

縦断的に異なる平面形を有する複断面流路における定常流れの構造 Steady flow structure in a compound channel with different planforms

21D3101006G 平山 和輝 (河川工学研究室)
Kazuki HIRAYAMA / River Engineering Lab.

Key Words : different planforms, steady flow, compound meandering channel flow

1. 序論

我が国の河川では、横断面形が低水路と高水敷から成る複断面蛇行河道が一般的である。複断面蛇行河道で大規模な洪水が生じると、堤防線形と低水路線形に位相差があることによって高水敷の遅い流れが低水路に流入し、流れの混合が生じる。これにより、湾曲二次流を抑制する逆向きの二次流が発生し、主流が外岸側から内岸側へ寄る複断面的蛇行流れが発生することになる¹⁾。実河川の複断面流路は平面形が縦断的に異なり、堤防線形と低水路線形の位相差により、高水敷と低水路間の流れの混合度合が変化する^{1),2)}。その結果、流れの構造や河床変動が縦断的に変化するため、この機構を明らかにする必要がある。

本研究では、縦断的に異なる平面形を有する複断面水路を用いた大規模な移動床実験³⁾の解析を行い、この実験結果と解析結果に基づいて、平面形が縦断的に異なる複断面流路における流れの構造と河床形状の関係を明らかにする。

2. 実験概要と解析方法、解析条件

図-1は実験水路³⁾とその代表断面の横断面形を示す。全長65m、水路幅3m、低水路幅0.8m、水路床勾配が1/1000であり、上下流部の直線区間と中流部の蛇行区間が、湾曲部で接続されている。一樣蛇行区間は、最大偏角 $\theta_{max} = 22.5^\circ$ 、低水路の蛇行度 S (=低水路蛇行長/低水路蛇行波長) $S=1.04$ の低水路が2.5波長分で構成されている。初期高水敷高を0.05mとして、河床材料には比重2.59、粒径0.8mmの一樣砂を用いている。また、水路最上流の直線部(長さ15m)は給砂区間と考え、上流端からの給砂は行っていない。水理条件として相対水深 Dr (=高水敷水深/低水路水深)を変化させ、単断面条件の $Dr=0$ (Case1)、複断面条件の $Dr=0.25$ (Case2)、 $Dr=0.40$ (Case3)の3ケースを行った。それぞれのケースについて、平坦河床の状態から、水位、河床高を経時的に測定し、ほぼ平衡状態になったと考えられる20時間まで通水を行っている。

解析には、非静水圧準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS⁴⁾)を用いた。本研究では相対水深 $Dr=0.40$ (Case3)の複断面条件を対象として、初期の平坦河床状態から20時間通水した後の河床形状を平衡河床と考え、この平衡河床を土砂の移動のない固定床として解析を行った。上流端の流れの境界条件には断面85における観測水位、

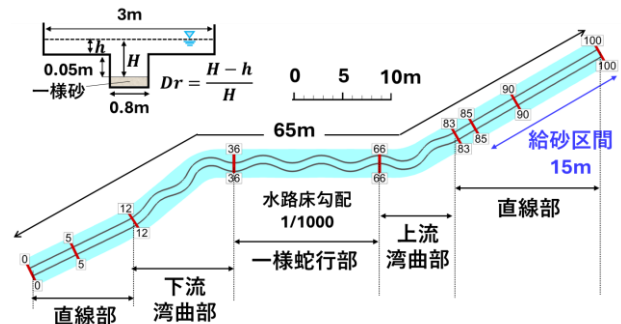


図-1 実験水路と代表断面の横断面形

下流端境界条件には断面5における観測水位を与えた。解析格子は流下方向に0.25m、横断方向に0.05mとした。

3. 解析結果とその考察

(1) 水面形と平面流況

図-2は観測と解析の水面形と低水路の平均河床高・最深河床高縦断図を示す。図中に示す粗度係数を与えることによって、解析水面形は観測水面形を良好に再現できており、解析結果は現象を適切に説明できると考えてよい。図-3は水深平均流速の平面分布を示す。低水路の流速に着目すると、複断面直線部より複断面蛇行部の方が流速が小さい。これは、高水敷から遅い流れが入り込み、低水路の流れとの混合が生じることによって流れの抵抗が増大したためであり、このため低水路の主流は内岸寄りに偏って生じている。

