

風波発生下における自由水面近傍での組織構造に関する基礎的研究

Fundamental study on coherent structure beneath the free surface in wind-induced water-wave flows

禰津家久*・吉田圭介**・池田大輔***・垂井晃一****
 Iehisa NEZU, Keisuke YOSHIDA, Daisuke IKEDA, and Kouichi TARUI

*フェロー 工博 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**学生員 修(工) 京都大学大学院 環境地球工学専攻 博士課程 (同上)

***正会員 修(工) 株式会社 JCB (〒180-8001 東京都千代田区神田駿河台)

****学生員 京都大学大学院 社会基盤工学専攻 修士課程 (同上)

This study describes an experimental investigation on instantaneous turbulent structure and coherent structure beneath the free surface in wind-induced water-wave flows by using Particle-Image Velocimetry (PIV) and Laser Doppler Anemometer (LDA) with wave gauge sensor. In this study, the downward-bursting phenomena are instantaneously visualized by PIV method, and the organized motions are investigated in detail by the time-frequency analysis using the wavelet transform, by which the wave-induced fluctuations are separated from the whole velocity fluctuations. As the results of experiments, it is shown that the low-frequency fluctuations are enhanced significantly although relatively small amplitude when the bursting phenomena occur. It is found that these bursting behavior is recognized as the low-frequency motions. Furthermore, it is shown that the bursting phenomena tend to occur when surface fluctuations are relatively small.

Key words : downward-bursting phenomena, wind-induced water-wave flows, PIV, the wavelet transformation

1. はじめに

風波とは、自由水面上に風が吹くことによって水・空気界面に発生する現象である。気流により風波および吹送流が発生し運動量やエネルギーが水面下に輸送されるだけでなく、さらに空気中の各種気体も輸送される。現在、全地球規模での環境問題を解決するためには水域・大気間での物質輸送過程の評価が重要な課題となっているが、いまだ未解明な点が多いのが現状である。

風波に関して従来から海岸・海洋工学や地球物理学などの分野で数多くの研究がなされている。Wu(1981)¹⁾は水面上に風が吹く場合について風速の鉛直分布を対数則で表すとともに、固定床上での境界層との類似性に着目し、水表面の粗度状態を表す粗度レイノルズ数により滑面・不完全粗面・粗面の3通りに分類した。水・空気界面を通しての運動量輸送に関しても様々な研究が行われており、Shermin(1972)²⁾は大気側から水面に輸送される運動量のほぼ全部が水面下に輸送されることを、Wu(1975)³⁾は約7割が、光易・草場(1988)⁴⁾は約半分が輸送されることを指摘している。また、風波にはエネルギー Spektral に顕著なピークがあり、その両側にエネルギーが急激に減少するという相似構造が存在する。そこで、経験的に代表波(有義波)による取り扱いが多くなされてきた。Toba(1972)⁵⁾は風波の有義波高と有義波周期の間には以下のような相似則が成り立つと指摘している。

$$H^* = BT^{*3/2} \quad (1)$$

ここで、 $H^* = gH_s/U_{*0}^2$ および $T^* = gT_s/U_{*0}$ である。 T_s および H_s は有義波の周期および波高、 U_{*0} は風速の平均主流速分布に対数則を適用したときの摩擦速度、 g は重量加速度、 B は比例定数である。さらに、Toba(1988)⁶⁾は有限振幅波理論におけるストークスドリフトの速度 u_0 を高次の項を無視することによって、風波の代表波の量を用いて次のように評価している。

$$u_0 = 2\pi^3 H_s^2 / g T_s^3 \quad (2)$$

注目すべき点は、風波発生下では自由水面近傍において水面下方へ落ち込む乱れの組織構造の存在が指摘されていることである。Yoshikawa et al. (1988)⁷⁾は風波下の乱流場において風波の卓越周波数よりも低周波のバーストの存在を見いだした。Toba & Kawamura (1996)⁸⁾はこのような風波直下の組織的な乱流境界層(Downward Bursting Boundary Layer : DBBL)の存在を指摘し、このDBBLの特徴は実験室規模のものから実際の海洋での実測データまで広く成立していることを指摘した。さらに風波直下における乱流境界層は低周波のバーストによって特徴づけられることを示した。また、杉原ら(1999)⁹⁾はToba and Kawamuraの議論の妥当性を検証し、低周波成分による乱流特性量が風波の特性量(有義波高およびストークスドリフト流速)によって普遍的に規格化でき、風波の卓越周期よりも長いタイムスケールで起こる大規模な乱流バーストが発生すること

表-1 実験条件表

ケース名	フルード数	$U_{a,max}$ (m/sec)	$U_{w,mean}$ (cm/sec)	U_{*w} (cm/sec)	U_{*b} (cm/sec)	H_s (cm)	λ (cm)	f_p (Hz)
Q3V0	0.073	$\cong 0$	7.92	$\cong 0$	0.492	-	-	-
Q3V1	0.076	2.42	8.23	0.47	0.491	-	-	-
Q3V2	0.081	4.25	8.80	0.53	0.577	0.64	8.01	5.2
Q3V3	0.079	6.51	8.55	1.44	0.600	1.20	16.28	3.5
Q0V2	-	4.31	0.00	0.54	-	0.74	9.81	4.4
Q0V3	-	6.67	0.00	1.32	-	1.24	17.20	3.1

