

開水路乱流構造の動的特性のビデオ画像解析

VIDEO IMAGE ANALYSIS OF OPEN CHANNEL TURBULENT FLOW

桑村純一¹・宇民正²・上野鉄男³

Junichi KUWAMURA, Tadashi UTAMI and Tetsuo UENO

¹学生会員 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

²正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

³正会員 工博 京都大学 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

A longitudinal vertical cross-section of unsteady open channel flow was visualized by video camera. The 120 frames during 4 seconds in rising stage and the 120 frames during 4 seconds in falling stage were analyzed by cross-correlation method to obtain velocity vector distribution. The structure of large scale turbulence which drives longitudinal spiral motions were examined by using the obtained data.

Key Words : video image analysis, large scale turbulence structure, vortices, upward flow, secondary flow

1. はじめに

洪水流では、流れの境界形状は彎曲や蛇行の影響を受け、また底面に形成される河床波の形も刻々と変化する。さらに流れは非定常である。このため洪水流の乱流構造は非常に複雑である。非定常の乱流構造の実験的研究は1980年代後半に林¹⁾らや富永²⁾らにより始められ、その後Graf³⁾、4)らおよび楠津⁵⁾、6)、7)、8)らにより進められたが、洪水流を模擬した非定常流を作ることが困難である、また流速測定とその解析が困難であるなどの問題を抱えている。

本研究では、実験水路における非定常流の縦断面内の流況をビデオカメラを用いて可視化し、その画像を動的に解析することにより、開水路における水深規模の乱流構造である並列らせん流⁹⁾と水路床近傍の乱流構造との関係を明らかにしようとした。

に平均粒径0.33mmのトレーサーを注入し、側壁面から8cm離れた鉛直縦断面を水路の下方より幅2mmのシート状の光で照射し、その光に反射するトレーサーをSONYデジタルビデオカメラレコーダーTRV900で水路側方から撮影した。実験におけるレイノルズ数は1250～3750、フルード数は0.04～0.11であった。トレーサーは比重1.04のポリスチレンビーズで、これを水中処理し、中立のものだけを抽出して使用した。

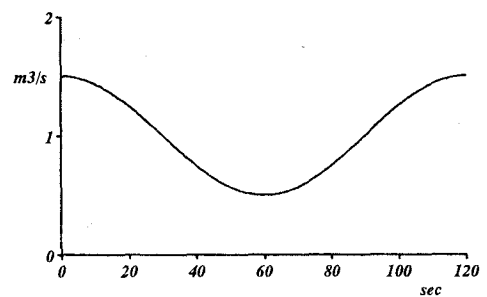


図-1 流量の経時変化

2. 実験方法及び水理条件

幅40cm、水路床勾配1/5000の長方形断面をもつ、透明アクリル樹脂製実験水路において、流量を正弦波状に変化させた。流量変化の周期は120秒、最大流量1.5(l/sec)、最低流量0.5(l/sec)とした。流量と時間の関係を図-1に、水深と時間の関係を図-2に示す。この流れ

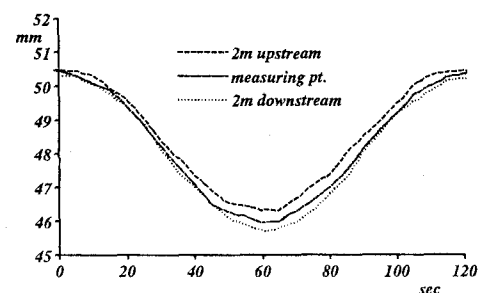


図-2 水位の経時変化

3. 解析の手法

解析範囲は増水期のうち、測定点での水位最低時からの時間経過が23秒～27秒の間の4秒間及び減水期のうち、測定点での水位最高時からの時間経過が32秒～36秒の間の4秒間とした。撮影は1/30秒に1回行われているので、4秒間では120画像フレームに相当する。画像解析ではそれらの全コマを用い、相互相関法を適用して、流速ベクトル分布を得た。さらにそれらから、各種水理量（絶対流速、渦度、流線）を計算し、図化した。本解析で相互相関法を適用するにあたり、用いた画像データの諸元ならびに相関計算の諸元を表-1に示す。

