

高速度ビデオカメラを用いた開水路凹部流れの 画像解析とLESによる数値解析

Image Processing of Flows in a Trench Using a High-Speed
Video Camera and Numerical Analysis by LES

藤田一郎*・神田 徹**・河村三郎***・矢野芳広****・森田卓光*****

By Ichiro FUJITA, Tohru KANDA, Saburo KOMURA, Yoshihiro YANO, Takamitsu MORITA

Open channel flows in a trench exhibit complex turbulent flow patterns such as separation, reverse flow, or dead water zone. To understand the flow structures, an image processing method is applied to the visualized vertical flow section including a trench. In this research, the evolution of spatial velocity distributions can be obtained at a high sampling rate, 125Hz, by using a high-speed video camera. The results are compared with the numerical analysis by the large eddy simulation(LES) for the same flow condition. Satisfactory agreements between image and numerical analyses are obtained for the flow structure.

Keywords: image processing, correlation method, LES, trench flow

1. まえがき

開水路凹部（トレンチ）における流れは、剥離、逆流、死水域といった複雑乱流が存在する場で、水理学的に興味深い流れ場である。河川においては、流送土砂の制御の目的でトレンチ部が設けられることがあるが^{1) 2)}、近年では多自然型河川工法の一つとして、中小規模河川の小流量時の生態系を保全するためにもトレンチ部が設置される場合がある。しかしながら、このような開水路凹部の流れの詳細、特に流れの時間変動特性や組織的な渦構造等については不明な点が多い。本研究では、まず水理実験によって鉛直二次元断面内の流れの特性を明らかにする。その解析にあたっては、高速ビデオカメラを利用し極めて短い時間間隔で画像を取り込み、それを相関法³⁾で処理する手法を用いる。また、非定常、高レイノルズ数流れの数値解析手法として発展してきたLarge Eddy Simulation (LES) による解析も試み、実験値との比較・検討を行う。

* 正会員 学博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

*** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

**** 学生員 神戸大学大学院工学研究科

***** 学生員 岐阜大学工学部土木工学科

2. 実験概要および画像解析の方法

実験水路の概略を図-1に示す。水路は長さ4.28m、幅0.14m、勾配0.0014の亚克力樹脂製循環式開水路である。水路の中央部には流下方向長さ L が0.2mで、深さ D は可変の凹部（トレンチ）を設けている。水路上流端には格子状の整流機構を取り付け、トレンチ流入端までの流れが等流状態となるようにしている。実験条件を表-1に示す。ここに、 H_0 はトレンチ上流側の水深、 U_0 は断面平均流速である。トレンチ形状のパラメーターを表-2に示す。

画像計測システムを図-2に示す。流れの可視化は、トレーサーとして比重が約1.02、平均粒径0.2mmのナイロン粒子を流水中に投入し、ビームエクパンダーでスリット状にしたアルゴンレーザー光を、水路上部より鉛直下向きに照射して行っている。スリット幅は約5mm程度である。可視化された画像は、高速度ビデオカメラによりサンプリング周波数125Hzでデジタルメモリー装置に書き込む。この装置では最大4KHzまでサンプリング可能だが、デジタルメモリー装置に搭載されたメモリーが1000画像分なので、時間的な渦の発達等を観察するために125Hzすなわち8秒間の画像データを得ることとする。デジタルメモリーに蓄積された画像はアナログ出力できるので、ビデオ画像としてVHSビデオテープに記録する。ビデオ画像は画像メモリーボード搭載のパーソナルコンピュータを用いて再びデジタル化し、512×512画素、256階調のバイナリデータとして外部記憶装置に保存する。アナログ画像データの一例を図-3に示す。