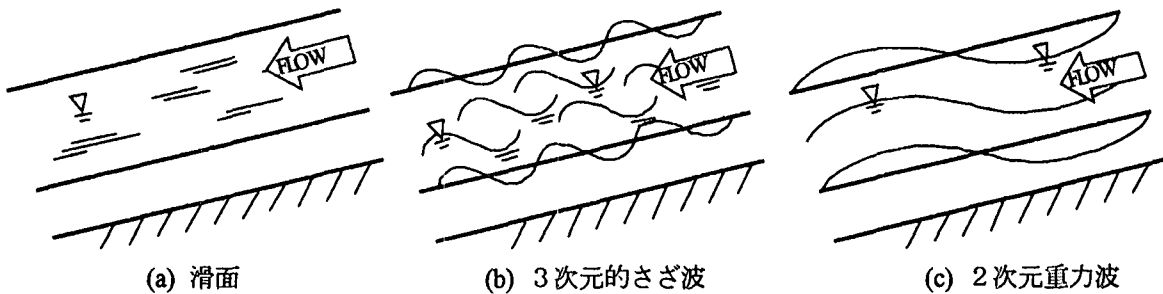


図-1 水面形状の模式図

を示した。一方, Komori *et al.* (1993)¹⁰⁾は空気層で発生する上方へ向かう組織渦と, 水層で発生する下方へ向かう表面更新渦の2つの組織構造が気体輸送と密接に関連していることを指摘している。瀬津ら (2002)¹¹⁾は水・空気両層を2台のレーザ流速計(LDA)で同時計測し, 空気層から水層への界面相互作用の結果としてバースト現象が生じると指摘した。

このような自由水面近傍での組織構造は, 運動量交換だけでなく気体などの物質交換においても主因であると予測されているが, 未解明な点が多いのが現状であり, また水・空気界面を通しての物質輸送との関連性が指摘されていることから, この組織構造の解明は非常に重要であると考えられる。また, 従来の研究は点計測が主であり, 可視化された定量的解析例は少ない。さらに, この組織構造の存在が指摘されているのは閉鎖場であり¹²⁾, 風波・開水路混成場においてこの組織構造が存在するか否かは不明である。そこで本研究では, 閉鎖場だけでなく風波・開水路混成場を対象に, 自由水面近傍で発生する組織構造の解明を試みた。PIVを用いて組織構造の定量的可視化をするとともに, 波高計とレーザ流速計の同時計測によって組織構造と水面変動との関連性の検討を行い, 自由水面近傍で発生する組織構造に関する詳細な研究を行った。

2. 実験装置および実験方法

本実験で用いた水路は, 全長16m, 幅40cm, 高さ50cmの可変勾配型水槽風洞である。計測部は水路両側壁と底面が光学ガラス製である。座標系は流下方向に x 軸, 鉛直上向きに水路底面から y 軸, 静水面から鉛直下向きに z 軸をとる。また, x 軸および y 軸方向の流速変動成分を u , v と定義する。なお, 水路下流端には消波材を設置し波の反射を抑制した。

実験条件を表-1に示す。本研究では上流・下流端を閉めきった閉鎖場において, 図-1に示すような水面形状が3次元式的さざ波および2次元重力波となるように最大風速 $U_{a,max}$ を2通り変化させた条件(Q0V2, Q0V3)をまず行った。次に, 開水路の上流・下流をポンプで連結して循環流として水層に一定の流量(3l/sec)を与えた風波・開水路混成場を作成し水面形状が滑面, 3次元式的さざ波, および2次元重力波となるように最大風速 $U_{a,max}$ を3通り変化させた条件(Q3V1, Q3V2, Q3V3)および無風, すなわち通常の開水路流れのみのケース(Q3V0)の条件の合計6ケースの実験を行った。水深 H は12cmに固定した。 $U_{w,mean}$ は水層における水路中央断面での平均流速であり, LDA計測によって得られた平均主流速分布から算出し, 流れの目安とした。 U_{*b} , U_{*w} は時間平均流速分布に対してそれぞれ水層底面および

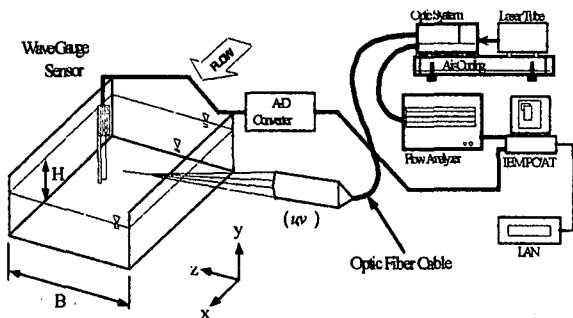


図-2 LDA 装置図

水層界面から対数則を適用して求めた摩擦速度である。有義波高 H_s および平均波長 λ は PIV 画像から無作為に約 50 個のサンプルを抽出し、平均値を求め、それらより算出した。 f_p は風波の卓越周波数であり、主流速変動 $u(t)$ を LDA 計測した後にスペクトル解析から求めた。

レーザー流速計(LDA, Dantec 社製)を用いて点計測を行った。図-2 に点計測の実験装置図を示す。実験条件諸量の測定には空冷式(300mW)の後方散乱型 2 成分アルゴンイオンレーザー流速計を用い 60 秒間の計測を行った。また、水面変動との同時計測の際には水面形状が 2 次元重力波のケース(Q3V3, Q0V3)では容量式波高計, 3 次元式的さ波のケース(Q0V2)では超音波波高計を用い, 計測時間は 180 秒であった。ただし, 容量式波高計は水中で直接計測を行う接触型のため, 横断方向に LDA より 4cm ずらして計測を行った。LDA トラバース装置は水路に直付けで 1/100mm の精度を持っており, 計測周波数は約 100Hz であった。LDA 計測地点は風波が十分発達している上流端から約 9m の地点である。なお, LDA の計測部体積はおおよそ $\Delta x = \Delta y = 0.14\text{mm}$, $\Delta z = 2.27\text{mm}$ である。

図-3 は可視化画像解析装置(PIV)を示す。直径約 $100\mu\text{m}$, 比重が約 1.02 のナイロン 12 粒子をトレーサー粒子としてエチルアルコール液で十分に攪拌した後, 浮遊粒子のみを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 $12\text{cm} \times 12\text{cm}$ の範囲を水路側壁方向から CCD カメラで撮影した。撮影された画像は 30 (Hz) で光ディスクに記憶され, フレームメモリーボードを介して濃度相関 PIV 法により処理され, LLS 平面内の瞬時の多点速度情報を得た。なお PIV 計測地点は LDA とほぼ同地点である。

