

# 縦断的に異なる平面形・横断面形を有する 複断面蛇行流路における流れの構造

平山 和輝<sup>1</sup>・福岡 捷二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 博士課程前期課程  
(〒112-8551 東京都文京区春日一丁目 12-27) (Corresponding Author)

E-mail: a21.rxf5@g.chuo-u.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 機構教授 (同上)

E-mail: sfukuoka001t@g.chuo-u.ac.jp

複断面蛇行流れの構造と流砂量, 河床変動は時空間的に変化し, 両者の関係は複雑であり, これを説明できる解析法の開発が急務となっている. 本研究では, 1990年代に行われた平面形が縦断的に変化する複断面水路を用いた定常流移動床実験結果に対して非静水圧準三次元洪水流解析を適用し, 縦断的に異なる平面形・横断面形を有する蛇行流れの構造を明らかにしている. 特に, 複断面的蛇行流れの構造は, 遠心力による湾曲二次流と高水敷と低水路間の流れの移流混合による二次流が共存し, これらの共存状態が平面形・横断面形の縦断的な変化に応じて異なることで, 縦横断的に複雑な3次元流れ構造となることを示した. そして複雑な複断面蛇行流れの問題の解明には流れと河床変動を一体的に検討していくことが今後の課題であることを述べている.

**Key Words:** *planform, compound meandering channel flow, flow structure, sediment discharge*

## 1. 序論

気候変動の影響により, 近年河川のH.W.L.を超える水位で流れる大規模洪水の発生頻度が高まっている. このような大規模洪水に対して, 我が国で一般的な複断面蛇行河川の河道・堤防の計画・設計にあたっては, 洪水時の流れの理解とそれに基づく水位・河床高に速度水頭と圧力の非静水圧水頭を加えた全エネルギー水頭の時空間変化の分布検討の必要性が示された<sup>1)</sup>. 大規模洪水時の全エネルギー水頭の分布には, 複断面蛇行流れでの砂州の動き, 河床高の時空間変化を高精度で表現できる解析技術が求められている<sup>2)</sup>.

後藤ら<sup>3)</sup>は令和元年10月の多摩川における大規模洪水に対して, 浮遊砂を考慮した準三次元洪水流・河床変動解析法を用いることで, 砂州の変形・発達とこれに伴う全エネルギー水頭分布の時空間変化を求め, 大規模洪水時の堤防と河道の危険箇所を推定法を提案している. しかし, 大規模洪水時には複断面蛇行流れが発生し, 堤防線形と低水路線形の位相差によって高水敷と低水路間の流れの混合度合が縦横断的に変化する<sup>4)</sup>. これにより,

複断面蛇行流れの構造と流砂量, 河床変動特性は縦横断的に変化する. このような複断面蛇行流れの機構, 流砂量・河床変動の機構を反映した洪水流・河床変動解析法は未だ存在せず, その技術開発が強く求められている.

これまで, 複断面蛇行流れにおける流砂量・河床変動機構に関して, 多くの基礎的研究が行われてきた. 福岡・渡邊らは, 単純な線形の複断面蛇行水路で静水圧を仮定した三次元解析<sup>5)</sup>と非静水圧三次元解析<sup>6)</sup>による河床変動解析を行い, 比較・検討することで, 低水路蛇行の遷移区間では高水敷と低水路間の流れの流出入が起これ, 圧力分布は非静水圧分布となるため, 静水圧を仮定した解析では実際の流れ場と河床形状を十分表現できないことを示した. 岡田ら<sup>7)</sup>は平面形が縦断的に変化する大規模な複断面水路を用いた定常流移動床実験で, 相対水深  $D_r$ (高水敷水深/低水路水深)を変化させ, それぞれのケースで河床高の変動を経時的に測定し, 河道の平面形状によって流砂量特性が異なることを示した. また, 福岡ら<sup>8)</sup>は, 岡田らと同様の水路・水理条件で移動床実験を行い, 水路の平面形状が異なる区間で流砂量を測定し, 静水圧を仮定した三次元数値解析<sup>9)</sup>及び平衡流砂量式を

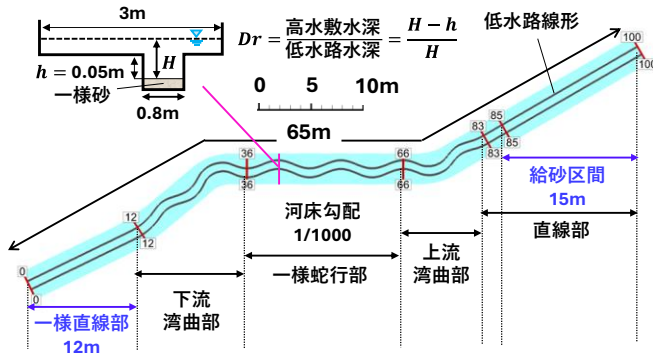


図-1 実験水路の平面図とその代表初期横断面図<sup>7)</sup>

表-1 実験条件<sup>8)</sup>

	Case1	Case2
相対水深Dr	0	0.40
流れの形態	単断面蛇行流れ	複断面的蛇行流れ
流量[m <sup>3</sup> /s]	0.0106	0.030
初期高水敷高[m]	0.050	
通水時間	20時間	

