

一般座標系での湾曲流の水深積分モデルの改良と その検証について

REFINEMENT OF A DEPTH AVERAGED MODEL IN CURVED CHANNEL IN GENERALIZED CURVILINEAR COORDINATE SYSTEM AND ITS VERIFICATION

音田 慎一郎¹・細田 尚²・木村 一郎³

Shinichiro ONDA, Takashi HOSODA and Ichiro KIMURA

¹正会員 博(工) 京都大学大学院助手 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 博(工) 松江工業高等専門学校助教授 環境・建設工学科 (〒690-8518 松江市西生馬町14-4)

In curved channels, velocity distribution in the main flow direction is transformed by the secondary currents and the strength of secondary circulation is varied with the transformation of downstream velocity. Therefore, it is necessary to consider the interaction between main and secondary flows. In this study, a depth averaged flow model in curved channels in generalized curvilinear coordinate system is refined, by including this interaction. The model is applied to the experiments by Rozovskii for uniformly curved channel flow and compared with both the experimental and 3-D results.

Key Words : *depth averaged flow model, interaction between main and secondary flow, generalized curvilinear coordinate system*

1. はじめに

河道内の流れや河床変動を予測する場合、一般座標系での平面2次元モデルが汎用的に用いられている。その際、河道湾曲部や蛇行部では、2次流が生じるため、運動量輸送や底面せん断応力の評価に2次流の影響を考慮する必要がある。これまで、2次流のモデル化や2次流による運動量輸送を平面2次元モデルに組み込む手法を考察するため、数多くの研究が行われてきた^{1)~8)}。

石川・金¹⁾は、一様湾曲水路を対象に実験を行い、主流と2次流の干渉が2次流強度に大きな影響を及ぼすことを指摘するとともに、2次流強度の縦断変化を解析する手法を理論的に考察している。また、Blanckaert²⁾は、急激に湾曲する一様湾曲水路において実験を行い、石川・金と同様に2次流によって主流方向流速が再分配され、最大流速点のdipが起こること、従来用いられている主流方向に等流を仮定したモデル³⁾では、運動量輸送を過大評価することを指摘した。さらに、得られた実験データから運動方程式中の各項のオーダーを比較することで主流流速の変形に重要な役割を果たす主要項の抽出を行っている。

一方、池田・西村⁴⁾、Johannesson・Paker⁵⁾は主流に対する2次流の発達・減衰の遅れを考慮する必要性を指摘し、細田ら⁶⁾は2次流及び2次流による横断方向の運動量

輸送を一般座標系での水深積分モデルに組み込む方法を提案するとともに、主流と2次流の遅れを考慮した場合の定式化を示した。

このように、2次流のモデル化と2次流による運動量輸送を組み込んだ平面2次元解析法として様々なモデルが提案されているが、上述のモデルでは解析法が複雑なために積分モデルに組み込むことが困難なもの、2次流による主流流速の変化を考慮しているものの、最大流速点のdipまでは再現できないものがあり、一般的なモデルは少ない。

筆者らは前報⁹⁾で、2次流による主流の流速分布変化を考慮したモデル化について検討した。しかし、導かれたモデルを平面2次元モデルに組み込むまでは至っていない。そこで、本研究では主流の流速分布変化を考慮したモデルを水深積分モデルに組み込むとともに、主流に対する2次流の発達・減衰を考慮する方法⁶⁾を導入し、河川流や河床変動予測の際に汎用されている水深積分モデルの高精度化について検討する。モデルをRozovskiiの実験に適用し、計算結果の適合性を検証する。

2. 主流の流速分布変化を考慮した平面2次元モデル

(1) 基礎式

一般座標系での2次流を考慮した平面2次元モデルの基礎式は以下のとおりである⁶⁾.