図-4は白で描かれた最大主流速線と河床高コンターの関係を示す。深掘れ部の位置は最大主流速線と概ね対応している。図-2の最深河床高(茶点線)の縦断図と図-4より、上流湾曲部(断面83～断面66)では水衝部となる左岸側が大きく洗掘されているが、一樣蛇行部(断面66～断面36)では下流に行くにつれて徐々に左右岸の洗掘量の差が小さくなっている。下流湾曲部(断面36～断面12)では上流湾曲部と同様に、水衝部となる右岸側が大きく洗掘されている。

これらの違いは、堤防線形と低水路線形との関係から、高水敷と低水路間の流れの混合の度合が異なることにより、流れの3次元構造が空間的に変化しているためだと考えられる。この点について、一樣蛇行部(図-4に示す検討区間)に着目し、高水敷から低水路に流入する運動量との関係から考察する。

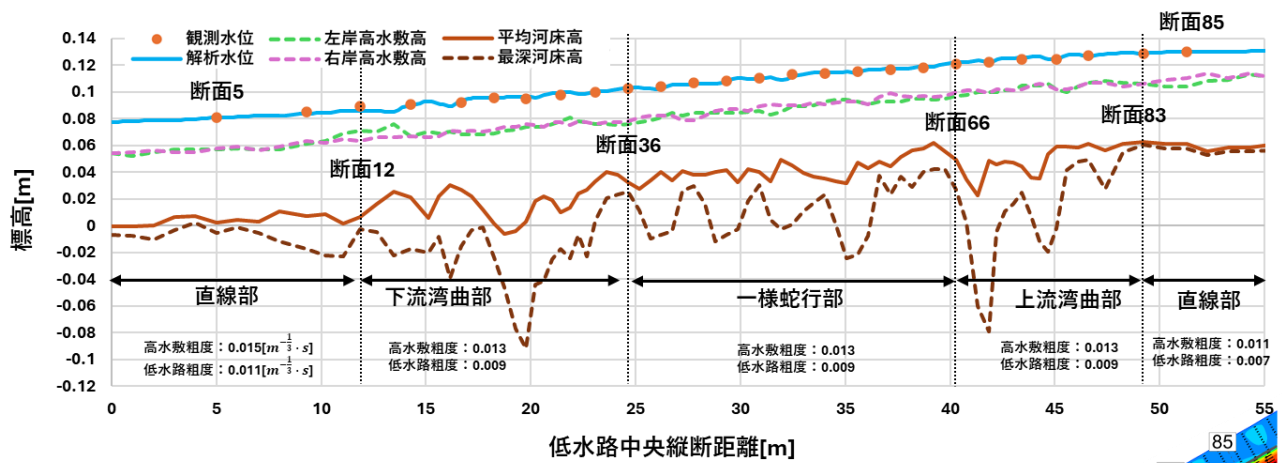


図-2 観測と解析の水面形と低水路の平均河床高・最深河床高縦断図

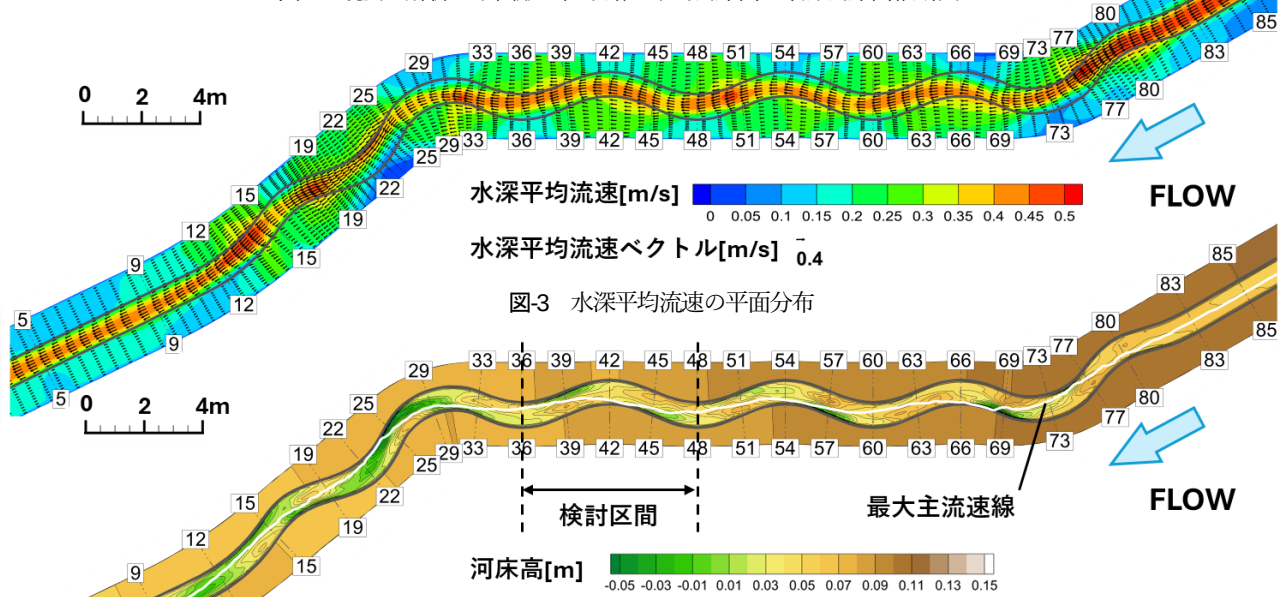


図-3 水深平均流速の平面分布

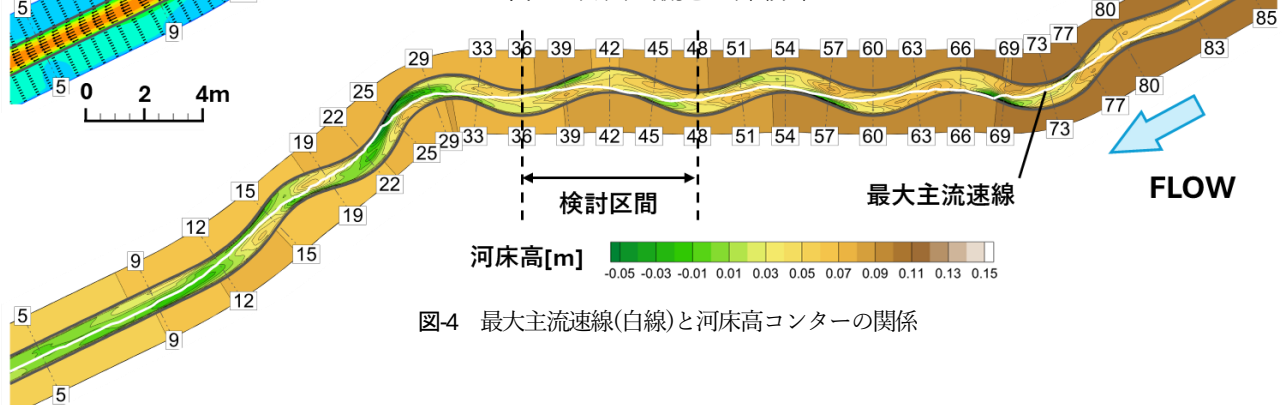


図-4 最大主流速線(白線)と河床高コンターの関係

(2) 一様蛇行部における複断面的蛇行流れの考察

図-5は一様蛇行部における単位幅あたりの運動量フラックスコンターに水深平均流速ベクトルを重ねたものである。高水敷と低水路間で運動量交換が行われていることがわかる。複断面蛇行流路では、高水敷から流入する運動量の大きさが、低水路内の二次流構造に大きく影響するものと考えられる。