

風波発生下での空気層及び水層における 瞬間構造に関する研究

INSTANTANEOUS STRUCTURES OF AIR AND WATER LAYERS IN WIND WATER WAVES

瀬津家久¹・中山忠暢²

Iehisa NEZU and Tadanobu NAKAYAMA

¹正会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学教室 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生会員 日本学術振興会特別研究員
京都大学大学院 環境地球工学専攻

Instantaneous structures of both air and water layers were measured by using PIV method in wind water waves. Furthermore, turbulence structures at various phase of wind waves were evaluated by applying phase-averaged method. Reynolds stress distributions are much different with each layer. Reynolds stress contributions take a greater value on windward side of wave crest. It became clear that these phenomena are closely related to the generation mechanisms of coherent vortices both in air and water layers, which approach the wave periods in the faster wind velocity.

Key Words : wind water waves, instantaneous structures, PIV, phase-averaged method, bursting period

1. 緒論

著者らはこれまで水・空気2層流に関して両層での乱流構造及び気体輸送特性との関連性について研究を行ってきた^{1,2)}。一方、水・空気界面の相互作用の過程を厳密に評価するためには両層での瞬間構造・組織構造の挙動を調べる必要がある。Chang *et al.*(1971)³⁾は風波上の空気流について風波上の各位相での平均風速・乱れ強度の位相平均を求めている。また、各位相でのエネルギースペクトルを求めることによって組織構造との関連性について評価を行っている。Takeuchi *et al.*(1977)⁴⁾は同様な流れについて瞬間レイノルズ応力についての考察を行っている。Kato and Sano(1971)⁵⁾もまた同様な研究を行っており、水面変動との関連性やクロススペクトル等についても評価している。さらに、Kawai(1982)⁶⁾は微細な粒子を用いた可視化手法によって、風波背後の瞬間的な空気流の剥離について定性的な評価を行っている。これらの研究をもとに、Kawamura and Toba(1988)⁷⁾は風波上の空気層に存在する組織構造に関して興味深い研究を行っている。彼らは固定床上に発生するバースト現象との比較を通して、風波上に発生するバースト現象を説明するために"big burst"モデルと"small burst"モデルの2つを提案し、界面での相互作用に重要な役割を果たすことを指摘している。一方で風波内部の流れの構造に関して、Okuda(1982a, 1982b, 1982c)^{8),9),10)}は一連の研究によって渦度

分布、流線パターン及び内部の圧力場についての研究を行っている。Esfahany and Kawaji(1996)¹¹⁾は風波下の水流中での流速分布について、トラフ下よりもクレスト下の方が主流速が大きいことを実験的に示している。また、Rashidi *et al.*(1991)¹²⁾は水素気泡法を用いた可視化によって水・空気界面近傍での組織構造の挙動について考察を行っており、気体輸送特性との関連性について若干の検討を行っている。さらに、Komori *et al.*(1993)¹³⁾は水・空気界面近傍での両層における組織構造の関連性について模式図を提案している。その中で、空気層での剥離流れが再付着するあたりから上方に向かって組織渦が発生するとともに、水層では表面更新渦が水面下に潜り込み、これらの2つの組織渦が気体輸送と密接に関連していることを述べている。

以上のように、風波についてこれまで乱流構造及び定性的な組織構造についてはある程度明らかにされているものの、風波のどの地点で両層での組織構造が発生するのか、及び両組織構造の関連性について定量的に十分に明らかにされていない。そこで、本研究ではPIV法及びレーザ流速計と超音波波高計の同時計測による位相平均手法を用いることによって水・空気両層での瞬間構造の評価、及び両組織構造の関連性について検討を行った。

2. 実験方法

表-1 水理条件

case	H (cm)	$U_{a,max}$ (m/s)	U^*_a (cm/s)
w1f0	4.0	1.49	5.34
w2f0	4.0	4.39	21.37
w3f0	4.0	8.41	37.99