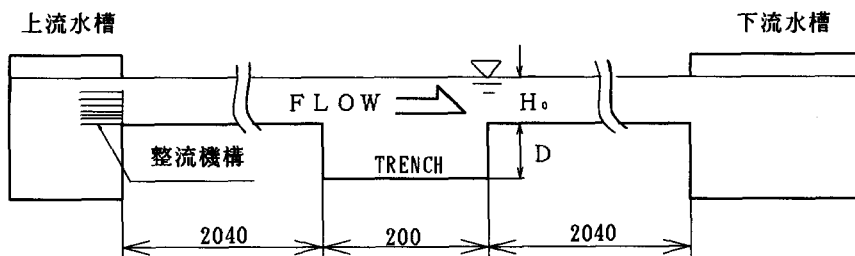


図-1 実験水路（側面図） (mm)

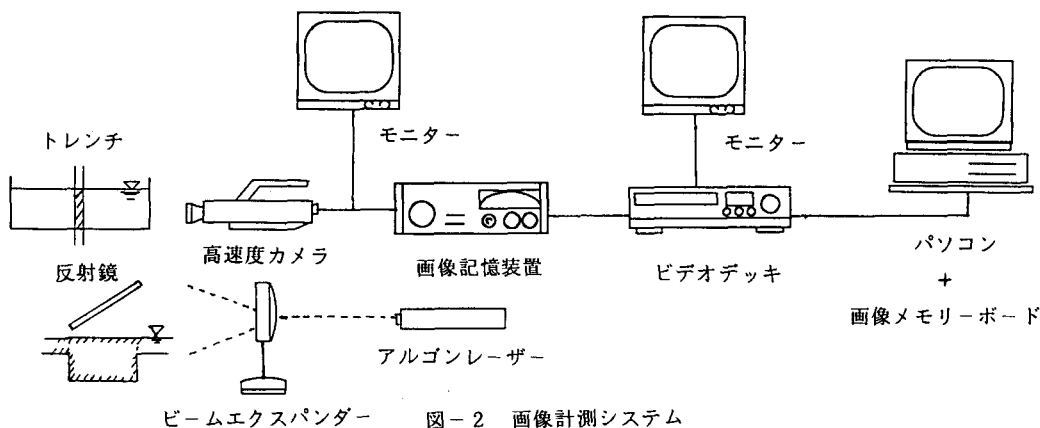


図-2 画像計測システム

表-1 実験条件

i	Q (l/s)	H_0 (cm)	U_0 (cm)	Re	Fr
0.0014	4.6×10^{-3}	1.6	20.5	3280	0.52

表-2 トレンチ形状

CASE	D (cm)	L (cm)	D/L
1	2.0	20.0	10.0
2	4.0	20.0	5.0

画像処理には濃淡画像を対象とする相関法³⁾を用いる。相関法の精度については、画像間のトレーサー粒子群のせん断変形が小さいほど向上し、画素中心間の相互相関係数を二次元補間することによって、数分の1画素程度の粒子移動量が計測可能となることが示されている⁴⁾。本研究では高速ビデオの導入により、一般のビデオ機器の4分の1程度まで粒子移動距離およびせん断変形を減少させたために、精度の高い画像計測が可能となっている。

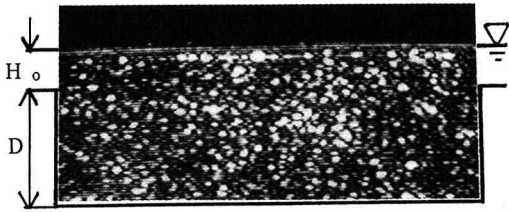


図 - 3 アナログ画像データ

3. LESによる数値シミュレーション

LESの基礎方程式はSGSのスマゴリンスキーモデルに基づいて以下のように表せる。ただし、繰り返し添え字については縮約規則にしたがうものとする。

連続方程式：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

運動方程式：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i - \tau_{ji})}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \Omega_i$$

$$\tau_{ji} = (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]^{1/2}$$

$$\Delta = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{1/3} \quad (5) \quad P = \frac{p}{\rho} + \frac{2}{3} K_G \quad (6)$$

$$K_G = \frac{\nu_t^2}{(C \Delta)^2} \quad (7) \quad \Omega_i = (g_x, g_y, g_z) \quad (8)$$