図-6は左右岸の高水敷から低水路に流入する運動量フラックス $\rho h U_{fp} V_e$ と、低水路平均の運動量フラックス $\rho h U_{mc}^2$ の比を解析結果から縦断的に調べたものである。ここで、 ρ ：水の密度、 h ：水深、 U_{fp} ：高水敷上での水深平均流速、 V_e ：低水路線形に直交方向の水深平均流速、 U_{mc} ：低水路内の水深平均流速である。図-6の縦軸は $\rho h U_{fp} V_e / \rho h U_{mc}^2$ であり、値が正であれば低水路内に運動量が流入し、負であれば低水路内から運動量が流出していることを示す。断面47から断面43にかけて、 $\rho h U_{mc}^2$ の2~5%の $\rho h U_{fp} V_e$ が右岸高水敷から流入している。その結果、図-7、図-8、

図-9に示す断面47、断面46、断面44の主流方向流速のコンターと二次流ベクトルは、主流方向流速の大きな領域を中心に湾曲二次流が形成されることに加え、高水敷からの運動量流入により、下流に向かうにつれて右岸側で二次流が発達していることが分かる(図中の赤点線)。これにより、湾曲二次流による左岸側の深掘れに加えて、右岸側の高水敷際も洗掘傾向にあるものと考えられる。

図-10は断面42の主流方向流速のコンターと二次流ベクトルを示す。断面42では低水路蛇行の外岸が右岸側に移ることにより、左岸側で断面44とは反対方向の湾曲二次流が形成され始めている。外岸となる右岸側では高水敷から低水路への運動量の流入がほとんどないものの(図-6)、湾曲二次流とは逆向きの二次流が存在している。これは、断面47から断面43にかけて高水敷から低水路内に運動量が縦断的に流入することにより発達した二次流が残っているためであると考えられる。その結

