

LESによるキャビティーせん断乱流構造 の数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION ON TURBULENT STRUCTURES IN CAVITY
FLOWS BY MEANS OF LARGE EDDY SIMULATION

榊津家久¹・山本義暢²・鬼束幸樹³

Iehisa NEZU, Yoshinobu YAMAMOTO and Kouki ONISTUKA

¹正会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学教室 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生員 京都大学大学院生 工学研究科環境地球工学専攻

³正会員 博(工) 京都大学大学院助手 環境地球工学教室

This paper describes the numerical simulation results of cavity in open-channel flows by means of Large Eddy Simulation(LES). The comparison, between numerical simulation and turbulence measurements conducted by making use of a two component fiber-optic laser Doppler anemometer (FLDA), was carried out in two cases. The results indicate that LES can reproduce the variations of mean velocities and turbulent statistics by trench length changes, and these variations may be relevant to the cycle of separated vortices and the position and size of the large circulating vortex.

Key Words : cavity flow, LES, FLDA, turbulence structure, mean velocity, separated vortices, coherent structures

1. はじめに

実河川においては、河床波、蛇行などの自然的な要因および堰、ゲート、トレンチなどの人工的な要因によって不連続な境界が形成される。その中でも近年トレンチは流送土砂制御の目的だけでなく、河川における環境維持の目的より多自然型河川工法の一つとして設置されている。また、トレンチに類似する流れ場を形成するワンドも、環境にやさしいという観点から非常に注目されている。このようにトレンチ・ワンドはこれからの「瀬・淵」を含めた水工設計に欠かせないものとなる。

一方、水理学的に見ても、開水路キャビティー流れは、剥離せん断層の発達、組織渦の発生・発達・崩壊、あるいは逆流域、死水域の存在といったような複雑な乱流場を形成し、非常に興味深い局所流となる。

Knisely & Rockwell¹⁾は、下流衝突端のあるキャビティー流れにおいてLDAを用いた乱流計測とともに水素気泡法による組織渦の可視化を行った。その結果、下流衝突端のない通常の段落ち流れと比較して乱れ強度が50%から80%低減することおよび、この現象は下流端からかなり上流側の領域でも起こること、また、キャビティー上流端から発生する剥離渦が下流端に衝突する位置は規則的に変化することを

指摘するとともに、流れの3次元性についても考察している。

藤田ら^{2), 3)}はトレンチのアスペクト比(L/H 、ここに L はトレンチの流下方向長さ、 H はトレンチ高さを示す)5~10と比較的大きい形状のトレンチにおいて、PIV(Particle Image Velocimetry)、LES(Large Eddy Simulation)によりせん断層内においては運動量と渦度に対し凍結乱流の仮定がほぼ成立するが、移流速度は平均流速の60%~80%程度であること、そしてキャビティー内部では底面に近づくにつれて流れの3次元性が強まることを明らかにした。

榊津ら⁴⁾はアスペクト比0.5~7の形状のトレンチにおいての水理条件一定の下では、あるアスペクト比の場合において乱れ強度、レイノルズ応力ともにピーク値をとり、この時トレンチ幅の増加に伴い減少していたストローハル数がジャンプを起こし、流体混合が活発となり、この後トレンチ幅の増加とともに再び減少を始めることを示し、キャビティー形状の違いにより独自の特性を持つ組織構造の存在を確認した。

以上のような非定常性、3次元性、非等方性を有するキャビティー流れを数値シミュレーションするには $k-\varepsilon$ モデルのような時間平均、等方性の仮定を必要とするモデルは不的確でありLESが最適である。しかし、開水路流におけるその予測精度について高精度な実験値との比較、検証はほとんど行われ

について高精度な実験値との比較、検証はほとんど行われていない。そこで、本研究においてはトレンチ幅の変化によって平均流速、乱流統計量が大きく異なる場合を対象にLESによる数値実験を行いファイバーレーザー流速計(FLDA)による実験結果と比較検討し、さらにその乱流構造・非定常特性を解明するものである。

