

鼻ぐり井手における隔壁間流れの数値解析

ANALYSIS OF FLOW THROUGH CONSTRICTIONS IN THE HANAGURI 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. In this study, a numerical analysis of the flow through the channel constrictions was carried out by means of a large eddy simulation (LES), and the volume of fluid (VOF) method was used to deal with the variation in free surface area. The results were in good agreement with experimental measurements; we found LES to be an effective technique for analyzing flow through constrictions such as those in the Hanaguri channel.

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

1. はじめに

加藤清正は、豊臣秀吉から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、緑川および球磨川の4河川に対して創意工夫に富んだ数多くの治水・利水事業を精力的に展開したことはよく知られている^{1) 2)}。その中の一つに、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、掘削の際、下部に半円状のオリフィスをもつ隔壁を水路内に連続して複数残すようにして造られている。このような隔壁の影響により水路内に渦巻く水流を発生させ、この地方に多い火山灰(ヨナ)が水路内に堆積するのを防いだと言われている。

大本²⁾は模型実験を行い、鼻ぐり井手における隔壁間流れの特性として、下層では壁面噴流、上層では下層に対し逆流を形成することを明らかにした。そして、二次元壁面噴流の理論に基づき土砂輸送能力を推定している。しかし、このような複雑な形状の構造物周辺では流れに大きな乱れが生じるため、測定上の問題から模型実験のみによって流れの構造に関する詳細なデータを入手することは困難な場合が多い。このような弱点を克服する手段として、近年、数値解析が有力視されている。

乱流解析手法の一つであるLES (Large Eddy

Simulation) は、非等方性を有する流れの3次元・非定常解析が可能であるため、近年の計算機の発達とともに、その適用が増えつつある。例えば、複断面を有する開水路流れの2次流(例えば、Thomas et al.³⁾)、底部に凹部を有する開水路流れ(藤田⁴⁾、瀬津⁵⁾)、側壁に凹部を有する開水路流れ(瀬津⁶⁾)等に対しては精度の高い再現結果が得られており、現象の解明に大きく貢献している。しかし、LESでは自由水面の変動を取り扱わない場合が多く、鼻ぐり井手のような複雑な形状の構造物周辺の流れについてはまだ解析例がない。

そこで本研究では、鼻ぐり井手における隔壁間流れに対しLESによる数値解析を行う。自由水面の変動に対しては、再現の精度が高く解析例も多いVOF法 (Volume of Fluid Method)⁷⁾を適用する。そして平均流特性と乱れ特性に関する再現性を模型実験結果との比較検討から評価し、さらに流れの構造を明らかにする。

2. 解析方法

(1) LESにおける基礎式

LESのための空間粗視化した連続式とNavier-Stokes方程式は、以下のように表記される⁸⁾。

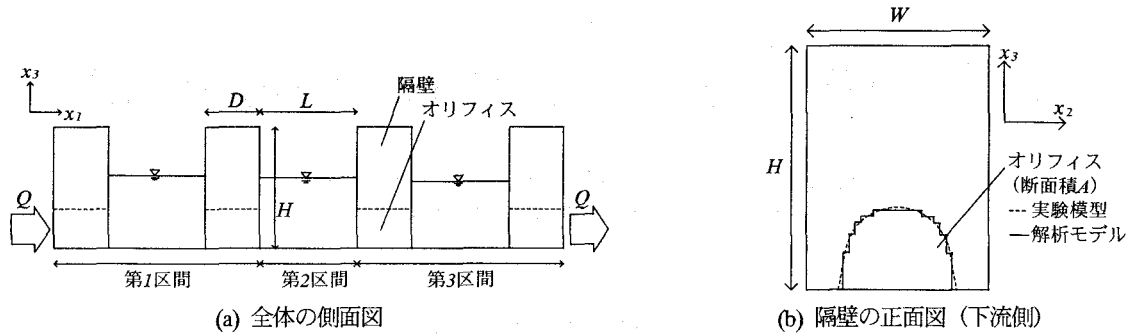


図-1 解析モデルの概要

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

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

ここで、 $\bar{}$ は空間平均を表し、 t は時間、 x_i は流下方向座標、 x_2 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、 τ_{ij} はSGS応力成分、 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。 τ_{ij} は、以下のように表記される。