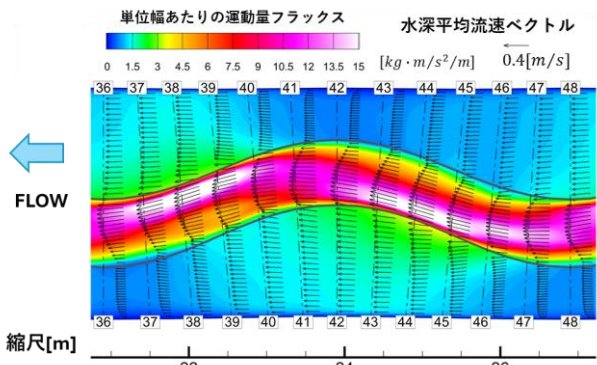


図5 一様蛇行部の単位幅あたりの運動量フラックスコンターと水深平均流速ベクトル

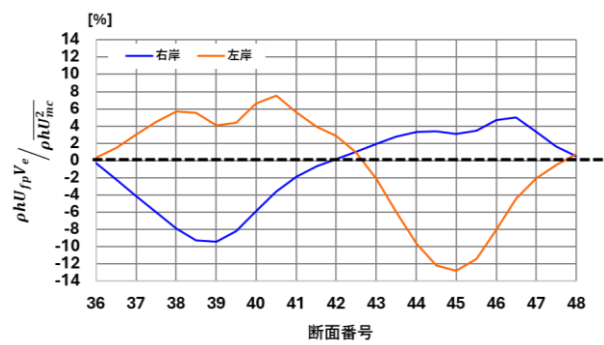


図6 一様蛇行部における高水敷から低水路に出入りする運動量フラックスと低水路平均の運動量フラックスの比の縦断分布

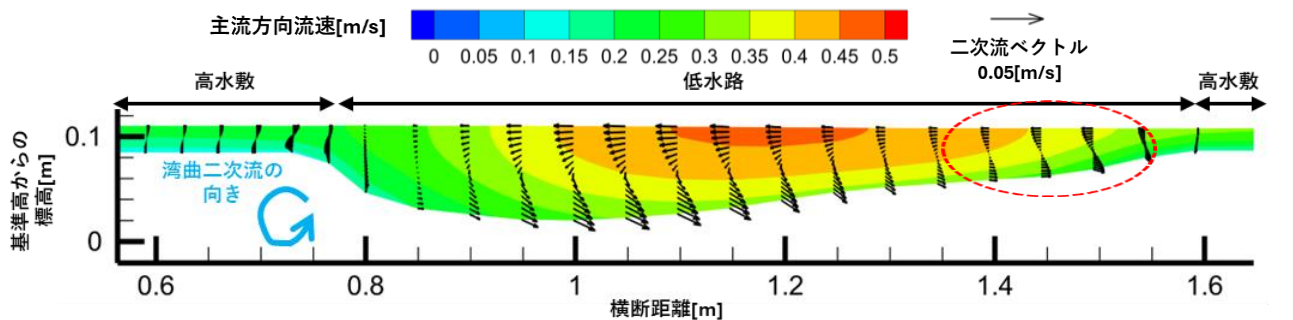


図7 断面47の主流方向流速のコンターと二次流ベクトル

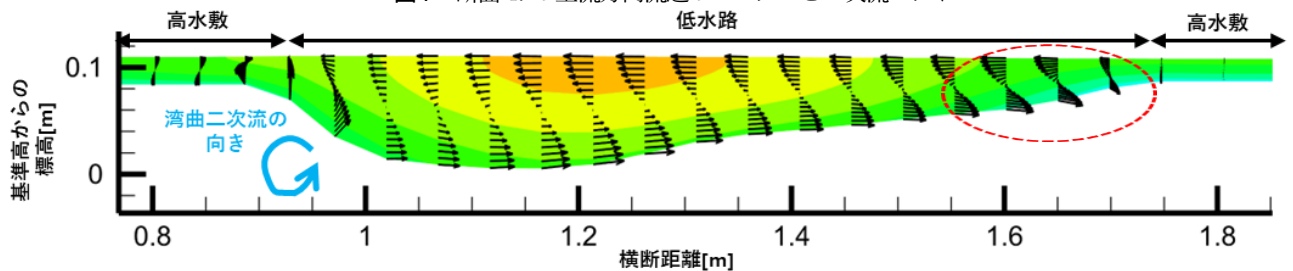


図8 断面46の主流方向流速のコンターと二次流ベクトル

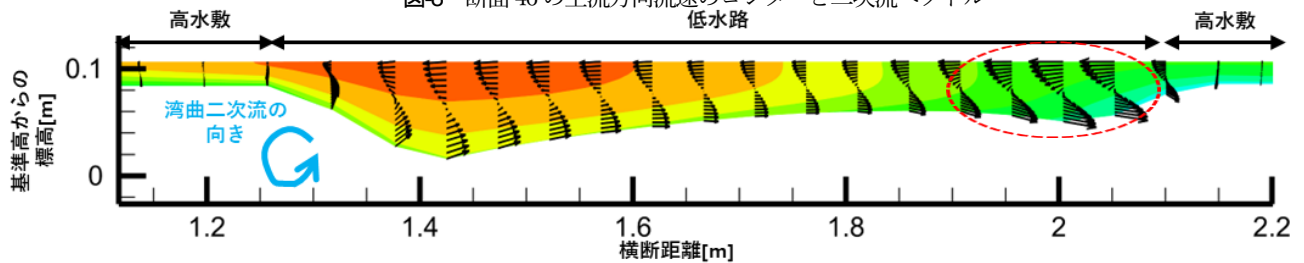


図9 断面44の主流方向流速のコンターと二次流ベクトル

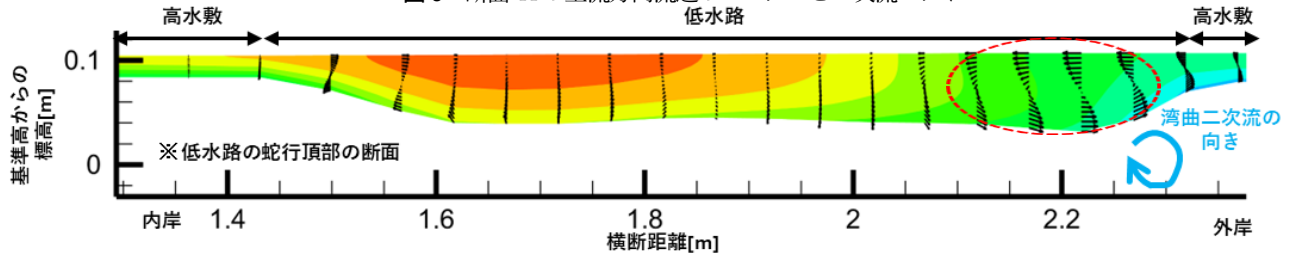


図10 断面42の主流方向流速のコンターと二次流ベクトル

