

自由水面が組織渦構造に及ぼす 影響に関する研究

EFFECT OF THE SURFACE-WAVE FLUCTUATIONS ON COHERENT STRUCTURES NEAR THE FREE-SURFACE

欄津家久¹・中山忠暢²・鬼束幸樹³

Iehisa NEZU, Tadanobu NAKAYAMA and Kouki ONITSUKA

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

²学生会員 京都大学大学院 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

The turbulent structures near a free surface greatly depend on the Froude number, and the vertical component of turbulence intensity is affected by the surface-wave fluctuations. Furthermore, it has been pointed out that the coherent structures and the turbulence statistics near the free-surface are closely related with each other. In this study, PIV (Particle-Image Velocimetry) was used to measure evolutionary patterns of coherent vortices in the center of channel. A relationship between the "bursting phenomenon" generated near the wall and the "surface renewal eddies" near the free-surface was evaluated.

Key Words : free surface, coherent vortices, PIV, turbulence.

1. 緒論

従来より、自由水面近傍における乱れ構造やエネルギー収支関係等はFroude数や水面変動に大きく依存することが指摘されている。特に、この変化特性は開水路に特有な自由水面近傍において顕著に現れ、水面の穏やかな状態で見られる自由水面近傍での乱れの低減特性は水面変動の増大とともに失われることになる。さらに、このような水面変動の増大は乱れの再配分率の複雑化に大きな影響を及ぼし自由水面近傍に発生する組織構造と密接に関わっている¹⁾とともに、この表面更新渦は環境地球工学的な観点から眺めると水・空気の相互作用による物質輸送に大きな影響を及ぼすことになる²⁾。

自由水面近傍の乱れ特性と組織渦構造との関連性については従来より、Hunt & Graham (1978)³⁾、Hunt (1984)⁴⁾によって提案された理論が中心的な存在であった。つまり、"source layer"において流速変動の鉛直方向成分から主流方向・横断方向成分へエネルギーが再分配されるというものであり、鉛直方向の乱れ強さは自由水面の減衰効果によって管路流れの値よりも大きく低減し、自由水面に衝突した渦構造がゆがめられ流下方向に引き延ばされることを指

摘している。しかし、このような自由水面近傍での乱れ特性と組織構造の関連性はあくまでも水面が穏やかな状態におけるものであり、水面変動によるinactive成分が加わると内部メカニズムは異なるものになると推測される。

近年、表面更新現象と壁面近傍で発生するバースト運動の関連性の研究が発展してきている。Nakagawa & Nezu (1981)⁵⁾は2台のホットフィルム流速計を用いて同時計測を行うことによって、bursting現象のメカニズムおよび移流過程についての考察を行っている。また、Rashidi & Banerjee (1988)⁶⁾は壁面近傍でのバースト運動による低運動量の上昇流体と加速流体の相互作用による回転混合運動が自由水面に到達し、壁面に再び戻ってくると考えている。宇民・上野 (1977)⁷⁾は水面が比較的穏やかな流れを対象として、トレーサによる可視化法を用いて路床形態と水深規模の大スケール乱れとの関連性について検討を行っている。一方、Tamburrino & Gulliver (1994)⁸⁾は回転式ベルトを用いることによって水面渦を強制的に発生させ、その平面的な瞬間像について考察を行っている。このように表面更新渦と壁面近傍で発生するbursting現象には密接な関係があり、水深方向全体の瞬間的な構造の把握が不可欠である。

表-1 水理条件

case	S	h (cm)	B/h	U_m (cm/s)	U^* (cm/s)	Fr	Re ($\times 10^3$)
L-FR02	1/6000	5.0	8.0	16.0	0.99	0.23	8.0
S-FR31	1/41	3.0	13.3	166.7	8.47	3.07	50.0

本研究ではこれまでに行った研究^{9), 10)}のもとに、PIV (Particle-Image Velocimetry)法を用いることによって鉛直縦断面内の瞬間像を求め、水深規模の組織構造と壁面および自由水面との関連性について考察を行ったものである。