$$\tau_{ij} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ここで、 ν_t は渦動粘性係数である。 ν_t の表現方法に対していくつかのLESモデルが提案されているが、本研究では1方程式モデル⁹⁾を採用する。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。

$$\nu_t = C_v \Delta K^{1/2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right\} \\ & + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij} \right\} \\ & - C_\epsilon \frac{K^{3/2}}{\Delta} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 Δ は粗視化を行う際のフィルター幅であり、1方程式モデルでは 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。

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \quad (6)$$

また、式(4)、(5)における係数としては、禰津ら⁹⁾と同様に閉管路に対する推奨値である $C_v = 0.05$ 、 $C_\epsilon = 1.0$ 、

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	48
h	水路下流端の堰高	cm	30

$\sigma_k = 0.5$ を用いた。

(2) 解析モデル

数値解析との比較検討のため、まず模型実験を行った。用いた水路は長さ40m、幅60cmの可変勾配水路であり、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基設置した。その諸元は表-1に示す通りであり、現状に対して1/5の縮尺としている。なお、水路勾配はゼロとした。そして上流から5基目と6基目の隔壁間を測定区間とし、3次元電磁流速計を用いて流速分布をサンプリング時間60秒で測定した。

解析モデルは、差分格子の大きさを2cmで一定とした解析空間に、模型実験を模擬して作成した。その概要を図-1に、諸元を表-1に示す。解析モデルは4基の隔壁間を対象とし、差分格子数は x_1 、 x_2 、 x_3 軸方向のそれぞれに対し168、30、40である。そして、上流から2基目と3基目の隔壁間を第2区間、それより上流側を第1区間、下流側を第3区間とする。なお、差分格子の大きさと解析モデルにおける隔壁の数については、計算機的能力上の制限から定めている。そのため、図-1、表-1からわかるように実験模型と解析モデルの諸元の間で若干の相違が生じたが、流れの特性に与える影響は少ないと考えられる。また、このような大きさの差分格子は、LESによる解析としては粗いものである。しかし、LESの乱流モデルの一つであるSmagorinskyモデルを大格子での解析に適用しても妥当な結果が得られることが報告されており（例えば、正村ら¹⁰⁾）、本研究においてもある程度の精度で流況を再現できると考えられる。

