

振動格子乱流場における水表面近傍の乱れ特性

Turbulent Characteristics near Free Surface of an Oscillating-Grid Turbulence Field

小松利光*・柴田敏彦**・朝位孝二***・高原健太郎****

By Toshimitsu KOMATSU, Toshihiko SHIBATA, Koji ASAI and Kentaro TAKAHARA

The influence of free surface on the characteristics of turbulence have been investigated experimentally. An oscillating grid was used to generate turbulence in a tank filled with water. The turbulence and the pressure disturbance were measured by both LDV and FLV and the pressure transducer, respectively. The results from the experiments showed that the vertical turbulence was converted into the horizontal one through the pressure fluctuation near the free surface. In addition, it is obvious that there are the dominant eddies contributing to the turbulent characteristics near the free surface as well as the energy exchange due to the pressure redistribution.

Keywords : oscillating-grid turbulence, free surface,
pressure redistribution, eddy structure

1. まえがき

近年のコンピューターの発達と数値計算法の改良により、様々な乱流場のシミュレーションが乱流モデルを用いて活発に行われるようになってきた。しかしながら、自由水表面近傍における乱流構造がまだあまり明らかにされていないために、水表面での境界条件が計算の精度向上に対する大きな妨げの一つとなっている。したがって、水表面における境界条件の与え方を確立することは重要であり、そのためには水表面近傍の乱流構造を詳細に知る必要がある。また水質工学の見地からも、水表面近傍の乱流構造は曝気など水表面を通じてのスカラー量の輸送に深く関わっているため、その構造の詳細な知見を得ることが強く望まれている。

開水路せん断乱流については Nezu *et al.*¹⁾ が LDV を用いて乱流計測をおこない水表面近傍の乱流特性量を得ている。このデータに基づいて 柗津ら²⁾ は等方 $k-\epsilon$ 乱流モデルのための自由水表面の処理方法を鉛直 2 次元開水路流れに対して提案している。また Komori *et al.*³⁾ も LDV を用いて開水路せん断流の乱流計測を行い、曝気等に関係する表面更新渦の検討を行っている。一方平均せん断流が存在しない振動格子乱流場については Brumley and Jirka⁴⁾ が水表面近傍の乱流計測を詳細に行っている。しかしながら、彼らの計測

*	正会員	工博	九州大学教授	工学部建設都市工学科
**	正会員		九州大学技官	工学部建設都市工学科
***	正会員	工修	九州大学助手	工学部建設都市工学科
****	学生員		九州大学大学院	工学研究科修士課程水工土木学専攻

(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

はホットフィルム流速計を水平面内で回転させて行なっているためかデータのばらつきが大きい。著者らは振動格子乱流場を対象にレーザー流速計及び拡散形半導体小型圧力変換器を用いて乱れの一連の高精度な計測を行った。本論文はこれらのデータを解析・考察することにより水表面近傍の乱流構造を検討したものである。

2. 水表面近傍の乱れ特性

2.1 実験装置及び測定方法

本実験(実験A)で用いた装置の概要を図-1に示す。水槽は断面25 cm×25 cm、高さ60 cmの亚克力製で、水槽底部に1 cm幅の角柱正方の振動格子を取り付けている。格子間隔は5 cmである。水平方向乱れ成分 u をLDV(Laser Doppler Velocimeter)で、鉛直方向乱れ成分 w をFLV(Fiber Laser Velocimeter)で測定した。LDV、FLVからの出力はAD変換された後、統計処理された。

従来の測定結果との直接的な比較は困難となるが、本実験では水表面の存在が乱れに及ぼす影響だけを厳密に調べるため以下に述べるような測定法を採用した。測定点とエネルギー発生源との距離を固定して同一条件のもとで、測定点と水表面の間の距離 Δz を変えて実験を行った。図-2に示しているように格子の振動の中心位置を z 座標の原点とし、 z の位置に測定点を固定し水深を変えることにより水表面の影響を変化させて検討した。 $z=10.0$ cm, 12.5 cm, 15.0 cmの3種類の実験を行った。いずれの場合も $\Delta z=0.3$ cmからはじめ、徐々に水深を増加させて計測した。格子はストローク長6 cm、振動数4 Hzで振動させた。水表面近傍ではFLVからのレーザー光は通常の利用方では水表面を突き抜けて外にでてしまうので、図-1に併示しているように水表面近傍の計測はFLVを少し傾けて行った。また振動格子乱流における自由水表面と固体壁面との相違を検討するため、亚克力板を水表面の位置に設置し同様の計測を行った。

