

開水路側方キャビティ内二次流とその浮遊砂 輸送への影響を再現する水深積分モデル

2D DEPTH-AVERAGED MODEL FOR COMPUTING SECONDARY CURRENT
AND ITS EFFECT ON SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN A SIDE-CAVITY

木村 一郎¹・音田慎一郎²・細田 尚³・清水 康行⁴
Ichiro KIMURA, Shinichiro ONDA, Takashi HOSODA and Yasuyuki SHIMIZU

¹正会員 博(工) 北海道大学准教授 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 博(工) 京都大学助教 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³正会員 工博 京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 工博 北海道大学教授 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

Suspended sediment transport phenomena in a rectangular side-cavity in a shallow open channel flow were investigated using plane 2D shallow water flow equations. The flow in a side-cavity is characterized by formations of a recirculation with a vertical axis and related secondary current due to a centrifugal force (a secondary current of first kind). The suspended sediment transports as well as 3D flow structures are affected by those 3D turbulent flow features. In this study, we applied depth-averaged shallow flow equations including effects of secondary currents instead of 3D flow equations considering computational efficiency. We applied 4 different types of models for shallow flow equations and compare the performances of each model. First, these models were applied to a simple flow in a torus-shape channel with rigidly rotating flow in order to consider the fundamental characteristics of suspended sediment model. Then the models were applied to open channel flows with a side cavity in order to consider both flow structures and sediment transport affected by the secondary current. The computations were performed under the same conditions of the laboratory tests and applicability of each model is discussed through the comparison between computational and experimental results.

Key Words : *Secondary current of first kind, Suspended sediment, Tea-pot effect, 2D cavity flow, Depth averaged shallow flow model*

1. はじめに

近年、河川における環境機能の重要度がますます注目され、特に都市河川においては人間活動における憩いの場としての機能とともに、貴重な生物生息空間としての機能向上が求められている。このような目的のなかで進められる多自然川づくりでは、河道内に多様な空間を創造することをその基本とする。この一貫として、河川岸岸に人工ワンドを設ける試みが各地で進められている。人工ワンドの設計にあたっては、治水面への影響を十分考慮しつつ、河川環境に寄与する機能を十分に発揮する形状、規模とすることが基本となるが、それと同時に、洪水などのインパクトに対してワンドおよびその周辺の地形が中長期的に安定し、ワンド本来の機能が将来にわたって継続的に発揮されることも重要である。

一般に、河道における中、小スケールの地形変動の実務レベルの予測には、計算機負荷や予測精度を考慮して平面2次元モデルが用いられることが多い。ワンドおよびその周辺における地形変動の予測にも平面2次元モデルが有用と考えられるが、その際、ワンド内に発生する循環流とそれに伴う二次流（第1種二次流）に留意しな

ければならない。循環流に伴う二次流は底面付近の物質を循環の中心に寄せる働きがあり、Tea-pot効果（ティーポットの茶葉がポットの中心に寄り集まる現象）と呼ばれることもある。二次流は三次元的な流れ構造であるため、これを平面二次元モデルに反映させるためには何らかのモデル化が必要である。すでに掃流砂輸送については二次の効果を長谷川式¹⁾で評価することが一般的に行われ、その有用性が広く検証されている²⁾。これに対して、浮遊砂に対する二次流のモデル化については適用例が少ない。人工ワンドが設置される地点が河川中下流域の比較的浮遊砂の影響が大きい箇所であることを考慮すれば、二次流の影響を考慮した浮遊砂輸送モデルの検討が重要と考えられる。

一方、二次流は平面二次元モデルで計算される水深平均流速分布を直接変形させ、これが間接的に流砂輸送に影響を及ぼすという効果も考えられる。この効果を取り込むには二次流が流れに及ぼす影響をモデル化することが必要である。このようなモデルについては、Kalkwijk & de Vriend (1980) ³⁾が流線座標において初めて提案して以来、直交座標系及び一般曲線座標系への拡張⁴⁾、流線の曲がりと二次流発達ラグを考慮したモデル⁴⁾、二次流に伴う流速分布の変化を考慮したモデル⁵⁾⁶⁾などが提案

され、高性能化が進んでいる。(ここに、ラグとは流線の曲がりに対する二次流発達の遅れを意味する。以下、これを単に「ラグ」と称する。)しかしながら、これらを実際の河川流へ適用した例は少なく、今後種々の条件でモデルの妥当性を検証していく必要がある。

