

左右交互にオリフィスが開いた 連続隔壁を通過する開水路流れの解析

ANALYSIS OF FLOW THROUGH CONSTRICTIONS WITH ORIFICES BORED IN RIGHT AND LEFT ALTERNATELY IN AN OPEN CHANNEL

浪平篤¹・高木強治²・小林宏康³

Atsushi NAMIHIRA, Kyoji TAKAKI and Hiroyasu KOBAYASHI

- ¹正会員 農修 農業工学研究所 水工部水源施設水理研究室 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)
² 農博 農業工学研究所 水工部水源施設水理研究室 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)
³ 農修 農業工学研究所 水工部水源施設水理研究室 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

The Hanaguri channel, constructed by Kiyomasa Kato in Kumamoto, is an irrigation channel with uniquely shaped constrictions. A series of walls with orifices constructed crosswise in the channel was intended to prevent volcanic ash from sedimenting in this channel. Though the orifices are opened in the center of each wall now, it is also said that they were bored in right and left alternately at first. In this study, a numerical analysis of the flow through constrictions of the channel with such legendary orifices was carried out by means of LES. In addition, VOF method was used to deal with the variation in free surface area, and TVD scheme used to prevent calculation from being unstable due to shortage of grids at the place where flow changes rapidly. The results were in good agreement with experimental measurements; we found these methods to be effective for analyzing flow through constrictions such as those in an open channel with orifices bored in right and left alternately.

Key Words : The Hanaguri channel, constriction, turbulent flow, free surface, LES, VOF, TVD scheme

1. はじめに

加藤清正は、豊臣秀吉によって肥後の統治を任された1588年から亡くなる1611年までの24年間に、熊本県の菊池川、白川、緑川及び球磨川の4河川に対して創意工夫に富んだ数多くの治水及び利水事業を精力的に展開した^{1) 2)}。その一つに、白川の中流域に建設された鼻ぐり井手と呼ばれる用水路がある。鼻ぐり井手は、下部の中央に半円状のオリフィスが開いた隔壁を水路内に連続して残すように掘削されている。この隔壁により、水路内に渦巻く水流を発生させ、この地方特有の火山灰(ヨナ)が水路内に堆積するのを防いだと言われている。

鼻ぐり井手の水理特性については、大本²⁾、高木ら³⁾が模型実験を行い、オリフィスの直下流では流れが噴流状態となり、その上層では主流に対し逆流が形成されることを明らかにしている。また、二次元壁面噴流の理論に基づいて土砂輸送能力を推定している。

一方、昭和初期の改訂合志川芥⁴⁾によると、鼻ぐり井手の隔壁では、オリフィスは左右交互に開けられていた

と記録されている。しかし、江戸時代末期に加藤清正の遺業を調査した勝国治水遺⁵⁾には、そのような形状についての記述は見られない。今となっては上述の隔壁の存在を確認できないが、その流れの構造は現況の鼻ぐり井手とは大きく異なると推測され、工学的に興味深い。

高木ら³⁾は、改訂合志川芥に記録されている鼻ぐり井手を想定した、図-1(c)のようにオリフィスが左右交互に開いた連続隔壁を通過する開水路流れに対しても模型実験を行っている。そして、通水能力は現況の半分程度になること、主流速から推定した土砂輸送能力は現況よりやや低下すること、隔壁間でらせん状の複雑な渦が形成されること等を明らかにしている。しかし、その流れには大きな乱れが生じるため、詳細な流れの構造は十分に解明されていない。

このような場合、数値解析が現象解明の有力な手段になると考えられる。中でもLES (Large Eddy Simulation) は、非等方性を有する三次元非定常乱流解析において実績がある。現況の鼻ぐり井手に対しても、著者ら⁶⁾が隔壁間流れを再現し、流れの構造の解明と瞬間流況の推定を行っている。

