

II-244

断面急変部を有する成層水域の内部応答特性

神戸大学大学院 学生員 長谷川憲孝
 神戸大学工学部 正 員 道奥 康治
 (株) 間 組 正 員 鳥山 孝治

1. まえがき

感潮部や貯水池においては、(1)潮位変動、(2)熱収支量の時間的・空間的変動、(3)風応力、等様々な力学的・熱的外乱によって成層内部に変動が発生する。貯水池においては堆砂段丘によって水深が急変する場合やmain reservoirとside armが不連続的に接続している場合、感潮部においては容量の異なる入り江・小湾が接続している場合など、規模の異なる水域間の水質交換に対して内部波動の果たす役割は重要である。本研究は水深が急変する二成層水域に強制外力を加え、その結果生ずる密度成層場の内部応答特性について実験的・理論的検討を行ったものである。

2. 理論

図-1のような断面を有する水路内の二層系における長波性の界面振動を対象とする。ここでは摩擦損失を無視し、上端は固定境界とする。まず、自由振動特性を調べるために図-1中の破線で示すように $x=0$ の水路端が $x=l_1+l_2$ とともに鉛直固定壁である場合に生起する基本モードの内部セーシュを解析する。 $x=0, l_1+l_2$ の両端で流量が0、 $x=l_1$ の接続部で水位と流量が連続する条件を用いれば、自由振動周期 T_f の解が次式のように得られる。

$$\tan \frac{1}{T_f} + r_o \tan \frac{r_1}{r_o} \cdot \frac{1}{T_f} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{T}_f = (c_1/2\pi l_1) T_f$: 領域(1) (深水域) の諸量 l_1, c_1 で無次元化された周期、 $r_o = c_2/c_1$: 領域(1), (2)の長波波速の比、 r_1 : 水域長の比、 $c_i = \sqrt{\varepsilon g / \{1/h_1^{(i)} + (1+\varepsilon)/h_2^{(i)}\}}$, ($i=1, 2$) : 領域(1), (2)の内部長波の波速、 ε : 上下層の相対密度差、である。また、自由振動による内部波の波形 $\tilde{\eta}_{or}$ は次式のようになる。

$$\tilde{\eta}_{or}^{(1)} = \cos\left(\frac{\tilde{x}}{\tilde{T}_f}\right), \quad \tilde{\eta}_{or}^{(2)} = \frac{\cos(1/\tilde{T}_f) \cdot \cos\{(\tilde{x}-r_1-1)/\tilde{T}_f r_o\}}{\cos(r_1/r_o \tilde{T}_f)} \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{x} = x/l_1$: 無次元距離、 $\tilde{\eta}_{or}^{(1)}, \tilde{\eta}_{or}^{(2)}$: $x=0$ における内部境界面の変位 $\eta_{or}^{(1)}(0)$ で無次元化した領域(1), (2)での波形である。一方、強制外力が作用する場合については、 $x=0$ において界面変位が強制振動の振幅 z に一致するという条件と、自由振動と同様の $x=l_1, (l_1+l_2)$ での水位・流量連続条件を用いれば、強制振動による内部波形の解として次式を得る。

$$\tilde{\eta}_e^{(1)} = \frac{\cos[\nu \tilde{\sigma}_r (\tilde{x}-1)] + r_o \{ \tan \nu (r_1/r_o) \tilde{\sigma}_r \} \cdot \sin[\nu \tilde{\sigma}_r (\tilde{x}-1)]}{\cos[\nu \tilde{\sigma}_r] [1 - r_o \tan(\nu \tilde{\sigma}_r) \cdot \tan\{\nu (r_1/r_o) \tilde{\sigma}_r\}]} \quad (3)$$

$$\tilde{\eta}_e^{(2)} = \frac{\cos[\nu (\tilde{\sigma}_r/r_o) (\tilde{x}-r_1-1)]}{\cos(\nu \tilde{\sigma}_r) \cos[\nu (r_1/r_o) \tilde{\sigma}_r] [1 - r_o \tan(\nu \tilde{\sigma}_r) \cdot \tan\{\nu (r_1/r_o) \tilde{\sigma}_r\}]}$$

ここで、 $\tilde{\eta}_e^{(1)} = \eta_e^{(1)}/z$: 無次元界面変位、 $\nu = T_f/T_e$: 自由振動と強制振動の周期の比、 $\tilde{\sigma}_r = l_1/c_1 \cdot \sigma_r$: 領域(1)の諸量で無次元化された自由振動の角振動数、である。

