

非線形 k - ϵ モデルによる斜め越流型水制周辺の三次元流況に関する数値解析3D Numerical Simulations of Open Channel Flows around Submerged Skewed Spur Dikes
Using a Non-linear k - ϵ Model

木村 一郎*, 細田 尚**, 音田 慎一郎***, 富永 晃宏****

Ichiro Kimura, Takashi Hosoda, Shinichiro Onda and Akihiro Tominaga

*工博, 四日市大学助教授, 環境情報部環境情報学科 (〒512-8512 三重県四日市市萱生町 1200)

** 工博 京都大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*** 工修 京都大学大学院博士課程学生, 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**** 工博 名古屋工業大学教授, 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

3D flow structures around sub-merged skewed spur dikes are numerically investigated. The basic equations of the numerical model are derived on a generalized curvilinear movable coordinate system with full-staggered arrangement of hydraulic variables. A 2nd order non-linear k - ϵ model with effects of the strain parameter and the rotation parameter is adopted as a turbulence model to simulate the complex turbulent flows with separation and vortex shedding from the edge of the spur dikes. Numerical results are compared with the PIV measurements by Tominaga et al (2001)¹⁾ and the model performance is examined. The present numerical model could reproduce the fundamental aspect of the 3D turbulent flow features affected by the inclination angle of spur dikes.

Key Words: spur dike, non-linear k - ϵ model, open channel flow, river environment

キーワード: 水制, 非線形 k - ϵ モデル, 開水路流れ, 河川環境

1. はじめに

水制は, 本来堤防の保護や川舟の航路確保のために堤防と垂直に近い角度で設置される河川構造物であり, 透過型, 不透過型等の種類がある. 水制は伝統的河川工法としてかつては各地の河川で見られたが, 河川の舟運の衰退, 堤防技術の進歩に伴い本来の役目を終え, 一部で撤去が進められてきた. ところが, 近年は水制の有する河川環境向上の機能が注目され, 水制の効用が再認識されている. すなわち, 水制は河川環境に変化を与えるとともに, 水制周辺に土砂が堆積して形成されるワンド(入江状の地形)は, 多様な生態系の維持に極めて有効である点が指摘されている. このため, 最初から河川環境向上を主目的とした水制設置が近年行われるようになってきた. しかしながら, その多くは未だ試行錯誤的であり, 成功とはいえない例も多い. 例えば, 水制設置後数年で水制間のほとんどが土砂で埋もれてしまった例や, 逆に水制間に全く土砂が堆積せず, ワンドが形成されない例が見受けられる.

河川環境構造物として水制を設計する場合, 水制周辺

の河床変動と, 水制域・主流間の水質交換に留意する必要がある. このためには, 水制周辺の三次元流況を精度よく予測する必要がある. 水制設置の着眼点の一つとして, 水制設置角度, すなわち河川横断方向と水制の張り出し方向のなす角度が挙げられる²⁾. 山下ら³⁾は, 木曽川ケレップ水制群(不透過型)に関する現地調査, および航空写真等の資料解析を行い, 水制間の土砂堆積量が水制設置角度に大きく依存し, 上流向きの水制では土砂の堆積が進行する傾向にあり, 下流向きの水制では土砂の堆積が生じにくい点を指摘した. 最近, 鬼束ら^{4,5)}は越流, 非越流の両方の条件下で不透過型越流型斜め水制に関する移動床室内実験を行い, 堆積量を比較した. この実験では, 越流型では上流向き水制の水制間土砂堆積量が下流向き水制の約3倍, 非越流型では約1.5倍となっており, 水制角度の影響は越流状態でより顕著に現れることが指摘された. 富永ら¹⁾は不透過越流型水制を対象に水制設置角度を変えた場合の流れ場の変化に関するPIV計測を行い, 上流向きの水制では底面付近に開口部から岸側に向かう流れが卓越すること, 下流向きの水制では逆に底面付近の流れが水制奥から開口部に向かうことを指

摘した。これらの結果は、水制角度により水制間土砂堆積量を制御できる可能性を示唆するものであるが、実際の水制設計に応用するにはさらに多くの条件における検討が必要である。

様々な水理条件のもとでの流れ場の検討を行うには、信頼できる数値解析モデルによる方法が最も能率的、かつ経済的である。水制周辺の流れ場に関する数値解析は従来から行われているが（例えば文献^{6),7)}参照）、その多くが平面二次元モデル、あるいは静水圧近似の三次元モデルを用いており、その適用には限界がある。鉛直方向の運動方程式を含む三次元モデルについては長田ら⁸⁾が直角水制を対象に検討を行っており、極めて良好な結果を得ている。

本研究は、斜め越流型水制周辺の流れを対象に、鉛直方向の運動方程式を含む三次元流れの基礎式を用いて数値解析を試みる。用いるモデルは前述の長田らのモデル⁸⁾と類似であるが、定式化の過程が異なる。富永らの実験¹⁾と同条件で計算を実施し、数値解析結果と実験結果の比較を通じてモデルの妥当性を検証するとともに、水制角度が流れ場に及ぼす影響を検討する。

2. 数値解析法の概要

2.1 数値解析モデル構築の基本方針

本研究で採用する数値解析モデルの主な特徴は、次の通りである。

① 非線形 k-ε モデル

乱流モデルとしては、ストレイン・パラメータ、ローテーションパラメータ依存性を考慮した非線形 k-ε モデルを用いる。これは、水制先端からの渦の発振や2次流等を、少ない計算機負荷で精度良く再現するためである。また、水制設置域の流れ場のレイノルズ数が一般に大きく、かつ水制壁面が粗面であると仮定して、高レイノルズ数型のモデルとする。

② 移動一般曲線座標系

斜め水制周辺の地形を滑らかに再現するとともに、自由水面の変動を考慮するため、移動一般曲線座標系における基礎式を用いる。基礎変数として流速ベクトルの反変成分を用いることにより、基礎式の誘導や水面移動の計算が極めて容易となる。

③ 完全スタガード格子

一般に、一般曲線座標系においては、プログラミングを容易にし、計算機記憶容量を抑えるため、レギュラー格子系やコロケート格子系が用いられることが多いが、本研究では保存性や有限体積法との親和性、計算の安定性等を考慮して、完全スタガード格子系を採用する。

2.2 基礎式

本研究で用いる移動一般曲線座標系における反変成分表示の基礎式^{9),10),11)}を次に示す。以下、添字はアイン

シュタイン総和則に従う。

[連続式]

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^a \sqrt{g}}{\partial \xi^a} = 0 \quad (1)$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i (V^j - W^j)] + V^i \nabla_j W^j + V^j \nabla_j W^i \\ = F^i - \frac{1}{\rho} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j \left[-\overline{v^i v^j} \right] + 2\nu \nabla_j e^{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