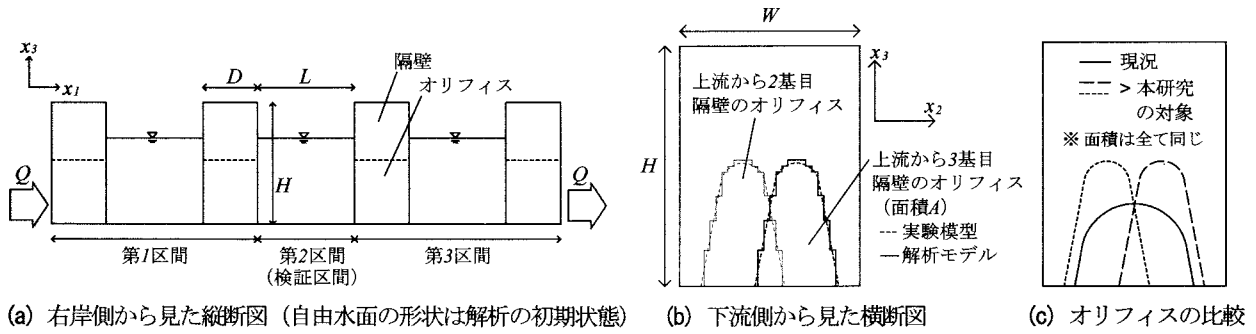


図-1 解析モデルの概要

表-1 実験模型と解析モデルの諸元

記号	説明	実験模型	解析モデル
H	隔壁の高さ	cm	80
W	隔壁の幅	cm	60
D	隔壁の流下方向長さ	cm	37
L	隔壁の流下方向間隔	cm	63
A	オリフィス面積	cm ²	815
Q	通水流量	l/s	45
h	水路下流端の堰高	cm	30

そこで本研究では、図-1(c)のようにオリフィスが左右交互に開いた連続隔壁を通過する開水路流れに対し、LESによる数値解析を行う。その際、流れの急変部等で十分な数の格子点を設定できないことによる計算の発散を防ぐため、高次精度を維持しつつ数値的振動を抑えることのできるTVDスキームを導入する。そして、平均流の再現性を模型実験結果³⁾との比較から評価する。さらに、模型実験では得られていない詳細な流れの構造や瞬間流況について明らかにする。

2. 解析方法

(1) LESにおける基礎式

LESで用いる空間粗視化した連続式とNavier-Stokes方程式（以下、N-S方程式という）は、以下のように表記される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p}{\rho} + \frac{2}{3} K \delta_{ij} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \nu_t) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + G_i \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\quad}$ は空間平均を表し、 t は時間、 x_i は流下方向座標、 x_j は横断方向座標、 x_3 は鉛直方向座標、 $\bar{u}_i$ は x_i 軸方向の流速成分（ $i=1,2,3$ ）、 p は圧力、 ρ は密度、

ν は動粘性係数、 G_i は x_i 軸方向の外力成分（ $i=1,2,3$ ）、 K はSGS（Sub Grid Scale）乱れエネルギー、 ν_t は渦動粘性係数、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号である。繰り返し添字はアインシュタイン縮約に従うものとする。

ν_t に対しては1方程式モデル⁷⁾を適用した。1方程式モデルでは、 ν_t の評価式と K の輸送式は以下のように表記される。

$$\nu_t = C_\nu \Delta K^{1/2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right\} \\ & + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij} \right\} \\ & - C_\epsilon \frac{K^{3/2}}{\Delta} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 Δ は粗視化を行う際のフィルター幅であり、 x_i 軸方向の格子幅 Δ_i （ $i=1,2,3$ ）を用いて以下のように表記される。

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \quad (5)$$

また、式(3)、(4)における係数としては、 $C_\nu = 0.05$ 、 $\sigma_k = 0.5$ 、 $C_\epsilon = 1.0$ ⁸⁾を用いた。