表-1 画像データおよび相関計算の諸元

ピクセル数 (pixel)	相関窓 (pixel)	検索窓 (pixel)	ベクトル間隔 dx(mm) dy(mm)		ベクトル数
640×480	25×11 ～15×5	11×9	3.5278	1.7639	59×65

4. 解析結果とその考察

(1) 増水期の乱流構造

増水期にはその乱流構造が活発な時と、穏やかな時があった。並列らせん流は揺動しているが、照射面が並列らせん流の上昇流領域に一致した時には活発な乱流構造が捉えられ、下降流領域に一致した時には穏やかな乱流構造が捉えられたと考えられる。まず、活発な時の乱流構造の例として、解析開始時から15/30秒経過した時点の絶対流速(流速ベクトルの大きさ)の分布を図-3に、また渦度分布を図-4に示す。水路床付近に大きな渦度をもつ層が存在するが、その層の一部が上方に向けて剥離しかかっている様子が見える。この部分は逆U字渦の断面を示していると考えられる。これはバッファー層の外側の大規模乱流構造で、Brown & Thomas¹⁰⁾あるいは宇民・上野¹¹⁾が指摘しているものに相当する。図-5に

鉛直方向流速分布を示す。逆U字渦の頭付近で強い上昇流が噴出した様子を捉えることができる。図-6に流線を示す。水路床近傍の乱流構造の概要を把握し易くするため、本図では、河床から約1/3水深あたりの平均流速と同じ速度で並進する移動座標系から見た流線を示した。図-4において強い渦度の層が剥離しかかっているところで、流線は渦を内包する興味あるパターンを示しており、また、その渦がちょうど頭を持ち上げたところで流れを上向きに吹き上げている様子が明瞭に判読できる。

次に、穏やかな時の例として、解析開始から77/30秒後の渦度分布を図-7に示す。渦の活発な動きは無く、渦度の高い部分は水路床近傍の狭い領域だけとなり、それが穏やかに流下している。また、同時刻における鉛直方向流速分布を図-8に示す。全体的に上昇流領域は少なく下降流が卓越していることがわかる。以上のことから、下降流が卓越しているところでは水路床近くの乱れは鎮静化しているようである。

図-9には、図-4の渦度分布で述べた逆U字渦の動きを把握するため、渦度が4.0(1/sec)以上の範囲の動きを1コマおきに同一紙面上にプロットした。同図には同時に、それにとまって形成されたと考えられる同時点の上昇流の領域(鉛直方向流速成分が2.5mm/sec以上の領域)をプロットした。本図から渦度の層が時間経過と共に剥離したりおさまったりしながら流下方向に移動していく様子を捉えることができる。これは逆U字渦が横断方向に揺動しているためと思われる。また、逆U字渦による噴出流により形成された上昇流領域が平均流により運搬され、変形していく様子も捉えることができるが、この領域は上昇しないまま消滅していることがわかる。すなわち、変形・移動時において、下端は領域が狭まると共に河床に対して約6°の傾斜を持って上方へ移動しているのに対し、この領域の上端は水路床から見てほぼ同じ高さを維持している。さらに本図から、逆U字渦と上昇流領域の移動速度の差異により、時間経過と共に、上昇流領域の位置が逆U字渦の位置より相対的に下流にずれていっていることがわかる。