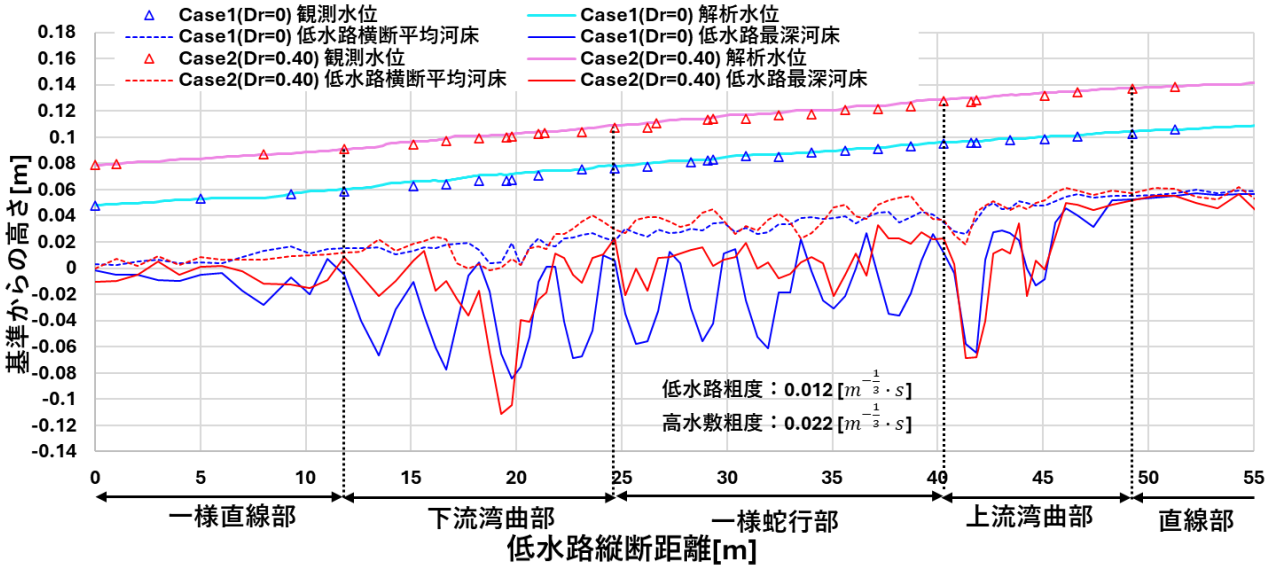


図-2 観測水面形と解析水面形の比較及び通水20時間後の低水路横断平均河床と低水路最深河床の縦断分布

用いた河床変動解析と比較した結果、複断面蛇行流れにおいて測定値を再現できず、流れと土砂移動の関係についてこれまでの解析法では説明できない課題があることを示した。

このことから、現地河川のように平面形・河床横断面形が縦断的に大きく変化する流れ場では、流れの非静水圧成分を考慮し、平衡流砂量式を用いない洪水流・河床変動解析法が本質的であり、これまで行われてきた研究を見直す必要性が明らかとなった。

現地の複断面蛇行河川では、流れと河床変動の相互関係は実験水路に比して複雑化し、平面形や横断面形の縦断的な変化によって時空間的に大きく変化する。このため、まずは基本的な複断面蛇行流路における流れ、流砂量、河床変動特性の解明を狙いとする。しかし、複断面蛇行流路の流れと河床変動を同時に検討することは、今なお複雑であるため、複断面蛇行流れの構造を明らかにすることから始めるのがよいと考えている。

本研究では複断面蛇行流路における流れと河床変動を再現できる解析法の開発にむけて、まずは実験水路において基本的な平面構造を有する蛇行流れによって形成され、安定した河床形状での流れの構造を検討する。これには岡田ら、福岡らが用いた複断面水路の移動床実験で

形成された平衡河床を、固定床河床として与え、竹村・福岡による非静水圧準三次元洪水流解析<sup>9)</sup>を行う。そして、この平衡河床の流れ場を再現することで、これまで十分明らかにされていなかった縦断的に異なる平面形・横断面形を有する複断面蛇行流路における流れの構造に