(2) 解析モデル

まず、解析モデルの模擬対象とした模型実験³⁾の概要を説明する。実験は、勾配をゼロとした長さ40m、幅60cmの可変勾配水路において、その上流端から15mの地点を始点とし、それより下流側に鼻ぐり井手の隔壁の鋼製模型を10基設置して行われている。その諸元には、現地に対して縮尺1/5となるよう、表-1の値が与えられている。上流から5基目と6基目の隔壁間（以下、測定区間という）では、60秒間の平均流速分布が3次元電磁流速計を用いて測定されている。また、同区間中央における水深の平均値（以下、実験水深という）が測定されている。本研究では、これらのデータを解析結果の検証に用いる。

解析モデルは、格子幅が2cmで一定のデカルト座標に

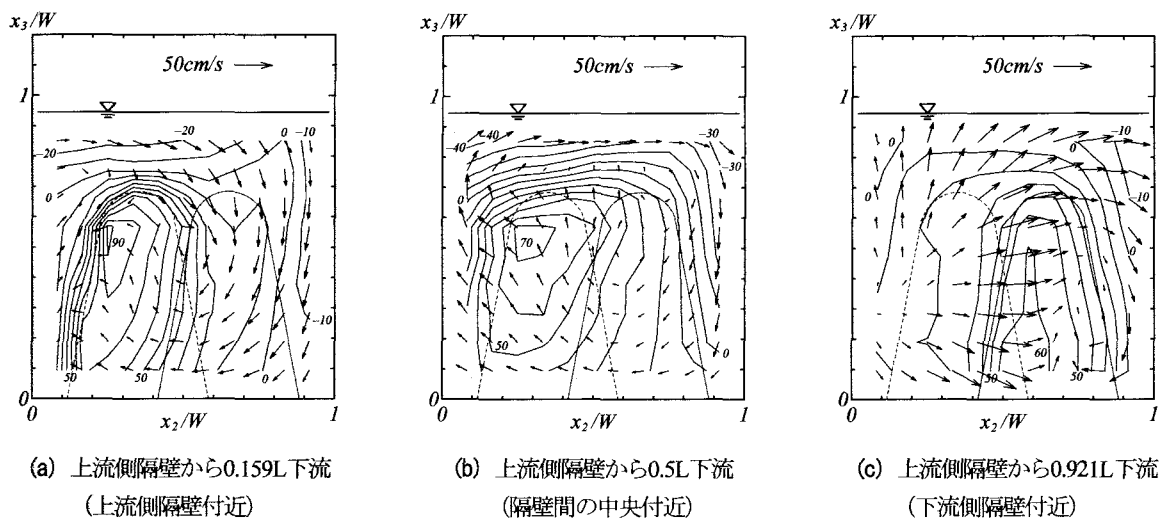


図-2 模型実験³⁾による主流速の等値線と2次流ベクトル

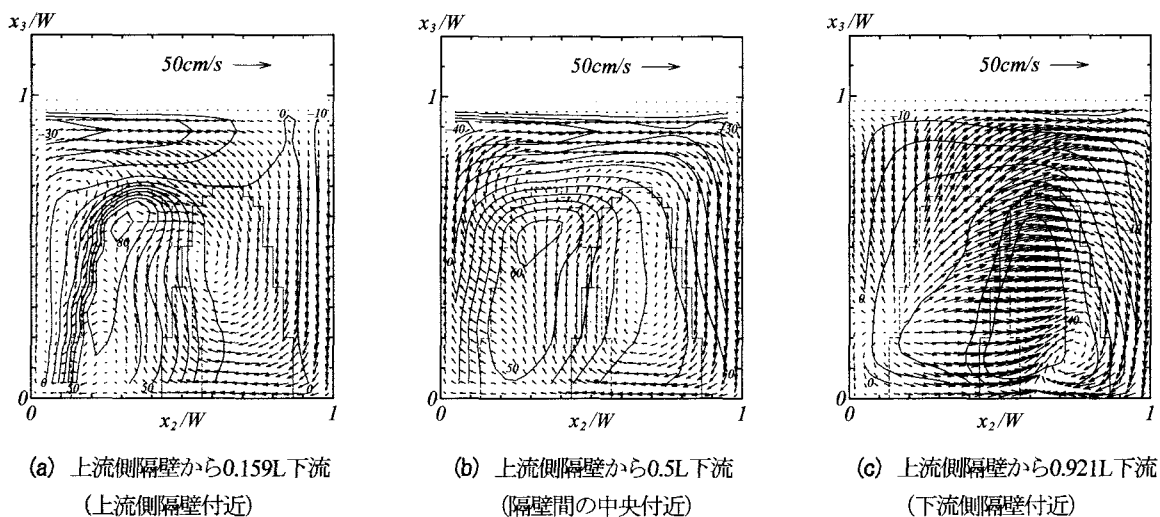


図-3 数値解析による主流速の等値線と2次流ベクトル

において、4基の隔壁間を対象として作成した。その概要を図-1に、諸元を表-1に示す。格子点の数は x_1 、 x_2 、 x_3 軸方向のそれぞれに対し169、31、41である。なお、格子幅は計算機的能力上の制限から定めた。そのため、図-1、表-1に示したように、実験模型と解析モデルの諸元には若干の相違が生じた。しかし、これらが大域的な流れの特性に与える影響は少ないと考えられる。