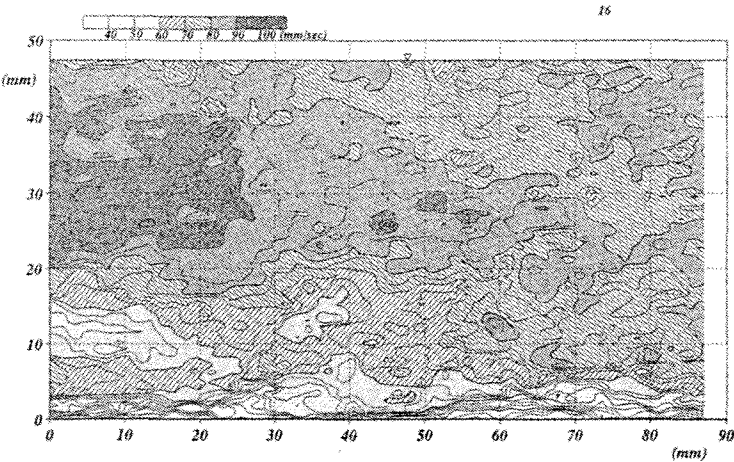


図-3 絶対流速分布 (15/30秒時点)

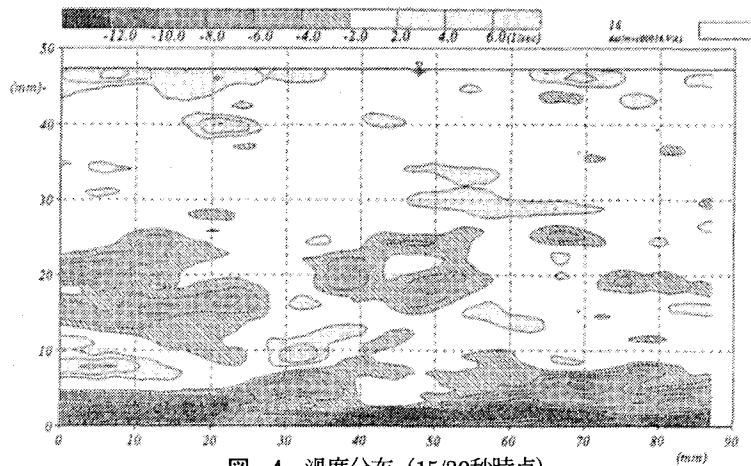


図-4 渦度分布 (15/30秒時点)

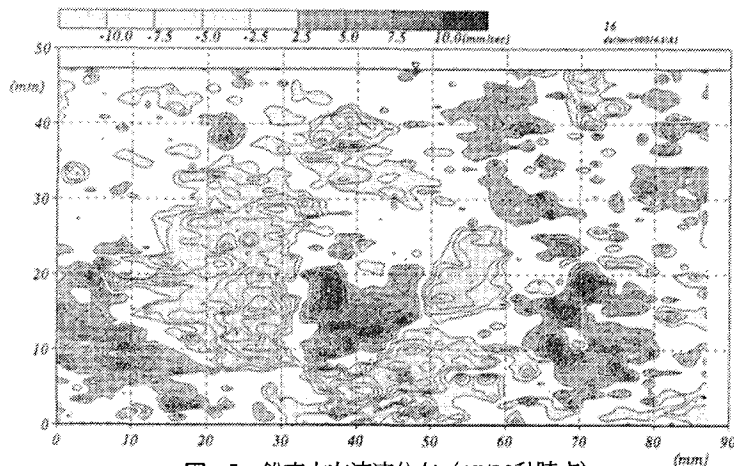


図-5 鉛直方向流速分布 (15/30秒時点)

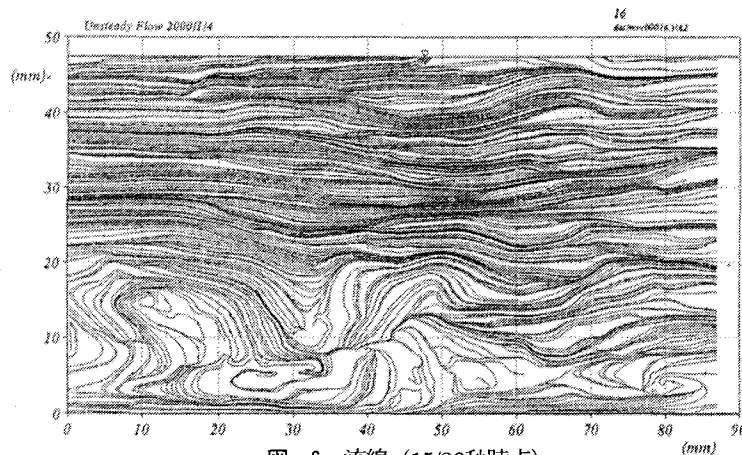


図-6 流線 (15/30秒時点)

