

逆流風波開水路混成場における 乱流特性に関する研究

TURBULENCE CHARACTERISTICS IN ADVERSE WIND-DRIVEN OPEN-CHANNEL FLOWS

瀬津家久¹・垂井晃一²・吉田圭介³
Iehisa NEZU, Kouichi TARUI and Keisuke YOSHIDA

¹フェロー会員 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)

²学生員 京都大学大学院修士課程 社会基盤工学専攻

³学生員 京都大学大学院博士課程 環境地球工学専攻

This study describes an experimental investigation on turbulence characteristics and the water-surface fluctuations in adverse wind-driven open-channel flows by using both a laser Doppler Anemometer (LDA) and a wave gauge simultaneously. In this study, it was shown that the velocity fluctuations of water flow near the interface in not only cocurrent flow but also adverse flow are significantly affected by the water surface in every range of frequency. However turbulence characteristics in water layer in adverse wind-driven open-channel flows are different from those in cocurrent flow, and there exists a high correlation between turbulence and the surface fluctuations in predominant frequency due to high-sheared wind flow.

Key Words : adverse wind-driven open-channel flows, turbulent characteristic, LDA,

1. はじめに

水流速が遅く風が速い場所では水面の上を流れる風の影響を大きく受ける流れ場が数多く存在する。開水路流の上に風シアの加わったこの流れ場は非常に複雑であり、また自由水面での気体輸送等にも大きな影響を与える。現在まで開水路乱流や風波場について数多くの検討がなされている^{1,2)}。開水路流れの上に風シアを伴う流れ場には、空気流と水流の方向が同じ順流場と空気流と水流の方向が逆である逆流場がある。著者らはこれまで順流場において水・空気界面での乱流特性について研究を行い、系統的な特性を検討してきた^{3,4)}。

逆流場においては波浪の予測などの点から海岸・海洋工学の分野で多くの研究がなされている。鶴谷⁵⁾は波が立たない弱い風シアを伴った逆流場において実験を通じて水流の流速分布や乱れ特性について考察を行っており、流速分布や乱れ強度に対して底面シアによるものと界面シアによるものとを線形的に加えることができると仮定して経験式を与えた。セリーら⁷⁾は流れ関数を用いて順流場および逆流場における主流速特性を予測する手法を提案している。Rashidi & Banajee⁶⁾は順流場およ

び逆流場において数パターンの実験条件で流速分布や乱れ特性について示しており、また可視化計測も行っている。また、逆流場での風波についての研究では鶴谷ら⁸⁾が波の発達特性についての研究を行っている。

以上、既往の研究は波が立たないような風シアが弱い逆流場を扱った研究が多く、風シアが強く風波が発生している流れ場での主流速特性や乱流特性についての研究はあまり行われていない。また、逆流場における水層の乱流特性と水面変動に関する考察もあまり行われていない。そこで本研究では逆流場において系統的に実験条件を変化させて、水路中央鉛直断面においてレーザー流速計 (LDA) および波高計の同時計測によって、順流場における乱流特性との比較検討から逆流場における乱流特性について考察を試みる。

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の傾斜水槽風洞である⁴⁾。図-1に概要図を示す。計測部は水路風上端より約9mの地点で、水路両側壁と底