[連続式]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[運動量方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2} h \right) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2} h \right) \\ & + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) \\ & - \xi_x (S_{\xi 1} + S_{\xi 2} + S_{\xi 3} + S_{\xi 4}) \\ & - \xi_y (S_{\eta 1} + S_{\eta 2} + S_{\eta 3} + S_{\eta 4}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2} h \right) + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) \\ & - \eta_x (S_{\xi 1} + S_{\xi 2} + S_{\xi 3} + S_{\xi 4}) \\ & - \eta_y (S_{\eta 1} + S_{\eta 2} + S_{\eta 3} + S_{\eta 4}) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 t ：時間、 ξ, η ：一般座標、 J ：座標変換のヤコビアン、 Q^ξ, Q^η ：流量フラックスベクトルの反変成分、 M, N ：流量フラックスベクトルの x, y 方向成分、 U, V ：流速ベクトルの反変成分、 h ：水深、 z_s ：基準水平面からの水位、 τ_b^ξ, τ_b^η ：底面せん断応力ベクトルの反変成分、 $-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2}$ ：直角座標でのレイノルズ応力テンソルの成分、 φ ：流線と x 軸のなす角度である。また $S_{\xi 1}$ から $S_{\eta 4}$ は2次流を考慮したことによる付加項であり、次式で定義される。

$$S_{\xi 1} = -c_{sn} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} (\xi_x A_n \bar{u}_s h \sin 2\varphi - \xi_y A_n \bar{u}_s h \cos 2\varphi) \right] \quad (4a)$$

$$S_{\xi 2} = -c_{sn} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} (\eta_x A_n \bar{u}_s h \sin 2\varphi - \eta_y A_n \bar{u}_s h \cos 2\varphi) \right] \quad (4b)$$

$$S_{\xi 3} = c_{n2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} (\xi_x A_n^2 h \sin^2 \varphi - \xi_y A_n^2 h \cos \varphi \sin \varphi) \right] \quad (4c)$$

$$S_{\xi 4} = c_{n2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} (\eta_x A_n^2 h \sin^2 \varphi - \eta_y A_n^2 h \cos \varphi \sin \varphi) \right] \quad (4d)$$

$$S_{\eta 1} = c_{sn} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} (\xi_x A_n \bar{u}_s h \cos 2\varphi + \xi_y A_n \bar{u}_s h \sin 2\varphi) \right] \quad (4e)$$

$$S_{\eta 2} = c_{sn} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} (\eta_x A_n \bar{u}_s h \cos 2\varphi + \eta_y A_n \bar{u}_s h \sin 2\varphi) \right] \quad (4f)$$

$$S_{\eta 3} = -c_{n2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} (\xi_x A_n^2 h \sin \varphi \cos \varphi - \xi_y A_n^2 h \cos^2 \varphi) \right] \quad (4g)$$

$$S_{\eta 4} = -c_{n2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} (\eta_x A_n^2 h \cos \varphi \sin \varphi - \eta_y A_n^2 h \cos^2 \varphi) \right] \quad (4h)$$

ここで、 $\bar{u}_s$ は主流方向(s 方向)の水深平均流速、 c_{sn} は遠心力の s 方向成分に関する運動量輸送係数、 c_{n2} は n 方向の係数であり、主流方向流速 u_s 及び主流と直交する方向の流速 u_n の分布形を

$$u_s = \bar{u}_s \cdot f_s(\zeta), \quad u_n = A_n \cdot f_n(\zeta)$$

ように表したとき次式で定義される。

$$c_{sn} = \int_0^1 f_s(\zeta) f_n(\zeta) d\zeta, \quad c_{n2} = \int_0^1 f_n(\zeta)^2 d\zeta$$

ここに、 A_n は流速の鉛直分布を相似関数式で表したときの代表流速であり、これについては後述する。本研究では、上記の流速分布形の評価に主流の流速分布変化を考慮したモデルを適用する。モデルの物理的機構及び誘導過程については前報⁹⁾で詳細に記述しているため、ここでは簡単に説明する。 s, n 方向の運動方程式から主流と2次流の干渉を考慮したモデル化として主要項を取り出すと以下ようになる。

[s 方向]

$$-\frac{u_s u_n}{r} + g \sin \theta + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_e \frac{\partial u_s}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

[n 方向]

$$\frac{u_s^2}{r} + \varepsilon_e \frac{\partial^2 u_n}{\partial z^2} - g \frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