図-10には時間経過110/30secにおける鉛直方向流速成分を示した。本図では上昇流領域は水路床近傍からほとんど水面までを占める。このように水面まで伸びた上昇流領域はボイル構造の縦断面を意味すると考えられる。またこの図では、流下方向にいくつかの上昇流領域が断続的に連なっていることがわかる。図-11はそのうちの1つの領域の移動の様子を2コマおきにプロットしたものと、それと同時刻に対応する渦度が2.0(1/sec)以上の範囲の動きを2コマおきにプロットしたものである。図-9に示した場合と異なり、この場合は

上昇流領域が平均流によって運搬されながら上方へ伸長してゆき、ついには水面に達することがわかる。この上昇流領域は明らかに水路床近傍から伸びていることや、このような強い上昇流領域は渦度分布において水路床近傍に強い渦度領域の剥離が存在するところによく発生していることから、逆U字渦によるものであると考えられる。

それでは図-9の場合には上昇流領域は上昇しないままで消滅し、図-11の場合には、それは水面に達しボイルを形成するまで発達したのは何故であろうか。そ

の理由としては2つが考えられる。すなわち、①上昇流領域での平均的な流速は底面近くでのそれより大きい
ため、ある逆U字渦の頭付近から噴出された上昇流がそれより速く流下して行き、下流の底面近くに存在する別の逆U字渦により噴出された上昇流と統合された結果、水深全体にわたる上昇流が形成された。②一つの逆U字渦の上に、上流側から伸びてきた別の逆U字渦が重なって渦の構造が2重となり、渦運動が統合された結果、水深規模の強い上昇流が形成された。

図-11に示す上昇流と逆U字渦との関係は上記の①に相当すると考えられる。すなわち、ここに示されて

いる上昇流領域は、ここに示されている逆U字渦よりさらに上流にある渦により形成され、その渦より早く流下して図-11に示される位置関係に達したときに上昇流が増大されたと考えられる。一方、本実験によるかぎり、上記②のメカニズムによる上昇流の発達は認められなかった。

さらに、図-10に示したように、強い上昇流の領域が流下方向にいくつも連なっている所では、これらの部分が並列らせん流の上昇流領域を形成していると考えられる。

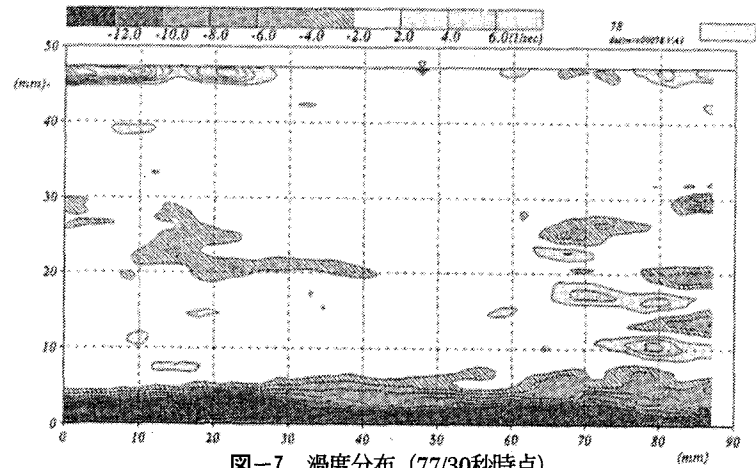


図-7 渦度分布 (77/30秒時点)

