

PIV法を用いた風波界面近傍流体の組織構造に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON AIR-WATER INTERFACIAL COHERENT STRUCTURES IN WIND-INDUCED WATER WAVES FLOWS BY PIV MEASUREMENTS

瀬津家久¹・吉田圭介²・池田大輔³

Iehisa NEZU, Keisuke YOSHIDA and Daisuke IKEDA

¹フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

^{2,3}学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻

This paper describes an experimental study on turbulent bursting phenomena across air-water interface in wind-induced water waves by using Particle-Image Velocimetry (PIV). The purpose of this study is to clarify coherent structures near the air-water interface in a wind-driven shear layer, and to evaluate an effect on momentum transport due to the bursting events from the interfacial water to water-body flow. As the results of experiments, it is shown that the water flow is a combined flow with a wall shear flow and orbital motions, and that the wave-induced fluctuations have major power in the whole velocity fluctuations. In particular, when the bursting events are detected near the air-water interface by human eyes in the time-series of PIV raw images, only the low-frequency fluctuations are enhanced obviously at that time in wavelet-filter analysis. Therefore, it is inferred that the mechanism of water momentum transport is organized by the wave-induced fluctuations from the air-water interface to the water bulk, not by the bursting events with small fluctuations. It is also recognized by PIV measurements that the bursting events are closely related to the unsteady wave-induced velocity fluctuations near the interface.

Key Words : Air-water interface, Wind-induced water waves, PIV, Interfacial bursting phenomena

1. はじめに

乱流中に観察される組織構造は乱流渦で代表される構造を有し, 乱流境界層内層における組織構造は, 流れ場の可視化による Kline らの研究によってその組織構造パターンが初めて知られた。その後, 開水路流の底面組織乱流構造に関して精力的な研究¹⁾がなされ, 近年では開水路底面近傍で観察されるバースト現象と自由水面における表面更新現象の関連性についても活発に研究がなされている^{2), 3)}。たとえば, Rashidi & Barnerjee⁴⁾は酸素気泡法を用いて底面及び自由水面近傍における組織構造の可視化を行い, 両者が内部変数表示で定量的に同様の傾向を示すことを明らかにした。一方, 近年数値計算手法による乱流解析が盛んに行われており, シミュレートされた組織構造の可視化⁵⁾なども行われるようになってきたが, 乱流統計量に対する境界条件の曖昧さを残すなど問題点も多いことも指摘されている⁶⁾。よって, 組織構造解析には実験的手法, 特に可視化計測が現在でも最も有効と考えられる。

Non-slip条件が課される固定底面シアアが卓越した開水路流れと異なり, slip条件がある程度課される水・空気界面における風シアアが卓越した風波流れにおける組織構造解析は主に界面近傍の流体挙動や乱流境界層が注目されてきた。現在までに, 風

波場における水・空気界面現象を支配する要因として多くの研究者によって界面直下の乱流境界層の存在が指摘されている。Tobaら⁷⁾によれば, 風波直下では乱れ特性が変化しない‘局所平衡領域’が存在し, 風波の相似則の枠組みで捉えられる。彼らはこの領域(乱流境界層)を Downward-bursting boundary layer (DBBL)と名付け, 実験結果からこの境界層が有義波高の数倍のオーダーであると指摘している。また, 風波直下では低周波のバースト構造が存在すると指摘されているが, そのメカニズムについては未だ明らかではない。また, 風波場における水層組織構造に関してはKomoriら⁸⁾, 杉原ら⁹⁾, 筆者ら^{10), 11)}などの研究が挙げられる。特に, 風波場界面組織構造に関する研究はLDAを用いた点計測解析手法が主流であり, VITA法を併用したu-v相関解析や4象限区分半値しきい法などの解析手法が多用されてきた。

上述のように, 既往の研究では風波場の界面乱流境界層および組織構造に関してある程度明らかにされているが, なぜ低周波乱流構造が風波場界面近傍を支配しているのか, またどの程度の影響を及ぼしているのかは明白ではない。そこで, 本研究では明確な波立ちが存在する2次元風波場における水層流体挙動を2次元PIV法によって可視化し, 時間周波数解析手法を利用して, 界面近傍流体の挙動お