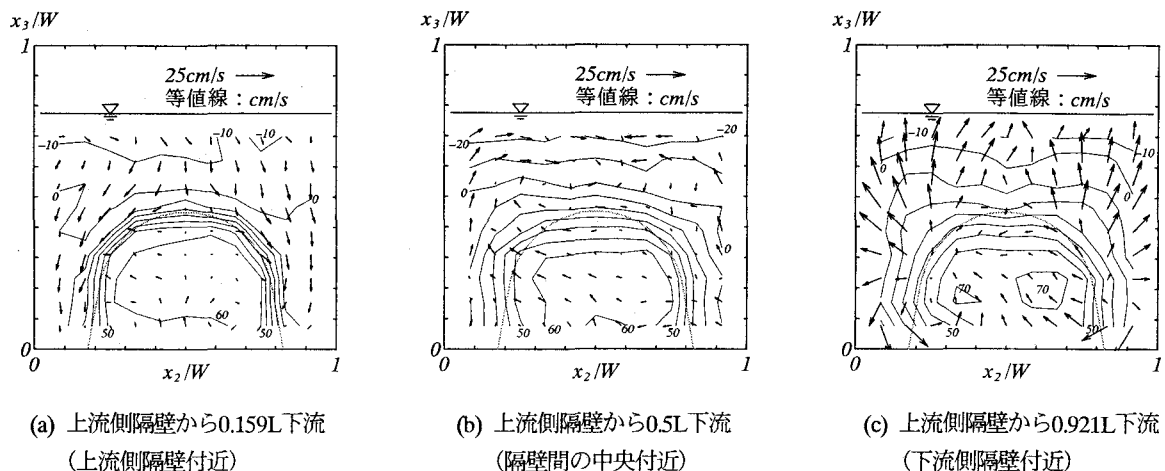


図3 模型実験による主流速の等値線と2次流ベクトル

(3) 計算条件

基礎式の離散化手法には有限差分法を用い、各変数はデカルト座標系スタッガード格子によって配置した。時間差分スキームとしては2次精度Adams-Bashforth法、空間差分スキームとしては2次精度中心差分を用いた。ただし、Nervier-Stokes方程式の対流項に対してのみ4次精度中心差分を用いた。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法では圧力収束状況等に応じて計算時間刻みを制御するが、本研究では後述する流況安定後の140秒間の平均値は0.00543秒であった。また、壁面境界条件に対して対数則⁸⁾、自由水面に対してVOF法⁷⁾を適用した。

ここでVOF法とは、離散化した解析空間の各差分セルに含まれる流体を存在比率 F によって表現し、各差分セルにおける F 値の分布から自由水面の形状を推定する方法である。 F 値による各差分セルの類別は、以下のように定義されている。

$F = 0$: 気体セル

$0 < F < 1$: 水面セル

$F = 1$: 液体セル

各差分セル間の F 値の移動は、次の移流方程式に基づいて行われる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

上式の離散化には、ドナー・アクセプタ法⁷⁾を用いた。

流入・流出境界における流速に対しては、計算開始時点ではゼロとし、計算開始から5秒間に一定速度で増加させ、表-1の $Q = 48l/s$ を満足するように与えた。その際、模型実験で得られた平均流速分布を用いた。このように一定値である境界条件は現実的でないため、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見なし、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、流況が安定したときの第2区間の平均水深が、模型実験における測定区間の平均水深と一致するよう試行錯誤的に与えた。このとき、第1区間から第3区間まで全て同じ値とした。解析開始から60秒程度で第2区間の流況がほぼ安定したため、その後の140秒間から算出した平均値を解析値の検証に用いた。

3. 解析結果および考察

(1) 平均流特性

図-3と図-4はそれぞれ、模型実験の測定区間および数値解析の第2区間の横断面における主流速の等値線と2次流ベクトルを示したものである。以下、実験結果と比較する際には、解析結果では同一断面上に線形内挿した値を用いている。

解析値では主流速変化の勾配が実験値より小さくなる傾向にあるが、流下に伴う主流速の拡散、上流側隔壁付近における下降流、下流側隔壁付近における上昇流が再現されている。さらに、模型実験では明確に現れていない流下に伴う2次流の変化を捉えている。この2次流の変化は、現況に対し1/10の縮尺で行われた大本の実験²⁾では確認されていない。

図4(c)に示す下流側隔壁付近では、流れがスムーズにオリフィスへ吸い込まれていないことがわかる。これは解析モデルにおいて図-1(b)に示すような凹凸のあるオリフィス形状としたためと考えられる。また、同断面中央のオリフィス天端より上位部においては、実験値では図3(c)に示すように上昇流となるのに対し、解析値では下降流となっている。しかし、これより0.0325L下流側の断面では実験値により近い流況を呈しており、解析値では上昇流の発生位置が実験値より下流側にずれていると考えられる。この原因として、図-1(b)、表-1にあるよう

