

中小河川を対象とした氾濫リスクに関する研究：ペケレベツ川を例として

The flood risk analysis in small streams: A case study of the Pekerebetsu River

北海道大学工学部環境社会工学科 学生会員 ○大河内駿 (Syun Okouchi)
北海道大学大学院工学院 学生会員 高橋広大 (Koudai Takahashi)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 岩崎理樹 (Toshiki Iwasaki)
北海道大学大学院工学研究院 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

我が国の河川管理においては、大規模河川に比べて整備や研究があまり進んでいないのが中小河川における実状であるといえる。中小河川の多くは都道府県管理河川であり、整備に対して人的経済的な制約があるうえに、上下流バランスも考慮しなくてはならず、中小河川特有の課題も数多く存在する。さらに、河川規模が小さくても、川沿いには住宅地や施設などが隣接している地域も多く存在し、水害に対する脆弱度が低いわけではない。近年進行中であると予想されている地球温暖化や気候変動の影響を勘案すると、今後も日本において記録的な豪雨・台風が訪れることは避けられないといえる。気候変動による降雨量の変化は、大河川はもとより、集中豪雨の増加という形で、中小河川に対して特に顕著な影響をもたらす可能性もある。本研究では、そのような中小河川における水土砂災害に関する検討として、2016年北海道豪雨で深刻な被害を受けたペケレベツ川を対象とした検討を行う。

中小河川における検討を行う際に問題となるのが、利用可能なデータが限られることである。大河川においては、水文観測データ、横断測量データ、Lidarデータ、河床材料データなど様々な観測データが蓄積されてきている。一方で、高い自由度を持つ気候システムが生起する降雨・流出形態もまた多くの可能性が存在し、これまでの水文観測データだけで起こりうる事象の全体像を把握することは困難であり、中小河川の場合は、観測データが少ないこともさらに問題となる。そのような中、気候モデルを用いた大規模アンサンブル計算が実施され²⁾、観測データに加えてより多数の計算結果から気候変動予測やリスク評価について議論することが可能状況となっている³⁾。このようにして得られた降雨流出データを用いることで、大河川のみならず、データがそもそも少ない中小河川においてもより網羅的な流量条件によって検討が行えることが期待される。

本研究では、2016年北海道豪雨を契機として整備された水平解像度5kmに力学的ダウンスケーリングした大規模アンサンブル降雨データ^{4,5)}を流出モデルである貯留関数法を経由して得られる大量のハイドログラフ群⁶⁾の形状を基に類似パターンに分類したうえで特徴化し、これをiRIC-Nays2DH⁷⁾の境界条件として用いることで、種々の流量、河床変動条件の下でペケレベツ川の洪水氾濫リスクがどのように変化するか検討を行うものである。これにより大規模アンサンブルデータにて求められたハイドログラフのデータを、氾濫リスクの検討において網

羅的に検証することが可能となる。

2. 手法

2.1 対象河川と河川・河床変動計算条件

本研究で対象とする河川は、十勝川水系の支川で清水町を流れて十勝川に合流するペケレベツ川である。この河川は、2016年北海道豪雨時に洪水流により大規模に河床・河岸が変動し、大きな被害を受けている。久加ら¹⁾は、特に被害が大きかった河川区間を対象とし、iRIC-Nays2DHを改良したモデルを用いることにより、実際の流路変動過程を再現し、氾濫被害や土砂供給の影響について明らかにしている。彼らは、流量ハイドログラフとして、分布型モデルにより得られた推定値を用いて解析を実施しているが、本研究では、このハイドログラフについて波形の影響などについて検討を加える。

久加らの検討との比較を容易とするために、計算条件については可能な限り同一のものをを用いた。詳細については論文を参照されたいが、概要について以下に示す。計算領域は、町道ペケレベツ川橋から市街地付近の新清橋までの区間とし、計算領域、計算メッシュは同一とした。また、河床材料粒径は均一砂を仮定して、90mmの一定値とし、マンニングの粗度係数は、0.03と空間的に一様に設定している。計算モデルとして、非定常平面2次元流れと河床変動計算の解析用ソルバーであるiRICNays2DHを使用している。ここでは、久加らが設定したような岩盤侵食や土砂供給の影響は検討しておらず、土砂供給量は水理量から計算される平衡流砂量としている。