ところで、この実験方法で問題となるのは水深を変えるために水槽内の水の全体積ひいてはエネルギー散逸場のボリュームが一定でなくなり、このことが乱れ特性量に影響を与えてしまう可能性があることである。しかしながら後述の図-3、4で水表面が離れてほとんど影響がない場合に乱れ強度がほぼ一定値を示して

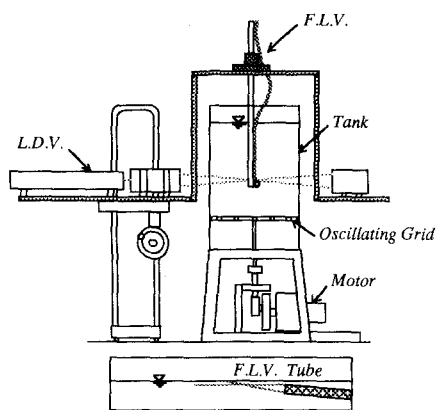


図-1 実験装置

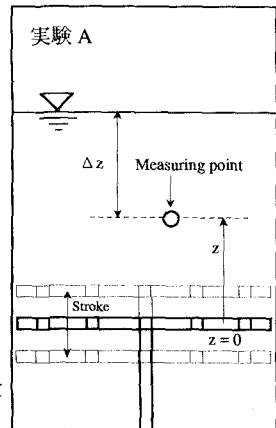


図-2 記号説明及び乱れ強度の測定

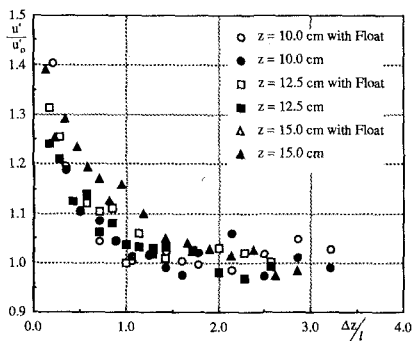


図-3 水平方向乱れ成分 u の乱れ強度

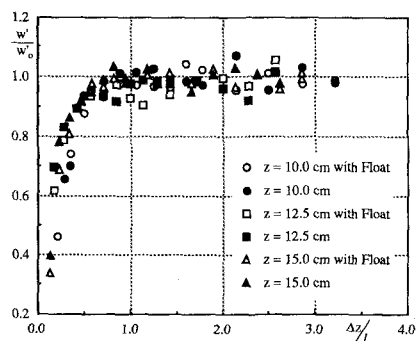


図-4 鉛直方向乱れ成分 w の乱れ強度

いることから分かるように、この実験の範囲内では水の全体積の変化は乱れ特性量にそれ程大きな影響を与えないということを確認した。

2.2 乱れ強度

水平方向の乱れ強度 u' 及び鉛直方向の乱れ強度 w' をそれぞれ図-3、図-4に示す。縦軸は、水表面が十分上方にあり測定点が水表面の影響を受けない場合の乱れ強度 u_0' 、 w_0' で無次元化されている。また横軸は測定点と水表面の間の距離 Δz を、次式で示される水表面の影響がない場合の振動格子乱流場の水平方向の乱れの積分長さスケール⁵⁾で無次元化した量である。

$$l = az \tag{1}$$

ここで a は比例定数で 0.14 を採用した⁶⁾。

これらの図より水平方向の乱れ強度は水表面が近づくにつれ増加し、一方鉛直方向の乱れ強度は水表面に抑えられて急激に減少していくことが分かる。また自由水表面の乱れ強度に及ぼす効果と固体壁面の効果はこの実験においては差は見られず、同様な働きをすることが分かる。水表面の影響を受ける層 (Surface-influenced layer) の厚さは乱れの方法成分によって異なり鉛直方向の乱れの方が水平乱れに比べて小さいが、およそ水平方向の乱れの積分長さスケールの 1 ～ 1.5 倍程度である。