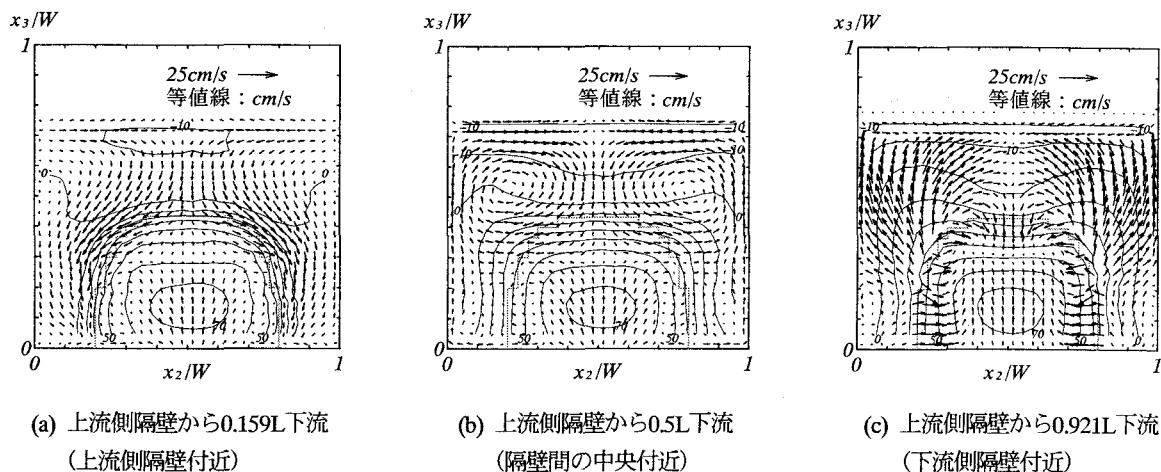


図4 数値解析による主流速の等値線と2次流ベクトル

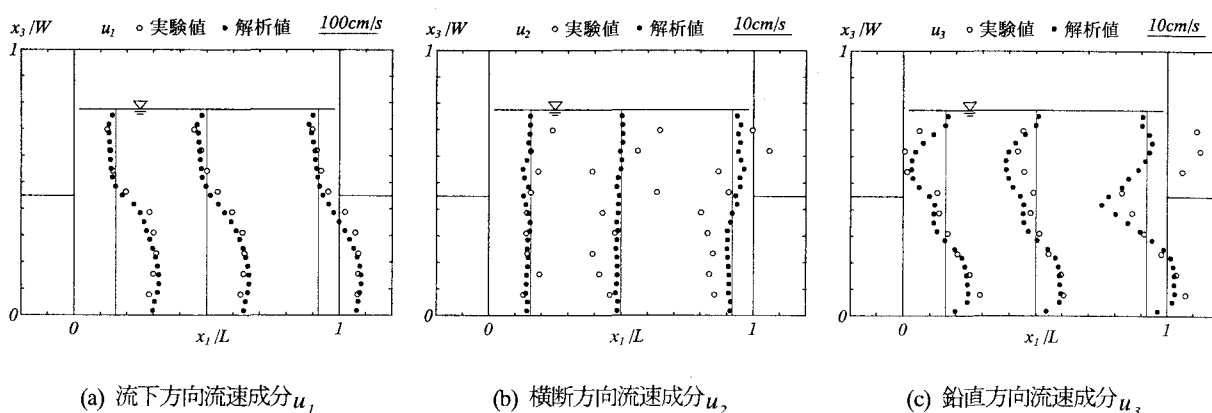


図-5 中央縦断面における流速成分の実験値と解析値の比較 (下流側: 右, 流速正: 右)

なモデル化における誤差, 壁面付近で差分格子の解像度が不足していること, 壁面境界に対して対数則を適用したが, 本研究で行った模型実験を対象とする場合, 用いたパラメータの値が不適切であったこと等が考えられる。

図-5は, 模型実験の測定区間および数値解析の第2区間における中央縦断面の流下方向流速成分 u_1 , 横断方向流速成分 u_2 , 鉛直方向流速成分 u_3 の鉛直分布を比較したものである。

u_1 については, 実験値における流下に伴う拡散や, オリフィス天端より上位部における逆流が, 解析値では良好に再現されている。

u_2 については, 解析値ではどの深さにおいてもほとんどゼロに近い値となっているのに対し, 実験値では不規則なばらつきが生じている。この原因として, 模型実験における測定誤差や, 測定時間が短かったために横断方向の流速成分については平均値を捉えられていないこと等が考えられる。

u_3 については, 実験値における上流側隔壁付近と隔壁間中央付近のオリフィス天端より下位部における上昇流と, オリフィス天端より上位部における下降流, さら

に, 下流側隔壁付近のオリフィス天端より下位部における上昇流と, オリフィス天端付近における下降流が, 解析値では良好に再現されている。しかし図-3と図-4の比較でも見られたように, 実験値における下流側隔壁付近のオリフィス天端より上位部における上昇流は, 解析値ではほとんど発生していない。

