

逆流風波開水路混成場における乱れ構造と気体輸送に関する実験的研究

Experimental Study on Turbulence Characteristics and Gas Transfer
in Adverse Wind-Driven Open-Channel Flows

瀬津家久*, 福谷彰**, 吉田圭介***, 垂井晃一****

Iehisa NEZU, Akira FUKUTANI, Keisuke IKEDA and Kouichi TARUI

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

**学生員 京都大学大学院修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***正員 博(工) 東京工業大学 研究員

****正員 修(工) JR 東日本

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. Furthermore, a dissolved oxygen (DO) meter was used to investigate the gas transfer across the interface between the water and air.

In this study, it was shown that the velocity fluctuations of water flow near the interface in not only co-current flow but also adverse flow are affected significantly by the water-surface fluctuations in every range of frequency. However, turbulence characteristics and gas transfer phenomena in water layer in adverse wind-driven open-channel flows are different from those in the corresponding co-current 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, gas transfer

1. はじめに

水流速が遅く風速が速い流域では、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ような流れ場は非常に複雑であり、自由水面での気体輸送等にも大きな影響を与えることが予想される。しかしながら、水流と空気流が共存する流れ場については、未だ十分に研究がなされているとは言えず、界面近傍における風波と乱流構造の関係の解明が環境水理学上でも求められている。水工学においては、図-1 のように開水路上の風シアの向きにより順流場 (Co-current flows) と逆流場 (Counter-current flows) に分類される。ここで、 τ_w は底面せん断応力、 τ_s は界面せん断応力、 U_w は水流の平均流速、 U_a は空気流の平均流速である。これらの流れ場を検討するにあたって、これまで水流及び空気流の流速分布の予測が主に行われてきた。逆流場においては、順流場と比較して波の流れ場に及ぼす影響が大きく現れることから海岸・海洋工学で多くの研究がなされているが、流速分布や乱れ特性に関する解明はあまり進んで

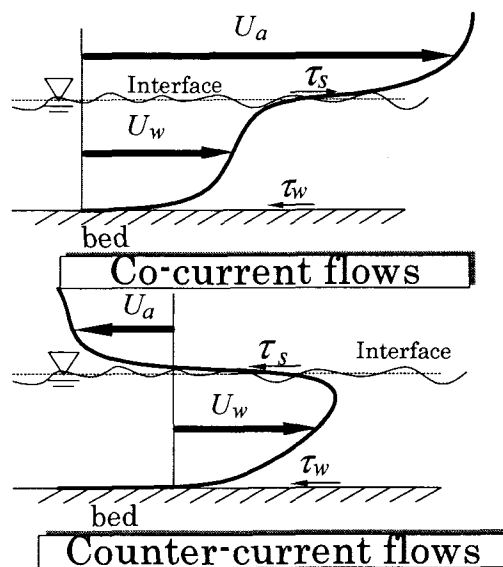


図-1 順流場と逆流場の模式図

いないのが現状である。その中でも、鶴谷(1984)¹⁾は波が生じない弱い風シアを伴った逆流場における実験によって水流の流速分布や乱れ特性に関する考察を行っており、