2. 実験方法

本実験で使用した水路は全長10m、幅40cm、高さ30cmの可変勾配型循環式直線水路であり、勾配はジャッキにより最大1/10まで上げることが可能である。計測部は水路側壁と底面下方が光学ガラス製となっており(特に計測区間3mは一枚強化ガラス製)、流れが十分に発達している水路上流端から約6mの地点を計測部とした。座標系は流下方向・鉛直方向・横断方向をそれぞれ x, y, z とし、それらに対応する流速変動成分を u, v, w とする。水理条件を表-1に示す。本研究では単断面滑面開水路流れについて、水面の穏やかな常流、および水面変動の激しい射流の2通りの流れを対象とした。直径約50 μm 、比重1.02のナイロン12粒子をトレーサ粒子としてアルコール液で十分にかくはんした後、水中に一樣に混入し、厚さ約2mmのレーザーライトシート(LLS)を水路底面から垂直にパルス的に照射して、水路中央断面における約20cm $\times$ 20cmの範囲を水路側壁方向からCCDカメラで撮影した。ここで画像の1ピクセルは約0.4 $\times$ 0.4mmである。撮影された画像は1/30s間隔で光ディスクに記録され、フレームメモリーボードを介してPIV法によってコンピュータで処理され、LLS平面内の瞬時の多点速度情報を得た。

3. 実験結果および考察

(1) PIV法の精度の確認

本研究では、組織渦構造を研究するにあたってまずPIV法の精度や有効性を調べる必要があり、同一条件でのLDAによる計測結果⁹⁾との比較を行った。図-1はケースL-FR02について、内部変数表示 $y^+=Uy/\nu$ に対する、平均主流速 U を摩擦速度 U^* で無次元化表示した値 $U^+=U/U^*$ の分布である。また、図にはKim et al. (1987)¹⁰⁾による管中央の対称条件を用いた閉管路のDNSデータも実線で併記した。これより、PIV法は高Reynolds数の場合、粘性底層の計測は難しいが、対数則領域以上ではかなり高精度に計測可能であると