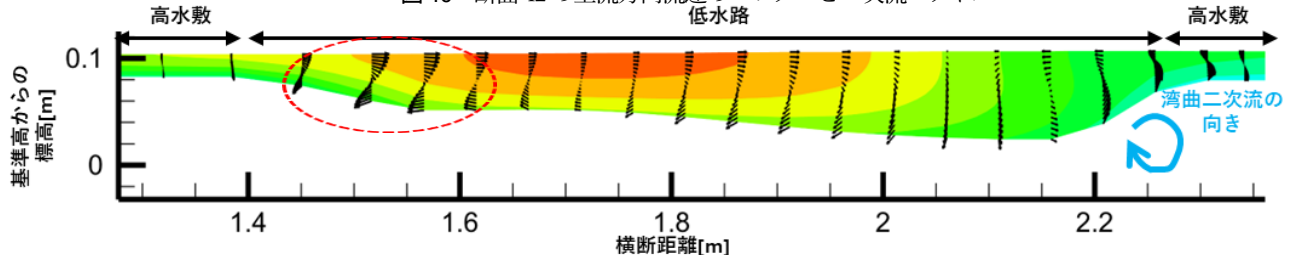


図11 断面41の主流方向流速のコンターと二次流ベクトル

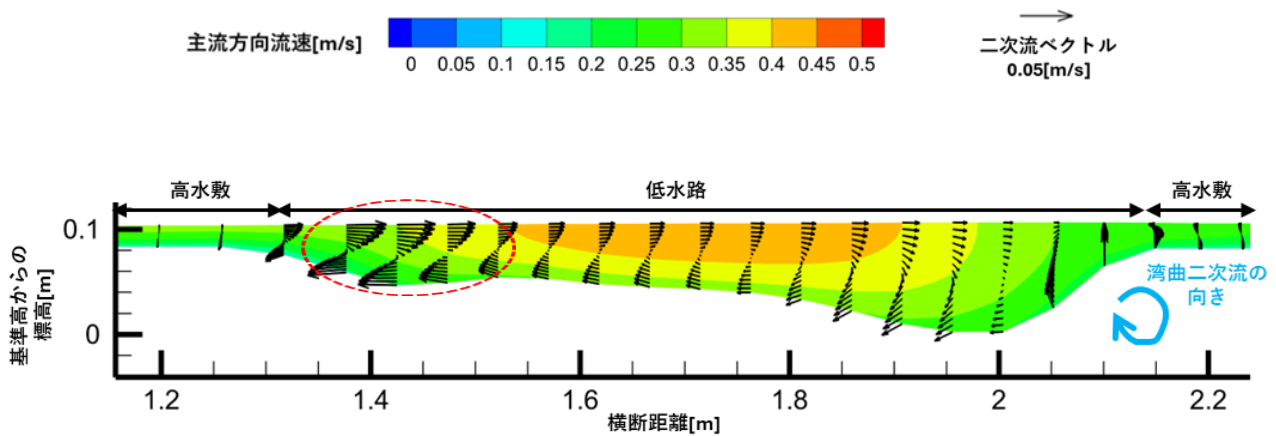


図-12 断面 40 の主流方向流速のコンターと二次流ベクトル

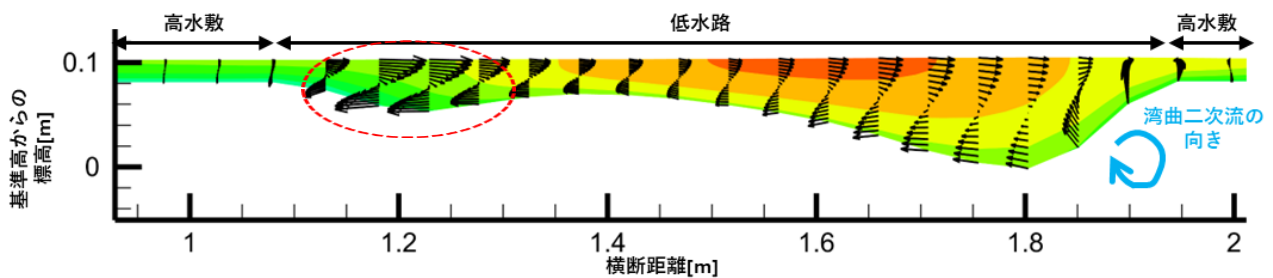


図-13 断面 39 の主流方向流速のコンターと二次流ベクトル

果、断面42では湾曲二次流の形成が抑制され、比較的平坦な断面形が形成されたものと考えられる。図-11から図-13に示す断面41から断面39にかけては、低水路蛇行の外岸側に位置する右岸側において、湾曲二次流と逆向きの二次流が徐々に消失し、断面内で湾曲二次流が卓越するようになる。また、 $\rho \bar{h} \bar{U}_{mc}^2$ の2~7%の $phU_{fp}V_e$ が左岸高水敷から流入することで(図-6)、左岸側の二次流が下流に向かうにつれて発達している。これにより、右岸側は湾曲二次流による深掘れが形成され、左岸側の高水敷際も洗掘傾向にあるものと考えられる。