2.3 タイムスケール

図-5は水平方向の乱れ u の積分タイムスケールを、図-6には鉛直方向の乱れ w の積分タイムスケールを示している。積分タイムスケールは水表面の影響のない Δz が大きい条件の下で得られた値で無次元化されている。図-5より水平方向の乱れの積分タイムスケールは水表面の影響をあまり受けておらずほぼ一定の値となっている。一方、鉛直方向の乱れのタイムスケールは水表面の影響を強く受けており、水表面が近づくにつれて急激に減少し 0 に近づく。また両スケールとも自由水面と固体壁面の違いによる顕著な差違は見受けられなかった。

2.4 周波数スペクトル

図-7に水平方向の乱れの周波数パワースペクトルを、図-

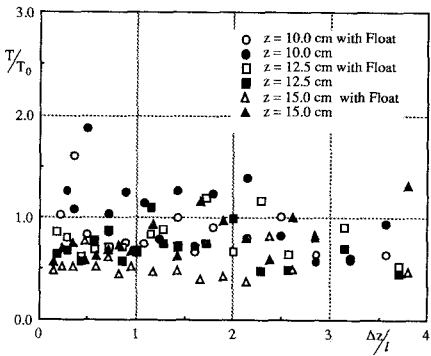


図-5 u の積分タイムスケール

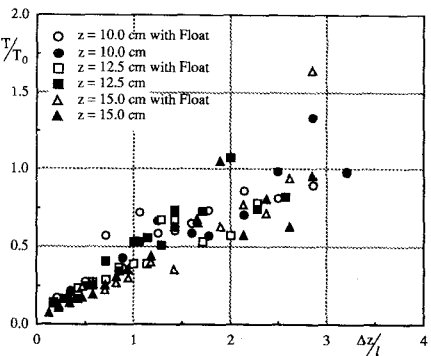


図-6 w の積分タイムスケール

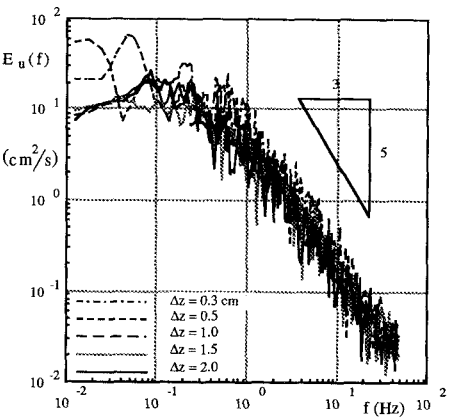


図-7 u のスペクトル

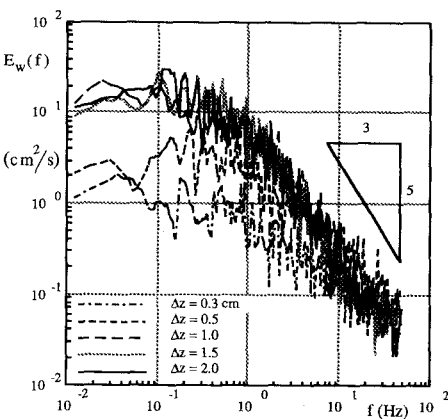


図-8 w のスペクトル

8に鉛直方向の乱れの周波数パワースペクトルをそれぞれ示している。水表面が近づくと水平方向の乱れのスペクトルは低周波側でやや大きくなっている。一方鉛直乱れのスペクトルは低周波側で顕著に減少し、乱れが抑制されていることが分かる。高周波側では共に顕著な影響はみられなかった。

3. 水表面近傍の乱れの空間スケール

3.1 実験装置及び測定方法

上述の実験は点計測でありしかも平均流が存在しないため空間的なスケールを得ることはできない。そこで次の実験を行い水平方向と鉛直方向の空間スケールを評価した。図-9は空間スケールの測定方法を示したものである。

実験B-1では水平方向乱れの水平空間スケールの測定を行った。計測点を原点から z の距離に設定し、水中にアクリル板を計測点から Δz 離して水平に設置し、LDVとFLVの水平距離 Δx を0 cmから12 cmまで1 cm間隔に変化させて u の同時測定を行った。 Δz は0.2 cmから6.5 cmまで変化させている。この一連の測定を $z = 10.0$ cm、12.5 cm、15.0 cmの3種類行った。実際の水表面では乱れのため小さな水面変動が現れるが、ここでは水表面の変動は無視できるような条件のもとで実験を行うこととし、前節の考察から水中に水表面の代わりにアクリル板を設置した。

