

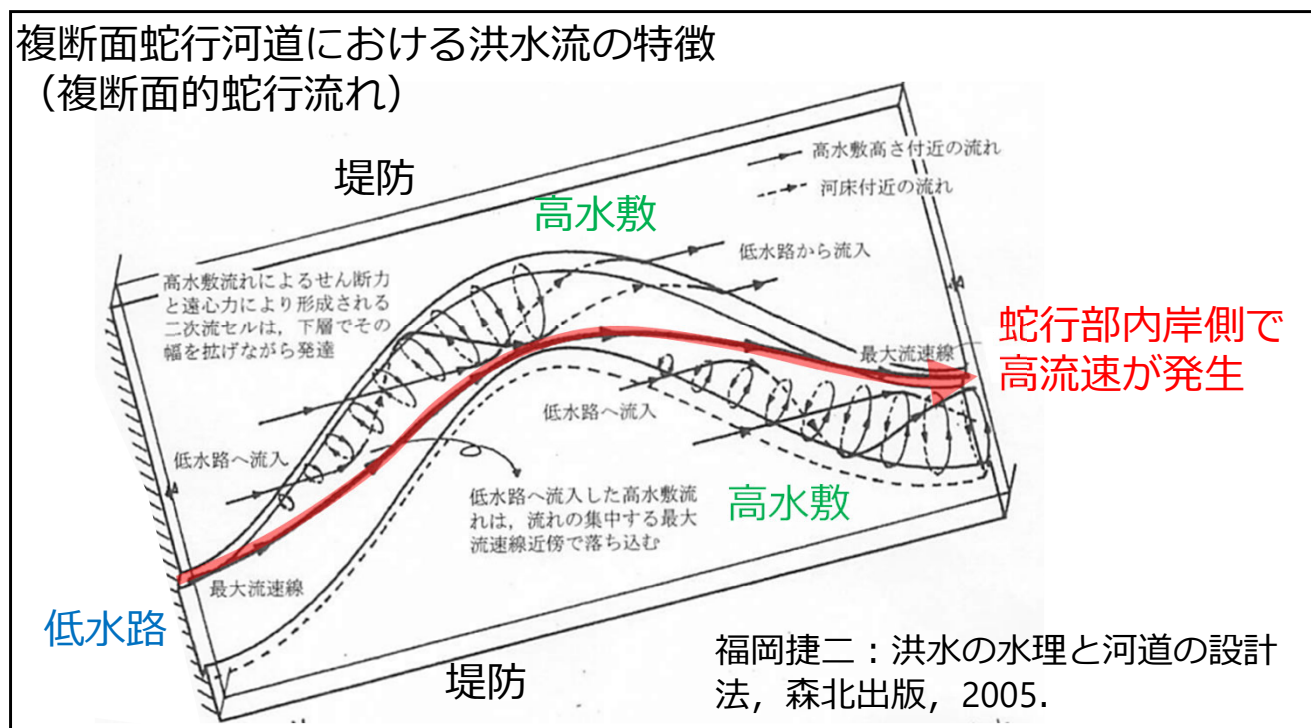
蛇行する低水路を有する複断面河道における
洪水流の流下機構と河道内被災の分析と対策
—令和2年7月球磨川洪水を例として—

中央大学研究開発機構
株式会社東京建設コンサルタント
国土交通省 八代河川国道事務所 流域治水課長
中央大学研究開発機構

○後藤岳久
長谷部夏希
向田清峻
福岡捷二

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。

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。



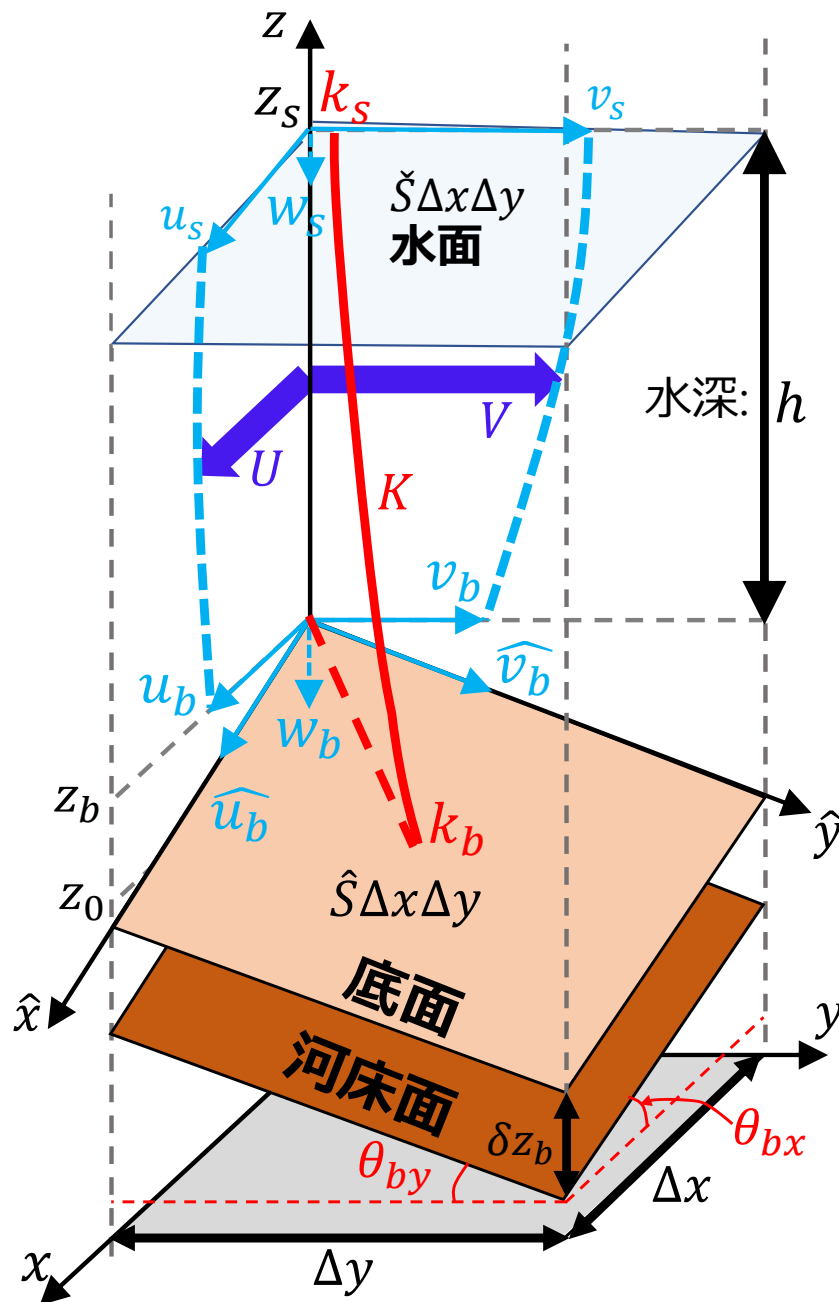
本研究では、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う高精度な非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法(Q3D-NEIBS)を用い、まず、石狩川の昭和56年8月大洪水を例として、複断面的蛇行流れが生じる機構を説明する。

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。

非静水圧準三次元洪水流解析法の枠組み(Q3D-FEBS)

流れの解析法には、水深積分モデルの枠組みで非静水圧分布と3次元流れを評価できるQ3D-FEBS法(竹村・福岡, 2019)を用いる。



流れの解析

水深積分の連続式 h 水面の運動方程式 u_{si}

水深積分の運動方程式 U_i 底面の運動方程式 u_{bi}

乱れの解析

水深積分の乱れエネルギーの輸送方程式 K

水面の乱れエネルギーの輸送方程式 k_s

底面の乱れエネルギーの輸送方程式 k_b

流速鉛直分布

$$\overline{u_i(\eta)} = \overline{U_i} + \Delta \overline{u_i}(12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta \overline{u_i}(4\eta^3 - 3\eta^2)$$

$$\Delta \overline{u_i} = \overline{u_{si}} - \overline{U_i}, \quad \delta \overline{u_i} = \overline{u_{si}} - \overline{u_{bi}}$$

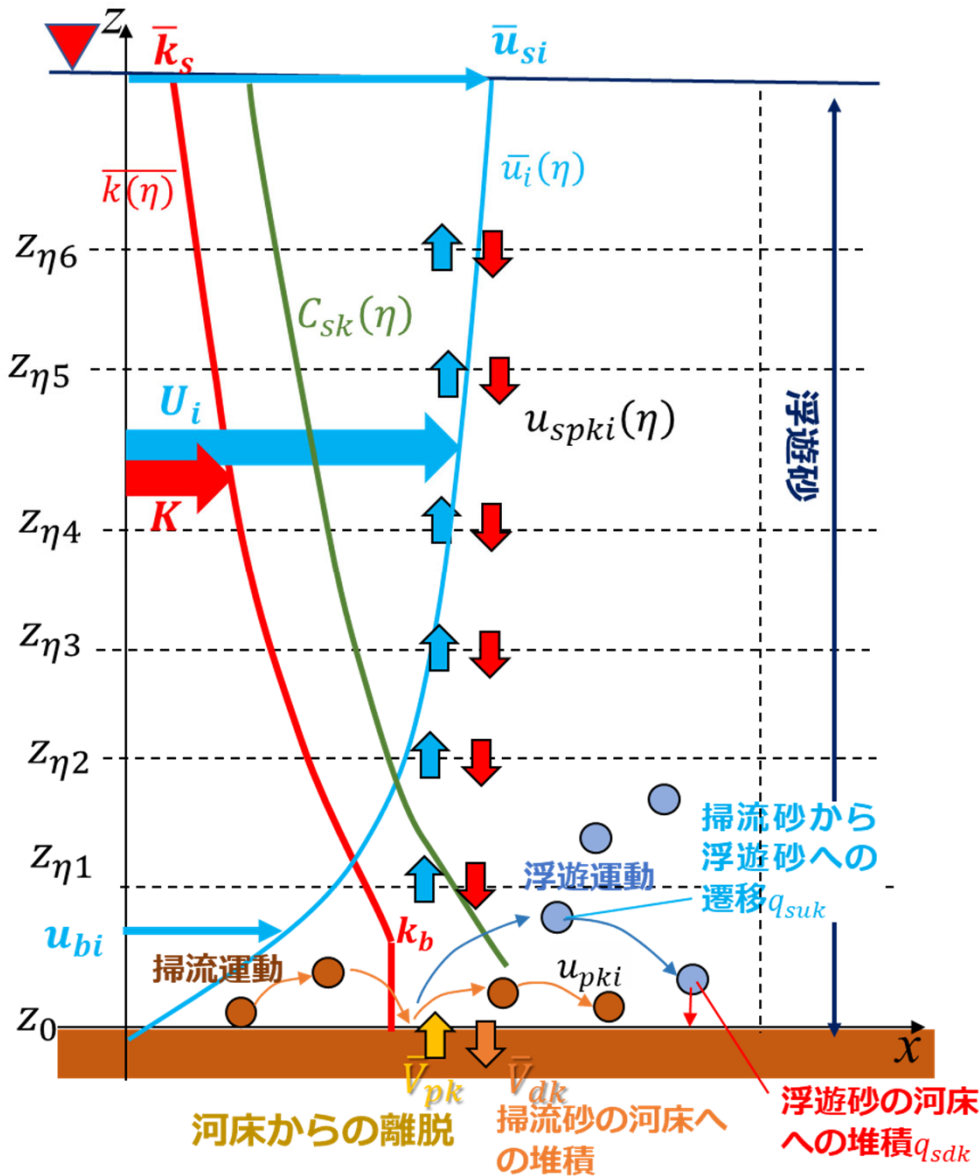
乱れエネルギーの鉛直分布

$$\overline{k(\eta)} = \overline{K} + \Delta \overline{k}(12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta \overline{k}(4\eta^3 - 3\eta^2)$$

