

東海大学大学院 学生員 ○ 綿貫 啓
水産工学研究所 正会員 木村晴保

1. はじめに

浅海域における内部波の挙動は、物理的、生物的に見て重要な現象であり、密度成層をなす閉鎖性湾の海水交流を論じる上で、内部波の知識は不可欠である。本稿では、斜面上の二層界面長波の基本式を誘導し、底勾配の様な閉鎖性湾や湖における界面静振の特性を調べ、実験でその妥当性を検討する。

2. 理論

Fig.1に示す自由表面を持つ二層流体を考慮。流体は理想流体とし、波長は上下層の厚さに比べ十分大きく、水粒子速度の鉛直成分は、水平成分に比べ無視する。また、地球の自転の影響も無視すると、表面長波と同様な扱いから、運動方程式(1),(2)式、連続の方程式(3),(4)式を得る。

$$\text{上層: } \rho_1 u_{1x} = -P_x, \quad P_x = -\rho_1 g \quad \text{---(1)} \quad u_1: \text{水粒子速度の水平成分} \quad \rho: \text{密度} \quad P: \text{圧力}$$

$$\text{下層: } \rho_2 u_{2x} = -P_x, \quad P_x = -\rho_2 g \quad \text{---(2)} \quad g: \text{重力加速度} \quad h_i: \text{層の厚さ}$$

$$\text{上層: } (\zeta_1 - \zeta_2)_x + h_1 u_{1x} = 0 \quad \text{---(3)} \quad \text{添字1, 2は各々上層, 下層を示す。}$$

$$\text{下層: } \zeta_{2x} + (u_2 h_2)_x = 0 \quad \text{---(4)} \quad \zeta_1: \text{表面変位} \quad \zeta_2: \text{界面変位}$$

境界条件 $z = h_1 + \zeta_1$ で $P = 0$, $z = \zeta_2$ で $P = P_2$ と仮定 $\zeta_1 \ll \zeta_2 \ll h_1 \& h_2$, $\rho_1/\rho_2 \approx 1$ のもとで(1)~(4)式を整理し、二層界面長波の基本式(5)を得る。

$$\Delta \rho g h_1 h_2 (\zeta_{1xxx} - \zeta_{2xxx}) - h_2 (\zeta_{1xxx}) - h_1 (\zeta_{2xxx}) = 0 \quad \text{---(5)}$$

$$\text{但し, } \Delta \rho = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$$

次にFig.2に示す水路幅が一定で、 $h_2 = h_0 - \alpha x$ の様な斜面上の界面静振を考慮。このとき、(5)式は $\zeta_1 x = g(x) e^{-i\sigma x}$ と置き次式を得る。

$$(x'A) g_{xx} + (Cx' - B) g = 0 \quad \text{---(6)}$$

$$\text{但し, } x' = x/l, A = h_0/l\alpha, B = (l\sigma^2/\Delta \rho g d)(1 + h_0/h_1), C = l^2 \sigma^2/\Delta \rho g h_1$$

$$l: \text{水路長} \quad \alpha: \text{斜面勾配} \quad \sigma: \text{角周波数}$$

(6)式で $x' = 0 (x = 0)$ で $g = 0$, $x' = 1 (x = l)$ で $g = 0$ の境界条件を満たす σ が界面静振のモード周波数(σ_m)である。前者の条件を満たす解は、

$$g(x', \sigma) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n x'^n \quad \text{---(7)}$$

$$\text{但し, } a_1 = \text{任意定数}, a_2 = 0, a_3 = -Ba_1/6A, a_n = \{(n-1)(n-2)a_{n-1} - Ba_{n-1}\} / n(n-1)A$$

よって、 $g(1, \sigma_m) = 0$ を満足する σ_m を求めればよい。上下層の水深比をパラメータにして斜面勾配とモード周波数との関係を図3に示した。下層水深が一定の水路におけるモード周期は、 $ld/h_0 = 0$ に対応する縦軸の $l\sigma/\sqrt{\Delta \rho g h_0}$ より求められる。