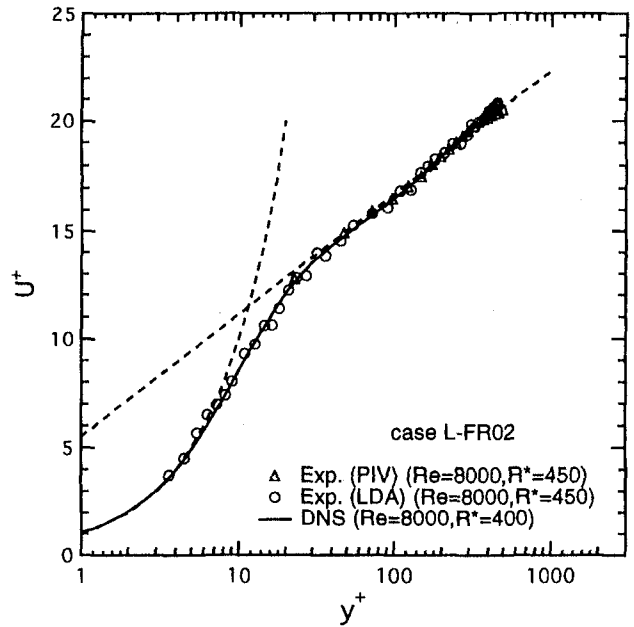


図-1 平均主流速 U^+ の分布

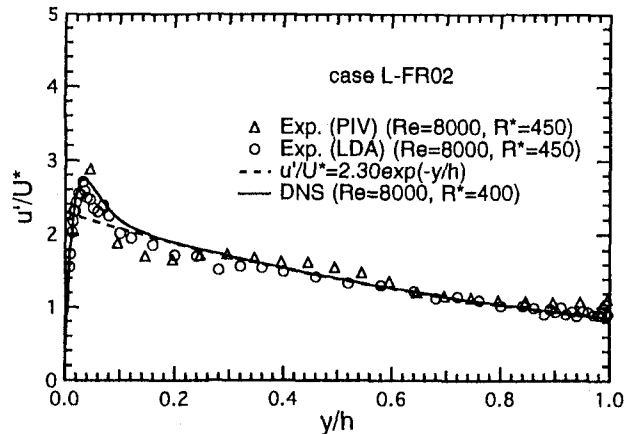


図-2 乱れ強度 u'/U_* の分布

いえる。図-2は同様にケースL-FR02について、外部変数表示 y/h に対する、無次元化された乱れ強度 u'/U_* の分布である。一般に乱れ成分についてはPIVはそれほど精度が良くないことが従来より指摘されているが、本研究のような2次元流れとみなせる単純な流れ場においては比較的精度良く計測が可能である。ただし、 $y/h > 0.9$ の水面近傍では乱れの再配分が促進され3次元性が顕在化するため⁹⁾、PIVの計測値は若干大きくなっている。また、壁面および自由水面近傍においては相関の対象領域・追跡領域が減少するため若干のずれが見られるが、その欠点以上に、PTV (Particle-Tracking Velocimetry) 法のような補間操作が不必要であるため、さらに高精度に瞬間的に平面内の情報が得られるという長所に注目すべきである。