$$\Delta \overline{k} = \overline{k_s} - \overline{K}, \quad \delta \overline{k} = \overline{k_s} - \overline{k_b}$$

掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う河床変動解析法(Q3D-NEIBS)

河床変動解析法には、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱うことで非平衡流砂運動を考慮した河床変動解析法(Q3D-NEIBS, 長谷部ら, 2021)を用いる。



各高さの浮遊砂の連続式 $C_{sk}(\eta)$

$$\frac{\partial C_{sk}(\eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_{skx}(\eta)}{\partial x} + \frac{\partial q_{s ky}(\eta)}{\partial y} + \frac{\partial q_{skz}(\eta)}{\partial z} = 0$$

$$q_{ski}(\eta) = C_{sk}(\eta) u_{ski}(\eta)$$

● 浮遊砂粒子の平均移動速度

底面でのフラックス: $q_{skzb} = q_{suk} - q_{sdk}$

掃流砂体積の連続式 \bar{V}_{bk}

● 単位面積あたりの流砂体積
 $i = 1, 2 (x_1 = x, x_2 = y)$

$$\frac{\partial \bar{V}_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{q}_{bjk}}{\partial x_j} = (\bar{V}_{pk} - \bar{V}_{dk} - \bar{q}_{suk}) \hat{S}$$

● 掃流砂から浮遊砂への遷移割合

$$\hat{q}_{bjk} = \bar{V}_{bk} \hat{u}_{pik}$$

● 掃流砂の堆積割合
 ● 河床からの離脱割合
 ● 掃流砂粒子の平均移動速度

● 河床からの離脱割合

河床の連続式 z_0

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} = -\frac{\alpha_2}{\alpha_3} \sum_{k_{max}} (\bar{V}_{pk} - \bar{V}_{dk} - q_{sdk})$$

● 掃流砂の堆積割合
 ● 浮遊砂の堆積割合

掃流砂

石狩川河口の特徴

河床材料は細砂0.4mm程度で構成され、洪水時に浮遊砂の卓越した土砂移動となる。

大規模洪水時には河口蛇行部において、複断面的蛇行流れとそれに伴う、河床変動が生じる。

平成17年8月洪水時(ピーク流量約4,800m³/s)

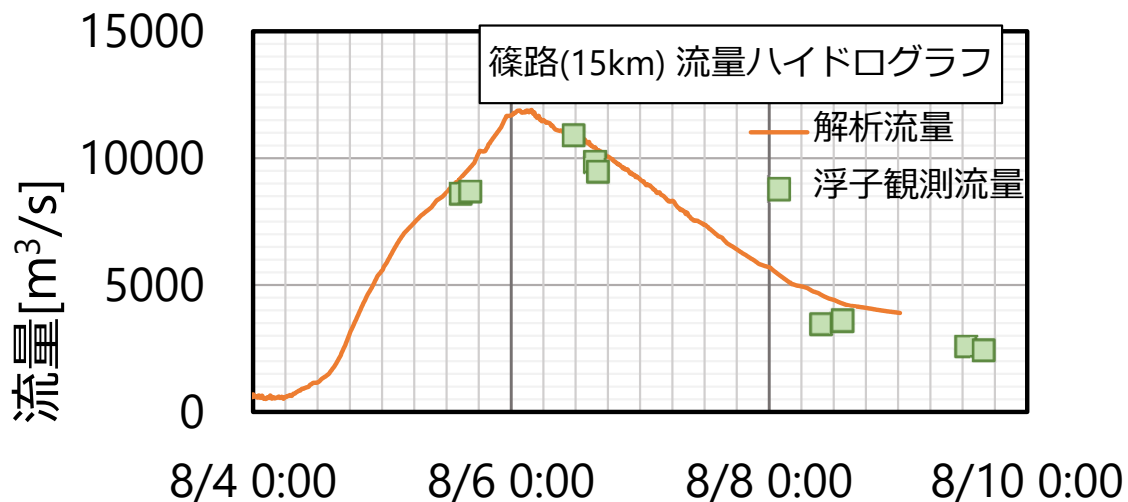


平成17年洪水8月洪水時(約4,800m³/s)

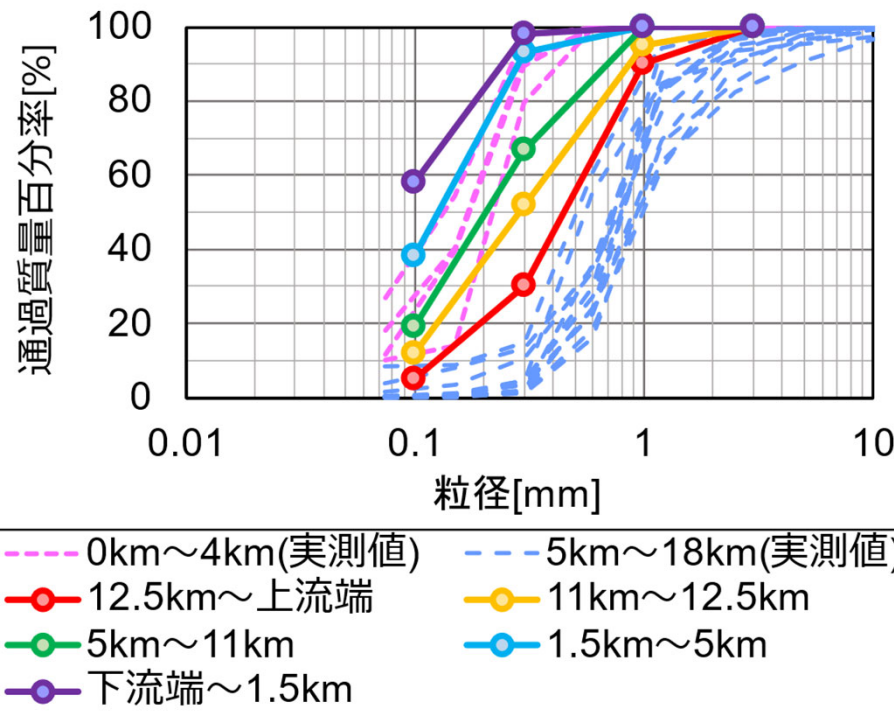


昭和56年8月石狩川洪水の観測体制と解析条件

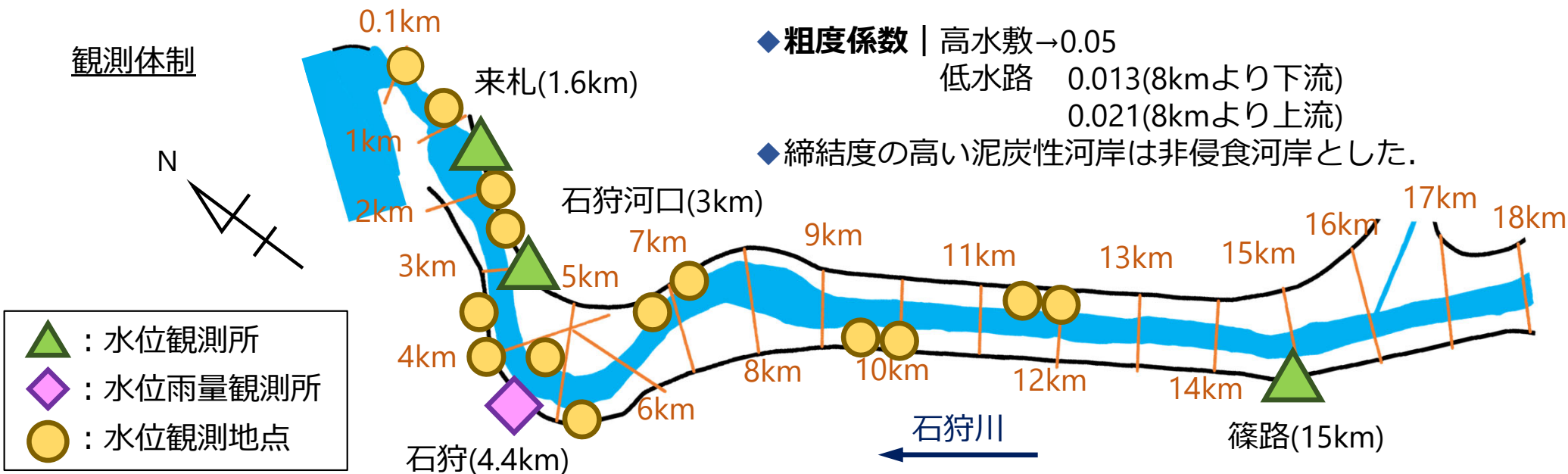
昭和56年8月石狩川洪水は、当時の計画を超える洪水であり、本洪水では、国土交通省北海道開発局により、河口部の詳細な洪水水面形時系列、流量、河床形状等の大規模な観測を行い、貴重な観測データが得られている。