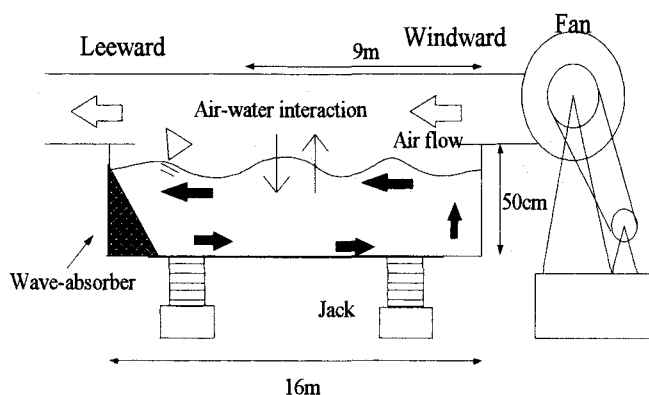


図-1 風洞付き水槽実験装置

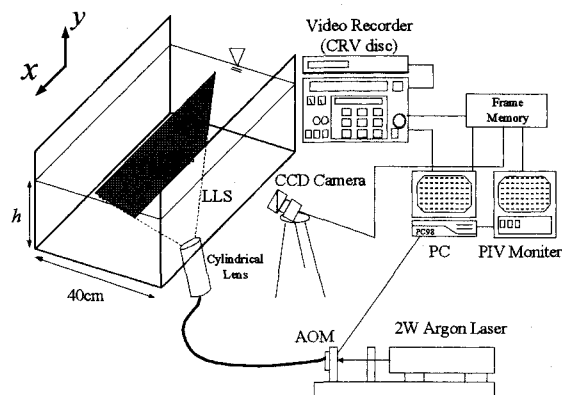


図-2 可視化及び画像解析装置(PIV)

表-1 実験条件表

h (cm)	$U_{a,max}$ (m/sec)	U_{*a} (cm/s)	U_{*w} (cm/s)	η' (cm)	H_s (cm)	λ (cm)	f_p (Hz)
12.0	6.67	40.4	1.32	0.156	1.24	17.20	3.1

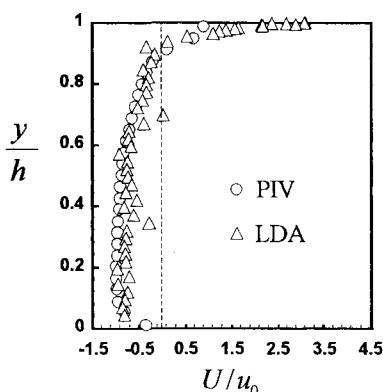


図-3(a) 平均流速分布(PIV&LDA)

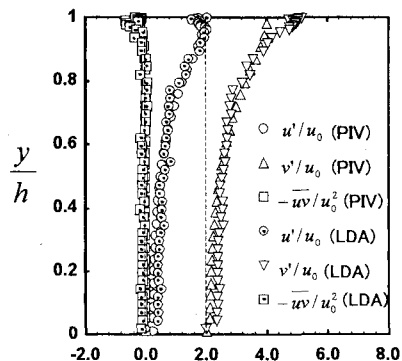


図-3(b) 乱れ分布(PIV&LDA)

よび組織構造に対する風波の影響について考察を試みる。また、本研究で扱うバースト現象とは固定壁面近傍で観察される準定常的な特異流体挙動ではなく、風波場、特に界面に比較的大きな波立ち(自由界面変動)が存在する場合でのバースト現象に関して考察を行った。

2. 実験装置および実験条件

(1) 実験水路

本実験で用いた水路は、全長16m、幅40cm、高さ50cmの水槽風洞である。図-1に概要図を示す。計測部は水路両側壁と底面が光学ガラス製である。

(2) 計測方法及び実験条件

図-2に可視化及び画像解析装置を示す。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、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。直径約 $100 \mu m$ 、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

