

## 流量ハイドログラフ群のばらつきによる流路変動への影響

Effect of variability of multiple hydrographs on the channel deformation

北海道大学工学部                      ○学生会員   村上大知 (Daichi Murakami)  
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

河川の災害を引き起こす原因の一つに流路変動がある。2016年北海道豪雨災害においては道内各地で流路変動による災害が生じ、例えば音更川上流区間で流路が大きく変動して堤防の破壊を引き起こした。この流路変動は、高速な水の流れが土砂の移動を促進し、河床や河道形状を大きく変化させる現象である。流路変動の要因には、出水前の流路形状、植生、土砂供給量など様々なものが考えられるが、その一つに流量ハイドログラフの形状がある。既存の研究<sup>1),2)</sup>では、実績のハイドログラフのピーク流量や継続時間を変化させることで、異なる形状のハイドログラフによる流路変動の応答を検討している。

このハイドログラフに注目すると、現在 d4PDF<sup>3)</sup>と呼ばれるアンサンブル気候予測データから得られる降雨データを入力値として流出解析を行うことにより、現在、将来気候下においてどのようなハイドログラフが生じるのか、より大量のデータを基に議論することが可能である。これは、実績ハイドログラフを引き延ばすことの妥当性を議論できるだけでなく、今後起こりうる流量ハイドログラフにより誘発される流路変動等の影響をより網羅的に検討できる可能性がある。さらに、長期的に生じるハイドログラフ群に関するデータが得られるため、その流量シナリオに基づいた長期的な流路変動過程までも議論できる可能性を持っているといえるが、長期的に発生する洪水群を考えると、その規模の組み合わせや順番には不確実性があり、条件としては非常に複雑である。

そこで本研究では、このような複雑条件の結果として得られる流路変動のパターンを議論するための第一歩として、単純な条件において長期的に発生しうる複数の洪水を想定し、ハイドログラフの順番や組み合わせにより流路変動にどの程度の違いがみられるかを検討した。

## 2. 手法

本研究では iRIC<sup>4)</sup>に同梱されている平面二次元河床変動計算のソルバーである Nays2DH を用いて、実河川を模した現地スケールの流路変動の再現計算を行う。このモデルは岡部ら<sup>1),2)</sup>により 2016 年北海道豪雨時に見られた音更川の流路変動の検討において活用されており、再現性が確認されている。このモデルを用いて単純化した音更川の条件を設定し、単純化した複数のハイドログラフを境界条件として複数のパターンの流路変動計算を行うことで、得られた流路、河床形状の違いを比較した。

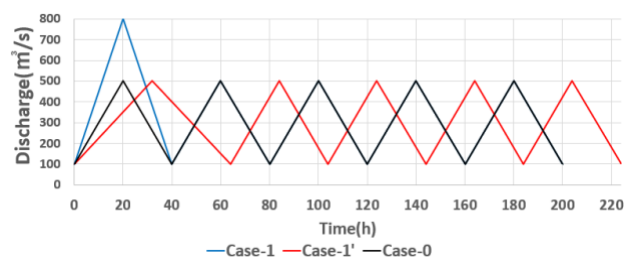


図1：計算に用いたハイドログラフの一部。

Case-0：基本形、Case-1：一番目の洪水のピーク流量を大きくした場合、Case-1'：一番目の洪水の洪水継続時間を長くした場合

## 2.1 河道の条件

河道の条件については、岡部ら<sup>1),2)</sup>の条件を参考に、音更川上流区間を単純化して長さ 5000m、低水路幅 100m、兩岸高水敷 50m の直線河川を設定した。低水路高さは 2m、法面勾配は 5(10m/2m)としている。河床材料は粒径 55mm の均一粒径とし、水路勾配 0.0083(1/200)、マンニングの粗度係数 0.03 とした。計算格子サイズは横断方向 10m、縦断方向 25m で、格子数は横断方向 22、縦断方向 200 である。