解析に用いた粒度分布

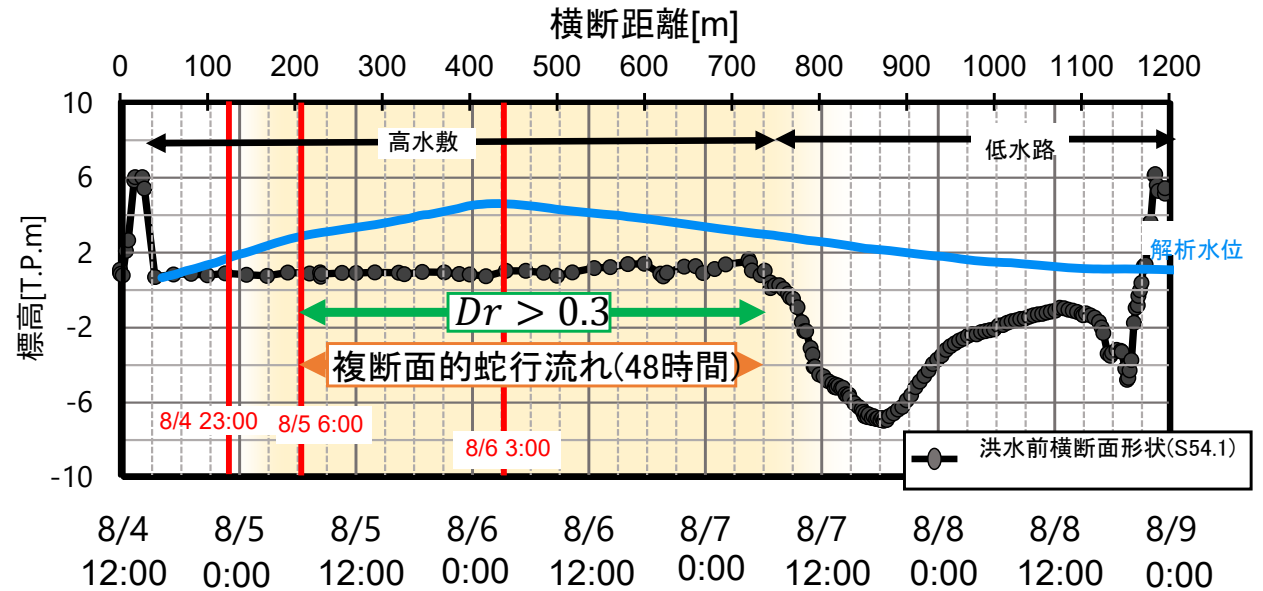
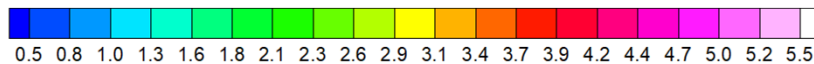
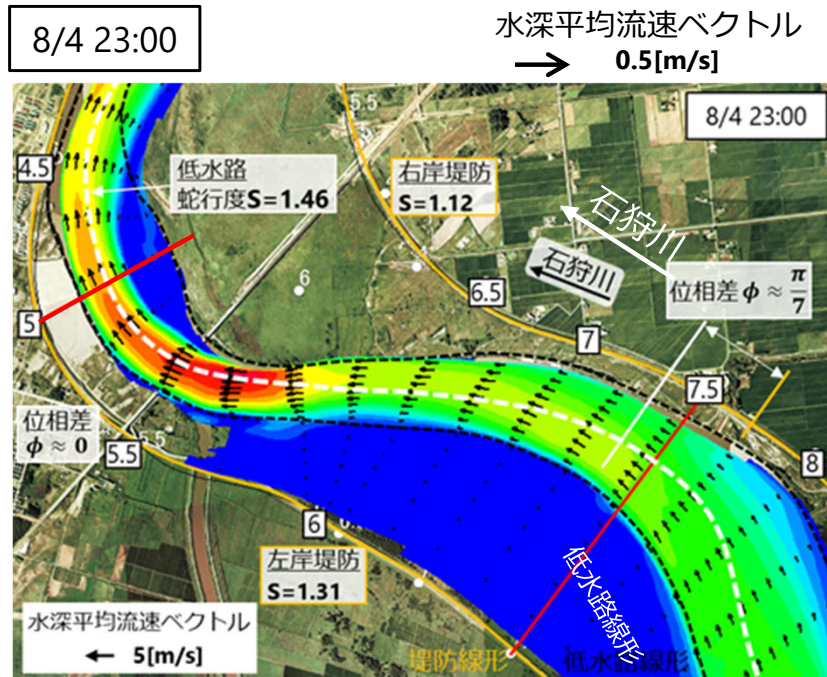


観測体制



石狩川の複断面蛇行区間における流速分布の時間変化(8/4 23:00)

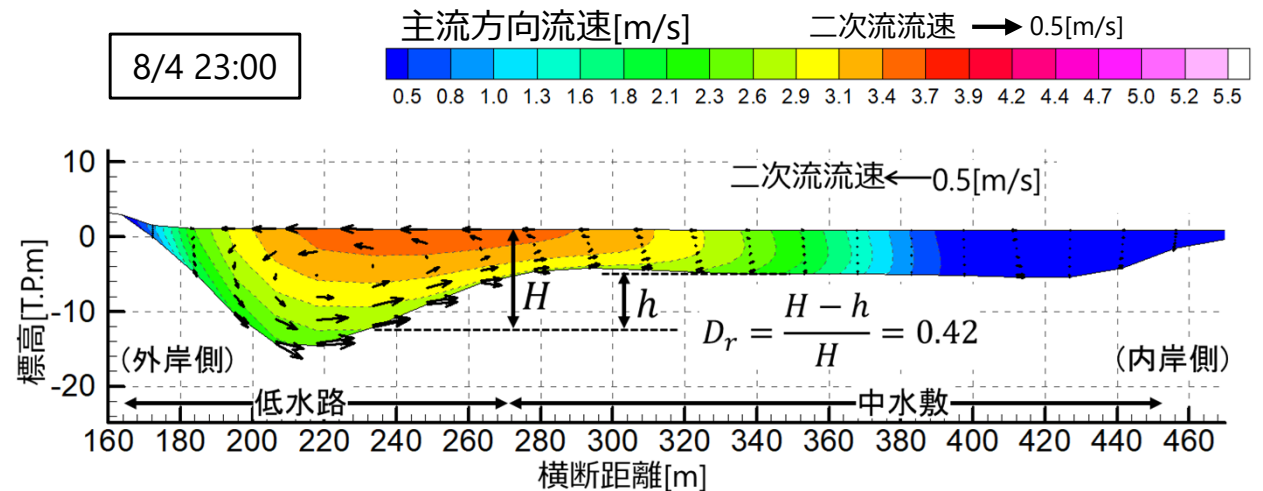
洪水増水期(8/4 23:00)の水深平均流速分布



5.0km地点の二次流の解析結果

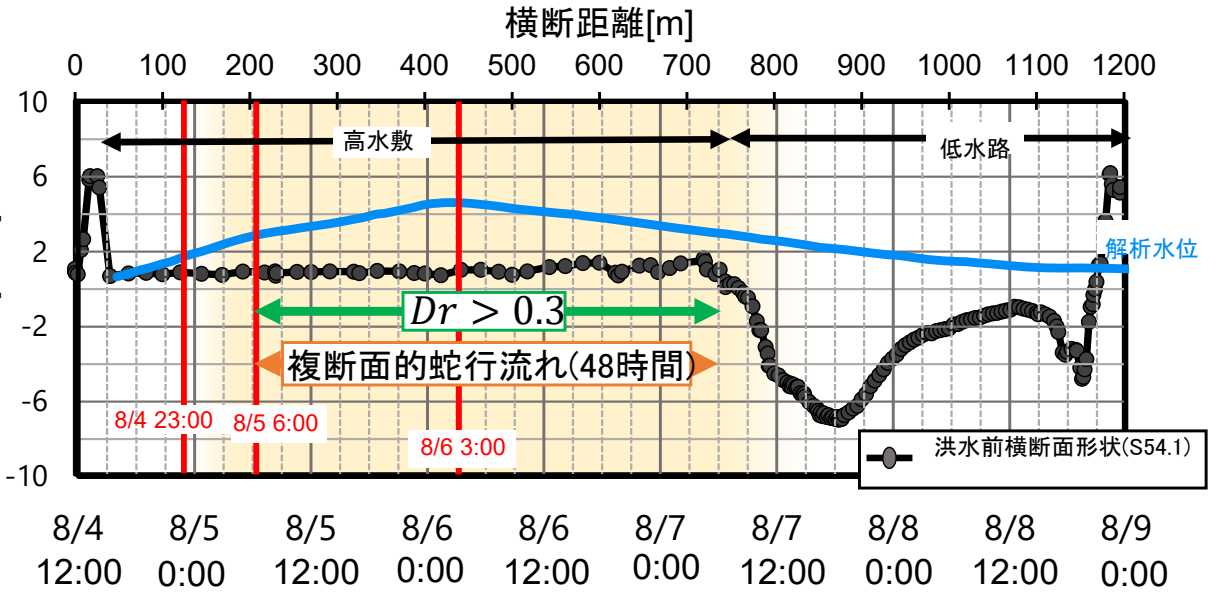
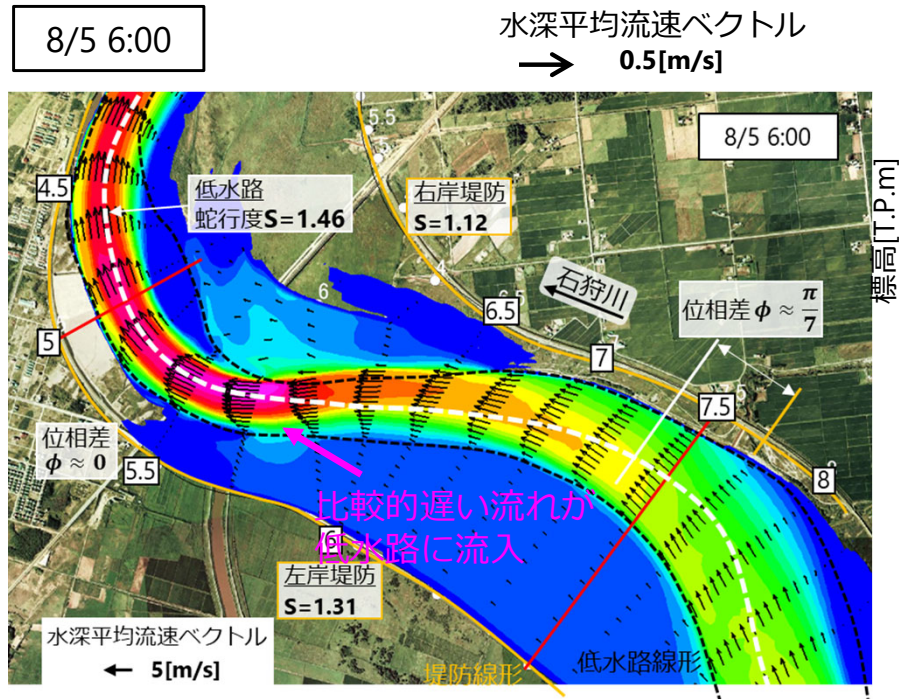
洪水増水期(8/4 23:00) | 単断面的蛇行流れ