2.2 流量ハイドログラフの特徴化

本研究で検討するハイドログラフについては、舩屋ら⁸⁾が検討したものをを用いた。彼らは、星野ら⁴⁾、植村ら⁵⁾が検討した十勝川流域における水平解像度5kmに力学的ダウンスケーリングされた大規模サンサンブル降雨データについて、貯留関数法を適用して十勝川流域をいくつかのサブ流域に分割した流出計算を行った。さらに、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することでペケレベツ川の流量を求めている。今回は、彼らが抽出した過去実験2434ケース、4℃上昇実験4075ケースの流量データについて検討する。

このような大量データから想起される氾濫リスクなどを検討するには、すべてのケースで実際に水理計算を実施することがまず考えられる⁸⁾。一方で、ここで実施する流路変動計算は一般に計算時間を要し、すべてのアン

サンプルデータに対して計算を実施することは現実的でないし、また類似のハイドログラフからは類似の河床変動過程が得られることも予想されるため、必ずしもすべてのケースに対して検討する必要もないと考えられる。そこで、ここでは上記流量群に対してクラスタリング手法の一つである K-shape クラスタリングを適用することで、大量のハイドログラフをより少ない代表的なハイドログラフ群に区分することを試みる。

大量のハイドログラフを直接解析する前に、流量値を以下のように平均値 0、標準偏差 1 とする規格化を行い、ピーク値によらず分類できるように前処理を行った。

$$Q = (Q^* - Q_{ave}^*) / \sigma_{Q^*} \quad (1)$$

ここに、 Q^* : 基準化前流量、 Q_{ave}^* : Q^* の平均値、 σ_{Q^*} : Q^* の標準偏差、 Q : 規格化後流量である。このように規格化した流量について K-shape クラスタリングを実施した。分類方法にはいくつか考えられるが、一番簡単と思われる過去・将来実験における流量ハイドログラフをすべてまとめて上でクラスタリングを行い、ハイドログラフについて特徴化した。

このように分類したハイドログラフを図1に示す。なお、ここでは試行錯誤的に 14 のクラスターに分類した。図を見ると Cluster 1 など複雑なハイドログラフは合理的に分類できているとは言えない部分もあるが、そのほかのクラスターでは比較的類似の形として分類できていることがわかる。各クラスターは、特に継続時間やピークの数により、物理的な意味づけが可能と考えられる。

この結果を基に、本研究では久加らが解析に用いたハイドログラフのピーク流量 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ と同じ規模のハイドログラフを各クラスターから抽出して解析を実施することを考えた。これは、ピーク流量が同じであっても、異なる形状特性により、様々な氾濫・流路変動過程となることまでを検討するためである。ここでは、クラスター 3, 4 および 12 からそれぞれ 1 つずつ、3 つのハイドログラフを図-2 のように抽出し、これを境界条件として流れの計算、および河床変動計算を行う。

3. 数値計算

3.1 流れのみの計算

以上の条件と抽出したデータを基に、まず河床変動を考慮しない、流れのみの計算を行った。この検証により河川に流れ込む流量とその変化が河川の氾濫にどのように影響を与えるのかを検討する。

3.1.1 浸水面積と流量の関係

浸水がピークに達した時の氾濫状況とハイドログラフの関係について調べる。その為、河川の浸水がピークになるという状態を定義する必要がある。本研究では河川氾濫による浸水面積が最も大きくなった時間をピーク時刻と定めることとする。図3に、各ケースにおける浸水面積の時間変化を示す。この図を見ると浸水面積の最大値は全ケースでほぼ同じであるとともに、図2に示す上流端に与えたハイドログラフとほぼ同じ時間変化を示している。この点は、水深コンター図で確認しても同様であり、図4に示すように、浸水ピーク時においても浸水エ