図-6に示すように堤防線形が直線的な一様蛇行部では、左右岸の高水敷から低水路に出入りする運動量の縦断分布が概ね等しく、上で考察したように低水路蛇行の頂部を境として左右対称に近い流速分布と断面形状が形成されたものと考察される。これに対し、堤防線形の変曲点に位置する上流湾曲部と下流湾曲部では、堤防線形と低水路線形との関係から、左右岸の高水敷から流入する運動量の大きさや縦断分布に差が生まれ、図-2と図-4に示したように左右岸で洗掘量が大きく異なるものと考えられる。

4. 結論と今後の課題

本研究では、縦断的に平面形状の変化する複断面移動床水路を対象に、相対水深 $Dr=0.40$ の平衡河床状態の流れの構造と河床形状の関係について、実験結果と非

静水圧準三次元解析の結果から検討した。一様蛇行部では、低水路平均の運動量フラックスの2~7%の運動量フラックスが高水敷から低水路に縦断的に流入することで、湾曲二次流による洗掘の抑制や高水敷際の洗掘に寄与していることを考察した。

今後は、複断面的蛇行流れの特徴を説明する水理的な指標についてさらに検討を進めるとともに、相対水深 $Dr=0$ の単断面蛇行流れとの比較から、複断面流路に特有の相対水深や堤防線形と低水路線形との関係で変化する、流れの3次元構造と河床形状、流砂運動の関係について検討する。

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) 後藤岳久，長谷部夏希，向田清峻，福岡捷二：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—，河川技術論文集，第29巻，pp.341-346，2023.
- 3) 岡田将治，Julio Masís Jimenez，福岡捷二，田村浩敏，重松良：平面形が縦断的に変化する複断面河道における流れと河床変動，水工学論文集，第47巻，pp.655-660，2003.
- 4) 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，No1，pp.61-80，2019.