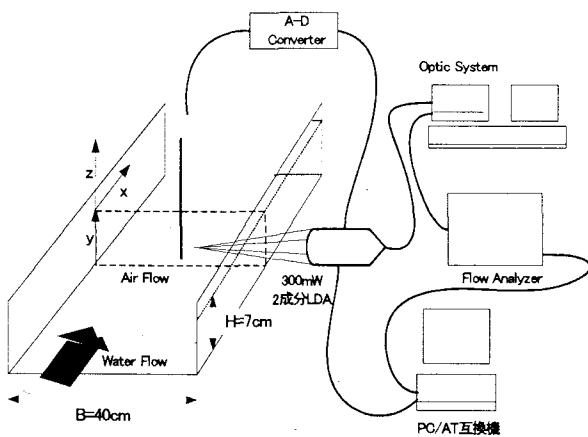


図-2 LDA 計測装置と容量式波高計

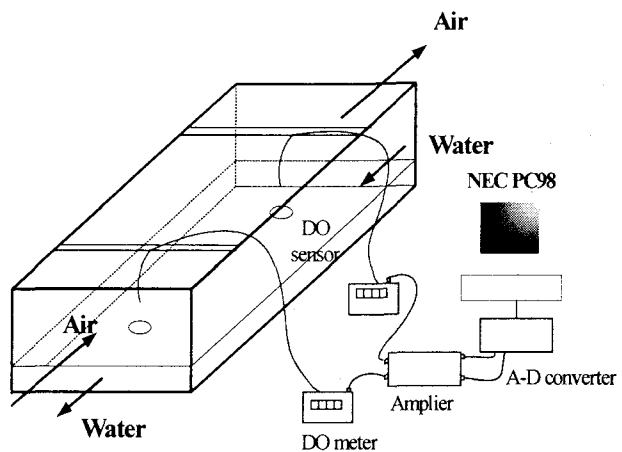


図-3 溶存酸素計測装置

流速分布や乱れ強度に対して底面シアーによるものと界面シアー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。また、セリーら(1991)²⁾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 & Banajee(1989)³⁾は順流場および逆流場において実験条件を数パターン変化させて流速分布や乱れ特性を検討し、また水素気泡法を用いた可視化計測も行っている。最近、水野ら(1997)⁴⁾は風波開水路乱流で発生する2次流の影響について順流場と逆流場では循環流の向きが逆転し、そのため水路内部における風シアーに伴う乱流運動が順流場と逆流場で異なると指摘している。また、瀬津ら(2005)⁵⁾も逆流場の乱流特性について検討した。

一方、このような風波流れにおける気体輸送プロセスに関する研究も試みられている。特に、さまざまな既往研究において風シアーと気体輸送速度 K_L との関係が報告されている。O'Connor(1983)⁶⁾は、滑面に境界膜説、粗面に表面更新渦と水表面の状態によって異なる気体輸送のモデルを適用し、理論的に気体輸送速度 K_L と界面の空気側の摩擦速度 U_{*a} を関連づけている。彼のモデルによると、 K_L の U_{*a} に対する依存性は滑面では1乗、粗面では1/2乗、中間の不完全粗面では最大2乗となる。また、碎波の発生にともない気体輸送が著しく促進されることが示されている。Chu and Jirka(1995)⁷⁾も摩擦速度 U_{*a} が15cm/sで K_L の U_{*a} に対する依存性がO'Connor(1983)⁶⁾と同様に1乗から2乗へと変化することを指摘している。Komori et al.(1993)⁸⁾は、炭酸ガス輸送と2成分LDAを使用した表面流速場の測定を行って、同様の傾向を確認している。しかしながら、逆流場における気体輸送プロセスについての知見はほとんど得られていない。

そこで本研究では既往の研究⁵⁾をふまえ、逆流場において系統的な実験条件を設定し、水路中央鉛直断面において

レーザ流速計(LDA)及び波高計の同時計測を行った。さらに、溶存酸素計(DOメーター)を用いた気体輸送速度の計測を行うことによって、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及び気体輸送過程の解明を試みた。

2. 実験概要

本実験で用いた水路は、全長16m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型風洞付水槽である。風路上流端より約9mの地点においてレーザ流速計(LDA)を用いて水層及び空気層の水路中央断面における瞬間流速の点計測を行った。座標系は水路中央断面において、水層流下方向に x 軸、鉛直上向きに静水面から z 軸、水路底面から上向きに y 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、容量式波高計を設置して流速変動と水面変動の同時計測を行った。なお、機器形状の制約や相互干渉を避けるために、LDAの流速計測点と波高計測部は横断方向に2cmずらしてある。

さらに、図-3に示すようにDOメータを用いて溶存酸素の濃度計測を行った。本実験では、断面平均流速が存在し移流項の評価が必要となるので上流と下流の2点での同時計測を行った。溶存酸素濃度の時間変化から気体輸送速度 K_L を算出して20°Cでの値に補正した。

実験条件を表-1に示す。 U_{*a} および U_{*w} はそれぞれ空気層界面近傍と水層底面近傍で対数則を適用して求めた摩擦速度である。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。 δ は空気層における境界層厚である。 δ は、空気層におけるレイノルズ応力が直線分布すると仮定し、レイノルズ応力が0となる高さ z を境界層厚として求めた。 U_s は吹送流の表面速度であり、水流に