実験B-2は鉛直方向の乱れの鉛直方向の空間スケールの測定である。同時測定の計測点を鉛直方向に2点とると、振動格子からの距離が各測点で異なるため正しい空間スケールの測定ができない。そこで便宜的にアクリル板を水中に鉛直に挿入し、これを模擬水表面とした。FLVを板から Δx (Δz に相当する)だけ離れた点に設置し、LDVをFLVから1 cm間隔で水平方向に移動させ u (w に相当する)の2点の同時測定を行った。一連の測定終了後 Δx を変化させ ($\Delta x = 0.5$ cm $\sim$ 7 cm)同様の測定を行った。測定点は実験B-1と同様 $z = 10.0$ cm、12.5 cm、15.0 cmである。

3.2 実験結果と考察

今回の測定で得られた水平方向及び鉛直方向空間スケールをそれぞれ図-10、図-11に示す。これらの図の縦軸は測定点が水表面の影響を受けない Δz の大きいときに得られた乱れの積分空間スケールで無次元化された量を示しており、横軸は(1)式の水平乱れの長さスケールで無次元化された Δz を示している。水平空間スケールは水表面の極近傍でわずかに減少しているものの、全体的にあまり大きな変化は見られない。一方、鉛直空間スケールはSurface-influenced layer ($\Delta z/l = 1 \sim 1.5$)内で水表面の存在により抑えられて顕著な減少傾向を示している。

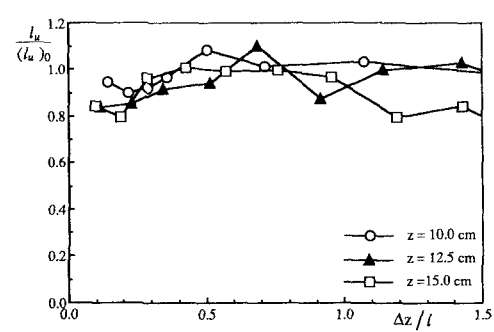


図-10 u の水平方向空間スケール

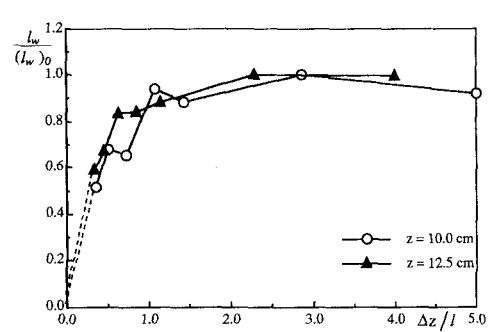


図-11 w の鉛直方向空間スケール

4. 圧力変動を介してのエネルギー変換

4.1 実験装置及び測定方法

実験 A の結果より、水表面近傍では鉛直方向の乱れ強度は減少し水平方向の乱れ強度が増加することが確認された。これは圧力変動を介して鉛直方向の乱れエネルギーが水平方向の乱れエネルギーに変換されるためと思われる。そこで圧力と乱れ速度を同時測定し、エネルギー変換のメカニズムに関する考察を行った。

まずはじめに速度変動および圧力変動の測定を行い、鉛直方向乱れ w 、水平方向乱れ u および圧力変動 p の三者による相互相関を求める実験を行った。乱れ測定には FLV と LDV を、圧力測定には拡散形半導体小型圧力変換器 (Pressure Transducer) を用いた。測定方法を図 - 12 に示す。

実験 C - 1 では水表面を原点から 10.0 cm の距離に設定し、水表面下 0.1 cm に圧力変換器を設置する。その直下 $\Delta z = 0.5$ cm の位置 ($z = 9.4$ cm) に鉛直乱れ成分 w を測定するための FLV を、また $\Delta z = 0.2$ cm の位置に水平乱れ成分 u の測定のための LDV を設置し、LDV と FLV の間の水平距離 Δx を 0.0 cm から 2.5 cm まで変化させて u 、 w 、 p の同時測定を行った。

