

蛇行する低水路を有する複断面河道における 洪水流の流下機構と河道内被災の分析と対策 —令和2年7月球磨川洪水を例として—

ANALYSIS AND COUNTERMEASURES FOR FLOOD FLOW MECHANISMS
AND RIVER DISASTER IN COMPOUND MEANDERING RIVER
- A CASE STUDY OF THE KUMA RIVER FLOOD IN JULY 2020 -

後藤岳久¹・長谷部夏希²・向田清峻³・福岡捷二⁴

Takahisa GOTOH, Natsuki HASEBE, Kiyotaka MUKAIDA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博士(工) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1丁目13-27)

²正会員 修士(工) 株式会社東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1丁目15-6)

³正会員 国土交通省 八代河川国道事務所 流域治水課長 (〒866-0831 八代市萩原町1丁目708-2)

⁴フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1丁目13-27)

本研究では、まず、昭和56年8月石狩川洪水を対象とした掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析の解析結果を基に、複断面蛇行河道において複断面的蛇行流れが生じる機構と低水路線形との関係を明らかにした。そして、これらの知見を踏まえ、令和2年7月球磨川豪雨を対象に、複断面蛇行河道において低水路線形が及ぼす洪水流の流れ構造と河道被害との関係について分析を行った。その結果、低水路線形と堤防線形の蛇行度または位相に差があり、蛇行頂部付近の上流側に広い高水敷がある河道区間では、大規模洪水時に高水敷と低水路の流れの混合が生じ、複断面的蛇行流れが発生し得ることを示した。そして、令和2年7月球磨川豪雨においては、複断面的蛇行流れによる主流位置の変化が内岸側の河道被害発生の一因となったことを示した。本研究の成果として、大規模洪水時に複断面的蛇行流れが生じた際の流れ構造の変化や、複断面的蛇行流れが生じ得る河道区間の特徴を調べることは、今後の治水・河川環境・河川空間の利用を総合的に考慮する上で重要となる情報を与えることを示した。

Key Words : secondary flow, compound meandering channel flow, compound meandering river, non-hydrostatic pressure quasi-three-dimensional analysis, Kuma River

1. 序論

堤防線形に対して低水路線形が蛇行し、低水路沿いに広い高水敷を有する複断面蛇行河道では、大規模洪水時に相対水深(高水敷水深/低水路水深)がおおよそ0.3を超えると洪水流の主流が内岸側を走る複断面的蛇行流れが生じる¹⁾。このような流れは内岸側の河床・河岸の洗掘や内岸側に繁茂した樹木群の倒伏・流失等を引き起し、結果として、洪水中に河道の流下能力を増加させることになる。一方で、内岸寄りの主流は、内岸側の高水敷や堤防、そこに設置された護岸や構造物などに被害をもたらす危険性がある。このことから、複断面的蛇行流れの機構と低水路線形・高水敷の縦断配置とその平面形状の関係を明らかにすることは、治水と河川環境の調和する川づくりのために重要であり、新しい課題である。

これまで著者らは、複断面蛇行区間を有する石狩川河口部の昭和56年8月大洪水を対象とし、非静水圧準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS法)²⁾と掃流砂・浮遊砂を一体的に扱う河床変動解析法(Q3D-NEIBS法)を用い、複断面蛇行流路における三次元流れとそれに伴う非平衡流砂運動を解析した。その結果、洪水ピーク付近では主流が走る内岸側の河床が洗掘を受ける一方、外岸側の河床洗掘が緩和されること、洪水終了時の河床形状は、再び外岸側が洗掘を受けている河床形状に戻り、洪水中に著しい流れ構造変化と河床変動が生じることを明らかにした³⁾。

本研究が対象とする令和2年7月球磨川豪雨では、洪水ピーク流量が計画高水流量を超える大規模洪水が発生し、河川水位が軒並み堤防天端を越え、河道を低水路、堤内地を高水敷として洪水流が激しい複断面的蛇行流れとなって流下した⁴⁾。このことにより、図-1、図-2に示すように、河道の内岸側で橋梁や護岸の被災、樹木群の倒