(2) 乱流統計量

図-6と図-7はそれぞれ, 模型実験の測定区間および数値解析の第2区間の隔壁間中央の横断面における横断方向流速成分の乱れ強度 u'_2 , 鉛直方向流速成分の乱れ強度 u'_3 , レイノルズ応力 $-\overline{u'_2 u'_3}$ の等値線を示したものである。 u'_2 , u'_3 の解析値ではオリフィス天端付近において実験値には見られないピークが生じたが, それ以外の点については, u'_2 , u'_3 , $-\overline{u'_2 u'_3}$ とともに解析値は実験値の大まかな分布形状を捉えている。

図-8は, 模型実験の測定区間および数値解析の第2区間における中央縦断面の流下方向流速成分の乱れ強度 u'_1 , 鉛直方向流速成分の乱れ強度 u'_3 , レイノルズ応力 $-\overline{u'_1 u'_3}$ の鉛直分布を比較したものである。 u'_1 と u'_3 につ

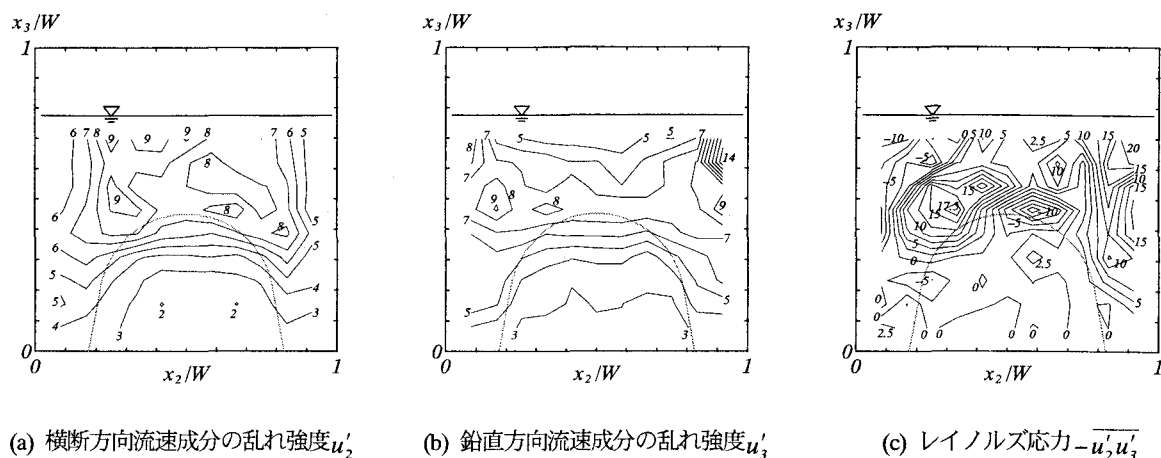


図-6 模型実験による上流側隔壁から0.5L下流（隔壁間の中央付近）における乱流統計量の等値線

