

風洞水槽内の風の乱れと水面変動

九州工業大学 正員 浦 勝

九州工業大学 学生員 ○中村 力

九州工業大学 学生員 木佐貫 徹

九州工業大学 学生員 竹原 幸生

1. はじめに 成層化した貯水池の水表面に風のせん断力が加わると流れが誘起され、密度界面(躍層)の形成および低下が生じる。界面の低下速度すなわち連行速度は界面上の乱れ強さに強く支配されており、この乱れ強さは水面に存在する表面波の有無に大きく依存している¹⁾。このため表面波の特性と界面上の流れの乱れ特性量との関係を検討したいと考えている。本研究はその第一段階として、風洞水槽を用いて風の応力の評価と表面波の性質について得られた結果を報告するものである。

2. 実験方法 実験は長さ5.0m, 幅0.2m, 高さ0.59m(貯水部水深0.39m, 風路高さ0.20m)の風洞水槽に水道水を入れて行なった。風速はホットワイヤ風速計を、水表面変位は容量式波高計を用いて測定した。座標軸は貯水槽上流端の静止水面を原点にとり、風向きにx軸、鉛直上向きにz軸をとった。

3. 水表面上の空気摩擦速度 はじめに、水面上の水平方向風速Uの鉛直分布を片対数紙にプロットしたものを図1に示す。同図において、水面近傍の流速がほぼ一様な流速 U_{sa} に達する高さを境界層厚さ δ と定義した。同図の直線は水面近傍において対数分布則

$$U/u_{sa} = 5.75 \log(z/z_0) \quad (1)$$

に一致する区間が存在するとみなして記入したものである。直線上の測定値を式(1)に代入して求めた空気摩擦速度 u_{sa} の値を図中に示した。また同図には式(1)の粗さの特性長 z_0 を30倍した数値を記入した。 z_0 は風速分布が Nikuradse の式

$$\frac{U}{u_{sa}} = \begin{cases} 5.5 + 5.75 \log(u_* z / \nu) & (u_* k / \nu \leq 5.0; \text{滑面}) \\ 8.5 + 5.75 \log(z / k) & (u_* k / \nu \geq 70; \text{粗面}) \end{cases} \quad (2)$$

に一致するとみなして、次式で求めたものである。

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= \nu / 10 u_{sa} \quad (\text{滑面}), \quad z_0 = k / 30 \quad (\text{粗面}), \\ z_0 &= k / 30 + \nu / 10 u_{sa} \quad (\text{遷移領域}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

なお ν は動粘性係数、 k は相当粗度。このようにして求めた u_{sa} と U_{sa} との関係を図2に図1

と同一記号で示した。

同図の▼印は同じ方法で求めた結果である。

次に u_{sa} を求める別の方法として、水面近傍の定せん断層をレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布より求めることが考えられる。

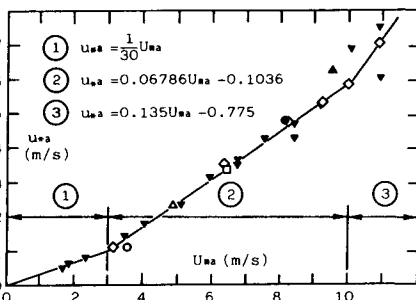


図 2

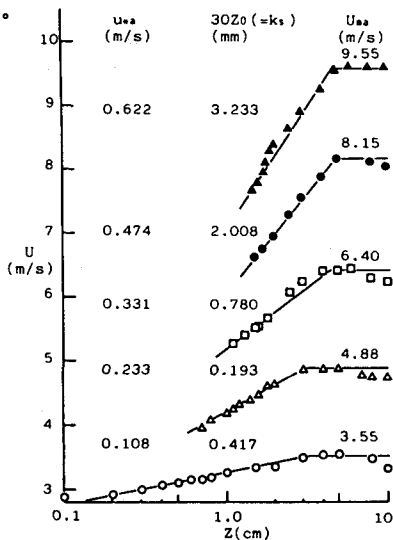


図 1

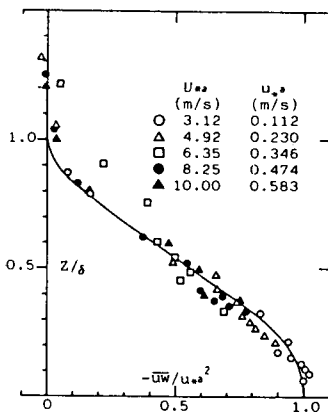


図 3

X型ホットワイヤを用いて $x=197\text{cm}$ の水平および鉛直方向の風速変動 u , w より $-\overline{uw}$ を求めた。しかし、実際には表面波の存在により $-\overline{uw}$ が一定となる領域を求めることは難しい。そこで $z/\delta=0.5$ における測定値 $-\overline{uw}|_{0.5}$ が Klebanoff²⁾ によって平板境界層で測定された値 $-\overline{uw}|_{0.5}=0.565 u_{*a}^2$ に一致するとみなして u_{*a} を求めた。この u_{*a} を用いて $-\overline{uw}/u_{*a}^2$ と z/δ の関係を示したものが図3である。このようになりよい一致がみられ、この方法も u_{*a} を求める方法として有効であると考えられる。この方法で求めた u_{*a} と U_{ma} の関係は図2に◇印で示した。図2より本実験装置の u_{*a} と U_{ma} との関係は m/s 単位を用いて次式で近似される。