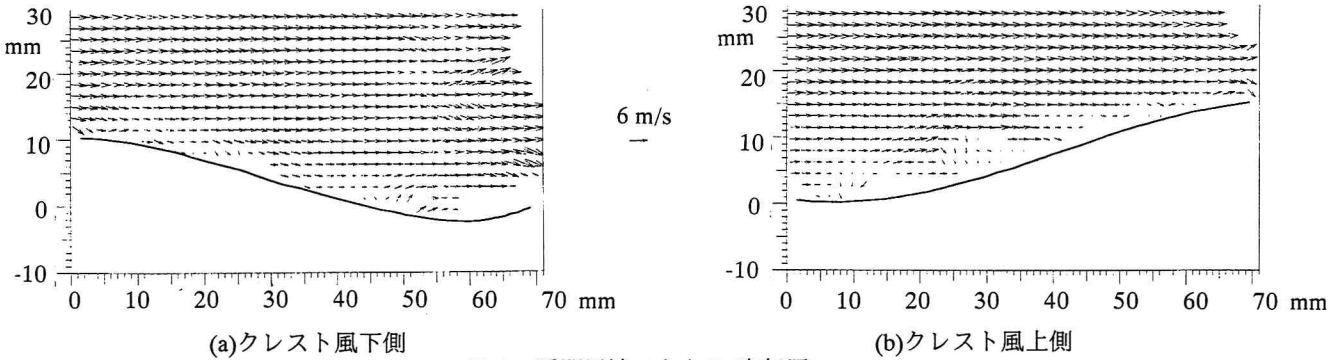


図-1 瞬間風速ベクトル(空気層)

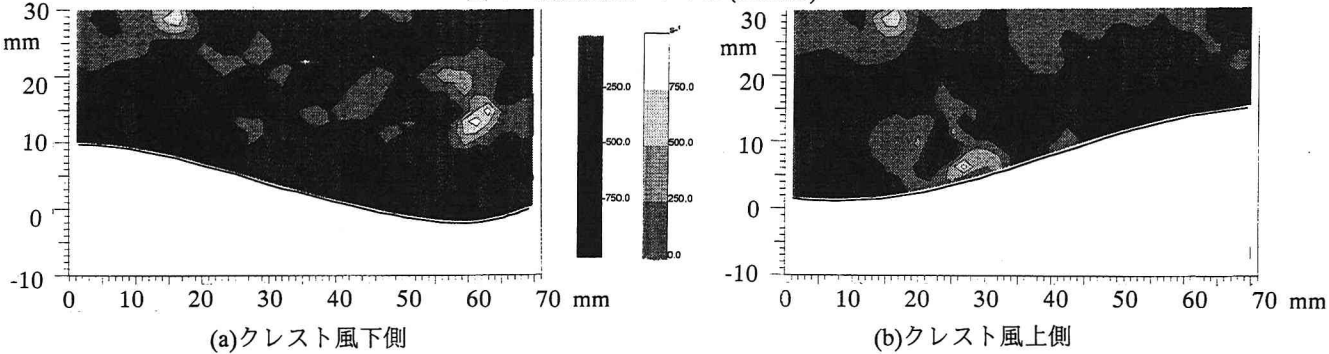


図-2 瞬間渦度のコンター(空気層)

本実験は全長16m、幅40cm、高さ50cmの風洞付き水路を用いて行った。座標系は流下方向を x 、水路底面から上向きに y 、界面から下向きに y' ($y'=H-y$, H は水深)、界面から鉛直上方に z とした。流速変動成分は流下方向成分を u 、鉛直方向成分を v とした。表-1に水理条件を示す。実験は風によるシアの卓越する風波を対象として行った。 H は水深、 $U_{a,max}$ は空気層での最大風速、 U^*_a は空気層での風速分布に対数則を適用して求めた摩擦速度、 η' は水面変動強度である。全てのケースについて水深は4cmに固定した。実験の詳細については中山・瀬津(1999a, b, c)^{1),2),14)}を参照して頂きたい。瞬間流速の計測にはPIVシステム(Dantec社製)を用いた。ダブルキャビティのYAGレーザを水路底面もしくは上方から照射し、水路側壁方向に設置したCCDカメラ(ピクセル分解能1008×1018)によって水路中央断面における瞬間流速計測(0.6秒間隔)を行った。また、気流を高精度に計測するためにシーディング発生装置を用いた。この計測システムではベクトルマップをほぼリアルタイムでモニタすることができる。さらに、500mWの4ビーム後方散乱型2成分レーザ流速計(Dantec社製)を用いて水側及び空気側の水路中央断面における計測を行った。その際に、分解能が0.1mmの超音波波高計(Keyence社製)との同時計測を行い、位相平均手法を用いることによって風波の各位相での乱流構造の評