2. 数値解析

(1) 基礎方程式

1方程式モデルのLESの基礎方程式は以下のよう表せる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \Omega_i - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{2}{3} K \right\} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = 2 \nu_T \bar{D}^2 - C_\varepsilon \frac{K^{2/3}}{\Delta} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right\} \tag{3}$$

$$\Omega_i = (g \sin \theta, -g \cos \theta, 0), \quad K = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'}, \quad \nu_T = C_\nu \Delta K^{1/2},$$

$$\tau_{ij} = -\nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad \Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3},$$

$$\bar{D} = \left(\overline{D_{ij} D_{ij}} \right)^{1/2} \text{ ただし, } D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right),$$

$C_\nu = 0.05, \sigma_k = 0.5, C_\varepsilon = 1.0$
 ここで u_i は i 方向の速度成分 ($i=1,2,3$), $x_1(x)$ は流下方向, $x_2(y)$ は流下垂直上向き方向, $x_3(z)$ は横断方向, $\bar{}$ は空間平均を施した値, $\overline{}$ は空間平均からのずれ, Δ はフィルター幅, p は圧力, ρ は密度, g は重力加速度, $\sin \theta$ は河床勾配, ν は動粘性係数をそれぞれ示し、繰返し添え字は縮約規約に従うものとする。

式(1)は連続式、式(2)は運動方程式、式(3)はsubgrid scaleの乱流エネルギー K の輸送方程式である。

(2) 数値解析手法

本研究では、差分スキームは時間に対して2次精度のAdams-Bashforth法、空間に対しては2次精度の中心差分を用いた。差分アルゴリズムとしてSMAC法を使用し、速度ポテンシャルの計算は共役残差法により解いた。メッシュ系はスタガードグリッドを適用し、境界条件は村上ら⁹⁾に従い流入、流出面において主流、横断方向に周期境界条件、壁面

においてはno-slip条件、水面においては対称条件を用いた。

(3) 計算条件

本研究におけるトレンチの形状及び座標系を図-1に示す。また各ケースの水理条件を表-1に示す。ここに Q は流量, h は水深, $Re = U_m R / \nu$ はレイノルズ数, U_m は断面平均流速, R はトレンチ上流部における径深, $Fr = U_m / \sqrt{gh}$ はフルード数である。また無次元時間 $T = R / U_m = 1$ は実時間で0.52秒である。格子分割は x, y, z 方向についてそれぞれV10は $56 \times 32 \times 20$, V30は $74 \times 32 \times 20$ とした。

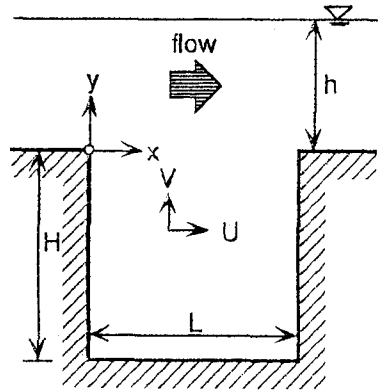


図-1 トレンチ形状と座標系

表-1 水理条件

CASE	$Q(l/s)$	$h(cm)$	$L(cm)$	L/H	Re	Fr
V10	2.5	6.6	6.6	1.0	4700	0.12
V30	2.5	6.6	19.8	3.0	4700	0.12

3. 解析結果

本研究における実験値と比較する平均諸量は、計算開始から15万ステップ経過後ほぼ流れが定常に達しているのを確認し、その後の3000ステップ（無次元時間で約57）のアンサンブル平均を取り乱流量等を計算した値である。なお、ここでの流下方向、流下垂直上向き方向についてそれぞれ時間平均流速を U, V 、レイノルズ応力を $-\overline{uv}$ 、乱流エネルギーを k とし初期断面の最大流速 U_{max0} で無次元化している。