[k 方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla_j [k (V^j - W^j)] + k \nabla_j W^j \\ = -g_{ij} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i - \varepsilon + \nabla_j \left\{ \left(\frac{D_i}{\sigma_k} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i k \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

[ε 方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla_j [\varepsilon (V^j - W^j)] + \varepsilon \nabla_j W^j = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} g_{ij} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i \\ - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla_j \left\{ \left(\frac{D_i}{\sigma_k} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i \varepsilon \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 ξ^j : 計算空間の空間座標、 t : 時間、 V^j : 流速ベクトルの反変成分、 W^j : 格子移動速度ベクトルの反変成分、 v^j : 乱れ速度ベクトルの反変成分、 p : 圧力、 ν : 動粘性係数、 ρ : 流体の密度、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギー散逸率、 F^j : 重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表す。 g_{ij} , g^{ij} は計量テンソルの共変成分及び反変成分であり、次のような関係がある。

$$g_{ij} = \frac{\partial x^k}{\partial \xi^i} \frac{\partial x^l}{\partial \xi^j} \delta_{kl}, \quad g^{ij} = \frac{\partial \xi^k}{\partial x^i} \frac{\partial \xi^l}{\partial x^j} \delta_{kl}, \quad g_{ij} g^{jk} = \delta_i^k \quad (5)$$

ここに、 x^k はデカルト座標系を表す。また、

$$g = \det[g_{ij}] \quad (6)$$

である。さらに、 ∇_j は共変微分を表し、例えば、あるベクトルの反変成分 A^k に関しては、次のようになる。

$$\nabla_i A^k = \frac{\partial A^k}{\partial \xi^i} + A^j \Gamma_{ij}^k \quad (7)$$

ここに、 Γ_{ij}^k はクリストッフェルの記号（接続の係数）であり、次式で計算される。

$$\begin{aligned} \Gamma_{ij}^k = \left\{ \begin{matrix} k \\ i j \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{km} \left(\frac{\partial g_{jm}}{\partial \xi^i} + \frac{\partial g_{im}}{\partial \xi^j} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial \xi^m} \right) \\ = \frac{\partial \xi^k}{\partial x^p} \frac{\partial^2 x^p}{\partial \xi^i \partial \xi^j} \end{aligned} \quad (8)$$

なお、流速ベクトルの反変成分(V^k)と直交成分(U^k)は次の関係 (chain rule) により変換される。

$$V^i = \frac{\partial \xi^i}{\partial x^j} U^j, U^i = \frac{\partial x^i}{\partial \xi^j} V^j \quad (9)$$

2.3 乱流モデル

乱流モデルとしては、著者らがこれまでに角柱¹²⁾や立方体周辺の流れ^{13),14)}、複断面開水路流れ¹⁵⁾などの計算に用いてきた、高レイノルズ数型の二次非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。本モデルによる構成則は一般曲線座標系において次のように表される¹⁶⁾。

$$-\overline{v^i v^j} = D_i S^{ij} - \frac{2}{3} k \delta_s^i g^{ij} - \frac{k}{\varepsilon} D_i [\alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 + \alpha_3 Q_3] \quad (10)$$

$$D_i = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

$$Q_1 = S^{ia} g_{ai} \Omega^{ij} + S^{jb} g_{bj} \Omega^{ji} \quad (12)$$

$$Q_2 = S^{ia} g_{ai} S^{lj} - \frac{1}{3} S^{ka} g_{am} S^{mb} g_{bk} \delta_l^i g^{lj} \quad (13)$$

$$Q_3 = \Omega^{ia} g_{ai} \Omega^{lj} - \frac{1}{3} \Omega^{ka} g_{am} \Omega^{mb} g_{bk} \delta_l^i g^{lj} \quad (14)$$

$$S^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i + g^{ia} \nabla_a V^j \quad (15)$$

$$\Omega^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i - g^{ia} \nabla_a V^j \quad (16)$$

モデル係数は、ストレインプラメータ S と、ローテーションパラメータ Ω の次のような関数で与える。

$$\alpha_1 = -0.1325 f_M, \alpha_2 = 0.0675 f_M,$$

$$\alpha_3 = -0.0675 f_M \quad (17)$$

$$f_M = \frac{1}{1 + 0.02 M^2} \quad (18)$$

$$C_\mu = \min \left[0.09, \frac{0.3}{1 + 0.09 M^2} \right] \quad (19)$$

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S^{ia} g_{ai} S^{jb} g_{bj}} \quad (20)$$

$$\Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega^{ia} g_{ai} \Omega^{jb} g_{bj}} \quad (21)$$

モデル係数のうち、式(17)、(18)は単純せん断流場における乱れ強さの配分に関する実験結果との比較を通じて同定された^{13),14)}。また、式(19)については、二次元および三次元流れ場における実現条件を満たすように関数形を同定した¹⁷⁾。

2.4 計算法の概要

(1) 計算スキーム

計算法は有限体積法とし、圧力、 k および ε を直方体格子の中央で、流速ベクトルの成分を側面で定義する完全スタガード格子系を用いた。計量テンソル、クリストフフェル記号等は格子点上で定義し、計算の過程で必要となる位置の値については、その都度内挿により求めた。これは、計算機メモリの節約のためである。本研究における計算格子上の水理量の配置を図-1に示す。

運動方程式の移流項の離散化には QUICK スキームを、 k および ε 方程式の移流項には Hybrid 法を用いている。また、運動方程式の移流項に関するクリストフフェル記号を含む付加項についても、従来の研究¹¹⁾にならないコントロールボリュームの上流側で評価した。時間積分は完全陽解法とし、二次の Adams Bashforth 法を用いる。圧力は時間ステップ毎に SOLA アルゴリズム^{18),19)}と同様の収束計算により求める。

(2) 境界条件及び水面の取り扱い

今回の数値計算の対象が河川流であることを考慮し、壁面の k と ε については壁関数法で与え、壁面近傍の流速は対数則で評価することとした。上流端の k と ε は、時間ステップ毎に一つ下流側の定義点の値と等しく置いた。下流端の k と ε については、勾配ゼロの条件を用いた。

水面の ε は杉山ら²⁰⁾の提案する次式で評価した。

$$\varepsilon_s = \frac{C_{\mu 0}^{3/4} k_s^{3/2}}{0.4 \Delta z_s}, \quad (C_{\mu 0} = 0.09) \quad (22)$$

