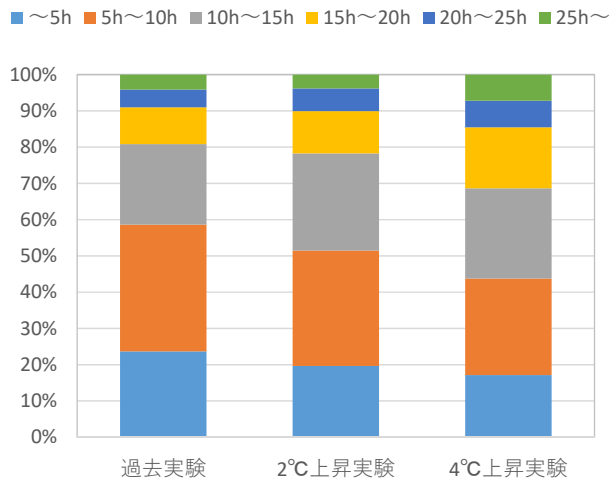


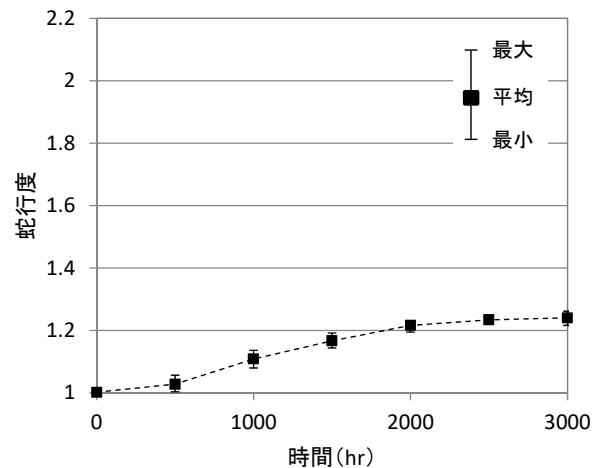
図-6 気候変動の影響による洪水継続時間の変化

一方、中央値をみると、過去実験で $13\text{m}^3/\text{s}$ 、 2°C 上昇実験で $14\text{m}^3/\text{s}$ 、 4°C 上昇実験で $18\text{m}^3/\text{s}$ と小さい。これは、芽室太地点の年最大雨量発生期間を対象に流出計算を実施して比流量換算でペケレベツ川の流量を求めたため、過去実験2434ケース、 2°C 上昇実験3046ケース、 4°C 上昇実験4075 ケースの中に、ペケレベツ川の年最大流量が発生していないケースが含まれていたためと思われる。

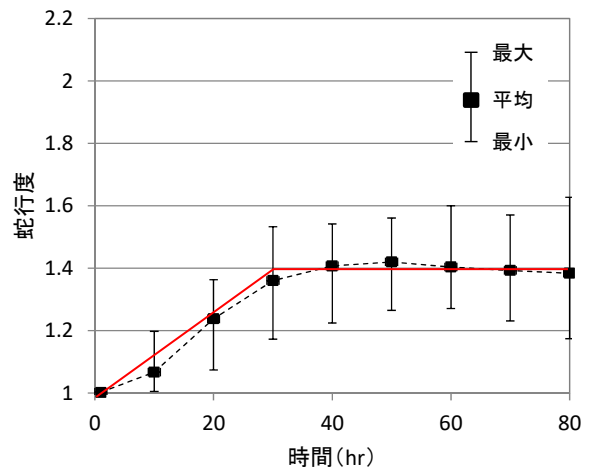
等流計算を用いて、平成28年8月出水前のペケレベツ川の状態を想定した川幅35m、河床勾配1/66、粗度係数0.030、河床材料90mmの条件で、均一粒径の場合の無次元限界掃流力0.05を超過する流量を試算すると約 $50\text{m}^3/\text{s}$ であった。一般的に、年に1回程度は土砂移動を伴う出水が発生すると想定されることや、本研究では蛇行の発達による川幅拡大を議論の対象とすることから、土砂移動が生じないピーク流量 $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下のケースは、以降の議論では対象外とした。