## 2.2 連続するハイドログラフの条件

岡部ら<sup>2)</sup>は実績の流量ハイドログラフのピーク流量を引き延ばすことで異なるハイドログラフを設定しているが、本研究では、まず図1のCase-0のように三角形に単純化した基本のハイドログラフを5つ並べて長期的に発生する5回分の洪水を想定したものを基本形に設定した。そこからCase-1、Case-1'のように5つのうち1つの洪水のピーク流量や洪水継続時間を引き延ばすことで異なるパターンの洪水群を設定した。変形させる流量ハイドログラフの順番により、各ケースで5通りのハイドログラフ群が想定できる（例えば、2番目のハイドログラフを変化させた場合は、Case-2, 2'というように呼ぶことにする）。これらは、将来発生する複数の洪水の規模や順番が異なるケースを想定しており、それによって生じる流路変動がどの程度変化しうるかを検討するものである。

基本となる流量ハイドログラフのピーク値と継続時間については、岡部らを参考に設定した。すなわち、岡部ら<sup>1)</sup>は音更川の流路変動を促進する流量が 400 m³/s あたりであると報告していることから、それを超える流量としてピーク流量を 500m³/s とした。洪水継続時間は既存の最大規模の洪水である 2016 年出水の流量データを元

にして、40 時間とした。一方、変化させる場合の流量については、ピーク値については、音更川の既存最大規模の流量である  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  とし、継続時間を変化させる場合は、ピーク流量を変化させた場合のハイドログラフと同様の洪水体積となるようにハイドログラフを設定している。

### 3. 数値計算

前項で図1のように設定したハイドログラフを用いて流路変動計算を行った。Case-0 のように同じ洪水が5 回来ることを想定したものに対して、Case-1,1'のようにそのうちピーク流量が大きな洪水、洪水継続時間が大きな洪水が一つ増えた場合、生じる流路変動がどの程度変化するかを検討する。

まずは、比較の基本となる同じ洪水を 5 回与えた Case-0 の計算結果を図2に示す。一回目の洪水後、上流部分で明確な複列砂州が形成され、二回目で不安定化し、一本の蛇行流路となった後、流路が堤防に達する様子が計算されている。蛇行流路が明確になっている区間では、網状の区間と比べて堤防側への側方侵食が大きく進んでいることが確認できる。

#### 3.1. ピーク流量を変化させた洪水群での流路変動

図3はCase-0の5つのハイドログラフのうち、一つのピーク流量のみ大きくした各ケースの計算終了時の水深コンター図である。これを見ると全ケースで川幅全体に網状流路が広がり、各ケースでの違いや類似性は評価しにくいような河床形状になっている。Case-0と比較すると、ピークを大きくした洪水を与えた Case-1~5 では洪水流が堤防沿いを流れる場合が多いことがわかる。

続いて、生じた河床形状の違いを別の視点でとらえるために、側方境界でどれだけ侵食が起きているかを調べた。これを定量化するために、堤防侵食割合として両側方境界で一定以上の河床変動量が生じている割合を計算している。この検討は、両境界位置を堤防と見立てた際の、ある種の堤防侵食リスクを示していることに相当すると考えられる。

図4は1m以上の堤防侵食割合を示したものである。ピークの大きい洪水の順番を変えた各ケースでとりうる侵食割合とその時間変化が明瞭に異なる結果となった。最終的な値は1回目に大きな洪水を与えたCase-1で15%であるのに対して、3回目に与えたCase-3では45%近くの領域で側方境界の侵食が発生している。特にCase-2,3,4では侵食割合の増加速度が大きく、侵食範囲が大きくなっている。ここで、図2よりCase-0では三回目の洪水で、蛇行流路の位置で側方侵食が進んでいたことを考慮して河床形状を確認すると、Case-2,3,4では大きな流量を与えたタイミングで蛇行流路が大きく発達しており、一方Case-1,5では蛇行流路が形成されていなかった。ここから、蛇行流路の形成が側方境界での侵食を促進していると考えられる。