表-1 実験条件

ケース名	$U_{w,max}$ (cm/sec)	U_{*w} (cm/sec)	Fr	$U_{a,max}$ (cm/sec)	U_{*a} (cm/sec)	δ (cm)	U_s (cm/sec)	z_a ($\times 10^{-3}$ cm)	B/h	f_p (Hz)
Run1	15.2	0.829	0.18	0	—	—	18.2	—	5.71	—
Run2	16.8	0.886	0.20	115	5.79	18.78	16.0	4.5	5.71	—
Run3	16.7	0.899	0.20	190	9.08	17.72	13.8	5.4	5.71	2.05
Run4	16.6	0.916	0.20	228	11.0	15.62	13.3	5.8	5.71	1.88
Run5	16.8	0.914	0.20	267	12.4	17.22	12.4	5.5	5.71	1.88
Run6	16.6	0.891	0.20	343	15.7	15.23	10.6	5.6	5.71	1.86
Run7	16.4	0.891	0.20	417	18.6	15.23	9.54	4.5	5.71	1.68
Run8	35.4	1.81	0.43	0	—	—	36.9	—	5.71	—
Run9	35.2	1.78	0.43	118	5.53	21.76	34.9	1.5	5.71	—
Run10	35.7	1.86	0.43	265	12.0	19.70	29.8	2.8	5.71	—
Run11	35.1	1.75	0.42	343	15.4	16.25	28.1	3.5	5.71	—
Run12	35.1	1.86	0.42	422	21.2	16.04	26.2	4.7	5.71	—
Run13	34.8	1.79	0.42	498	25.2	13.80	25.5	6.5	5.71	0.97
Run14	34.5	1.70	0.42	577	29.5	15.95	24.2	6.1	5.71	1.00

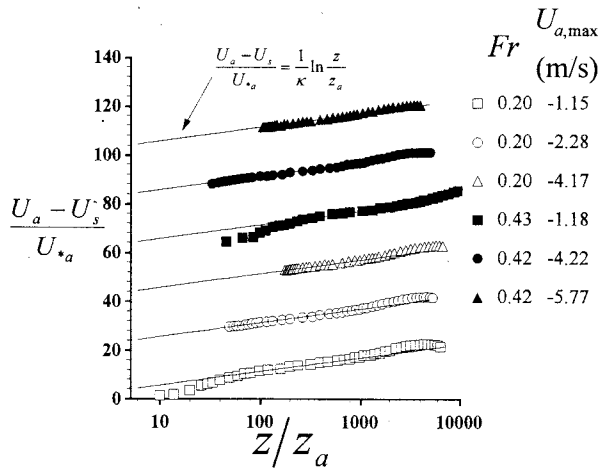


図-4 空気層の主流速分布

浮かべたフロートの流下速度の計測より求めた。 f_p は風波の卓越周波数であり、主流速変動のスペクトル解析から求めた。本実験では静水時における水層厚 h ($=7.0$ cm)を固定し、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 $B/h=5.7$ (水路幅 $B=40$ cm)、フルード数 $Fr=0.2$ および 0.43 の開水路等流を基本流として、空気層最大風速 $U_{a,max}$ を系統的に調整し、計14通りの実験条件を設定した。なお、 $U_{a,max} > 0$ が順流で、風と水流の向きが同じ方向であり、この研究成果はすでに得られている⁹⁾。一方、 $U_{a,max} < 0$ が逆流であり、水流と風向きが逆であり (図-1)、本実験では逆流を研究対象とした。

3. 逆流場の乱流構造

3.1 空気層の主流速分布

図-4は空気層の主流速 U_a の分布を空気層界面近傍の摩擦速度 U_{*a} により無次元化し、対数表示したものである。図には次式の粗面対数則を併示した。

$$\frac{U_a - U_s}{U_{*a}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_a} \quad (1)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 z_a は粗度高さである。本研究では $\kappa=0.41$ と仮定し、 U_{*a} を評価した。図-4のデータは各ケースとも20ずつ上方にずらして表示した。なお、空気流の計測は風波の発生によって水をかぶる領域では計測を行っていない。 z_a は式(1)にbest-fitするように算定し、その値を表に示した。この z_a の値は、ほぼO'Connor(1983)⁹⁾の値と一致した。

図-4より空気層では界面の状態にかかわらず対数則がよく成立していることが分かる。計測した領域での流速分布においては、水層の流れ場の違いによる差がみられず、このことから、空気層においては平均流特性において水層の流れ場の影響を受ける領域は界面極近傍に限られると予測される。また、風速の最も小さいケースにおいては界面近傍で対数則よりも小さい領域がみられ、粘性底層が存在する滑面流れであることがわかる。