価を行った。

3. 位相平均手法

風波発生下での瞬間流速変動 u_i は次式のように分離できる⁴⁾。

$$u_i(x,t)=U_i(x)+\bar{u}_i(x,t)+u_i'(x,t) \quad (1)$$

ここで、 U_i は時間平均された流速、 $\bar{u}_i$ は波によって誘起された変動成分、 u_i' は乱れによる変動成分である。位相平均 $\langle u_i \rangle$ は流速変動と水面変動の同時計測を行うことによって次式で定義される。

$$\begin{aligned} \langle u_i(x,t) \rangle &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_i(x,t+nT) \\ &= U_i(x) + \bar{u}_i(x,t) \end{aligned} \quad (2)$$

T は波高計を用いて計測した風波の周期(s)である。よって、式(1)の u_i' は次式のように変換される。

$$u_i'(x,t)=u_i(x,t)-\langle u_i(x,t) \rangle \quad (3)$$

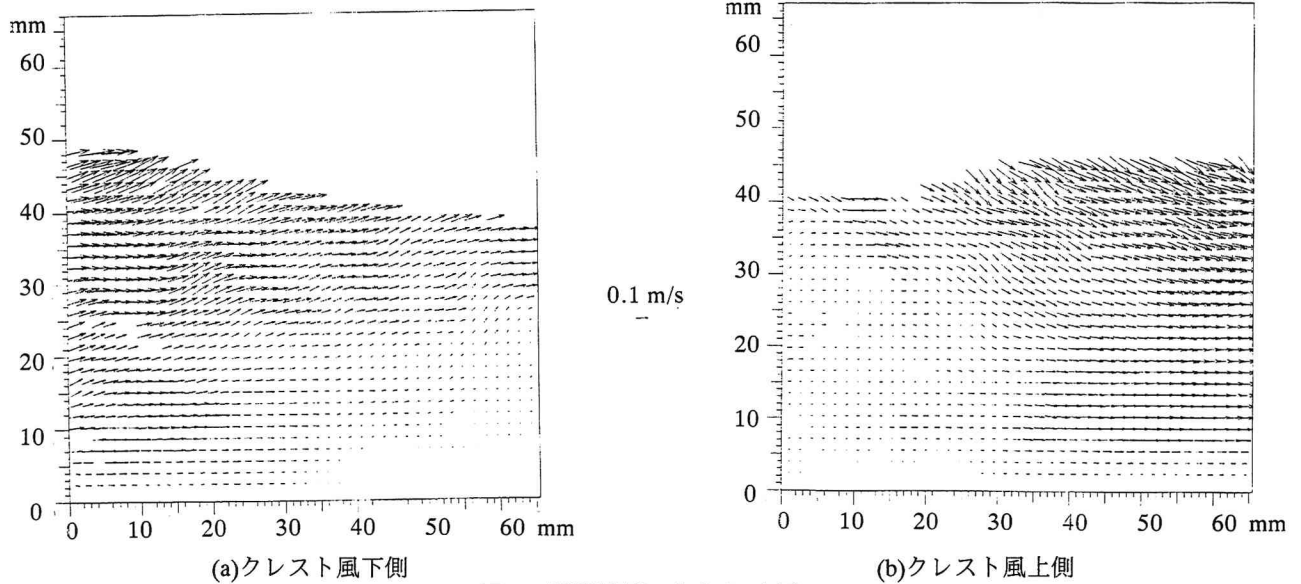


図-3 瞬間流速ベクトル(水層)