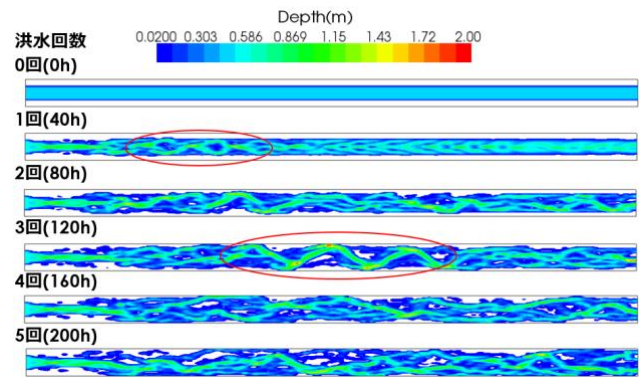


図2：Case-0における各洪水後の水深コンター図

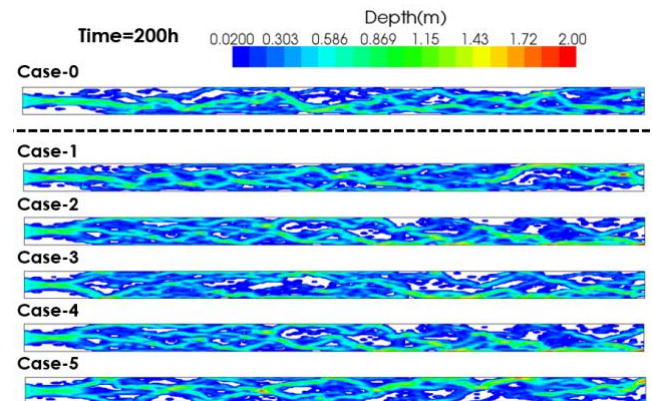


図3：ピーク流量を変化させたケースでの計算終了時の水深コンター図

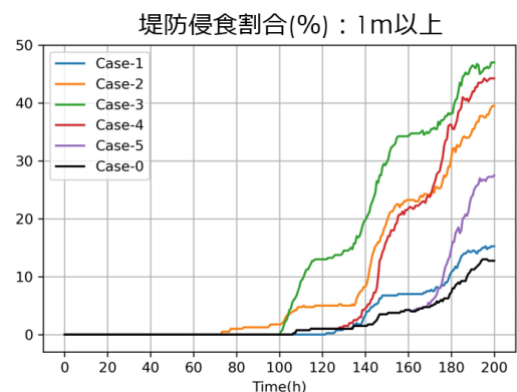


図4：ピーク流量を変化させたケースの1m以上の堤防侵食割合(%)

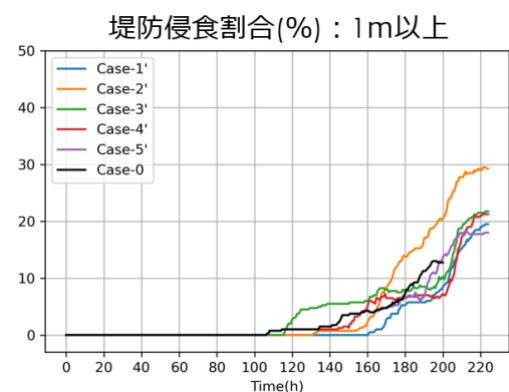


図5：洪水継続時間を変化させたケースの1m以上の堤防侵食割合(%)



### 3.2. 洪水継続時間を変化させた洪水群での流路変動

図5はCase-0の5つのハイドログラフのうち、一つの洪水継続時間のみ大きくした各ケースで1m以上の堤防侵食割合を示したものである。ピーク流量を大きくした場合と比較して、洪水の順番を変えた各ケースでとりうる値と時間変化が似たように推移し、値も小さくなる傾向が見られた。ここから、継続時間を長くした場合では、洪水の順番を変えた各ケースで堤防側へ侵食する力があまり変わらないことが考えられる。