(3) 計算条件

基礎式の各変数はスタッガード配置し、基礎式は有限差分法によって離散化した。LESでは、上流化によって導入される数値粘性が実質レイノルズ数を低下させることを防ぐため、N-S方程式の対流項の離散化には中心差分が望ましいとされている⁹⁾。しかし、現況の鼻ぐり井手を対象とした前報⁶⁾と同様に、時間差分スキームとして2次精度Adams-Bashforth法、空間差分スキームとして2次精度中心差分、但し、N-S方程式の対流項に対しての

み4次精度中心差分を適用すると、計算は発散した。

その原因として、流れの急変部等で十分な数の格子点を設定できなかったことが考えられる。しかし、格子点数の増加は計算機的能力上困難である。そのため、流れの急変部で局所的に上流化が行われるTVDスキームの一つであるTVD-MUSCL法¹⁰⁾をN-S方程式の対流項の離散化に適用した。さらに、時間差分スキームとして4次精度Runge-Kutta法を導入した。これにより、安定した解析が可能となった。なお、得られた結果では、平均流においても、流下方向の格子点間の主流速差は最大で約17cm/sに達した。中心差分を適用した際には、このような箇所でも格子点の数が不足したと推察される。

圧力場と連続式のカップリング手法には、HSMAC法¹¹⁾を用いた。HSMAC法では、CFL条件や圧力収束状況等に応じて計算時間刻みを制御する。本研究における時間刻みは、後述する流況安定後の180秒間の平均をとると0.00529秒であった。