3. 実験結果及び考察

3.1 PIV 法を用いた閉鎖場における組織構造解析

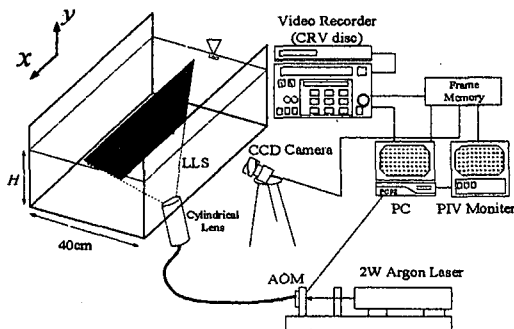


図-3 可視化画像解析装置(PIV)

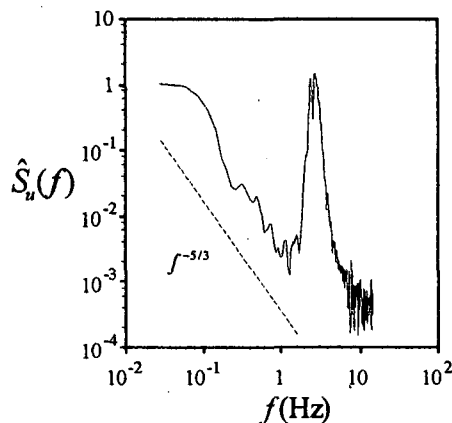


図-4 主流速変動パワースペクトル

図-4 はケース Q0V3 における PIV 法により得られた流速変動 $u(t)$ から算定した界面近傍 ($y'/H_s=1.0$) の規格化されたパワースペクトル $\hat{S}_u(f)$ である。ここで, $\hat{S}_u(f)$ は流速変動 $u(t)$ のパワースペクトル $S_u(f)$ を乱れ強度 u' で無次元化したものである。同図より, 1~10Hz の間で従来から指摘されているように顕著なスペクトルピークが観察され, この卓越周波数は LDA 計測データから算出した卓越周波数 f_p ($=3.1\text{Hz}$) とほぼ一致した。これより, 明確な波立ちの存在する風波場の流速変動は波に起因する変動が大部分を占めていることが分かる。また, スペクトルピークの低周波側および高周波側にはスペクトルの $-5/3$ 乗則の成立する領域がみられる。よって, 風波場の流れは風による界面せん断に起因する吹送流と, 波に起因する回転軌道変動によって構成され则认为される。したがって, 風波場の水流挙動を説明するには流速変動をより詳細に調べる必要があると考えられ, 以下ではウェーブレット解析を用いて流速変動の解析を行った。

図-5 にウェーブレット解析を用いて周波数分解した流速変動時系列の一例を示す。ただし, 各流速変動成分は縦軸方向にそれぞれ $20(\text{cm/sec})$ ずつ原点移動して表示している。スペクトル解析と同様にケ

ース QOV3 における界面近傍の $y'/H_s=1.0$ の点での変化を示しており、瞬間流速変動 $u(t)$ は以下のように便宜的に3つの周波数帯に分離した。

$$u(t) = u^*(t) + \hat{u}(t) + u''(t)$$

u^* : 低周波変動成分 (0.9Hz 以下)

$\hat{u}$: 波動成分 (0.9~7.5Hz)

u'' : 高周波変動成分 (7.5Hz 以上)

同図より、波動成分が低周波変動成分や高周波変動成分に比べ非常に大きな変動をもっており、流速変動の大部分を占めていることがわかる。

PIV 計測で得られた可視化画像によって自由水面近傍において下方へ落ち込む大規模な組織構造 (バースト) が観察された領域の代表点における低周波変動成分 u^* (流下方向), v^* (鉛直方向) およびそれらの相関値 u^*v^* の時系列を図-6 に示す。図に矢印で示すように、10~12 秒の間で相関値 u^*v^* が大きな負値になっており、この10~12秒という時刻はPIV 画像により組織構造が確認された時刻に一致した。杉原ら(1999)³⁾は本研究と同様の風波場水層界面近傍での低周波変動成分の時系列解析を行った結果、風波の卓越周期よりも長いタイムスケールで起こる大規模な乱流バースト ($u > 0, v < 0$) が生成されることを示しており、本研究の結果もこれと定性的に一致している。すなわち、自由水面近傍で下方へ落ち込む組織構造が発生したとき低周波変動成分の相関値 u^*v^* は大きな負値となり、その時の低周波成分の正負は $u^* > 0, v^* < 0$ であることがわかる。したがって、本研究では低周波成分の正負および相関値 u^*v^* の値から組織構造の発生を判断することにする。

図-5、図-6 に示した時系列の波動成分と低周波変動成分の瞬間値 $\hat{u}(t)$, $\hat{v}(t)$ および $u^*(t)$, $v^*(t)$ を4象限に区分して表示したものを図-7 に示す。それぞれの値は乱れ強度で無次元化している。(a)の波動成分は各象限に均等に分布しているのに対し、(b)の低周波成分に関しては第4象限に偏った楕円形に分布していることがわかる。これより、波動成分は回転運動に大きく寄与しているが、下方へ落ち込む組織構造には低周波変動成分が寄与していると考えられる。つまり、自由水面近傍において波による運動を除けば、自由水面は振動する弱い壁として働き、自由水面の界面近傍において開水路壁面乱流に類似した乱れ構造が生じていると示唆される。