実験 C - 2 は実験 C - 1 の測定点が水表面の影響を受けない場合の乱れの特性を調べるため、測点はそのまま水表面を離して原点から 20.0 cm のところに設定し同様の測定を行った。ただし、圧力変換器は水表面では測定可能であるが水中では乱れによる動圧成分も併せて計測してしまうため純粋に静圧変動だけを測定することができない。したがってこの実験においては u 、 w のみの同時測定を行った。

実験 C - 3 では水表面を原点から 10.0 cm の距離に設定し、LDV を $\Delta z = 0.2$ cm、 $\Delta x = 0.5$ cm に固定して FLV を $\Delta z = 0.0$ cm ~ 1.6 cm の範囲で変化させて u 、 w 、 p の同時測定を行った。

次に圧力動揺による乱れエネルギーの方向配分を直接調べるために乱れの勾配と圧力変動の同時測定の実験を行った。図 - 13 に示すように振動格子の振動の中心から上向きに z 軸座標を、右向きに x 軸座標をとり、水表面を原点から 10.0 cm の点に設定する。

実験 C - 4 は $\partial p / \partial z$ と p の測定の実験で、水表面下 0.1 cm に圧力変換器を設置し、その真下で距離 Δz のところに鉛直流速変動成分 w_1 の測定のための FLV を設置し、 Δz を 0 cm から 1.6 cm まで変化させて w_1 、 p の同時測定を行った。

一方、実験 C - 5 は $\partial u / \partial x$ と p を測定するための実験で、水表面下 0.2 cm に圧力変換器、その直下に u_2 測定のための FLV を設置し、これからの距離 Δx のところに u_1 測定のための LDV を設

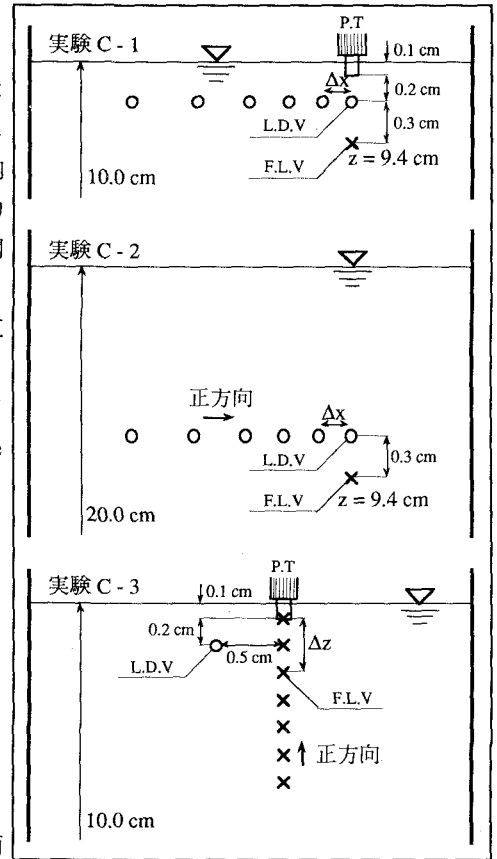


図 - 12 u 、 w 、 p の同時測定

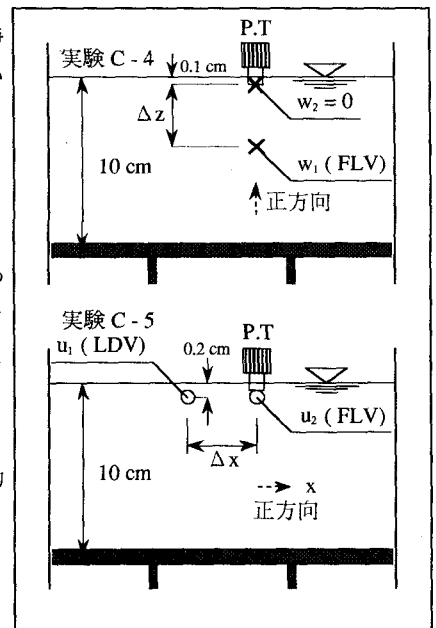


図 - 13 圧力再配分項を評価するための実験

置した。そして u_1 の測点を $\Delta x = 0 \text{ cm}$ から 1.4 cm まで変化させて u_1 、 u_2 、 p の同時測定を行った。