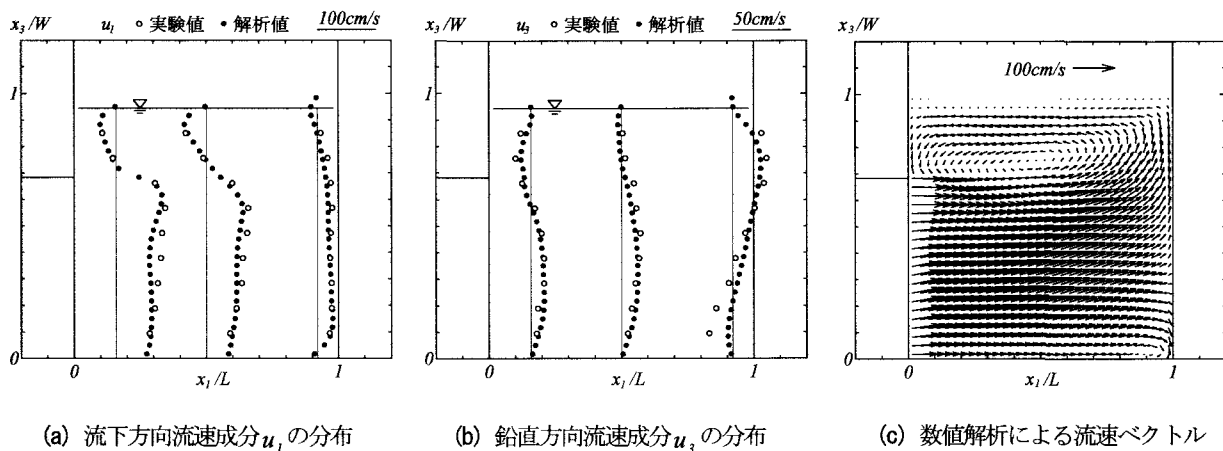


図-4 右岸水路壁から0.333W離れた縦断面における平均流況（下流側：右，流速正：右）

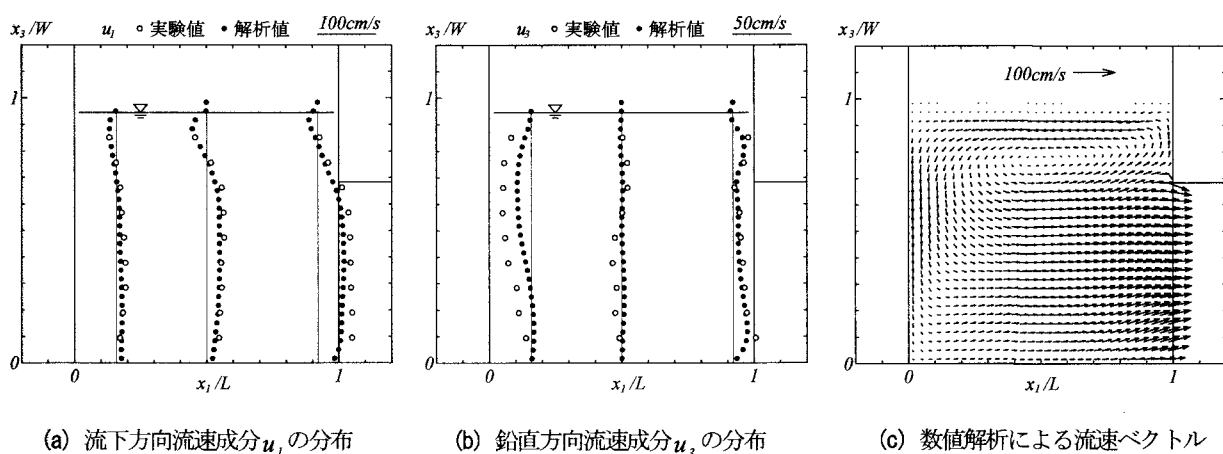


図-5 右岸水路壁から0.667W離れた縦断面における平均流況（下流側：右，流速正：右）

自由水面の変動は、再現精度が高く解析例も多いVOF法（Volume of Fluid Method）¹²⁾により表現した。壁面境界条件には対数則⁹⁾を適用した。対数則適用の際の目安として、固体壁面とそれに最も近い流速定義点の距離は壁座標で30～200とされている⁹⁾。本研究では、平均流をもとにした同距離は238となるが、その適用に大きな問題はないと考えられる。

流入及び流出境界の流速は、計算開始時点でゼロとし、その後5秒間に一定速度で増加させ、それ以降は一定の流速分布を与えた。その値は、模型実験で得られた平均流速分布に対し、表-1の $Q=45.5\text{ l/s}$ を満足するように若干の修正を行ったものである。また、図-1の第1区間と第3区間は、第2区間に適切な境界条件を与えるための助走区間とし、第2区間を解析値の検証区間とした。

初期条件としては、流速は全てゼロとした。水深については、流況安定後の第2区間中央における水深の平均値が実験水深と一致するように試行錯誤して与えた。このとき、第1区間から第3区間まで全て同じ値とした。解析値の検証に用いる平均流データは、第2区間の流況が解析開始から60秒程度でほぼ安定したため、その後の180秒間から算出した。これは、180秒以上の平均値は十

分に一定と見なせたためである。

3. 解析結果および考察

(1) 横断面の平均流特性

横断面における主流速の等値線及び2次流ベクトルを図-2、3に示す。なお、実験値が計測された断面で比較を行うため、以下の解析値では、同断面上に線形内挿した値を用いる。また、実験値を記載する図には実験水深を併記する。