中に一様に混入し、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 $12cm \times 12cm$ の範囲を水路側壁方向からCCDカメラ(解像度 512×480 pixels)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。PIV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。

一方、実験条件諸量を得るために、レーザー流速計(LDA, Dantec社製)を用いて点計測を行った。点計測では空冷式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た。LDA計測部はPIV計測部とほぼ同一地点である。計測周波数は約100Hzである。また、風波の平均波長 λ 、平均波高 $\bar{H}$ の計測にはデジタルカメラを用いた。

実験条件を表-1に示す。本実験では水深 h を固定し、水路底面は平坦で滑面とした。本研究では風速 $U_{a,max}$ を調整することで、2次元重力波を実現させた。 U_{*a}, U_{*w} は既報¹¹⁾と同様にしてそれぞれ空気層、水層での時間平均流速に対数則分布を適用して求めた界面摩擦速度である。また、 η' は界面変動強度

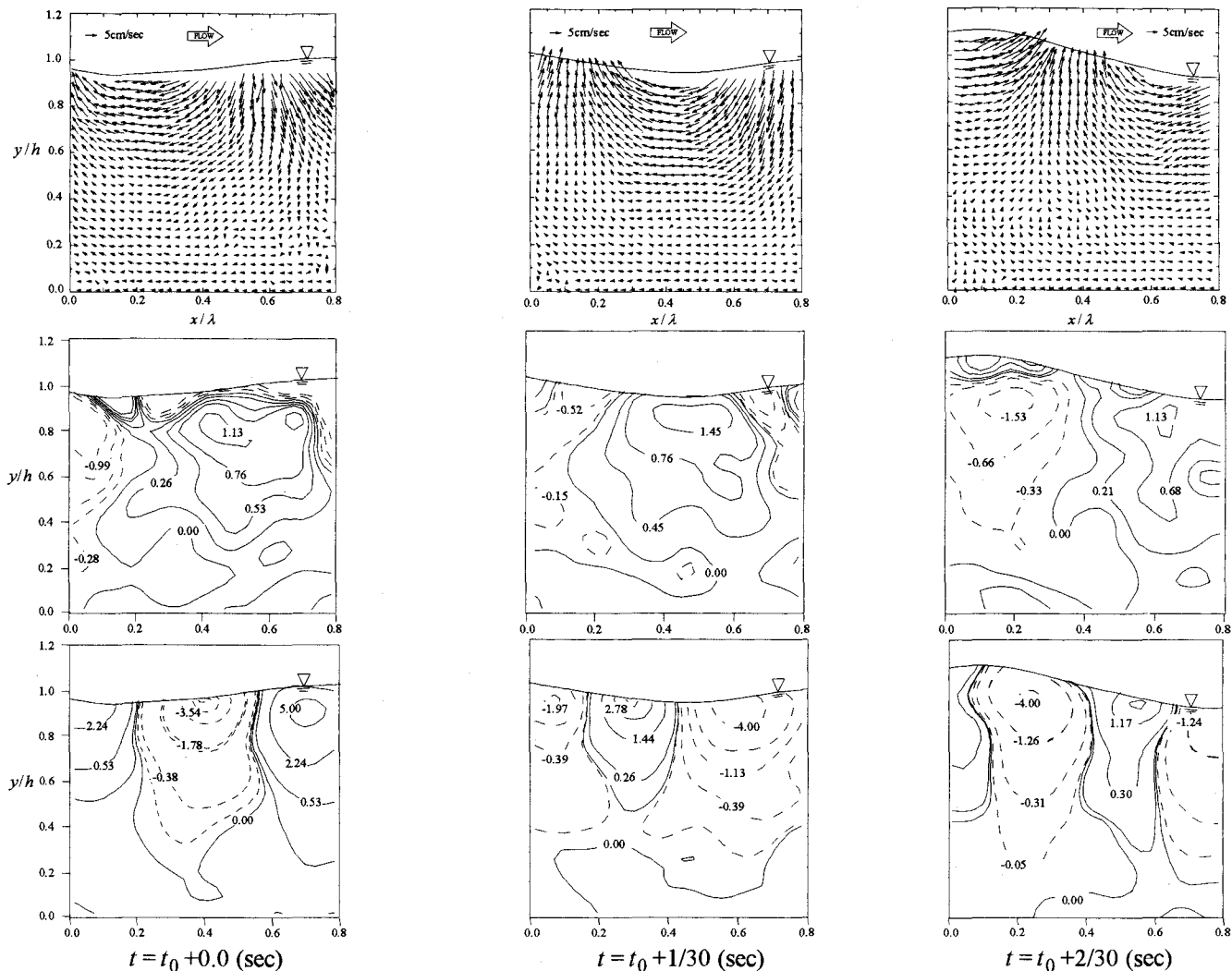


図-4 風波の瞬間構造（上から流速ベクトル図，瞬間渦度コンター，瞬間レイノルズ応力コンター）

であり，超音波波高計で計測した．一方，風波の卓越周波数 f_p は主流速変動 $u(t)$ を LDA 計測した後にスペクトル解析から求めた．有義波高 H_s は平均波高 $\bar{H}$ に対して Rayleigh 分布を適用して求めた．ただし，本論文で記述した界面とは，水・空気境界面の極薄い界面拡散層 (Surface Diffusion Boundary Layer, DBL¹³⁾) を指していない．

3. 実験結果および考察