上式中、添字 s は表層の値を、 Δz_s は水面から定義点までの距離を表す。水面の k には slip 条件を課す。また、水面近傍の鉛直方向の乱れの減衰を考慮するため、次の減衰関数を渦動粘性係数に乘じる²¹⁾。

$$f_s = 1 - \exp \left\{ -B(h-z) \varepsilon_s / k_s^{3/2} \right\}, \quad (B=10) \quad (23)$$

自由水面変動量は、反変成分表示の基礎式においては次のように極めて簡単な式により計算される¹¹⁾。

$$\Delta h = \sqrt{g_{33}} V^3 \Delta t \quad (24)$$

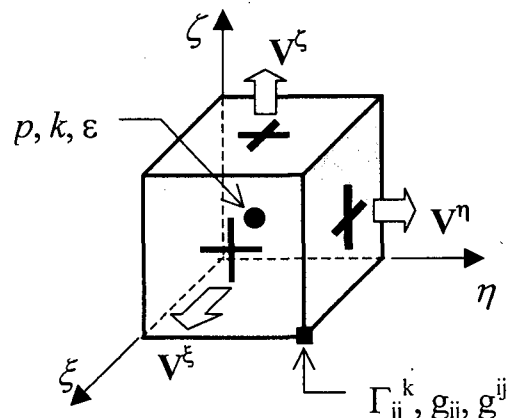


図-1 完全スタガード格子における変数配置

表-1 数値計算における水理条件（富永ら¹⁾の実験と同条件）

水路幅	路床勾配	平均水深	流量	平均流速	フルード数	レイノルズ数	水制長	水制幅	水制高
0.3m	1/2000	8.0cm	4.1 l/s	17.08cm/s	0.193	13660	5.0cm	2.0cm	4.0cm

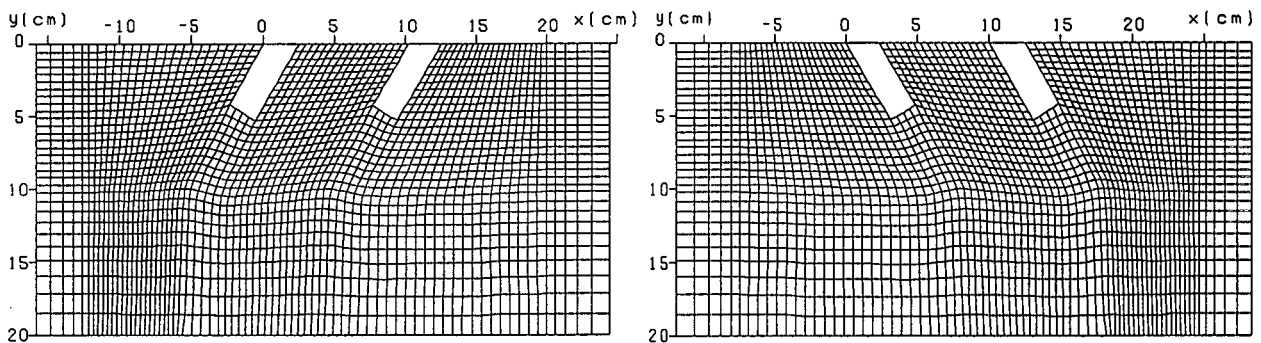


図-2 水制付近の水平面内の計算格子（左：Run 1，右：Run 2，流れは左から右）

上の式で、 Δt ：計算時間間隔、 Δh ： Δt 時間の水面変動量を表し、添字 3 は鉛直方向を表すものとする。

2.5 計算の条件

(1) 水理条件

計算は、富永らの実験（PIV 計測）¹⁾と同条件で行う。表-1 にこの実験における水理条件を示す。上流向き（直角より 30° 上流向）を Run 1，下流向き（直角より 30° 下流向）の場合を Run 2 とする。

(2) 計算領域と計算格子

計算領域は上下流端の影響を考慮して、第 1 水制の上流側 60cm から下流側 160cm の範囲とした。図-2 に Run 1 および Run 2 の計算対象領域のうち、水制周辺部分の水平面内の計算格子を示した。水平方向の格子形成にあたっては、千葉らによる格子生成ソフトウェア、Rubnet²²⁾を使用した。このソフトウェアを用いることにより、GUI 環境のもとで極めて容易に格子生成を行うことができる。一方、鉛直方向の格子は、初期条件として底面・水面間を等間隔で分割し、水制天端高さ（ $z=40\text{mm}$ ）より高い部分の格子については式(24)で計算される水面変動に比例させて時間ステップごとに变化させる移動格子とした。計算格子数は 94 (x 方向)×30 (y 方向)×8 (z 方向)となった。最小格子幅は 3.4mm である。

3. 計算結果の概要

3.1 水平面内の流速ベクトル

まず、水平面内の流況について考察する。図-3 は Run 1（上流向き水制）における水深の異なる水平断面における時間平均流速ベクトルを、数値解析と実験と比較したものである。解析結果は水面振動を伴う振動解となるが、ここでは時間平均特性についてのみ着目する。図-3 の計算結果は、初期条件の影響が十分減衰したと判断される $t=120(\text{sec})$ の時点からさらに 100 秒間の計算を行い、 $t=120$

～220(sec)の計算結果を時間平均したものである。この操作により、初期条件の影響を除去し、かつ流体振動の影響をほぼ平均化した流れ場を抽出することが可能と判断した。一方、富永らの実験¹⁾では、約 16 秒間、高速ビデオカメラで撮影可能な計 1963 枚の画像から時間平均値が求められている。

各断面における平面流況に関して、数値解析結果と実験結果はある程度適合しているものの、一部に相違が見られる。特に、 $z=10\text{mm}$ の断面では、実験結果では循環の中心が $y=2\text{cm}$ 付近に存在するのに対し、計算結果では $y=5\text{cm}$ 付近に位置する。この原因は不明であるが、計算格子と乱流モデルの両面から今後さらに検討を要する。

$z=35, 45\text{mm}$ の断面では、数値解析結果は実験結果と比較的良好に一致している。第 1 水制による水はね効果は、後述の Run 2 の場合に比べて小さいという特徴についても実験結果と一致する。また、実験結果、数値解析結果ともに、第 1 水制の下流側の側面に沿って、岸から主流域に向かう流れが卓越し、第 2 水制の上流側の側面に沿って、主流から岸辺に向かう流れが卓越している。このため、水制間には反時計周りの循環流が形成されている。この循環流の向きは、後述の Run 2 とは逆向きであり、水制の設置角度によって水制水制間の定性的流況が異なることが理解できる。これらの結果から、実河川の水制設計における設置角度の検討の重要性が指摘される。