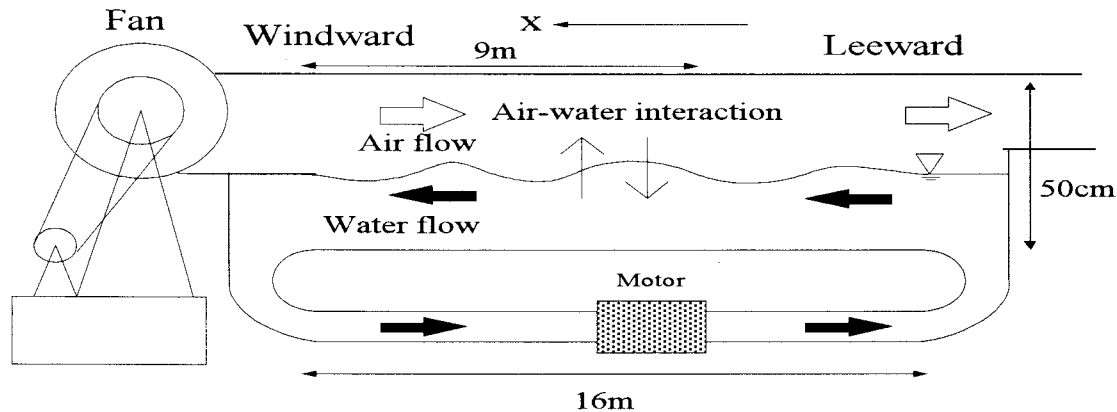


図-1 風洞付き傾斜水槽実験装置

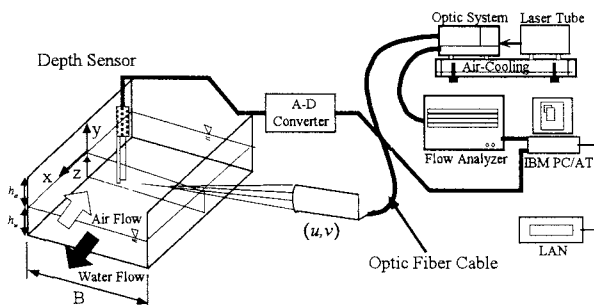


図-2 LDA計測装置と容量式波高計

面が光学ガラス製である。

(2) 計測方法および実験条件

瞬間流速の点計測には、300mWの後方散乱型2成分アルゴンイオンレーザー流速計(LDA, Dantec社製)を用いた(図-2)。計測点は水層および空気層それぞれの水路中央断面とした。空気流のLDA散乱粒子の直径は平均 $1.5\mu\text{m}$ 、比重は1.02であり、霧発生装置(Dantec社製)を用いた。水流のLDA散乱粒子には市販の水溶性ペンキを用いた。LDAのトラバース装置は水路に直付けで $1/100\text{mm}$ の精度を有する。測定時間は60秒、測定周波数は水層で最大約200Hz、空気層で最大約500Hzであった。座標系は水路中央断面において、流下方向に x 軸、鉛直上向きに静水面から y 軸、水路底面から上向きに z 軸とした(図-2)。流下方向 x 軸および鉛直方向 y 軸(or z 軸)方向の平均流速成分を (u, v) 、乱れ変動成分を (u', v') と定義した。また、容量式波高計(Kenck社製)を設置して流速変動と水面変動の同時計測を行った。その際、流速計測点と波高計測部は横断方向に2cmずらしてある⁴⁾。

実験条件を表-1に示す。なお、ここでは添字 a, w はそれぞれ空気層および水層に関する量を示す。本実験では静水時における水層厚 h_w ($=7.0\text{cm}$)および空気層厚 h_a ($=43.0\text{cm}$)を固定し($z = y + h_w$)、水路底面は平坦で滑面とした。本研究では水路アスペクト比

表-1 実験条件表

	$U_{w, mean}$ (m/sec)	$U_{a, max}$ (m/sec)	U_{*a} (cm/sec)	U_{*w} (cm/sec)	h'/h_w	f_p (Hz)
REV1	0.265	-1.51	-4.93	1.35	0.00545	-
REV2	0.262	-2.19	-9.53	1.33	0.00384	-
REV3	0.264	-2.87	-12.5	1.33	0.0293	1.39
REV4	0.260	-3.54	-17.6	1.29	0.0329	1.39
REV5	0.259	-4.28	-20.1	1.26	0.0459	1.29
REV6	0.260	-4.97	-25.2	1.24	0.0256	1.39