4.2 実験結果とその考察

実験 C-1、C-2 のデータより $w-u$ の相互相関係数 R_{wu} を求めた。その結果の一部を図 - 14 に示す。 w の測定点が水表面に比較的近いため $\tau = 0$ 付近で負のピークが見られ、 Δx が大きくなるにつれてこのピークの値も大きくなる。これは w の運動と u の運動が連動していることを示しており、ある程度の拡がりを持ったユニットとしての渦構造体が水表面付近にきたときの w と u の挙動を表しているものと思われる。そこで、 $\tau = 0$ におけるピークの値を読み取り、 Δx に対してプロットしたのが図 - 15、16 である。水表面の影響がない場合はピークの絶対値が大きな値を持つのは $\Delta x = 0.2 \sim 0.7 \text{ cm}$ であるのに対し、水表面がある場合には $\Delta x = 0.8 \sim 1.5 \text{ cm}$ となり高い相関域が横に広がっていることが分かる。

実験 C-3 の鉛直方向距離に関する $w-u$ の相互相関係数において各 Δz に対し相関係数がピーク値をとるときの τ の値をプロットしたものが図 - 17 である。ピーク値には $\Delta z = 0.3 \sim 1.5 \text{ cm}$ の範囲では $\tau = 0$ の付近で生じるが、 Δz が増加するにつれて時間遅れが生じており、 Δz が大きい点では w が生じた後水表面付近の u が生じることを示している。

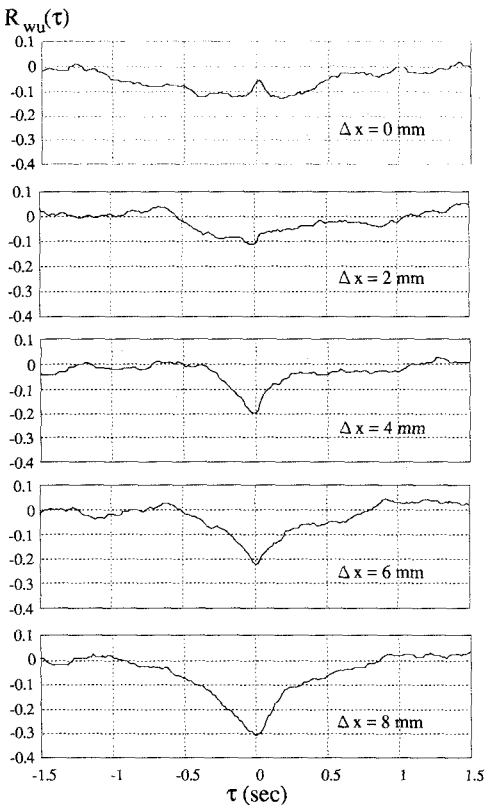


図 - 14 w と u の相互相関係数 R_{wu} (実験 C-1)