ピーク流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ を超過するケースの相対度数及び累積相対度数を図-5bに示す。ピーク流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ を超過するケースは、過去実験では2434ケース中266ケース、 2°C 上昇実験では3046ケース中497ケース、 4°C 上昇実験では4075ケース中985ケースであり、その流量の中央値は過去実験で $77\text{m}^3/\text{s}$ 、 2°C 上昇実験で $82\text{m}^3/\text{s}$ 、 4°C 上昇実験で $97\text{m}^3/\text{s}$ であった。また、流量の99%タイル値でみると、過去実験で $231\text{m}^3/\text{s}$ 、 2°C 上昇実験で $303\text{m}^3/\text{s}$ 、 4°C 上昇実験で $353\text{m}^3/\text{s}$ であり、 2°C 上昇実験では過去実験と比較して約3割、 4°C 上昇実験では過去実験と比較して約5割の流量増加傾向にある。平成28年8月出水時のピーク流量である $250\text{m}^3/\text{s}$ の年超過確率は、過去実験で約1/180、 2°C 上昇実験で約1/30、 4°C 上昇実験で約1/20となっており、過去実験では $250\text{m}^3/\text{s}$ の発生確率は低いが、気候変動が進行するに伴って、発生確率が高くなることが分かる。

次に、川幅算定に用いる過去実験266ケース、 2°C 上昇実験497ケース、 4°C 上昇実験985ケースのそれぞれに占める $50\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量の継続時間の割合を図-6に示す。



a) 河床勾配=0.001の場合



b) 河床勾配=0.01の場合 (赤線は後述する補正係数)

図-7 数値計算から求められた蛇行度の時間変化^{a)}

過去実験では、 $50\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量が継続する時間が20時間を超える割合は約10%、15時間を超える割合は約20%、10時間を超える割合は約40%であった。 2°C 上昇実験では、20時間を超える割合が約10%、15時間を超える割合は約20%、10時間を超える割合は約50%であった。また、 4°C 上昇実験では20時間を超える割合は約15%、15時間を超える割合は約30%、10時間を超える割合は約55%であり、気候変動の進行に伴って、出水時に $50\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量の継続時間が増加することが分かる。

4. 将来気候下における川幅の推定

平成28年8月出水時のペケレベツ川では、比較的直線的に整備された流路が、振幅が大きな蛇行流路へと発達し大規模河岸侵食に至っているとの報告から、本研究では蛇行振幅量を出水後の川幅と捉えて議論を進める。

蛇行振幅量を推定する手法としては、旭ら⁹⁾が提案した自由蛇行モデルと実河川データを用いて過去実験266ケース、 2°C 上昇実験497ケース、 4°C 上昇実験985ケース