(2) 表面更新渦の発生と大規模組織構造の関連性

Gulliver & Harverson (1989)¹²⁾は、水深規模の組織構造と表面更新渦による擾乱の発生数が比例関係にあ

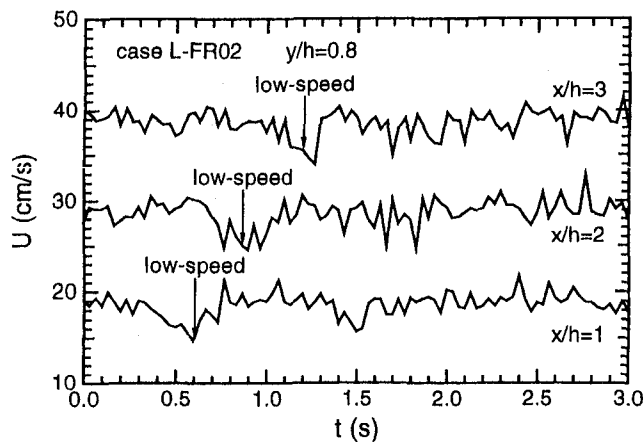


図-3 主流速の時系列

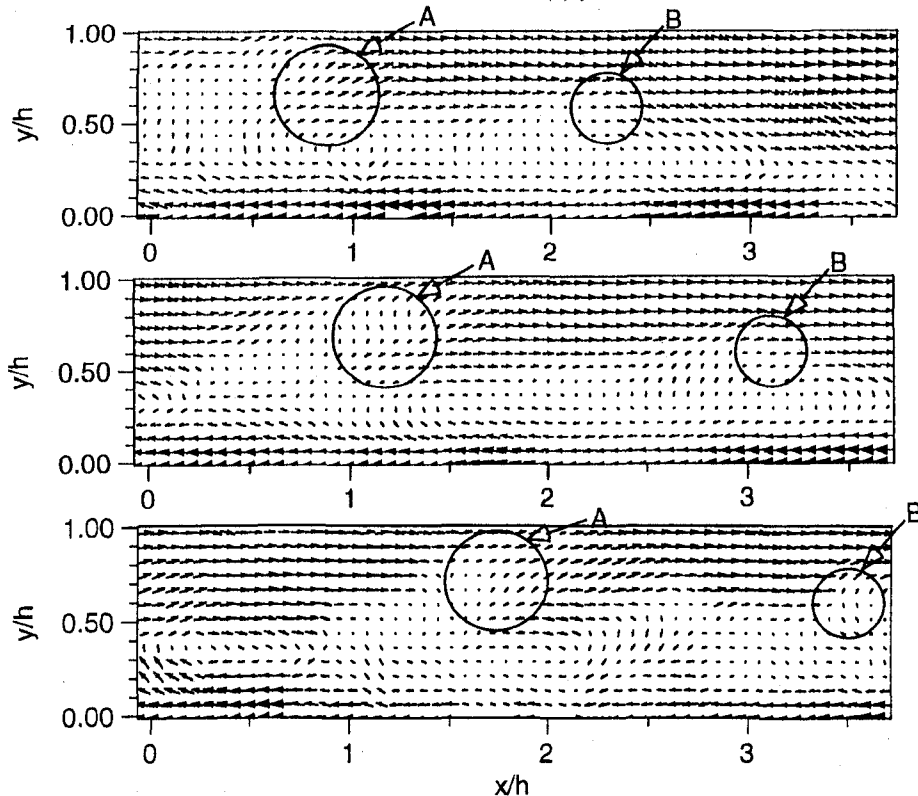


図-4 瞬間流速ベクトル (case L-FR02, 上から $t=0.4, 0.6, 0.8$ s)

ることを指摘している。また、著者らの研究⁹⁾から、水面変動の激しい射流状態においては水面近傍における逸散率はFroude数に比例して増加し、水面変動もまたエネルギーの発生原因となりうるが示されている。これらより、水面変動の発生の有無は水路縦断面内の組織構造の挙動に大きな影響を及ぼすと考えられる。

a) 水面が穏やかな流れにおける瞬間構造

一般に、Froude数が小さく水面の穏やかな流れにおいては自由水面は一種の弱い壁として作用し、特に鉛直方向の乱れ変動は大きく低減することが明らかになっている¹⁾。図-3はFroude数が小さく自由水面による低減効果の激しいケースL-FR02 ($Fr=0.23$)における、水路中央での水面近傍($y/h=0.8$)での主流速の時系列である。これより、バーストに伴う周期性の

組織構造が水面近傍にも見られることがわかる。また、時系列の類似性より、その組織構造は形状をほぼ保持した状態で流下方向へ移流され则认为られる。図-4は鉛直縦断面内の瞬間流速ベクトルである。ここで、宇民・上野(1977)⁷⁾の単断面流れにおける研究より、流下方向への平均流速の移動座標系から見るのが最も流れ場の現象を理解することが容易であることが示されていることから、本研究においても平均主流速を引いて表示した。これより、水深の2倍程度のスケールの組織構造が周期的に見られ⁷⁾、図の上昇流体(A及びB)は図-3の低速部に対応している。また、その周期的な組織構造のうち、あるものは自由水面近傍に大きく上昇する(A)が、自由水面の減衰特性によって上昇とともに勢力は小さくなる。そのような流速場の渦度分布を示したのが図-5