水制設計においては、掃流砂輸送と関係の深い底面付近の流れ場の予測が重要となる。底面付近($z=5\text{mm}$)の時間平均流速ベクトルをみると、実験結果、数値解析結果ともに、水制間の広い範囲にわたって開口部から川岸へ向かう流れが卓越していることがわかり、この流れにより掃流砂が水制間に流入することが予想される。山下ら³⁾は、木曽川のクレップ水制について現地調査と資料解析を実施し、上流向きの水制間では、土砂が堆積傾向にあること、下流向きの水制では土砂の堆積が少ないことを指摘した。この実地調査結果と本解析結果は関連性が

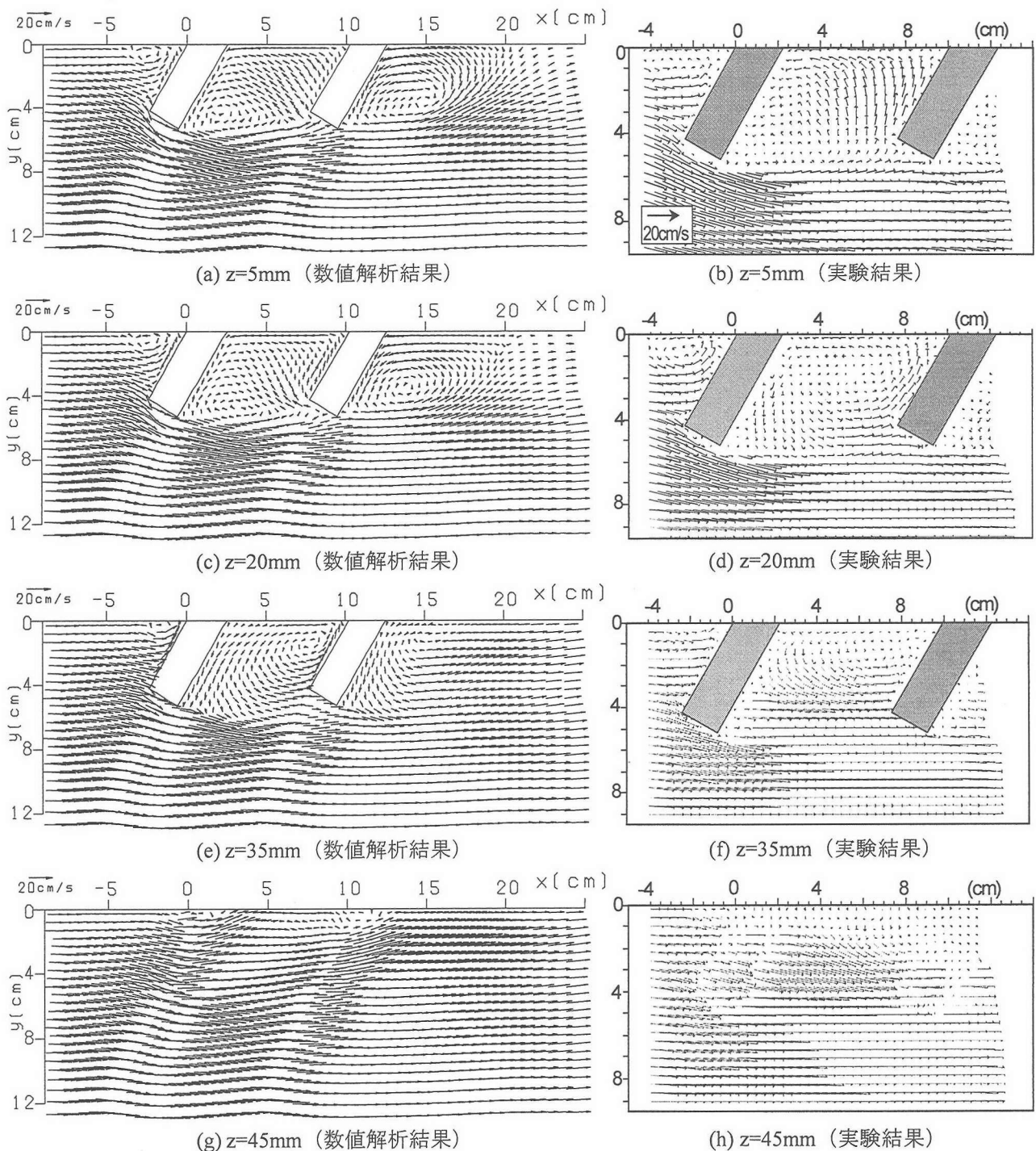


図-3 水平面内における時間平均流速ベクトルの比較 (Run 1)

あることが容易に予想できる。この点の解明は今後の課題であり、現地スケールと室内実験スケールでの現象の相違、水制群として連続して水制が存在する場合と本研究のように2本の水制のみが存在する場合の相違等について、さらに検討を進める必要がある。

図-4は、Run 2における水平面内の流速ベクトルを実験結果と数値解析結果で比較したものである。これらの結果には図-3と同様な時間平均操作が行われている。第1水制による水はね効果は、実験結果、数値解析結果ともにRun 1に比べて大きく、水はね角度は底面付近で特

に大きいことがわかる。水制間においては、第2水制の上流側の側面に沿って、左岸から水制先端に向かう流れが卓越しており、この流れの向きはRun 1と逆である。また、水制間の循環流は時計回りの流れが卓越しており、この向きについてもRun 1と比べて逆になっている。これらの定性的特性は実験結果と数値解析結果で良く一致している。また、底面付近では水制間において左岸から主流部に向かう流れが卓越していることから、このような水制では掃流砂が排出傾向となることが予想される。この点についても、先ほどと同様に山下³⁾の木曽川ケ