3.2 閉鎖場における流れの3次元性

前節では、閉鎖場において自由水面近傍で発生す

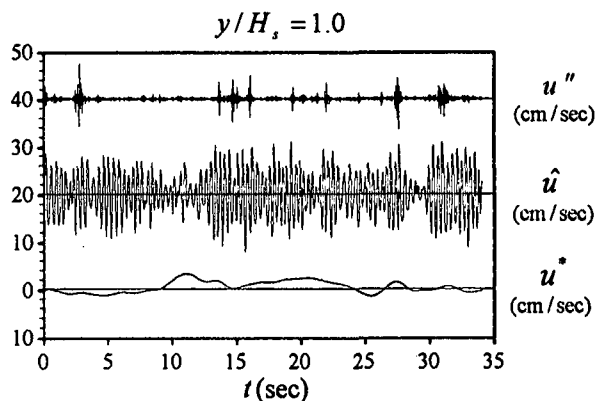


図-5 ウェーブレット解析による流速変動の分解

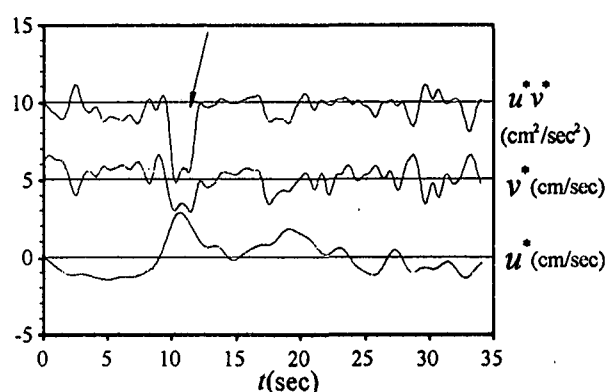


図-6 低周波変動成分時系列

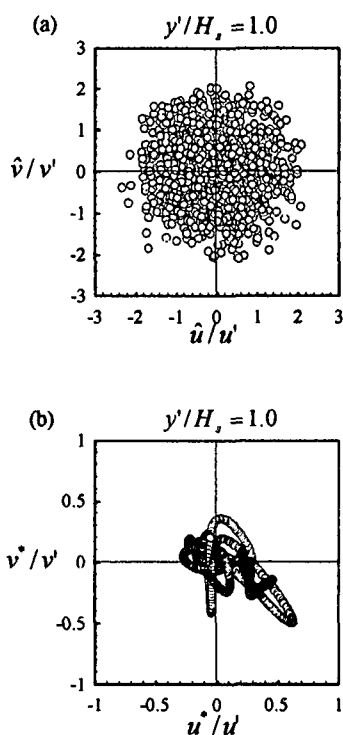


図-7 (a)波動成分および(b)低周波変動成分の4象限寄与分布

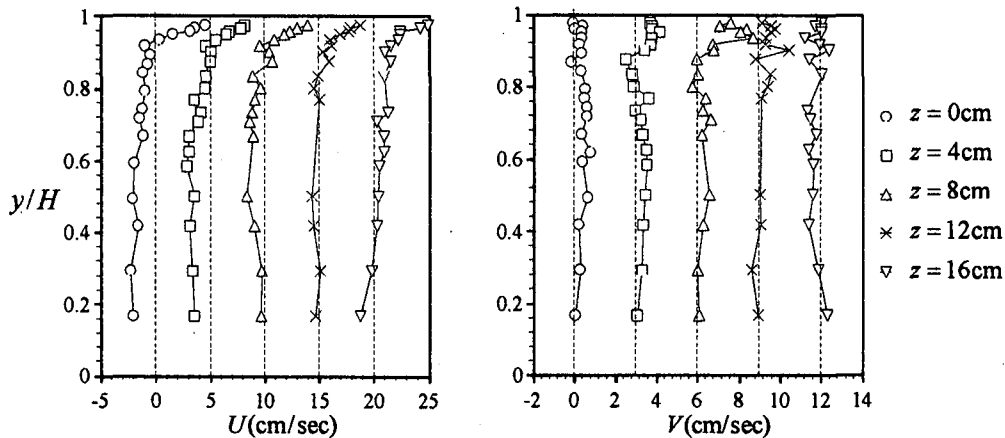


図-8 平均主流速の横断方向変化特性

る組織構造は低周波変動成分によって抽出できることを示した。しかしながら、閉鎖場では反流が存在するという点で開水路流れとは大きく異なり、また、風波発生下では大きな下降流を伴う2次流が発生するという指摘がある¹³⁾ことから、それらと組織構造との関連性は否定できない。よって、組織構造の評価には流れの3次元性や反流の影響を把握しておく必要があると考えられる。そこで、本研究では閉鎖場(Q0V3)においてレーザー流速計を2台用いて同時計測を行い、横断方向における乱流特性の変化および時空間相関構造を解析し、流れの3次元性と組織構造との関連性の考察を行った。

図-8は $z=0\text{cm}$ (中央断面)、4cm, 8cm, 12cm, 16cmにおける平均主流速 U および鉛直方向流速 V の鉛直分布 y/H を示したものである。鉛直座標は水深で無次元を行い、流速は横軸方向に原点をそれぞれ5ずつ平行移動して表示している。主流速に関して、側壁に近づくにつれて平均主流速がゼロになる交差点が界面近傍から底面へ移行し、水路中央断面で反流の最大値が生じて側壁に近づくにつれ反流が弱くなっていくことがわかる。また、平均的に正の値をとる($U > 0$)領域(約 $y/H > 0.9$)においては横断方向の変化は小さいことがわかる。一方、鉛直方向流速に関して、中央断面では水深方向で平均的に正值であるのに対し、 $z=16\text{cm}$ では逆に負値になっている。松永・鶴崎(2002)¹³⁾はアスペクト比 B/H に比例して風波に起因する水深規模の2次流の発生本数が増加することを指摘しており、彼らのデータを参考に推測すると本研究の条件下(アスペクト比 $B/H=3.33$, 卓越周波数 $f_p=3.1\text{sec}^{-1}$, 有義波高 $H_s=1.24\text{cm}$)で発生する2次流は1対または2対と考えられる。以上のことから、中央断面で上昇流が