図-1 球磨川の55km~72km区間の航空写真と本検討で対象とする河道被害箇所



(a)天狗橋(56km)の被災状況



(b)樹木群(64km~66km)の倒伏・流失状況

図-2 令和2年7月球磨川豪雨による河道被災状況

伏・流失が生じた。

本研究では、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う高精度な非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法を用い²⁾、まず、石狩川の昭和56年8月大洪水を例として、複断面的蛇行流れが生じる機構を説明する。そして、これらの知見を踏まえ、令和2年7月球磨川豪雨における河道被害と複断面蛇行河道の堤防線形と低水路線形の位相差が及ぼす洪水流の流れ構造に基づいて、複断面的蛇行流れの分析を行う。最後に、大規模洪水被害に備えた複断面蛇行河道の河道計画，管理への活用を示す。

2. 複断面蛇行区間を有する石狩川河口部における昭和56年8月大洪水時の複断面的蛇行流れの発生機構

本章では、著者らの解析結果³⁾に基づき、複断面蛇行区間を有する石狩川河口部の昭和56年8月大洪水時について、複断面的蛇行流れが発生する機構と低水路線形との関係に着目して分析する。

図-3は7.5km地点の解析水位ハイドログラフと横断面形状，相対水深の関係を示す。また，図-4は複断面蛇行区

間の水深平均流速分布の時間変化を示し，図-5は蛇行頂部付近である5.0km地点の主流方向流速分布と二次流分布の解析の時間変化を示す。図-4(a),図-5(a)より，8/4 23時頃では，5.0km地点において洪水流は高水敷上を流れているが，図-3に示すように，その上流区間の相対水深が小さく，上流区間の高水敷から低水路への流入量が少ない。このため，高水敷上の流れと低水路の流れの混合が小さく，この時間帯では，湾曲部で一般的に見られる流れの遠心力による第1種二次流が生じ単断面的蛇行流れとなっている。

しかし，5.5kmより上流区間で相対水深が約0.3を超えると(8/5 6:00以降，図-3)，上流区間の左岸高水敷から比較的遅い流れが5.5km付近の低水路の外岸側に相当量流入し，これにより，低水路と高水敷の流れが激しく混合するようになり，低水路内では第1種二次流とは逆回りの二次流が生じ始めている(図-5(b))。洪水ピーク付近では，左岸高水敷から低水路に流入してくる量がさらに多くなることで流れの混合が一層激しくなり，逆回りの二次流がより発達している。これにより，外岸側の流速がやや低減すると共に，高流速の発生位置がより内岸側に遷移し，複断面的蛇行流れが生じている(図-4(b)，図-5(c))。

図-4には，堤防線形と低水路線形の蛇行度，堤防線形と低水路線形の蛇行の位相差を併せて示しており，石狩川では，低水路線形の蛇行度が $S=1.46$ ，堤防線形の蛇行度が左岸側で $S=1.31$ ，右岸側で $S=1.12$ であり，右岸側堤防と低水路の線形の位相差は $\phi \approx \pi / 7$ である。このように，堤防線形と低水路線形との間に蛇行度差や位相差があることにより，大洪水時には高水敷の遅い流れが低水路に流入するようになる。これにより，低水路と高水敷の流れの激しい混合が逆回りの二次流を引き起こし，複断面的蛇行流れを生じさせることが分かった。