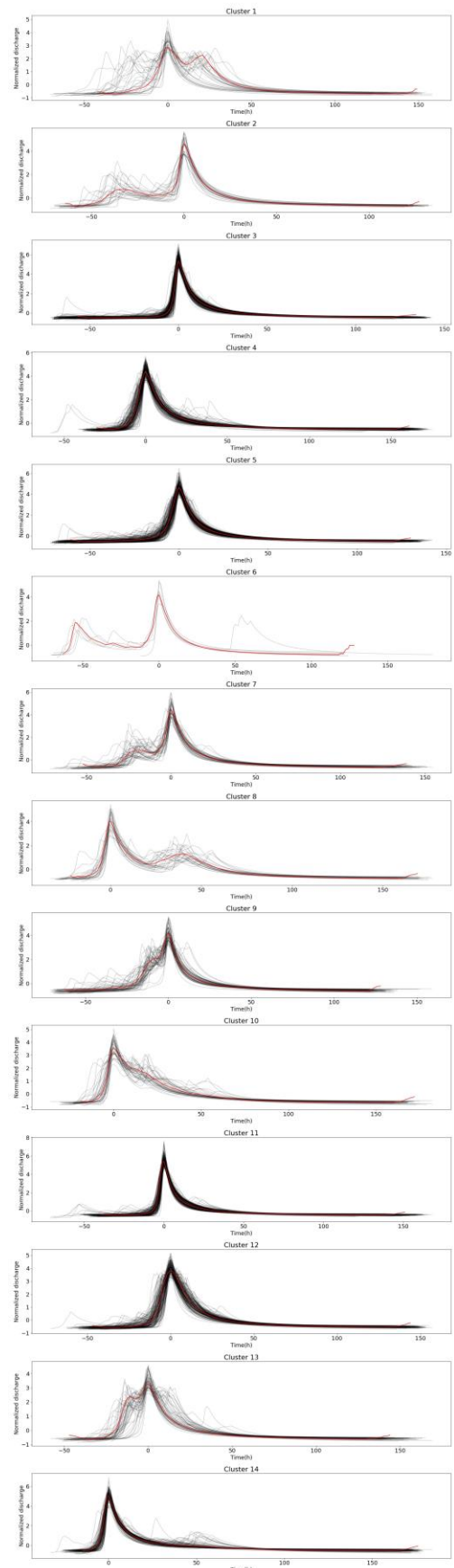


図-1 流量クラスタリング結果

リアはどのケースでも同じ箇所で起こっている。また氾濫状況についても特筆すべき差異は見受けられない結果となった。

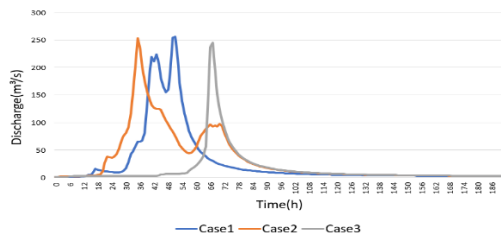


図-2 解析に使用した流量ハイドログラフ

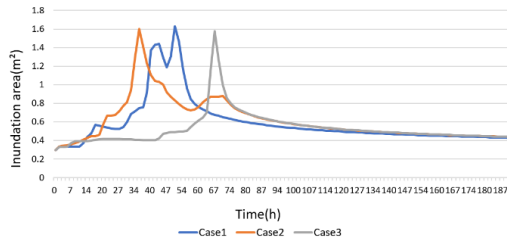


図-3 各ケースの浸水面積比較図（流れのみの計算）

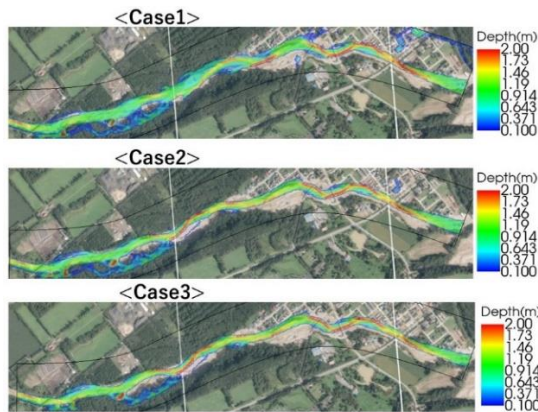


図-4 浸水ピーク時水深コンター図

3.2 河床変動を考慮した計算

3.2.1 河床変動を考慮する意義

次に同じ計算条件下で河川の河床変動を考慮した場合において計算を行う。大規模河川の河川で同じような検証を行う場合、河床変動を考慮しないことが多い。河川の規模が大きい為、河床の変動が起きたとしても河川全体に与える影響が少なく、固定床が良い近似となりえるためと思われる。一方で、中小河川においては、河川の規模が小さい・山間部が近く土砂の流入が多いといった理由などから、河床の変動が河川、及び氾濫に与える影響はペケレバツ川のように極めて大きくなりえる。よって、中小河川の氾濫リスクを検討する場合において河床変動を考慮しないことは妥当ではないことも多いと考えられる為、河床変動を考慮しないケースとの比較も踏まえ検証を行っていく。