(1) 時間平均流速分布特性

図-2, 3は平均流速のベクトル図である。V10, V30ともキャビティー内部の組織渦の存在が確認できるがV10のほうはトレンチ内部がほとんど死水域になっているのに対しV30のケースではトレンチ界面において混合層の広がりを見せられている。また図-4, 5, 6, 7は流下方向への流速分布の変化を示す図であり、図-8, 9はV30における平均主流速のコンター図である。これらよりFLDAにおいて特徴的な、V30はV10よりも逆領域がより下流に現れる点、

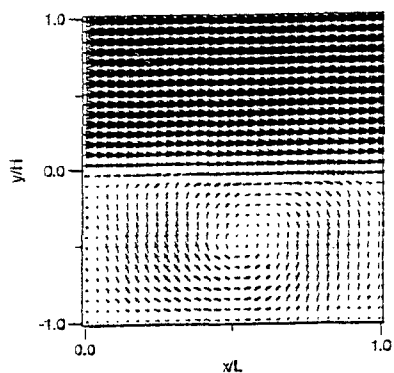


図-2 平均流速のベクトル (V10) 計算結果

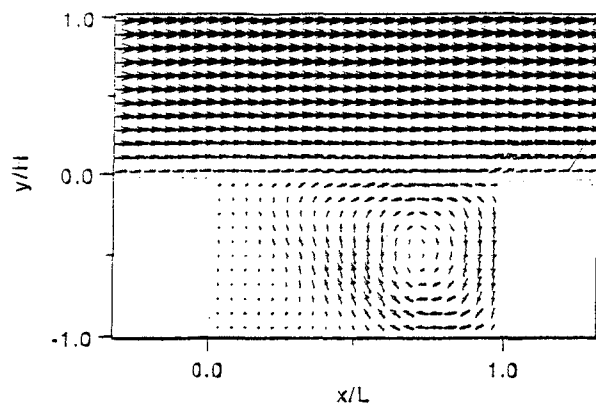


図-3 平均流速のベクトル (V30) 計算結果

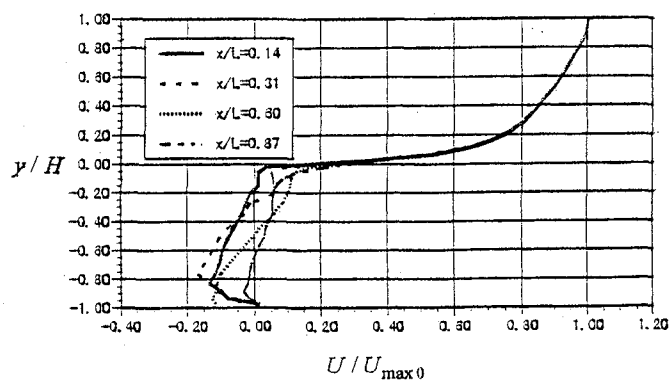


図-4 平均流速の流下方向変化(V10) 計算結果

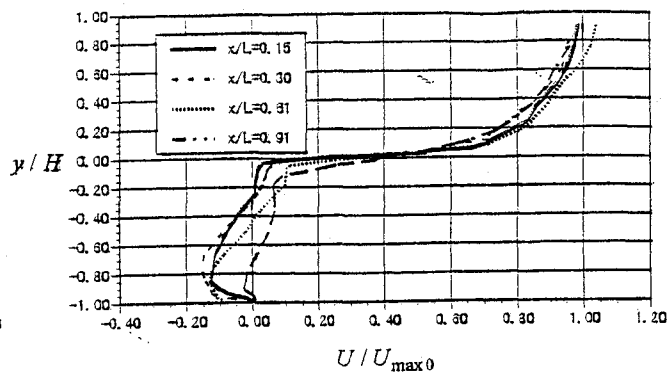


図-5 平均流速の流下方向変化(V10) 実験結果