3. 令和2年7月球磨川豪雨における複断面蛇行河道の低水路河道線形が及ぼす洪水流の流れ構造と河道被害の関係

本章では石狩川の検討で明らかとなった複断面的蛇行

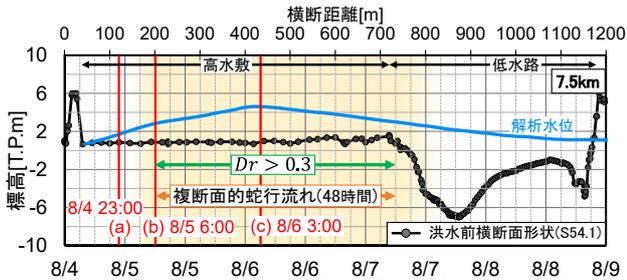
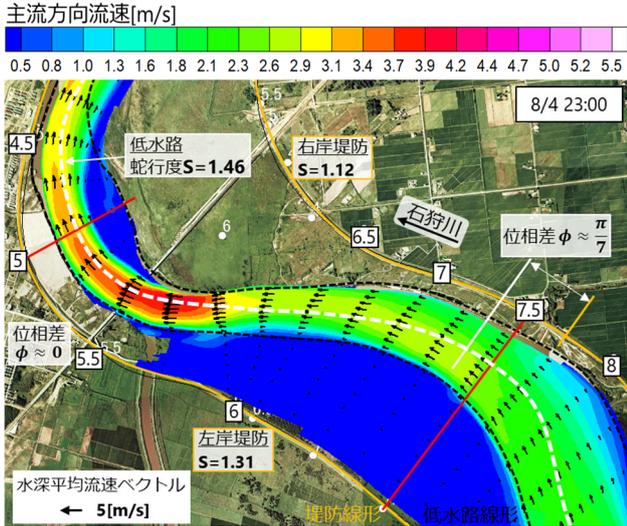
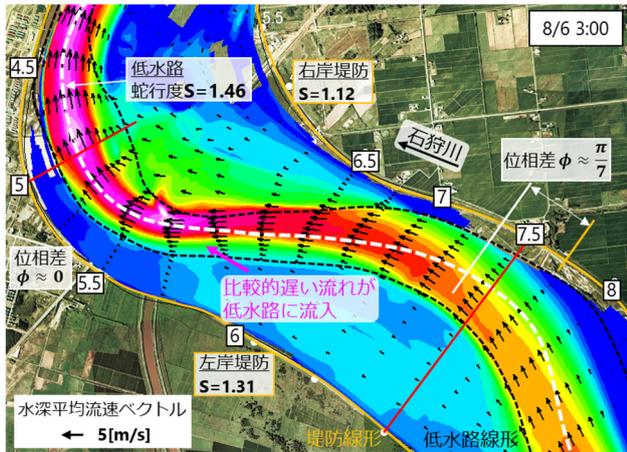


図-3 7.5km地点の解析水位ハイドログラフと横断面形状



(a)洪水増水期(8/4 23:00)



(b)洪水ピーク時(8/6 3:00)

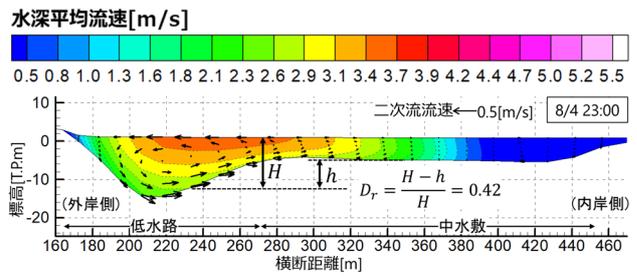
図-4 複断面蛇行区間の水深平均流速分布の時間変化

流れの機構に基づき、甚大な被害が生じた令和2年7月球磨川豪雨を対象とし、複断面蛇行河道における低水路線形が及ぼす洪水流の流れ構造と低水路・堤防線形、これらと河道被害状況との関係进行分析する。本研究では田端ら⁴⁾の解析結果を用いており、解析法については既往論文⁴⁾を参照されたい。

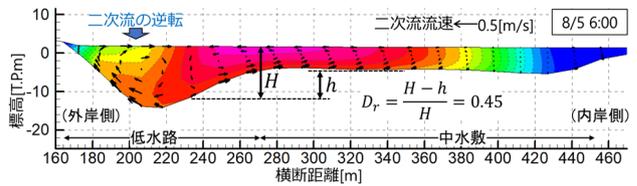
(1) 内岸側の橋台背面盛土が流失した天狗橋周辺の河道線形と流れ構造、河道被害の関係

図-1,図-2(a)に示す天狗橋(56km)では、内岸側の堤防付近に位置する橋台背面の盛土が流失する被害が生じた。

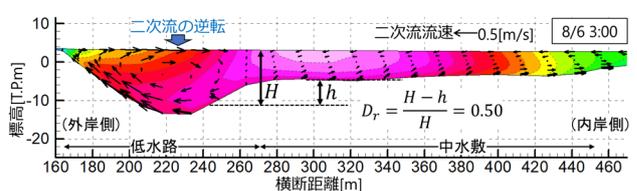
図-6は56.6km地点の解析水位ハイドログラフと横断面形



(a)洪水増水期(8/4 23:00)|5.0km地点



(b)8/5 6:00|5.0km地点



(c)洪水ピーク時(8/6 3:00)|5.0km地点

図-5 5.0km地点の主流方向流速分布と二次流分布の時間変化

状、相対水深の関係を示し、図中の Dr_1 は高水敷の水深と低水路の水深との比である相対水深を示しており、 Dr_2 は氾濫域の水深と河川区域(高水敷+低水路)の水深との相対水深を示す。また、図-7は天狗橋(56km)付近における解析結果の水深平均流速分布の時間変化を示し、図-8は56km地点における解析結果の主流方向流速分布と二次流分布の時間変化を示す。