$B/h_w = 5.7$ (水路幅 $B = 40\text{cm}$)、フルード数 $F_r = 0.2$ の開水路等流を基本流として、空気層最大風速 $U_{a, max}$ を系統的に調整することで、開水路水面上に逆向きに風シアーを与え、一連の界面波(REV1~REV6)を発生させた。 U_{*a} 、 U_{*w} はそれぞれ空気層界面、水層底面での平均流速に対数則分布を適用して求めた摩擦速度である。また、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。なお、REV1、REV2のケースではスペクトル解析で明確な卓越周波数が観察されなかった。

3. 実験結果および考察

(1) 主流速分布

図-3は逆流風速下での水層の平均流速 U_w の分布を示し、図-4はこの平均流速 U_w とフルード数 $F_r = 0.2$ の開水路流の流速 $U_{w(open)}$ との流速差を表したものである。

界面近傍では流下方向と逆向きの風シアーの影響で流速の落ち込みが見られる。また、開水路流と比較して界面付近では主流速は遅くなっているが、半水深付近では逆に開水路流よりも主流速が速くなっている。これらの特

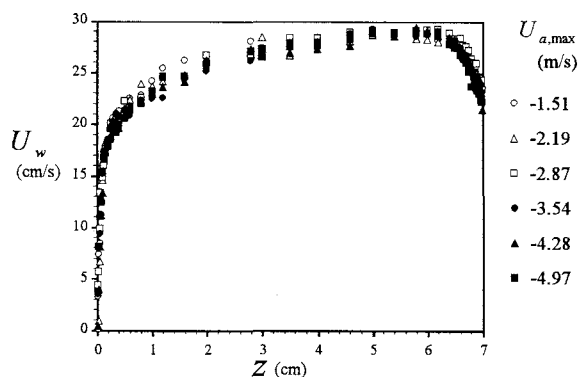


図-3 水層平均流速 U_w

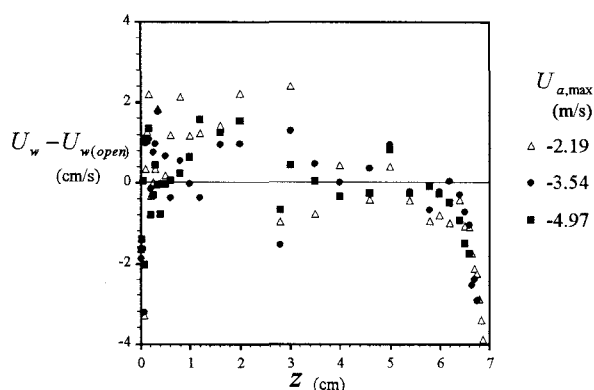


図-4 水層逆流場と開水路との平均流速差 $U_w - U_{w(open)}$

性は、鶴谷⁵⁾が逆流場における主流速分布の模式図を提案しているが、本実験でも同様の傾向を示している。図-5は同じく水層の平均流速 U_w の分布を内部変数表示したものである。ただし、データは各々図中で上方に10ずつ平行移動させている。図中には次式の対数則および粘性底層分布を併示した。

$$\text{対数則流速分布 } U_w^+ = \frac{1}{\kappa} \ln z^+ + A \quad (1)$$

$$\text{粘性底層流速分布 } U_w^+ = z^+ \quad (2)$$

ここで、 $U_w^+ \equiv U_w / U_{*b}$ 、 $z^+ \equiv z U_{*b} / \nu_w$ 、 κ はカルマン定数、 U_{*b} は水路底面における摩擦速度、 ν_w は水の動粘性係数、 A は積分定数である。開水路乱流では $\kappa = 0.41$ 、 $A = 5.3$ が推奨値である⁹⁾。順流場との比較として既往の研究⁴⁾のデータの流速分布も併示した。逆流場と順流場では主流速分布にいくつかの違いが見られる。まず、逆流場では順流場で見られたような流速分布の平坦化領域は見られない。また、逆流場において粘性底層での流速分布は全ケースを通じて変化はないが、風速の増加に伴い対数則領域での流速分布において積分定数 A の値が図-5に示すように大きくなる傾向が見られる。これは、逆流場では開水路と比較して半水深付近より下の領域で主流速が大きくなっていることによるものと考えられる。