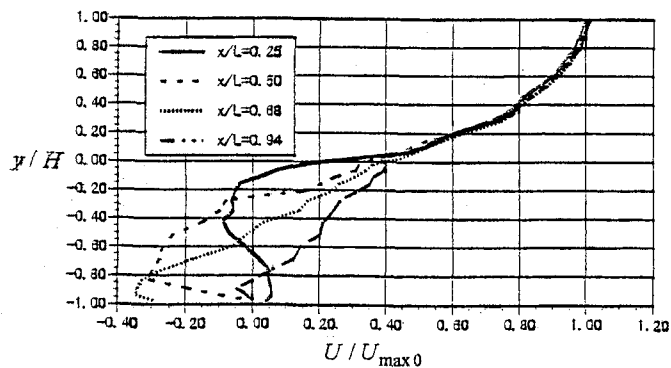


図-6 平均流速の流下方向変化(V30) 計算結果

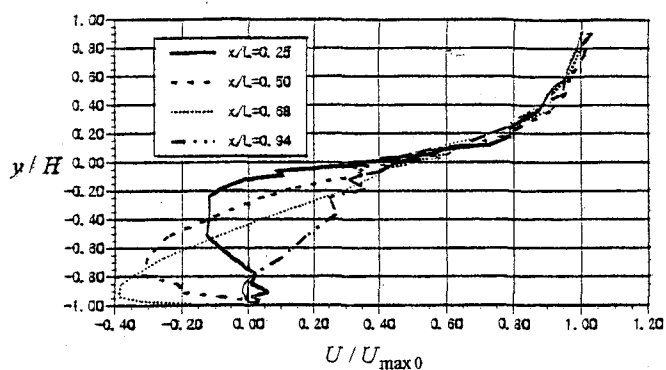


図-7 平均流速の流下方向変化(V30) 実験結果

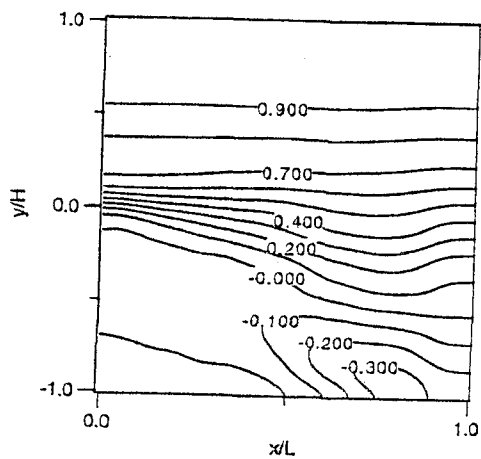


図-8 平均主流速のコンター (V30) 計算結果

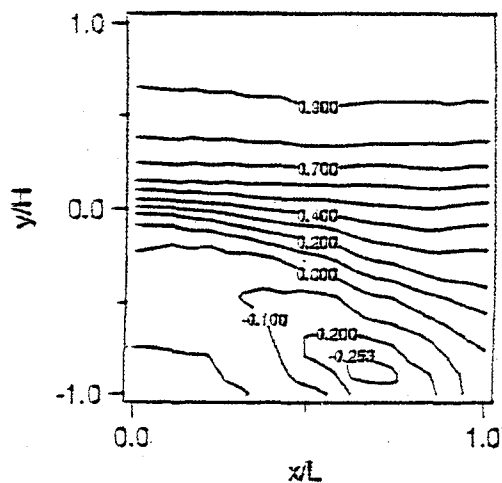


図-9 平均主流速のコンター (V30) 実験結果

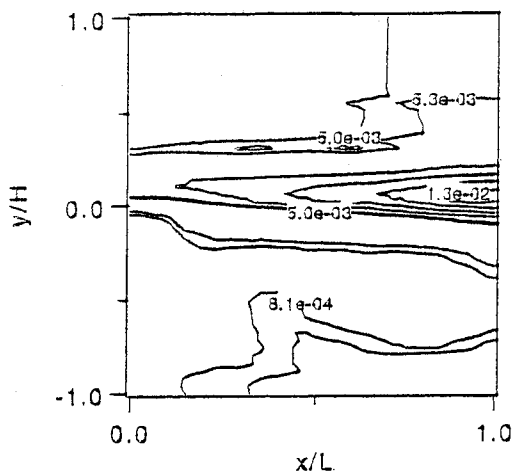


図-10 乱れエネルギーのコンター (V10) 計算結果

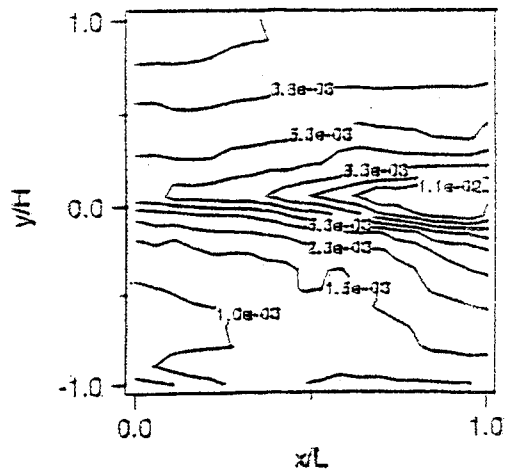


図-11 乱れエネルギーのコンター (V10) 実験結果

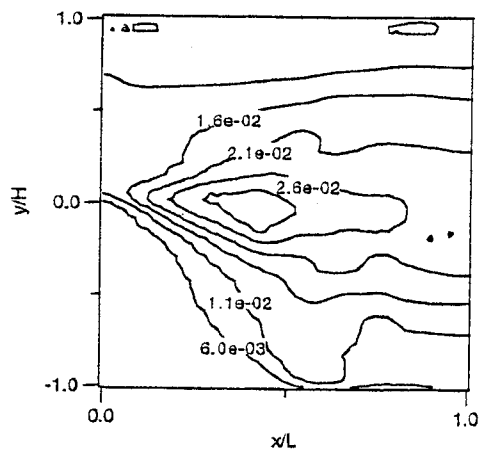


図-12 乱れエネルギーのコンター (V30) 計算結果

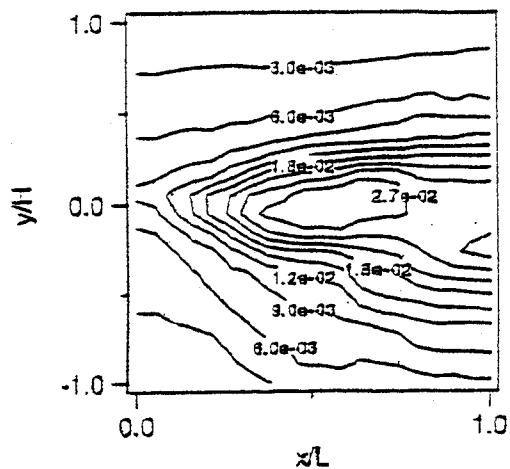