- 当該蛇行部の上流区間の相対水深が0.3以下の場合、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。



石狩川の複断面蛇行区間における流速分布の時間変化(8/5 6:00)⁹

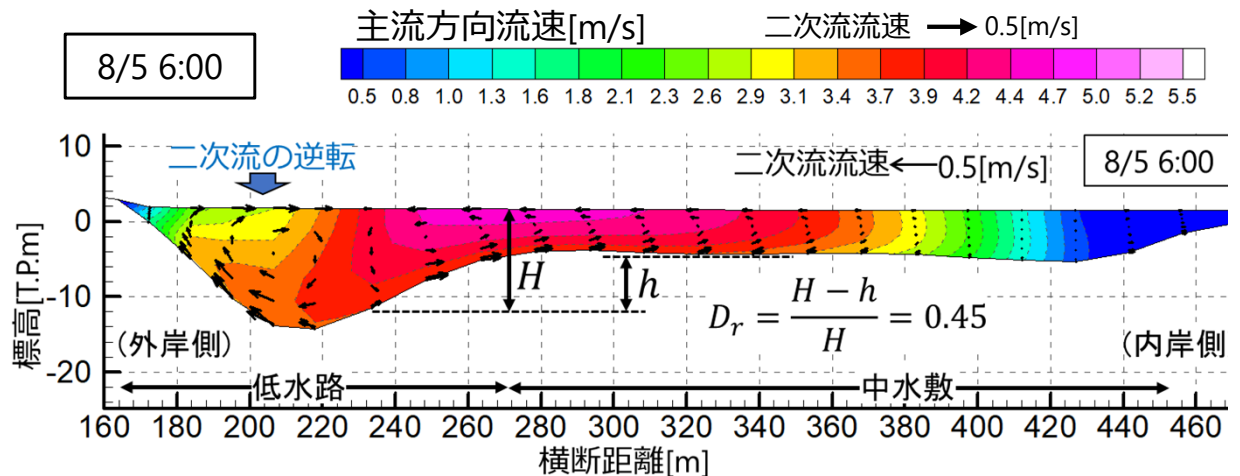
洪水増水期(8/5 6:00)の水深平均流速分布



5.0km地点の二次流の解析結果

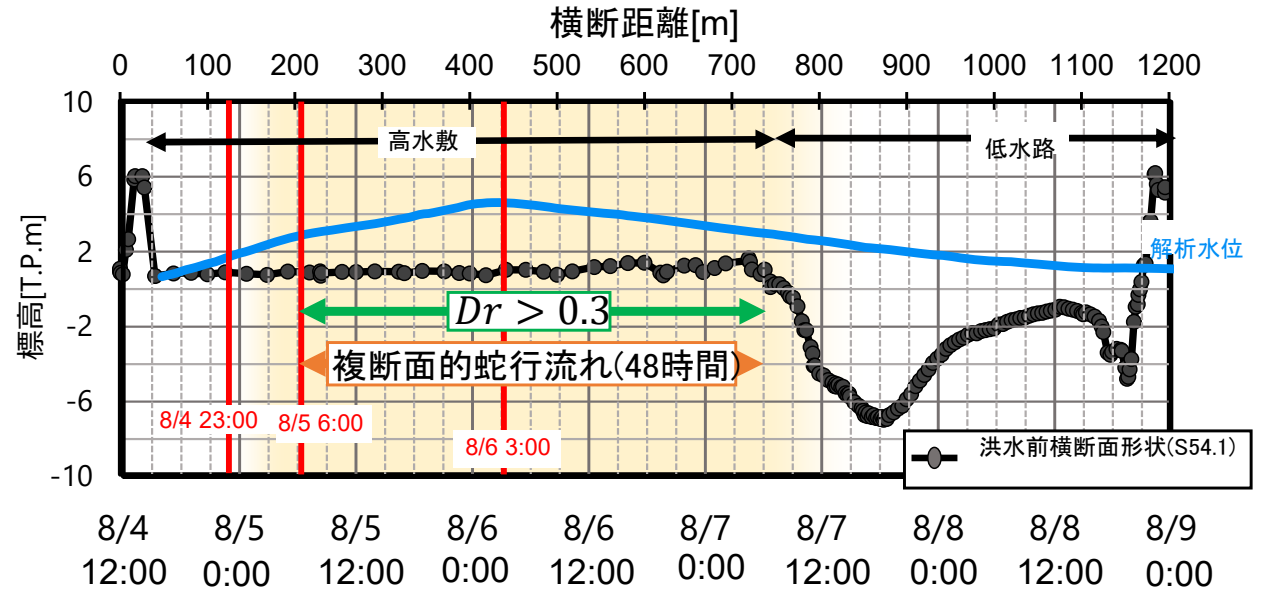
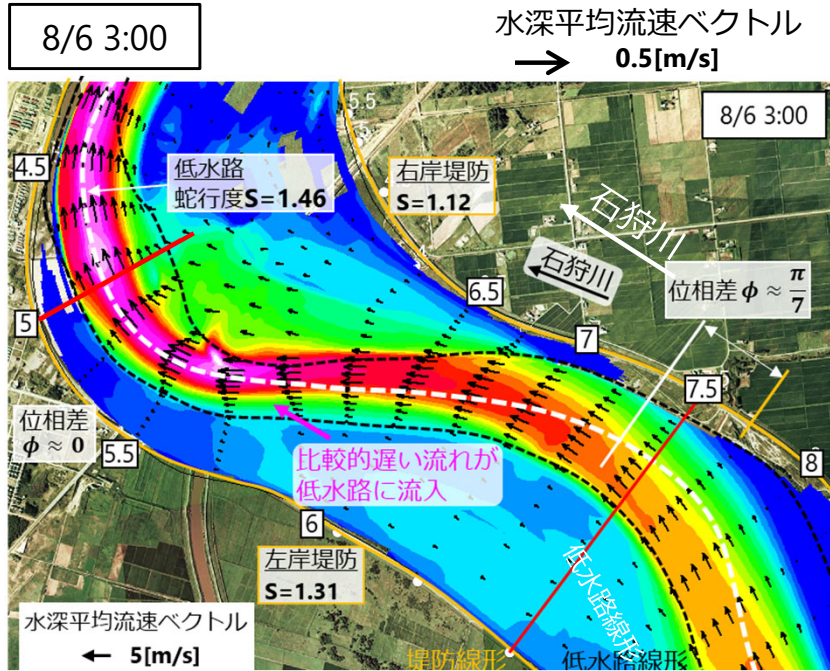
洪水増水期(8/5 6:00) | 複断面的蛇行流れ

- 当該蛇行部の上流区間の相対水深が約0.3を超えると(8/5 6:00以降), 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するようになる。
- 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。(複断面的蛇行流れ)



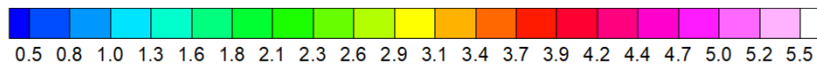
石狩川の複断面蛇行区間における流速分布の時間変化(8/6 0:00)