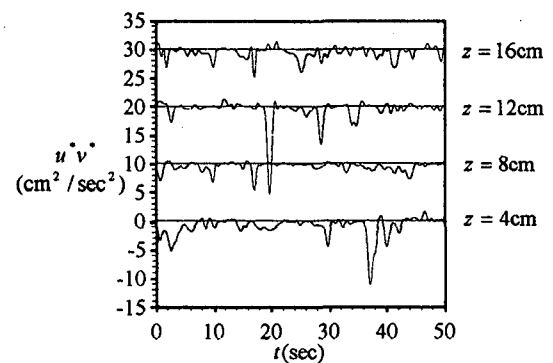


図-9 横断方向における低周波変動成分時系列($y'/H_s=1.0$ の計測点での例示)

生じるような1対の2次流の存在が示唆される。

図-9に低周波変動成分相関値 u^*v^* の時系列の横断方向変化特性を示す。計測点は $y'/H_s=1.0$ で各時系列はそれぞれ10ずつ原点移動して表示している。横断方向位置に関係なく図-6で観察されたような大きな負値がみられ、水路中央断面だけでなく大規模な組織構造が発生していると考えられる。このことから組織構造の発生に関して、 $|z|/(B/2) < 0.8$ の中央領域では横断方向による大きな差異はないと考えられ、組織構造に及ぼす2次流の影響は小さいと思われる。

次に、低周波変動成分 u^* と v^* の2点間の時空間相関係数 $C_{u,u}$, $C_{v,v}$ の分布を図-10に示す。図より、遅れ時間 τ によらず固定点近傍の相関係数は相対的に大きい、固定点近傍以外に特徴的な領域は観察されないことがわかる。つまり、低周波変動成分が反流や2次流によって大きな影響を受けていな

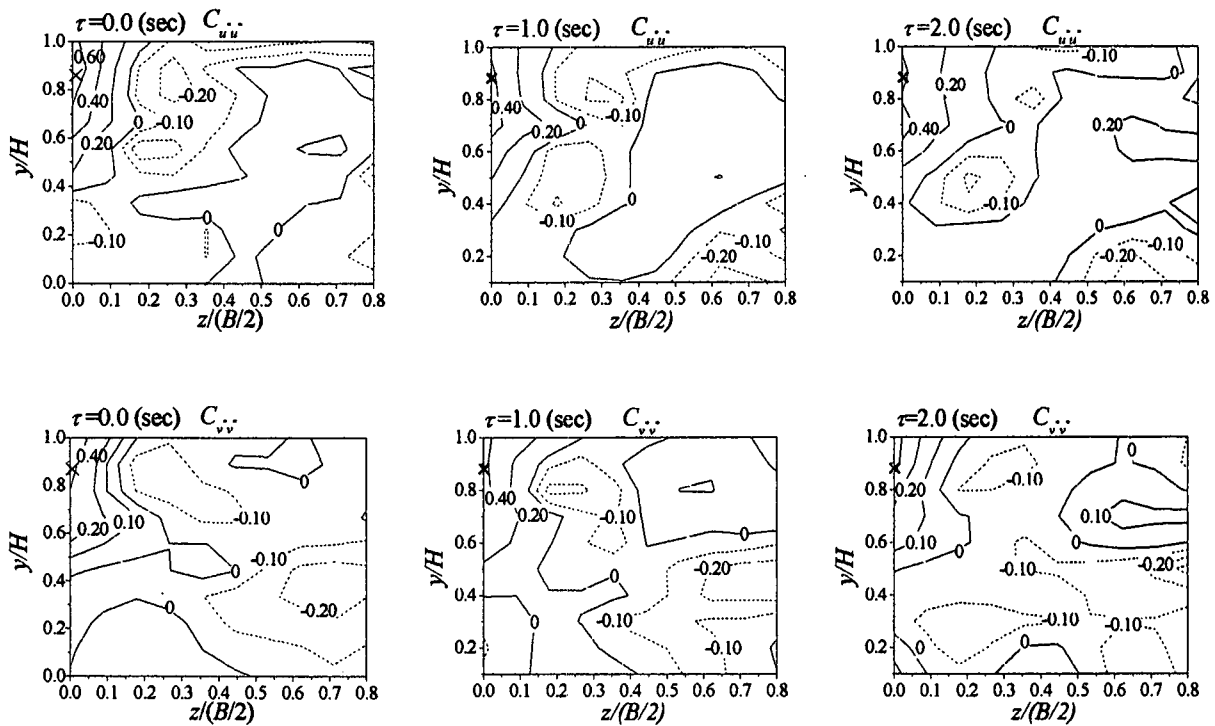


図-10 低周波変動成分に対する時空間相関係数の横断面分布(×は固定 LDA の位置を示す)
(上図：流下方向流速 u の相関，下図：鉛直方向流速 v の相関)

いと考えられる。

以上で得られた知見をまとめると、

- ① 水路中央で上昇流を伴う水深規模の 1 対の 2 次流が発生している。
- ② $|z|/(B/2) < 0.8$ の中央領域では、横断方向位置に関係なく組織構造の発生が認められる。
- ③ 横断面 $y-z$ において自由水面近傍での低周波変動成分と反流域の流速変動との相関は低い。

これらのことより、閉鎖場に特有の反流や風波発生に起因する 2 次流は、前節で述べたような組織構造の直接的な発生要因ではないと考えられる。

3.3 風波・開水路乱流混成場における自由水面近傍での組織構造

次に、風波・開水路乱流混成場における自由水面近傍での組織構造について検討する。各ケースでの $y/H = 0.9$ における低周波変動成分の相関値 u^*v^* を図-11 に示す。ケース Q3V2, Q3V3 では u^*v^* の大きな負値が頻繁に発生しており、閉鎖場と同様に自由水面近傍において組織構造が発生していると考えられる。また、ケース Q3V1 においても若干の負値が観察され、風速 $U_{a,max}$ の増加に伴い負値の大きさは相対的に増加し、頻度も増加する傾向がみられ