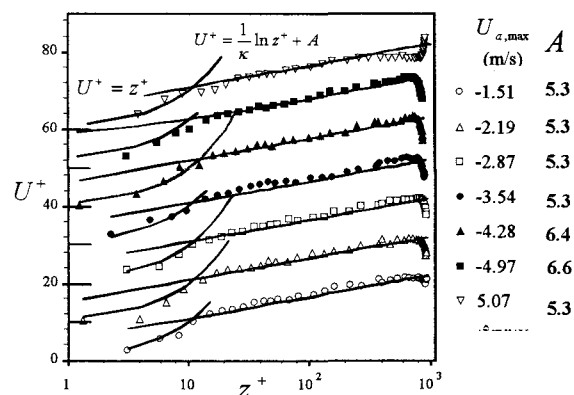


図-5 水層平均流速 U_w (内部変数表示)

(2) 乱れ特性分布

(a) 乱れ強度

図-6および図-7は水層における流下方向乱れ強度 u' および鉛直方向乱れ強度 v' の鉛直分布であり、底面摩擦速度 U_{*w} で無次元化して示したものである。同図には欄津の半理論公式¹⁰⁾を併示した。

$$\frac{u'_w}{U_{*w}} = 2.3 \exp(-z/h_w) \quad (3)$$

$$\frac{v'_w}{U_{*w}} = 1.27 \exp(-z/h_w) \quad (4)$$

また、同図にはRashidi & Banerjee(1990)⁹⁾の逆流場における乱れ強度のデータ（実験条件：interfacial shear rate $\partial U / \partial z = 25.2 \text{ sec}^{-1}$ ）を点線で併示した。なお、図中の Re_w は水層におけるレイノルズ数である。図-8および図-9は逆流場と順流場における乱れ強度 u' 、 v' を比較したものである。なお、順流のデータは既往研究⁴⁾のものである。水面が穏やかなケース（REV1～REV2）では乱れは界面近傍で若干増加しており、これは既往研究でも同様の傾向を示している。しかし、風速が増大し界面波が発生するケース（REV3～REV6）では界面で発生した乱れが半水深以下まで影響を及ぼし、水層全体で大きな値となっており、これは順流では半水深付近では乱れが減少する点と大きく異なっている。これは主流速分布の違いから説明できる。すなわち、順流では半水深付近で主流速分布が平坦化しているのに対して、逆流では領域全体を通じて流速勾配が大きいことによるものと考えられる。

(b) レイノルズ応力

図-10は水層におけるレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の分布を示したものである。図中には次式の三角形分布を併示した。

$$-\overline{uv} / U_{*w}^2 = (1 - z/h) \quad (5)$$

また、乱れ強度と同様、Rashidi & Banerjee(1990)⁹⁾のデータを点線で併示した。まず、底面および界面近傍を除き全ケースを通じてレイノルズ応力は底面付近からほぼ直線的に減少する傾向が見られる。一方界面近傍について