本研究は、二次流を考慮した平面二次元モデルにおける循環流場での浮遊砂、および平均流速の再現性を検討するものである。まず、単純なドーナツ型の水路に剛体回転流場を与え、浮遊砂輸送特性を検証する。次に河川ワンドを模した矩形平面キャビティ内の流れと浮遊砂輸送特性について、実験結果との比較を通じて検討する。用いる平面二次元モデルは次の4通りとする。

- ・二次流の影響を考慮しない平面二次元モデル
- ・二次流の影響を考慮するがラグは考慮しないモデル
- ・二次流の影響と共に、ラグも考慮するモデル
- ・二次流の影響と共に、ラグ、および二次流による流速分布の変形を考慮するモデル

2. 数値解析法

(1) 基礎式

本研究における数値解析モデルの基礎式は、水深積分された平面2次元空間における次のような連続式、運動方程式、浮遊砂輸送式、河床連続式より構成される。デカルト座標系における基礎式は次のように記述される⁷⁾。

[連続式]
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

[主流方向運動方程式]

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta u M}{\partial x} + \frac{\partial \beta v M}{\partial y} + gh \frac{\partial (h + z_b)}{\partial x} = gh \sin \theta - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial (-u'^2 h)}{\partial x} + \frac{\partial (-u'v'h)}{\partial y} + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + S_{cx} \quad (2)$$

[横断方向運動方程式]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial \beta u N}{\partial x} + \frac{\partial \beta v N}{\partial y} + gh \frac{\partial (h + z_b)}{\partial y} = -\frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial (-v'u'h)}{\partial x} + \frac{\partial (-v'^2 h)}{\partial y} + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + S_{cy} \quad (3)$$

[浮遊砂輸送方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\bar{c}h) + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{c}uh) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{c}vh) = w_0 (c_{be} - c_b) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h \left(D_{LS} \cos^2 \theta_f \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + D_{LS} \sin \theta_f \cos \theta_f \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h \left(D_{LS} \sin \theta_f \cos \theta_f \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + D_{LS} \sin^2 \theta_f \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) \right\} + S_{cs} \end{aligned} \quad (4)$$

[河床の連続式]

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} (q_{su} - w_0 c_b) = 0 \quad (5)$$

ここに、 (x, y) : 空間座標、 t : 時間、 h : 水深、 (u, v) : 水深平均流速ベクトルの (x, y) 方向成分、 (M, N) : フラックスの $(x,$

$y)$ 方向成分 ((hu, hv) で定義される)、 (u', v') : 乱れ速度の (x, y) 方向成分、 $-\overline{u'_i u'_j}$: 水深平均されたレイノルズ応力テンソル、 ν : 動粘性係数、 $\sin \theta$: 水路勾配、 f : 摩擦損失係数 (後述のようにレイノルズ数の関数として与える)、 (τ_{bx}, τ_{by}) : 底面摩擦ベクトル、 β : 運動量補正係数、 c : 浮遊砂の水深平均濃度、 z_b : 河床高、 w_0 : 浮遊砂の沈降速度、 λ : 河床材料の空隙率 ($\lambda = 0.5$ とした)、 D_{LS} : 浮遊砂の分散係数、 θ_f : 流線と x 軸のなす角度、 (D_x, D_y) : (x, y) 方向の渦動粘性係数、 (τ_{bx}, τ_{by}) : 底面摩擦ベクトルの (x, y) 方向成分、 q_{su} : 河床面からの砂粒子浮上量、 S_{cx}, S_{cy}, S_{cs} : 二次流の効果を表す付加項、 c_b : 河床近傍の浮遊砂濃度を表す。

底面せん断応力は、次式で評価する。

$$\tau_{bx} = \frac{f \rho u}{2} \sqrt{u^2 + v^2}; \quad \tau_{by} = \frac{f \rho v}{2} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

ここに、摩擦損失係数 f は局所的なレイノルズ数 $Re' \equiv uh/\nu$ を用いて、次のように評価する。

$$f = \frac{6}{Re'} \quad (Re' \leq 430) \quad (7a)$$

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = A_s - \frac{1}{\kappa} \left[1 - \ln \left(Re' - \sqrt{\frac{f}{2}} \right) \right] \quad (Re' > 430) \quad (7b)$$