(1) PIV 精度検証

PIV 法は同一平面内の多点での瞬間流速場が得られるという長所をもつ反面，トレーサー粒子の流れへの追従性の悪化や，パルス間隔 Δt ，また流れの 3 次元性などによる誤差を伴う．そこで，本研究における PIV 法適用の妥当性を検証するために，同一実験条件場における LDA 計測値との比較検討を行った．図-3(a)，(b) は，水層内の平均主流速 U および乱れ強度 u', v' ，レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ に関する LDA による計測値と PIV による計測値を比較したものである．図面中で y/h は水路底面からの無次元化座標，

u_0 はストークスドリフト流速⁷⁾を示し， u' は 2.0 だけ平行移動して図示した．両図より，本 PIV 計測は平均値および乱れにおいて界面近傍を除くと LDA と同程度の精度であることがわかる．また，主流速分布を観察すると，界面以外では戻り流れが存在し，界面以外の水槽内流体場では 2 次流れに注意する必要があることがわかる．一方，乱れ強度は杉原ら⁹⁾と比較して大きな値を有しているが，これは波の変動に起因する流速変動を含むからと考えられる．

(2) 水流瞬間構造

図-4 は PIV 画像を解析して得られた，瞬間流速ベクトル，それに対応する規格化渦度コンター及び規格化瞬間レイノルズ応力コンターの時系列である．ただし，時系列の基準時間を t_0 (sec)，時間間隔は 1/30 (sec) である．渦度は時計回りを正とし， u_0 及び有義波高 H_s で，瞬間レイノルズ応力は u_0^2 で無次元化している．同図より，本 PIV 解析は光の乱反射によるエラーベクトルが存在する界面極近傍を除いて的確に流速ベクトルを算定している様子が伺える．また，渦度コンター及び瞬間レイノルズ応力を観察すると，渦度は界面近傍で吹送流により図面上

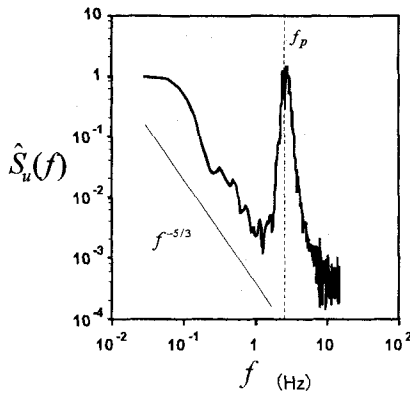


図-5 規格化パワースペクトル $\hat{S}_u$ (PIV法)