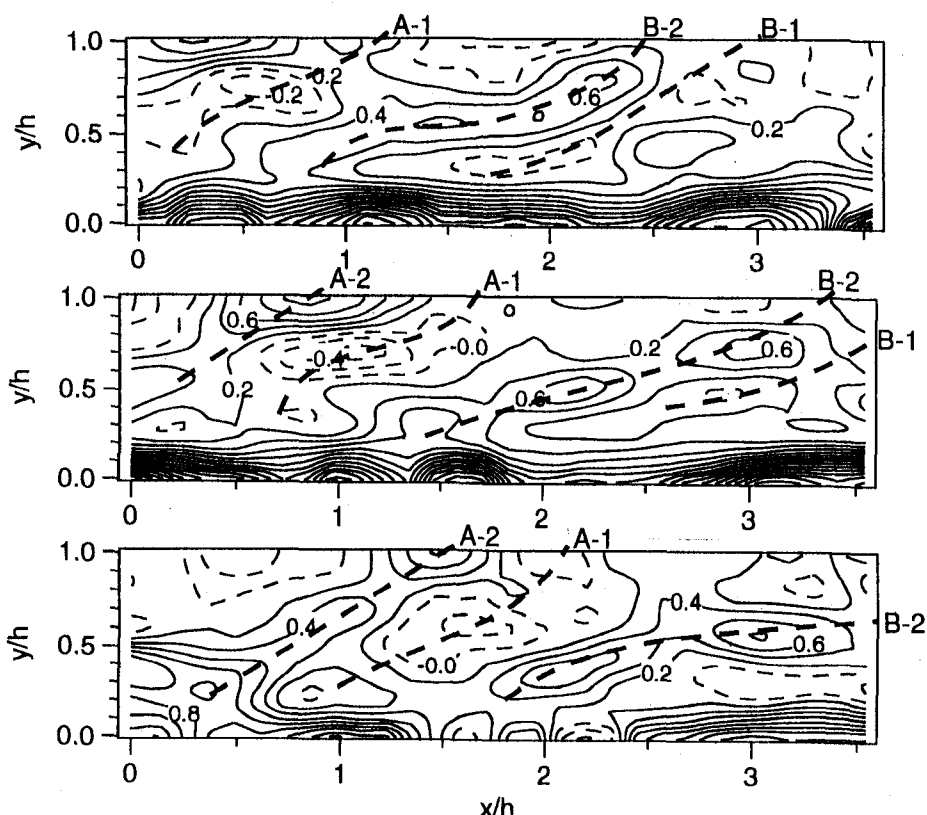


図-5 瞬間渦度分布 (case L-FR02, 上から $t=0.4, 0.6, 0.8s$)

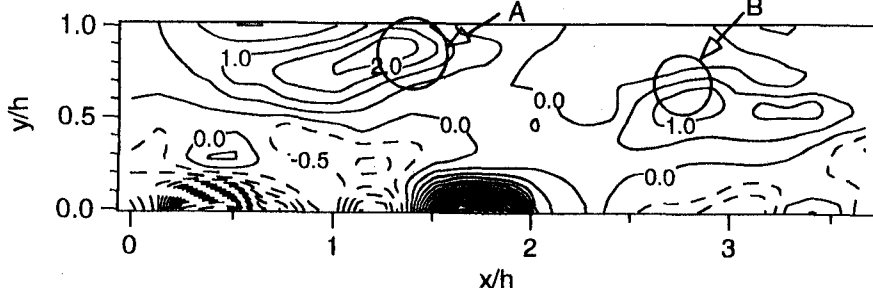


図-6 瞬間レイノルズ応力分布 (case L-FR02, $t=0.6s$)

である。その際に、渦度は最大平均主流速および水深で無次元化し、時計回りを正とした。瞬間流速ベクトルとの対応より、上昇流体の前部(A-1及びB-1)には渦度の小さい領域、後部(A-2及びB-2)には渦度の大きい領域が見られ、Nezu & Nakagawa (1993)¹¹⁾による高速領域から低速領域への遷移部が高渦度部、低速流体から高速流体への遷移部が低渦度部となる。壁面のシアによって発生する高渦度成分は水面に向かって上昇するが、シアが減少するにつれて移流とともに値は次第に減衰していく様子が見られる。この時、自由水面近傍では渦度の発生は見られない。図-6は図-4の $t=0.6s$ における瞬間レイノルズ応力の分布であり、摩擦速度の2乗で無次元化して表示したものである。組織構造の上昇部、すなわち室田ら (1981)¹³⁾も指摘しているようにejectionにおいて値は大きくなっており、特に水面近傍に大きく上昇する組織構造(A)の方がエネルギーの発生効果は大きい。