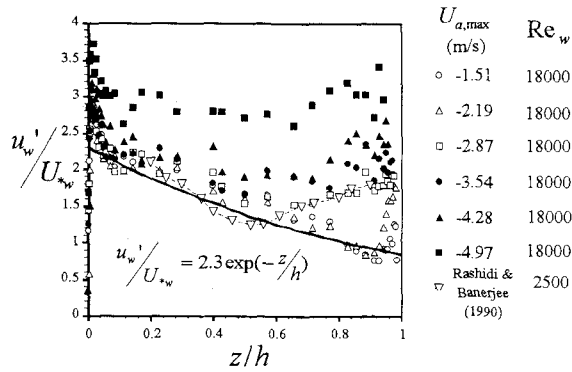


図-6 水層乱れ強度 u'_w

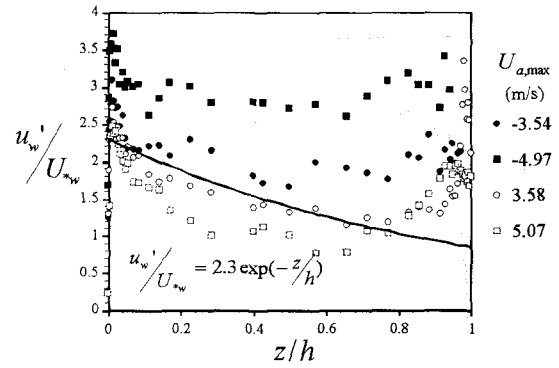


図-8 水層乱れ強度 u'_w

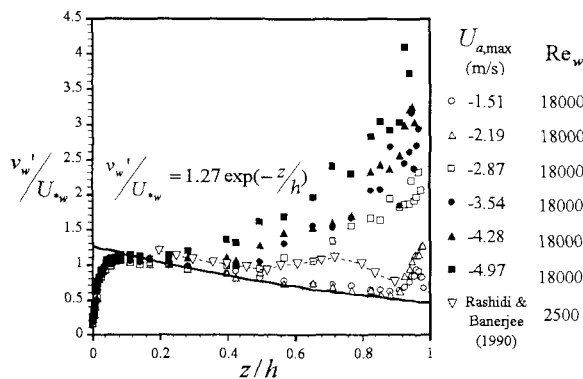


図-7 水層乱れ強度 v'_w

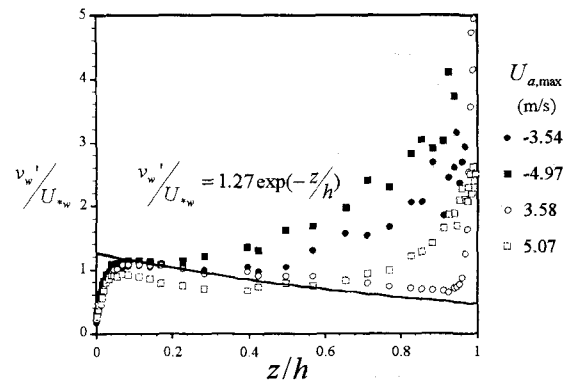


図-9 水層乱れ強度 v'_w

は、水面が穏やかなケース (REV1~REV2) では負の値を示しており鶴谷⁵⁾も同様の傾向を示している。また、風シアーが大きくなり界面波が発生するケース (REV3~REV6) では界面近傍でレイノルズ応力は逆に大きな正の値を示しておりこれは順流場と同様の傾向を示している。

(c) スペクトル解析

図-11および図-12には逆流場での水層界面近傍点 ($z/h \cong 0.9$) での主流速変動のパワースペクトル S_u および水面変動のパワースペクトル S_h を示した。図中のデータは各々 10^2 ずつ上方へ平行移動している。両図より、1Hz付近において卓越した変動パワーが観察され、これは風波固有の卓越周波数 f_p とみなせる。また、順流場と同様に、スペクトルピークの高周波側には、 $f^{-5/3}$ が成立する周波数領域が観察され、これは、界面付近での水の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。したがって、逆流場でも順流場と同様、風速の増大により界面付近の水の動きは開水路による変動から風波流れの変動へと遷移することがわかる。図-13は風波が発生

