

複断面蛇行流路における 流れと河床変動の3次元解析

THREE DIMENSIONAL ANALYSIS ON FLOWS AND BED TOPOGRAPHY IN A COMPOUND MEANDERING CHANNEL

渡辺明英¹・福岡捷二²

Akihide WATANABE and Shoji FUKUOKA

¹正会員 工博 広島大学助教授 工学部第4類(建設系)地域環境工学講座 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

²フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学教授 工学部第4類(建設系)地域環境工学講座 (同 上)

A three dimensional numerical model was developed to examine characteristics and mechanism of flows and bed deformation in a compound meandering channel. In this paper, it is shown that characteristics of flows and bed deformation in numerical results changes with the relative depth. When the relative depth is low, characteristics of flow is close to those of a single-section meandering channel because the exchange rate of the fluid between a main channel and flood channels is not yet large. When the relative depth is high, flows and bed topography show the characteristics of those in a compound channel obtained in a physical model with movable bed and numerical model with fixed flat bed. The river bed in a meandering compound channel is scoured along a main flow area by the secondary flows which go outside of the main flow area over the river bed.

Key Words: meandering compound channel, relative depth, spectral method, numerical analysis, river bed deformation, flows characteristics.

1. はじめに

従来の研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾から, 複断面蛇行水路における流れと河床形状の特性が, 低水路の蛇行度, 高水数上の水深と低水路水深の比(以下, 相対水深 Dr), 高水数と低水路の粗度の比などの水理特性によって大きく異なることが示されている. 福岡らは大型水理模型実験結果⁶⁾と航空測量写真から得られた流速分布⁷⁾について検討し, 単断面的な蛇行流れの特性と複断面的な蛇行流れの特性を持つ領域を区分する無次元量について整理している.

近年, このような複断面蛇行水路における流れの数値解析⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾が試みられるようになってきており, 数値モデルを用いることにより相対水深の変化に伴う流れ構造の変化を解析し得ることが示されている¹⁰⁾. しかし, 複断面蛇行河道における流れと河床形状の特性の関係までも的確に再現し得る数値モデルは開発されていないのが現状である. 特に相対水深が大きい場合に静水圧分布を仮定した河床変動解析を行うと低水路下層の蛇行変曲点付近で流れが集中しすぎて実際の流れ場と河床形状を表現できないという問題がある¹¹⁾.

本文では, スペクトル法を用いた流れの非静水圧

3次元解析モデル¹⁰⁾に河床変動モデル¹¹⁾を組み込み, 河床変動解析を行っている. 複断面蛇行流れの特性を支配する水理量として相対水深 Dr を選び, 相対水深 Dr の値を変化させた場合に, 流れ場と河床変動の特性がどのように変化するかについて数値実験的に検討を行っている.

2. 解析方法

解析方法と考え方は, 既報¹⁰⁾¹¹⁾で述べてあるので, ここでは要点のみを説明する. 対象とする場の境界形状が周期的であるので, 境界形状, 流れ場, 河床形状を縦断方向にフーリエ級数展開し, スペクトル選点法によってモード成分を時間積分することで解を求める. 本解析では級数を0次～7次モードまで展開し, スペクトル選点は32点取っている. しかし, 流砂量ベクトルは解析上で流れのモードと比較して高次モードまで必要とするので, 厳密にはスペクトルのモードを十分な範囲まで広げることが望ましい.

(1)座標系の設定

複雑な境界形状の影響を数値解析へ容易に取り入れるために, 平面座標変換と鉛直座標変換を行う.