$$u_{*a} = \begin{cases} (1/30) U_{ma} & (U_{ma} < 3.0 \text{ m/s}) \\ 0.0679 U_{ma} - 0.104 & (3.0 \leq U_{ma} \leq 10 \text{ m/s}) \\ 0.135 U_{ma} - 0.775 & (U_{ma} > 10 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (4)$$

上式のように水表面上の摩擦速度は U_{ma} の領域によって傾向が異なる。

4. 水面変位

水面の平均水位からの変位量 η' に関する周波数スペクトル $E_\eta(f)$ を $U_{ma}=8.15\text{m/s}$ と 6.40m/s の場合について図4(b)に示す。図4(a)には $U_{ma}=8.15\text{m/s}$ に対応する u のスペクトル $E_u(f)$ を風路中央の $z=10\text{cm}$ と水面近傍 $z=1.7\text{cm}$ の場合について示した。これより水面変位は卓越した周波数 f_m をもつ波が支配的であることがわかる。また水面近傍の u は、この波の影響を受けて変動していることがわかる。一方、水面強度 $\eta = (\overline{\eta'^2})^{1/2}$ とゼロアップクロス法を用いて求めた有義波高 $H_{1/3}$ および周期 $T_{1/3}$ と f_m との間には次の関係が得られた。

$$H_{1/3} = 3.73 \eta, \quad T_{1/3} = 1/1.05 f_m \quad (5)$$

η と U_{ma} との関係を図5(a)に○印で示した、これより η は風速と共に増大することがわかる。この卓越波の波長 L は次式

$$\left. \begin{aligned} C^2 &= ((2\pi/L)^2 Te/\gamma + (1 + (\pi H_{1/3}/L)^2 (8 + \cosh(8\pi h/L)) \\ &\quad / 8 \sinh^4(2\pi h/L))) (gL/2\pi) \tanh(2\pi h/L) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$C = L f_m$$

を用いて f_m と $H_{1/3}$ より求めた。ここに、 Te は水の表面張力、 γ は水の単位体積重量。波形勾配 η/L と U_{ma} の関係を図5(b)に示した。

このような水面上の卓越波の性質と空気流に対する粗さとの関係を見るため、式(3)を用いて求めた $x=2.0\text{m}$ における相当粗度 k ($=30z_0$) の値を図5(a)に□印で示した。 $U_{ma} < 4.5\text{m/s}$ の低風速域では滑面領域、 $U_{ma} > 10\text{m/s}$ で粗面領域となることがわかる。 η/L と k/η との関係を図6に示す。図5(b)より U_{ma} の増大に伴い η/L が増大するので η/L の増大と k/η は低風速では一義的な関係があるようであるが高風速では一定の関係がみられなくなる。このことは高風速では碎波のため高周波の波が風の抵抗に寄与していると推定される。

参考文献.

- 1) 浦 ほか：密度界面における進行に及ぼす乱れの寄与、第29回水理講演会論文集，p. 401～406，1985。
- 2) 例えば Hinze, O. M : Turbulence, p. 642, 1975.

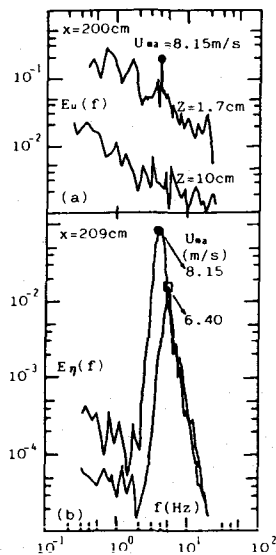


図 4

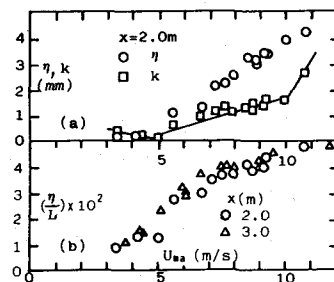


図 5

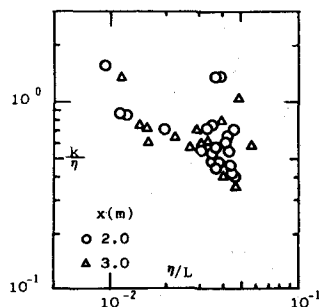


図 6