主流速の解析値では、下流側隔壁付近におけるオリフィスへの流れに見られるように、流下に伴う最速領域の減衰が実験値より大きい。しかし、実験値の分布傾向を良好に再現している。上流側隔壁のオリフィスからの流れは、上流側隔壁付近から隔壁間中央にかけては若干の拡散が見られる程度であるのに対し、それより下流側では急激に拡散し、分布位置も大きく変化する状況等が確認できる。

2次流の解析値についても、全体の流況を良好に再現している。流下に伴い、大きなせん断の中心位置が断

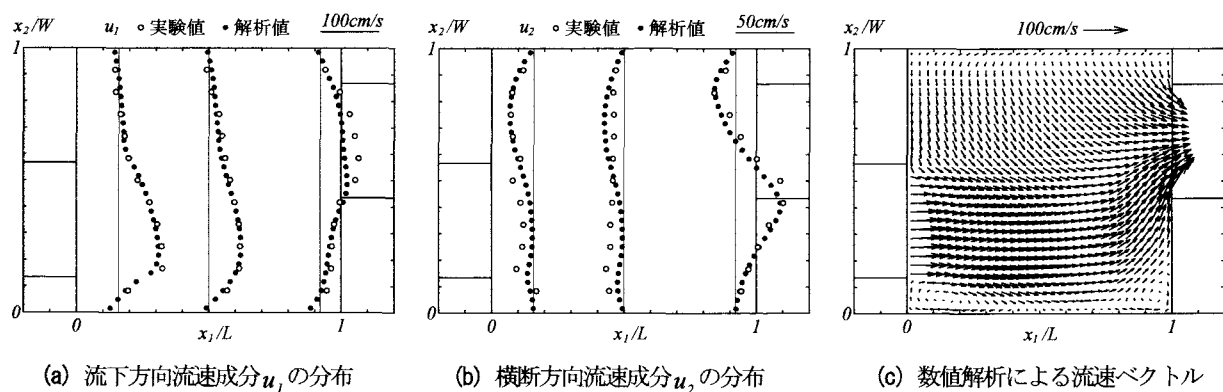


図-6 水路底から0.0945W離れた水平断面における平均流況（下流側：右，流速正：右）

面中央から左岸側へと変化する状況等が確認できる。また，実験値では明確に現れていない小さな渦の様子も捉えている。

(2) 縦断面の平均流特性

右岸水路壁から0.333W離れた縦断面における流下方向流速成分 u_1 及び鉛直方向流速成分 u_3 の分布と流速ベクトルを図-4に示す。本断面は，上流側隔壁のオリフィスの横断方向中心に位置する。

u_1 の解析値は，実験値の分布傾向を良好に再現している。 u_3 についても，下流側隔壁付近の水路底近傍で，隔壁との衝突によって生じる下降流が実験値より小さいが，全体的な分布傾向は良好に再現している。流速ベクトルを見ると，上流側隔壁のオリフィスからの流れが下流側隔壁と衝突し，水面付近で強い逆流を形成する状況が確認できる。

右岸水路壁から0.667W離れた縦断面における流下方向流速成分 u_1 及び鉛直方向流速成分 u_3 の分布と流速ベクトルを図-5に示す。本断面は，下流側隔壁のオリフィスの横断方向中心に位置する。

u_1 の解析値では，横断面（図-3(c)）で確認されたのと同様，流下に伴う最速領域の減衰が大きく，下流側隔壁のオリフィスへの流れが実験値より小さくなっている。 u_3 についても，上流側隔壁付近で，隔壁との衝突によって生じる下降流が実験値より小さい。しかし， u_1 ， u_3 ともに全体的な分布傾向を再現している。流速ベクトルを見ると，水面付近の逆流が反転して下流側隔壁のオリフィスへ流れ込む状況が確認できる。