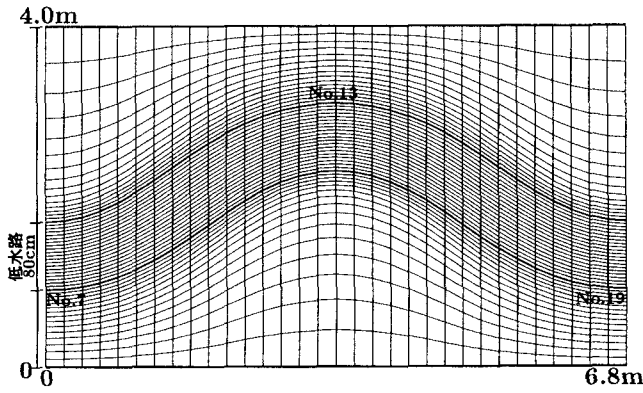


図-1 複断面水路平面形状と平面座標系

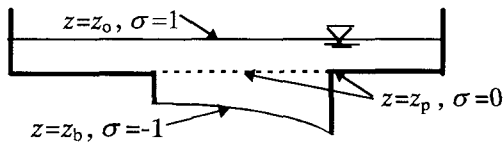


図-2 σ 座標系の定義

解析対象とする複断面河道の平面形状と導入した平面座標系を図-1に示す。鉛直座標 z は図-2に示すような変則的な σ 座標系に変換される。この座標系の導入により、計量テンソルマトリクスは、

$$\begin{bmatrix} \xi_x & \eta_x & \sigma_x \\ \xi_y & \eta_y & \sigma_y \\ \xi_z & \eta_z & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_\eta / J' & -y_\xi / J' & \sigma_x' / z_\sigma \\ -x_\eta / J' & x_\xi / J' & \sigma_y' / z_\sigma \\ 0 & 0 & 1 / z_\sigma \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_x' = -(z_\xi \xi_x + z_\eta \eta_x) \\ \sigma_y' = -(z_\xi \xi_y + z_\eta \eta_y) \end{cases} \quad (2)$$

$$J = J' z_\sigma, J' = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi \quad (3)$$

の様に簡潔に表わされる。座標系による添字はその座標に対する偏微分を示す。 J : ヤコビアンである。曲線座標系における反変流速はそれぞれ以下のように表わされる。

$$\begin{cases} U = \xi_x u + \xi_y v \\ V = \eta_x u + \eta_y v \\ W = \sigma_z w, W' = (\sigma_x' u + \sigma_y' v + w) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 u : x 方向流速、 v : y 方向流速、 w : z 方向流速、 U : ξ 方向反変流速、 V : η 方向反変流速、 W : σ 方向反変流速を表す。

(2) 流れの基礎方程式

上述の座標系を導入すると流れの運動方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial u}{\partial \xi} + V \frac{\partial u}{\partial \eta} + W' \frac{\partial u}{\partial z'} &= g_x + \nu_T \Delta u \\ -\frac{1}{\rho} (\xi_x \frac{\partial p}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial p}{\partial \eta} + \sigma_x' \frac{\partial p}{\partial z'}) & \end{aligned}$$

$$-g(\xi_x \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial \zeta}{\partial \eta}) \quad (5a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial \xi} + V \frac{\partial v}{\partial \eta} + W' \frac{\partial v}{\partial z'} = g_y + \nu_T \Delta v$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\rho} (\xi_y \frac{\partial p}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial p}{\partial \eta} + \sigma_y' \frac{\partial p}{\partial z'}) \\ -g(\xi_y \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial \zeta}{\partial \eta}) \end{aligned} \quad (5b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + U \frac{\partial w}{\partial \xi} + V \frac{\partial w}{\partial \eta} + W' \frac{\partial w}{\partial z'} = g_z + \nu_T \Delta w$$

$$-\frac{1}{\rho} (\frac{\partial p}{\partial z'}) \quad (5c)$$

と表わされる。 g : 重力加速度、 ζ : 基準水面に対する水位変動である。 ν_T は h : 基準水面からとった水深、 dz : 底面からの高さ、 u_* : 底面摩擦速度を用いて次式で表わされる。

$$\nu_T = \kappa u_* dz (1 - dz/h) \quad (6)$$

連続式は

$$\frac{\partial J' z_\sigma U}{\partial \xi} + \frac{\partial J' z_\sigma V}{\partial \eta} + \frac{\partial J' W'}{\partial \sigma} = 0 \quad (7)$$