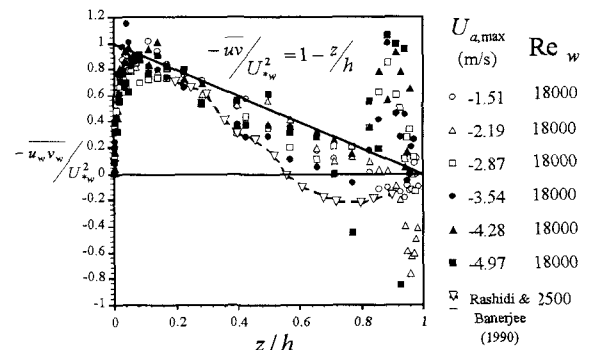


図-10 水層レイノルズ応力 $-u'_w v'_w$

している場合において最大風速 $U_{a,max}$ に対する順流場と逆流場における風波の卓越周波数 f_p の分布である。順流場のデータは既往研究⁹⁾のものである。逆流場における卓越周波数 f_p は順流場のそれに比べ小さくなっている。また、順流場においては風速が大きくなると卓越周波数が小さくなるのに対し、この研究では逆流場では風速が大きくなっても卓越周波数はほとんど変化していないが、この点に関しては理由が説明できないので今後

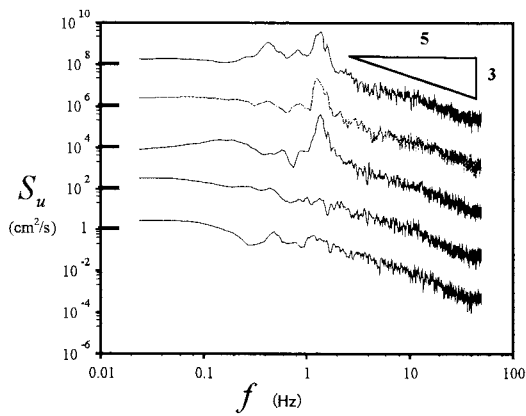


図-11 流速変動パワースペクトル($z/h \approx 0.9$)
(10^2 ずつ平行移動させて表記)

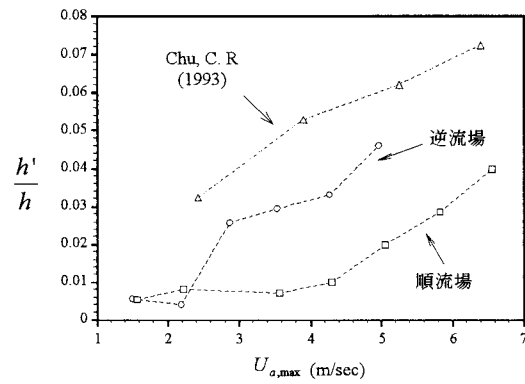


図-14 水面変動強度 h'

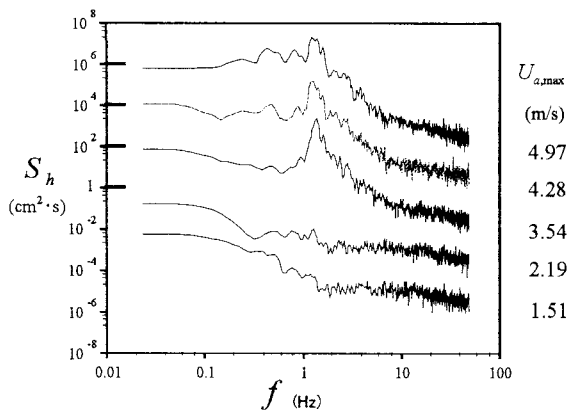


図-12 水面変動パワースペクトル
(10^2 ずつ平行移動させて表記)