ここに、 $\kappa = 0.41$ (カルマン定数)、 $A_s = 5.5$ とした。水深平均レイノルズ応力テンソルはゼロ方程式モデルより、

$$-\overline{u'_i u'_j} = D_h \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad D_h = \alpha h u_* \quad (8)$$

とした。ここに α : 定数 ($\alpha = 0.2$ とした)、 u_* : 局所的な摩擦速度 ($\equiv \sqrt{f(u^2 + v^2)/2}$)、 k : 水深積分された乱れエネルギーである。なお、 k についてはNezu & Nakagawa⁸⁾によって提案された乱れエネルギーの経験則、

$$\frac{k}{u_*^2} = 4.78 \exp \left(-2 \frac{z}{h} \right) \quad (9)$$

を水深積分することによって得られる次式で評価した。

$$k = 2.07 u_*^2 \quad (10)$$

$\sin \theta_f$ および $\cos \theta_f$ は次式で計算される。

$$\sin \theta_f = \frac{|v|}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad \cos \theta_f = \frac{|u|}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (11)$$

浮遊砂分散係数は次式で評価する。

$$D_{LS} = 5.93 h u_* \quad (12)$$

浮遊砂浮上項 q_{su} 及び底面付近浮遊砂濃度 c_b は、

$$q_{su} = w_0 c_{be}, \quad c_b = \frac{\beta \bar{c}}{1 - e^{-\beta}}, \quad \beta = \frac{w_0 h}{\varepsilon_s} \quad (13)$$

ここに、 ε_s は鉛直方向の渦動拡散係数であり、鉛直方向の渦動粘性係数と等しいと仮定し、次式で与える。

$$\varepsilon_s = \frac{\gamma \kappa u_* h}{6} \quad (14)$$

ここに、 γ は定数 ($\gamma = 1.0$ を用いた)、 κ は前出のカルマン定数である。式(13)、(14)から β は次式となる。

$$\beta = \frac{w_0 h}{\varepsilon_s} = \frac{6w_0 h}{\gamma k u_* h} = \frac{15w_0}{u_*} \quad (15)$$

式(13)における c_{be} は基準面濃度を表わしており、次の芦田・道上の式で評価する。

$$c_{be} = 0.025 \left\{ \frac{g(\zeta_0)}{\zeta_0} - G(\zeta_0) \right\} \quad (16)$$

ここに、次の関係を用いている。

$$\zeta_0 = \frac{4w_0}{3u_*}, \quad g(\zeta_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0.5\zeta_0^2) \quad (17)$$

$$G(\zeta_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\zeta_0}^{\infty} \exp(-0.5\zeta^2) d\zeta$$

運動方程式及び浮遊砂輸送方程式における二次流による付加項、 S_{cx} , S_{cy} , S_{cs} は、次のように表わされる⁴⁾。

$$S_{cx} = C_{sn} \left[\frac{\partial \bar{u}_x A_n h \sin 2\theta}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}_x A_n h \cos 2\theta}{\partial y} \right] + C_{n2} \left[-\frac{\partial A_n^2 h \sin^2 \theta}{\partial x} + \frac{\partial A_n^2 h \cos \theta \sin \theta}{\partial y} \right] \quad (18)$$

$$S_{cy} = C_{sn} \left[-\frac{\partial \bar{u}_x A_n h \cos 2\theta}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}_x A_n h \sin 2\theta}{\partial y} \right] + C_{n2} \left[\frac{\partial A_n^2 h \sin \theta \cos \theta}{\partial x} - \frac{\partial A_n^2 h \cos^2 \theta}{\partial y} \right] \quad (19)$$

$$S_{cs} = C_{cn} \left[-\frac{\partial A_n \bar{ch} \sin \theta}{\partial x} + \frac{\partial A_n \bar{ch} \cos \theta}{\partial y} \right] \quad (20)$$

(2) モデル係数 A_n の評価⁴⁾

A_n の評価にあたり、まず、流線方向流速 u_s と流線に直交する方向の流速 u_n を次のように表わす。

$$u_s = \bar{u}_s \cdot f_s(\zeta), \quad u_n = A_n \cdot f_n(\zeta), \quad \zeta = (z - z_b)/h \quad (21)$$