と表わされる。この式(7)を河床面から水面まで積分すると、水位変動 ζ が得られる。水表面、河床面における σ 方向反変流速 W' は、運動学的境界条件から与えられる¹⁰⁾¹¹⁾。流速の壁面境界条件として、不透過スリップ条件が適用され、壁面上の摩擦速度は、壁面近傍の流速を抵抗係数で除して求められる。

(3) 河床変動モデル

河床変動量は流砂の連続式¹¹⁾と斜面の縦横断勾配の影響¹²⁾¹³⁾が考慮された反変流砂量ベクトル¹¹⁾によって得られる。流砂量の算定には芦田・道上式が用いられている。河床変動の時間積分はスペクトル選点上での差分計算で行われ、得られた河床形状からスペクトル成分が抽出される。河床変動の解析には多くの計算時間を要するが、河床変動速度は遅いため、流れ場は河床変化に対して速く追従できる特性がある¹¹⁾。ここでは河床変動と流速変動の計算が別の時間スケールで交互にくり返されることで河床変動の計算過程が加速されている。まず流れ場が4秒間計算され、この間の時間平均値を用いて底面せん断力が算定される。流れに対する河床変動の時間歪みを5として20秒間分の河床変動量が求められ、河床形状を変更した後、流れ場が求め直される。本文中の時間は河床変動に対応させたものである。

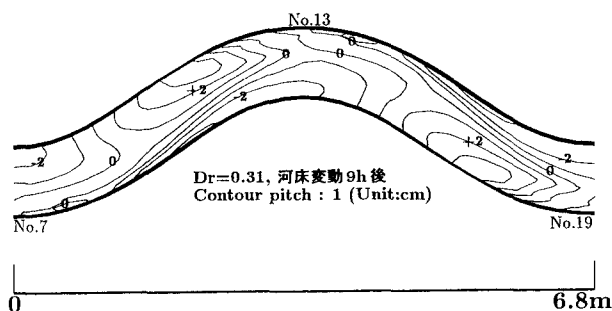


図-3 ケース3の河床変動コンター（解析結果）

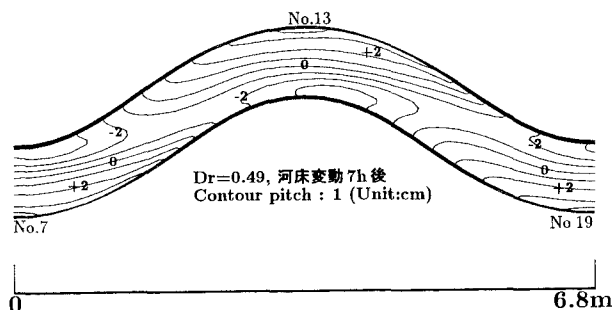


図-5 ケース5の河床変動コンター（解析結果）

表-1 解析条件

case	実験 流量 (l/s)	解析 流量 (l/s)	低水路 水深 (cm)	高水敷 水深 (cm)	相対水深 Dr
3	35.9	34.4	8.0	2.5	0.31
5	63.7	74.7	10.6	5.3	0.49

3. 解析

(1)実験及び解析の条件

対象とする複断面流路は図-1に示した幅4.0 m, 低水路幅0.8 m, 低水路河岸平均高さ0.055 m, 区間長6.8m, 蛇行度1.1の水路である。

本文では、福岡らによる大型模型実験のうち、相対水深が異なるケース3, 5⁶⁾を解析対象とした。実験水路の全長は15mであり、その中に蛇行が2波長分ある。高水敷上には粗度として人工芝が張り付けられており、低水路には粒径0.8 mmの砂が敷き詰めである。水路及び河床面の勾配は1/600である。底面抵抗係数は、相当粗度 ks と流速の計算点である底面上1メッシュ目の中央の高さ $z_{1/2}$ を用いて、