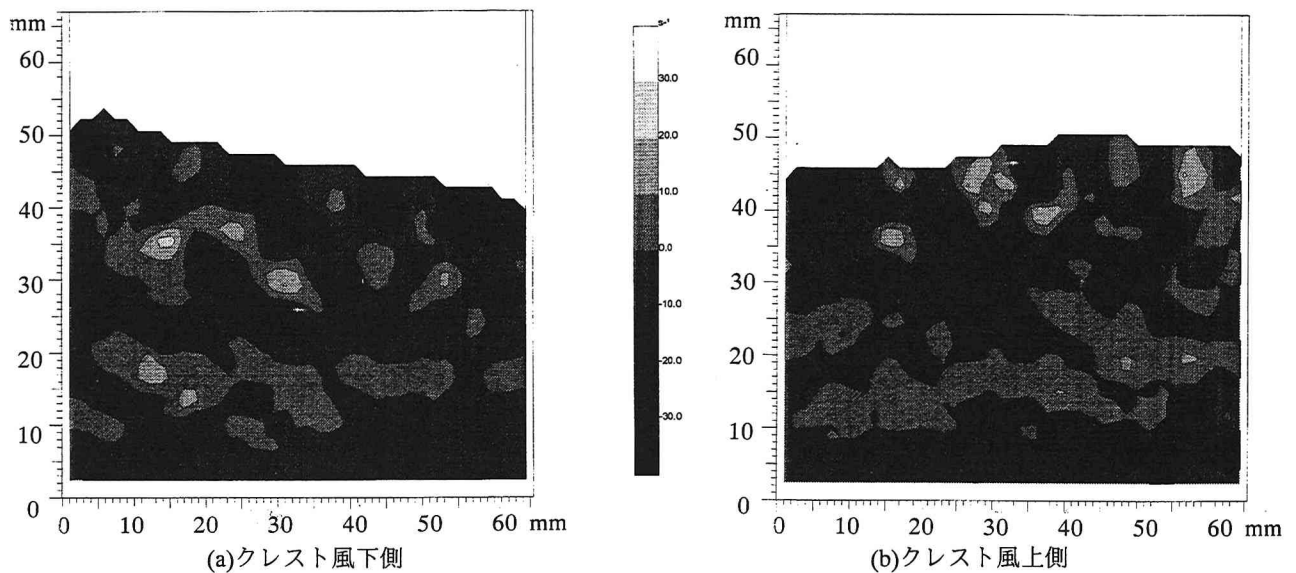


図-4 瞬間渦度のコンター(水層)

4. 実験結果および考察

(1) 空気層及び水層での瞬間構造

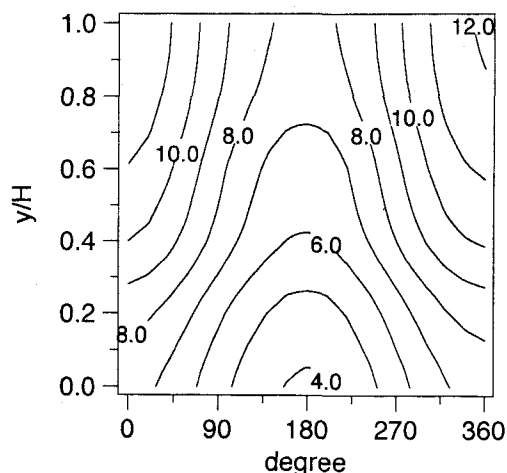
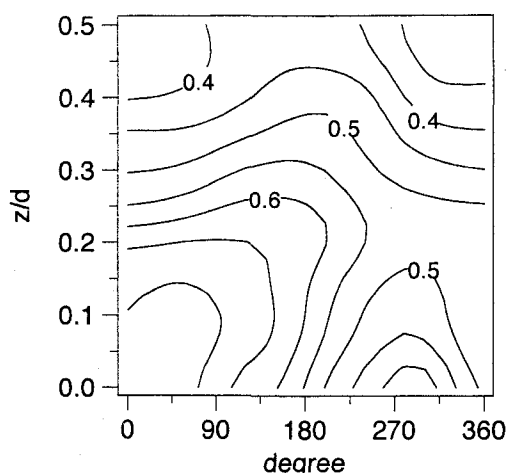
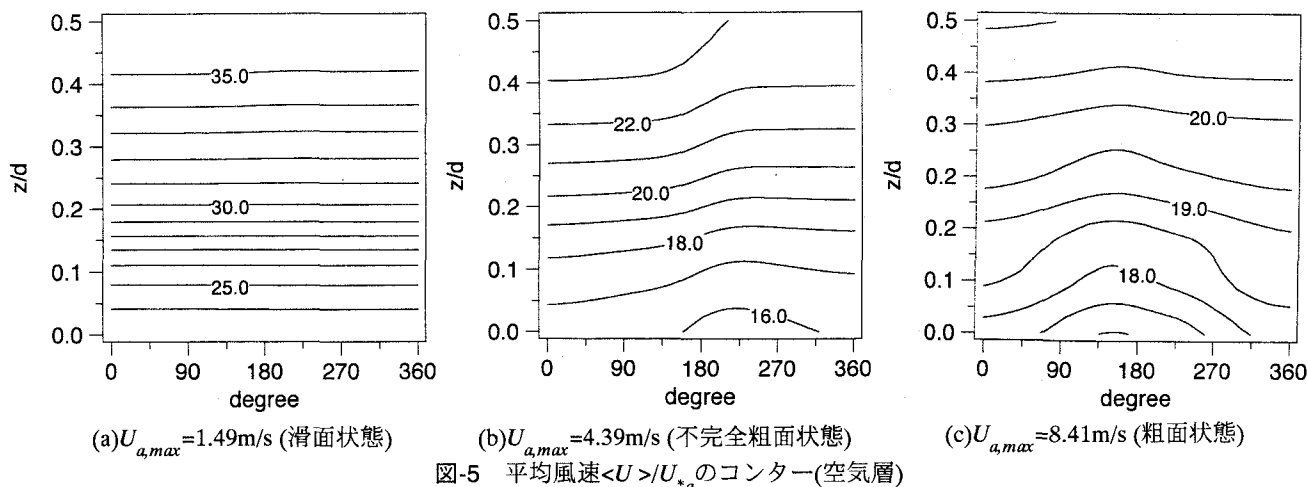
a) 空気層での瞬間構造