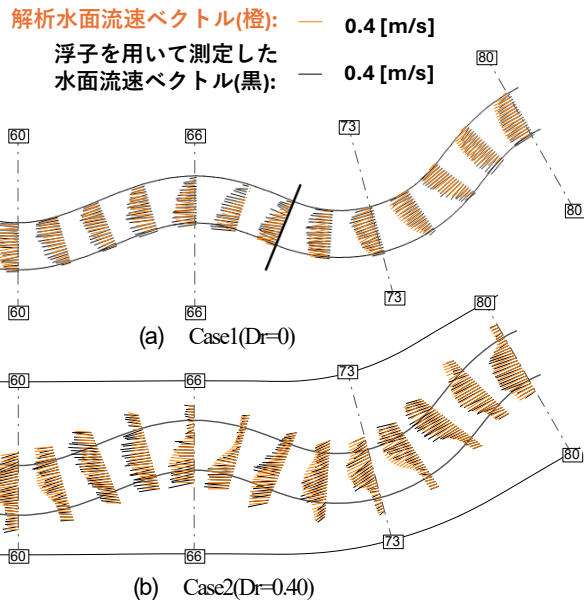


図-3 浮子を用いて測定した水面流速ベクトル<sup>7)</sup>(黒)と解析水面流速ベクトル(橙)の比較

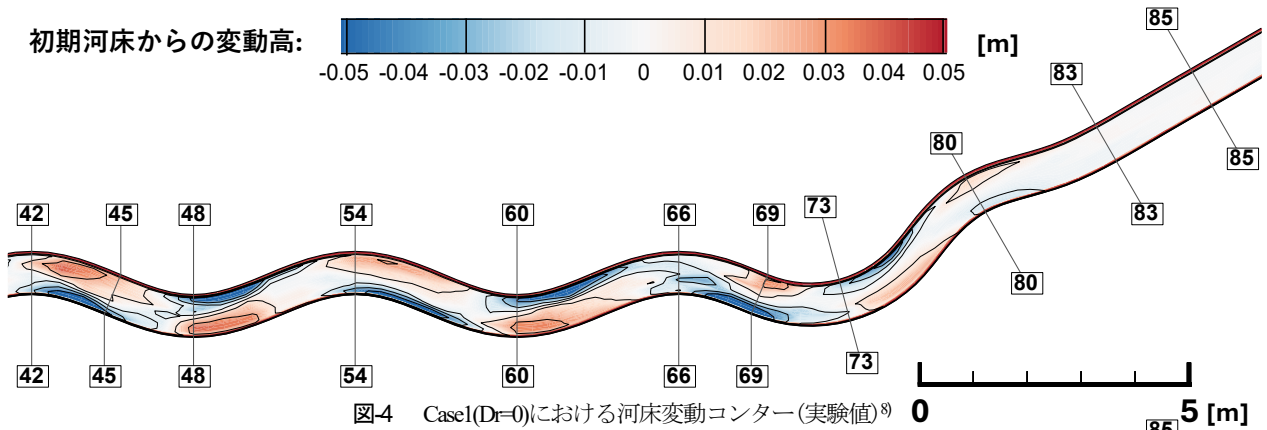


図-4 Case1(Dr=0)における河床変動コンター(実験値)<sup>9)</sup>

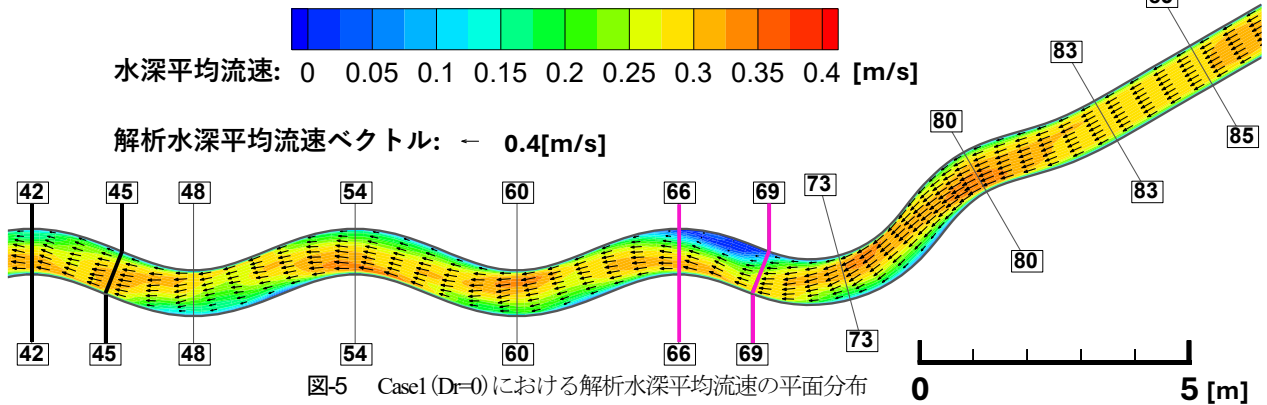


図-5 Case1(Dr=0)における解析水深平均流速の平面分布

ついて明らかにする。

## 2. 解析に用いた実験概要と解析手法

図-1は実験水路の平面図とその代表初期横断面図<sup>7,8)</sup>を示す。実験水路は全長65m, 水路幅3m, 低水路幅0.8mであり, 上下流の直線部と中流の一樣蛇行部が湾曲部で接続されている。低水路には河床勾配が1/1000, 初期高水敷高が0.05mとなるように, 比重2.59, 粒径0.8mmの一樣砂が平坦に敷き詰められている。水路最上流の直線部(15m)を給砂区間とし, 上流端からの給砂は行っていない。水路下流部には直線部(12m)があり, 安定した流れ場を作っている。

表-1は実験条件<sup>9)</sup>を示す。本研究では, 低水路満杯で流れる単断面蛇行流れCase1(Dr=0)と, 高水敷にも水が流れる複断面的蛇行流れCase2(Dr=0.40)を解析対象として, 初期平坦河床から20時間通水し, 安定した平衡河床を形成させ, これを固定床として解析を行い, この河床を形成した流れの構造を検討している。