$$\varphi_b = 5.75 \log(z_{1/2} / ks) + 8.5 \quad (8)$$

とした。 ks の値は高水敷上で2.8cm, 河床面での ks は砂粒径の1.1倍とし、河床波等による粗度の変化は考慮しないこととした。

表-1は解析条件を示している。本解析では水深（相対水深）が実験と一致するようにし、平坦時における

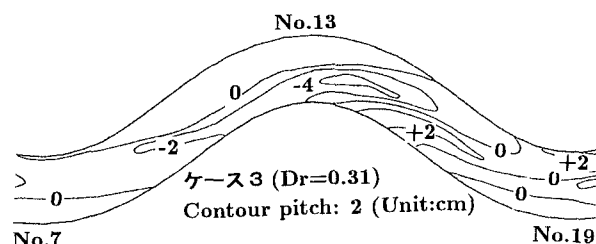


図-4 ケース3の河床変動コンター（実験結果）

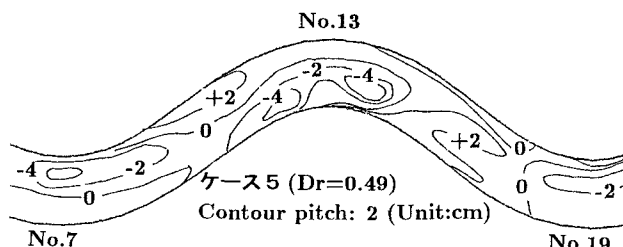


図-6 ケース5の河床変動コンター（実験結果）

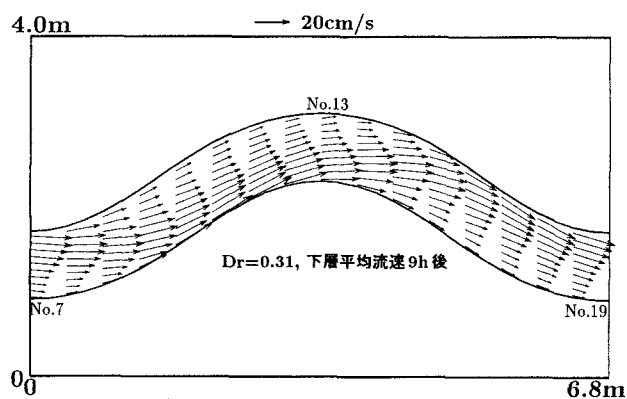
解析時の流量が河床変動後の実験時の流量に合うように抵抗係数を定めた¹¹⁾。しかしながら、表-1に示すように河床変動後の解析結果の流量は多少異なっている。これは先に述べた河床波の発達等による粗度の変化や河床形状と流れの構造の変化の影響をあらかじめ考慮して粗度を同定していないためである。

(2)河床変動特性

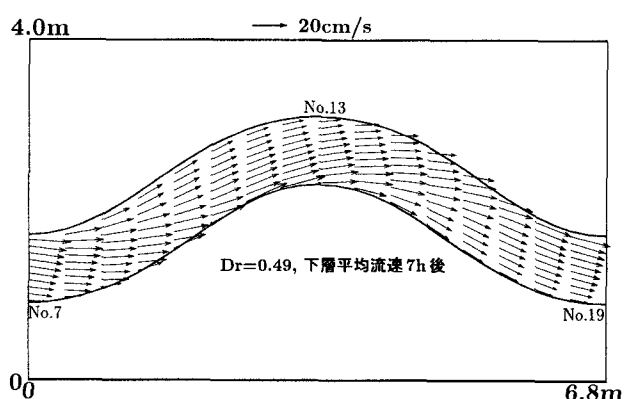
図-3, 図-5はそれぞれケース3, 5についての河床変動の解析結果を示している。ケース3は9時間後の河床形状を、ケース5については6時間以降の河床変動がほぼ収束したので7時間後のものを示している。図-4, 図-6はケース3, 5における実験結果を示している。

これらの図を比較すると、相対水深 $Dr=0.31$ のとき、実験では複断面的蛇行流れの特徴が現われ始めており、蛇行湾曲内岸のNo.13付近の洗掘が顕著に現われている。ただし、実験結果は縦断方向に周期的になっておらず、実験上の境界条件や縦断距離の影響を受けている。一方、同一の相対水深 $Dr=0.31$ に対する解析結果は、蛇行の変曲点から内岸部にかけて大きな洗掘が生じている。すなわち、この状態では流れ場は完全には複断面的蛇行流れに移行しておらず、まだ遷移領域(単断面的蛇行流れ)にあることを示している。