洪水増水期(8/6 3:00)の水深平均流速分布

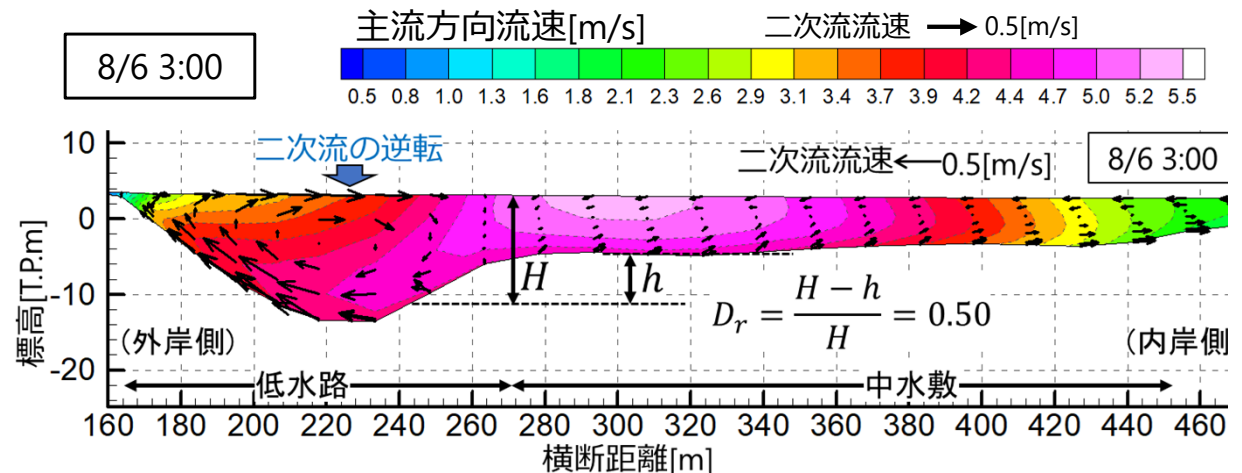


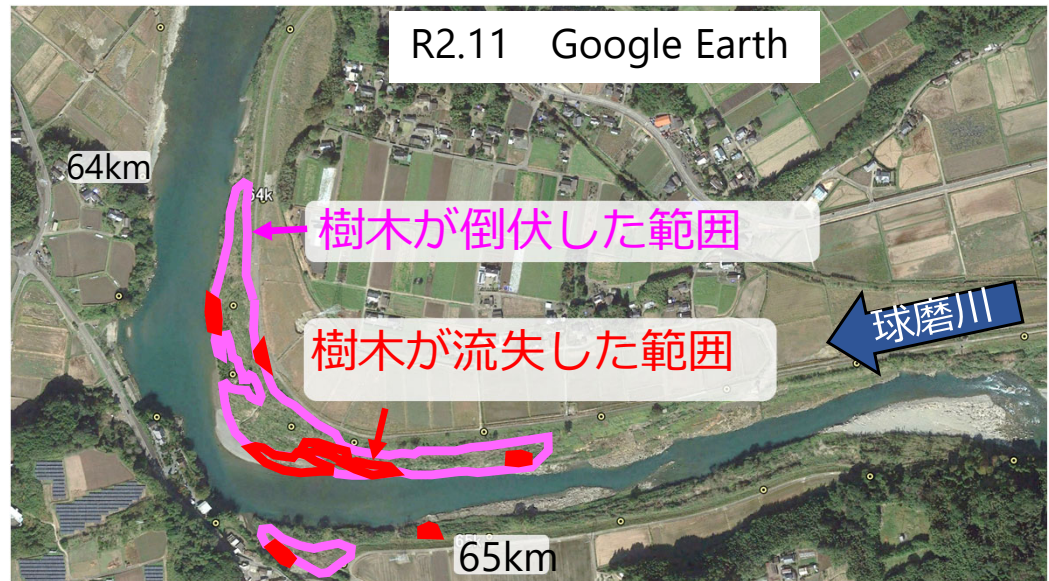
5.0km地点の二次流の解析結果

洪水ピーク時(8/6 3:00) | 複断面的蛇行流れ



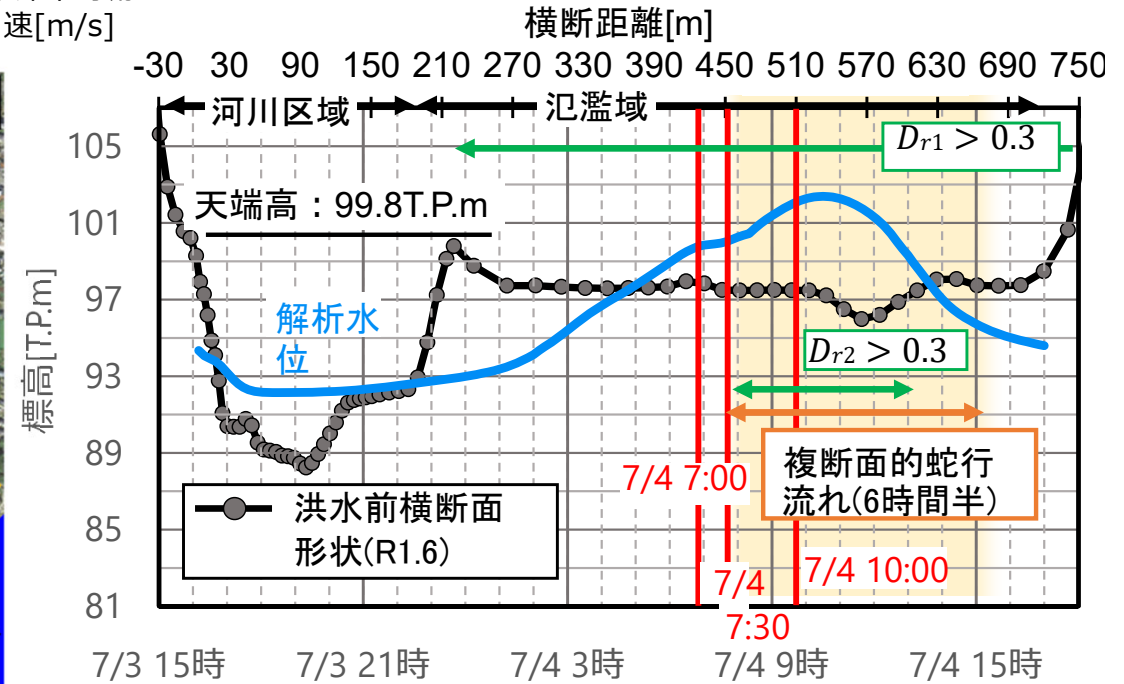
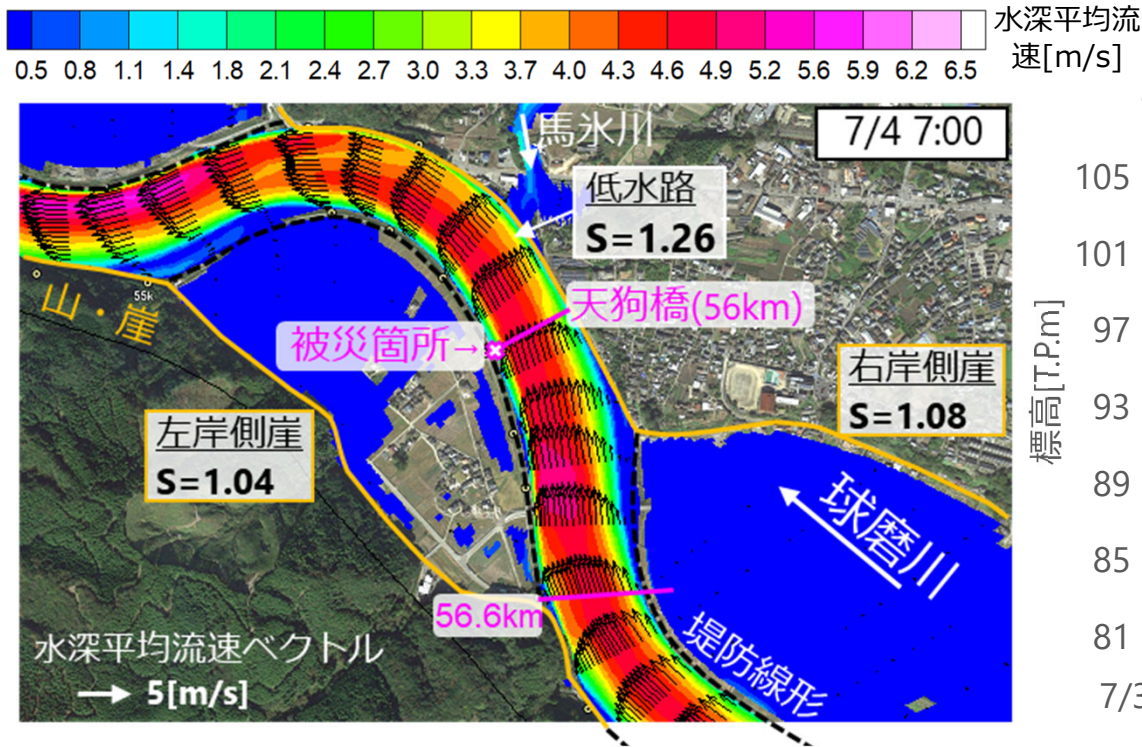
- 洪水ピーク付近では、左岸高水敷から低水路に流入してくる流量がさらに多くなり、流れの混合が一層激しくなる。
- 逆回りの二次流がより発達すると共に、高流速の発生位置がより内岸側に遷移する。**(複断面的蛇行流れ)**
- 堤防線形と低水路線形との間の蛇行度差や位相差が大きい場合、大洪水時に高水敷の遅い流れが低水路に流入するようになり、その激しい混合が逆回りの二次流を引き起こし、複断面的蛇行流れを生じさせる。



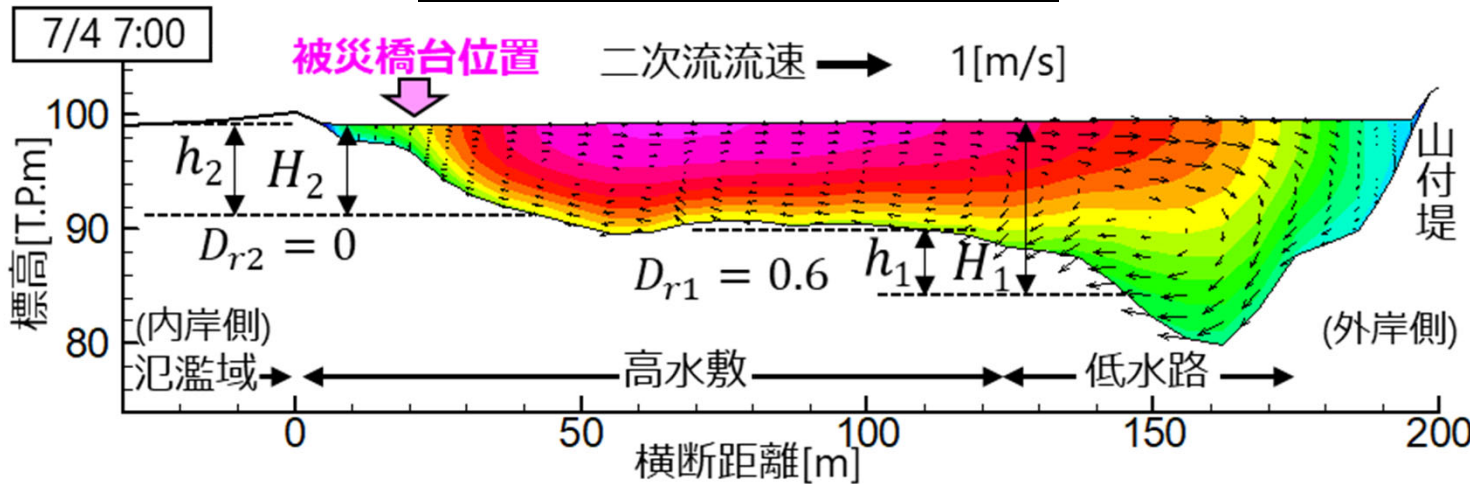


- 令和2年7月球磨川豪雨では、河川水位が軒並み堤防天端を越え、河道を低水路、堤内地を高水敷として洪水流が激しい複断面的蛇行流れとなって流下した。
- 球磨川の天狗橋(56km)では、内岸側の堤防付近に位置する橋台背面の盛土が流失する被害が生じた。
- 64km~66km区間では、内岸側の高水敷に繁茂していた樹木群の倒伏範囲と流失した。
- 解析方法は、石狩川河口部の計算と同様の方法を用いた。解析条件については、球磨川全体の計算を実施した田端ら(2021)と同様の条件を用いた。