3.2 空気層の乱れ特性

図-5は空気層における主流方向乱れ強度分布、図-6は鉛直方向乱れ強度分布を示す。なお、摩擦速度 U_{*a} で無

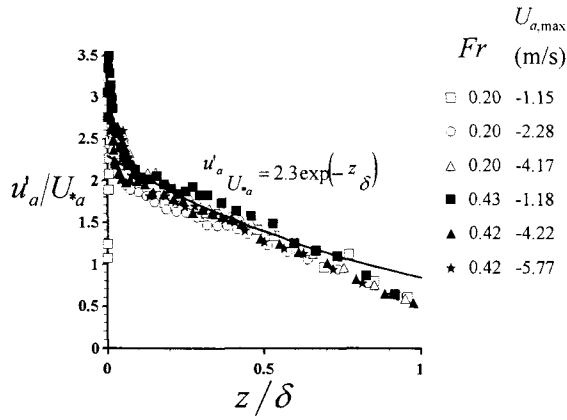


図-5 空気層の主流方向乱れ強度

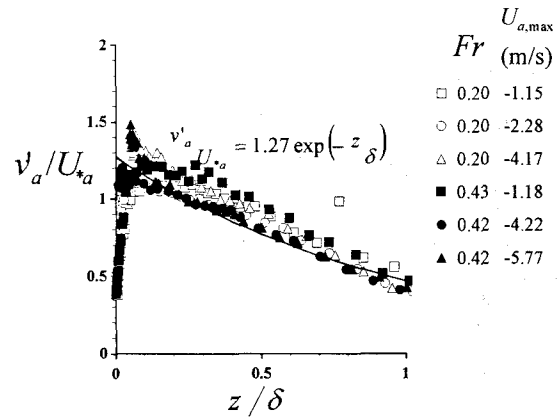


図-6 空気層の鉛直方向乱れ強度

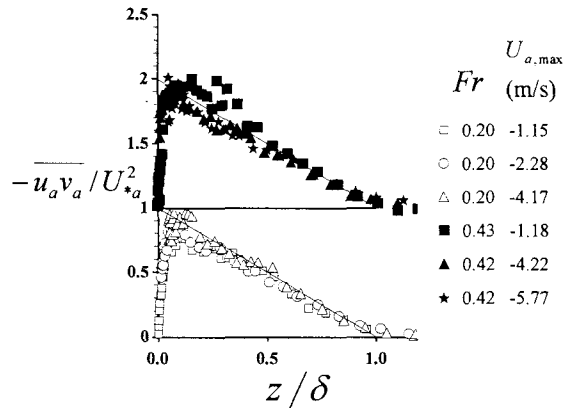


図-7 空気層のレイノルズ応力分布

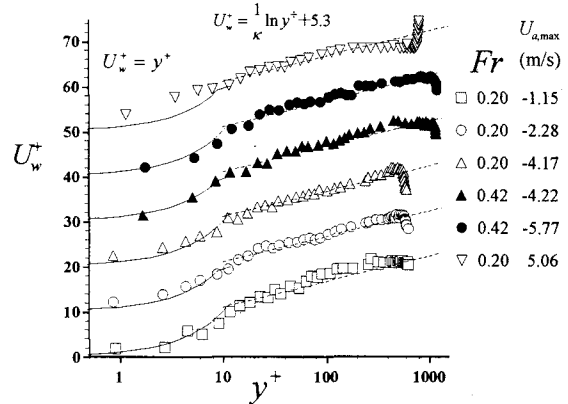


図-8 水層の主流速分布

次元化している。図中には、禰津の半理論公式⁹⁾を併示した。主流方向および鉛直方向ともに乱れ強度分布は界面近傍をのぞいて水面形状にかかわらず半理論式に比較的よく一致している。

図-7 は空気層におけるレイノルズ応力分布を示す。水流のフルード数 $Fr = 0.43$ のケースは上方へ1単位ずらして表示した。水流のフルード数のいかんに関わらず、三角形分布にはほぼ一致し、 $\kappa = 0.41$ と仮定した対数則から評価した $U_{*,a}$ が妥当であることがわかった。

3.3 水層の主流速分布

図-8 は水層の主流速 U_w の分布を内部変数表示したものである。図中には対数則および粘性底層分布を併示した。また、順流場との比較として既往研究⁹⁾のデータの流速分布も併示した。逆流場では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みられる。一方、半水深付近 ($y^+ = 300 \sim 600$) では $U_{a,max} = 0$ の開水路流

よりも主流速が若干大きくなっている領域が見られる。これは、鶴谷⁹⁾が主流速分布の模式図を提案しているように、風シアーによる界面近傍の主流速分布の影響が半水深付近に及んでいるためと考えられる。このように逆流場では順流場でみられたような流速分布の平坦化領域はみられず、若干凸型の分布形状となるがほぼ対数則分布に従うと考えてよい。

3.4 水層の乱れ特性

図-9 および図-10 は水層における主流方向乱れ強度 u' および鉛直方向乱れ強度 v' の鉛直分布である。それぞれの値は底面摩擦速度 $U_{*,w}$ で無次元化して示した。同図には禰津の半理論公式⁹⁾を併示した。風速が増大し界面波が発生するケース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いる。これは順流では半水深付近において乱れが減少する点と大きく異なっている。このことは主流速分布の違いによるものと思