図-1(a)及び(b)は $U_{a,max}=8.41\text{m/s}$ のケース(粗面状態¹⁴⁾)について、PIV法を用いて計測した空気層のクレスト風下側及び風上側での瞬間風速ベクトルである。同図において、風は左から右に向かって吹いている。図より、Kawai(1982)⁹⁾が指摘しているようにクレスト風下側にはクレスト頂部から剥離して下方に向かう流れが見られる。図-2(a)及び(b)は図-1(a)及び(b)に対応する瞬間渦度 $\Omega_a (= \partial v / \partial x - \partial u / \partial z)$ 、反時計回りを正とする)の分布である。低風速で水面が穏やかなケースでは、中山・瀬津(1999d)¹⁵⁾によるPIV法を用いた滑面開水路流れと同様に高渦度領域が比較的周期的に発生していた。一方、風速が大きくなると図のように負の高渦度領域がクレスト風下側の剥離領域及びクレスト風上側の広い領域に渡って見られ、渦度分布が風波の形状に大きく依存するように

なることがわかる。

b) 水層での瞬間構造

図-3(a)及び(b)は図-1と同様のケースについての水層での瞬間流速ベクトルである。図-3(a)より、クレスト風下側では高速の上昇流体が発生していることがわかる。また、図-3(b)より、クレスト風上側では高速の下降流体が発生している。このような瞬間流速ベクトルはOkuda(1982b)⁹⁾による実験結果及びKomori *et al.*(1993)¹³⁾による計算結果と非常に良く一致している。一方で、Esfahany and Kawaji(1996)¹¹⁾による実験はクレスト部で高速流体が見られるが、鉛直方向流速の向きがクレスト前後で本研究、Okuda(1982b)⁹⁾及びKomori *et al.*(1993)¹³⁾と反対であり、実験の精度が疑わしい。図-4(a)及び(b)は図-3(a)及び(b)に対応する瞬間渦度 $\Omega_w (= \partial v / \partial x - \partial u / \partial y)$ 、反時計回りを正とする)の分布である。Okuda(1982a)⁸⁾はクレスト風下側に高渦度領域が存在することを指摘している。しかしながら、点計測を用いているために計測点間隔が粗く、十分に定かではない。図より、クレ



スト風上側(b)に比べて風下側(a)の方に負の高渦度領域が多く見られる。

(2) 位相平均手法による各位相での乱れ構造

a) 空気層での乱れ構造

図-5(a)-(c)は $U_{a,max} = 1.49$ (滑面状態), 4.39 (不完全粗面状態), 及び 8.41 m/s (粗面状態)と変化させた場合における, 1波長内での位相平均した平均風速 $\langle U \rangle / U_{*a}$ のコンターである。 d は空気層高さの半分である。 U_{*a} は平均風速分布に対数則を適用して求めた摩擦速度である。図中の 0° 及び 360° は波のクレスト, 180° はトラフに対応し, 風は左から右に向かって吹いている。図より, 風速が増加して風波が発達するにつれてクレスト近傍で風速が大きくなっていく(加速流れ)ことがわかり, 従来の結果³⁾と一致するとともに, 固定床上での流速分布と類似している。図-6は $U_{a,max} = 8.41 \text{ m/s}$ のケースについてのレイノルズ応力 $-\overline{u'v'} / U_{*a}^2$ の分布である。Takeuchi et al.(1977)⁴⁾はクレスト風下側でシアーが大きくなることを指摘している。図より, クレスト近傍で値が大きくなっており, 特にクレスト頂部から風下側の上方に向かってシアーが大きく発達していることがわかる。