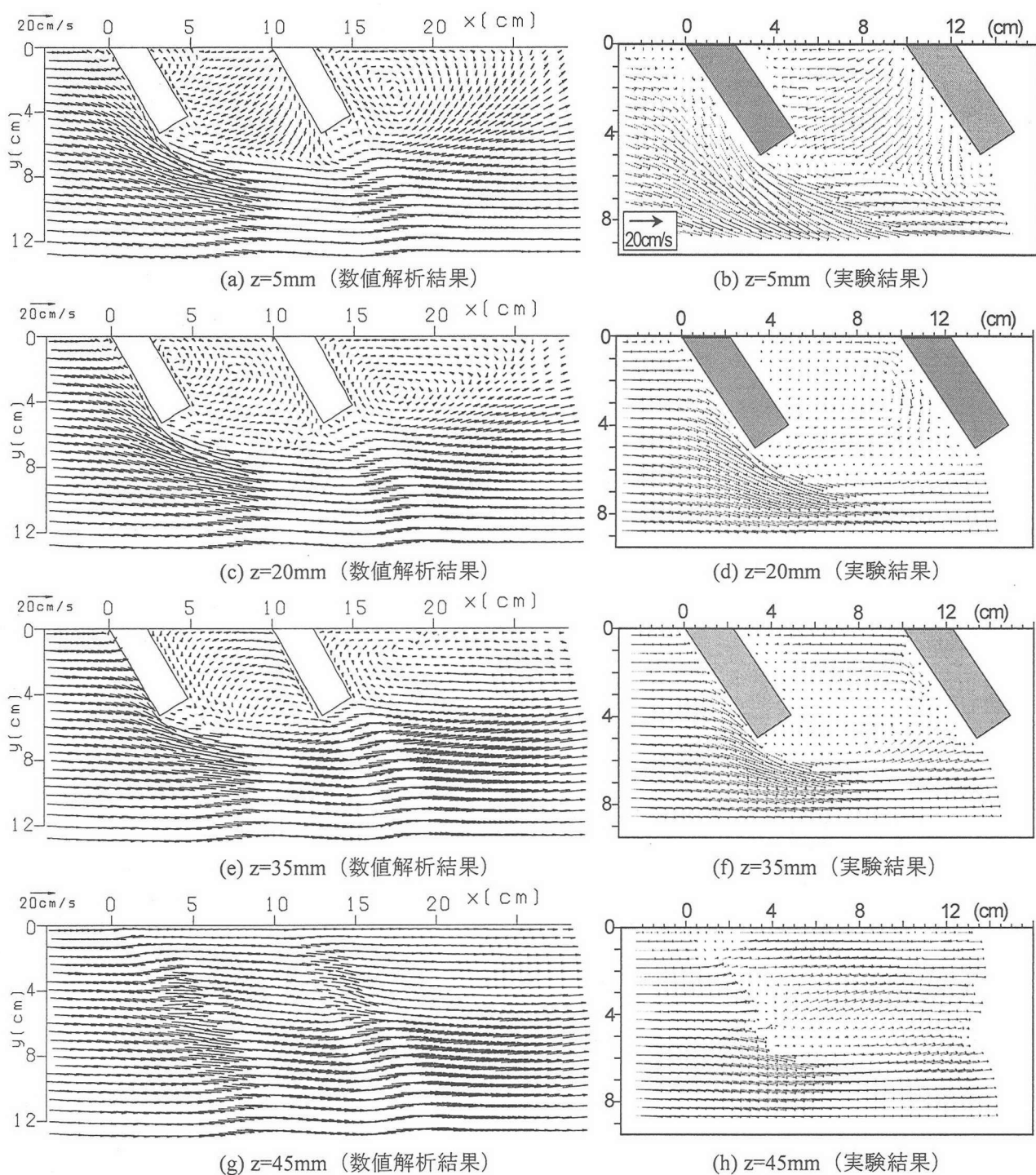


図-4 水平面内における時間平均流速ベクトルの比較 (Run 2)

レップ水制の実地調査結果との関連性が指摘される。

3.2 鉛直縦断面内の流速ベクトル

次に、主流方向の鉛直断面内の流況について検討する。図-5は、Run 1における $y=5\text{mm}$ 、 25mm 、 45mm 、 55mm の各鉛直断面における流速ベクトルを、数値解析結果と実験結果で比較したものである。ここで、数値解析結果の断面は計算格子に沿ったものであり、実験結果の表示断面とは完全には一致していない。また、実験では水路右岸からビデオ撮影を行っており、水制の背後は撮影でき

ないため、左岸に近い断面ほど計測範囲が狭まっている。

実験結果に着目すると、水路左岸近傍にあたる $y=5\text{mm}$ の断面では、第1水制上方に強い越流が生じており、この影響は水面付近にまで及ぶ。越流の強さは、岸から離れるにつれて弱くなる。このような第1水制の越流の特性は、数値解析結果にもほぼ再現されている。

次に、水制間の流れについてみると、実験結果と数値解析結果の間に若干の相違が認められる。特に、 $y=5\text{mm}$ の断面では、実験結果において2つの水制間のほぼ全域に渡って比較的強い上昇流が生じているのに対し、計算