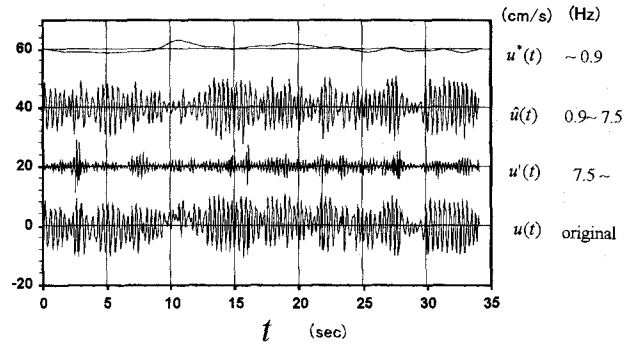


図-6 ウェーブレット解析による流速変動 u の時系列

で左から右へと移流され、瞬間レイノルズ応力は界面近傍で比較的大きな値を有することがわかる。また、風波の位相によりレイノルズ応力の正負が交代している様子も観察される¹⁰⁾。

(3) スペクトル解析

図-5はPIV法により解析された流速変動 $u(t)$ から算定した、界面近傍 ($y/h=0.8$) におけるパワースペクトル $\hat{S}_u(f)$ である。ただし、パワースペクトルは次式を用いて規格化を行っている。

$$\hat{S}_u(f) = \frac{S_u(f)}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_u(f) df} \quad (1)$$

ここで、最大周波数 $f_{\max}$ はナイキスト周波数でPIV計測周波数 (=30Hz) の半分であり、最小周波数 $f_{\min}$ は計測時間 (=1分間) に対応する。同図より、1~10Hzにおいて卓越した変動パワーが観察される。これは既往の研究^{8), 9)}で指摘されている卓越周波数 f_p と見なせる。また、スペクトルピークの低周波側および高周波側には、 $f^{-5/3}$ が成立する周波数領域が観察される。これは、風波場における水流挙動が吹送流による界面せん断流と波による回転軌道変動によって構成されることを示唆していると考えられる^{14), 15)}。したがって、風波場の水流挙動を説明する際には、乱れ変動成分を周波数成分に分解してさらに詳細に調べる必要があると指摘できる。

(4) 組織構造解析

Tobaら⁷⁾のアイデアによる局所平衡下の風波の相似則に基づく、風波場における水層乱流構造は波と結合した特別な乱流境界層(DBBL、有義波高の5~7倍のオーダー)において、卓越周波数よりも低周波のバースト構造に支配されていると論じている。また、Komoriらおよび筆者らによれば、水層における組織構造は空気層における組織構造に誘発されていることが指摘されている。一方、先に示した流速変動パワースペクトル $\hat{S}_u(f)$ を観察すると、卓越周波数 f_p 周辺の流速変動パワーは大きく、水面波の変動が界面近傍のスカラー輸送を担う乱流構造

を支配する要因として考えられる。そこで、本研究ではバースト構造をより明白に把握するために、画像可視化による定性的観察と、PIV法より算定された流速変動時系列の時間周波数解析による定量的観察を併用して、組織構造解析を試みた。

風波場における水層流速変動に対する波の影響を解析する手法には、現在まで主にThaisら¹⁵⁾の準解析的手法 (TDM, Triple Decomposition Method) およびBenilovらのスペクトル解析手法 (LFT, Linear Filtering Technique) が提案されており、これらの手法を風波場に適用した研究例は多く挙げられる¹⁷⁾。Thaisらの手法はDeanの流れ関数法を風波場に初めて応用したもので、流速変動と水面変動の同時計測を行うことで、以下のように流速変動を分解する。

$$\tilde{u}(t) = \bar{u} + u_p(t) + u_r(t) + u'(t) \quad (2)$$

ただし、 $\bar{u}$ は吹送流速、 $u_p(t)$ は波のpotential成分、 $u_r(t)$ はrotational成分、そして $u'(t)$ はランダムな変動を示す。ここで、 $\bar{u}$ は平均流速に、 $u_p(t) + u_r(t)$ は波の軌道流速に対応するものと考えられる。なお、 $u_p(t)$ の算定には計測値と解析的予測値の残差を最小にする方法で、また $u_r(t)$ の算定にはBenilovらのスペクトル解析の考えを援用する。また、スペクトル解析手法では波による変動強度は算定されるが、変動時系列は算定されない。一方、本研究では組織構造検出の定量的解析を行うために、Daubechiesのウェーブレットフィルタによる時間周波数解析を行った。Daubechiesのウェーブレットフィルタによって、変動流速は以下のように分解される。

$$u(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \langle \phi_{mi} | u \rangle \phi_{mi}(t) + \sum_{j=m-\infty}^{-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle \psi_{ji} | u \rangle \psi_{ji}(t) \quad (3)$$