図-13 乱れエネルギーのコンター (V30) 実験結果

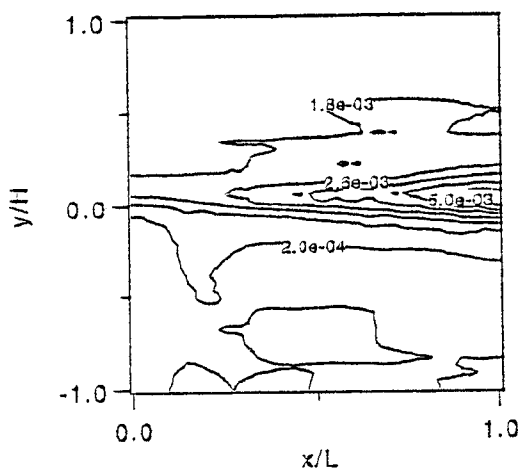


図-14 レイノルズ応力のコンター (V10) 計算結果

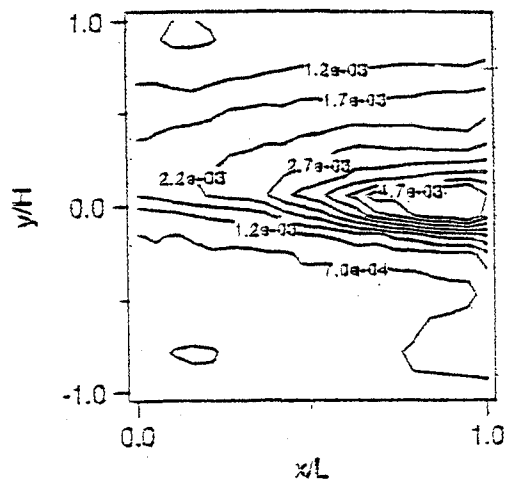


図-15 レイノルズ応力のコンター (V10) 実験結果

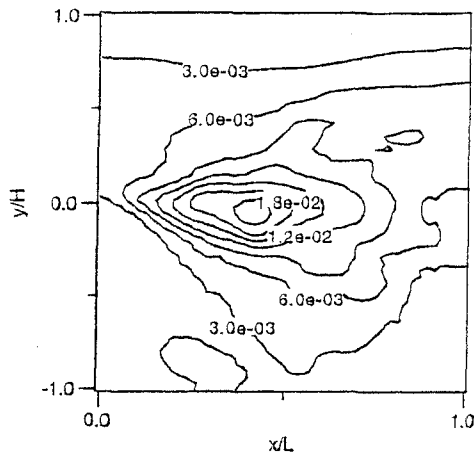


図-16 レイノルズ応力のコンター (V30) 計算結果

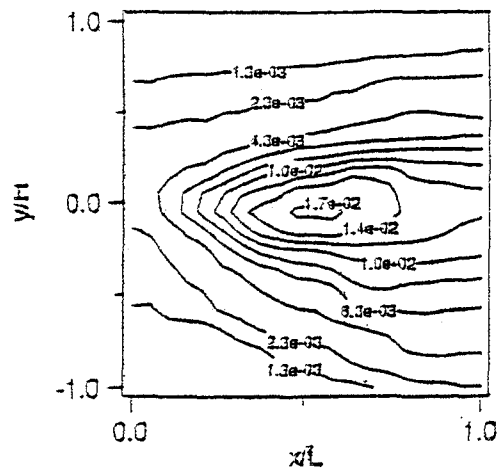


図-17 レイノルズ応力のコンター (V30) 実験結果

またキャビティー内部においてはV30のほうが逆流が強い点がLESにより傾向、値とも再現できているが、V30のコンター図においてLESはFLDAに比べ上流側のトレンチ壁面近くで分布形が少しずれている。

(2) 乱れ統計量の分布特性

図-10～17は乱れエネルギー、レイノルズ応力のコンター図である。V10についてはレイノルズ応力、乱れ強度ともにトレンチ界面の下流端付近でピーク値をとる点や流体混合がトレンチ界面近傍のみで行われている傾向が定性的・定量的に再現できている。V30においては、トレンチ上流端付近でLESはやや乱れの広がりを抑制されている点や、また上流付近の水面近傍でも不連続な部分が見られる。

これらについては、境界条件や格子幅などの諸条件をもう一度検討してみる必要があると思われるが、乱れエネルギーがトレンチの界面中央と下流端付近で2つのピーク値をとる点や界面を中心として流下方向に扇状に広がって行く点など値、傾向がよく表現できている。トレンチ形状の違いによる乱流構造の違いを良好に計算できている。レイノルズ応力についても同様の傾向が見られる。

(3) 組織渦構造

a) 組織渦の発生・発達機構

トレンチのアスペクト比の変化により乱れ強度、レイノルズ応力がピーク値をとるV30における流れはキャビティー上流端で剥離した流れがロールアップするまでの領域である線形領域と、ロールアップを起こした後の組織的な渦構造が発達していく非線形領域に分けられる。その組織構造は、剥離渦の発生周期と循環渦の大きさ・中心位置により、ある過程を何回も重複したり、さらには、省略しながら反復しているが、剥離渦と下流端付近の大きな循環渦との関係により以下のようなパターンを繰り返している。