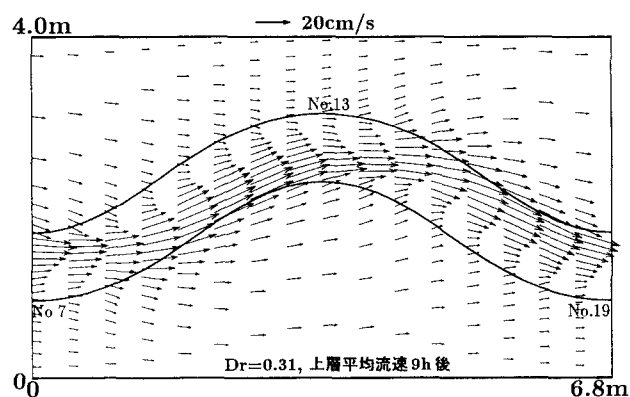
相対水深が大きい $Dr=0.49$ の場合では、蛇行の内岸から次の内岸へ向かうようにほぼ連続するように



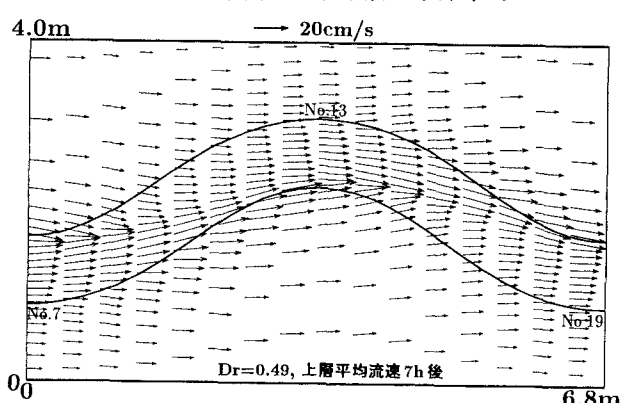
(a) 高水敷高さより下層の水深平均



(a) 高水敷高さより下層の水深平均



(b) 高水敷高さより上層の水深平均



(b) 高水敷高さより上層の水深平均

図-7 ケース 3 ($Dr=0.31$) の水深平均流速ベクトル

図-8 ケース 5 ($Dr=0.49$) の水深平均流速ベクトル

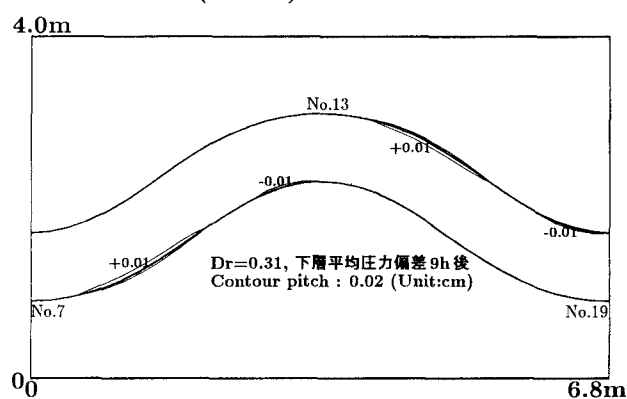


図-9 ケース 3 ($Dr=0.31$) の下層平均圧力水頭偏差

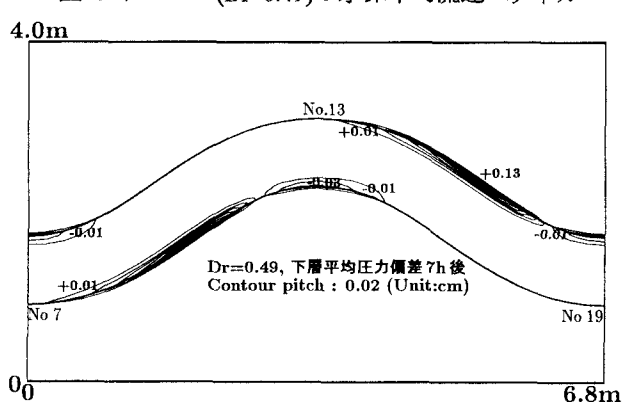


図-10 ケース 5 ($Dr=0.49$) の下層平均圧力水頭偏差分布

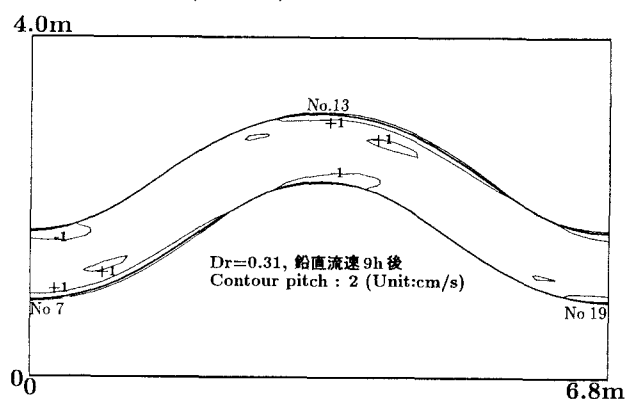


図-11 ケース 3 ($Dr=0.31$) の鉛直流速分布

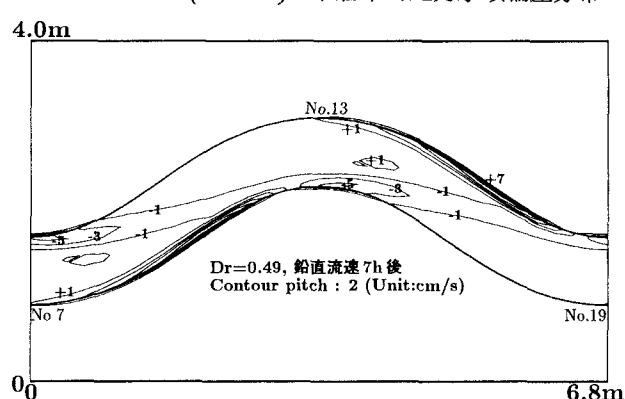


図-12 ケース 5 ($Dr=0.49$) の鉛直流速分布

