

九州工業大学 工学部 正 瀬 勝
 大学院 学 〇 松村 武彦
 工学部 〇 江口 尚
 〇 川上 英人

1. はじめに 用いた水域において、鉛直方向に成層化した密度場の自由表面に風が吹くと、密度境界面を介して混合が生じる。そこで、筆者らは、比較的小規模の風洞水槽を用いて、密度界面の進行実験を行った。しかし、この進行現象を明らかにするためには、若さる場での空気と水の気・液界面、及び、密度境界面である液・液界面、の2つの界面における運動量の輸送を評価する必要がある。本報告は、前者の現象に注目し、この風洞水槽における、風速と応力の関係、風速と波の関係について、主に、実験結果を述べる。

2. 実験装置 風洞水槽は、 $600 \times 59 \times 20$ (cm)

Table.1

で、風路高は20(cm)、貯水部は全水深39(cm)、長さ5mである。実験は、貯水部に水道水を入れ、風速は、ファン回転数を調整することにより変化させた。

実験条件と結果の一部を表1¹⁾に簡単に示す。

SYMBOL	Fw (cm)	U _b (m/s)	U _{sa} (cm/s)	Ks (mm)	ψ [*] (mm)	H _{1/2} (mm)	f _m (Hz)	C (cm/s)	L (cm)
⊕	42.5	7.53	53.3	1.72	0.97	3.33	7.82	26.8	3.43
⊙	112.5	8.10	61.2	4.91	1.42	4.81	5.60	32.3	5.81
⊗	202.5	8.70	60.9	5.65	3.11	11.10	4.40	41.5	9.43
⊖	297.0	8.70	60.8	5.08	3.89	14.20	3.81	47.1	12.35
▽	368.0	9.00	58.5	3.77	4.67	17.70	3.32	53.1	16.00
◇	297.0	5.10	35.9	4.77	0.90	3.43	5.60	31.6	5.67
⊕	297.0	6.78	52.0	7.80	2.87	11.10	4.67	40.1	8.55
◆	297.0	11.05	80.8	8.04	5.94	22.30	3.13	57.5	18.40

3. 風速と応力の関係

外力として、水表面

に与えられた風の剪断力： τ_a は、空気摩擦速度： U_{sa} を測定し、 $\tau_a = \rho_a \cdot U_{sa}^2$ の関係を用いることにより求めた。

U_{sa} は、ピトー静圧管により測定した風速分布より得た。

また、代表風速として、対数分布則から与えられる点の風速(境界層外縁風速)： U_b を用いた。これは、風速の断面平均値とほぼ等しい。図1に U_{sa} と U_b の関係を示した。

二つより、 U_{sa} と U_b は、図中の折線で近似できる4つの領域に分けることが出来る。また、同図には、他の実験者の結果も示しているが、それらに比べて、 $U_b = 5 \sim 9$ (%)で、 U_{sa} が大きい値をとるのが特徴である。これは、吹送距離

が短いことが主な原因であるが、直線(1)から(4)への遷移領域が広く存在することを見ることも出来る。しかし、図1²⁾の結果とは、同じ傾向を持つ。

4. 水表面変位のスペクトル

表面波は、吹送距離： $F \approx 0.4, 1, 2,$

$3, 3.7$ (m)の位置で、風速を3.5~12(%)に変えて、容量式波高計により、

測定した。波高計の出力を、時間刻分： $\Delta T = 0.02$ (sec)、データ総数： $N = 2048$,

として離散化し、FFT法により、スペクトルを求めた。スペクトルピークに対応する卓越周期数： S_m 、吹送距離： F 、空気摩擦速度： U_{sa} の関係を図2に示す。なお、図中の直線は、光易の式である。

同図において、実験値は、無次元摩擦速度： $U_{sa}/\sqrt{gF} < 10^{-1}$ において、光易の式から大きくはずれ、それらは $F = 2m$ における代表風速： $U_b < 6.6$ (%) の時に発生する波であり、充分に発達した波に比べ、表面張力の影響を持つ、高周波の波であることが解る。

5. 有義波としての表面波特性

上述の方法で離散化した波高計の出力に、ゼロアップクロス法を用い

て、有義波高： $H_{1/2}$ 、1/10最大波高： $H_{1/10}$ 、平均波高： $\bar{H}$ 、さらに、水表面変位のrms値： η' を求めた。

Fig.1

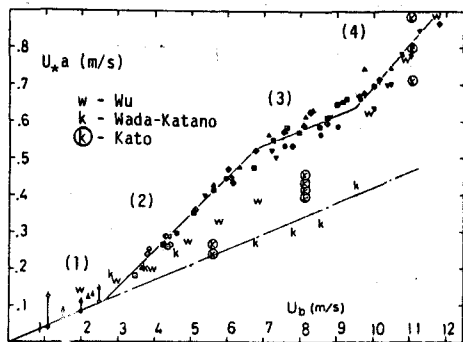
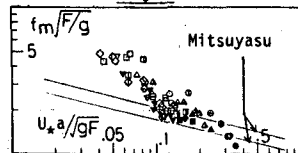