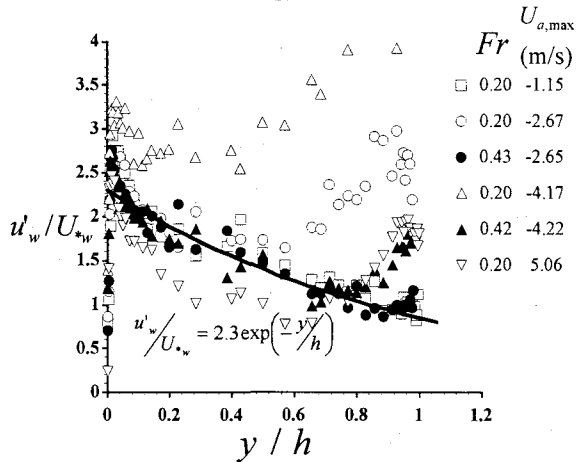


図-9 水層の主流方向乱れ強度

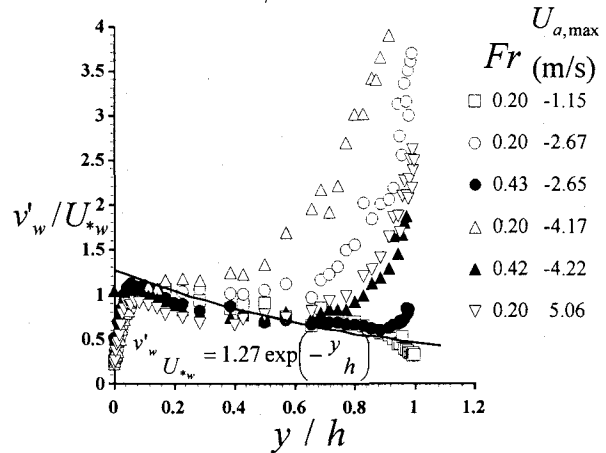


図-10 水層の鉛直方向乱れ強度

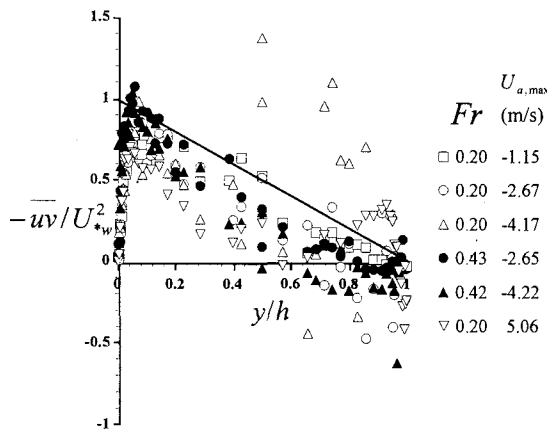


図-11 水層のレイノルズ応力

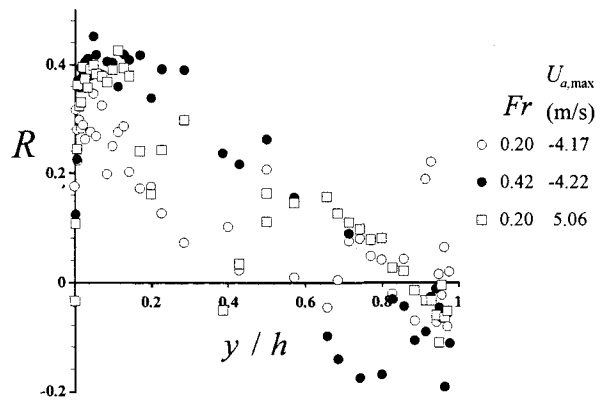


図-12 乱れの相関係数

われる。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くなるためと考えられる。また、逆流場においても順流場と同様に低フルード数流れのほうが界面近傍における風波による乱れが大きくなる。この点について、逆流場では水層の流速が増加すると界面での水と空気の相対速度が大きくなるにも関わらず風シアーによる乱れの影響は小さくなっている。このことから、風の吹く方向いかに関わらず、フルード数が大きい流れ場になると風波による乱れの影響は小さくなると考えられる。

図-11は水層におけるレイノルズ応力分布である。レイノルズ応力は水層の底面摩擦速度 U_{*w} で無次元化をしている。風速の小さいケースでは、レイノルズ応力の三角形分布に比較的良好に一致しているが、風速が増加するに従って下方へずれ、負の値を示している。これは、風速の増加に伴って流速勾配 $\partial u / \partial y$ が水面側で負になることによる