低水路河床形状は流下方向に0.5m, 横断方向に0.1mの間隔で計測されている。解析格子には境界適合格子を用いて, 流下方向に0.25m, 横断方向に0.05mとしている。流れの解析には, 非静水圧準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS法<sup>9)</sup>)を用いている。

## 3. 縦断的な平面形・横断面形の違いと流れの構造の関係

### (1) 水面形及び水面流速の観測値と解析値との比較

図-2は観測水面形と解析水面形の比較及び通水20時間後の低水路横断平均河床と最深河床の縦断面図を示す。縦軸は下流端に設けた基準からの高さを示す<sup>7)</sup>。どちらのCaseも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いる。図-3は浮子を用いて測定した水面流速<sup>7)</sup>と解析水面流速の比較を示す。橙色の解析水面流速は黒色の測定した水面流速を概ね再現できている。

観測水面形と流速分布を概ね再現できていることから, 本解析法は安定した河床を有する蛇行流れを適切に再現できる解析モデルになっていると考え, 以下の検討を行う。

### (2) 単断面蛇行流れの構造

図-4はCase1(Dr=0)における河床変動コンター(実験値)<sup>9)</sup>を示す。蛇行が始まり上流湾曲部に入ると, 直線部で発達した流れが水衝部である断面69に当たり, 遠心力による湾曲二次流により外岸が大きく洗掘されている。これにより, 洗掘部の対岸に砂州が形成され, 最大で13cmもの標高差となっている。一樣蛇行部においては規則的な単断面蛇行流路により洗掘位置が外岸最大曲率部の下流にシフトし, 規則的な固定砂州が形成されてい

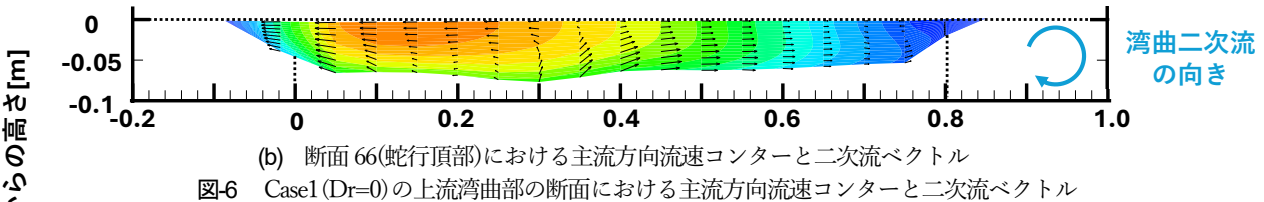
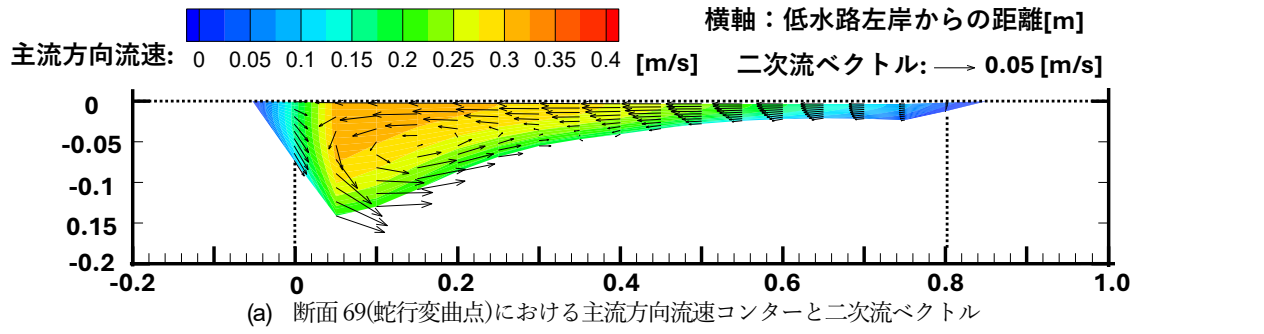


図-6 Case1 ( $Dr=0$ )の上流湾曲部の断面における主流方向流速コンターと二次流ベクトル

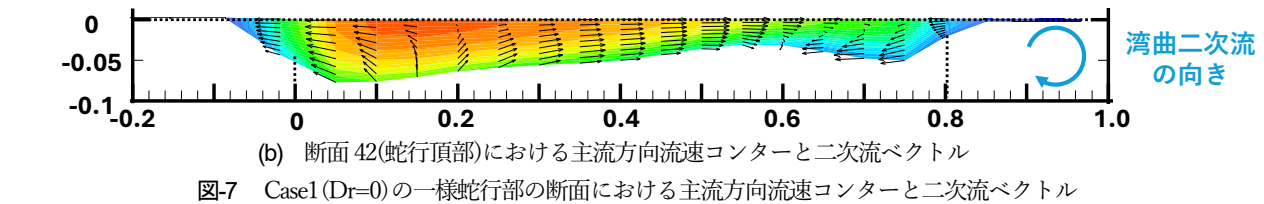
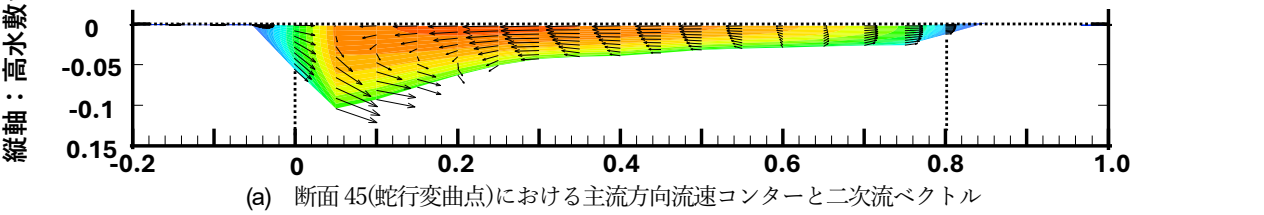