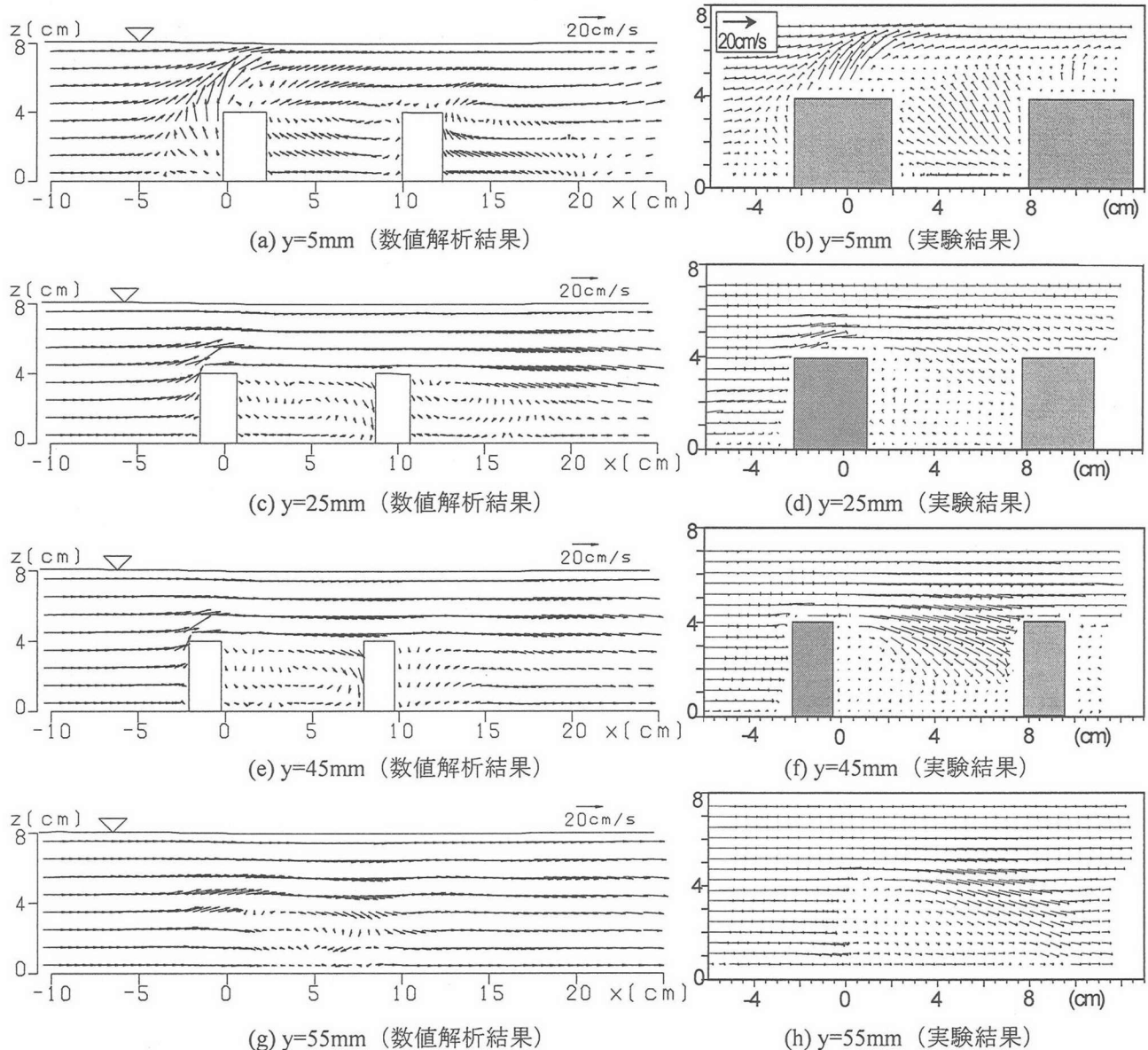


図-5 鉛直断面内の時間平均流速ベクトル (Run 1)

結果では、時計回りの循環流が生じており、定性的特性が異なっている。一方、 $y=25\text{mm}$ および $y=45\text{mm}$ の断面においては、実験結果、数値解析結果ともに、2つの水制間に時計回りの循環流の形成が認められるが、その規模は数値解析結果の方が大きい。この原因は不明であり、計算格子や乱流モデル、計算スキーム等の影響についてさらに検討を要する。水制先端付近の主流域に相当する $y=55\text{mm}$ 付近の流況は、第1水制付近の流れの剥離、第2水制付近の斜め下向きの流れの形成等、実験結果と数値解析結果で比較的良好に一致している。

次に、Run 2における縦断面内の流速ベクトルを図-6に示す。まず、第1水制の水はねの影響について考察する。実験結果、数値解析結果ともに第1水制上方には水はねの影響で斜め上向きの流れが生じているが、この流れの規模はRun 1に比べてかなり小さいことがわかる。これは、次のような理由によると考えられる。すなわち、

Run 1においては水制が上流を向いており、水制の付け根にあたる岸付近では鋭角の隅角部が形成され、ここに進入してきた水は必然的に上方向に向かうことになり、結果として強い上昇流が生じる。一方、Run 2においては、水制付け根が鈍角の隅角部となっており、ここに侵入する水の一部は水制に沿って主流方向に向かうと考えられ、このため上方向に向かう流れがRun 1に比べて弱くなるものと推測される。

次に、2つの水制間の流れに着目すると、実験結果では、 $y=5\sim 45\text{mm}$ の各断面で時計回りの循環流の形成が認められる。この循環流の規模は、水路左岸に近い $y=5\text{mm}$ の断面で最も大きい。数値解析結果においてもほぼ同様な傾向が認められる。 $y=55\text{mm}$ の断面においても数値解析結果の定性的特性は実験結果とほぼ適合している。

このように、水制付近の三次元的流れ特性については、実験結果と数値解析結果で比較的良好な一致が認められ、

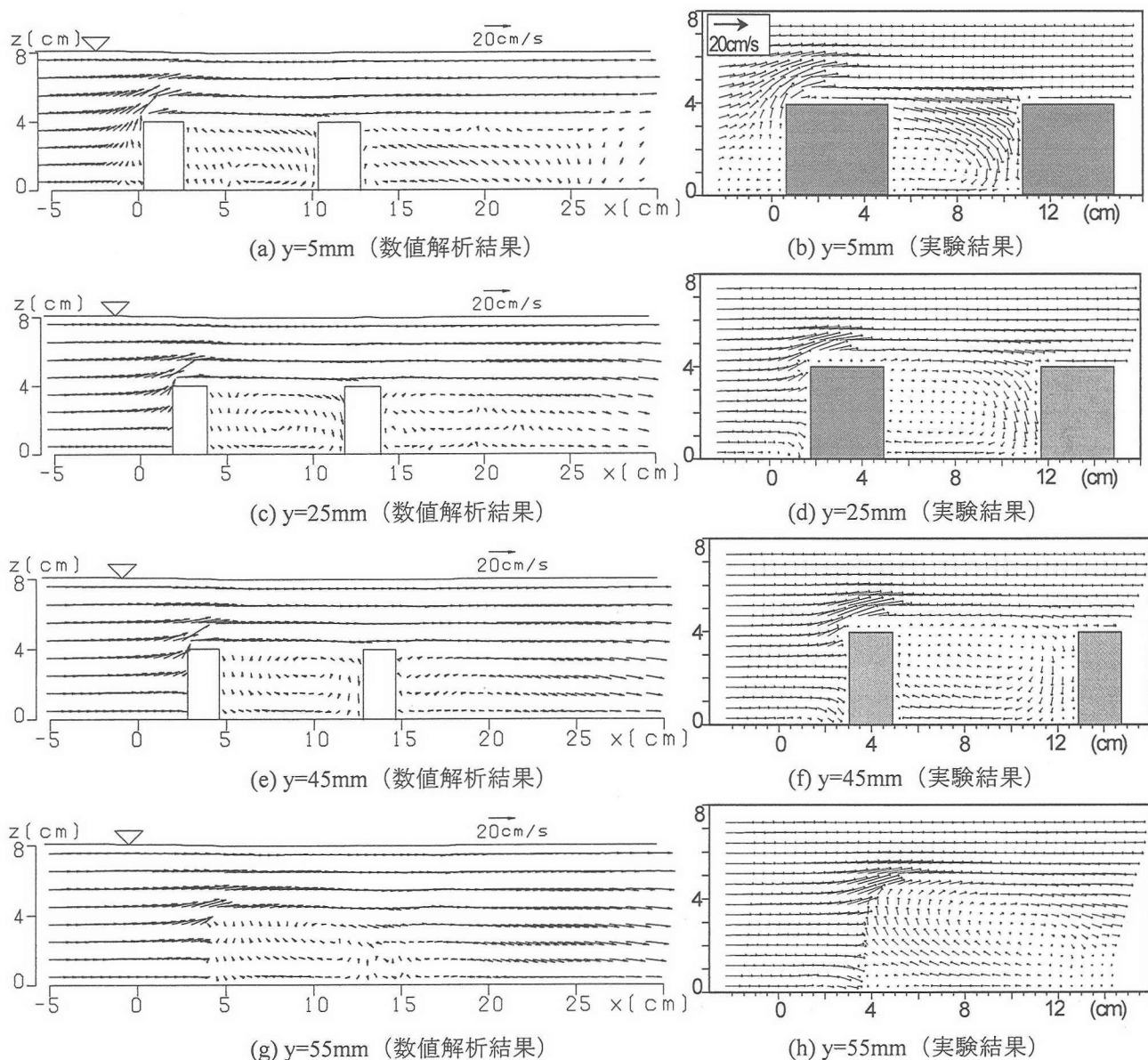


図-6 鉛直断面内の時間平均流速ベクトル (Run 2)