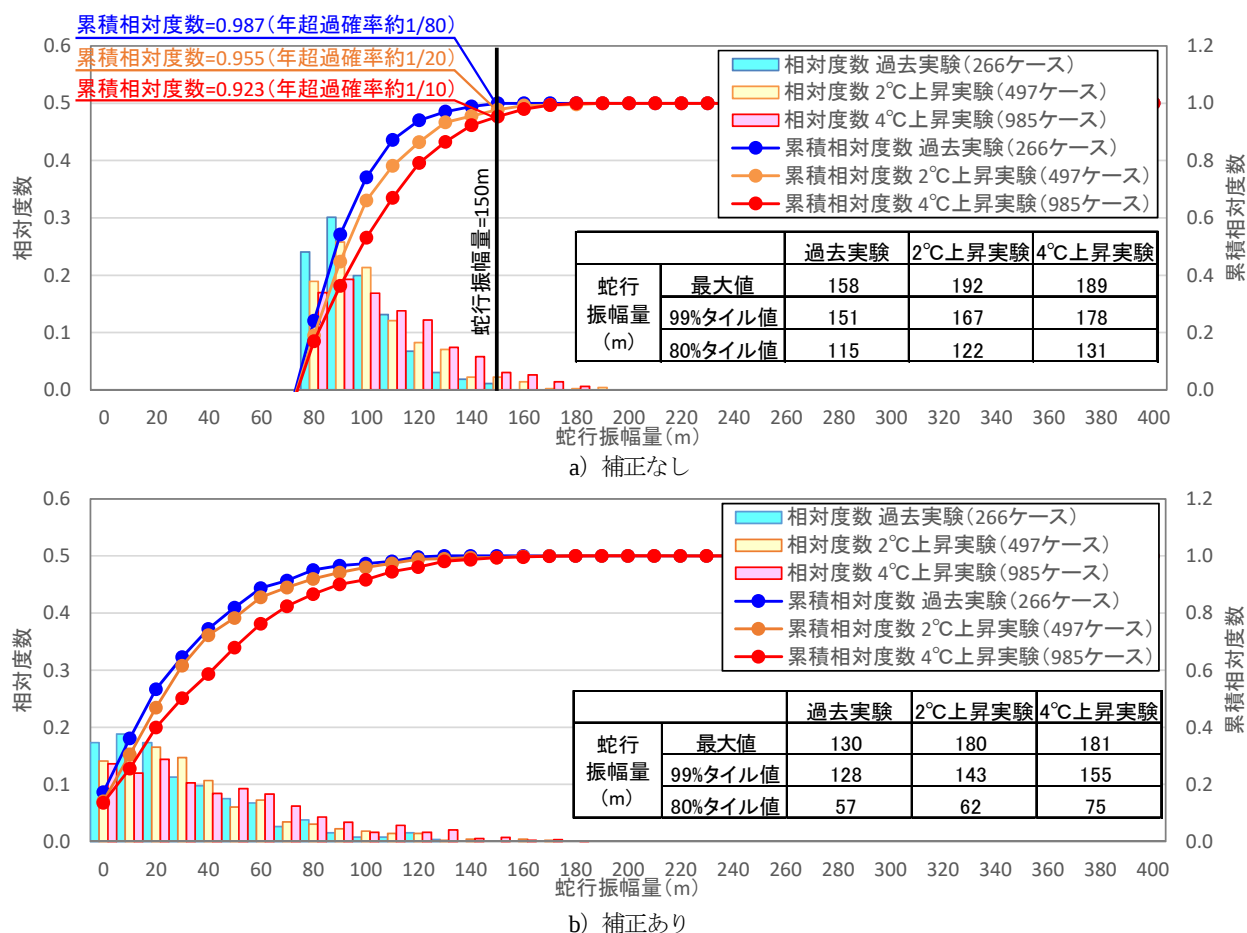


図-8 ペケレベツ川における蛇行振幅量の度数分布

の蛇行数値計算を行い、蛇行振幅量を求める方法が考えられる。しかしながら、都道府県の管理河川は膨大な数に上ることから、すべての河川で大量アンサンブルデータに対する蛇行数値計算を実施することは、実務上困難である。そこで、著者ら⁹⁾が、旭らの自由蛇行モデルを用いて定常流下における蛇行数値計算を行い、計算結果が実河川に即していることを確認したうえで、蛇行振幅量－流量の関係として示した次式を用いる。

$$y = 18.647Q^{0.3842} \quad (\text{河床勾配}i=0.01\text{の場合}) \quad (1)$$

ここで、 y ：蛇行振幅量 (m)， Q ：流量 (m^3/s) である。

式(1)は、定常流下を想定した流量や初期川幅が異なる様々な数値計算結果から求められたものであるが、実河川における蛇行の発達には、非定常流下で発生する現象である。一般に、蛇行の発達現象には流量の大きさや継続時間が関係しているとされており、実河川において蛇行振幅量を推定するためには、流量に加えて継続時間を考慮することや、積算流量による推定が必要と考えられる。著者ら⁹⁾の既往研究によると(図-7)、河床勾配1/1000の河道では、蛇行の発達が定常状態に至るまで約3000時間を要している。一方で、河床勾配1/100の河道では、定常流下においては約30時間程度で蛇行の発達が概ね定常状態に至っている。そこで、本研究では式(1)の算定値に図-7bの赤線で示した補正係数をかけることとする。