ここに、 $\bar{u}_s$, $\bar{u}_n$: u_s , u_n の水深平均値である。また、 $f_s(\zeta)$, $f_n(\zeta)$ は流速分布形を表わす関数である。これより、 A_n は二次流の強度を表わすことがわかる。

i) ラグを無視する場合：

$$A_n = \frac{\bar{u}_s h}{R} \quad (22)$$

とする。ここに、 R は流線の曲率半径を表わす。

ii) ラグを考慮する場合：

細田らは水深積分渦度方程式から A_n に関する次のような輸送方程式を導出した。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\lambda A_n] + \frac{\partial}{\partial x} [u_x |s| u_n |s| - u_x |b| u_n |b|] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} [u_y |s| u_n |s| - u_y |b| u_n |b|] - \frac{1}{R} [u_s^2 |s| - u_s^2 |b|] \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\tau_{zn}}{\rho} \right]_s - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\tau_{zn}}{\rho} \right]_b + \alpha h u_* \lambda \left[\frac{\partial^2 A_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_n}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

ここに、 $|s|$, $|b|$ はそれぞれ水面及び底面の値を表わす。 λ , u_n , u_s の具体的な表記や右辺第1,2項の表現は流速分布形の仮定によって異なり、詳細は文献^{4),5),6)}を参照されたい。

(3) モデル係数 C_{sn} , C_{n2} , C_{cn} の評価

流速分布を式(21)で表し、浮遊砂の鉛直分布を、

$$c = \bar{c} f_c(\zeta) \quad (24)$$

とする。 $f_c(\zeta)$ は指数分布を仮定し、次のようにおく。

$$c_b = \frac{\beta e^{-\beta \zeta}}{1 - e^{-\beta}}, \quad \beta = \frac{15w_0}{u_*} \quad (25)$$

式(21), (24)により、流速及び浮遊砂の二次の分布係数を次のように定義する。

$$C_{s2} = \int_0^1 f_s(\zeta)^2 d\zeta \quad (26)$$

$$C_{sn} = \int_0^1 f_s(\zeta) f_n(\zeta) d\zeta \quad (27)$$

$$C_{n2} = \int_0^1 f_n(\zeta)^2 d\zeta \quad (28)$$

$$C_{cn} = \int_0^1 f_c(\zeta) f_n(\zeta) d\zeta \quad (29)$$

C_{s2} は1とし、他の3つの係数については次のようなモデルが提案されている。

i) Engelundモデル⁹⁾を用いる場合⁴⁾

ii) 二次流発生に伴う流速分布変化を考慮する場合^{5,6)}

このうち、ii)は二次流の発生による流速分布のdipなどを考慮するものであり、より高い再現性が期待されるが、モデルの導出過程は複雑となる。両モデルの詳細については文献^{4),5),6)}を参照されたい。

(4) 本研究で用いるモデル

本研究では次の4通りの平面二次元モデルを用いる。

Model I: 二次流を考慮しないモデル

Model II: 二次流を考慮するがラグは無視する。流速分布にはEngelundモデルを用いる。

Model III: 二次流を考慮しラグも考慮する。流速分布はEngelundモデルを用いる。

Model IV: 二次流を考慮しラグも考慮する。流速分布には二次流による分布形変化を考慮する。

(5) 計算スキーム

計算法はスタガード格子上の有限体積法とし完全陽解法で計算を進めた。運動方程式の移流項の離散化にはQUICKを、時間積分には二次Adams Bashforth法を用いた。

4. 計算結果と考察

(1) 検証Case A: 単純剛体回転流場の浮遊砂輸送

最初に極力単純化した回転流場としてドーナツ状水路に剛体回転流を与えた場合の浮遊砂輸送現象を考える。

図-1に流れ場の平面図と計算格子を示す。これに角速度 $\omega = 0.5$ (rad/sec), 水深 $h = 1$ (cm)の定常循環流を与え、初期浮遊砂濃度を5 (%)として浮遊砂輸送と河床変動を計算する。本計算では基礎式を細田ら⁴⁾にならい、一般曲線座標系に変換した上で用いる。

図-2は計算開始後 $t = 10$ (sec)における河床高を4つのモデルで比較したものである。いずれの条件でも堆積は軸対称に生じている。二次流効果を考慮したModel II-