ここに、 r ：曲率半径、 θ ：路床勾配、 ε_e ：渦動粘性係数(= $\beta h u_*$, $\beta = 0.077$)。

s 及び n 方向流速の分布形を式(7), (8)のように相対水深 ζ に関するべき乗表示で仮定すると、式(7), (8)中の係数は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{u_s}{\bar{u}_s} &= C_0 + C_1 \zeta + C_2 \zeta^2 + C_3 \zeta^3 + C_4 \zeta^4 \\ &+ C_5 \zeta^5 + C_6 \zeta^6 + C_7 \zeta^7 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{u_n}{\bar{u}_s} &= D_0 + D_1 \zeta + D_2 \zeta^2 + D_3 \zeta^3 + D_4 \zeta^4 \\ &+ D_5 \zeta^5 + D_6 \zeta^6 + D_7 \zeta^7 \end{aligned} \quad (8)$$

$$C_0 = \frac{u_{sb}}{\bar{u}_s} = \frac{r_* u_*}{\bar{u}_s} \quad (9a)$$

$$C_1 = \frac{C_0}{\beta r_*} - \delta [C_0 D_0]$$

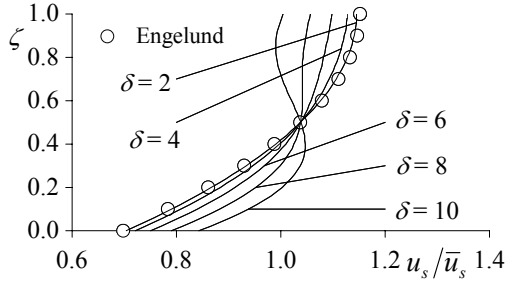


図-1 主流方向流速の分布形 ($r^*=10$)

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2}(C_0 D_1 + C_1 D_0) + \frac{1}{3}(C_0 D_2 + C_1 D_1 + C_2 D_0) \\
 & + \frac{1}{4}(C_0 D_3 + C_1 D_2 + C_2 D_1 + C_3 D_0) \\
 & + \frac{1}{5}(C_0 D_4 + C_1 D_3 + C_2 D_2 + C_3 D_1 + C_4 D_0) \\
 & + \frac{1}{6}(C_0 D_5 + C_1 D_4 + C_2 D_3 + C_3 D_2 + C_4 D_1 + C_5 D_0) \\
 & + \frac{1}{7}(C_0 D_6 + C_1 D_5 + C_2 D_4 + C_3 D_3 + C_4 D_2 \\
 & + C_5 D_1 + C_6 D_0) + \frac{1}{8}(C_0 D_7 + C_1 D_6 + C_2 D_5 \\
 & + C_3 D_4 + C_4 D_3 + C_5 D_2 + C_6 D_1 + C_7 D_0) \quad (9b)
 \end{aligned}$$

$$C_2 = -\frac{1}{2} \frac{C_0}{\beta r^*} + \frac{1}{2} \delta C_0 D_0 \quad (9c)$$

$$C_3 = \frac{1}{6} \delta (C_0 D_1 + C_1 D_0) \quad (9d)$$

$$C_4 = \frac{1}{12} \delta (C_0 D_2 + C_1 D_1 + C_2 D_0) \quad (9e)$$

$$C_5 = \frac{1}{20} \delta (C_0 D_3 + C_1 D_2 + C_2 D_1 + C_3 D_0) \quad (9f)$$

$$C_6 = \frac{1}{30} \delta (C_0 D_4 + C_1 D_3 + C_2 D_2 + C_3 D_1 + C_4 D_0) \quad (9g)$$

$$C_7 = \frac{1}{42} \delta (C_0 D_5 + C_1 D_4 + C_2 D_3 + C_3 D_2 + C_4 D_1 + C_5 D_0) \quad (9h)$$

$$D_0 = \frac{u_{nb}}{\bar{u}_s} \quad (10a)$$

$$D_1 = \frac{D_0}{\beta r^*} \quad (10b)$$

$$\begin{aligned}
 D_2 = \frac{1}{2} \delta \left[C_0 C_1 + \frac{2}{3} C_0 C_2 + \frac{1}{3} C_1^2 + \frac{1}{2} C_0 C_3 + \frac{1}{2} C_1 C_2 \right. \\
 + \frac{2}{5} C_0 C_4 + \frac{2}{5} C_1 C_3 + \frac{1}{5} C_2^2 + \frac{1}{3} C_0 C_5 + \frac{1}{3} C_1 C_4 + \frac{1}{3} C_2 C_3 \\
 + \frac{2}{7} C_0 C_6 + \frac{2}{7} C_1 C_5 + \frac{2}{7} C_2 C_4 + \frac{1}{7} C_3^2 + \frac{1}{4} C_0 C_7 + \frac{1}{4} C_1 C_6 \\
 \left. + \frac{1}{4} C_2 C_5 + \frac{1}{4} C_3 C_4 \right] - \frac{1}{2} \frac{D_0}{\beta r^*} \quad (10c)
 \end{aligned}$$

