

風の剪断力による密度境界面の挙動

九州工業大学 工学部 正員 浦 勝
大学院 学生員 松 利 武 彦
工学部 学生員 藤 田 武 彦

1. はじめに 閉じた水域において、安定に成層化された密度場の自由水面に風が吹くと、密度境界面を介して混合が生じる。筆者らは、この混合現象を解明するために、風洞水槽を用いて進行実験を行っている。⁽¹⁾ 本報告では、進行のメカニズムとしての界面波に注目して、主に実験結果を述べる。

2. 実験概要 実験の概念図を図1に示す。実験は長さ500cm、幅20cm、総水深39cmの貯水部に、初期上層水深 H_{10} 、初期密度差 $\Delta\sigma_s$ の密度二成層の場を水道水と塩水を用いて形成した後、高さ20cmの風路に、上流側のファン回転数 N を制御し、水表面上に一定の風速(マッハ速度 U_{Ma})を加えて、密度境界面の挙動を測定したものである。鉛直密度分布の時間的変化は、貯水部始端からの距離 $x = 143, 223, 344$ cmの3断面で測定した。密度界面変位の時間的変化は、 $x = 247$ cmの位置に、 $\Delta x = 1.0$ cmの間隔で2本の抵抗棒式内部波高計により求めた。実験条件を表1に示すが、界面の時間的変位は、界面低下に応じてそれぞれ7回程度測定した。

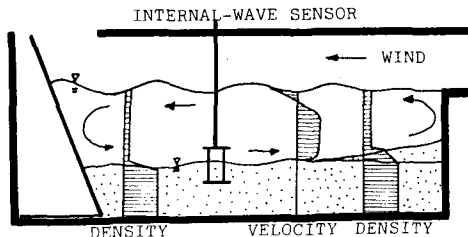


Fig. 1

EXP. NO.	60	80	100
SYMBOL	○	△	□
N (rpm)	600	800	1000
U_{MAX} (cm/s)	4.92	6.15	7.85
U_{Ma} (m/s)	0.32	0.49	0.62
$\Delta\sigma_s (10^{-3} \text{ g/cm}^3)$	7.8	8.2	7.8
H_{10} (cm)	19.3	19.5	19.0
$U_{ef} (10^{-3} \text{ cm/s})$	0.809	3.30	14.29
U_{ef} (cm/s)	0.80	1.1	1.65
Rir	230	129	53.3

Table 1

3. 実験結果 界面変位の時間的変化の一例を図2に示す。同図はそれぞれの実験結果の最初の記録であり、風の吹送開始後の時間 t 、上層水深 H_1 、密度差 $\Delta\sigma$ 、界面変位のrms値 σ' を示した。次に界面変位の周波数空間における特性を調べるために、これらのデータを時間間隔 $\Delta t = 0.1$ sec、総数2048×2のデジタル量に変換し、FFT法により変位スペクトルを求めたのが図3である。また、クロススペクトルより波速 c を求め、波長 λ との関係を示したものが図4である。ただし波速は、上層逆流速度と同じ向きを正とした。同図の曲線は、 $K \cdot H$ 深水波(式①)を表れる。

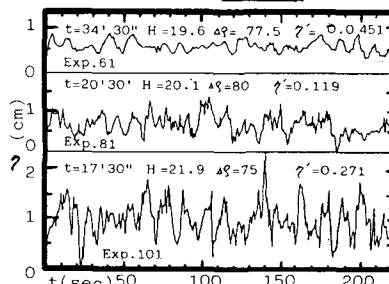


Fig. 2

$$\frac{c_{\pm}}{U_r} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{\varepsilon g L}{\pi U_r^2} - 1} \right) \quad \text{--- ①}$$

更に、波速 c の周波数 f ごとの分散を上層逆流平均流速 U_r と密度差 $\varepsilon g (= \Delta\sigma/g \cdot g)$ を用いて無次元化したものを図4に示す。なお同図の曲線は、 $K \cdot H$ 深水波(式②)である。⁽²⁾

$$\frac{c_{\pm}}{U_r} = \frac{1}{8} \left[\left(4 + \frac{\varepsilon g}{\pi U_r^2} \right) \pm \sqrt{\left(4 + \frac{\varepsilon g}{\pi U_r^2} \right)^2 - 32} \right] \quad \text{②}$$

最後に、界面変位を1つの波で表現するためにZero-up-cross法により、界面変位のrms値 σ' 、有義波高 $H/3$ 、周期 $T/3$ 、などを求めた。図5(a)には、 σ' と $H/3$ の関係を示した。

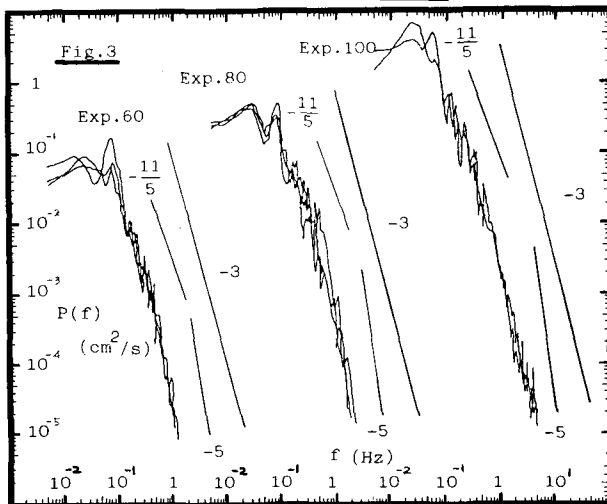


図6(b)は、 $T=6^{sec}$ 以上の長周期成分を移動平均により除去した後の短周期成分波の関数である。表2においてRayleigh分布と比較した。

4. 界面の変動特性 前述の測定結果より、界面変位は風速の増加にともない大きくなり、 ζ' の値が増加する。同一風速のもとでは、ほぼ定常であるが、上流部に形成される中間層が下流側まで到達すると ζ' も増加することが解った。次に周波数 f に関する変位スペクトル $P(f)$ の分布は、波速の結果も考慮して次の4つの領域に分けられる。