b) 水層での乱れ構造

図-7は $U_{a,max} = 8.41 \text{ m/s}$ のケースの平均主流速 $\langle U \rangle / U_{*w}$

U_{*w} のコンターである。 U_{*w} は水面を基準にした平均流速分布に対数則を適用して求めた摩擦速度である¹⁴⁾。流速分布についても風速と同様にクレスト近傍で値が大きくなっている。また, 乱れ強度 u' 及び v' もクレスト近傍で大きな値をとっていた。図-8はレイノルズ応力 $-\overline{u'v'} / U_{*w}^2$ の分布である。図より, クレストより風上側($180^\circ \sim 360^\circ$)では $-\overline{u'v'} > 0$ であり, 値も図-6の空気層とほぼ等しい($\rho U_{*a}^2 \approx \rho U_{*w}^2$ より¹⁴⁾。)。しかし, クレストよりも風下側($0^\circ \sim 180^\circ$)では $-\overline{u'v'} < 0$ であり, 同じ領域の空気層での値(> 0)とは全く異なる。この界面を通してのレイノルズ応力の不一致は図-4(a)のクレスト風下側での高渦度領域と密接に関連していると考えられる。

(3) 両層における組織構造の関連性

a) レイノルズ応力に対する寄与率の分布

Kawamura and Toba(1988)⁷⁾は2次元波の発生する風波を対象として, 空気層の対数則領域におけるejection($u' < 0, v' > 0$. 彼らはburstと呼んでいる)及びsweep($u' > 0, v' < 0$)のレイノルズ応力への寄与率に関して風波の各位相で比較を行っており, 前者はクレスト風上側で, 後者はクレスト風下側で卓越することを指摘している。図-9は風速を3段階に変化させた場合における, 風波の各位相での空気層のejection

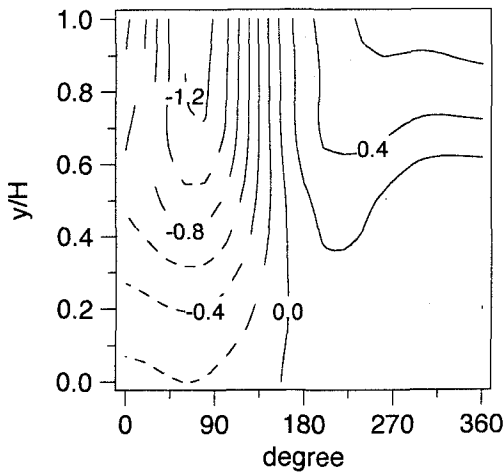


図-8 レイノルズ応力 $\overline{u'v'}/U_{*w}^2$ のコンター(水層)

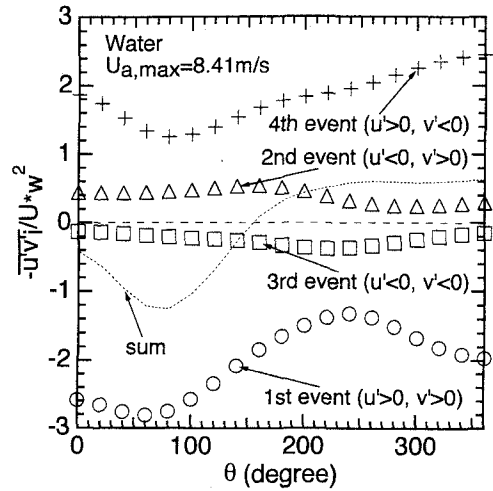


図-10 各象限の寄与率(水層)

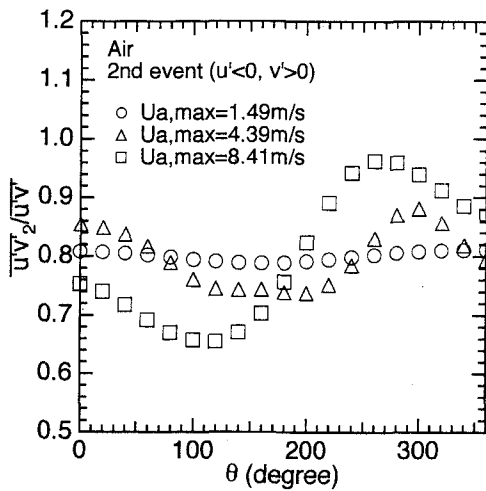
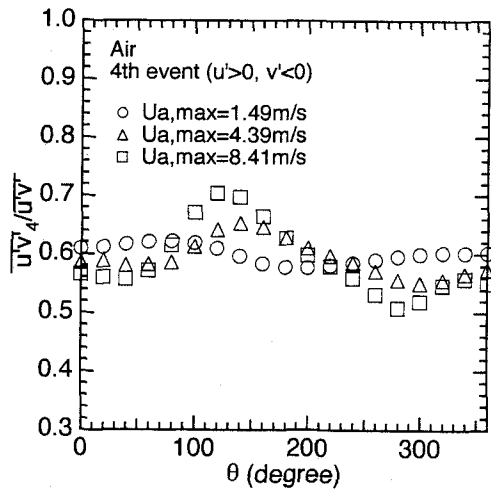