Fig.2



二水より、 $H_{1/2}=4.27\eta'$ $H_{1/3}=3.73\eta'$ $\bar{H}=2.60\eta'$ $H_{1/2}/H_{1/3}=1.14$ $H_{1/2}/\bar{H}=1.44$
 の関係を得た。一方、海岸波は、Rayleigh分布に近く、

$$H_{1/2}=5.08\eta' \quad H_{1/3}=4.00\eta' \quad \bar{H}=2.50\eta' \quad H_{1/2}/H_{1/3}=1.27 \quad H_{1/2}/\bar{H}=1.60$$

といわれている。二水より、波の発達に、海岸に比べ、抑制されていることが解る。さらに、有義周期： $T_{1/2}$ について、 $T_{1/2}=1/(1.05 S_m)$ の関係が得られ、有義波は最も高いエネルギーを持つ成分波であることが解る。そこで、 U_{b2} と吹送距離における $H_{1/2}$ の関係を図3に示した。二水より、波高は、 U_{b2} が3.0%を越えたと増加し始めた。 $U_{b2}=4\sim7\%$ の波高の発達に、 $U_{b2}>7\%$ に比べ、小さいことが解る。次に、表面張力の影響を考慮した、有限振幅波の発達の式は、次の様に表わされる。

$$C^2 = \frac{T}{\omega_0} \frac{2\pi\theta}{L} + \left\{ 1 + \frac{(\pi H)^2}{L} \frac{8 + \coth(2\pi R/L)}{8 [\coth(2\pi R/L)]^2} \right\} \frac{9L}{2\pi} \tanh \frac{2\pi R}{L}, \quad C = L/T \div L \cdot S_m$$

ここで、 T ：表面張力、 ω_0 ：水の単位体積重量、 L ：波長、 H ：波高、 R ：水深
 上式に、有義波について得られた、 $H_{1/2}$ 、 S_m を用いて、繰り返し計算により、 C と L を求めた。図4に有義波の波長と風速の関係を示す。二水より、 $L \leq 5 \text{ cm}$ 以下では波長の増加率が小さく、それ以上では急になる。この臨界波長は、表面張力の影響が、重量の1割以下になる波長($L_c \approx 5.4 \text{ cm}$)とほぼ等しい。そして、 $U_{b2} \approx 6\%$ で水路半分以下、 $U_{b2} \approx 9.5\%$ で、ほぼ全吹送距離において重力波と行ったといえる。

6. 表面波と粗度の関係 水表面近傍の風速分布が、対数分布則に従うとすれば、水表面の粗さのパラメータ： Z_0 は、次の様に表わされる。

$$Z_0 = Z \exp(-kZ/U_{*a}) \quad \text{ここで、} \quad U_*: \text{高き} Z \text{ における風速} \\ k: \text{Karman 定数}$$

二水より、相当粗度： kZ_0 は、近似的に、完全粗面に対し、 $kZ_0 = 33Z_0$ 、遷移領域では $kZ_0 = 33(Z_0 + 1/10 \cdot U_{*a}/\nu_{*a})$ として求まる。図5に kZ_0 と η' の関係を示す。

また、図6に η' と kZ_0 の関係を、波の勾配： η'/L で表わした。二水より、低風速で表面張力の影響を受ける時は、風に對して個々の水表面の凹凸が、形状抵抗として効いて、 $kZ_0/\eta' \approx 8$ となるが、波が発達して重力波になると、波の勾配 $\eta'/L \approx 0.035$ ($\bar{H}/L \approx 0.1$) となり、 kZ_0/η' は、1.0~1.3 となるようである。

7. おわりに 以上より、本風洞水槽は吹送距離が短いので、低風速で発生する波は、表面張力の影響を持つ高周波の波であり、空気に対する粗さの効果が大きく、高風速では、重力波となり、空気に対する粗さは小さく、ほぼ一定値となる。

さらに、図5に示した4つの領域は、(1)：風の剪断力が全て水の剪断力となる領域、(2)：表面張力波から重力波への発達過程で、風の剪断力のうち、波の形成に費やされる割合が増加する領域、(3)：重力波の発生とともに、表面張力の影響が次第に小さくなる領域、(4)：水路全域で重力深水波となり、風の剪断力の一部のみが波の維持に、大部分が、吹送流に費やされる領域、となる。最後に、本研究に對し御指導いただいた、元川大学工学部 橋本一郎教授に、深く感謝を表わします。

(参考文献) 1) 浦・松岡；元川工業工学研究報告 No.44 (1982)

2) Kunishi；京大防衛研究所年報 Bulletin No.61 March, 1963

Fig.3

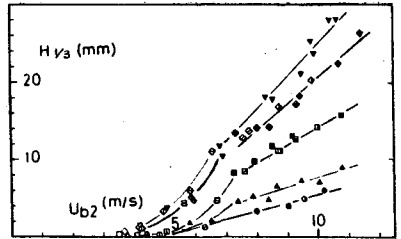


Fig.4

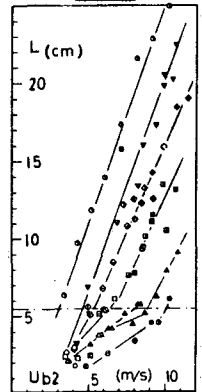


Fig.5

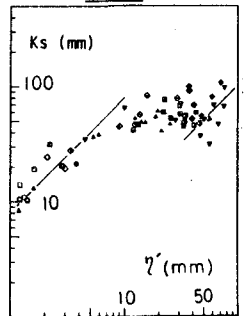


Fig.6