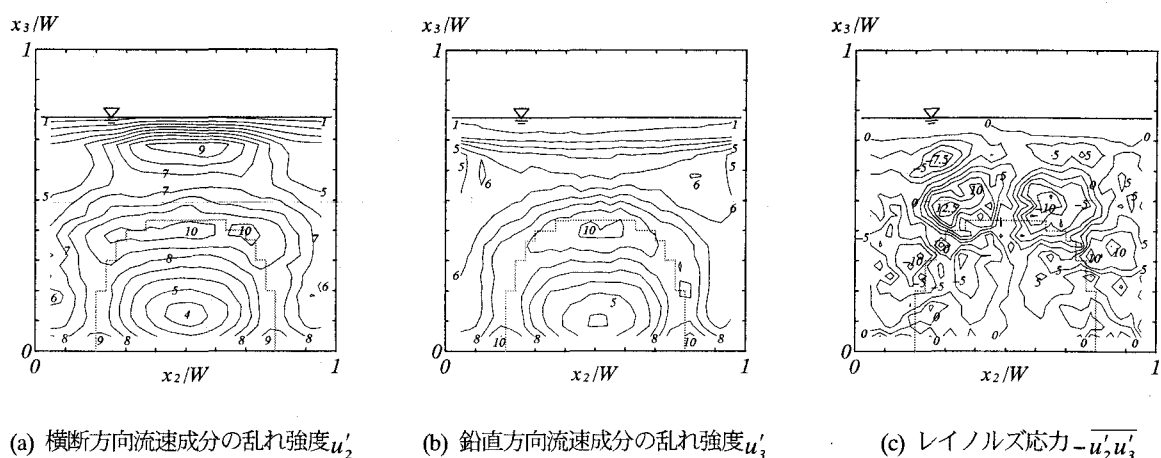


図-7 数値解析による上流側隔壁から0.5L下流（隔壁間の中央付近）における乱流統計量の等値線

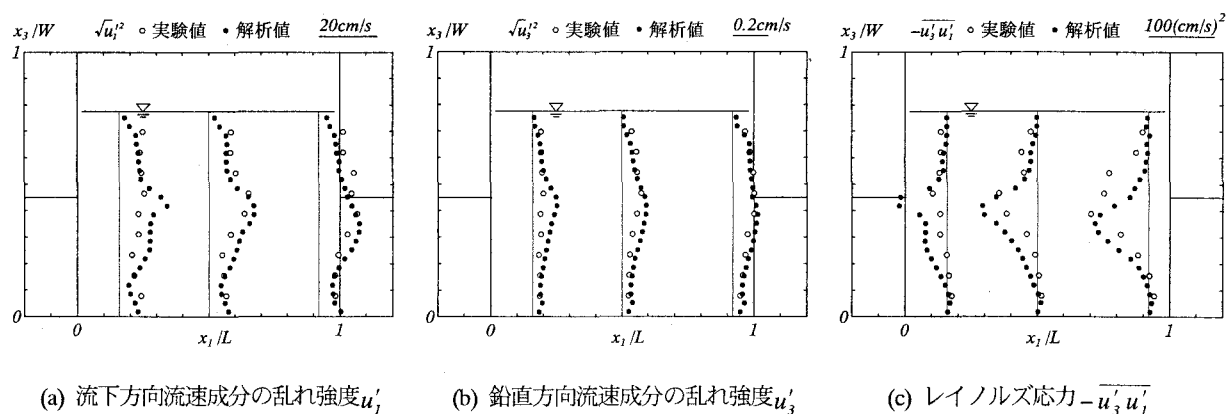


図-8 中央縦断面における乱流統計量の実験値と解析値の比較（下流側：右，乱流統計量正：右）

いては、上流側隔壁付近のオリフィス天端付近で過大評価となる以外、解析値は実験値の分布形状を良好に再現している。 $-\overline{u'_3 u'_1}$ については、上流側隔壁付近のオリフィス天端付近で過大評価、下流側隔壁付近のオリフィス天端より上位部で過小評価となっているが、解析値は実験値の全体的な分布形状を捉えている。

乱流統計量の解析値では、オリフィス天端高さ付近において過大評価の傾向が確認された。この原因として、順方向流れと逆方向流れの境界となるオリフィスの輪郭付近において、差分格子の解像度が不足していることが考えられる。また、本研究では電磁流速計を用いたため、実験に基づく乱流統計量の精度は高いとはいえないが、