図-7 Case1 ( $Dr=0$ )の一樣蛇行部の断面における主流方向流速コンターと二次流ベクトル

る。図-5はCase1( $Dr=0$ )における解析水深平均流速の平面分布を示す。最大流速の発生位置は河床の深掘れ位置と対応している(図-4)。また、断面69は左岸と右岸で標高差が大きく、深掘れ部となる左岸側に流れが集中している。

上流湾曲部と一樣蛇行部では、蛇行度の違いがそれぞれの場合での主流と二次流構造に違いをもたらし、これが土砂移動を介して河床形状の違いとなっていることを本章の(2)、(3)で示す。図-6はCase1( $Dr=0$ )の上流湾曲部の断面(図-5中ピンク色の線)における主流方向流速コンターと二次流ベクトルを示す。図-6(a)に示す断面69は蛇行の変曲点にあり、上流側が激しく蛇行し、大きく発達した遠心力による湾曲二次流によって左岸が大きく洗掘されている。図-6(b)に示す断面66は蛇行頂部にあり、低水路蛇行の外岸は右岸側となるが、遠心力場であるにもかかわらず、右岸側では湾曲二次流とは逆向きの二次流が発達している。これは、平均流の縦断的な移流機構の差によって発生した河床形状の変化と関係していると思われる。図-7はCase1( $Dr=0$ )の一樣蛇行部の断面(図-5中黒色の線)における主流方向流速コンターと二次流ベクトルであり、図-7(a)が蛇行変曲点の断面45、図-7(b)が蛇行頂部の断面42を示す。断面45でも湾曲二次流が形

成されているが、その大きさは断面69よりも小さく、洗掘深も小さくなっている。

このように、単断面蛇行流路における流れと河床形状の関係は、従来から明らかにされていた結果と同様であるが、蛇行流れの土砂の移動機構を二次流との関係により詳細に調べることによって、河床深掘れ箇所の議論の精度を高めることが出来る。本節の単断面蛇行流れの構造の考察結果は、次節に示す複断面的蛇行流れの構造の理解に有用な技術情報を与えている。土砂の移動機構と河床変動について二次流との関係で議論の精度を高めることは、単断面蛇行流れの今後の重要な研究課題であると考えている。

### (3) 複断面的蛇行流れの構造

図-8はCase2( $Dr=0.40$ )における河床変動コンター(実験値)を示す。図-4と比較すると、単断面蛇行流れでは一樣蛇行部において洗掘と堆積の差は最大で13cmあり、規則的な固定砂州が形成されているが、複断面的蛇行流れでは洗掘と堆積の差は最大でも8cmと単断面蛇行流れより小さく、砂州も水路中央寄りに形成されている。

図-9はCase2( $Dr=0.40$ )における解析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、上流の複断面