$$D_3 = -\frac{1}{3} \delta C_0 C_1 \quad (10d)$$

$$D_4 = -\frac{1}{12} \delta (2C_0 C_2 + C_1^2) \quad (10e)$$

$$D_5 = -\frac{1}{10} \delta (C_0 C_3 + C_1 C_2) \quad (10f)$$

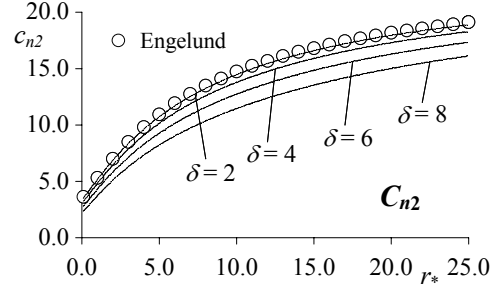
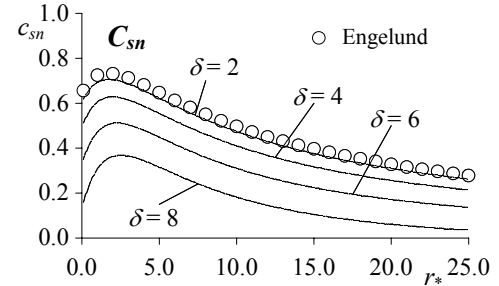


図-2 運動量輸送係数

$$D_6 = -\frac{1}{30} \delta (2C_0 C_4 + 2C_1 C_3 + C_2^2) \quad (10g)$$

$$D_7 = -\frac{1}{21} \delta (C_0 C_5 + C_1 C_4 + C_2 C_3) \quad (10h)$$

ここに、 $\delta = h \bar{u}_s / (\beta u_s r)$ である。係数 C , D の算出方法については参考文献⁹⁾に記載しているため、ここでは紙面の都合上省略する。式(7), (8)を若干変形することにより、運動量輸送係数 c_{sn} , c_{n2} が求められる。

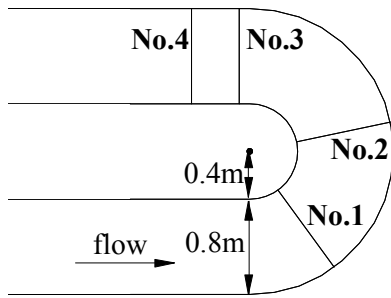
次に、式(4)中の A_n について説明する。 A_n は2次流強度を表し、主流流線の変化に対する2次流の遅れを無視する場合、 A_n は次のように表される。

$$A_n = \bar{u}_s h / r \quad (11)$$

一方、湾曲部、蛇行部流れにおいて、主流流線の変化に対する2次流の発達・減衰の遅れを考慮する必要性が指摘され、2次流の発達・減衰過程が簡略化された渦度方程式によって説明されている^{4, 5)}。本研究でも2次流の発達・減衰過程を組み込むを試みる。2次流の遅れを考慮するためには、 A_n の流線方向の変化を考慮する必要がある。水深積分した一般座標系での渦度方程式は次式で表される⁹⁾。

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{(u_n)_s - (u_n)_b}{J} \right\} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \frac{U_s (u_n)_s - U_b (u_n)_b}{J} \right\} \\
 & \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ \frac{V_s (u_n)_s - V_b (u_n)_b}{J} \right\} - \frac{1}{Jr} \{ (u_s^2)_s - (u_s^2)_b \} \\
 & = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{zn}}{\rho} \right)_s - \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{zn}}{\rho} \right)_b \\
 & + \alpha h u_s \lambda \left\{ \frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial^2 A_n}{\partial \xi^2} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial^2 A_n}{\partial \eta^2} \right\} \\
 & + \alpha h u_s \lambda \left\{ \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial^2 A_n}{\partial \xi^2} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial^2 A_n}{\partial \eta^2} \right\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