図-7(a)より、7月4日7時では56km(天狗橋)における Dr_1 は0.3を超えているが、56kmより上流区間の氾濫域からの流入が少なく混合が弱いため、この時間帯では通常第1種二次流が生じている(図-8(a))。しかし、河川水位が堤防天端高を上回り、浸水範囲が谷幅一杯に広がり、氾濫域と河川区域との相対水深 Dr_2 が約0.3を超える時間帯(7/4 7:30-12:30頃、図-6)になると、河道が低水路、堤内地が高水敷のように振舞う流れとなる。これにより、氾濫域の比較的遅い流れが56km付近の外岸側に相当量流入し、強い流れの混合が生じることにより、石狩川の解析結果に見られたような第1種二次流とは逆回りの二次流が56km地点で生じ始め(図-8(b))、高速流の発生位置も内岸側に遷移している(複断面的蛇行流れ)。さらに、洪水ピーク付近になると氾濫域からの流入量が増加し(図-7(b))、流れの混合が激しくなることで逆回りの二次流が発達し、高速流の発生位置が内岸側の被災橋台付近まで移動している(図-8(c))。このような流れ場の変化は、図-9の洪水前後の横断面形状の変化に示すように、56km地点の天狗橋の内岸橋台周辺の洗掘を生じさせ、これが橋台背面盛土の流失の一つの要因となったものと考えられる。

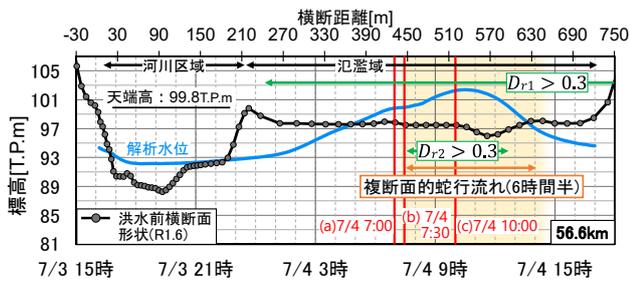
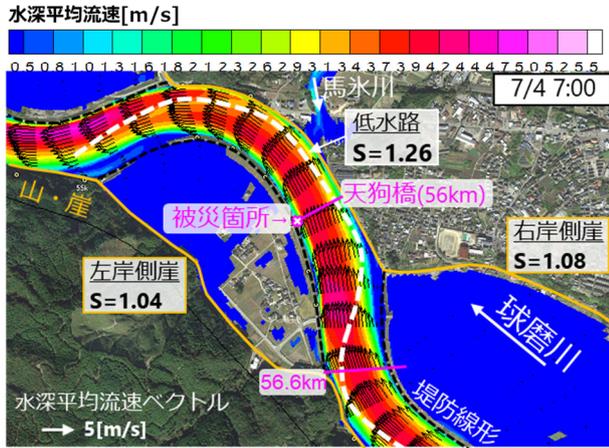
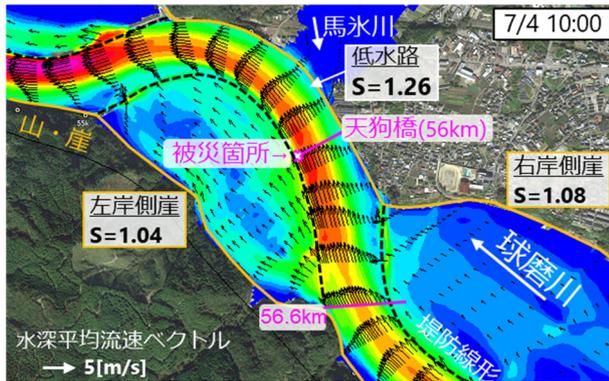


図-6 56.6km地点の解析水位ハイドログラフと横断面形状



(a)堤防満杯時(7/4 7:00)



(b)洪水ピーク時(7/4 10:00)