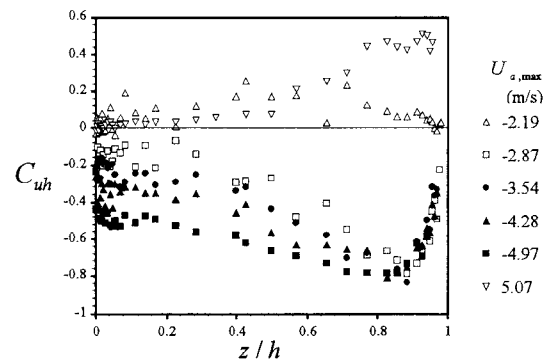


図-15 水面変動と流速変動の相関係数 C_{uh}

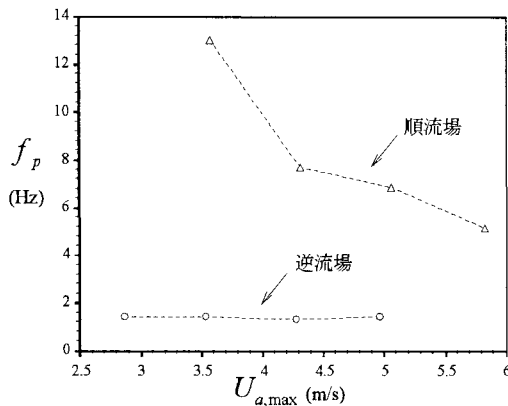


図-13 卓越周波数分布

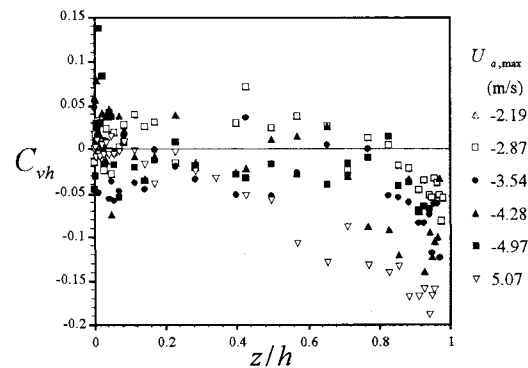


図-16 水面変動と流速変動の相関係数 C_{vh}

更なる検討をしていきたい。

(d) 水面変動と流速変動との相関

図-14は空気層界面摩擦速度 U_{*a} に対して水面変動強度（水面変動のrms値） h' を示したものである。同図にはChu(1993)¹¹⁾の逆流場におけるデータ、および順流場⁴⁾

のデータを併示した。同図より、風波が発生しているケースでは、風速が増大して風シアーが大きくなるにつれて水面変動は大きくなることが分かる。また、同じ風速に対しては順流場より逆流場のほうが水面変動強度は大きくなっている。図-15および図-16は水面変動 $h(t)$ と水層流速変動 $u(t), v(t)$ との相関係数 C_{uh} ($=\overline{uh}/\overline{u'h'}$)、 C_{vh} ($=\overline{vh}/\overline{v'h'}$) の鉛直分布を示したものである。図には既往研究の順流場における相関係数を併示している⁴⁾。逆流場では水面変動が大きくなると $C_{uh} < 0$ 、 $C_{vh} < 0$ となり、正の水面変動 $h(t) > 0$ の

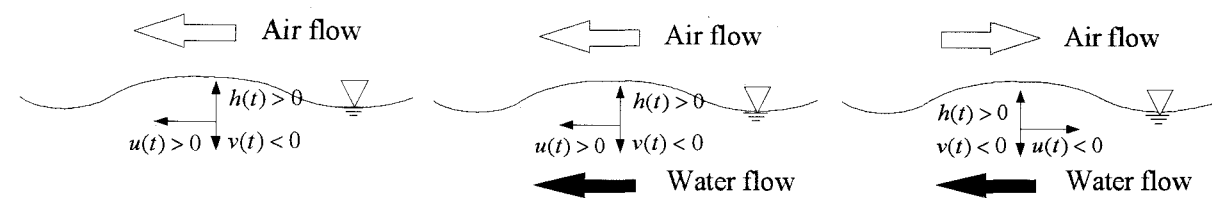


図-17 水面変動と流速変動の模式図 (左図：風波のみ 中図：順流場 右図：逆流場)