ここに下添字の s , b はそれぞれ水面および路床での値を表し、 α については0.5とした。式(12)の左辺第1項は、



流量 Q : 12.3l/s, 平均水深 h : 0.06m, 水路勾配: 0

図-3 実験水路の諸元と水理条件

下記のように A_n と関係付けられ、式(12)より主流と2次流の遅れを表現することができる。

$$(u_n)_s - (u_n)_b = \lambda \cdot A_n \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{1}{\beta^2 C_1 \delta} (D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6 + D_7)$$

式(12)中の各項の評価には、前述のモデル⁹⁾を用いて算出する。

(2) 流速分布、運動量輸送係数の基本的特性

本モデルにおける流速分布と運動量輸送係数の基本的特性について考察する。図-1, 2は、式(7), (8)中の δ 及び r_* を変化させ、主流方向流速分布と運動量輸送係数について比較したものである。図をみると、パラメータ δ の値が小さいとき、主流方向流速は等流の分布形(Engelundモデル)とほぼ一致しているが、 δ の値が大きくなると、2次流の影響が強くなり、主流方向流速が変形することがわかる。その結果、流速分布の一樣化や最大流速点のdipが生じている。運動量輸送係数についても同様に、 δ の値が大きくなると、2次流によって主流方向流速が変化し、一樣化するため、2次流の影響が弱くなり、運動量輸送係数が等流のモデルよりも小さくなっている。これは主流方向に等流を仮定したモデルでは運動量輸送を過大評価するというBlanckaert²⁾の指摘と一致している。

3. モデルの適用

本モデルをRozovskiiの一樣湾曲水路実験¹⁰⁾に適用し、モデルの妥当性を検証する。実験水路の諸元と水理条件を図-3に示す。No.1, 2断面は湾曲部入口からそれぞれ36, 102度の角をなす位置であり、No.3, 4は湾曲部出口からおよそ0.1, 0.5m下流側である。

計算法として有限体積法を用い、移流項の離散化にはQUICKスキームを適用した。計算格子については湾曲部180度を30分割し、横断方向の格子は20とした。また、池田・西村⁴⁾の研究を参考に側壁付近での2次流強度の減衰を考慮するため、運動量輸送係数 c_{sm} , c_{n2} に次の減衰関数を乗じた。

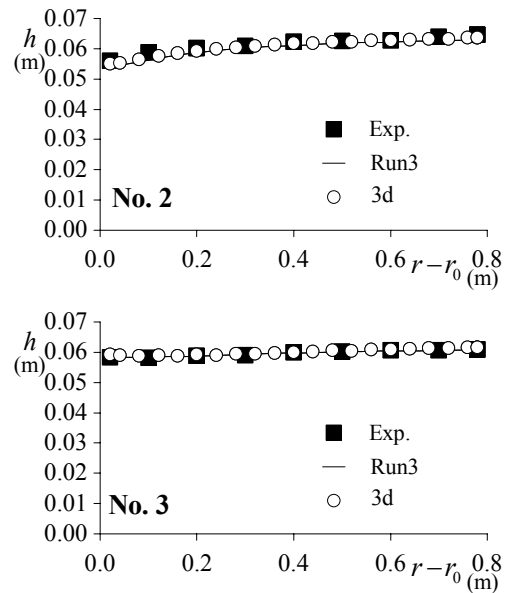


図-4 水位の横断分布

$$f_w = 1.0 - \left(1.0 - \frac{l}{aB}\right)^2 \quad (14)$$

ここに、 l : 側壁からの距離、 B : 水路幅、 a : 定数であり、0.3とした。

本研究では、以下の3つのケースについて検討した。

- [Run1] 2次流を考慮しない通常の平面2次元モデル
- [Run2] 流速分布形の評価にEngelundモデルを適用し、2次流を考慮した平面2次元モデル
- [Run3] 流速分布形の評価に主流の流速分布変化を考慮したモデルを適用した平面2次元モデル

ここで、2次流の影響を組み込んだRun2, Run3については、主流に対する2次流の発達・減衰の遅れを考慮するかどうか問題となる。Rozovskiiの実験条件の場合、遅れを考慮しないモデルでは2次流強度 A_n が正しく計算されず、安定した計算結果が得られなかったため、本研究では遅れを考慮した場合について検討した。また、Run3において流速分布形を求める際、式(9), (10)に δ の値を代入して各格子点での係数を算出するが、本計算条件では δ の値が大きいため、主流の流速分布変化が大きくなり過ぎてしまい、計算が不安定になりやすい。従って、定数を乗じて δ の効果を減衰させている。