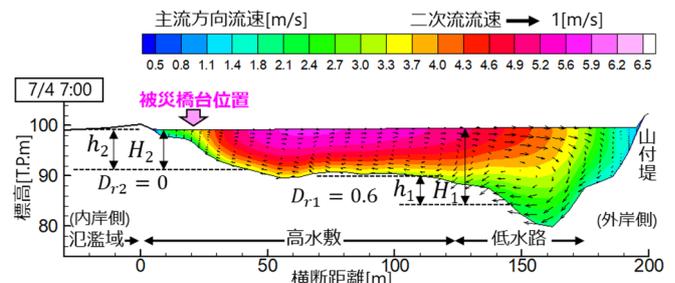
図-7 天狗橋(56km)付近の水深平均流速分布の時間変化

図-7には低水路線形と兩岸の崖の蛇行度も併せて示しており、この区間の低水路線形と流れ場の関係を考察する。洪水ピーク付近の流れの河幅を規定する兩岸の崖の線形の蛇行度は左岸側で $S=1.04$ 、右岸側で $S=1.08$ であるのに対し、低水路線形の蛇行度は $S=1.26$ とその差は大きく、洪水ピーク付近では堤内地の流れが低水路に流入するような河道線形を有していることが分かる。

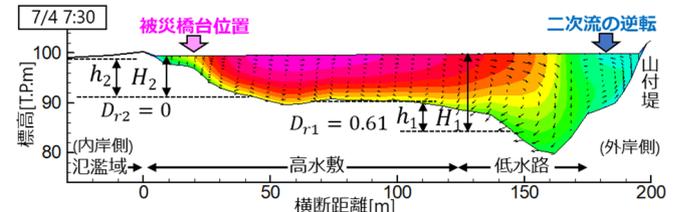
(2) 内岸高水敷上の樹木群が流失した64km~66km区間の河道線形と流れ構造、河道被害の関係

図-1、図-2(b)は64km~66km区間における内岸側の高水敷に繁茂していた樹木群の倒伏範囲と流失範囲を示す。この区間では、内岸側に繁茂していた樹木群が全体的に倒伏し、赤枠で示す河岸際の樹木群は流失した。

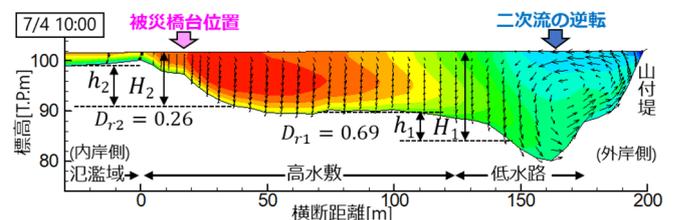
図-10は64.6km地点の解析水位ハイドログラフと横断面形状、相対水深の関係を示す。また、図-11は樹木群の



(a)堤防満杯時(7/4 7:00) | 56km地点



(b)7/4 7:30 | 56km地点



(c)洪水ピーク時(7/4 10:00) | 56km地点

図-8 56km地点の主流方向流速分布と二次流分布の時間変化

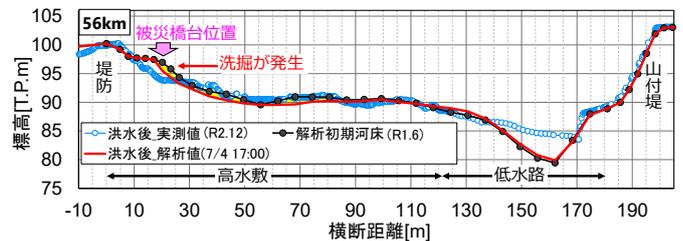


図-9 56km地点の洪水前後の横断面形状の変化

倒伏・流失が生じた64km~66km区間の洪水ピーク時の水深平均流速分布を示し、図-11には堤防線形と低水路線形の蛇行度も示している。この区間は堤防線形が左岸側で $S=1.38$ 、右岸側で $S=1.47$ であるのに対し、低水路線形の蛇行度は $S=1.46$ とほぼ同程度であり、両者の位相差は殆どない河道線形を有している。