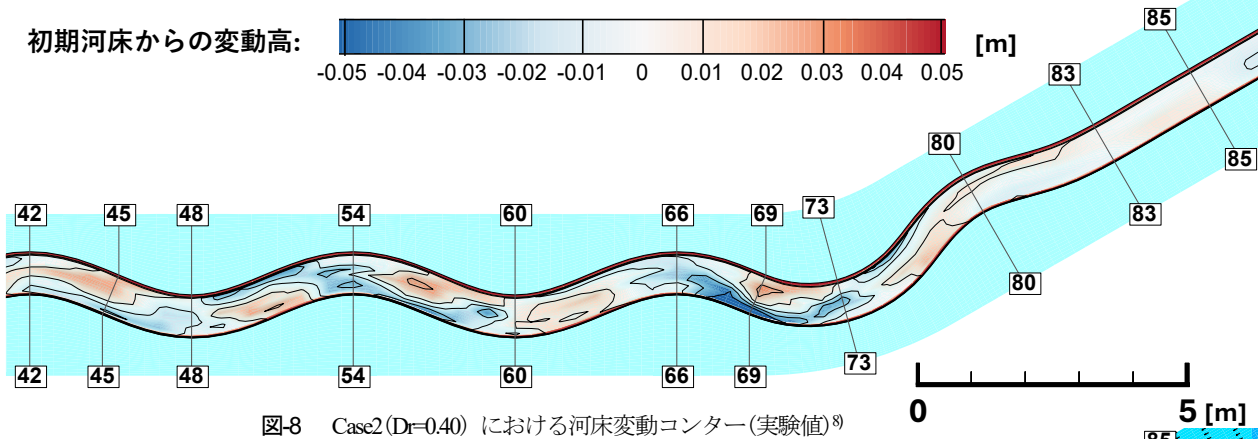


図-8 Case2(Dr=0.40)における河床変動コンター(実験値)<sup>8)</sup>

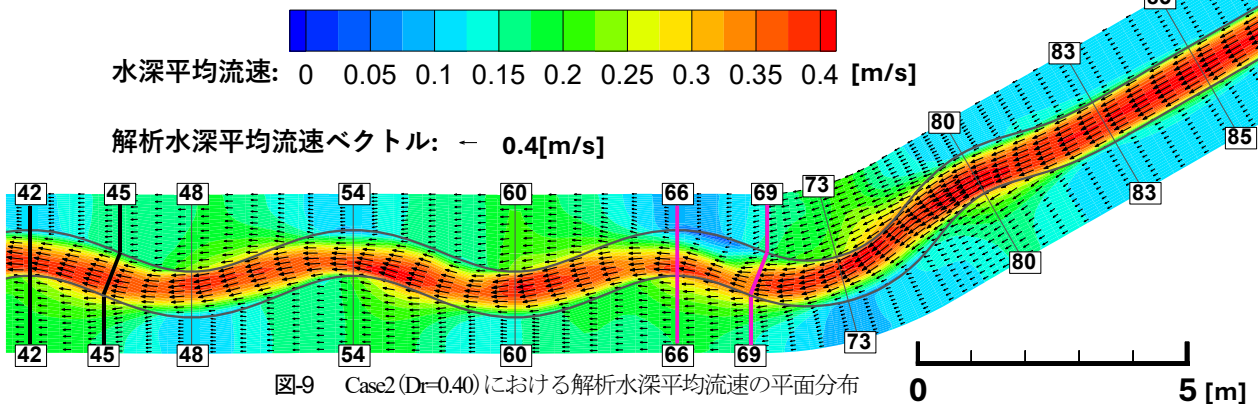


図-9 Case2(Dr=0.40)における解析水深平均流速の平面分布

直線部より複断面蛇行部の流速が小さい。これは、低水路の蛇行が始まると、高水敷の遅い流れが低水路へ流入する量及び、低水路の速い流れが高水敷へ乗り上げる量が複断面直線区間より多くなることで縦断的に運動量の交換が起り、低水路内の流れの抵抗が増加したためである。これにより、Case1(Dr=0)と比べて外岸側の流速は小さくなり(図-5)、主流は内岸側に偏って生じている。

図-10はCase2(Dr=0.40)での上流湾曲部の断面(図-9中ピンク色の線)における主流方向流速コンターと二次流ベクトルを示す。上流湾曲部では複断面直線部から入ってきた低水路の速い流れが断面80から右岸高水敷に縦断的に流出し、高水敷の流れを加速させ、断面73から低水路内に再び縦断的に流入する(図-9)。これにより、図-10(a)に示す断面69では低水路での遠心力による湾曲二次流が大きく発達することに加え、右岸高水敷から大量に流れが入り込んでいる。その影響が下流まで残り、図-10(b)に示す断面66では湾曲二次流とは逆向きの二次流が断面全体で形成されている。