ここに、 u_i ：座標軸 x_i 方向($i=1,2,3$)の流速成分、 x_i ：座標軸(x_1 ：流下方向、 x_2 ：横断方向、 x_3 ：鉛直方向)、 τ_{ji} ：せん断力成分、 Ω_i ：外力成分、 ν ：動粘性係数、 p ：圧力、 K_G ：SGSの乱流エネルギー、 Δ ：格子平均サイズ、 C_s ：モデル定数(0.01)、 C ：モデル定数(0.094)。

移流項の計算には三次精度のQUICKESTスキーム、圧力緩和にはSMAC法を用いる。計算格子は不等間隔

のスタガード格子とし、壁面近傍では壁法則を与える。流入部では指数分布形式の流速分布、流出部では従属変数に対して自由流出条件を与える。自由表面の扱いはFr数が比較的小さく、実験範囲での水面変化はわずかであったことからrigid lidを仮定した。四部区間の格子数はCASE 1では $30 \times 17 \times 19$ 、CASE 2では $39 \times 33 \times 24$ 、また時間ステップは無次元時間で0.001とした。図-4に計算フローチャートを示す。

4. 画像処理結果

図-5に平均流速ベクトルを、図-6に流線を示す。CASE 1では $x=11 \sim 12(\text{cm})$ の位置で再付着しており、

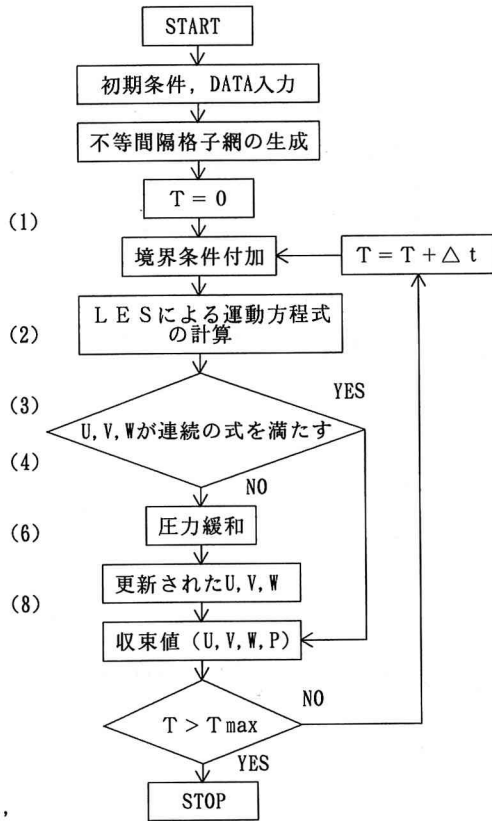


図 - 4 計算手順フローチャート

CASE 2では流入端からの流れがトレンチ内部に向かって拡散するが、トレンチ後端の影響のため再付着には至らず、平均的には一つの大きな循環流が形成されている点が良好に捉えられている。また、流入端直下における流れはほとんど停滞しており、死水域とよべる領域が存在する。実験において、トレーサ粒子がこの領域に捕捉されて抜け出せない状況が多く見られたことから、浮遊砂等の堆積にはこの領域の規模が大きく関与すると考えられる。CASE 1とCASE 2とでは明らかに渦領域の存在位置が異なり、CASE 1ではトレンチ流入部にかかなり近いところで発生し、CASE 2では、より大きな渦がトレンチ下流部に現れている。図-7はある時刻での瞬時的な流速ベクトルを示す。主流と凹部間のせん断層内に微小な渦塊が数多く発生している。また主流と凹部流れの境界面はこれらの渦群の運動の影響で大きく波打ち、複雑な様子を呈している。特にCASE 1の場合は水面近傍の流速ベクトルは場所的にもかなり変動しており、トレンチの存在は自由表面に大きく影響を与えていると思われる。図-8はレイノルズ応力分布を示したものであり、剥離せん断層に沿うレイノルズ応力が下流方向および鉛直方向に変化する様子が見られる。