一方、Case-2'では他のケースよりも10%程侵食範囲が広い状態で推移している。ここで、各ケースの河床形状の時間変化を確認すると、Case-2'~5'では図2で示したCase-0の三回目の洪水時と同様に、中流部あたりで蛇行流路が形成されていた。しかしCase-2'では、図6に示した通り、中流部の蛇行流路に加えて上流部で複列砂州が大きく発達し、水衝部で黒く示した1m以上の侵食領域が発達している。このように、複列砂州が別の区間でも発達したことで、側方境界の侵食領域が広がったと考えられる。また、Case-1'では、洪水継続時間を長くした影響で一回目の洪水中に複列砂州が崩壊し、網状流路の状態では流路が変動していた。蛇行流路が形成されなかったことで、Case-1'の侵食割合が低く推移したと考えられる。

### 3.3. 考察

計算結果では、蛇行流路が形成されたケースと形成されないケースで堤防侵食割合に大きく差が生まれた。また、このような蛇行流路は洪水継続時間よりピーク流量を変化させた場合のほうがより大きく発達した。そこで、蛇行流路による侵食への影響、蛇行流路の形成条件の二点について以下に考察した。

まず一点目に、蛇行流路により側方境界の河床侵食が促進される理由を考えた。図7は最も蛇行流路が発達したCase-3の三回目の洪水での侵食過程である。水深コンター図に加えて、河床が1m以上侵食されている領域を黒く示した。時間変化から侵食プロセスを考えると、まず蛇行流路の水衝部で1m以上の深い侵食領域が現れる。次に砂州全体が下流側へ移動するとともに侵食領域も下流側へ延びていく。その結果侵食領域がつながり、側方境界に沿って洪水流が流れ、砂州形状が崩れる。ここから、蛇行流路が堤防の侵食を促進する理由としては二つ考えられる。一つは、水路が一本に集中することで、水衝部で堤防側に深い侵食が発生すること、もう一つは砂州形状が崩壊することで、堤防側に水路が流れるようになることである。

二点目に、このような蛇行流路の形成条件について、蛇行流路が発達したケースとしなかったケースに分けて考察した。まずは発達したケースについて、図8ではCase-0で蛇行流路が形成された2,3回目の洪水時の水深コンター図を示した。Case-0では、二回目の洪水終了時点での不安定化した複列砂州をきっかけとして蛇行流路が形成されている。また、三回目でピークを大きくした洪水を与えたCase-3では、蛇行流路がより下流側まで大きく発達し、砂州形状が下流側へ大きく移動している。

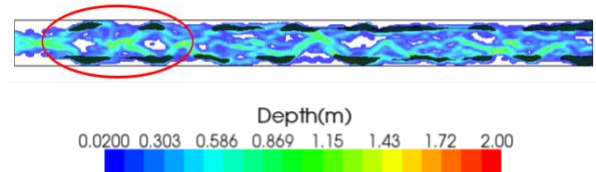


図6: Case-2'三回目の洪水終了時の水深コンター図  
(Time = 144h、黒い領域は1m以上の侵食領域、  
図6~9で水深カラーバーは共通)

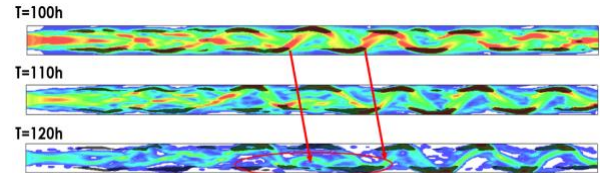


図7: Case-3 三回目の洪水の侵食過程  
(黒い領域は1m以上の侵食領域)