ただし、 ϕ_{ij}, ψ_{ij} (i, j は整数、 m は計測時間 T に依存する整数で、 $m = \text{int}(\log_2 T)$) はそれぞれ2のべき乗に離散化されたスケーリング関数及びマザーウェーブレット関数である。上式で第1項が近似流速成分、第2項が周波数帯に分離された変動流速の総和を示す。図-6は図-5における流速変動を上記フィルタを用いたウェーブレット解析によって分解した結果である。ただし、流速変動 $u(t)$ (original) は便宜的に以下のように分離した。

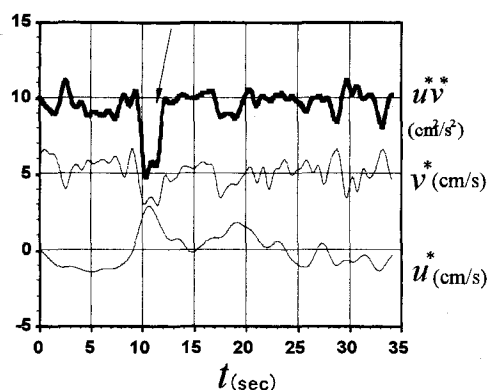


図-7 バースト時における低周波変動流速時系列

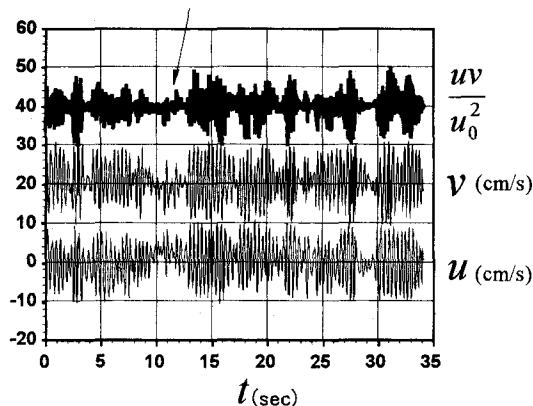


図-8 バースト時における乱れ変動流速時系列

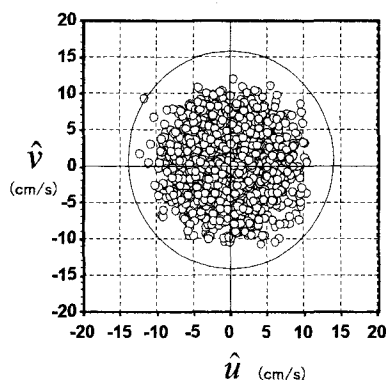
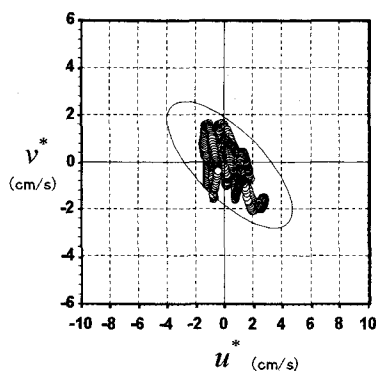