b) 水面変動の激しい流れにおける瞬間構造

Froude数が大きくなると組織構造は水面変動の影響を大きく受け、a) で見られたものとは異なる大スケール乱れが形成されると考えられる。特にRashidi & Banerjee (1988)⁹⁾は、水面変動の発生によって水面近傍に上昇してくる組織構造がバウンドされ再び水面下へ降下することを指摘している。図-7はFroude数が大きく水面変動のかなり激しいケースS-FR31 ($Fr=3.07$)における鉛直縦断面内の瞬間流速ベクトルである。これより、 $t=0.067s$ に見られる2つの組織渦(C及びD)の発生時間間隔は $TU_{max}/h=3.3$ となり、従来から指摘されているリバーストの平均周期およびボイルの発生周期($TU_{max}/h=1.5\sim3.0$)とほぼ一致する。このことはa) の場合にもあてはまっていた。一方、 $t=0.0$ においては水面近傍に群体化した組織構造が見られる(G)。この発生周期はかなり大きく、Jackson (1976)¹⁴⁾が実河川について指摘している周期に近い値をとる。これより、本実験のような単断面開水路流れにおいては、Nezu & Nakagawa (1993)¹¹⁾のボイルの分類においてバースト運動に伴う第3種のボ

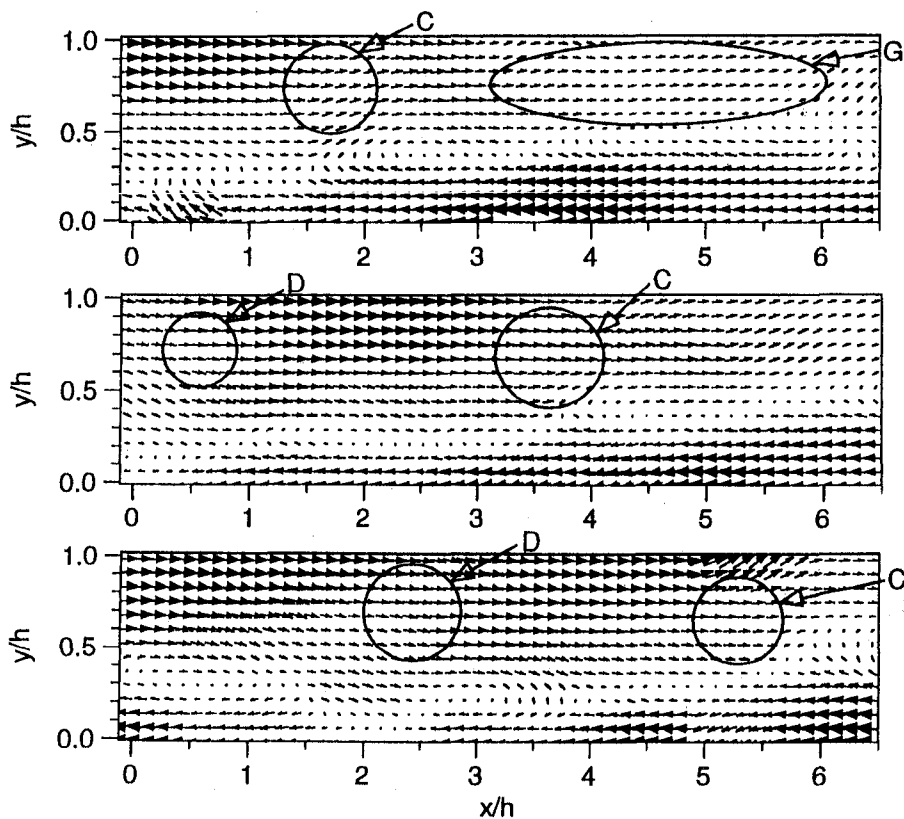


図-7 瞬間流速ベクトル (case S-FR31, 上から $t=0.0, 0.033, 0.067s$)