ものと考えられる。

図-12は水層における鉛直方向の乱れと流下方向の乱れの相関係数、すなわち $R \equiv -u'_w v'_w / (u'_w v'_w)$ を示したものである。フルード数 Fr が小さいケースでは順流場、逆流場ともに半水深付近で相関が0に近い値を示している。これは低フルード数流れのほうがより底面付近まで風シアーの影響を受けていることを示していると考えられる。また、高フルード数流れでは半水深付近でも高い相関を示すが、界面近くでは負の相関がみられる。

3.5 パワースペクトル

図-13は順流場での、図-14は逆流場での水層界面近傍点($z/h \cong 0.8$)での主流速変動のパワースペクトル S_u を示している。順流場のデータは既往研究¹⁰⁾のものである。図より、逆流場では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。

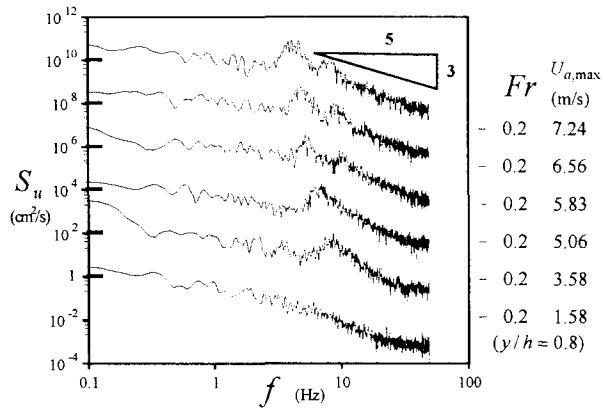


図-13 主流速変動パワースペクトル (順流)

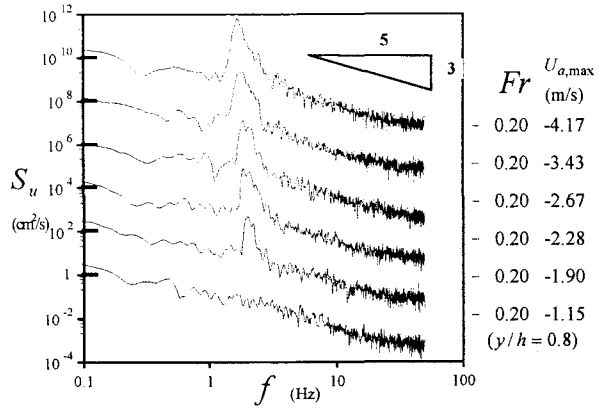


図-14 主流速変動パワースペクトル (逆流)

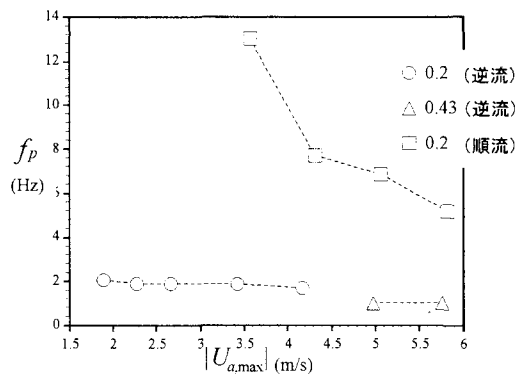


図-15 卓越周波数

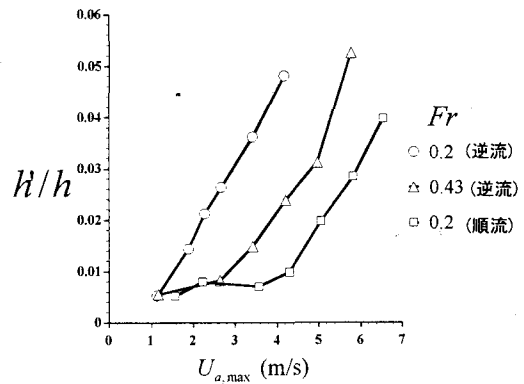


図-16 水面変動強度

また、順流場と同様に逆流場でも、スペクトルピークの高周波側 ($f \gg f_p$) には、 $f^{-5/3}$ が成立する周波数領域が観察される。これは、界面付近での吹送流による界面せん断乱流の特性と考えられる。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-15 は風波が発生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 の分布を示す。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、今回の実験条件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。この点に関しては風速の増加に伴う風波の発達における逆流場の特徴と考えられるが、本実験データのみからではその詳細なメカニズムを説明できないので今後更なる検討をしていきたい。