3.2.2 浸水面積と流量の相関性

先程の検証と同じように河床変動を考慮した場合の、浸水面積と河川の様子について調べる。浸水ピーク時刻とは引き続き浸水面積が最大となる時刻とする。図5に、河床変動を考慮した場合の浸水面積の時間変化を示す。

この結果は、流れのみの結果と明らかに異なっており、浸水面積の最大値にケースごとに差があること、ハイドログラフの波形と浸水面積の時間変化が異なることがわかる。特に浸水ピーク後に浸水面積の減少が緩やかであ

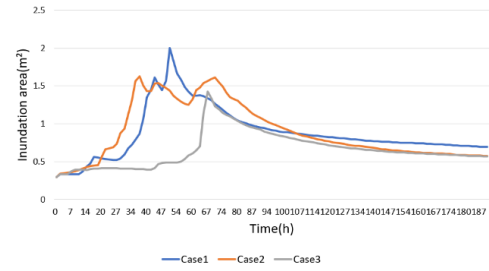


図-5 各ケースの浸水面積比較図（河床変動考慮）

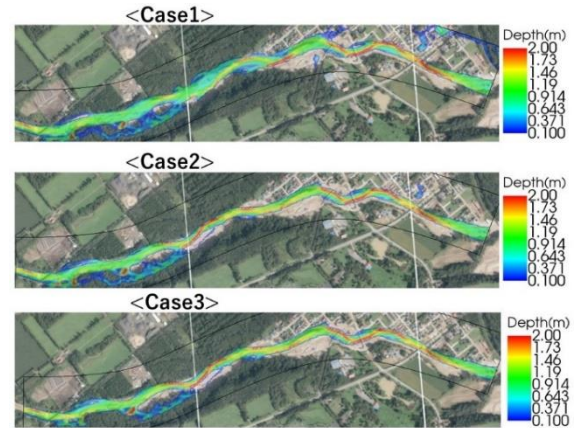


図-6 浸水ピーク時水深コンター図（河床変動考慮）

ることが特徴である。また計算結果から、浸水ピークが起こる時刻とハイドログラフのピーク時刻はほとんど同一であったため、引き続きこの時刻をピーク時刻とし、この時点における水深コンター図により浸水特性について調べていく。図6に示すように浸水状況についても、流れのみのケースとは異なることがわかる。侵食によって水路が拡幅していることに加えて、流れのみの計算では見られなかった左岸側の市街地への氾濫が発生していることも見て取れる。これは、ハイドログラフの形状の違いが、流路変動過程に大きく影響し、それに伴い氾濫特性も顕著に変化したためであると考えられる。

3.3 考察

図7に河床変動の有無による浸水面積の時間変化の違いを示す。この図から分かるようにピーク前はそこまで大きな差はないが、ピーク後のグラフの差が顕著に表れている。ただ Case2 と Case3 から分かるように最初にピークを迎える波形では、浸水面積の最大値に差はほとんど見られなかった。これは浸水面積の大きさはある程度流量値に依存するが、河床変動を考慮した為、河川に流れ込んだ土砂が堆積し氾濫流が再び河川に戻りにくくなっているからだと考えられる。一方で Case1 のようにピークを迎えその後もう1回ピークが訪れるような波形では、浸水面積の最大値を更新していることが見て取れる。これは先程述べたように、1度目のピークにて溜まった水が元の状態に戻りきらない内に新しい浸水が起きる為、浸水面積の最大値を更新したと考えられる。この溜まった水の影響の大きさは Case2 の2度目の小さなピーク時の浸水面積からも見て確認できる。

この結果を見ると、河床変動の有無により浸水面積に

ある程度の差があり、かつ河床変動を考慮した場合のほうが、ハイドログラフ形状の影響が浸水面積の時間変化に対して大きく影響していることが見て取れる。

流れのみの計算の場合、浸水特性はそのまま流量の変化を直接的に受ける結果となっている。本研究では堤防決壊などを考慮していないため、流量の波形の違いによって浸水の開始時刻や浸水面積に差異を与えることは見受けられず、氾濫を左右する要素は河川に流れ込む流量のみに依存する結果となっている。一方で、河床変動を考慮した場合、時間とともに河床・河岸の形状が大きく変化するために、氾濫特性もまた変化する。この際、ピーク流量が同じであっても流量波形の違いによって流路変動特性が異なるため、ハイドログラフの液状の影響についても重要な要素となることがわかる。