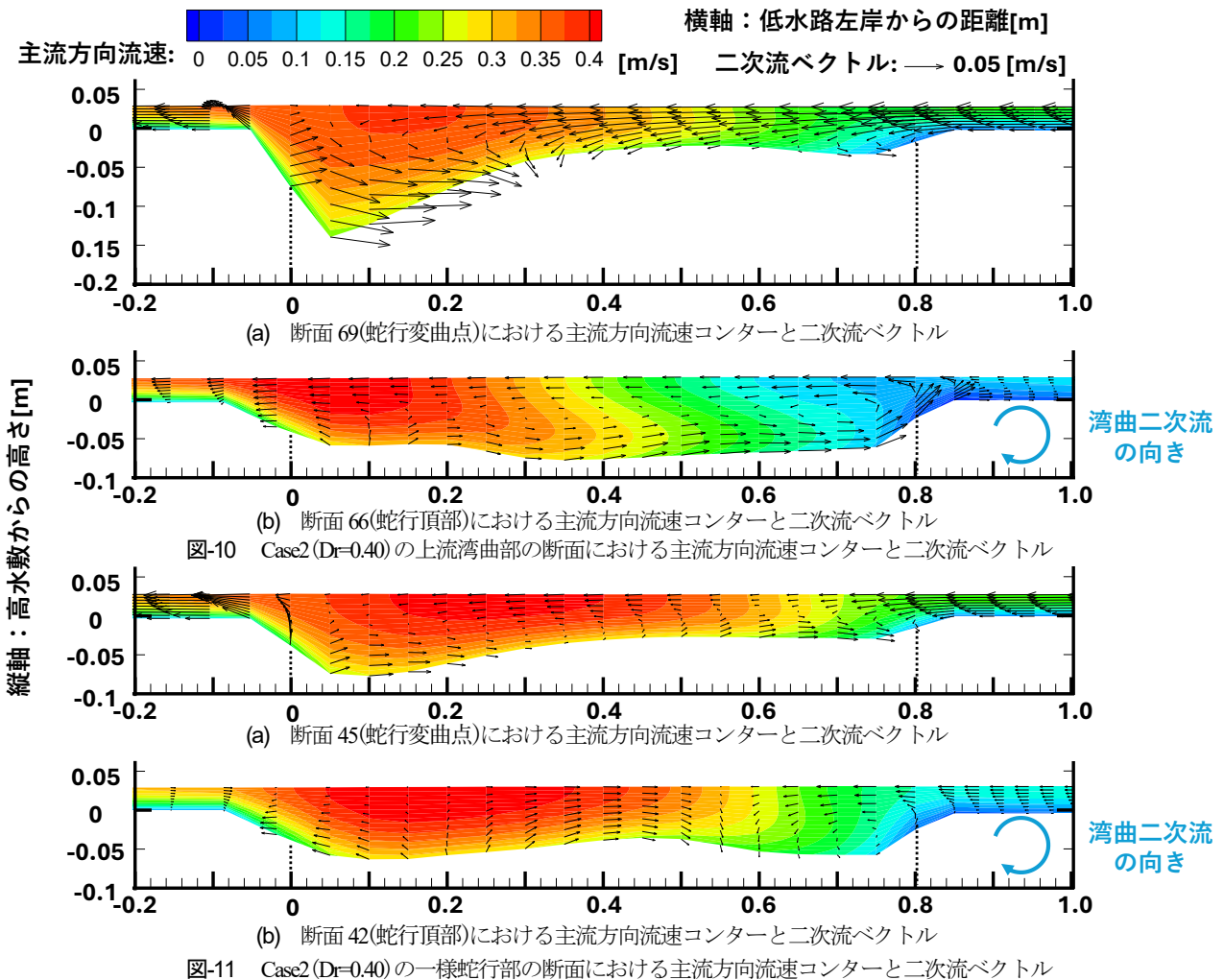
図-11はCase2(Dr=0.40)の一樣蛇行部の断面(図-9中黒色の線)における主流方向流速コンターと二次流ベクトルを示す。一樣蛇行部では高水敷と低水路間で左右岸で対称かつ周期的に流れの出入りを繰り返しており、流出入が蛇行の遷移区間で同時に起こっている(図-9)。図-11(a)に示す断面45では右岸高水敷から流れが流入しているが、その量は上流湾曲部の断面69より小さい(図-10(a))。また、左岸際では高水敷へ流れが流出しているが、深掘

れ部を主流が流れ、水面流速と底面流速の差が大きくなることによって遠心力場が維持されており、遠心力による湾曲二次流が形成されている。これにより、図-11(b)に示す断面42では、右岸側での高水敷からの移流混合による二次流、中央部での上流から河床形状に沿った流れ、左岸側での高水敷から低水路へ流入する流れの影響を受けた二次流が形成されている。

上流湾曲部(断面73～断面66)、一樣蛇行部(断面48～断面42)では、どちらの区間も右岸高水敷からの遅い流れが縦断的に連続して入り込んでいる(図-9)。しかし、上流湾曲部では堤防線形が大きく湾曲し、低水路線形が堤防線形の湾曲よりも大きな曲率で蛇行することで、右岸高水敷の遅い流れが一樣蛇行部よりも大量に流入している。これにより、一樣蛇行部よりも上流湾曲部において、運動量の交換が縦断的に激しく起り、湾曲二次流とは逆向きの二次流が断面全体に形成された。(図-10(b))。

一方、一樣蛇行部では、右岸側からの流入量が上流湾曲部に比べて少ないために、逆向きの二次流は右岸付近に形成され、中央部は上流からの速い主流がそのまま流れている状況で、二次流の向きは全体が右岸に向いている。さらに左岸寄りになると、左岸から流入する流れの影響を受けた二次流構造となっている。(図-11(b))。

このように、複断面的蛇行流れでは堤防線形と低水路線形の位相関係が縦断的に変化することで、高水敷と低水路間の運動量交換の度合が大きく変化し、その度合に



よって流れの構造が縦横断的に異なることになる。さらに、河床が平坦でなく、縦断的に異なる横断面をもつことにより、主流が深掘れ部を流れ、水面と底面の流速差が大きくなることで遠心力場が維持され、複断面的蛇行流れであっても遠心力による湾曲二次流は存在することになる。このため、複断面的蛇行流れの構造は湾曲二次流とは逆向きの二次流が形成される特徴を有するが、混合の度合によってこれら二つの二次流が共存し、これらの共存状態が堤防線形と低水路線形の位相差による流れの流出量と河床形状の縦横断的な変化に応じて異なることで、場所ごとに複雑な3次元構造となることが明らかとなった。

#### 4. 結論

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移動床実験で得られた平衡河床の流れ場を固定床流れ場としてQ3D-FEBS法で解析し、再現した。さらに、一様蛇行部の流れと異なる蛇行度の上流湾曲部の流れを比較することで、縦断的な平面形・横断面形の違いと流れの構造の関係を検討した。

単断面蛇行流れについては、蛇行流の二次流構造との関係で土砂移動、河床深掘れ箇所等の議論の精度を高めることの必要性を述べた。

複断面的蛇行流れの構造は、遠心力に起因する湾曲二次流と複断面形状に起因する流れの移流混合により生じる二次流が共存し、これらの共存状態が平面形・横断面形の縦断的な変化に応じて異なることで、縦横断的に複雑な3次元流れ構造となることを示した。