3.6 水面変動

図-16 は最大風速 $U_{a,max}$ に対して水面変動強度 (水面変

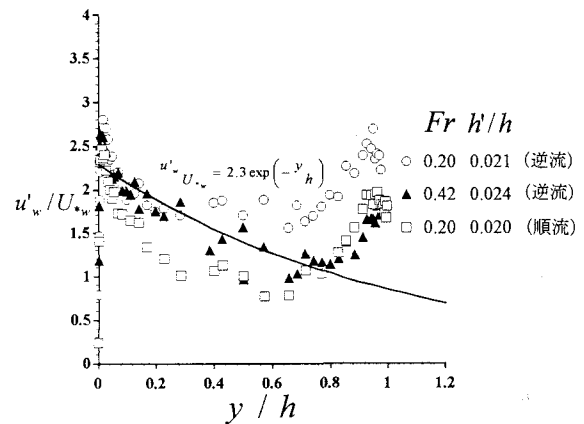


図-17 水面変動強度と主流方向乱れ強度

動のrms値) h' を示したものである。同図には順流場のデータ¹⁰⁾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、同じ逆流場では高フルード数流れより低フルード数流れのほうが水面変動強度は大きくなっている。

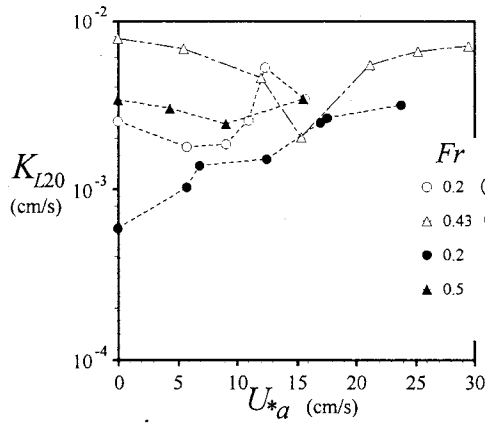


図-18 空気層界面摩擦速度と気体輸送速度

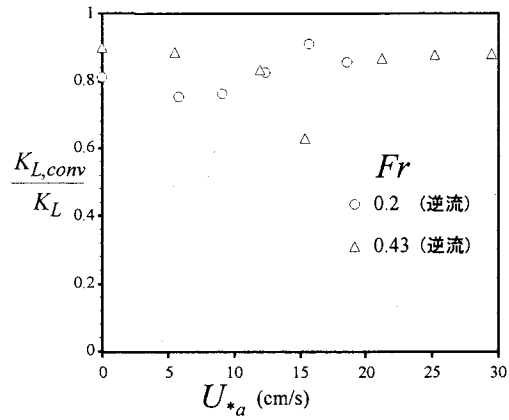


図-19 気体輸送速度における移流項割合

図-17には水面変動強度がほぼ等しい流れ場における乱れ強度 u' の分布を示したものである($h'/h \cong 0.02$)。図より、水面変動強度がほぼ等しい流れでも、その流れ場の種類によって乱れの特性が異なることが分かり、順流と逆流とで組織乱流が相違することが推測される。

4. 気体輸送過程

ここでは、空気水流間における気体輸送プロセスの指標である気体輸送速度について考察する。水層における気体輸送速度は、水層での酸素濃度及び再曝気係数 K_2 (s^{-1})を用いて以下のように表現できる¹¹⁾。

$$\frac{dC}{dt} = K_2 (C_s - C(t)) \quad (2)$$

C_s は飽和溶存酸素濃度、 C は溶存酸素濃度である。水流の断面平均流速が存在する場合には、移流項の評価が必要になる。Moog(1995)¹²⁾によると次式で再曝気係数が評価できる。

$$K_2 = -\frac{\partial \ln D}{\partial t} - U_{w,mean} \frac{\partial \ln D}{\partial x} \quad (3)$$

ここで、 $D (= 1 - C(t)/C_s)$ は水中酸素不飽和度、 $U_{w,mean}(x)$ は水流の断面平均流速である。右辺の第一項は非定常項 K_{acc} を示し、第二項は移流項 $K_{L,conv}$ を示す。また、気体輸送速度 K_L は次式で定義される。

$$J = K_L (C_s - C) \quad (4)$$

J は気体輸送フラックス、気体輸送速度 K_L と再曝気係数 K_2 との関係式は、次式で与えられる¹¹⁾。

$$K_2 = K_L \frac{A}{V} \approx K_L / h \quad (5)$$

ここで、 V は水層体積、 A は気液接触面積である。風波発生下でも水表面積の増加率はほとんど無視できることは中山・補津(2000)¹³⁾によって指摘されている。したがって、本研究では再曝気係数 K_2 に水深 h をかけることで気体輸送速度 K_L を算出した。また、計測した気体輸送速度 K_L は水温依存性がある。そこで、Elmore and West(1961)¹⁴⁾にならって、次式を用いて20℃での値 K_{L20} に補正した。