平成28年8月出水時の流量をみると、ペケレベツ川において河床材料が移動する流量である $50\text{m}^3/\text{s}$ を超過する流量が約20時間継続している。これを踏まえて、平成28年8月出水時のピーク流量 $250\text{m}^3/\text{s}$ を式(1)に代入したところ、蛇行振幅量は 156m であり、これに補正係数をかけると 130m となる。補正係数ありなしどちらも、本出水で報告されている蛇行振幅量と概ね一致する結果となった。

本研究では、ペケレベツ川における平成28年8月出水後の川幅を概ね再現していることを踏まえ、式(1)にピーク流量を代入して、将来の蛇行振幅量を推定する。また、気候変動後は洪水継続時間が増加傾向にあること(図-6)を考慮し、継続時間の補正係数を加味する場合としない場合の両方で、蛇行振幅を推定し、ピーク流量の増大と継続時間の増加の影響をそれぞれ考察する。

式(1)を用いて、過去実験266ケース、2℃上昇実験497ケース、4℃上昇実験985ケースの蛇行振幅量を算出した。発生する蛇行振幅量の分布に着目すると、図-8より、気候変動が進行すると大きな蛇行振幅量の発生頻度が高くなり、補正なしの場合の99%タイル値では、過去実験で 151m 、2℃上昇実験で 167m 、4℃上昇実験で 178m となる。一方、継続時間の補正係数を加味した場合の99%タイル値では、過去実験で 128m 、2℃上昇実験で 143m 、4℃上昇実験で 155m となる。補正係数を加味した場合、絶対

値は小さく算出されるものの、過去実験と4℃上昇実験の蛇行振幅量の99%タイル値の比をみると、補正なしでは1.18倍だが、補正ありでは1.21倍となり、継続時間の増加により河岸侵食のリスクが大きくなっていることが伺える。同様に、80%タイル値で過去実験と4℃上昇実験の蛇行振幅量の比を求めると、補正なしで1.14倍、補正ありで1.32倍となり、中規模洪水では継続時間増加の影響がより強くでることが分かる。

また、平成28年8月出水で生じた川幅150mの年超過確率を補正なしの累積相対度数から算出すると、過去実験で約1/80、2℃上昇実験で約1/20、4℃上昇実験で約1/15となっており、気候変動の進行に伴って発生確率が高くなることが分かる。

5. おわりに

本研究では、蛇行流路の発達に起因した河岸侵食による川幅拡大に対する危険箇所を予測するため、d4PDFを用いて将来気候下における流量を推定するとともに、蛇行振幅量－流量の関係式を用いて、将来気候下における蛇行の発達に起因する河岸侵食による川幅を推定した。

本研究で得られた主な成果を、以下に列記する。

- 1) 気候変動が進行すると、同一の発生確率であっても蛇行振幅量が大きくなる。平成28年8月出水時に拡大した川幅150mの年超過確率は、過去実験で約1/80、2℃上昇実験で約1/20、4℃上昇実験で約1/15であり、気候変動が進行すると発生頻度が高くなる。
- 2) 洪水継続時間の補正係数を考慮した場合、蛇行振幅の増加率が、補正係数を考慮しない場合より大きくなる。このことは、気候変動によって、ピーク流量だけでなく、洪水継続時間も増加するため、河岸侵食のリスクが大幅に高まる可能性を示唆している。