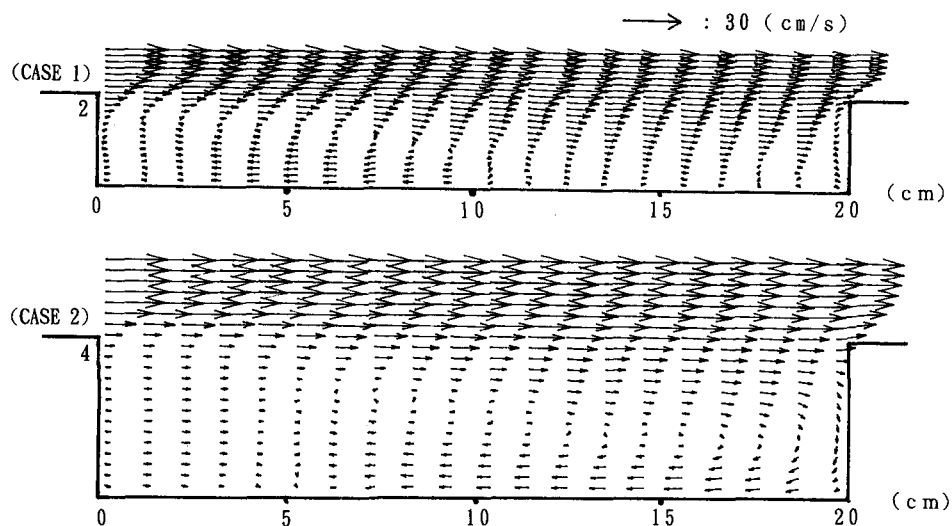


図-5 平均流速ベクトル

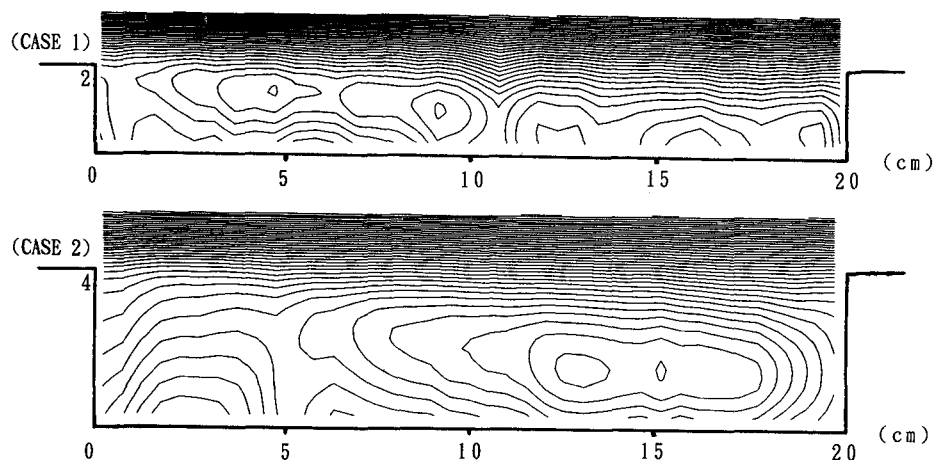


図-6 流線 CONTER STEP=0.005

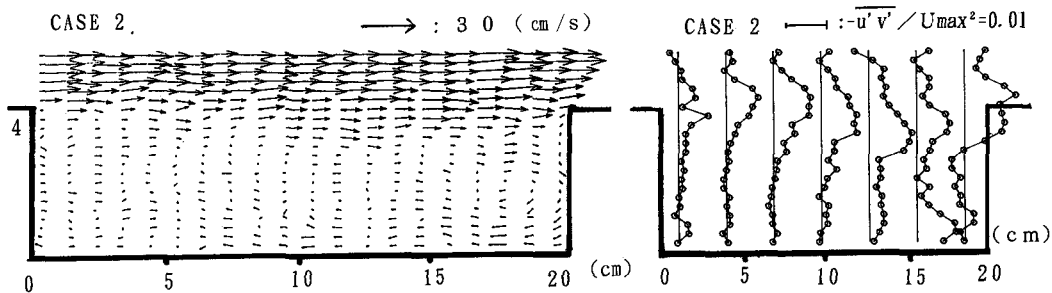
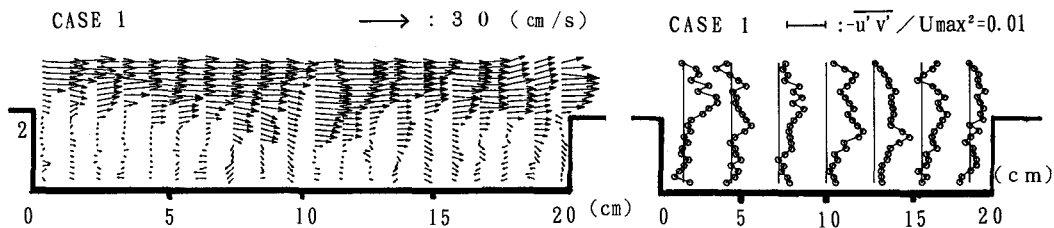


図-7 瞬間流速ベクトル

図-8 レイノルズ応力分布

5. 計算結果

LESによる計算は3次元で行っているが、実験値との比較のために水路中央の鉛直断面内の結果のみを示す。図-9に平均流速、その流線を図-10に示す。 $U_{\max}$ は流入部最大流速である。ここで、実験値と比較すると若干大きな規模の循環流が存在していることがわかる。レイノルズ応力の分布を図-11示す。実験値ではトレンチ流入部の高さで最大値が流下方向に進むに従い拡散する様子がみられるが、計算値ではトレンチの下流端で急激に増大している。図-12には流速ベクトルの瞬間値を示すが、実験値と比べると規模が大きく明瞭な渦が計算されている。これは格子サイズを十分に小さく取っていない点の一つの要因と考えられる。しかしながら、主流と凹部の境界面が波状となる点や死水域等に関してはうまく実験値を再現できている。