時に $u(t) < 0$, $v(t) < 0$ となる。順流場では相関係数 C_{uh} は正の相関を示しており、順流場と逆流場では逆の相関関係を示している。このことは図-17の模式図で説明できる。風波は空気流の主流速方向を正とすると、正の水面変動 $h(t) > 0$ の時に $u(t) > 0$, $v(t) < 0$ となり、これは水が流れていても界面付近では風波による水の挙動が卓越する。よって順流場では水流と空気流の主流速方向が同じ風波のみの流れ場と同じ相関を示し、逆流場では水流と空気流の主流速方向が逆になるため、 $u(t)$ に関して風波場と逆の相関を示すと言える。また、逆流場において主流速成分の変動 $u(t)$ は風波が大きくなるにつれて水深深くまで負の高い相関を示すが、鉛直方向成分の変動 $v(t)$ は風速の増大に関わらず界面近傍を除いてはほとんど相関関係がないことが分かる。

4. おわりに

本研究は水流と逆向きの風シアを伴う開水路乱流場を対象として、レーザー流速計(LDA)で2次元計測を行い、逆流場における乱れ特性についての検討を実験的に行ったものである。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 主流速分布において順流場と逆流場では異なる分布を示す。また、逆流場においても底面からほぼ対数則が成立する。
- 2) 乱れの分布について逆流場では風シアが強くなるにつれ順流場と異なり界面近傍だけでなく半水深付近でも乱れが大きくなる。これは主流速分布の影響と考えられる。
- 3) レイノルズ応力分布については逆流場においても底面および界面近傍を除き三角形分布を示す。また、界面近傍では風シアが弱い場合では負の値を示すが、風シアが強くなると正の値を示す。
- 4) 水面変動について逆流場では順流場と比較して弱い風速で風波の発生に影響を与える。水面変動と主流速変動との相関については、界面シアが大きい条件では負の相関を示す。

参考文献

- 1) Hughes, E.D. and Duffey, R.B.: Direct contact condensation and momentum transfer in turbulent separated flows, *J. Multiphase Flow*, Vol.17, No.5, pp.599-619, 1991
- 2) Chu, C.R. and Jirka, G.H.: Reaeration in combined wind/steram driven flows, *Air-Water Gas Transfer*, B. Jahne and E.S. Monahan eds., AEON Verlag, pp.553-569, 1995
- 3) 桶津家久・吉田圭介・牛島省：水面上に風シアが存在する開水路流れ場における水・空気層乱流構造に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.733/II-63，pp.67-76，2003.
- 4) 桶津家久・吉田圭介・垂井晃一：水面上に風シアが存在する開水路流れ場における水層乱れ構造と水面変動に関する研究，水工学論文集，第48巻，pp.517-522，2004.
- 5) 鶴谷広一：流れに及ぼす風と波の効果について—流速分布、乱れ強度及び拡散係数の検討—，昭和59年度 港湾技術研究所講演会講演集，pp.35-76，1984.
- 6) Rashidi, M. & Banerjee, S.: The effect of boundary conditions and shear rate on steak formation and breakdown in turbulent flows, *Phys. Fluids A*, Vol.2, No.10, pp.1827-1838, 1990.
- 7) スパラティッド・セリー・田中仁・首藤伸夫：波・流れ共存場における流速分布に関する研究，海岸工学論文集，第38巻，pp.6-10，1991.
- 8) 鶴谷広一・中野晋・柳嶋慎一・松延嘉國：逆流中での風波の発達特性，港湾技術研究所報告，第26巻，第4号，pp.35-56，1987.
- 9) Nezu, I and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.
- 10) 桶津家久：開水路乱流の乱れ強度に関する研究，土木学会論文集，No.261，pp.67-76，1977.
- 11) Chu, C. R. (1993): Experiments on gas transfer and turbulence structure in free surface flows with combined wind/bottom shear, *Ph. D Thesis presented to Cornell University*.

(2004. 9. 30 受付)