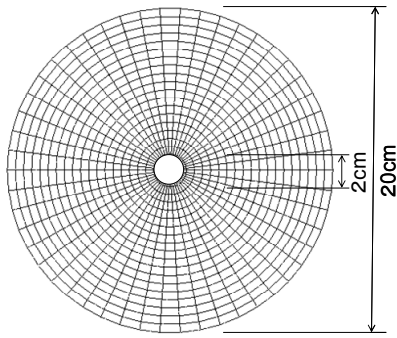


図-1 検証Case A(単純剛体回転場)の流れ場と計算格子

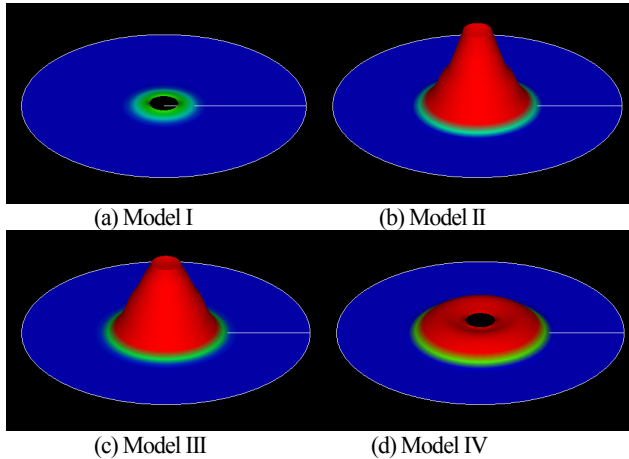


図-2 Case Aによる堆積パターンの比較(t=10sec)

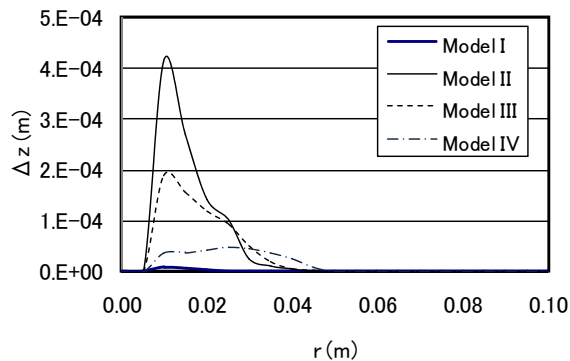


図-3 Case Aによる半径上の河床高分布の比較

IVでは堆積が水路中心部に集中して生じていることから、いわゆるTea-pot効果が再現されていることが確認できる。図-3は河床高の半径に沿う分布を示したものである。Model I-IIIの結果では河床高の最大値が内岸近傍で生じており、特にModel IIでは水路中心付近の河床が高くなっている。これに対し、Model IVでは内岸から少し離れた箇所でピークが見られる。この変化は、二次流に伴う流速分布の変化がもたらしたものと考えられる。なお、Case Aは極力単純化した状況下でのモデル比較を主眼としており、実現現象の再現性の検討は次のCase Bに譲る。

(2) 検証Case B: 側岸に矩形キャビティを有する流れ

a) 流れ場の概要, 実験条件, 計算条件

河川ワンドを単純化したモデルとして、開水路側岸に矩形の平面キャビティが存在する場合を考える。対象と

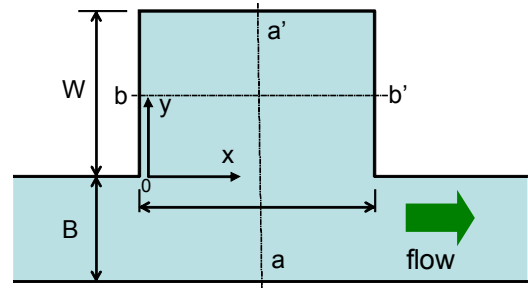


図-4 Case Bの流れ場の平面図

表-1 Case Bにおける実験の水理条件

	Run 1	Run 2
L (cm)	22.5	22.5
B (cm)	10.0	25.0
W (cm)	15.0	15.0
Channel slope	1/1000	1/1000
U_0 (cm/s)	23.0	31.4
h (cm)	1.0	1.5
Re	2300	4925
Fr	0.73	0.82
C_0 (%)		0.05
D (μm)		81
ρ_s (kg/m^3)		1210

L,B,W: scale of cavity (see Fig.4), U_0 : mean velocity in main channel, h: mean depth, Re: Reynolds number, Fr: Froude number, C_0 : inlet concentration of suspended sediment, D: mean diameter of the particle, ρ_s : density of the particle.