図-9 ejection及びsweepの寄与率(空気層)



(RS_2)及びsweep(RS_4)の寄与率である。ここで、寄与率の値として内層($z^+ < 0.2R_*$)での平均値を用いた。図より、ejectionはクレスト風上側で、sweepはクレスト風下側で卓越しており、Kawamura and Toba(1988)の実験結果と類似している。また、風速の減少とともに各位相間での相違が見られなくなる。

図-10は $U_{a,max}=8.41\text{m/s}$ のケースにおける、水層の水面近傍($y/H < 0.2$)での各象限の寄与率 $RS_1(u' > 0, v' > 0)$, $RS_2(u' < 0, v' > 0)$, $RS_3(u' < 0, v' < 0)$, 及び $RS_4(u' > 0, v' < 0)$ である。図-8より水層ではトラフ近傍でレイノルズ応力の符号が反転するので、図-10ではレイノルズ応力の各象限での値を $\overline{u'v'}$ の代わりに摩擦速度の2乗 U_{*w}^2 で無次元化して表示した。同図より、水層では RS_1 及び RS_4 の寄与率が RS_2 及び RS_3 に比べて大きく、空気層と大きく異なっている。特に RS_1 はクレスト風下側で、 RS_4 はクレスト風上側で大きく、 $RS_1 < RS_4$ となっている。このことは水面上に風が吹くことによって、界面から高速で水面下に潜り込む運動量がクレスト風下側で大きくなることを示しており、Komori et al.(1993)¹³⁾による模式図と一致する。

b) 組織渦の発生周期の比較

Kawamura and Toba(1988)⁷⁾はVITA法を用いること

によってejection及びsweepの発生個数と風波の数の比較を行っており、前者の方が多く発生することを指摘し、"big burst"モデルと比較した上で"small burst"モデルを提案している。図-11は空気層での $U_{a,max}$ に対する、ejection及びsweepの発生周期 T_2, T_4 と風波の周期 T の比 $T_2/T, T_4/T$ の分布である。ここでしきい値には中山・楠津(1999d)¹⁵⁾と同様の半値しきい値法を用いた。図中にはKawamura and Toba(1988)⁷⁾による、しきい値として $10\overline{u'v'}$ を用いた場合のデータも併記した。これより、風速の増加とともに $T_2/T, T_4/T$ は減少していくことがわかる。このことは風速の増加とともに風波が発生し、組織渦の発生が風波の周期に規制されることを示しており、big burstに比べてsmall burstの割合が増加することになる。一方、図-12は水層での $T_1/T, T_4/T$ の分布である。図より、風速が遅い場合には空気層での値に比べてなかり大きい。風速の増加とともに空気層の値に近づくことがわかる。このことは、水層中に発生する組織渦は風波が引き金となって始めて生じることを示している。また、風速が大きく十分に発達した風波では空気層と水層で対になった組織渦が発生することになる。

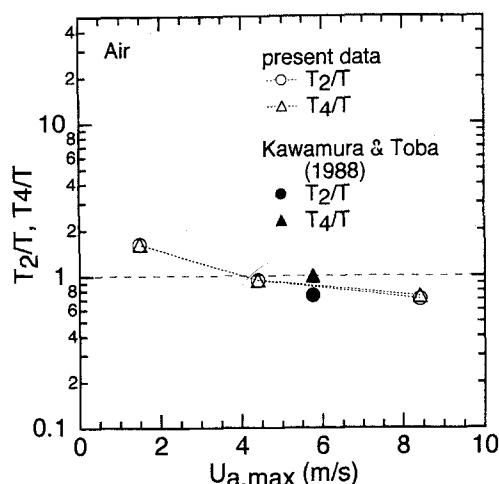


図-11 組織渦の発生周期と風波の周期の比(空気層)

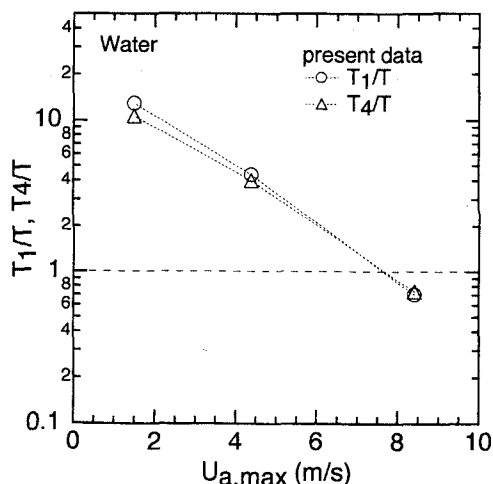


図-12 組織渦の発生周期と風波の周期の比(水層)