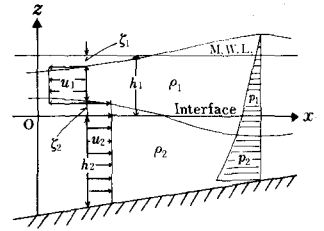


Fig.1

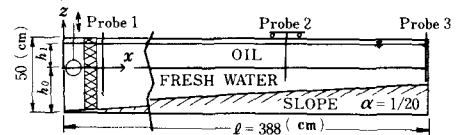


Fig.2

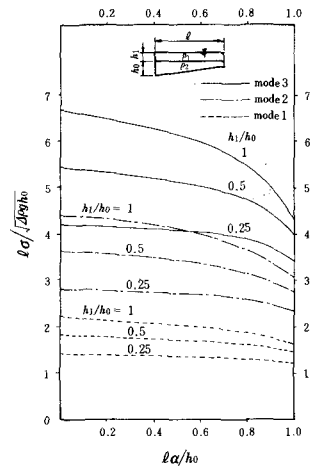


Fig.3

3. 実験と結果

実験水槽(Fig.2)は透明アクリル製で、流体は石油(比重0.786)と淡水を用いた。造波装置は界面部で円筒を上下に動かすプランジャー型で、周期は2~30秒まで変えられる。実験は、 $ld/h_0 = A = 0.746, 0.882, 1.0$ の3ケースについて各々モード1~3まで行なった。

各ケースとも $h_1/h_0 = 0.5$ である。

界面変動量($\Delta \xi$)は容量式波高計で測定し、1台は移動可能とした。Fig.4はストロークを一定とし、周期のみを変化させたときの、Fig.2右端(以下最浅部と呼ぶ)における界面および表面の変動量をプロットしたもので、矢印は、Fig.3から求めたモード周期を示す。

Fig.5,6は、 $T=11.83\text{sec}$ における水槽の長さ方向の界面変動量分布と流速分布を示す。流速は、上下層の浮遊物の一周あたりの移動距離から求めた。以上の実験から次のことが明らかになった。

i) 界面変動量は、 $A=1.0$ のケースを除いて、理論から求めたモード周期でピークとなった。 $A=1.0$ のケースでは、7~10% 短い周期でピークとなった。

ii) 節の位置、腹での波高、流速分布は、 $A=1.0$ のケースを除き、ほぼ理論に一致した。節での波高は0ではなく、 ld/h_0 の値が大きく、モード数が高いほど大きくなった。

iii) $A=0.882, 1.0$ のケースでは、最浅部で短波長の新たな波動が生じた。特に後者のモード3では、界面波のフロントが斜面上を遡上し、鉛直壁で反射する際に、波高0.9cm、波長10cm程度の波が2~3波生じ、造波機側へ伝播するのがはっきり観察された。

一樣斜面上の界面静振の特徴は、

i) $ld/h_0 = \text{const.}$ で同じモードの界面静振は、 h_1 が増加すると周期が短くなる(Fig.3)。

ii) モード数Mの周波数は、基本モードのM倍にならない(Fig.3)。

iii) 節の位置は、下層水深一定の重複波に比べ浅部へ移り(Fig.5)、 u_1 の最大は節で生じるが、 u_2 の最大は節の位置よりさらに浅部に移る(Fig.6)。そのため節より浅部でシアは最大となる。この傾向は特にモード1で顕著である。

4. むすび

理論と実験から、斜面上の界面静振の特徴が明らかになった。今後はさらに、水路幅が変化する場合や、躍層の厚さが無視できない場合など、より現実的なモデルについて検討をする。

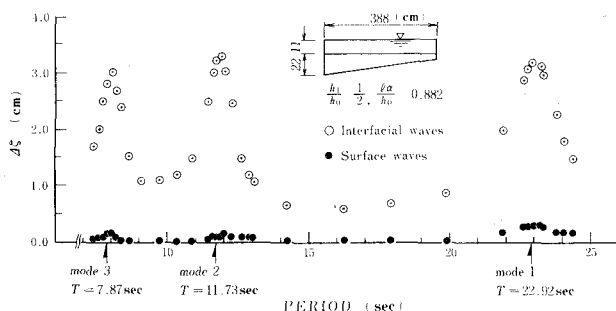


Fig. 4

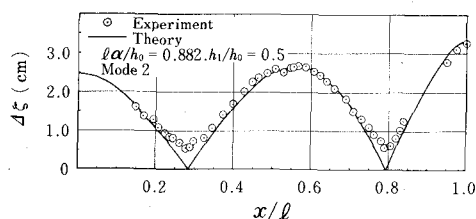


Fig. 5

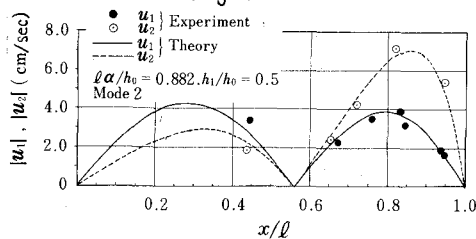


Fig. 6