4. 3次元数値解析¹¹⁾

移動一般曲線座標系での3次元数値解析についても検討する。乱流モデルには、高レイノルズ数型2次非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いた¹²⁾。本モデルは、水制周りの流れなどにも適用され、再現性が検証されている。基礎式、モデル係数の同定、計算法などについては、参考文献に記載されているため、紙面の都合上ここでは省略する。

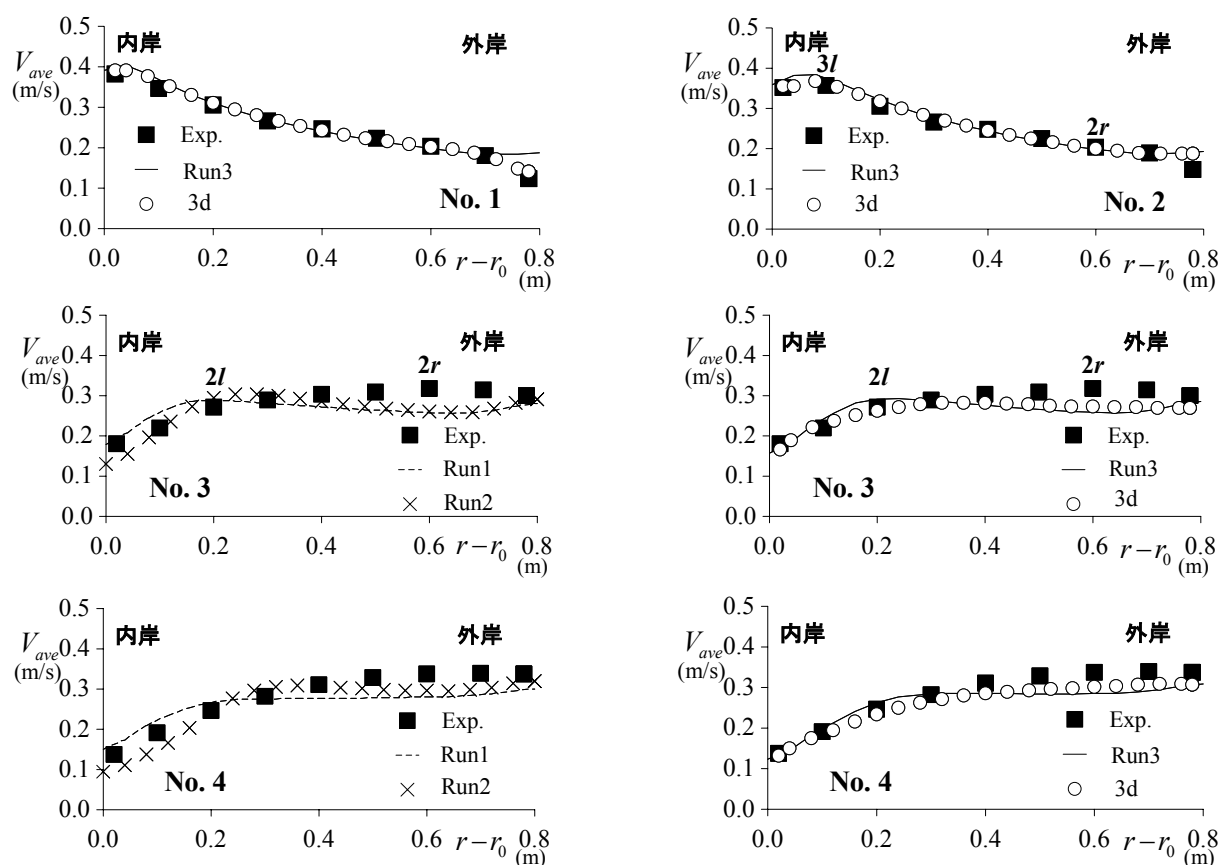


図-5 水深平均流速の横断分布

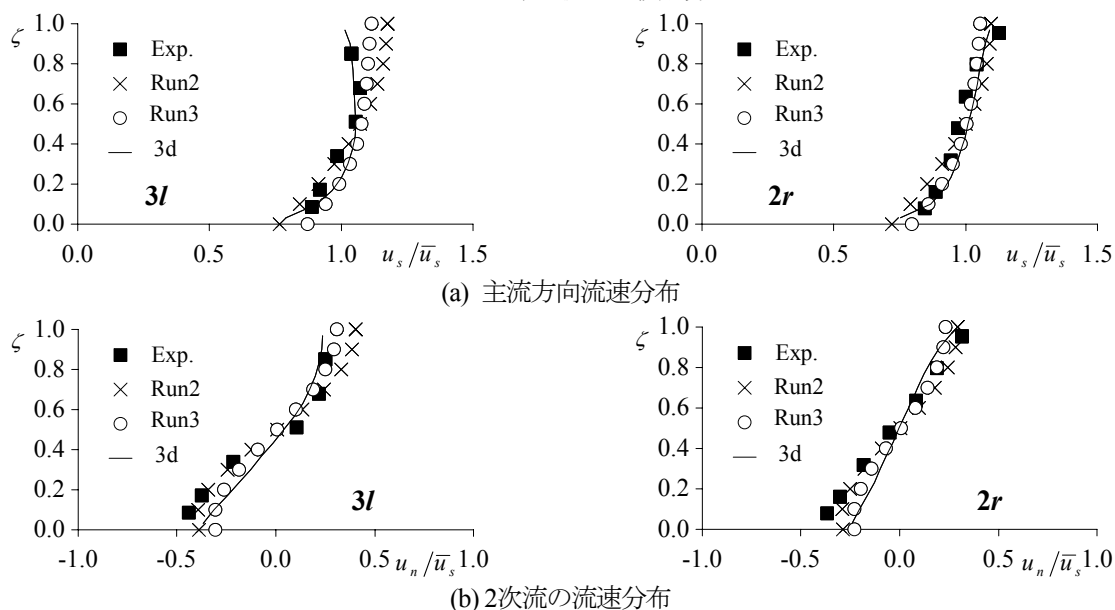


図-6 No.2断面における流速分布の比較

5. 結果と考察

各断面における水位及び水深平均流速の横断分布について実験結果と比較したものが図-4, 5である。なお、No.1, 2断面の水深平均流速と水位の横断分布についてはRun1からRun3でほぼ一致していたのでRun3の結果のみを示した。No.1, 2断面の流速分布をみると、平面2次元モデル、3次元モデルとも実験結果と適合していることがわかる。一方、湾曲部から直線部へ移るNo.3, 4断面で

は、内岸側で顕著な違いが見られる。Run2では、2次流の効果を考慮することでRun1に比べて実験結果に適合しているが、運動量輸送が過大評価されるために急な速度勾配を示している。これに対し、Run3では運動量輸送効果の過大評価が抑制されるため、実験結果とほぼ一致している。外岸側については、直線部に入ると外岸側の水位が低下するため、流速がその分速くなっているが、適合性が十分ではない。この点については、今後の検討課題としたい。3次元計算結果については、ほぼ妥当な