本研究で示した将来気候下におけるペケレベツ川を対象とした川幅の推定値は、数値計算で求めた蛇行振幅量－流量の関係式を用いたものであり、個々の河川の特徴や局所的な蛇行の発達を加味するには至っていない。また、ペケレベツ川は急勾配河川であり、蛇行発達が短時間で定常状態に至ることから、線形補間により簡易的に洪水継続時間の影響を評価している。しかしながら、他河川においても幅広く推定するためには、継続時間と蛇行振幅量の間関係を詳細に検討する必要がある。

謝辞：本研究は、文部科学省・気候変動リスク情報創生プログラムで作成されたd4PDFを使用した。解析に使用した雨量は、平成29年度地球シミュレータ特別推進課題ならびに文部科学省SI-CATの支援により地球シミュレータを用いることで得られ、「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」で使用されたデータの貸与を受けた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 久加朋子，清水康行，宮本具征，剣持浩高，酒谷賢治，泉典洋，山口里実，岩崎理樹，石田義明：2016年北海道豪雨におけるペケレベツ川の被災状況と流路変動特性の検証，河川技術論文集，第23巻，2017。
- 2) 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：<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html>。（閲覧日:2020年3月）
- 3) 立川康人，宮脇航平，田中智大，萬和明，加藤雅也，市川温，キムスンミン：超多数アンサンブル気候予測実験データを用いた極値河川流量の将来変化の分析，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73，No.3，77-90，2017。
- 4) 戸村翔，舩屋繁和，植村郁彦，吉田隆年，大村宣明，千葉学，山本太郎，岡部博一，佐々木博文，小林彩佳，星野剛，山田朋人，中津川誠：Florisモデルを用いた将来気候下における大規模水害時の死者数推定，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.75，No.2，I_1357-I_1362，2019。
- 5) 永多朋紀，渡邊康玄，安田浩保，伊藤丹：砂州地形に誘発された蛇行発達，土木学会論文集B1，Vol.69，No.4，pp.I_1099-1104，2013。
- 6) 旭一岳，清水康行，Parker, G., Nelson, J.：自由蛇行の発達に関する数値解析，土木学会論文集B1，Vol.68，No.4，pp.I_1183-1188，2012。
- 7) Parker, G., Shimizu, Y., Wilkerson, G.V., Eke, E.C., Abad, J.D., Lauer, J.W., Paola, C., Dietrich, W.E. and Voller, V.R.: A new framework for modeling the migration of meandering rivers, Earth Surface Processes and Landforms, Vol.36, pp.70-86, 2011。
- 8) 近藤祐介，清水康行，木村一郎，Parker, G.：Slump blockと内岸の陸地化の影響を考慮した自由蛇行の形成過程に関する数値解析，水工学論文集第53巻，pp.769-774，2009。
- 9) 舩屋繁和，井上卓也，岩崎理樹，清水康行：実河川スケールでの蛇行発達に関する数値計算，土木学会論文集B1，Vol.75，No.2，pp.I_1015-1020，2019。
- 10) 小澤達也，中津川誠：2016年8月の連続した大雨に伴う洪水流出量の再現検証，土木学会北海道支部，73，2017。
- 11) 国土交通省水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準，調査編，第3章第2節-15，2016。
- 12) 星野剛，山田朋人，稲津将，佐藤友徳，川瀬宏明，杉本志織：大量アンサンブル気候予測データを用いた大雨の時空間特性とその将来変化の分析，土木学会論文集B1，Vol.74，No.5，pp.I_13-18，2018。
- 13) 植村郁彦，舩屋繁和，吉田隆年，大村宣明，千葉学，戸村翔，山本太郎，時岡真治，佐々木博文，濱田悠貴，星野剛，山田朋人：実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく年最大流域平均雨量の算定年最大流域平均雨量の算定，土木学会論文集B1，Vol.74，No.5，pp.I_115-120，2018。

(2020. 4. 2受付)