これらの点は、流量ハイドログラフの波形の影響や河床変動を生むが中小河川において氾濫リスクや避難行動を考慮するうえで重要となることを示唆していると考えられる。ただし、本研究で考慮した流量ハイドログラフのパターンや土砂供給条件などは限られたものであり、より網羅的な検討を実施する必要がある。

4.まとめ

本研究ではペケレベツ川を対象として、将来発生しうると考えられるハイドログラフを大量アンサンブル降雨一流出計算結果を基に、K-Shape クラスタリングにより特徴化し、2016 年豪雨時に推定されたピーク流量値と同程度で、異なる波形を持つハイドログラフを境界条件とした水理-河床変動計算を行うことで今後起こりうる氾濫リスクを網羅的に検証することを試みた。その上で中小河川の氾濫を考える際に重要な要素である河床変動の有無の 2 つのパターンで iRICNays2DH を用いて計算を行い、流量の変化やその波形が河川の浸水や浸水面積にどのような影響を与えるのか比較と検証を行った。

本研究で想定した条件においては、河川の氾濫に最も直接的に大きな影響を与える要素はピーク流量であることが分かったが、河床変動の影響を受けやすい急流河川や、土砂の流入を強く受けるような中小河川では、ハイドログラフの波形の影響も受けることが確認できた。氾濫リスクという点で、特に注目すべきはハイドログラフにいくつかの波がある場合にあると考えられる。1 度目のハイドログラフ波形の山で溢れた水は、次に訪れる山の浸水を強めることになるため十分な警戒が必要なケースだと考えられる。

今後はピーク流量やハイドログラフの検証波形を増やしていくことで、より今後起きうる氾濫を網羅していくと共に、実際にそのような水害が起きたときに対応できる対策設備の検討や、ハザードマップなどを用いた住民の避難対策へ検討していきたい

5. 謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」(管理人:国立研究開発法人防災科学技術研究所)の支援を受けた。また、北

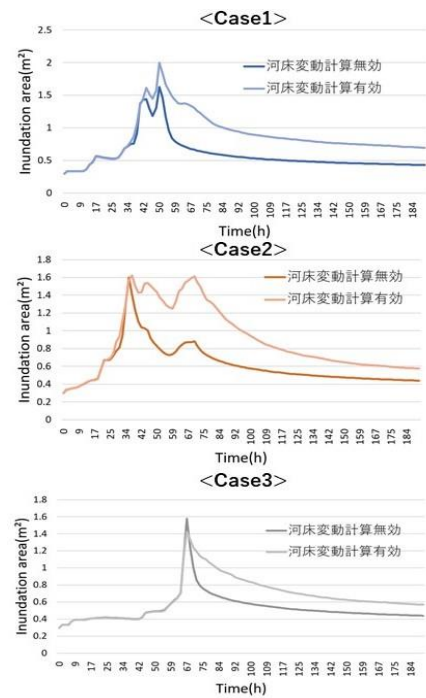


図-7 ケースごとの浸水面積比較図

海道開発局よりデータ提供を受けた。さらに、北海道大学山田朋人准教授、富山県立大学久加朋子准教授より、データ提供等、ご協力いただいた。ここに記し、謝意を表します。

6. 参考文献

- 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 年北海道豪雨災害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，pp.55-60，2017.
- 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/>
- 山田朋人・星野剛ら：北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化，河川技術論文集，第 24 巻，pp.391-396，2018.
- 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，Vol74，No5，pp.I_13-18，2018.
- 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，Vol74，No5，pp.I_115-120，2018.
- 舩屋繁和・井上卓也・岩崎理樹・清水康行：気候変動を考慮した将来気候下における川幅の推定，河川技術論文集，Vol.26，2020.
- iRIC Project: <http://i-ric.org/ja/>
- 川井翼・中津川誠・関洵哉：大量アンサンブルデータを用いた急流河川の侵食危険度の評価，土木学会論文集 B1，Vol77，No2，pp.I_199-204，2021.