図-9 各周波数帯流速変動成分の4象限に対する寄与分布 (左：低周波成分，右：卓越波周辺成分)

$$u(t) = u^*(t) + \hat{u}(t) + u'(t) \quad (4)$$

ここで、 $u^*(t)$, $\hat{u}(t)$, $u'(t)$ はそれぞれ概算で3つの周波数帯 (①低周波領域 $f_{\min} \sim 0.9(\text{Hz})$, ②卓越波領域 $0.9 \sim 7.5(\text{Hz})$, ③高周波領域 $7.5 \sim f_{\max}(\text{Hz})$) に分離された変動流速である。同図より、卓越周波数近傍の変動は流速変動の大部分を占めていることが示されている。また、これは先に示したスペクトル解析の結果を支持していることもわかる。さらに、風波の卓越周波数近傍の流速変動は非定常性が非常に強く、かつ比較的振幅の大きな位相の異なる波動が重なっていることもわかる。これは風波が非線形性を有することを示唆しており、バースト構造の解析上、こういった波動成分の非定常性もしくは非線形性を十分に考慮する必要があることを示していると考えられる。

図-7には可視化画像を目視した際に、界面直下にて周囲の流体と比較して相対的に急激な下降流が観察された領域の代表点において、ウェーブレットフィルタを作用させた時の低周波流速変動 $u^*(t)$, $v^*(t)$ およびその相関値 $u^*v^*(t)$ の時系列を鉛直方向に5だけずらして示したものである。同図より、時刻 $t=10(\text{sec})$ 近傍で負の大きな相関値が観察される。また、この時刻においては目視によって下降流が観察されていた。この結果から、下降流が観察された際には低周波バースト変動 ($u^*(t) > 0, v^*(t) < 0$) が存在することがわかる。このときレイノルズ応力

$-\overline{u^*v^*}$ は正值をとることもわかる。一方、PIV法によってこの下降流の速度は数cmオーダーで界面摩擦速度 U_{*a} の10分の1程度で、到達深度はばらつきがあるが概数で波高の数倍程度であった。また、本研究で観察されたバースト構造の発生頻度は20秒～30秒に一度程度のものであった。これらの結果は風波直下の組織構造に関する杉原らの既往の研究と一致し、低周波変動のレイノルズ応力 $-\overline{u^*v^*}$ は正值を有し、界面近傍での通常のレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ が負値を有する原因が波の変動によりもたらされることも指摘できる。

一方、図-8には上記のバーストが観察された際の変動流速 $u(t), v(t)$ およびストークスドリフト流速で正規化した相関値 $uv(t)/u_0^2$ の時系列を示した。同図より、図-7にてバースト現象が観察された時刻では、変動流速相関値 $uv(t)/u_0^2$ は比較的小さいことがわかる。よって、このことから風波直下の低周波バースト構造が運動量輸送には相対的にあまり寄与をしないことがわかる。このことから、界面からの瞬間的な運動量輸送においては卓越波近傍の周波数変動流速が支配的であるが、その一方で上下方向の時間平均的な質量輸送においては低周波変動も効果的な働きがあることを示唆している。また、低周波成分が大きな値を示す時には卓越波周波数成分は小さくなることも観察できる。つまり、バースト構造が観察されるときには、波の運動が比較的弱ま

っており、界面が一種の弱い壁¹⁸⁾として働くことで界面近傍流体が鉛直上向きの運動が抑制され、その結果、下向きのせん断バーストが引き起こされるものと推察される。

図-9には界面近傍点における流速変動成分 $u-v$ を低周波成分 f^* と卓越波周辺成分 $\hat{f}$ に関して4象限区分して示した。同図より、 u と v の積は卓越波周辺成分 $\hat{f}$ の方が大きいことがわかる。また、低周波成分 f^* では第2象限と第4象限が卓越しているが、 $\hat{f}$ では総時間内でほぼ均等であり等方に分布している。よって、低周波成分による運動量輸送は下方に卓越し、波動成分による運動量輸送には卓越性や偏りが存在しないことがわかる。一方、図-10には界面近傍($y'=y-h$, δ_w はレイノルズ応力がゼロ値となる界面からの点)における流下方向及び鉛直方向の歪度 S_u, S_v (ただし、 $S_u \equiv \overline{u^3}/(\overline{u^2})^{3/2}$)と尖度 F_u, F_v ($F_u \equiv \overline{u^4}/(\overline{u^2})^2$)を卓越波成分と低周波成分に分離して示した。同図より、界面近傍で卓越波に比べて低周波成分は歪度が観察され、特に鉛直方向成分は負値への偏りが観察される。また、低周波の F_v はガウス分布を表すライン($F=3.0$)より大きい。これは、低周波成分 f^* が界面近傍で瞬間的な流体運動によって、組織的に界面下方へと運動していることを示しているものと考えられる。