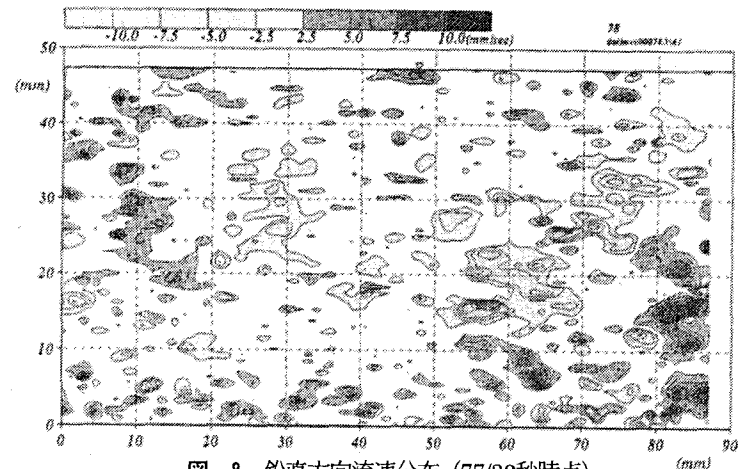


図-8 鉛直方向流速分布 (77/30秒時点)

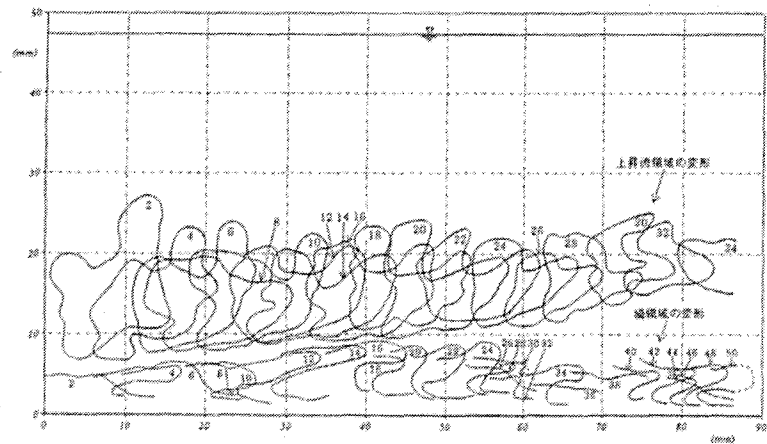


図-9 渦と上昇流領域の移動と変形 (数字はフレーム番号を示す)

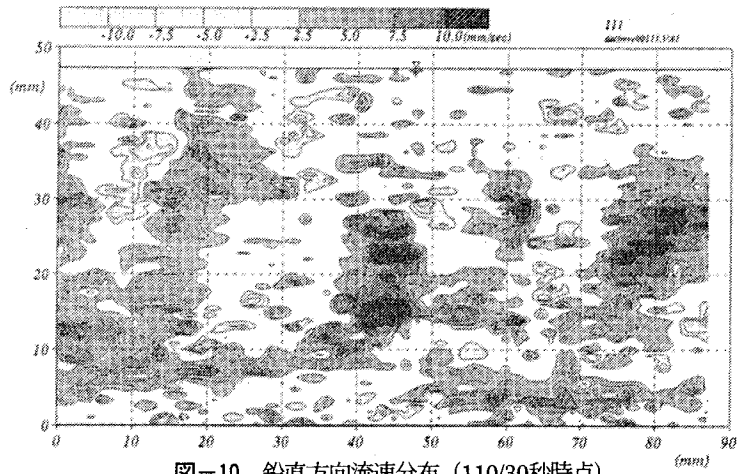


図-10 鉛直方向流速分布 (110/30秒時点)