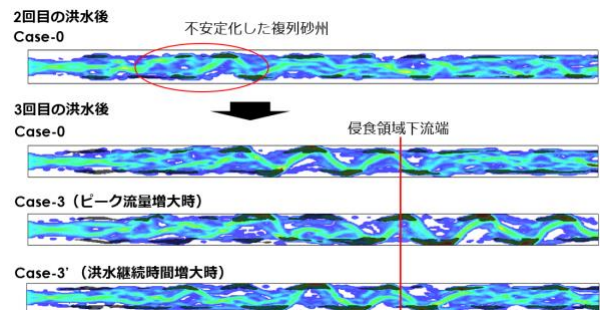


図8: 蛇行流路の形成過程  
(黒い領域は1m以上の侵食領域)

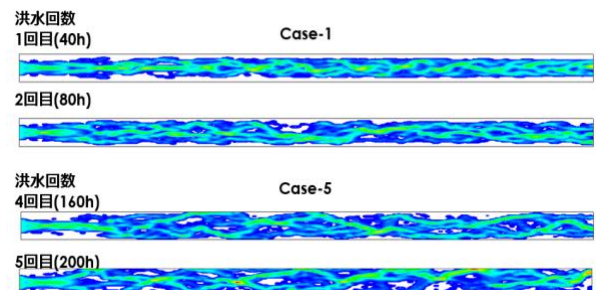


図9: 蛇行流路が形成されないケース

したがって、Case-2,3,4では、一回目の洪水で形成された複列砂州に対してピーク流量の大きな洪水が流れることで、複列砂州が不安定化し、蛇行流路が大きく発達したと考えられる。

また、蛇行流路の発達について、図8の三回目の洪水で洪水継続時間を長くしたCase-3'をみると、砂州の発達と砂州の下流側への移動距離はともにCase-0から微増している程度で、Case-3ほど大きな変化は見られない。このことから、洪水の継続時間よりもピーク流量の方が、砂州の発達と移動距離に寄与することが示唆された。よって、ピーク流量を変化させた洪水群では、大きな洪水を与えた際に蛇行流路などの砂州形状が大きく発達したことで、堤防侵食割合が大きくばらついたと考えられる。佐々木ら<sup>5)</sup>は実河川での再現計算により流量ハイドログ

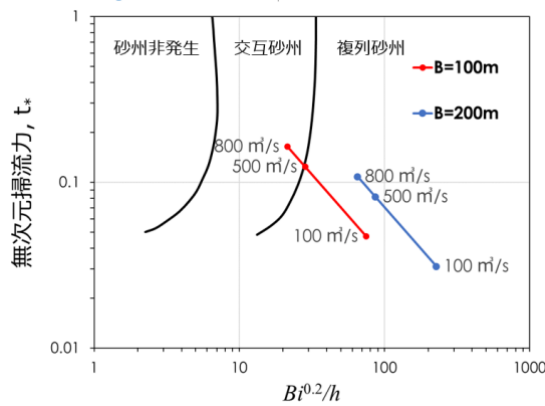


図 10：中規模河床形態の領域区分図  
( $\tau^*$ :無次元掃流力,  $B$ :川幅,  $i$ :水面勾配,  $h$ :等流水深)

ラフの総流量の増大、特にピーク流量の増大が蛇行部での河岸侵食に強く影響することを示しており、より現実に近い状況でも同様にピーク流量による侵食への影響が大きいことを示唆している。

続いて、蛇行流路が形成されなかった Case-1,5 に注目した。図 9 はそれぞれのケースで大きな洪水を与えた時点の水深コンター図である。図 2 で Case-0 の 1 回目の洪水後にはっきりと複列砂州が形成されたのに対して、Case-1 では複列砂州が崩れたような網状流路が形成されており、二回目の洪水では完全に網状流路に遷移している。このことから、蛇行流路の発達には、複列砂州から蛇行流路に移行する過程が必要であると考えられる。一方で、Case-5 についてみると、五回目にピークの大きな洪水を与えた場合でも網状流路が維持されたままであり、砂州崩壊後の網状流路の状態からでは蛇行流路が形成されにくいことが考えられる。