(3) 水平断面の平均流特性

水路底から0.0945W離れた水平断面における流下方向流速成分 u_1 及び横断方向流速成分 u_2 の分布と流速ベクトルを図-6に示す。本断面は，模型実験³⁾で測定が行われた最深の水平断面である。

u_1 の解析値では，下流側隔壁のオリフィスへの流れが同様に実験値より小さい。 u_2 についても，上流側2断面におけるオリフィスの下流位置で，実験値に見られる右

岸水路壁へ向かう流れが十分に現れていない。しかし， u_1 ， u_2 ともに全体的な分布傾向を再現している。流速ベクトルを見ると，上流側隔壁のオリフィスからの流れは，初め下流方向へほぼ直進するが， $x_1/W = 0.8$ 付近で急激に左岸方向へ向きを変える状況が確認できる。

(4) 瞬間流況

図-7に，右岸水路壁から0.333W離れた縦断面における瞬間流速ベクトルの解析値の一例を示す。下流側隔壁と衝突した流れが上昇して水面付近を逆流し，上流側隔壁のオリフィスからの流れと合流しながら再度下流側隔壁と衝突する様子が確認できる。このような現象は，詳細な状況は毎回異なるものの，1.5秒前後の周期で繰り返された。また，図-4(c)の平均流況と比較すると，瞬間流況は非定常性が強く，その乱れも強いことがわかる。

4. 結論

左右交互にオリフィスが開いた連続隔壁を通過する開水路流れに対し，N-S方程式の対流項の離散化にTVDスキームを適用したLESによる数値解析を行い，模型実験結果との比較検討を行った。以下に，得られた主な結果を示す。

- (1) 平均流については，実験値と比較して，流下に伴う主流最速領域の減衰が大きく，隔壁及び水路底の近傍で流れの急激な変化が小さい場合も見られたが，全体の流況を良好に再現できた。また，実験値では明確でない詳細な流れの構造を明らかにした。
- (2) 模型実験では測定が困難な瞬間流況を捉えた。これにより，流れが下流側隔壁と衝突する様子，水面付近を逆流した流れが上流側隔壁のオリフィスからの流れと合流する様子等が確認された。
- (3) (1)で述べた相違の原因として，①測定誤差，②模型実験では測定時間が短く平均値を捉えられていない，③TVDスキームによる数値粘性の過剰な作用等が考えられる。