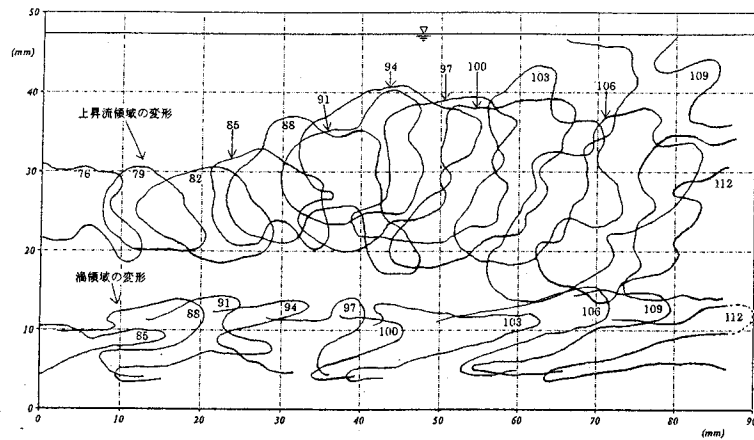


図-11 渦と上昇流領域の移動と変形 (数字はフレーム番号を示す)

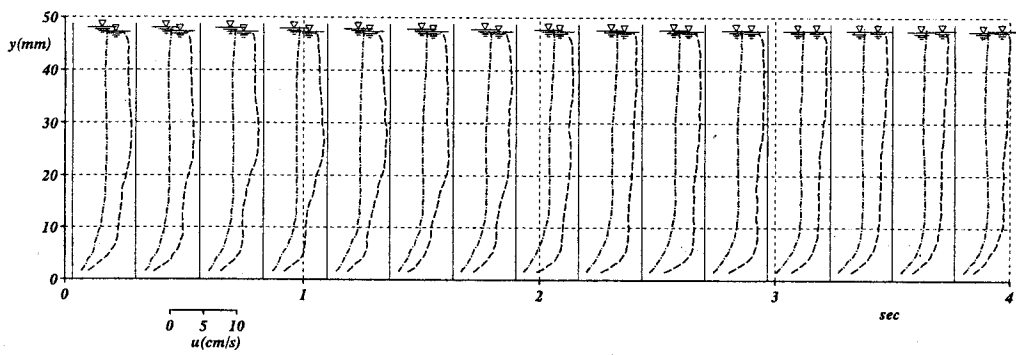


図-12 平均流速分布

(- - - - - 増水期, - - - - - 減水期)

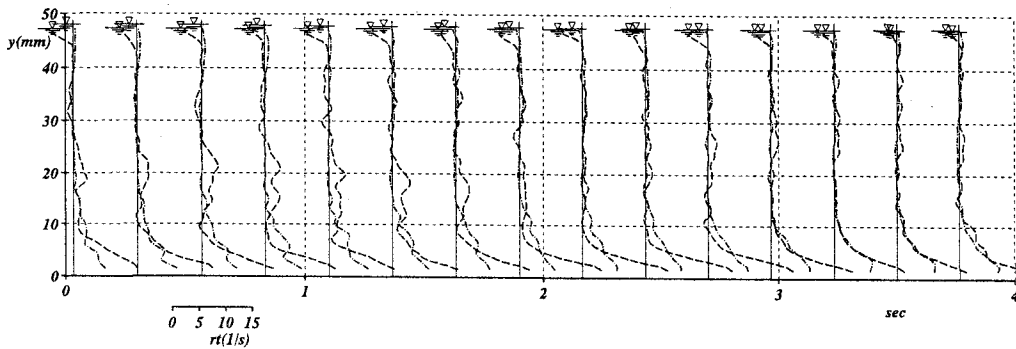


図-13 水平方向に平均された渦度分布の鉛直方向分布

(- - - - - 増水期, - - - - - 減水期)

(2) 増水期と減水期の比較

減水期のうち解析区間4秒間の前半は増水期で見られたのと同様の渦度分布が見られ、水路床近傍で逆U字渦が確認できる。増水期で述べた逆U字渦がもたらす上方への流れの噴出や、水路床近傍から水面まで達する上昇流領域の形成は減水期においても同様に発生している。

しかし、これらはいずれも増水期ほど顕著ではなく、4秒間の後半部については、底面近傍の強い渦度の領域も比較的薄くなり、逆U字渦の活発な動きが見られず、乱れの少ない穏やかな流れになっている。