(1) トレンチ下流部に存在する大きな循環渦(図-

18)に無次元時間で3～4間隔で発生する剥離渦がトレンチ中央からやや上流側で衝突し(図-19)、この剥離渦を連行し大きな循環渦が下流端に移動し一部はトレンチ外部に放出され、一部はトレンチ内部に引き込まれる(図-20)。

(2) またトレンチ下流側へ押しやられた循環渦に次の剥離渦が流下し二つの渦がトレンチ中央やや下流側で衝突し(図-21)再び大きな循環渦を形成する。

(3) さらにこの循環渦は、トレンチ界面付近の流体を巻き込み(図-22)さらに大きな循環渦を形成し再び(1)に戻る。

このような過程はKnisely & Rockwell¹⁾の指摘する剥離渦の下流端に衝突する位置は規則的に変化することと関連があると思われる。この様に明瞭に渦の発生・発達をとらえた研究はほとんどないため、今後詳細に調べる必要がある。

b) 組織渦の乱流統計量に及ぼす影響

V30のケースにおいては乱れ強度がトレンチ中央部と下流端において2つのピーク値をとるが、これは上記の過程により剥離渦と循環渦が衝突する中心部とその連行により下流端に衝突する部分に相当すると思われる。

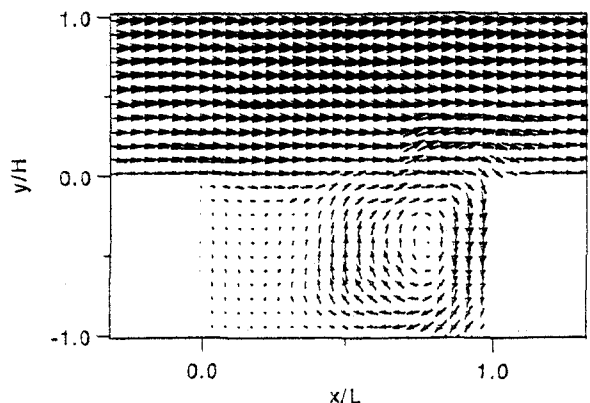


図-18 循環渦

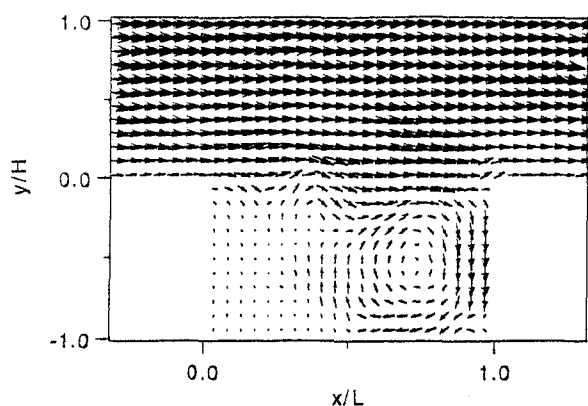


図-19 剥離渦と循環渦の衝突 1

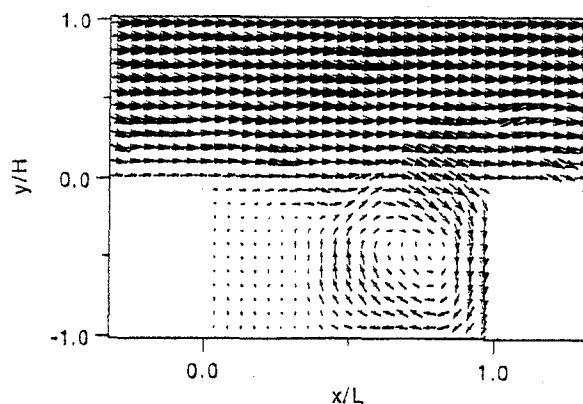


図-20 循環渦のトレンチ下流端への衝突

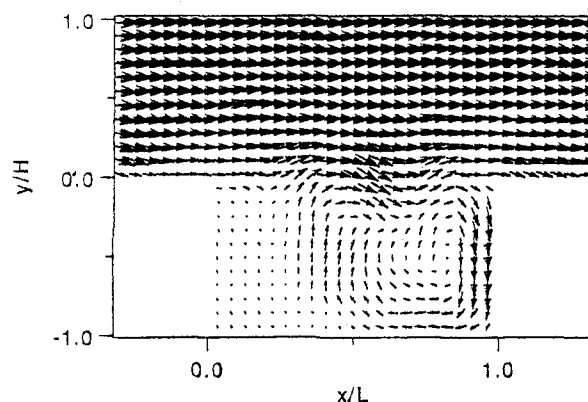


図-21 剥離渦と循環渦の衝突 2

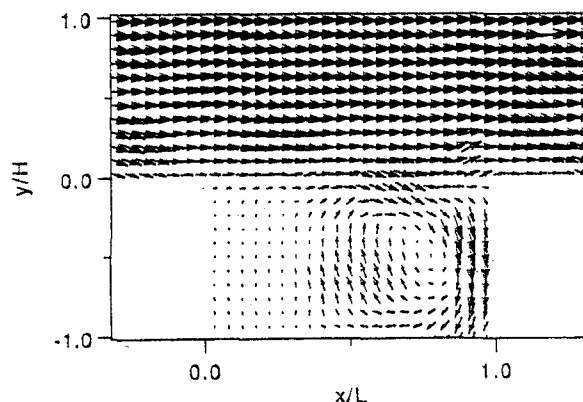


図-22 トレンチ界面付近の流体の巻き込み

4. 結論

本研究において、開水路キャビティーせん断乱流をLESにより数値シミュレーションを行い、その平均諸量をFLDAによる実験結果と比較・検討しさらにその乱流構造や非定常性について解明し以下のような結論が得られた。

(1) LESはFLDAによって得られたトレンチ幅の変化による平均流速、乱れエネルギー、レイノルズ応力の分布特性や値の変化を良好に再現できる。