$$K_L = K_{L20} \theta^{T-20} \quad (6)$$

ここで、 T (°C)は水層平均水温、 θ は温度補正係数($=1.0241$)である。図-18は逆流場における気体輸送速度 K_{L20} を空気層の摩擦速度 U_{*a} に対して示したものである。図中には既往研究による順流場のデータを併示した。底面シアの小さい流れ場 ($Fr = 0.2$) では界面シアが大きくなるにつれて気体輸送速度は大きくなるが、底面シアの大きい流れ場 (高 Fr 数流れ) では界面シアが増加しても気体輸送速度が大きく変化していない。この傾向は逆流場においても順流場と同様にみられた。詳しく検討すれば、順流場においては摩擦速度 U_{*a} に関わらずフルード数 Fr が大きくなると気体輸送速度 K_{L20} は大きくなっている。同様に、逆流場においても U_{*a} の小さいケースではフルード数の大きい流れで K_{L20} が大きくなっている。しかし、 U_{*a} が増加すると低フルード数と高フルード数で K_{L20} が同程度の値をとっている。これは、逆流場特有の現象であると推測され、今後、実験ケースを増やしてさらに検証する必要がある。フルード数が等しい流れ場における逆流場と順流場とは、逆流場のほうが気体輸送速度が比較的大きく、逆流場では順流場と比較して気体輸送を促進すると考えられる。図-19は気体輸送速度における移流項の割合を示したものである。図より水層のフルード数及び空気層の摩擦速度 U_{*a} に関わらず、移流項の割合は大きく、ほぼ0.8で一定の割合であることが分かる。

5. 結論

本研究では、レーザー流速計 (LDA) と波高計の同時計測及び溶存酸素計 (DO メータ) を用いた気体輸送速度の計測を行うことによって、逆流場における乱流特性及び気体輸送過程を解明しようとしたものである。現象が複雑であることから順流場において得られているデータとの比較検討から研究を行った。本研究で得られた主要な知見は以下のとおりである。

- (1) 逆流場においても順流場と同様に風波の発生によって乱れ構造は大きく変化するが、乱れ特性の変化の様子は順流場と逆流場では異なる傾向を示すことがわかった。また、水・空気2層流における水層の乱れ特性は空気流と水流との相対速度の影響に加えて水流のフルード数の影響を強く受ける。
- (2) 空気流と水流の流速が同程度であっても、逆流場と順流場では風波による変動の卓越周波数に大きな差異がみられることが分かった。順流場と比較して逆流場では周波数の小さい風波が発生する。また、逆流場と順流場では界面シアの増大に伴う風波の発達過程においても違いがみられた。
- (3) 逆流場のほうが順流場に比べて界面シアの影響による風波が発生しやすい。また、水面変動強度が同じであっても流れ場が異なれば流れ場の乱れ特性は異なることが確認された。
- (4) 気体輸送過程に関して、逆流場では順流場と同様にフルード数の増加に伴って気体輸送量が増加する傾向にある。また、同程度のフルード数では逆流場の方が順流場よりも気体輸送が促進されるようである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.

- 4) 水野信二郎・埜口英昭・木村康隆：風と開水路の流れの相互作用に関する室内実験, 水工学論文集, 第41巻, pp.1145-1148, 1997.
- 5) 瀬津家久・垂井晃一・吉田圭介：逆流風波開水路混成場における乱流特性に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.505-510, 2005.
- 6) O'Connor, D. J. : Wind effects on gas-liquid transfer coefficient, *J. Environ. Eng.*, vol.109, No.3, pp.731-752, 1983.
- 7) Chu, C. R. and Jirka G. H. : Reaeration in Combined Wind/Stream Driven Flows, *Air-Water Gas Transfer*, ed. By Jahne, B. and Monahan, E., pp.79-88, AEON Verlag, 1995.
- 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) 瀬津家久：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.
- 10) 瀬津家久・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.
- 11) 吉田圭介：水面上に風シアを伴う開水路における組織乱流構造と気体輸送に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 2005.
- 12) Moog, D. B. : BOD and oxygen relationship in streams, *J. Sanitary Engrg. Div. Proc. ASCE*, Vol.90, SA3, pp.53-78, 1964.
- 13) 中山忠暢, 瀬津家久：水・空気2層流における界面での表面積の増加率およびその他の因子が気体輸送に及ぼす影響, 水工学論文集, 第44巻, pp.891-896, 2000.
- 14) Enmore, H.L. and Weat, W.F. : Effects of water temperature on stream reaeration, *J. Sanitary Engrg. Div. Proc. ASCE*, Vol.87, SA6, pp.59-71, 1961.

(2005年4月15日 受付)