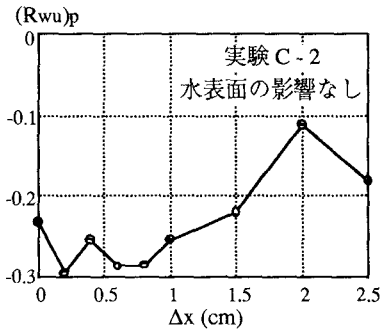


図 - 15 w と u の相互相関係数のピークの値 $(R_{wu})_p$

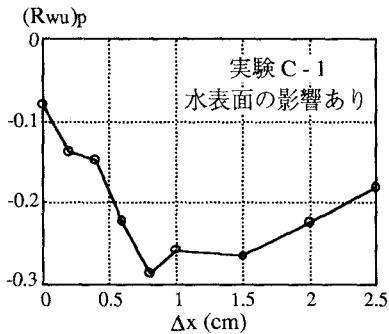


図 - 16 w と u の相互相関係数のピークの値 $(R_{wu})_p$

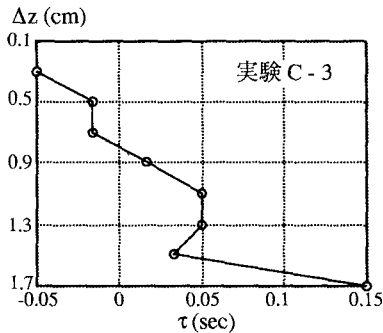


図 - 17 相互相関係数 R_{wu} がピーク値をとるときの τ の値

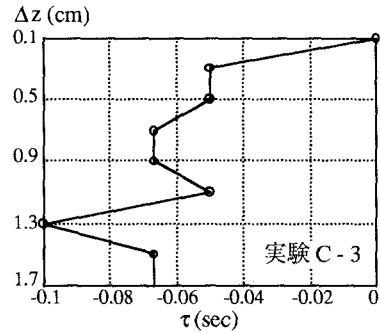


図 - 18 相互相関係数 R_{pw} がピーク値をとるときの τ の値

また p と w の相互相関係数 R_{pw} から、圧力の変動 p は変動 w よりすこし遅れて生じ、正の相関があることが分かった(図-20)。このピークの遅れ時間を Δz に対してプロットしたものが図-18である。この図からピークの遅れは p - w 間の距離 Δz が大きくなるにしたがって増加する傾向が見られ、 p の変動は w の衝突による動圧成分の影響を大きく受けていることが分かる。

次に各方向への乱れの再配分項について検討する。実験 C-4、C-5 において圧力変換器の真下では鉛直方向の流速を 0、また圧力と流速の相関も 0 という条件を用いて以下の計算を行った。ただし、 $\Delta z = 0$ の場合は w の鉛直方向の勾配が求められないため、やむなく凍結乱流の仮定を拡張 ($\partial w / \partial t + w \partial w / \partial z = 0$) して近似的に用いた。

$$\frac{\overline{p \frac{\partial w}{\partial z}}}{\rho} = \frac{\overline{p \frac{w_2 - w_1}{\Delta z}}}{\rho} = \frac{\overline{p \frac{0 - w_1}{\Delta z}}}{\rho} = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{\Delta z} \overline{p w_1} \quad (\Delta z \neq 0) \quad (2)$$

$$\frac{\overline{p \frac{\partial w}{\partial z}}}{\rho} = -\frac{\overline{p \frac{1}{w_1} \frac{\Delta w_1}{\Delta t}}}{\rho} = -\frac{1}{\rho \Delta t} \overline{\frac{p \Delta w_1}{w_1}} \quad (\Delta z = 0) \quad (3)$$

$$\frac{\overline{p \frac{\partial u}{\partial x}}}{\rho} = \frac{\overline{p \frac{u_2 - u_1}{\Delta x}}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{\Delta x} \overline{p(u_2 - u_1)} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{\Delta x} (\overline{p u_2} - \overline{p u_1}) = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{\Delta x} \overline{p u_1} \quad (4)$$

その結果、次の値が得られた。

$$\frac{\overline{p \frac{\partial w}{\partial z}}}{\rho} \cong -340 \text{ (cm}^2/\text{s}^3) \quad , \quad \frac{\overline{p \frac{\partial u}{\partial x}}}{\rho} \cong 200 \text{ (cm}^2/\text{s}^3)$$

これは連続の式から得られる(5)式を近似的に満足し、測定データの信頼性を実証する結果となっている。

$$\frac{1}{\rho} \left(\overline{p \frac{\partial u}{\partial x}} + \overline{p \frac{\partial v}{\partial y}} + \overline{p \frac{\partial w}{\partial z}} \right) = 0 \quad , \quad \left(\overline{p \frac{\partial u}{\partial x}} = \overline{p \frac{\partial v}{\partial y}} \right) \quad (5)$$

図-19 は実験 C-4 から得られた圧力変動 p と w の鉛直方向勾配の相互相関を τ に対して示したものである。ピーク値における τ が負であることから、速度変動 w に勾配が生じた後に圧力変動が起こっている。また圧力変動と速度勾配は負の相関をもつことから減速する乱れ w が圧力上昇を引き起こしていると考えられる。同様のことは図-20 の p と w の相互相関係数 R_{pw} からも言える。