図-12は64.6km地点の主流方向流速分布と二次流分布の解析の時間変化を示し、図-13は64km~66km区間における洪水前後の解析河床変動高のコンター図を示す。図-11より、この区間の上流の左岸側は山付堤となっており広い高水敷を有していないこと、上記のように堤防線形と低水路線形の蛇行度と位相がほぼ同程度であることから、高水敷から低水路への遅い流れの流入量が制限され、相対水深が0.3を超えても二次流の逆転は生じず、明確な複断面的蛇行流れは生じていない。しかし、64.6km付近は湾曲部の入り口付近に位置するため、最大流速が比較的内岸寄りに生じており、内岸高水敷上の樹木群前面付近で河床洗掘を受け(図-13)、樹木群の倒伏・流失が生じた。

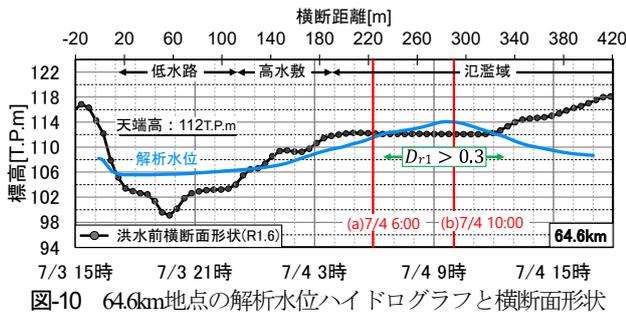


図-10 64.6km地点の解析水位ハイドログラフと横断面形状

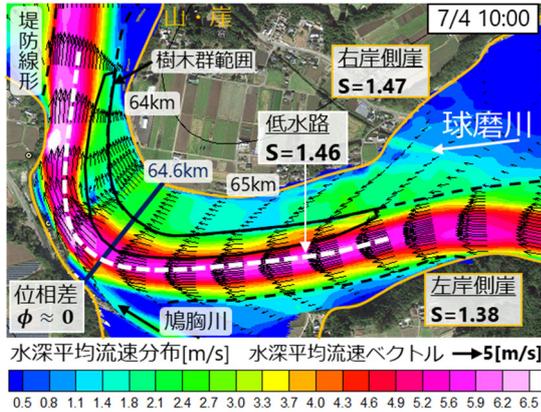


図-11 64-66km区間の水深平均流速分布 (洪水ピーク時)

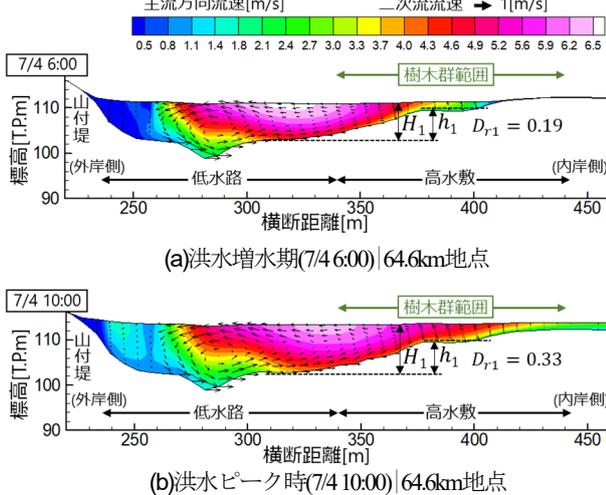


図-12 64.6km地点の主流方向流速分布と二次流分布の時間変化

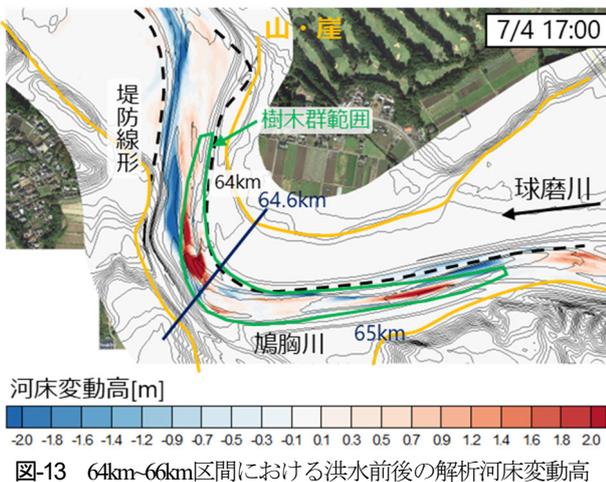


図-13 64km-66km区間における洪水前後の解析河床変動高

さらに相対水深が増大すると、63.8km付近で右岸氾濫域等から低水路への流入量が多くなり、この付近の流れの混合が一層激しくなることで、二次流の逆転を伴う複断面的蛇行流れが生じるものと考えられる。