する流れ場の平面図を図-4に示す。このような流れ場に関する研究はこれまでも数多く行われている^{10),11)}。Kimuraら¹²⁾はキャビティ内の定常的循環流とともに、主水路・キャビティ界面におけるせん断不安定に起因する周期的な大規模渦とそれに伴う水面振動が流れ場を特徴づけること、水面振動と大規模渦の共鳴現象がフルード数に依存することなどを実験的、数値解析的に示した。また、キャビティ内の浮遊砂輸送特性に関する研究としては、実験による堆積パターンの分類と平面二次モデルによる再現計算の試みなどが報告されている⁷⁾。

Case Bの計算は、著者らによって行われた実験と同条件で行うものとする。表-1に実験における水路のスケールと水理条件を示す。実験は2つの水理条件の下で行われ、Run 1では流れ場のみが計測され、Run 2では浮遊砂堆積状況のみが計測されている。図-5, 6はRun 1の流れ場をアルミニウム粉末を水面に散布して可視化し、露光時間をそれぞれ1.0(sec), 0.01(sec)として写真撮影を行ったものであり、図-5にはキャビティ内の定常循環流が、図-6には界面の周期渦が撮影されている。なお、流れは1秒以上の周期成分を含む非定常場であり、図-5が時間平均流を捉えているわけではないことに注意を要する。

浮遊砂の卓越する流れ場を形成するため、Run 2では、浮遊砂のモデルとして砂の代わりに平均粒径 $d=81\mu\text{m}$ 、比重 $s=1.21$ の塩化ビニル粉末を用いている。Rubeyの式を用いると、この粒子の沈降速度は $w_0 = 0.42$ (cm/s)とな

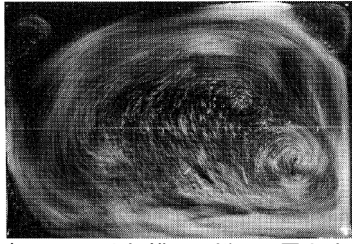


図-5 キャビティ内の大規模渦の様子（露光時間1.0(sec)

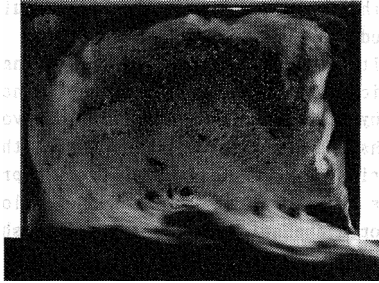


図-6 界面の周期渦の様子（露光時間0.01(sec)

る。実験においては、この粒子を少量の界面活性剤とともにあらかじめ水とよく混合しておき、主流域における浮遊砂体積濃度は0.05(%)となるよう、水路上流から一様に流入させた。

数値計算におけるキャビティ周辺の計算格子を図-7に示す。数値計算はRun 1では初期条件より200(sec)間進め、初期条件の影響のない流れ場を得た。なお、計算結果は周期的な渦の発振と水面振動を伴う非定常流れ場となった。Run 2では最初に流れ場の計算のみを200(sec)間進め、十分に発達した流況を得た後、浮遊砂を投入し、さらに200(sec)間の計算を進めた。

b) 計算結果の考察

図-8は、Run 1におけるa-a'断面（図-4参照）のx方向流速の分布を実験結果と4つのモデルによる計算結果と比較したもので、実験値は水深の midpoint で計測され、計算値は水深平均値を示している。まず、Model Iの結果がキャビティ内の循環流を過大に評価していることに気付く。これより、二次流の発生は循環流の流速を減衰させる効果があることが予想される。二次流を考慮したモデルは実験の流速分布をいずれも良好に再現しており、特にModel IVは外岸付近を除いて、実験結果と極めて良い一致を示している。

図-9は、Model IIIの計算結果から描いたb-b'（図-4参照）に沿う鉛直断面における流速ベクトルを示したものである。この流速ベクトルは、数値解析によって直接得られる水深平均流速から、式(21)を用いてs, n方向の流速を求め、これをx, y方向に変換した後、三次元の連続式により鉛直方向の流速を求めることによって描くことができる。この図には左右に逆回りの一組の渦が見られ、二次流が明確に捉えられていることを示している。

図-10は、Run 2の実験結果において、浮遊砂投入開始後t=100(sec)における堆積の様子を写真撮影したものである。浮遊砂の堆積はキャビティ内の中央付近のほぼ長方形の領域に生じている。計算結果では、Model IIを用