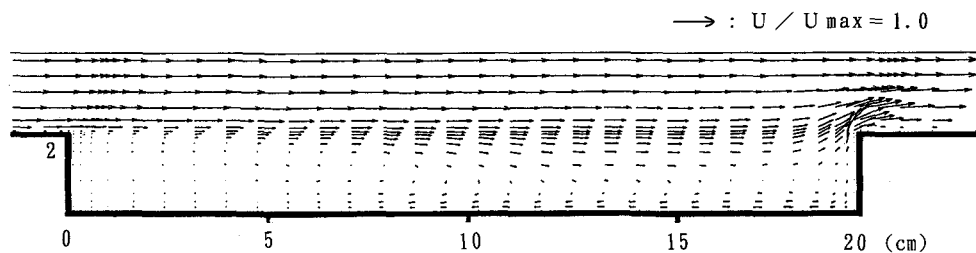


図-9 平均流速ベクトル CASE 1

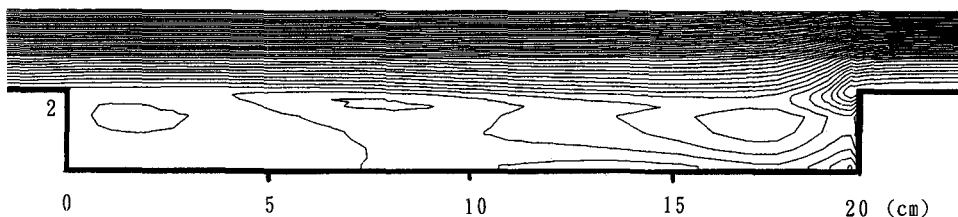


図-10 流線 CASE 1

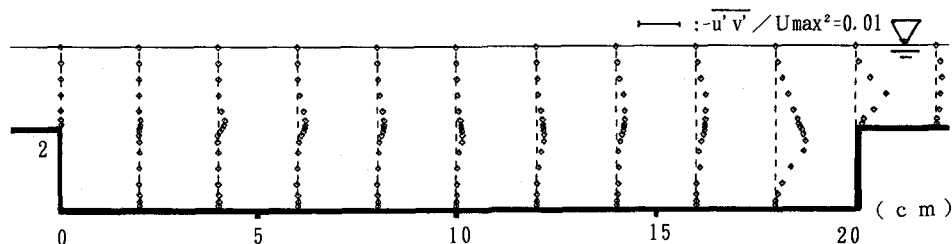


図 - 1 1 レイノルズ応力分布 (CASE 1)

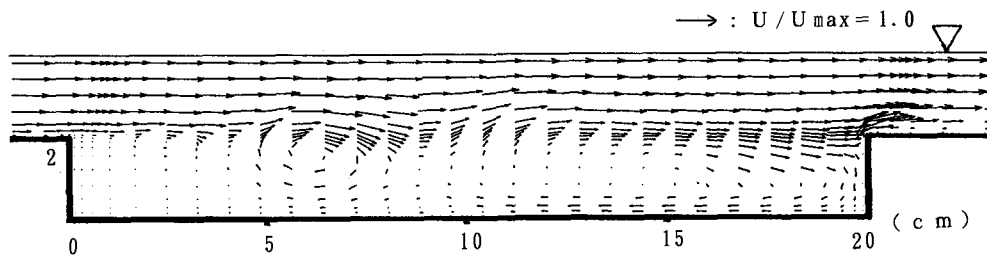


図 - 1 2 瞬間流速ベクトル (CASE 1)

6. あとがき

高速度ビデオカメラを利用することによって、従来のビデオ機器では困難であった複雑な乱流場の画像計測が可能となることを示した。サンプリング周波数にはまだ十分余裕があるので、さらに高速の流れに対しても対応が可能と考えられる。ただし、本研究ではデジタル画像を一度アナログ画像へ変換した後に再びデジタル化しているため、画質の劣化、解析時間の増大は避けられない。今後は、デジタルメモリーからコンピュータ側のメモリーへ直接的なデータ転送が可能となるような工夫が必要である。また、実際の現象で認められた流れの三次元性を明らかにするには、三次元画像計測手法の開発が不可欠と考えられる。

数値シミュレーションに関しては、まだ不十分な点が残されていることがわかった。今後は自由水面効果、格子サイズの影響、あるいは乱れの境界条件などについてもさらに検討を進め、精度向上をはかる必要がある。ただし、これまでLESによる瞬間流速分布を実験値と比較した例がほとんどなく、画像計測手法の導入によって初めて比較が可能となった点は意義深い。LESを含めた乱流モデルの改良のためには点計測だけではなく空間同時計測が必要であり、今後画像計測の重要性はさらに高まるものと確信できる。

なお、本研究の遂行にあたり、近畿大学理工学部江藤剛治教授からは同氏の研究室で開発された高速度ビデオカメラを快く使用させて頂き、竹原幸生助手には実験に際し貴重なご助言を頂いた。また、基礎水理学会の研究分科会（水理実験・数値実験のvisualizationとpresentation）の各位から貴重なご示唆を頂いた。画像処理には神戸大学学生の門脇正夫君の協力を得た。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Alfrink, B. J. and Rijn, L. C.: Two-equation turbulence model for flow in trenches, Journal of Professional Issues in Engineering, Vol. 109, No. 3, pp. 941-958, 1983.
- 2) 藤田・道上・檜谷: トレンチ内の流れと浮遊砂濃度分布の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第35巻, pp. 377-382, 1991.
- 3) 藤田・河村: 画像処理による合流部大規模剥離渦の運動特性に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp. 187-192, 1992.
- 4) Fujita, I. and Komura, S.: On the accuracy of the correlation method, Proc. of the 6th Int. Symp. on Flow Visualization, pp. 858-862, 1992.