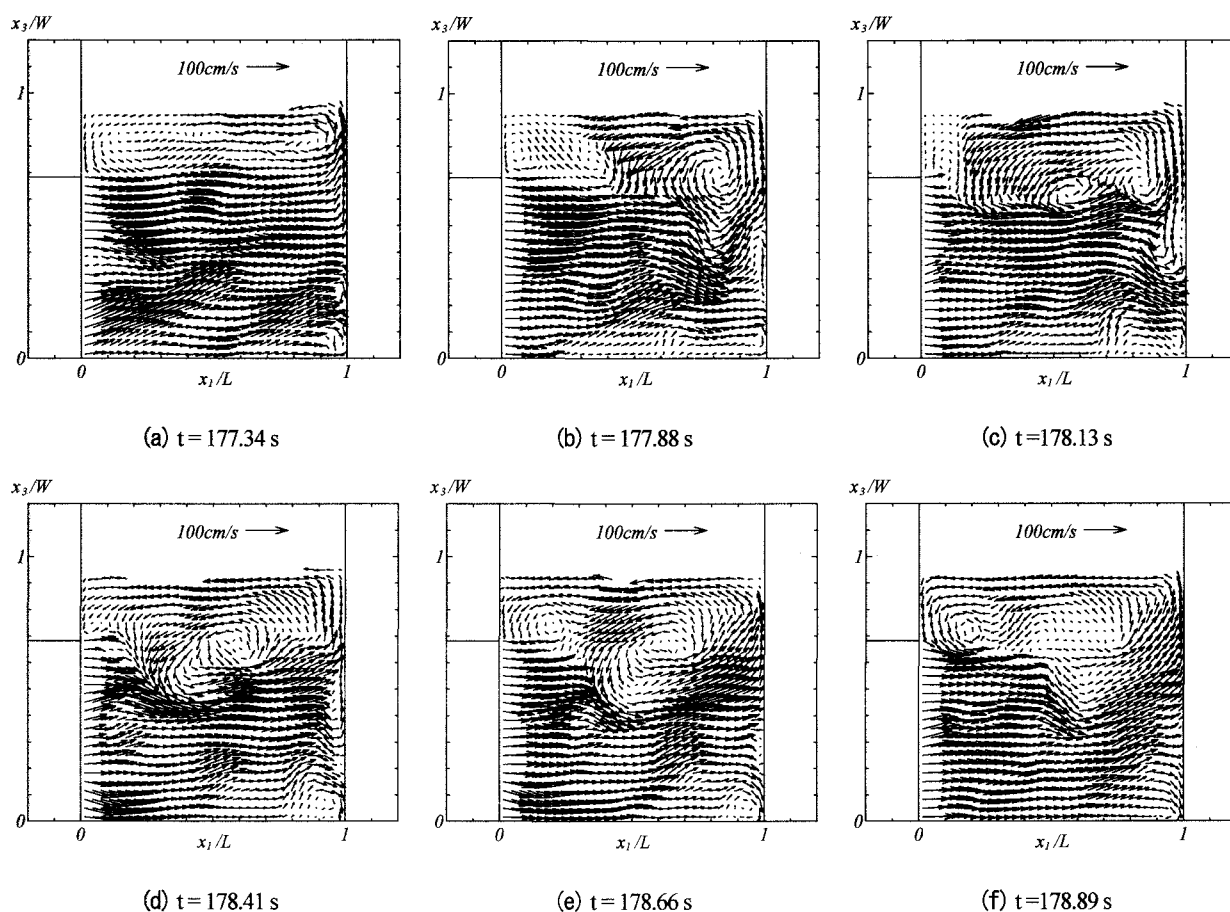


図-7 右岸水路壁から0.333W離れた縦断面における瞬間流況（下流側：右）

- (4) TVDスキームの導入により、流れの急変部等で十分な数の格子点を設定できなくとも、安定した解析が可能となった。TVDスキームを用いたLESは、格子点数の不足を改善できず計算が不安定となる場合の有効な解析手法と考えられる。
- (5) 今後の課題として、乱流統計量の再現性について検証する必要がある。また、本研究で解明した流れの三次元構造が土砂の輸送及び堆積に及ぼす影響について、今後の研究が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 建設省熊本工事事務所：加藤清正の川づくり・町づくり，1995。
- 2) 大本照憲：加藤清正の遺構「鼻繰り井手」の流水制御，水工学論文集，第42巻，pp.283-288，1998。
- 3) 高木強治，小林宏康，浪平篤：遺構「鼻繰り井手」の水理特性に関する実験的研究，農業土木学会論文集，第226号，pp.77-88，2003。
- 4) 合志芳太郎：改訂合志川芥，1932。
- 5) 鹿子木量平：勝国治水遺，江戸末期。
- 6) 浪平篤，高木強治，小林宏康：鼻繰り井手における隔壁間流れの数値解析，水工学論文集，第47巻，pp.505-510，2003。
- 7) 堀内潔：乱流のラージ・エディ・シミュレーションについて，天気，Vol38，No11，pp.3-17，1991。
- 8) 瀬津家久，山本義暢：開水路キャビティ流れの乱流構造に関する研究，土木学会論文集，No.614/II-46，pp.51-63，1999。
- 9) 梶島岳夫：乱流の数値シミュレーション，養賢堂，1999。
- 10) 藤井孝蔵：流体力学の数値計算法，東京大学出版会，1994。
- 11) C. W. Hirt, J. L. Cook : Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain , Journal of computational physics, Vol10, pp.324-340, 1972.
- 12) C. W. Hirt, B. D. Nichols : Volume of fluid (VOF) method for the Dynamics of free boundaries, Journal of computational physics, Vol29, pp.201-225, 1981.

(2003. 9. 30受付)