今後は本研究で用いた単断面蛇行流れ、複断面的蛇行流れに対する移動床実験結果を用いて移動床解析を行い、複断面蛇行流路の平面形と流砂運動機構、流れと河床変動機構について一体的に検討し、複断面蛇行流路の流れと河床変動を予測できる解析モデルを検討することを考えている。

#### REFERENCES

- 1) 福岡捷二：超過洪水時の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の一体設計の考え方，河川技術論文集，第29巻，pp.209-214, 2023.[Fukuoka, S.: Integrated design of levee and river channel based on three dimensional energy distributions of excess floods, *Advances in River Engineering*, Vol.29, pp.209-214, 2023.]
- 2) 福岡捷二：時代の要請に応える河川技術のこれまで

- とこれから(招待論文), 河川技術論文集, 第 31 卷, pp.K\_1-K\_17, 2025.[Fukuoka, S.: The past and future of Japanese river technology responding to the demands of the times, *Advances in River Engineering*, Vol.31, pp. K\_1-K\_17, 2025.]
- 3) 後藤岳久, 後藤勝洋, 加藤宏季, 福岡捷二:大規模洪水時における砂州の発達に伴う洪水流の三次元エネルギー分布の変化に基づく河川構造物の被災機構, 第 12 回河川堤防技術シンポジウム, pp.33-36, 2025.[Gotoh, T., Gotoh, K., Kato, H. and Fukuoka, S.: Analysis of damage mechanism of river structures based on the change in the 3D energy distribution of flood flows due to the development of sandbars during large-scale floods, *Proceedings of the 12th Symposium on River Levee Technology*, pp.33-36, 2025.]
  - 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狭隘区間の集落の被害分析, 河川技術論文集, 第 27 卷, pp. 597-602, 2021. [Tabata, K., Gotoh, T., Takemura, Y., Sakou, K. and Fukuoka, S.: Flood damage analysis for urban district and mountainous narrow area by integrating analysis of flood flow and inundation under the 2020 kumagawa heavy rain, *Advances in River Engineering*, Vol.27, pp. 597-602, 2021.]
  - 5) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡田将治: 静水圧近似 3 次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集, 第 42 卷, pp.1015-1020, 1998.[Fukuoka, S., Watanabe, A. and Okada, S.: Bed topography analysis in a compound meandering channel by using 3D numerical model with approximation of hydrostatic pressure, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.42, pp.1015-1020, 1998.]
  - 6) 渡邊明英, 福岡捷二: 複断面蛇行流路における流れと河床変動の 3 次元解析, 水工学論文集, 第 43 卷, pp.665-670, 1999.[Watanabe, A. and Fukuoka, S.: Three dimensional analysis on flows and bed topography in a compound meandering channel, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.43, pp.665-670, 1999.]
  - 7) 岡田将治, JULIO MASIS 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 卷, pp.655-660, 2003.[Okada, S., Julio M., J., Fukuoka, S., Tamura, H. and Shigematsu, R.: Flow and bed topography in a compound channel consisting of different plan shapes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.47, pp.655-660, 2003.]
  - 8) 福岡捷二, 柴田高, 田村浩敏, 田端幸輔, 山形勝巳: 異なる平面形が連なる複断面流路の流砂量分布に関する研究, 水工学論文集, 第 49 卷(2), pp.1027-1032, 2005.[Fukuoka, S., Shibata, T., Tamura, H., Tabata, K. and Yamagata, K.: Study on sediment discharge distributions in a compound channel with different plan forms, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.49(2), pp.1027-1032, 2005.]
  - 9) 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.[Takemura, Y. and Fukuoka, S.: Analysis of the flow in undular and hydraulic jump stilling basins using non-hydrostatic quasi-three dimensional model considering flow equations on boundary surfaces, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1(Hydraulic Engineering), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.]

(Received May 30, 2025)

(Accepted September 18, 2025)

## FLOW STRUCTURE IN A COMPOUND MEANDERING CHANNEL WITH VARIOUS PLANFORM AND CROSS SECTIONS

Kazuki HIRAYAMA and Shoji FUKUOKA

The structure of compound meandering channel flow, sediment discharge and bed variation change over time and space, and their relationship is complex. Due to the complexity of their interrelationships, there is an urgent need for the development of analytical methods capable of accurately capturing and explaining these dynamic processes. In this study, a non-hydrostatic pressure quasi-three-dimensional flood flow analysis was conducted on the results of steady-flow mobile bed experiments performed in a compound channel with longitudinally varying planform in the 1990s. The analysis clarified the structure of meandering flows with longitudinal variations in both planform and cross sections. Notably, it was revealed that the flow structure in compound meandering channel flow is characterized by the coexistence of secondary currents: those generated by centrifugal forces due to channel curvature, and those induced by convective exchange between the main channel flow and floodplain flow. The coexistence of these secondary flows were found to vary with longitudinal changes in both planform and cross-sections, resulting in a complex three-dimensional flow structure in both longitudinal and transverse directions. The findings highlight the necessity of integrated analyses that consider both flow dynamics and bed variation in order to address the complex challenges associated with compound meandering channel flow.