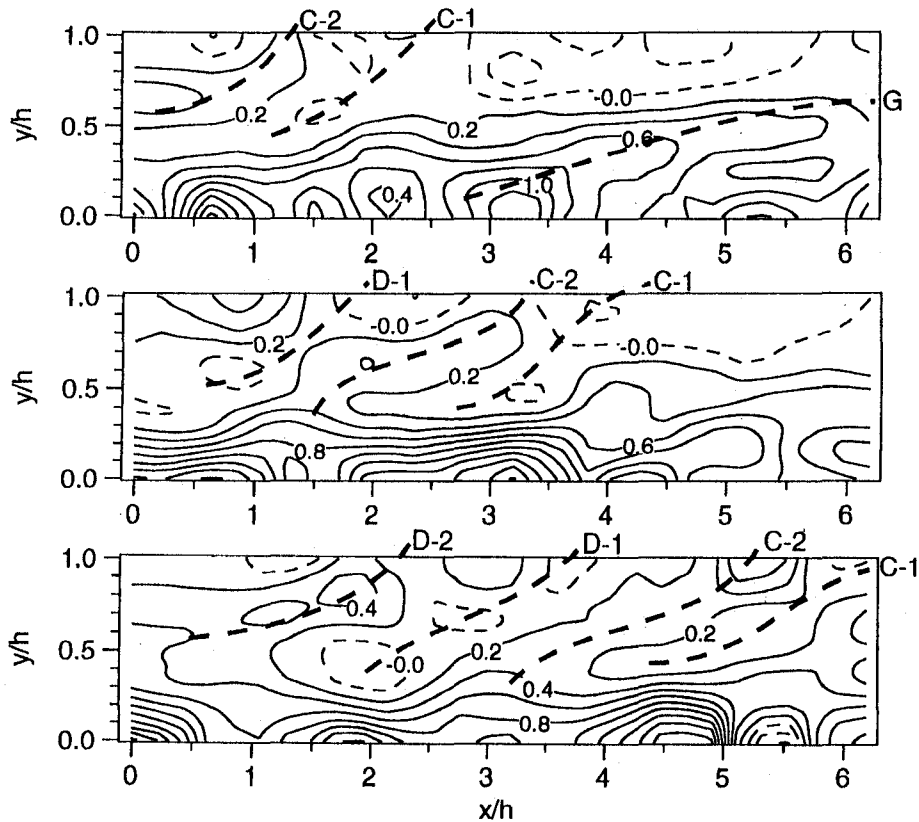


図-8 瞬間渦度分布 (case S-FR31, 上から $t=0.0, 0.033, 0.067s$)

イルのみが卓越すると考えられるので、勢力の強い組織構造のみが水面近傍に上昇、もしくは群体化が生じることになる。図-8は瞬間渦度の分布である。これより、 $t=0.067s$ においてはa)と同様に上昇流体の後部(C-2及びD-2)に正の高渦度領域が見られるが、 $t=0.0s$ においては水面近傍での負の渦度の発生に

よって、高渦度領域(G)の上昇が阻止されている特性が見られる。

(3) 水面変動を伴う流れにおける組織渦の群体化
前節より、水面変動の発生と組織構造の群体化とは密接な関係があると予想される。特に、底面から

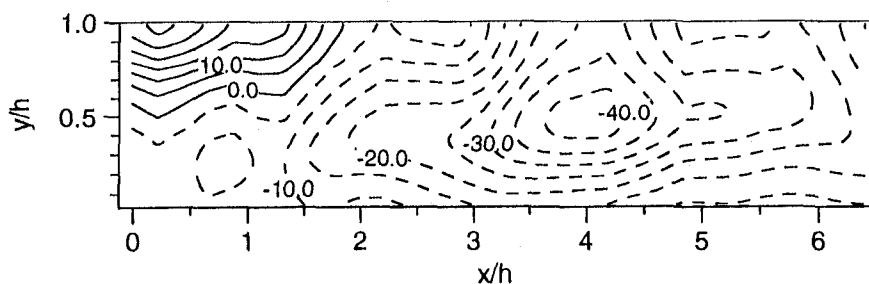


図-9 流線の分布 (case S-FR31, $t=0.0s$)

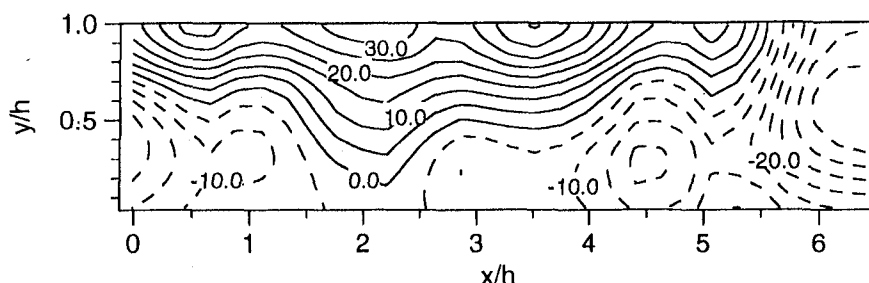


図-10 流線の分布 (case S-FR31, $t=0.067s$)