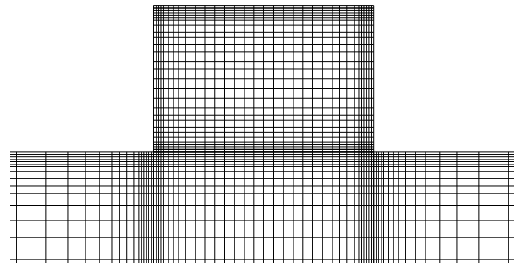


図-7 Case Bにおけるキャビティ付近の計算格子

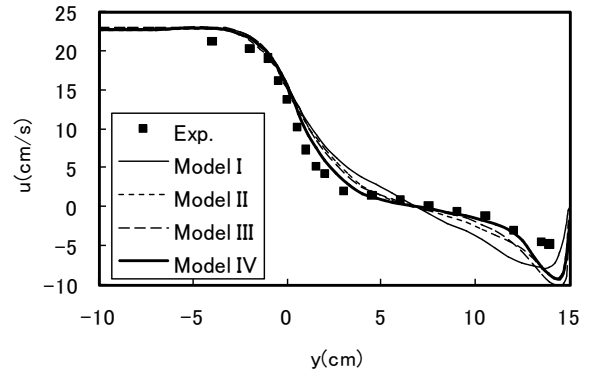


図-8 Run 1におけるa-a'断面の流速分布の比較

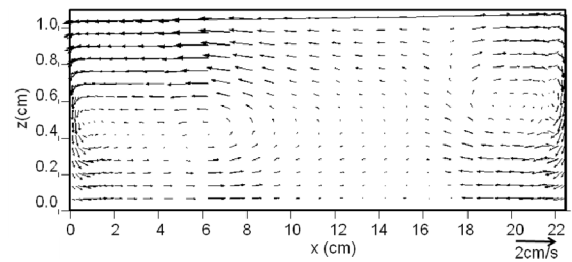


図-9 Run 1におけるb-b'鉛直断面の流速ベクトル (Model IIIによる数値計算結果)

いた場合、計算が不安定となり解を得ることができなかった。これは、界面に周期的に発生する大規模渦周辺で二次流による付加項が急激に変化するためである。剥離渦のような非定常現象周辺では、二次流が十分発達する前に剥離渦が消滅し、二次流も減衰すると考えられるため、ラグを考慮したモデル化が不可欠となることを示唆している。

図-11は、Model I, III, IVを用いて計算された浮遊砂堆積パターンを河床変動計算開始後t=100(sec)の時点で示したものである。いずれの計算結果においても、堆積域がキャビティの中央付近（循環の中心付近）に生じている点では定性的に一致するが、その面積が異なる。注目すべき点は、二次流を用いたモデルの方が堆積域が大きくなっている点である。二次流はTea-pot効果により堆積域をキャビティの中央に集中させる効果があるが、それとともに、図-8に示すように循環流そのものの強度を低下させる効果も有している。Case Bは、Case Aのような強制的な循環流れ場（Tea-pot内の循環流もこれに属する）と異なり、界面のせん断力に誘起された受動的な循環流れ場である。このような場合、堆積域は二次流による堆積域集中効果と循環流の減衰効果の相乗効果により決

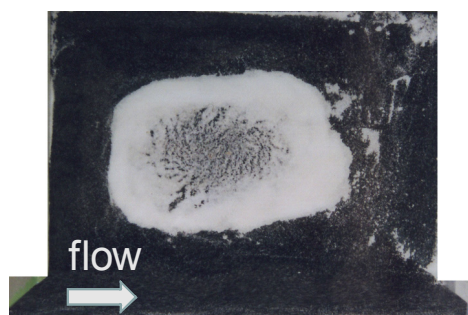


図-10 Run 2の実験における浮遊砂堆積状況

定されると考えられ、単純なTea-pot効果から予想される堆積特性とは異なる結果となる。堆積域について実験結果と比較すると、Model IIIの結果は明らかに堆積域が過大であり、Model IVの結果は実験の堆積域を比較的良好に再現している。しかし、Model I、IVの結果では実験ではみられなかったキャビティ上流側側壁付近に堆積がみられ、特にModel Iの結果はこの部分の堆積量が大きい。この実験結果との相違点については今後さらに検討を要する。以上を総合すると、Model IVによる堆積特性が実験と最も一致していると考えられる。