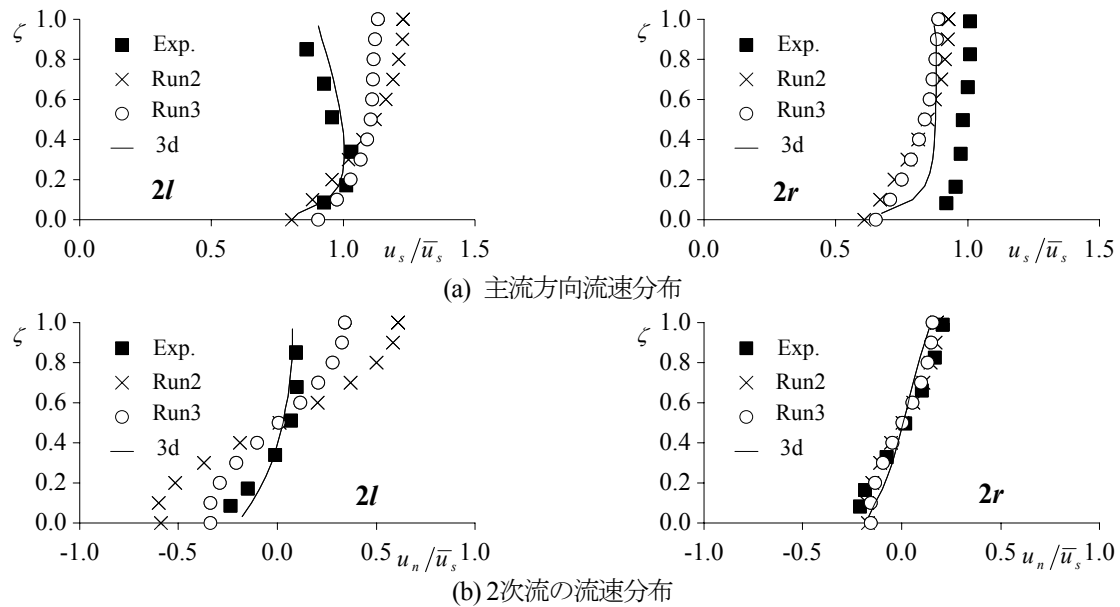


図-7 No.3断面における流速分布の比較

結果が得られた。

次に、断面内の流速の鉛直分布について実験結果と比較したものが図-6, 7である。図をみると、Run3では最大流速点のdipまでは再現されていないが、2次流による主流方向流速の変化を考慮することで、流速分布が一様化する様子が確認できる。これは、パラメータ δ に乗じた定数を大きくすることで改善されることが考えられる。また、流速分布の一様化に伴って2次流強度も減少しており、実験結果とほぼ一致している。3次元計算結果と実験結果を比較してみると、概ね再現されている。本研究では、2次流による主流の流速分布変化をモデル化し、水深積分モデルに組み込むことにより湾曲流の水深積分モデルの改良を検討した。その際、式(5), (6)のように簡略化した運動方程式でモデル化を行っているが、石川・金¹⁾によるモデルとは抽出した主要項が異なっており、抽出する主要項について考察する必要がある。別途行った3次元解析結果では実験結果をほぼ再現していることから、今後3次元解析結果を分析することにより、モデル化の妥当性など主流の流速分布変化と流れの3次元構造について考察したい。

6. おわりに

本研究は、2次流による主流の流速分布変化を考慮したモデルを平面2次元モデルに組み込み、水深積分モデルの高精度化について検討したものである。モデルをRozovskiiの実験に適用し、従来のモデルよりも適合することを示した。今後、より多くの実験結果との比較を行い、モデルの適用性について検討したい。

参考文献

- 1) 石川忠晴, 金 舜範: 湾曲部の2次流に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp.143-149, 1986.
- 2) Blanckaert, K: Flow and turbulence in sharp open-channel bends, PhD-thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- 3) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, *Proc. ASCE*, Vol.100, HY 11, pp.1631-1648, 1974.
- 4) 池田駿介, 西村達也: 砂床蛇行河川の三次元流れと河床形状, 土木学会論文集, 第369号/II-5, pp.99-108, 1986.
- 5) Johannesson, H. and Parker, G.: Secondary flow in mildly sinuous channel, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.115, No.3, pp.289-308, 1989.
- 6) Hosoda, T., Nagata, N., Kimura, I., Michibata, K. and Iwata, M.: A depth averaged model of open channel flows with lag between main flows and secondary currents in a generalized curvilinear coordinate system, *Advances in Fluid Modeling & Turbulence Measurements*, World Scientific, pp.63-70, 2001.
- 7) Kalkwijk, J. P., De Vriend, H. J.: Computation of the flow in shallow river bends, *J. Hydraulic Res.*, IAHR, Vol.18, No.4, pp.327-342, 1980.
- 8) 石川忠晴, 鈴木研司, 田中昌宏: 開水路流の準三次元計算法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp.181-189, 1986.
- 9) 音田慎一郎, 細田 尚, 木村一郎: 一般座標系での主流の流速分布変化を考慮した湾曲流の水深積分モデルとその検証, 水工学論文集, 第49巻, pp.553-558, 2005.
- 10) Rozovskii, I. L.: Flow of water in bends of open channels, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel, 1961.
- 11) 木村一郎, 細田 尚, 音田慎一郎, 富永晃宏: 越流型水制周辺の三次元乱流構造に及ぼす水理パラメータの効果, 水工学論文集, 第48巻, pp.661-666, 2004.
- 12) Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear $k-\varepsilon$ model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.42, pp.813-837, 2003.

(2005. 9. 30受付)