洗掘が生じており、内岸部で大きな洗掘が生じている。蛇行の外岸領域では土砂堆積が生じている。この複断面的蛇行流れの特徴は解析の方で顕著に現われている。これは解析で与えた河床面の粗度が平坦床に対するものであり、これが実際のものよりも小さかったために河床に作用する有効掃流力が大きくなって土砂が運ばれやすくなったことによると考えられる。

河床変動の実験結果と解析結果は細部にわたって一致していないが、相対水深に対する河床変動の応答特性は十分表わしている。

(3)流れ場の特性

図-7、図-8 はそれぞれ高水数高さを境に上層と下層に分けて水深平均したケース3、ケース5における流速ベクトルを示している。

低水路部の下層の水深平均流れは相対水深が小さい $Dr=0.31$ の場合には流れの集中と発散が大きくなっている。図-3 と共に図-7 を見ると、下層部において流れが集中している蛇行の変曲点から内岸にかけて洗掘が生じ、流れが遅くなる対岸部分で堆積が生じていることが分かる。

一方、相対水深が大きい $Dr=0.49$ の場合には、低水路下層の水深平均流れの集中の度合は $Dr=0.31$ の場合に比べて弱くなっている。相対水深が変化しても最大流速は同程度であり、相対水深が小さい場合に流速の遅かった箇所では流速が増大し、結果として流速差が減じられている。また、 $Dr=0.31$ の場合には蛇行の外岸部で外岸に向かう流れが弱く低水路の線形に沿うように流れが集中するのに対し、 $Dr=0.49$ の場合には外岸に向かう流れはそのまま壁面へ向かうように流れている。すなわち、 $Dr=0.49$ の場合には底面付近で外岸に向かう二次流によって土砂が外岸に向かって運ばれることになる。