本モデルの有用性が確認された。しかし、いくつかの点で計算結果と実験結果に相違がみられ、モデルの精度向上のためにはさらに詳細な検討が必要と思われる。

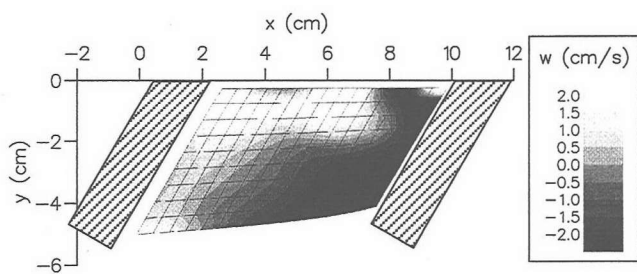
3.3 水制域境界面の流入・流出

水制域の環境、特に水質を考えるにあたっては、水制域と主流域との間の水の交換量を精度良く予測する必要がある。そのためには、水制域の界面における水の流入・流出量を検討する必要がある。そこで、富永ら¹⁾にならない、水制域への流入を負、水制域からの流出を正とし、水制域上面 ($z=40\text{mm}$ の水平面)、および水制域側面 ($y=50\text{mm}$ 付近の鉛直面) の2つの界面におけるフラックスの流入を検討する。

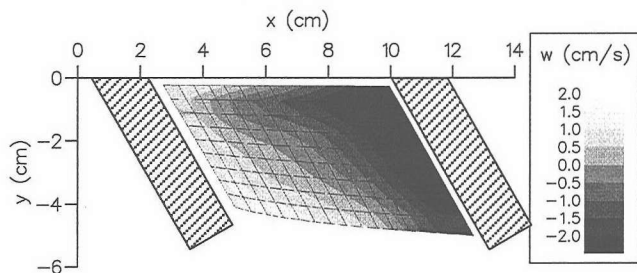
図-7 および図-8 は、それぞれ計算結果および実験結果における水制域上面の流入を濃淡図で示したものである。Run 1 では、実験結果、数値計算結果ともに、第

2水制の上流側、水制先端付近で水制域への流入が生じており、第1水制の付け根付近では水制域からの流出が卓越している。Run 2 については、第2水制の付け根付近で水制域への流入が卓越し、第1水制の先端付近で流出が生じている。これらの特性は、実験結果と数値解析結果において定性的に一致している。

図-9 および図-10 は、それぞれ数値解析と実験における $y=50\text{mm}$ 付近の鉛直面における流出入の様子を示したものである。ここで、数値解析結果は水制先端を通る計算格子に沿った曲面上の分布を示しており、実験における断面とは完全には一致していない。Run 1 についてみると、第2水制の下部付近で流入が、第1水制付近では流出が卓越する点は実験結果と数値解析結果で一致する。Run 2 についてはRun 1 とほぼ逆の傾向がみられ、第2水制の根元付近では流出が、水制先端高付近では水制間への流入が卓越している。これらの図からも、上流

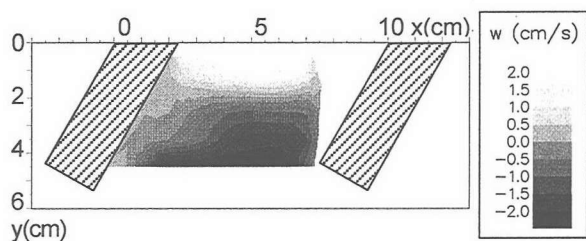


(a) Run 1 (数値解析結果)

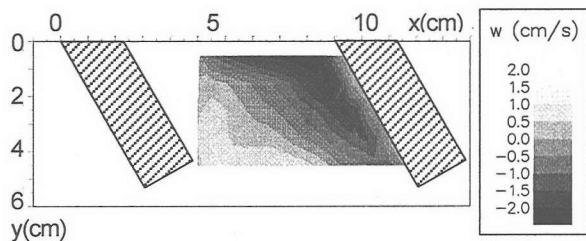


(b) Run 2 (数値解析結果)

図-7 水制天端高 ($z=40\text{mm}$) 水平面内における時間平均鉛直流速分布

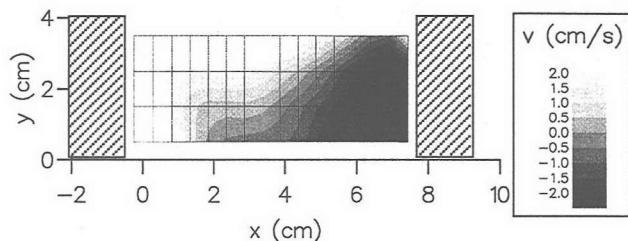


(a) Run 1 (実験結果)

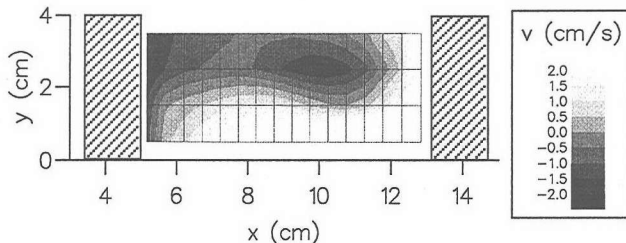


(b) Run 2 (実験結果)

図-8 水制天端高 ($z=40\text{mm}$) 水平面内における時間平均鉛直流速分布

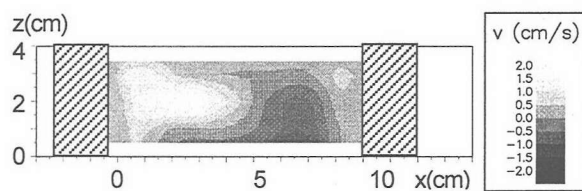


(a) Run 1 (数値解析結果)

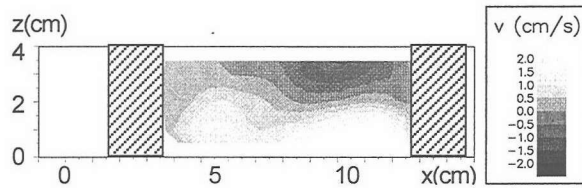


(b) Run 2 (数値解析結果)