領域	f (Hz)	T (sec)	$P(f)$ (cm/s)	C (cm/s)	L (cm)
(I)	.015 - .025	40 - 67	—	≈ 0	30 - 50
(II)	.05 - .1	10 - 20	—	C_1 (式⑩)	—
(III)	.15 - .5	2 - 6.7	$f^{-1/5}$	C_2 (式⑩)	—
(IV)	.5 - 2.0	0.5 - 2	f^{-5}	$(0.5 \sim 1.0) U_r$	—

界面変位のスペクトル分布について、日野⁽³³⁾らは、不連続成層界面の界面波のエネルギーは主に卓越波により供給され、Cascade-Processにより、 ε 子にスペクトル形が支配される高周波側に輸送されると考え、エネルギー含有域における $-1/5$ 乗則平衡領域における -5 乗則を次之解析により求めている。また、連続成層界面波については、 -3 乗則に従う平衡領域が存在するとしている。以上を考慮すると、

(I)の波は、成層場が閉じているために生じるセイシュ波的な変動であり、変位エネルギーとしては高いレベルを持つが、これ自身が直接混合に寄与するものではなく、他の領域の波との重畳により混合に寄与するものと考えられる。(Fig. 4 黒印)

(II)の波は、式⑩の夏の波であり、本実験では固定座標系でも上層逆流と逆方向に向う波である。この波は表面波軌運動に起因するスケールの乱れによる界面への爆撃によるものと推定され、エネルギーレベルも高い。

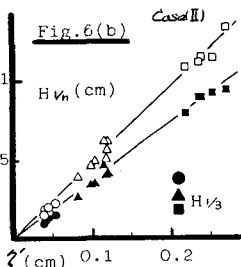
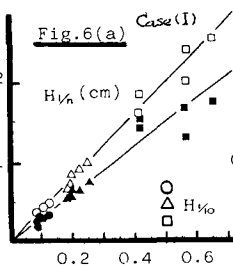
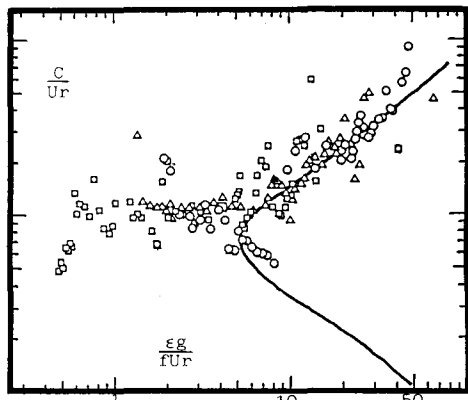
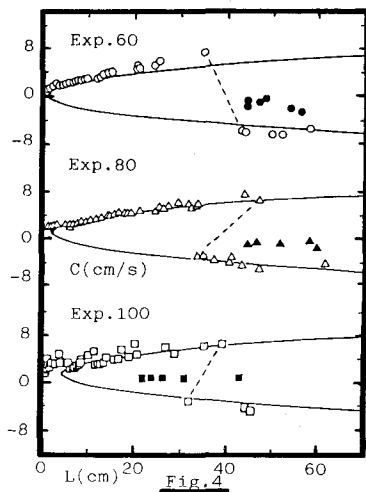
(I)、(II)の波が、風の剪断力による界面動揺の特徴であり、他の領域の波との干渉により進行を汚染しているようだ。

(III)の波は、KH深水波の正の波であり、スペクトル図からかなり卓越した周期を持つ波が存在することが解る。

この波は、Cascade-Processにより次の(IV)の領域へエネルギーを伝えていくようだ。

(IV)の波は、碎けながら上層逆流速度ないし界面速度で、上流側および上へ伝わるもので、コヒーレンスが急激に零に近づくことも考慮すると、直接、混合に寄与する領域と考えられる。Exp. No. (100)の場合は、IIIとIVの領域が区別しにくく、 $P(f) \sim f^{-3}$ で近似できる。これは、巻き波型の強い混合により、密度場が連続的密度分布に近くな、ためと考えられる。

5. おわりに 今回の実験が $\varepsilon g = \text{const.}$ であったこと、上層流速が本実験の値でないことなど、今後の課題は多い。最後に、本研究に有益な助言をいただいた九州大学、橋本一朗教授に、また、内部報告書の製作をいただいた、本学二部電気工学科、岡田敏勝助手に、実験に協力された本研究室の諸氏に、深甚なる謝意を表わしめる。



	Rayleigh	Case I	Case II
H 1/3	5.0	4.0	4.7
H 1/10	4.0	3.0	3.8

Table 2

- (参考文献)
- (1) 浦田正: JII 研究 (I 号) No. 41 (1980)
 - (2) 小林、今瀬、橋本: JII 学報 46, 52 (1980)
 - (3) 日野、谷: 年次学術報告 No. 24 (1969)