堤防満杯時(7/4 7:00)の水深平均流速分布

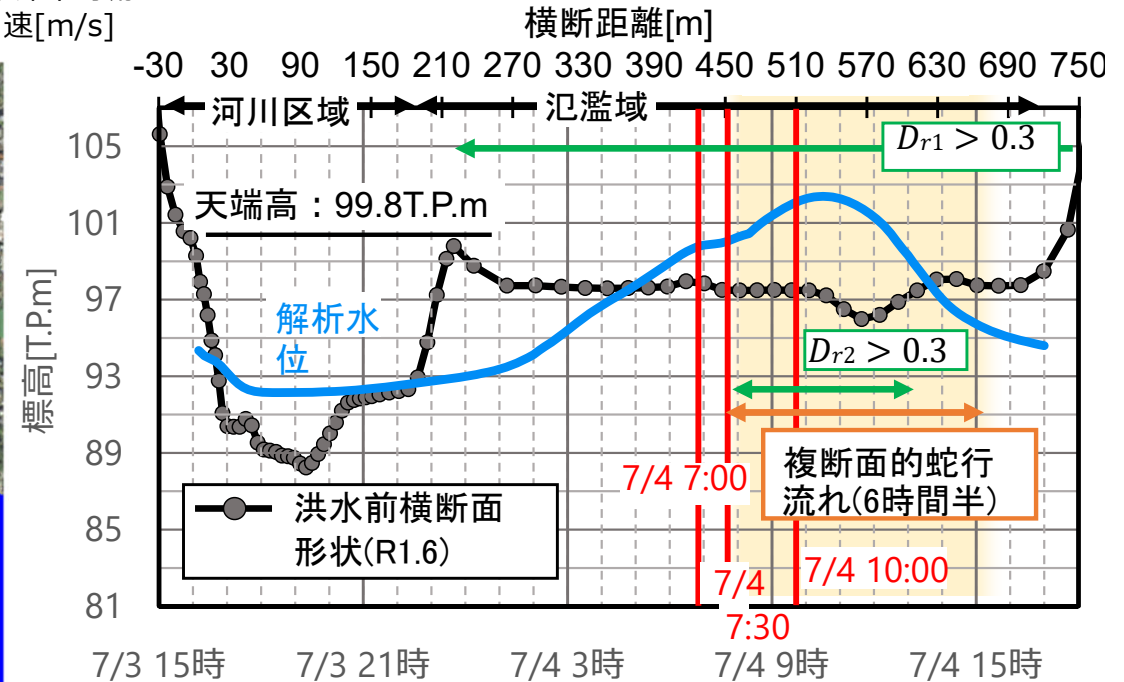
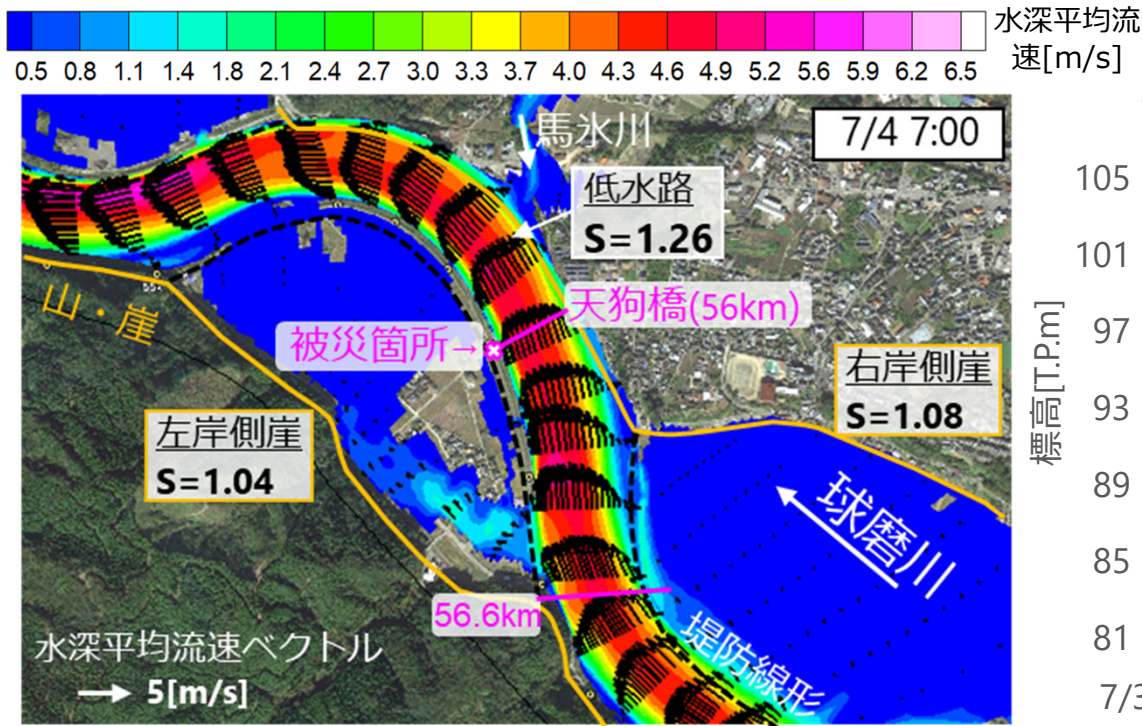


56km地点の二次流の解析結果

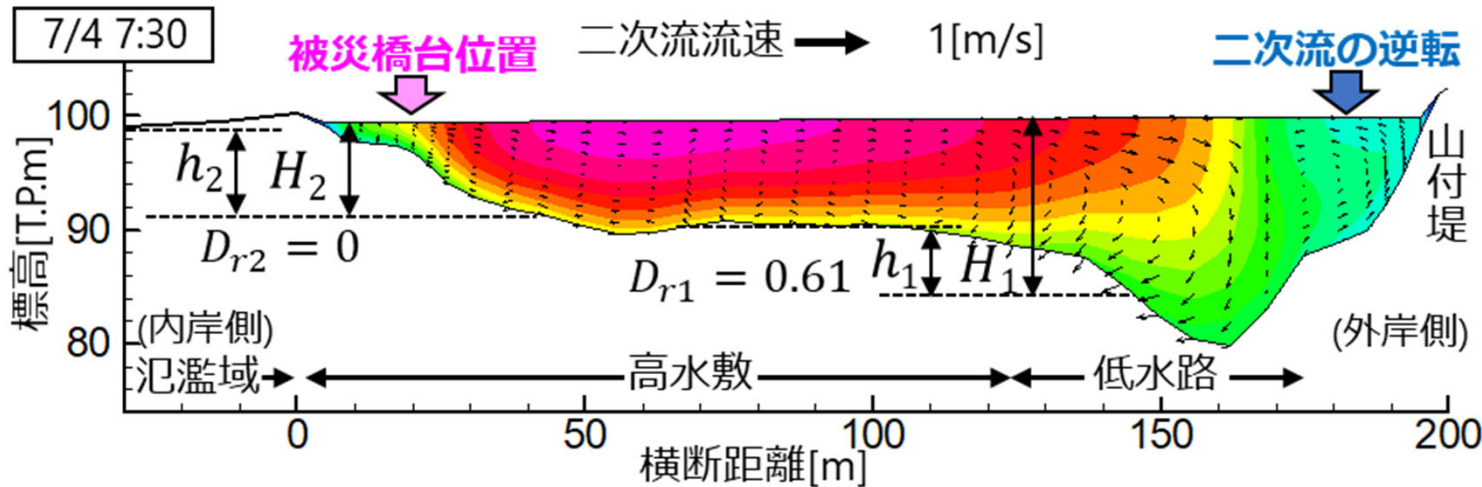


7月4日7時では56kmより上流区間の氾濫域からの流入が少なく混合が弱いため、この時間帯では通常の第1種二次流が生じている。
(単断面的蛇行流れ)