4. おわりに

本研究は明確な波立ちが存在する2次元風波場における水層流体挙動を2次元PIV法によって可視化し、時間周波数解析手法を利用して界面近傍流体の挙動および組織構造に対する風波の影響について考察を試みたものである。その結果、水層界面直下で卓越波の周期よりも長い周期の低周波変動バースト構造が観察された。また、この時、乱れ変動による運動量フラックスは相対的に小さいことが判明した。今後、本研究結果の妥当性を鋭意に検証するとともに他の研究成果を加味して、風波場の乱流構造の詳細について検討していきたい。

参考文献

- 1) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.
- 2) Komori, S., Murakami, Y. & Ueda, H.: The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.203, pp.103-123, 1989.
- 3) 瀬津家久, 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, No.586, II-42, pp.51-60, 1998.
- 4) Rashidi, M. & Banerjee, S.: The effect of boundary conditions and shear rate on streak formation and breakdown in turbulent flows, *Phys. Fluids A*, Vol.2, No.10,

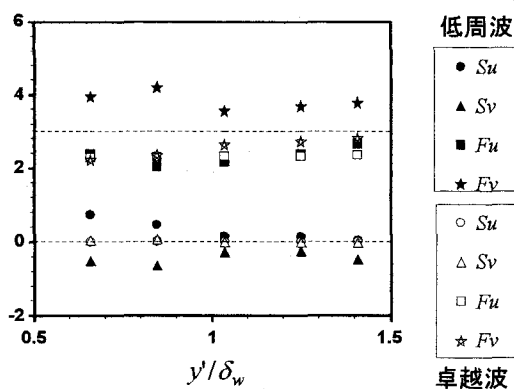


図-10 スキューネスとフラットネス
(低周波および卓越波成分の比較)

pp.1827-1838, 1990.

5) S. Komori et al.: Direct numerical simulation of three-dimensional open-channel flow with zero-shear gas-liquid interface, *Phys. Fluids*, Jan., pp.115-125, 1993.

6) 横嶋哲, 中山昭彦: 微小水面変動仮定に基づく開水路乱流の直接シミュレーション, 第14回数値流体力学シンポジウム, B02-1, 2000.

7) 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.

8) 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.

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) 瀬津家久, 中山忠暢: 風波発生下における空気層及び水層における瞬間構造に関する研究, 水工学論文集, 第44巻, pp.897-902, 2000.

11) 瀬津家久・牛島省・吉田圭介: 砕波を伴う風波の界面乱流構造に関する研究, 土木学会論文集, No.684, pp.69-80, 2001.

12) 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近傍流体の相関構造に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.547-552, 2002.

13) 中村由行・村井大享: 水表面におけるガス交換の流体力学的モデル化とガス交換機構について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.111-115, 1999.

14) 安田孝志・水谷夏樹・板野誠司・井坂健司・川越雄太・小野田武: 強風下に生成される水面バースト層とその乱流特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.106-110, 2000.

15) 加藤始, 大島直樹, 信岡尚道: 画像流速計を用いた吹送流の鉛直分布に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.241-245, 2000.

16) Thais, L. and Magnaudet, J.: Turbulent structure beneath surface gravity waves sheared by the wind, *J. Fluid Mech.*, Vol.328, pp.313-344, 1996.

17) たとえば, Cheung, T.K. and Street, R.L.: The turbulent layer in the water at an air-water interface, *J. Fluid Mech.*, Vol.194, pp.133-151, 1988.

18) Rashidi, M. & Banerjee, S.: Turbulent structure in free-surface channel flows, *Phys. Fluids A*, Vol.31, No.9, pp.1827-1838, 1990.

(2002. 9. 30受付)