4. 複断面的蛇行流れの生じる機構と低水路・堤防線形の関係

図-14は、石狩川と球磨川の検討結果を基に作成した、二次流の逆転を伴う複断面的蛇行流れの発生機構と河道条件との関係を説明する模式図である。図-14(a)は、低水路が蛇行し両岸に広い高水敷を有する河道であり、石狩川河口部の蛇行区間の流れ場と対応する。このような区間では、相対水深が約0.3以上になると高水敷上の比較的遅い流れが速い流れの低水路に流入し、逆回りの二次流を伴う激しい流れの混合が生じる。これにより、外岸側の流速の増加が抑制される一方で、内岸側に高速流が発生する複断面的蛇行流れが形成される。

図-14(b)は片側の一部区間の高水敷は狭く、堤防が低水路に比較的接近している河道であり、氾濫域が高水敷のようになった球磨川天狗橋付近の流れ場と対応する。このような区間では、上流側の断面1では図-14(a)と同様に高水敷と低水路の流れが混合し二次流の逆転が生じる。断面2では左岸側の高水敷が狭くなっているが、その上流側の広い右岸高水敷上の遅い流れが低水路へ流入し、低水路の速い流れは左岸の高水敷へ流出し、さらに、その下流の左岸高水敷上の遅い流れは低水路に流入することで、二次流の逆転による激しい流れの混合が生じ、図-14(a)と同様に、外岸側の流速の増加が抑制される一方で、洪水流の主流が内岸寄りになる。

図-14(c)は、片側の全体の高水敷が狭く堤防が接近している河道であり、球磨川の64km-66km区間に対応する。このような区間において、断面2付近では、蛇行部の入り口付近で比較的内岸側で高速流が生じるものの、左岸から低水路への遅い流れの流入が少ないため、相対水深が0.3を相当超えてもなお通常の第1種二次流が生じたままであり、明確な複断面的蛇行流れは生じにくい。この結果、蛇行頂部より下流では外岸側が主流となる湾曲流れとなり、外岸河床の洗掘が進行するものと考えられる。

以上の検討結果を整理すると、球磨川天狗橋付近や石狩川蛇行部のように、低水路線形と堤防線形の蛇行度 S または位相に差がある河道区間では、それらの差により、蛇行頂部付近の上流側に広い高水敷が存在するようになる。このような高水敷配置の特徴を有する河道区間において、大規模洪水時には、高水敷から低水路への流れの流入と対岸の高水敷への流れの流出が相当量生じるため、第1種二次流とは逆回りの二次流が発生し、激しい流れの混合が生じるようになる。これにより、外岸側