5. まとめ

本研究は、ワンド内の流れのような循環流を有する開水路流れにおいて、二次流とそれに伴う浮遊砂輸送の変化を考慮できる平面二次元モデルについて検討を行ったものである。主な成果を次にまとめる。

- 1) 平面二次元モデルとして、二次流の効果の有無、ラグの考慮の有無、二次流に伴う流速変化を考慮するか否かで異なる4通りのモデルを単純剛体回転場に適用した結果、二次流を含むモデルはいずれも回転中心付近に堆積を生じさせること（Tea-pot効果）が確認された。
- 2) 側岸にキャビティを有する流れ場の循環流の生成について4つのモデルを比較したところ、ラグと流速分布変化の双方を考慮した二次流効果導入モデルが最も良好に実験の流速分布と一致した。
- 3) 二次流効果を考慮したモデルでは、仮定した流速分布形と連続式を解くことでキャビティ内鉛直断面に逆回りの一対の渦が確認され、定性的に二次流を再現できることを確認した。
- 4) キャビティ内の浮遊砂堆積パターンについて実験と比較した結果、ラグと流速分布変化の双方を考慮した二次流効果導入平面二次元モデルが最も実験結果と一致した。

今回は主にモデルの定性的再現性の相違に視点を置いて検討を実施したが、今後はモデルの定量的な精度の検証を実験結果との比較を通じて行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 長谷川和義: 沖積蛇行の平面および河床形状に関する基礎

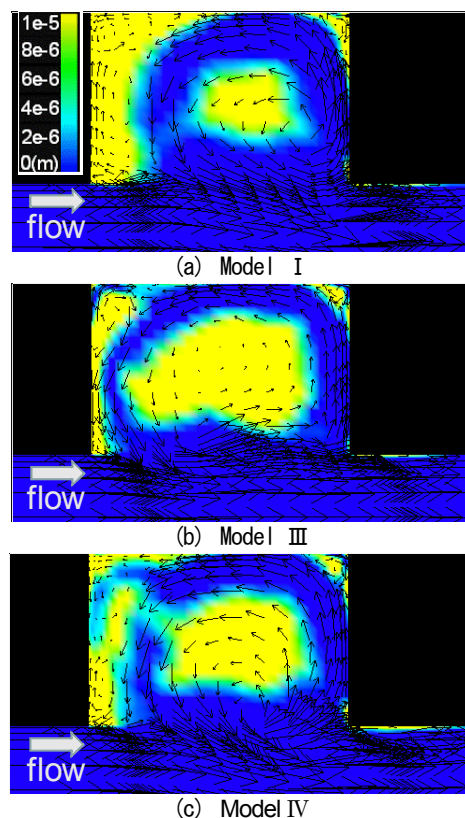


図-11 Case Bにおける各モデルの堆積状況の比較 (t=100(s))

的研究, 北海道大学学位論文, 1983.

- 2) 例えば, 清水他: 河岸侵食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集, 第40巻, pp.921-926, 1996.
- 3) 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.
- 4) 細田尚, 長田信寿, 岩田通明, 木村一郎: 一般座標系での主流と2次流の遅れを考慮した平面2次元モデル, 水工学論文集, 第44巻, pp.587-592, 2000.
- 5) 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.
- 6) 音田慎一郎, 細田尚, 木村一郎: 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, 水工学論文集, 第50巻, pp.769-774, 2006.
- 7) Kimura, I., Hosoda, T. & Onda, S.: Fundamental properties of suspended sediment transport in open channel flows with a side cavity. Proceedings of RCEM 2007, Enschede, Netherlands, Balkema Publishers, pp.-, 2007.
- 8) Nezu, I. & Nakagawa, H.: Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1993.
- 9) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, Proc. ASCE, Vol.100, HY11, pp.1631-1648, 1974.
- 10) 門谷健, 藤田一郎, 椿涼太: 開水路サイドキャビティ流れにおける水面振動の発生要因に関する検討, 水工学論文集第52巻, pp.757-762, 2008.
- 11) 富永晃宏, 佐々木高士, 郭緯: 堀川の潮汐流動に伴う流量特性と河岸凹部の流れ構造の現地観測, 水工学論文集第52巻, pp.781-786, 2008.
- 12) Kimura, I. & Hosoda, T.: Fundamental properties of flows in open channels with dead zone. J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.123 (2), pp.98-107, 1997.

(2008. 9. 30受付)