7/4 7:30の水深平均流速分布



56km地点の二次流の解析結果

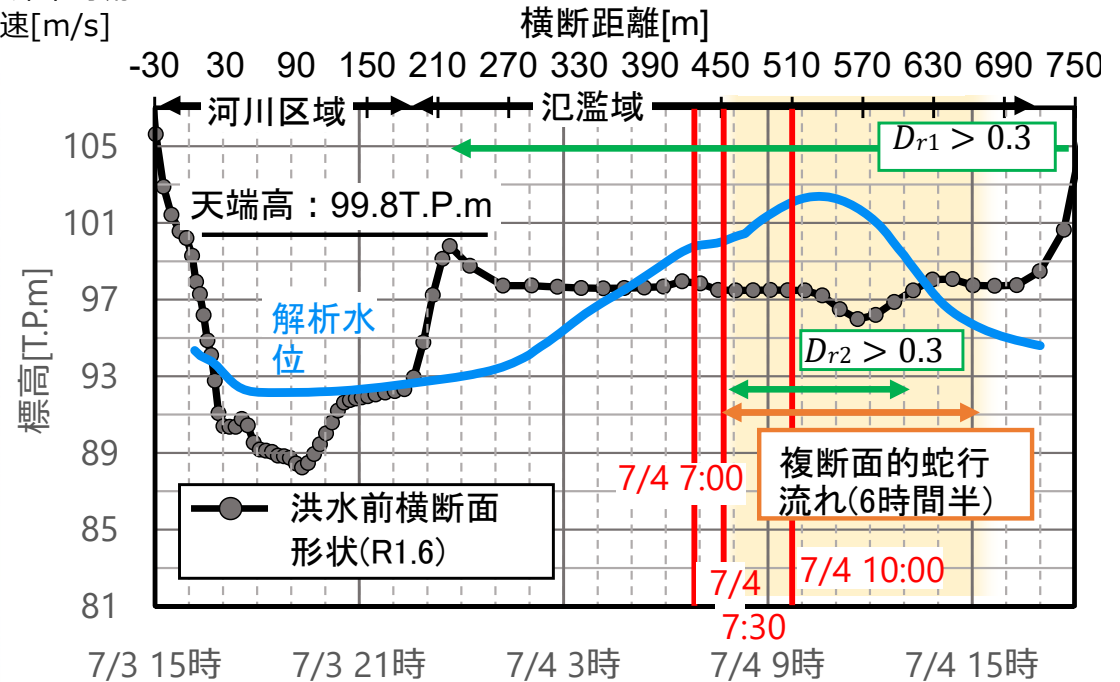
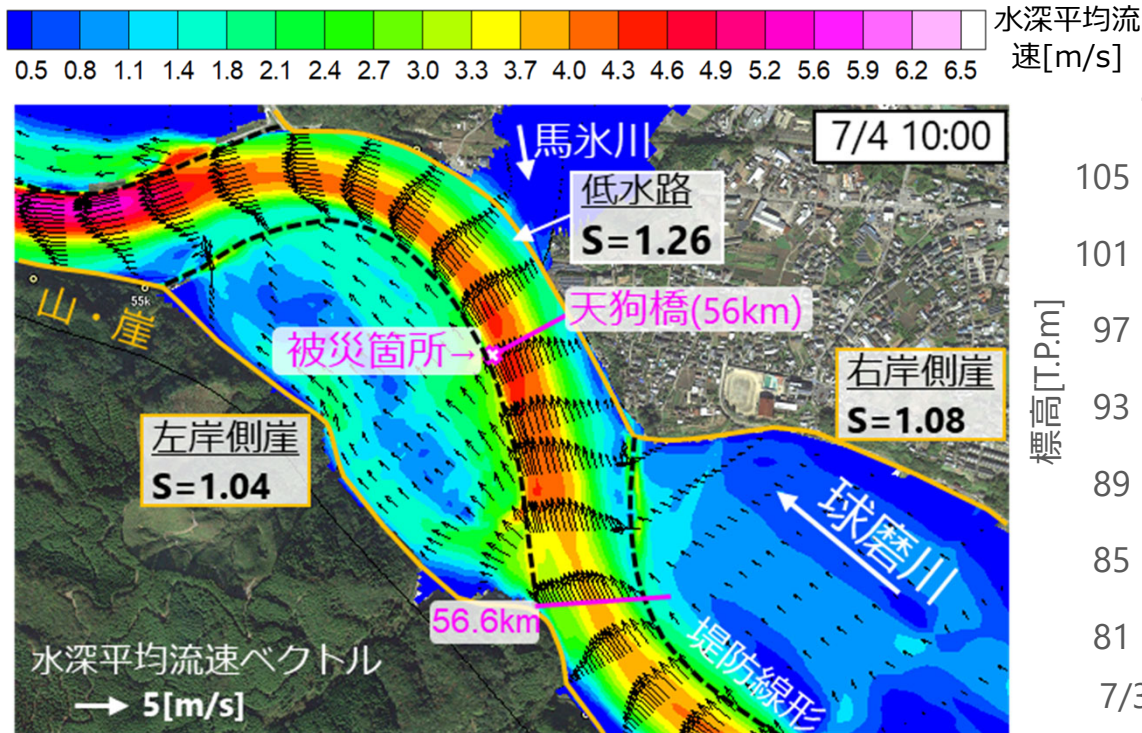


水位が堤防天端高を上回り、氾濫域と河川区域との相対水深 Dr_2 が約 0.3 を超える時間帯 (7/4 7:30~12:30頃) になると、氾濫域の比較的遅い流れが外岸側に相当量流入し、強い流れの混合が生じる。

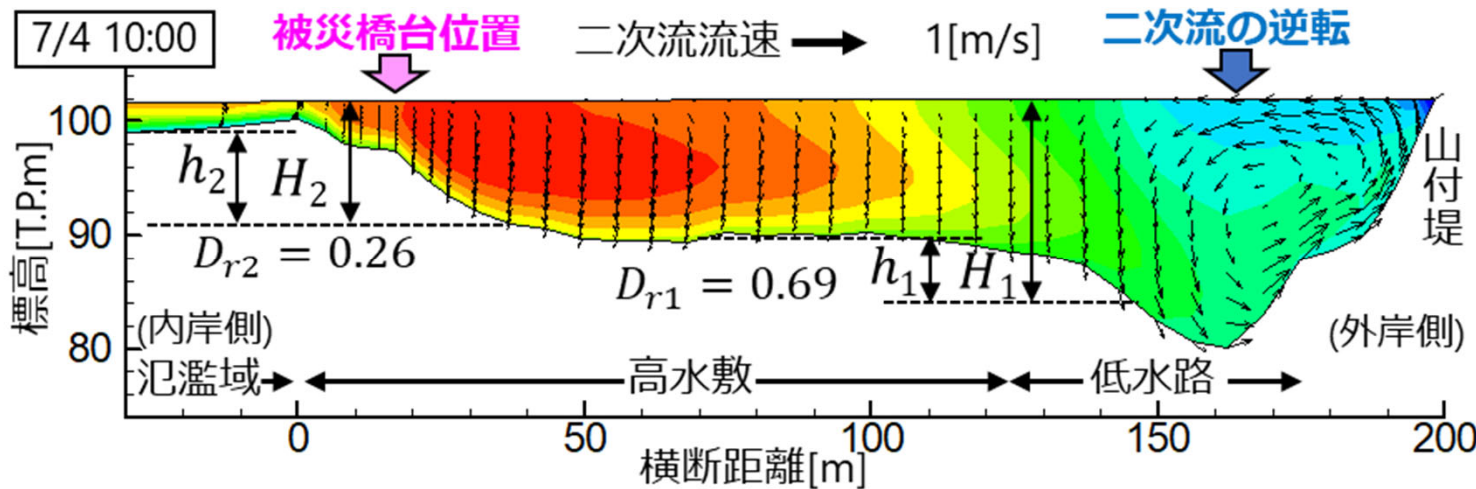
これにより、逆回りの二次流が生じ始め、高速流の発生位置も内岸側に遷移している。
(複断面的蛇行流れ)

天狗橋(56km)付近の水深平均流速分布の時間変化(7/4 10:00) 14

洪水ピーク時(7/4 10:00)の水深平均流速分布

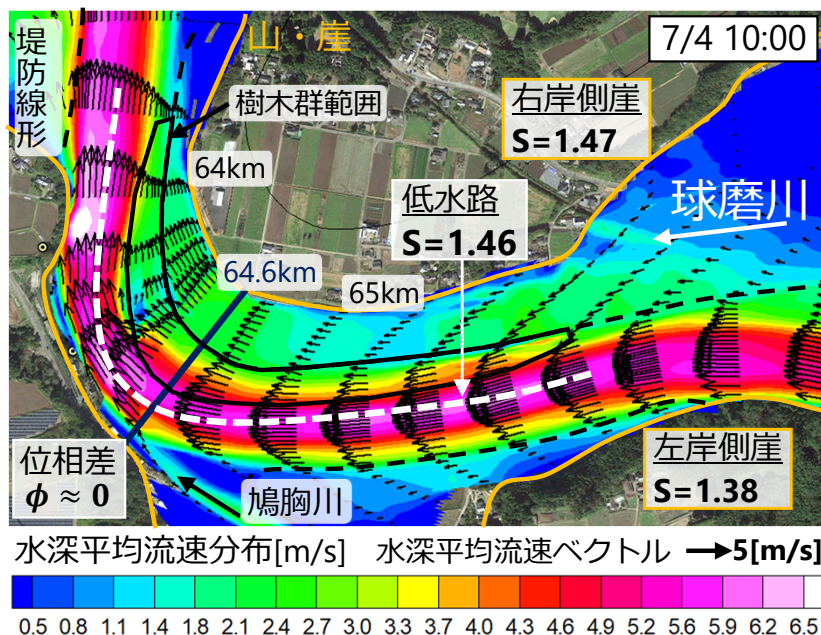


56km地点の二次流の解析結果

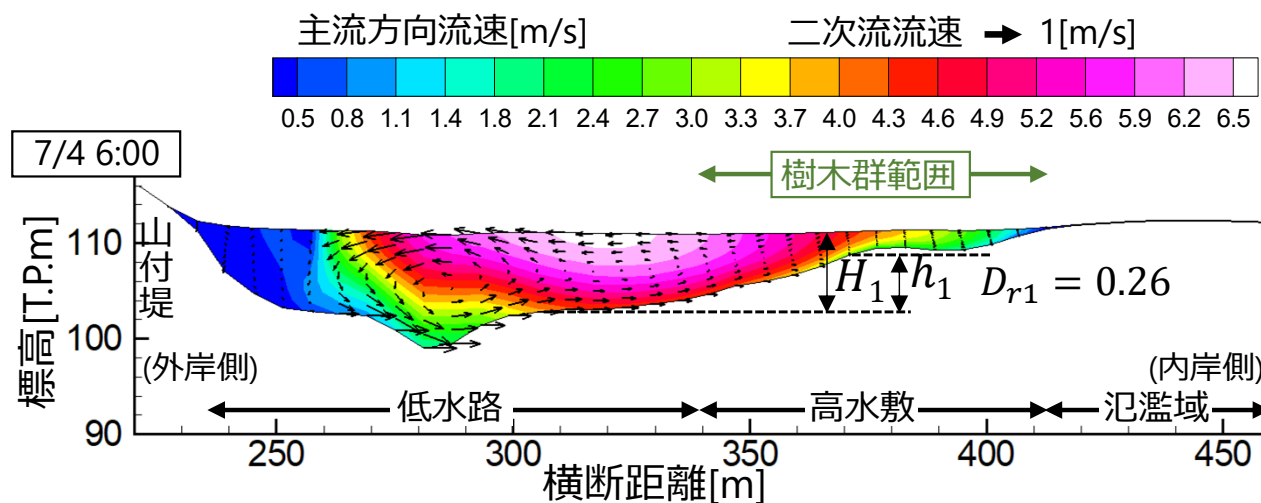


さらに、洪水ピーク付近になると氾濫域からの流入量が増加し、流れの混合が激しくなることで逆回りの二次流が発達し、高速流の発生位置が内岸側の被災橋台付近まで移動している。
(複断面的蛇行流れ)