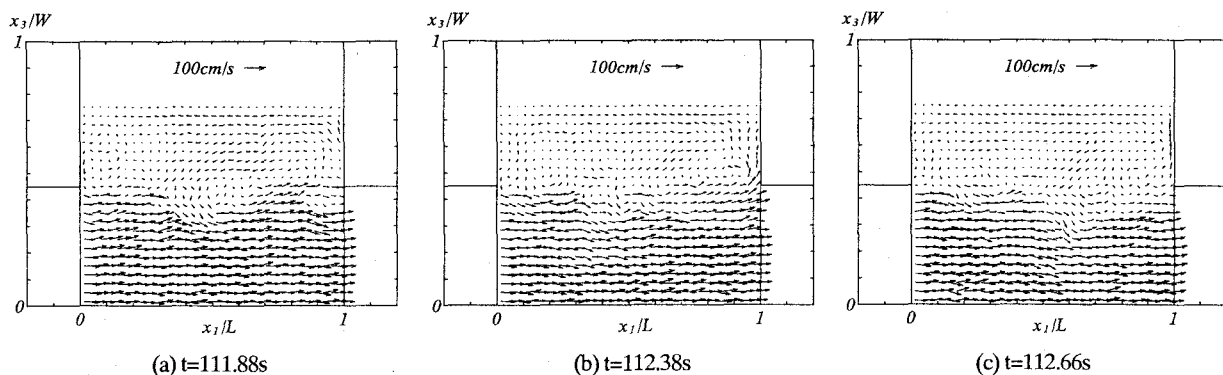


図-9 右岸壁から0.467Wの位置にある縦断面における瞬間流速ベクトルの時間変化 (図は右が下流側)

解析値と比較した相対的な乱流統計量の分布特性は良好であった。

(3) 瞬間流況

図-9に、模型実験では測定方法の問題から捉えられていない瞬間流速ベクトルの解析値を示す。中央縦断面では、順方向流れと逆方向流れの境界であるオリフィス天端高さ付近において渦が発生し、流下方向に輸送されて下流側隔壁と衝突し、消滅する様子が確認された。また、このときの渦の発生と輸送に伴い、差分格子内で生じる程度の水位変動が確認された。ただし、模型実験では水位変動を計測しておらず、その再現性は不明である。

4. 結論

鼻ぐり井手における隔壁間流れに対し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、オリフィス天端より上位部における上昇流に関し、流下方向における発生位置について若干の相違はあるが、その特性を良好に再現できた。また、実験値では明確に現れていない流下に伴う2次流の変化を捉えることができた。
- (2) 乱流統計量については、オリフィス天端付近においてピーク値の過大評価および実験値では見られないピークの発生があったが、全体的な分布特性を捉えることができた。
- (3) 模型実験では測定が容易でない瞬間流況を捉えることができた。これにより、オリフィス天端高さ付近で発生した渦が流下方向に輸送され、下流側隔壁と衝突する様子が確認された。
- (4) 上記(1), (2)で述べた相違の原因の一つとして、計算機の能力上の制限から粗い差分格子を用いたことが挙げられる。ただしそれを考慮しても、LESによる数値解析は、本研究で対象としたような流れにも有効であると考えられる。

- (5) 今後は、壁面近傍や順方向流れと逆方向流れの境界となるオリフィスの輪郭付近において、より解像度の高い差分格子を用いた解析を行う必要がある。

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，pp283-288，1998。
- 3) T. G. Thomas : Large eddy simulation of turbulent flow in an asymmetric compound open channel, Journal of hydraulics, Vol.33, pp27-41, 1995。
- 4) 藤田一郎，神田徹，門脇正夫，森田卓光：開水路凹部流れのPIVおよびLESによる乱流解析，土木学会論文集，No539/II-35, pp79-88, 1996。
- 5) 瀬津家久，山本義暢：開水路キャビティー流れの乱流構造に関する研究，土木学会論文集，No614/II-46, pp51-63, 1999。
- 6) 瀬津家久，鬼束幸樹，矢野勝士：側壁に凹部を有する開水路流れのLES解析，水工学論文集，第46巻，pp403-408, 2002。
- 7) C. W. Hirt, B. D. Nichols : Volume of fluid (VOF) method for the Dynamics of free boundaries, Journal of computational physics, Vol29, pp201-225, 1981。
- 8) 森西洋平：LESモデルによる乱流解析手法，水工学に関する夏期研修会講義集Aコース，ppA-2-1-A-2-29, 1992。
- 9) 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。
- 10) 正村憲史，藤間功司，後藤智明，飯田邦彦，重村利率：2次元・3次元ハイブリッドモデルを用いた津波の数値解析，土木学会論文集，No670/II-54, pp49-61, 2001。
- 11) C. W. Hirt, J. L. Cook : Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, Journal of computational physics, Vol10, pp324-340, 1972。

(2002. 9. 30受付)