水面へ直接上昇する組織構造は高渦度領域を伴うが、群体化が進むと高渦度領域は水面近傍で阻止される。図-9は図-7の $t=0.0s$ における流線であり、このような群体化が発生している場合、流れは水面近傍へ大きく上昇し、水面上のボイル形成に大きな影響を及ぼすことになる。一方、図-10は図-7の $t=0.067s$ における流線の分布である。これより、2つの組織渦の間で水面近傍から流れが大きく降下し、再び水面近傍へ上昇していく特性が明確に見られる。また、水面近傍では波状の曲線が見られ、水面変動と密接な関係があることがわかる。

4. 結論

本研究は、得られた可視化画像に対してPIV法を用いることによって、自由水面の変動の有無が組織渦構造に及ぼす影響について検討を行ったものである。得られた結果は以下のようにまとめられる。

1) 水面の穏やかな流れにおいては、壁面近傍で発生する組織構造は比較的高い確率で水面近傍へ上昇するが、水面の低減特性によって若干勢力が減少する。特に、水面近傍に大きく上昇する組織構造の方がエネルギーの発生効果は大きい。

2) 水面変動が発生するような流れにおいては壁面近傍ではほぼ規則的に組織構造が発生するが、乱れ特性やエネルギー配分率に大きな変化の見られる自由水面領域において群体化が促進され易くなる。また、水面での組織構造のバウンドが激しくなる。

参考文献

1) Nezu, I. & Nakagawa, H. : *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.

2) Moog, D. B. & Jirka, G. H. : Air-water gas transfer in uniform channel flow, *J. Environmental Eng.*, 1996.
 3) Hunt, J. C. R. & Graham, J. M. R. : Free-stream turbulence near plane boundaries, *J. Fluid Mech.*, Vol.84, pp.209-235, 1978.
 4) Hunt, J. C. R. : Turbulence structure and turbulent diffusion near gas-liquid interfaces, *Gas Transfer at Water Surfaces*, W. Brutsaert & G. H. Jirka (eds), Reidel Pub., pp.67-82, 1984.
 5) Nakagawa, H. & Nezu, I. : Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.104, pp.1-43, 1981.
 6) Rashidi, M. & S. Banerjee : Turbulence structure in free-surface channel flows, *Phys. Fluids*, Vol.31, No.9, pp.2491-2503, 1988.
 7) 宇民正, 上野鉄男 : 可視化法による大スケール乱れに関する研究(2), 京大防災研年報, 第20号B-2, pp.331-354, 1977.
 8) Tamburrino, A & Gulliver, J. S. : Free-surface turbulence measurements in an open-channel flow, *ASME*, pp.103-112, 1994.
 9) 棚津家久, 中山忠暢 : 自由水面近傍の乱流構造と水面変動との関連性に関する研究, 土木学会論文集, 1997, (投稿中).
 10) 棚津家久, 中山忠暢 : 自由水面近傍における組織渦の時空間相関構造に関する研究, 土木学会論文集, 1997, (投稿中).
 11) Kim, J., Moin, P. & Moser, R. : Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, Vol.177, pp.133-166, 1987.
 12) Gulliver, J. S. & Halverson, M. J. : Air-water gas transfer in open channels, *Water Resources Res.*, Vol.25, No.8, pp.1783-1793, 1989.
 13) 室田明, 福原輝幸, 小田勝也 : 開水路壁面乱流に関する実験的研究, 第25回水理講演会論文集, pp.447-454, 1981.
 14) Jackson, R. G. : Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, *J. Fluid Mech.*, Vol.77, pp.531-560, 1976.

(1997. 9. 30受付)