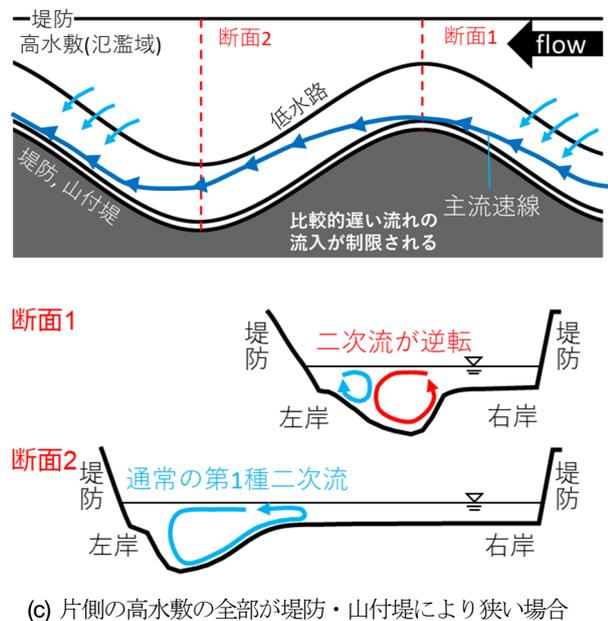
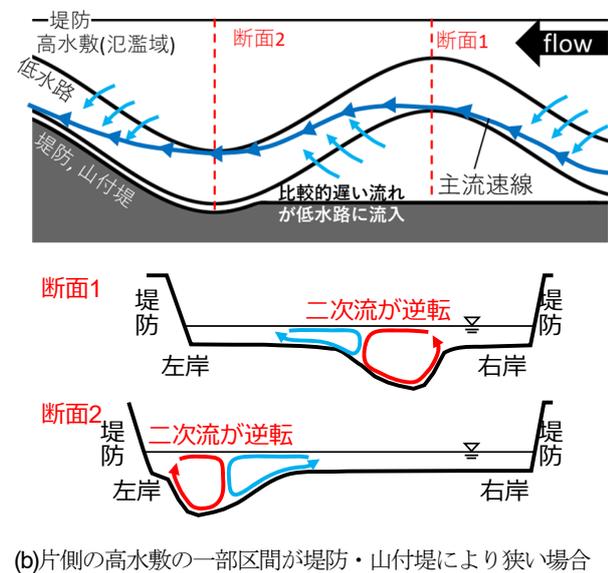
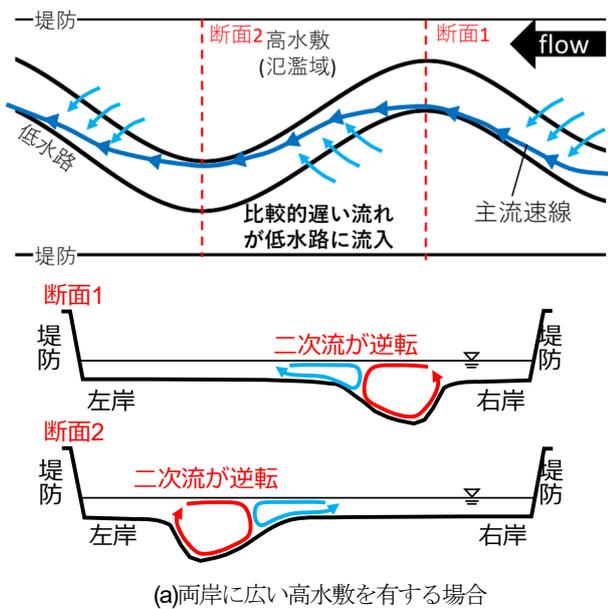


図-14 複断面的蛇行流れの発生機構と河道条件

の流速の増加が抑制される一方、高速流は内岸側を走るようになり、複断面的蛇行流れが生じることが分かった。従って、複断面蛇行区間を有する様々な河川において、相対水深と堤防・低水路線形の蛇行度・位相差等の関係を整理し、複断面的蛇行流れが生じ得る河道条件を明らかにすることが、今後発生し得る大規模洪水に備え、治水と環境の調和した河道計画・設計を行う際の重要な情報となることを示した。

5. 結論

本研究では、まず、石狩川昭和56年8月大洪水を対象とし、河口に近く浮遊砂の多い河道において、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析に基づき、複断面的蛇行流れにおいて生じる流れ構造と複断面河道の低水路線形の関係について明らかにした。そして、これらの知見を踏まえ、令和2年7月球磨川豪雨における複断面蛇行河川の河道被害と低水路線形が及ぼす洪水流の流れ構造の関係について分析した。

検討結果より、複断面蛇行河道区間において、低水路線形と堤防線形の蛇行度または位相に差があり、低水路沿いに広い高水敷がある場合には、大規模洪水時に高水敷と低水路の流れの激しい混合が生じることにより、複断面的蛇行流れが発生し得ることを示した。そして、これらの流れの構造により令和2年7月球磨川豪雨では、内岸側での被災がもたらされた。

本研究で示した複断面的蛇行流れの機構を踏まえ、複断面的蛇行流れが生じる河道区間の特徴を把握することは、大規模洪水への対策が必要な河道区間や河川構造物を検討する際に有用であり、さらには、今後の治水・河川環境・河川空間の利活用を総合的に考慮する上でも重要な情報となることを示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 2) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文集B1(水工学)，Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019。
- 3) 長谷部夏希，後藤岳久，福岡捷二，榎井正将：掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法の開発と昭和56年8月石狩川洪水への適用，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.78, No.2, pp.I_967-I_972, 2022。
- 4) 田端幸輔，後藤岳久，竹村吉晴，酒匂一樹，福岡捷二：令和2年7月球磨川豪雨における洪水流と氾濫流の一体解析による人吉市街地と狹隘区間の集落の被害分析，河川技術論文集，第27巻，pp.597-602, 2021。

(2023. 3. 24受付)