図-7(b)が示すように $Dr=0.31$ における低水路部上層の流れは下層と同様に集中した流れが内岸から次の内岸に向かっている。高水数上の流速が遅いために、横断方向に大きな流速差が生じている。これとともに、高水数上の流れが低水路に侵入する箇所においては下層の流速が上層に比べて速く、上層と下層の流速の向きも大きく異なっている。また、高水数上の水深と流速が小さいことは、高水数を通る流量が少ないことを示す。このことは低水路部と高水数部を出入りする流量が小さく、運動量の交換量も相対的に少なくことを意味する。これが複断面的蛇行流れの特性が現われ難い理由と考えられる。

低水路を流れる縦断平均流量 Q_m に対する高水数と低水路の間を片側で出入りする流量 dQ_{fp} の割合は、 $Dr=0.49$ のとき 0.76 であるのに対して、 $Dr=0.31$ のとき 0.33 である。これらのことから、単断面的蛇行流れから複断面的蛇行流れへの遷移の指標として、蛇行度・相対水深と共に流体の交換量に関わる高水数上の流速と粗度が重要であることが分かる。

一方、図-8(b)が示すように相対水深が大きい $Dr=0.49$ の場合、上層部では高水数上の流速が速くなっているために、 $Dr=0.31$ の場合と比較して、全体的に堤防の線形に沿った方向に流れ、横断方向の流速差も小さくなっている。しかし、先に述べたように低水路と高水数間で出入りする流体の量は大きく、低水路部の上層と下層で流れの向きが交差する範囲も大きくなって、変曲点の外岸から最大湾曲部に生じる単断面蛇行とは逆向きの二次流が広い範囲で形成されていることが分かる。

このように、河床変動特性からだけでなく水深平均流速場から見ても、相対水深 $Dr=0.31$ の解析結果は単断面蛇行流れから複断面的蛇行流れの遷移領域にあることになる。相対水深 $Dr=0.31$ の解析結果が遷移領域にあるのは高水数上の粗度と勾配による高水数上の流速が低水路内の流速に対して遅いためであると考えられる。このことは領域の区分が相対水深と蛇行度だけで決まるのではないことを示しており、高水数の粗度によっては異なる区分結果が得られるものと思われる。

図-9、図-10 はそれぞれ低水路下層部で水深平均したケース3、ケース5における圧力偏差の分布を示している。これより、相対水深 $Dr=0.49$ の場合には複断面的蛇行流れに特徴的な圧力分布、すなわち下層流れの乗り上げ部となる蛇行外岸側の変曲点において圧力が大きく上昇し、そこで大きな鉛直加速度を生じさせていること、蛇行の最大湾曲内岸で圧力低下が生じていることが分かる。これに対して、相対水深 $Dr=0.31$ の場合には圧力変動がほとんど生じていないことが分かる。すなわち、この状態では複断面的蛇行流れに遷移しきっていないことを示している。このことは高水数高さの面における鉛直流速分布からも示すことができる。

図-11、図-12 はそれぞれケース3、ケース5における高水数高さの鉛直流速分布を示している。負の値で囲まれた範囲が沈み込み領域を、正の値で囲まれた範囲が湧き上がり領域を示している。これらの図から、相対水深 $Dr=0.49$ の場合には湾曲内岸で大きな潜り込流れが生じ、下層で流れが当たる蛇行の

外岸部変曲点で大きな湧き上がりが生じているが、相対水深 $Dr=0.31$ の場合にはこれらの鉛直成分が相対水深が大きい場合に比べて小さい値を示していることが分かる。また、これらの潜り込み流れと湧き上がりは二次流の強さも表わしており、相対水深が大きい方が明瞭な二次流セルを持っていることを示している。

相対水深 $Dr=0.49$ の場合について、下層の水深平均流速分布図-8(a)と同時に見ると、流れが集中している主流部で上層から潜り込んだ流れが、下層で左右に別れて外岸へ向かって進んで行くことが分かる。また、河床変動コンター図-5 と同時に見るとこの沈み込み領域と洗掘領域が対応していることが分かる。