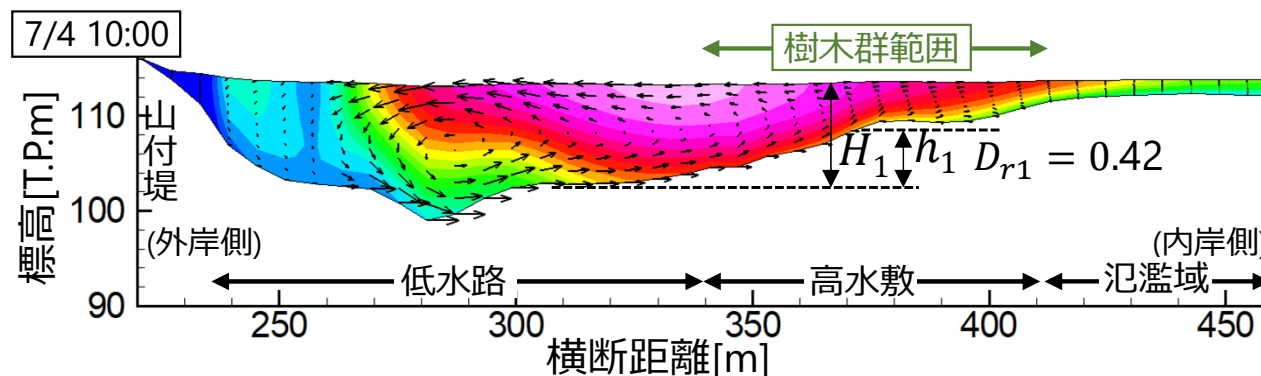
水深平均流速分布 (洪水ピーク時)



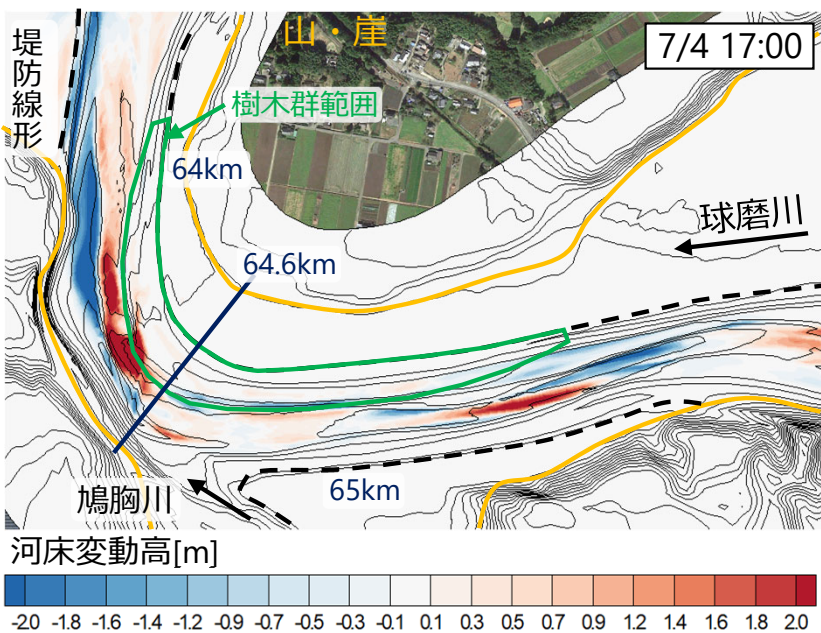
堤防満杯時(7/4 6:00) | 64.6km地点 | 単断面的蛇行流れ



洪水ピーク時(7/4 10:00) | 64.6km地点 | 単断面的蛇行流れ

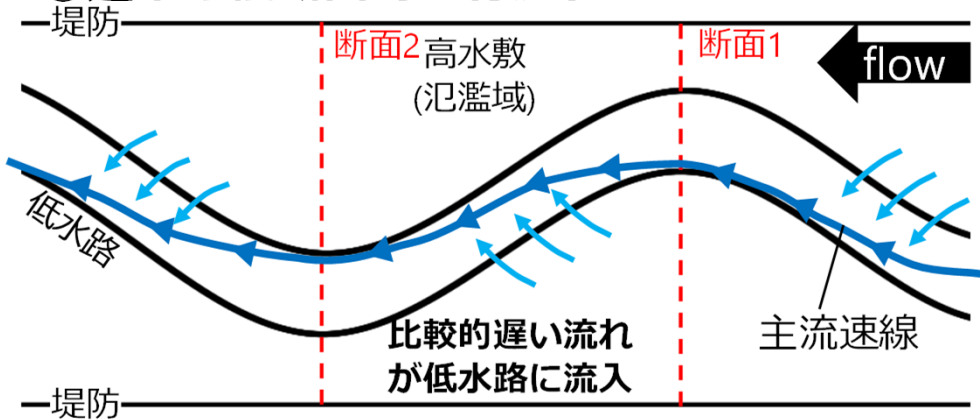


洪水前後の解析河床変動高

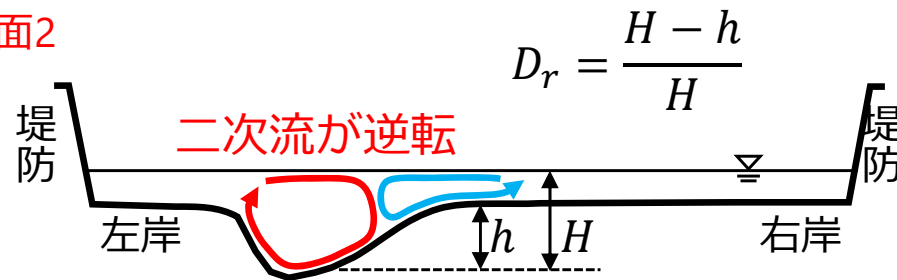


この区間の上流側は山付堤で広い高水敷を有していないこと、堤防線形と低水路線形の蛇行度と位相がほぼ同程度であることから、高水敷から低水路への遅い流れの流入量が制限され、相対水深が0.3を超えても二次流の逆転は生じず、明確な複断面的蛇行流れは生じていない。

① 通常の複断面的蛇行流れ

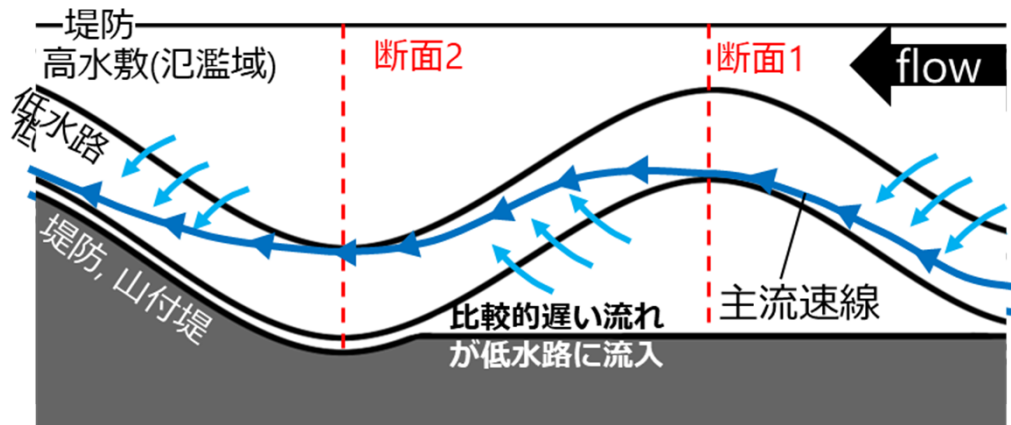


断面2

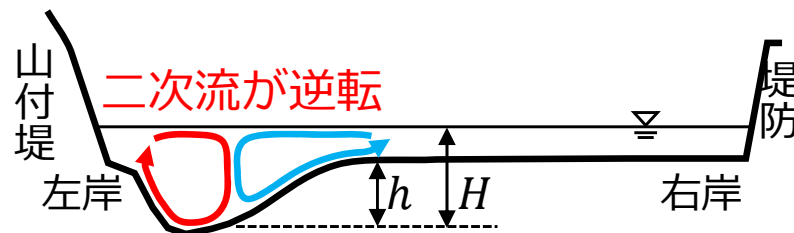


上流側の D_r が約0.3以上になると、高水敷上の遅い流れが低水路に流入し、二次流の逆転を伴う主流が内岸側を走る複断面的蛇行流れとなる。

② 片側の堤防の一部が山付堤

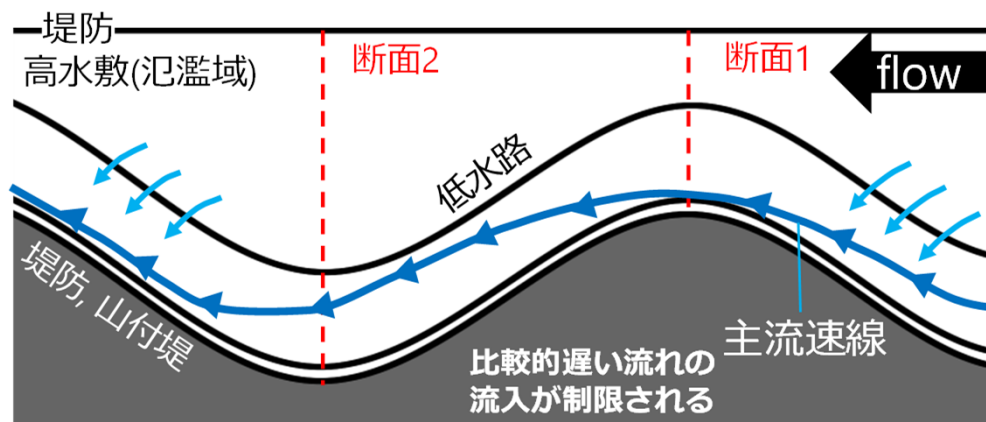


断面2

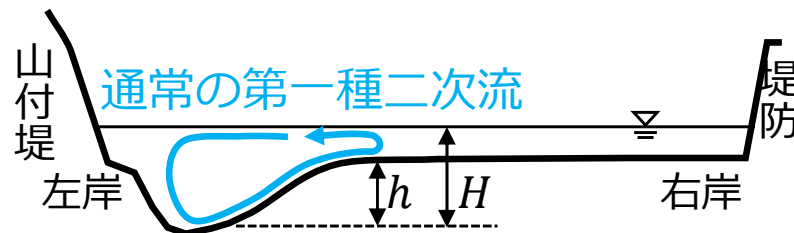


対象断面を見ると山付堤により流れの混合が生じ難いように見えるが、上流側の蛇行部で D_r が約0.3以上になると、高水敷上の遅い流れが低水路に流入し、二次流の逆転を伴う複断面的蛇行流れとなる。

③ 片側の堤防全体が山付堤



断面2



山付堤により上流側に広い高水敷が無く、高水敷上の遅い流れの流入が制限され流れの混合が生じ難いため、 D_r が0.3を超えても通常の第一種二次流が生じる。但し、蛇行部の入り口付近で比較的 inner bank 側で高速流が生じる。

- 本研究では、まず、昭和56年8月石狩川大洪水を対象とし、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。