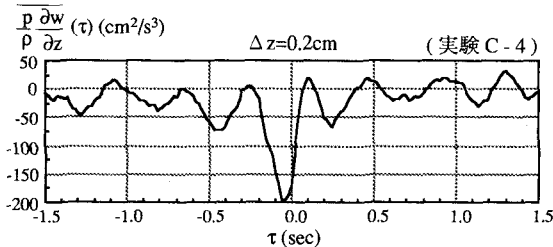


図-19 $\frac{\overline{p \frac{\partial w}{\partial z}}}{\rho}(\tau)$ の値

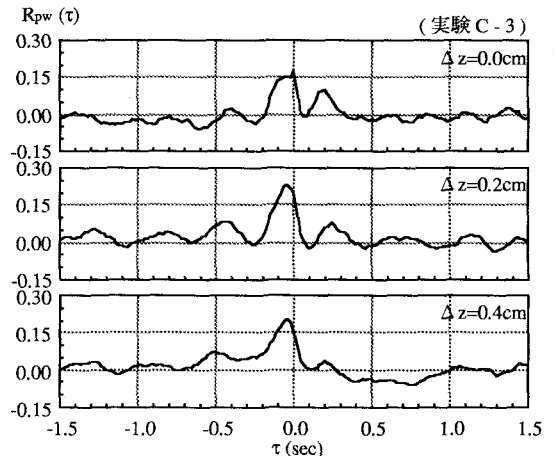


図-20 相互相関係数 R_{pw}

5. 結び

本論の内容を要約すると以下の通りである。

(1) 水表面近くでは鉛直方向の乱れ強度は水表面の存在により押え込まれて減少するが、逆に水平方向の乱れ強度は急激に増加し非等方性が大きくなる。

(2) 水表面の影響を受ける層 (Surface-influenced layer) は水平方向乱れの水平積分スケールの 1 ~ 1.5 倍程度の厚さをもつ。

(3) 水平方向の乱れの積分タイムスケールは水表面の影響をあまり受けずほぼ一定であるが、鉛直方向の乱れのタイムスケールは水表面が近づくにつれて急激に減少し 0 に近づく。

(4) 水平方向の乱れエネルギーは水表面が近づくとき低周波側で大きくなり逆に鉛直方向の乱れのエネルギーは低周波側で減少する。一方、高周波成分には共に大きな変化は見られない。

(5) 振動格子乱流場においては水表面の変動が小さい場合は自由水面と固体壁は乱れ特性量に対してほぼ同じような効果を有する。

(6) 水平方向の乱れ u に関する水平空間スケールは水表面が近づいてもほとんど変化しないが、鉛直乱れに関する鉛直方向のスケールは水表面近傍で抑えられて小さくなる。したがって渦のスケールは、水表面の影響を受けない等方的な領域では比較的球体に近い状態をしており、水表面が近づくにつれて横幅はあまり変わらないが、高さが押え込まれて扁平な形に変形するものと思われる。

(7) 鉛直方向乱れ w が圧力変動を生じさせ圧力変動が更に水平方向乱れ u を引き起こしていることが分かった。つまり圧力によるエネルギー再配分が行われていることが改めて実験的に確認された。しかしながら、 w と u の間の顕著な相関には時間遅れがないことなどからこれは時間的空間的に一体性を持った渦塊の挙動が水面付近の乱れ特性に同時に寄与していることを示しているものと思われる。

最後にこの研究を行うにあたり九州大学中村由行助教授には終始助言をいただいた。また当時九州大学大学院生であった B.S.Chayayi 氏 (現 WATER DEVELOPMENT, TANZANIA) 並びに当時九州大学 4 年生の遠藤悟氏 (現三井建設 (株)) の協力を得た。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) I. Nezu. and W. Rodi : Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer, J. Hydraulic Eng., ASCE, 112 (1986), 335-355.
- 2) 祢津, 中川 : 修正 $k - \epsilon$ 乱流モデルによる開水路乱流の数値計算, 土木学会論文集, 第 387 号 / II-8 (1987), 125-134.
- 3) S. Komori, H. Ueda, F. Ogino and T. Mizushima : Turbulence structure and transport mechanism at the free surface in an open channel flow, Int. J. Heat Mass Transfer, 25 (4) (1982), 481-521.
- 4) B. H. Brumley and G. H. Jirka : Near-surface turbulence in a grid-stirred tank, J. Fluid Mech., 183 (1987), 235-263.
- 5) S. M. Thompson and J. S. Turner : Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid, J. Fluid Mech., 67 (1975), 349-368.
- 6) 浦, 小松, 松永 : 振動格子の乱れによる密度界面の動特性と連行現象, 土木学会論文集, 第 345 号 / II-1 (1984), 91-99.