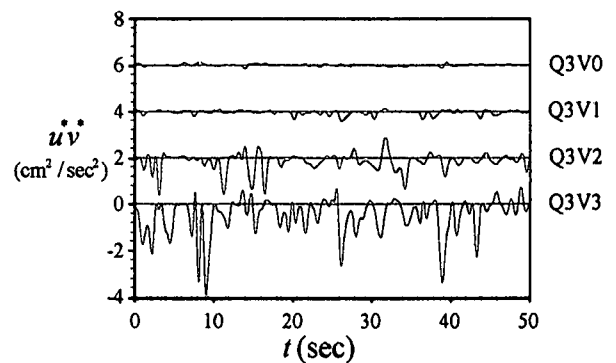


図-11 風波・開水路乱流混成場における低周波変動成分時系列

る。このような低周波変動の構造をより詳細に調べるために、図-11 に示した時系列の低周波変動成分の瞬間値 $u^*(t)$, $v^*(t)$ を 4 象限に区分して表示したものが図-12 である。 $u^*(t)$ および $v^*(t)$ はそれぞれ乱れ強度 u' および v' によって無次元化されている。(a)の開水路乱流のみのケース(Q3V0)では各象限へほぼ均等に分布しているが、風波・開水路混成場の 3 ケース、すなわち、(b)Q3V1(風速 $U_a = 2.4$ m/sec), (c)Q3V2($U_a = 4.3$ m/sec), (d)Q3V3($U_a = 6.5$ m/sec)においては第 2 象限・第 4 象限に偏って楕円形に分布す

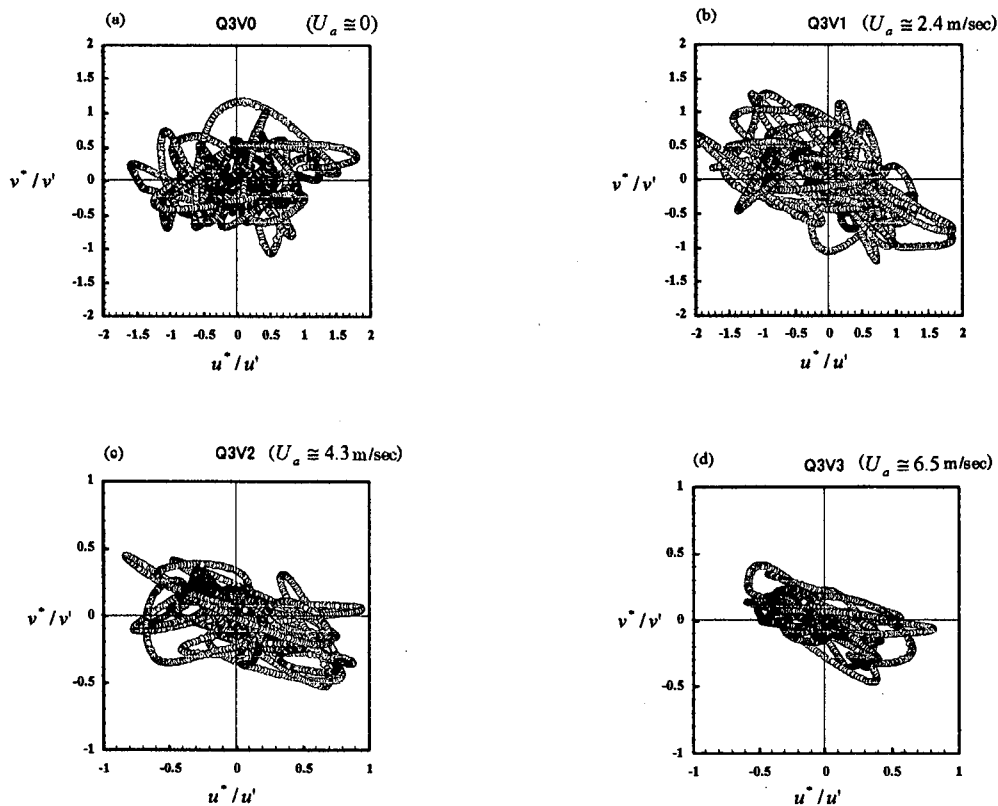


図-12 風波・開水路乱流の混成場における低周波変動成分の4象限寄与分布
(開水路の平均流速は約8cm/secの一定で風速 U_a を変化させている。)

る傾向がみられる。つまり、開水路乱流に風波が加わると自由水面の界面上に風によるせん断応力が発生し組織構造の発生が促されていると示唆される。また、風速の増加に伴い乱れ強度によって無次元化された値は小さくなる傾向がみられるが、これは風波の発生で波による変動成分が増加したために相対的に低周波の変動が小さくなったためであり、絶対値は増加している。

以上のことから、風波・開水路乱流の混成場においても自由水面界面で低周波の組織構造が発生することがわかった。また、風波が発生していない滑面状態のケース Q3V1 においてもその特性がみられたことから風波が発生しなくとも風によるせん断応力(ここでは界面せん断応力と呼ぶ)が存在すれば組織構造が発生すると考えられるが、この点に関しては今後より詳細な検討が必要である。また、風波・開水路混成場においても組織構造が発生するということから、反流の存在が組織構造の発生要因ではないという3.2節で示した結果の妥当性が示唆される。

3.4 界面組織構造の特性

前節までは、閉鎖場および風波・開水路混成場で自由水面界面において発生する組織構造は低周波の

流速変動成分によって捉えられることを示してきた。本節では、閉鎖場のケース Q0V2 (3次元さざ波)および Q0V3 (2次元重力波)、それに風波・開水路混成場の Q3V3 (Q0V3の風波に開水路乱流が加わったケース)の計3ケースを対象に、組織構造のより詳細な解析とともに水面形状や流れ場の相違による組織構造の特性変化を考察する。PIV法より得られた多点同時流速データから組織構造の移流過程を解析し、また、LDAと波高計の同時計測の結果から水面変動との関連性についての考察を試みた。