図-9 水制先端部鉛直断面内 ($y=50\text{mm}$) における時間平均横断流速分布



(a) Run 1 (実験結果)



(b) Run 2 (実験結果)

図-10 水制先端部鉛直断面内 ($y=50\text{mm}$) における時間平均横断流速分布

向き水制の方が掃流砂を水制間に流入させやすい傾向にあることが確認できる。

4. おわりに

本研究は、斜め越流型水制周辺の流れの三次元構造について、数値解析手法により検討を行ったものである。数値解析モデルにおいては、乱流モデルとして非線形 $k-\epsilon$ モデルを用い、移動一般座標系における反変成分表示の基礎式を採用した。数値解析は富永らによる PIV 計測と同条件で行い、実験結果と計算結果を比較することによ

り数値解析モデルの妥当性を検証した。

数値解析結果は実験結果を比較的良好に再現した。特に、掃流砂輸送に関係の深い底面付近の流速に着目すると、上流向き水制では底面付近において水制域からの流入が卓越し、下流向き水制の場合は逆に底面付近において流出が卓越するという実験結果を定性的に再現することができた。また、上流向き水制に比べて下流向き水制の方が水制による水はね効果が大きい点についても、実験結果と適合した。しかしながら、一部で計算結果と実験結果の不一致も認められたため、モデルの精度向上を目指して計算格子や乱流モデル、計算スキーム等の各視

点からモデルの妥当性に関する検討を継続して行っていく必要がある。また、今回は2本の水制のみが存在する場合を想定したが、実河川にみられるように水制群として存在する場合との比較も今後の課題である。さらに、河床変動モデルの組み込みを行い、流れの三次元構造と流砂輸送の関係についても検討を進めたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、四日市大学教授、千葉賢先生より、格子生成ソフトウェア Rubbnet の使用をお許しいただくとともに、種々の有益なご助言をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。また、本研究の一部は平成13年度科学研究費補助金奨励研究(A)「河川構造物周辺の三次元流況と局所洗掘予測に関する非定常解析モデルの開発」(課題番号:12750467, 研究代表者:木村一郎)の補助を受けて行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 富永晃宏, 井嶋康二, 中野義郎: 斜め越流型水制周辺の流れ構造の PIV 解析, 水工学論文集, Vol.45, pp.379-384, 2001.
- 2) 木村一郎, 北村忠紀, 鷺見哲也, 武田誠, 鬼束幸樹, 庄建治朗, 大塚康二: 木曾川感潮域に設置された水制群周辺のワンド形成過程と河川環境に関する共同研究, 河川技術論文集, 第8巻, pp.365-370, 2002.
- 3) 山下洋平, 伊藤昭文, 武田誠, 松尾直規: 木曾川ワンド群の堆積状況の支配的要因に関する研究, 土木学会中部支部講演概要集, pp.237-238, 2001.
- 4) 河川懇談会共同研究「ワンドの水理と河川環境」研究成果報告書, 第3章, 3.3節, pp.24-30, 2002.
- 5) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 矢野勝士: 河床形状がわんど流れに及ぼす影響に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.559-564, 2002.
- 6) 福岡捷二, 西村達也, 高橋晃, 川口昭人, 岡信昌利: 越流型水制工の設計法の研究, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.51-68, 1998.
- 7) 大槻英樹, 芦田和男, 荒巻浩, 劉炳義, 藤田暁: 河道湾曲部における水制機能の予測手法, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.35-40, 1998.
- 8) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, 中藤達昭: 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.21-34, 2001.
- 9) 木村一郎, 細田尚, 音田慎一郎: 完全スタガード移動一般曲線座標系における開水路乱流シミュレータの開発, 四日市大学環境情報論集, Vol.5, pp.145-170, 2002.
- 10) 越塚誠一: 数値流体力学, 培風館, 1997.
- 11) Takizawa, A., Koshizuka, S. and Kondo, S.: Generalization of physical component boundary fitted co-ordinate (PCBFC) method for the analysis of free-surface flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.15, pp.1213-1237, 1992.
- 12) Kimura, I. and Hosoda, T.: 3-D unsteady flow structures around rectangular column in open channels by means of non-linear $k-\epsilon$ model, *Proc. of 1st International Symposium on TURBULENCE and SHEAR FLOW PHENOMENA*, Santa Barbara, USA, pp.1001-1006, 1999.
- 13) 木村一郎, 細田尚: 乱れ強さ非負条件を考慮した非線形 $k-\epsilon$ モデルによる立方体周辺の流れの三次元解析, 水工学論文集, Vol.44, pp.599-604, 2000.
- 14) Kimura, I. and Hosoda, T.: Numerical simulation of flows around a surface-mounted cube by means of a non-linear $k-\epsilon$ model, *9th. International symposium on flow visualization*, Edinburgh, Scotland, Paper No.388 (CD-ROM), 2000.
- 15) Hosoda, T., Sakurai, T., Kimura, I. and Muramoto, Y.: 3-D Computations of compound open channel flows with horizontal vortices and secondary currents by means of non-linear $k-\epsilon$ Model, *J. Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol.17, No.2, pp.87-96, 2000.
- 16) Gatski, T.B. and Speziale, C.G.: On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows, *J. Fluid Mech.*, Vol.254, pp.59-78, 1993.
- 17) Hosoda, T., Kimura, I. and Shinichiro, O.: Some Necessary Conditions for a Non-Linear $k-\epsilon$ Model in Classified Flow Patterns with a Singular Point, *Proc. of 2nd Internatinal Symp. on Tubulence and Shear Flow Phenomena*, Stockholm, Sweden, Vol.3, pp.155-160, 2001.
- 18) Hirt, C. W., Nichols, B. D. and Romero, N. C.: SOLA—A Numerical solution algorithm for transient fluid flows, *Los Alamos Scientific Report*, LA-5852, 1975.
- 19) 岩佐義朗, 細田尚, 平岡順次, 岡川一義: 無巻水路トンネル内の流れの抵抗則について, 京都大学防災研究所年報, Vol.34, B-2, pp.337-353, 1991.
- 20) 杉山均, 秋山光庸, 松原珠: 複断面開水路内の乱流構造解析と縦渦生成に関する研究, 土木学会論文集, Vol.515, II-31, pp.55-65, 1995.
- 21) 細田尚: 開水路流れにおける乱流拡散機構に関する水理学的研究, 京都大学博士論文, 1990.
- 22) 千葉賢, 武本行正: 伊勢湾数値シミュレータの研究・第2報—GUI 環境を利用した2次元構造格子生成プログラムの開発—, 四日市大学環境情報論集, Vol.2, No.2, pp.103-126, 1999.

(2002年4月19日 受付)