図-12は8/30秒毎に平均流速分布をプロットしたもので、増水期の分布は破線で、減水期の分布は一点鎖線で示されている。本図から、水路床近傍における増水期の速度勾配は減水期のそれに比べて大きくなっていることがわかる。長谷川¹²⁾はこの現象が加速度の影響であることを流れの運動方程式に基づいて説明した。

図-13は、8/30秒毎に、水平方向に平均された渦度の鉛直方向分布をプロットしたもので、増水期の分布は破線で、減水期の分布は一点鎖線で示されている。本図から、増水期における水路床近傍での渦度は、減水期の約2倍程度になっていること、また、とくに解析区間4秒間の前半において、増水期は水路床付近を離れると急激に渦度の値が減少し、水深半ば程で再び増加するのに対し、減水期では水路床付近を離れても急には減少せず、徐々に減少してゆき、水深半ば程で0に近づくことがわかる。すなわち、水路床近くにおける増水期と減水期の渦度分布の違いは平均流速分布の違いを反映している。ちなみに、増水期における全断面の平均流速は7.6cm/sec、減水期におけるそれは4.6cm/secである。

5. おわりに

実験水路における非定常流の縦断面内の流況をビデオ画像解析の手法を用いて経時的に解析した結果、以下のような結論が得られた。

- ① 強い上昇流領域が逆U字渦により水路床近くに形成される。
- ② この上昇流領域は時間経過と共に、変形しながら平均流によって運搬され、流下方向に移動する。また、流れてきた上昇流領域が水路床近傍の逆U字

渦による噴出流により加速されたとき、大規模な上昇流領域が形成されるようである。

- ③ この領域が水面に達した時、ボイルが発生すると考えられる。
- ④ 流下方向に断続的に連なった上昇流領域は並列らせん流の形成に寄与していると考えられる。

参考文献

- 1) 林泰造・大島正憲 : Kinematic Waveとしての非定常性が水流の乱れ構造に及ぼす影響の研究, 第32回水理講演会論文集, pp. 607-612, 1988
- 2) 富永晃宏・湯下孝司・小葉竹重機 : 第44回土木学会全国大会概要集, pp. 484-485, 1989
- 3) Haizhou, Tu. and Graf, W. : Friction in unsteady openchannel flow over gravel beds, Journal of Hydraulic Research, Vol.31, pp.99-110, 1983
- 4) Song, T and W. H. Graf. : Velocity and Turbulence distribution in unsteady open-channel flow, Journal of Hydraulic Engineering, pp.141-154, 1996
- 5) 瀬津家久・門田章宏・中川博次 : 非定常開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 491/II-27, pp. 81-88, 1994
- 6) 瀬津家久・門田章宏・中川博次 : 開水路乱流の粘性低層および壁面領域に及ぼす非定常効果, 水工学論文集, Vol. 39, pp. 833-838
- 7) 瀬津家久・門田章宏・新橋秀樹・倉田昌明 : 河床波上非定常開水路流れの時空間相関構造に関する研究, 土木学会論文集, No. 579/II-41, pp. 125-136, 1997
- 8) 瀬津家久・鬼束幸樹・倉田昌明 : 非定常滑面開水路流内層の特性, 水工学論文集, Vol. 42, pp. 865-870, 1998
- 9) 木下良作 : 航空写真による洪水流の解析, 写真測量, Vol. 6, No. 1, pp. 1-17, 1967
- 10) Brown, G. L. and Thomas, A. S. W. : Large structure in a turbulent boundary layer, Phys. Fluid, Vol.20, 1977
- 11) Utami, T. and Ueno, T. : Experimental study on the coherent structure of turbulent open-channel flow using visualization and picture processing, J. Fluid Mech., Vol.174, pp.399-440, 1987
- 12) 長谷川和義・市埜順也・山下章司・崇田徳彦 : 洪水時流速分布の計測と結果の解析, 水工学論文集, Vol. 41, pp. 977-984, 1997

(2000.10.2受付)