ケース Q0V3 において、PIV計測で得られた可視化画像において組織構造の発生が確認された時刻を t_0 とし、その時刻以降での低周波変動成分ベクトル、同時刻での相関値 u^*v^* の分布図を図-13に示す。なお、同図において風は左から右に吹いている。図より、組織構造が検出された時刻 t_0 では自由水面近傍で組織的な下降流が確認され、それに対応した領域で相関値 u^*v^* が相対的に大きな負値になっているのがわかる。時刻 $t_0+1.0(\text{sec})$ では下降流は速度を増しながら流下方向に流され、時刻 $t_0+2.0(\text{sec})$ になるとさらに速度を増しながら下降し始め、時刻

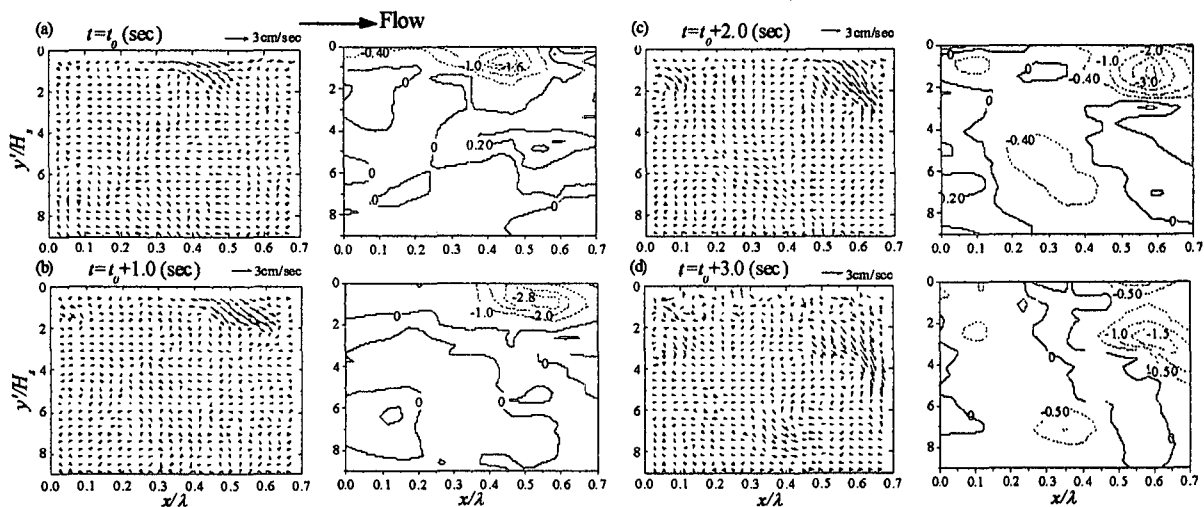


図-13 組織構造の移流過程(Q0V3)

(左：低周波流速変動ベクトル，右：低周波変動相関値 $u^* v^*$ のコンター図)

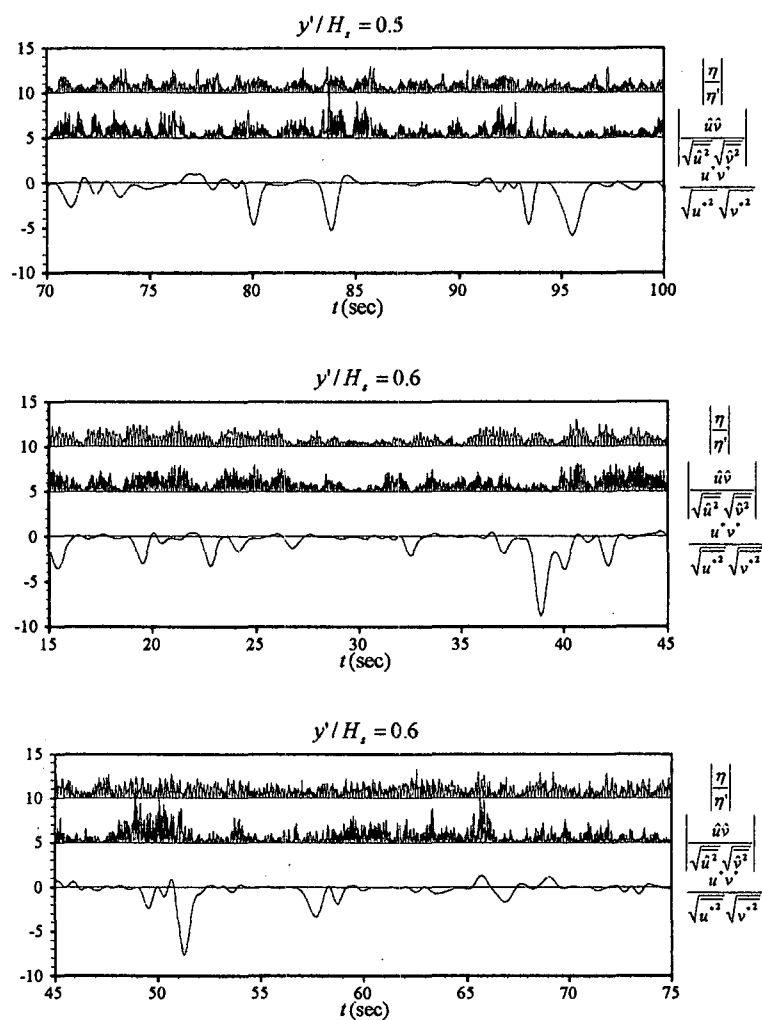


図-14 組織構造と水面変動の時系列
(上図：Q0V2，中図：Q0V3，下図：Q3V3)