以上のことから計算で見られた大きな侵食を誘発する蛇行流路は複列砂州が不安定化することで形成されており、複列砂州の形成が発達の条件であると考えられる。竹林ら<sup>6)</sup>は、このような複列砂州の不安定性は左右対称な形状特性にあり、複列砂州が安定して存在する条件は非常に難しいことも実験から示している。

この複列砂州の形成について調べるために、図 10 に岸・黒木<sup>7)</sup>による砂州の領域区分図上に計算条件をプロットしたものを示す。図 10 では川幅が低水路幅 100 m の場合と、高水敷も含めた川幅 200 m の場合で流量がそれぞれ 100, 500, 800 m³/s の値をプロットしている。これを見ると、低水路幅の 100m で流量 500 m³/s 以上の場合は交互砂州領域、それ以外は複列砂州領域に入っている。この結果は、ピーク流量 500 m³/s の洪水を与えた Case-0 で複列砂州が形成されたことと一致する。一方で図 9 のように 1 回目にピーク流量 800 m³/s の洪水を与えた Case-1 で砂州が形成されなかったことについては、流量が大きすぎて水が低水路内に収まらず、全川幅での現象としての側面が強く出たため、複列砂州が形成されにくく、網状流路が現れたと考えられる。また、Case-1' では洪水継続時間を長くした影響で一回目の洪水中に複列砂州が崩壊し、網状流路が形成された。これは、複列砂州の不安定性により、高い流量が長時間流れることで

砂州形状が維持されなかった可能性があり、洪水継続時間も複列砂州の形成に影響を与え得ると言える。

#### 4. まとめ

本研究では、将来発生しうる洪水群の組み合わせにより生じる流路変動、河床形状の違いを調べることを目的として、実績流量をもとに単純化した流量ハイドログラフを基本として異なるパターン洪水群を設定し、二次元平面河床変動計算ソルバーである iRIC Nays2DH を用いて流路変動計算を行い、結果を比較した。

結果として、将来の洪水群の組み合わせだけでなく順番によっても流路変動のリスクが大きくなる場合がありうると考えられる。側方境界での侵食が広範囲にわたったケースでは、複列砂州が不安定化することで蛇行流路が形成されており、そのような砂州形状が形成されるタイミングでピークの大きな洪水が来ると、砂州が発達して侵食が促進される。また、砂州形状の発達は洪水継続時間よりもピーク流量を大きくした場合に大きく促進された。このことから長期的に発生する洪水群による流路変動では、各洪水のピーク流量のばらつきが流路の変遷に大きな影響を与え得ると考えられる。

今後はピーク流量、継続時間、洪水回数を変えて計算を行い、侵食を促進する蛇行流路および複列砂州が現れる条件に違いがみられるかを検討したい。

#### 参考文献

- 岡部和憲, 久加朋子, 清水康行, 長谷川和義, 新庄興, 山口里実: 流量ハイドログラフ形状に対する蛇行流路の移動特性~十勝川水系音更川を事例として~, 水工学論文集, Vol.74 (5), pp.1009-1014, 2018.
- 岡部和憲, 久加朋子, 山口里実, 清水康行, 新庄興, 長谷川和義: 急流河川における将来洪水流量を考慮した河岸侵食特性と河道計画に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.75, No.2, I\_1423-I\_1428, 2019.
- 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/> (閲覧日:2020 年 12 月)
- iRIC Project: <http://i-ric.org/ja/>
- 佐々木章允, 長谷川和義, 渡邊康玄: 蛇行河岸の侵食・堆積土量と出水ハイドログラフの関係-常呂川における 3D 地形計測結果と数値シミュレーション-, 令和元年度土木学会北海道支部論文報告集 第 76 号
- 竹林洋史, 江頭進治: 自己形成流路の形成過程と形成水理条件, 土木学会論文集, Vol.677, pp75-86, 2001.
- 黒木幹男・岸力: 砂州河床の発生限界について, 土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集, II-420, pp. 812-813, 1978.