(2) 乱れエネルギー、レイノルズ応力の乱流統計量については局所的な部分についてはややずれる傾向が見られるが全体的な分布特性や値は一致する。

(3) トレンチ幅の変化により乱れエネルギー、レイノルズ応力がピークをとるケースにおいては、剥離渦の発生周期と循環渦の大きさ中心位置との関連によりいくつかの過程を反復していることが初めて分かった。

(4) 剥離渦と大きな循環渦が衝突するトレンチ中央部とその連行による渦のトレンチ下流端に衝突する現象は同様の場所において乱れエネルギー、レイノルズ応力がピークをとることと関係していると思われる。

(5) 本計算は比較的粗い格子を用いてのLESである

ので格子平均で失われる渦運動成分があると考えられ、非定常性の定量的な面においては今後詳細に調べる必要があると思われる。

謝辞：本研究を行うにあたり、京都大学大学院環境地球工学教室助手平岡久司先生に多大なるご協力とご助言を頂いた。ここに、謝意を表する。

参考文献

- 1) Knisely, C. and Rockwell, D. : Self-sustained low-frequency components in an impinging shear layer, *J. Fluid Mech.*, Vol. 16, pp.157-186, 1982.
- 2) 藤田一郎・神田徹・門脇正夫・海津利幸：PIVによるトレンチ内流れの乱流特性の解析，第26回乱流シンポジウム講演会論文集，pp. 96-99, 1994.
- 3) 藤田一郎・神田徹・森田卓光：LESによる開水路CAVITY内流れの乱流特性の解析，第26回乱流シンポジウム講演会論文集，pp. 334-337, 1994.
- 4) 棚津家久・門田章宏・高津昌夫・井上憲：開水路キャビティーせん断層の乱流構造と組織渦の発生機構，水工学論文集，第40巻，pp. 761-766, 1996.
- 5) 村上周三・持田灯・日比一喜：Large Eddy Simulationによる街区周辺の乱流場の解析，第3回生研NSTシンポジウム講演論文集，pp. 73-77, 1988.

(1997. 9. 30受付)