$t_0 + 3.0(\text{sec})$ では下降流は消散しつつも約 $y'/H_s = 5$ ほどの深さに達しているのがわかる。この組織構造の一連の挙動は、PIV の可視化画像で目視された流体の挙動をほぼ良好に解析している。

以上より、自由水面の界面から下方へ落ち込む組織構造の挙動は低周波変動成分によって捉えられ、自由水面近傍で発生した組織構造は吹送流や平均流によって流下方向に移流しつつ下降することが分かった。また、組織構造の発生領域は Toba & Kawamura (1996)⁸⁾ らの指摘する DBBL の領域内(有義波高の 3 ~ 7 倍)であると考えられ、低周波のレイノルズ応力成分 ($-u^*v^* > 0$) であることが示唆される。ケース Q3V3, Q0V2 においても同様の結果が得られた。また、組織構造発生時刻 t_0 では波動成分は非常に小さく、この時刻周辺では水面変動が非常に小さい状態であることが PIV 画像から確認された。

次に、LDA と波高計の同時計測より得られたデータを元に組織構造と水面変動との相関関係の解析を試みる。ケース Q0V2, Q0V3 および Q3V3 における低周波成分相関値 u^*v^* 、波動成分相関値 $\hat{u}\hat{v}$ 、水面変動 η の時系列を図-14 に示す。それぞれの値は各成分の乱れ強度(ms 値)によって無次元化しており、図を見やすくするために波動成分相関値 $\hat{u}\hat{v}$ および水面変動 η は絶対値で表示した。図より、各ケースにおいて水面変動および波動成分が大きいときよりもむしろ小さいときに組織構造が発生しやすいという特性がみられ注目される。また、水面変動が大きいときでも波動成分が小さくなっていれば組織構造が発生しやすい傾向もみられる。

以上のことから、水面変動が小さくなっているときには鉛直上向きの流速変動が制限されるようになり、自由水面が弱い壁として働くことで自由水面が波のある開水路乱流の底面に類似した境界条件になっている。したがって、水面変動が小さいときに組織構造が発生しやすくなると考えられる。また、風波は水層の流れと空気層の流れが相互に干渉しながら起こる現象であり、水面変動の大小によって空気層から水層への影響に変化が生じ、そのために水層で組織構造が発生するとも考えられる。

5. 結論

本研究は PIV 法によって流れ場の可視化を行うとともに、2 台のレーザー流速計(LDA)を用いて高精度な流速計測を行うことで、風波発生下における組織構造の解明を試みたものである。本研究では以下のような知見が得られた。

(1) 風波発生下において自由水面近傍では流速変動の大部分が波に起因する変動によって支配されており、自由水面近傍で発生する組織構造の解析には乱れ変動の分離が必要である。風波発生下において自由水面近傍で発生する組織構造は本研究で用いたウェーブレット解析によって分離された低周波変動成分で的確に捉えることができる。この解析手法は閉鎖場のみならず風波・開水路混成場においても有効であり組織構造の発生が確認された。このことより、風波発生下では水面形状や水層の流れの有無に関わらず、自由水面近傍で組織構造が発生することがわかった。さらに、組織構造の発生要因は反流や 2 次流ではないことが示唆された。

(2) 組織構造の挙動は低周波変動成分によって良好に表現でき、自由水面近傍で発生した組織構造は吹送流や平均流によって流下方向に移流しつつ下降することが観察された。また、自由水面近傍では大小の組織構造が発生し、大規模な組織構造は有義波高の約 7 倍の深度まで達することが観察された。さらに、組織構造は水面変動が小さくなっているときに発生しやすく、風波発生下における自由水面近傍での組織構造の発生は水面変動と関連していると考えられる。

謝辞: 本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号 12450200 (研究代表者: 裨津家久) のもとで遂行されたことを記し、これに感謝する。

参考文献

- 1) Wu, J.: On critical roughness Reynolds number of the atmospheric surface layer, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, No. C7, pp. 6661-6665, 1981.
- 2) Shemdin, O.H.: Wind-generated current and phase speed of wind waves, *J. Physical Ocean.*, No. 2, pp. 411-419, 1972.
- 3) Wu, J.: Wind-induced drift currents, *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, pp. 49-70, 1975.
- 4) 光易恒, 草場忠夫: 大気海洋間の運動量交換(2), 九州大学応力研究所報, 第 66 号, pp. 21-35, 1988.
- 5) Toba, Y.: Local balance in the air-sea boundary processes, *J. Oceanogr. Soc.*, Vol. 28, pp. 28-109, 1972.
- 6) Toba, Y.: Similarity laws of the wind wave and the coupling process of the air and water turbulent boundary layers, *Fluid Dyn. Res.*, No. 2, pp. 263-279, 1988.
- 7) Yoshikawa, I., Kawamura, H., Okuda, K. and Toba, Y.: Turbulent structure in water under laboratory

- wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.44, pp.143-156, 1988.
- 8) Toba, Y. and Kawamura, H.: Wind-wave coupled downward-busting boundary layer (DBBL) beneath the sea surface, *J. Oceanogr.*, Vol.52, pp.409-419, 1996.
 - 9) 杉原祐司, 高崎敦彦, 松永信博: 風波下における乱流境界層の構造, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.96-100, 1999.
 - 10) Komori, S., Nagaosa, R. and Murakami, Y.: Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence, *J. Fluid Mech.*, Vol.249, pp.161-183, 1993.
 - 11) 瀬津家久, 吉田圭介, 池田大輔: 水・空気層の同時計測による風波界面の相関構造に関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.547-552, 2002.
 - 12) 瀬津家久, 吉田圭介, 池田大輔: PIV 法を用いた封は界面近傍流体の組織構造に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.457-462, 2003.
 - 13) 松永信博, 鶴崎賢一: 吹送流中に生起する二次循環流の実験的研究, 土木学会論文集, No.705, II-59, pp.67-82, 2002.

(2003 年 4 月 18 日受付)