この沈み込み領域において洗掘が生じる理由とプロセスは以下のように考えられる。上層で集中した速い流れが沈み込むために下層の流速も周囲に比べて速くなる。この部分で掃流力が大きくなるため、土砂移動もこの範囲で活発になる。これと併せて、沈みこんだ流体は左右に別れるように外側へ流れていく。この結果、土砂が沈み込み領域から外側へ向かって運ばれ、沈み込み領域が洗掘領域になる。河床形状の形成に対して、この流体の沈み込みに起因する外側へ向う二次流が大きく作用する。すなわち、相対水深 $Dr=0.49$ において見られた特徴的な河床変動は、複断面的蛇行流れの特徴である集中した流れの下層への潜り込みに起因して生じている。

相対水深 $Dr=0.31$ の解析結果では、大きな潜り込み流れが現われていない等、流れ場が複断面的蛇行流れの特徴的な形態を示していない。単断面蛇行から複断面的蛇行への遷移領域(単断面的蛇行流れ)であるこの場合には、二次流の構造が弱められているので、下層流れの集中と発散に伴う流れの加速と減速によって河床変動が生じていると考えられる。

4. おわりに

複断面蛇行流路における流れ場と河床変動の解析から以下の結果を得た。相対水深が大きくなると複断面的蛇行流れの特性が現われ、この流れ場の特性に応じた河床形状が形成される。すなわち、複断面的流れの大きな特徴である主流部の潜り込みによって生じる二次流が主流域の土砂を外岸に向かって移動させ、これに伴い主流域に沿って洗掘が、その外側の領域で堆積が生じる。一方、相対水深 $Dr=0.31$ では流れ場は遷移過程にあり、複断面的蛇行流れの特

性は顕著に現われず、流れ場も河床形状も単断面的蛇行流れの特性を示した。

本文では相対水深の異なる2ケースのみの解析結果が示されている。流れ場の特性に関する領域区分を明らかにするためには、相対水深、蛇行度、粗度、堤防線形等を変化させて、より多くの水理条件の下で同様な解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 滝口将志: 蛇行低水路を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機構, 京都大学防災研究所年報第32号B-2, pp.527-551, 1989.
- 2) 森明巨, 岸力: 昭和56年石狩川洪水で観測された湾曲部河床変動の特性, 第30回水理講演会論文集, pp.493-498, 1986.
- 3) 芦田和男, 江藤進治, 劉炳義: 複断面蛇行流の水理特性に関する研究, 水工学論文集第34巻, pp.397-402, 1990.
- 4) 武藤裕則, 塩野耕二, 今本博健, 石垣泰輔: 複断面開水路流れの3次元構造について, 水工学論文集第40巻, pp.711-716, 1996.
- 5) 福岡捷二, 大串弘哉, 加村大輔, 平生昭二: 複断面蛇行流における洪水流の水理, 土木学会論文集 No.579/II-41, pp.83-92, 1997.
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英, 加村大輔, 岡田将治: 複断面流路における流砂量, 河床変動の実験的研究, 水工学論文集第41巻 pp.883-888, 1997.
- 7) 福岡捷二, 高橋浩尚, 加村大輔: 複断面河道の洪水流に現れる複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れ-洪水航空写真を用いた分析-, 水工学論文集第41巻 pp.971-976, 1997.
- 8) Haisheng Jin, Shinji Egashira, Bingyi Liu: Characteristics of Meandering Compound Channel Flow Evaluated With Two-Layered, 2-D Method, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE* Vol.41, pp.717-724, 1996.
- 9) Haisheng Jin, Shinji Egashira, Bingyi Liu: Modification of k-ε Turbulence Closure and Its Application to Meandering Compound Channel Flow. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE* Vol.42, pp.949-954, 1997.
- 10) 福岡捷二, 渡辺明英: 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp.39-50, 1998.
- 11) 福岡捷二, 渡辺明英, 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巻, pp.1015-1020, 1998.2
- 12) 福岡捷二, 渡辺明英, 萱場祐一, 曾田英揮: ベーン工が断続的に配置された河道湾曲部の流れと河床形状, 土木学会論文集 No.479/II-25, pp.61-70, 1993.
- 13) 福岡捷二, 山坂昌成: 直線流路の交互砂州, 第27回水理講演会論文集, pp.703-708, 1983.

(1998. 9. 30 受付)