5. 結論

本研究はPIV法及びレーザ流速計と波高計の同時計測による位相平均手法を用いることによって、風波下での空気層及び水層での瞬間構造の関連性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) 空気層では、クレスト風下側にクレスト頂部から剥離して下方に向かう流れが見られる。また、クレスト風下側の剥離領域及びクレスト風上側の広い領域に渡って負の高渦度領域が存在する。水層では、クレスト風上側で高速の上昇流体が、クレスト風下側で高速の下降流体が発生することの再確認を行った。さらに、クレスト風下側の方が高渦度領域が多く発生することが明らかになった。

2) 位相平均手法を用いることによって両層での乱れ構造を評価した。その結果、両層ともに、平均流速 U 、乱れ強度 u' 及び v' はクレスト近傍で最大になることが示された。空気層でのレイノルズ応力は、クレスト近傍から風下側の上方に向かって大きく発達する。一方、水層ではクレストよりも風下側で負の値となり、高渦度領域の発生と関連していると考えられる。

3) 風波の各位相における、両層でのレイノルズ応力への寄与率の評価を行った。空気層ではクレスト風上側で第2象限が、風下側で第4象限が卓越する。一方、水層ではクレスト風上側で第4象限が、風下側で第1象限が卓越する。また、風速の減少とともに各位相間での相違が見られなくなる。

4) 界面を通して両層に発生する組織渦の発生周期と風波の周期の関連性について検討を行った。空気層では風速の増加とともに組織渦の発生周期に対する風波の周期の比が減少していき、big burstに比べてsmall burstの割合が増加する。一方、水層での組織渦の発生は風波が引き金となって発生するために、その発生周期は空気層のものよりも大きい。また、風速が大きく十分に発達した風波では空気層と水層で対になった組織渦が発生する。

参考文献

- 1) 中山忠暢, 橋津家久: 水・空気2層流の乱流構造について, 土木学会論文集, 1999a (投稿中).
- 2) 中山忠暢, 橋津家久: 水・空気界面での乱流構造と気体輸送の関連性に関する研究, 土木学会論文集, 第635号/II-49, pp.85-95, 1999b.
- 3) Chang, P.C., Plate, E.J. and Hidy, G.M.: Turbulent air flow over the dominant component of wind-generated water waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.47, pp.183-208, 1971.
- 4) Takeuchi, K., Leavitt, E. and Chao, S.P.: Effects of water waves on the structure of turbulent shear flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.80, pp.535-559, 1977.
- 5) Kato, H. and Sano, K.: An experimental study of the turbulent structure of wind over water waves, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.10, No.1, pp.1-42, 1971.
- 6) Kawai, S.: Structure of air flow separation over wind-wave crests, *Boundary-Layer Met.*, Vol.23, pp.503-521, 1982.
- 7) Kawamura, H. and Toba, Y.: Ordered motion in the turbulent boundary layer over wind waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.197, pp.105-138, 1988.
- 8) Okuda, K.: Internal flow structure of short wind waves; Part I. On the internal vorticity structure, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.38, pp.28-42, 1982a.
- 9) Okuda, K.: Internal flow structure of short wind waves; Part II. The streamline pattern, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.38, pp.313-322, 1982b.
- 10) Okuda, K.: Internal flow structure of short wind waves; Part II. Pressure distribution, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.38, pp.331-338, 1982c.
- 11) Esfahany, M.N. and Kawaji, M.: Turbulence structure under a typical shear induced wave at a liquid/gas interface, *AIChE Symposium Series*, pp.203-210, 1996.
- 12) Rashidi, M., Hetsroni, G. and Banerjee, S.: Mechanisms of heat and gas transport at gas-liquid interfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.34, No.7, pp.1799-1810, 1991.
- 13) 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.
- 14) 中山忠暢, 橋津家久: 風波の乱流構造について, 土木学会論文集, 1999c (投稿中).
- 15) 中山忠暢, 橋津家久: 開水路流れにおけるバーストの水面近傍での挙動及び乱れ構造との関連性について, 土木学会論文集, 第635号/II-49, pp.31-40, 1999d.

(1999. 9. 30受付)