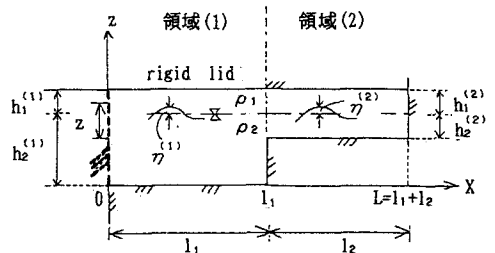


図-1 下層水深が急変する場合の断面図

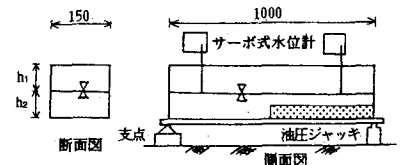


図-2(a) 自由振動の実験装置

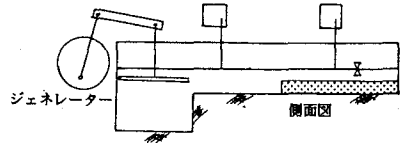


図-2(b) 強制振動の実験装置

3. 実験方法

図-2のような水槽を用いて内部振動特性を調べる。上層の流体としてはガムテレピン油（ $\rho_1=0.8643$ ）を下層の流体としては淡水を用いる。自由振動の実験では図-2(a)のように水槽の一端を油圧ジャッキで持ち上げ、界面がほぼ静止するのを確認した後、再びゆっくりおろすことによって基本モードのセーシュを発生させる。強制振動の実験では、図-2(b)のように水槽の一端に容量の大きな水槽を接続し、水平板を上下に振動させて強制的に内部波を生起させる。内部界面の変動は二台のサーボ式水位計を用いて検出され、ペンレコーダーに記録される。

4. 自由振動の特性

図-3に内部波波形の実験結果と式(2)との比較を示す。接続部において波形の急変が見られるが、 r_0 が小さいほどその傾向は大きい。図-4は r_0 にともなう自由振動周期 $\tilde{T}_r$ の変化を示す。 r_0 が小さい、すなわち断面急変性が大きいほど周期は長くなる。式(1)から得られる $\tilde{T}_r$ の理論値は実験値とよく適合している。図-5は領域(1)の最大振幅と領域(2)の最大振幅の比 $r_a = \eta_0^{(2)} \max / \eta_0^{(1)} \max$ と r_0 との関係を表す。 r_0 が大きいほど振幅比 r_a が小さくなる。式(2)から得られる r_a の理論値はこの傾向を良好に表している。

5. 強制振動による応答特性

図-6は強制振動周期と自由振動周期の比 ν にともなう内部波形の変化を式(3)の理論値とともに示したものである。図-7は接続部 $x=l_1$ における内部変位 $\tilde{\eta}_0^{(1)}(\tilde{T}_1) = \tilde{\eta}_0^{(2)}(\tilde{T}_1)$ と ν との関係を示す。同図中の曲線は式(3)から算定される応答曲線であり、概ね実験値の傾向と合致してはいるが、共振周期の周辺においては波形の有限振幅性などのために実験とのずれが見られる。

6. あとがき

水路が長い場合や粗度が大きい場合には摩擦の影響を考慮すべきであろう。また、有限振幅性を考慮した解析も今後行うべきであると考えらる。

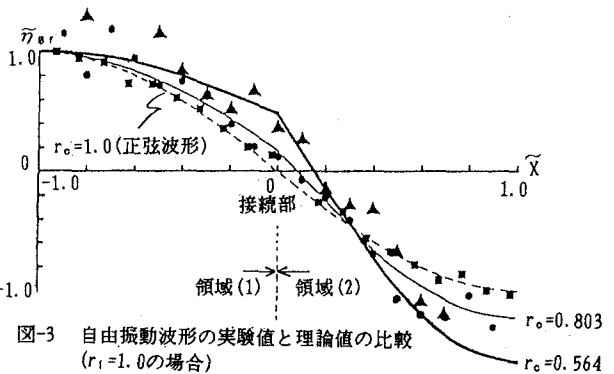


図-3 自由振動波形の実験値と理論値の比較
($r_1=1.0$ の場合)

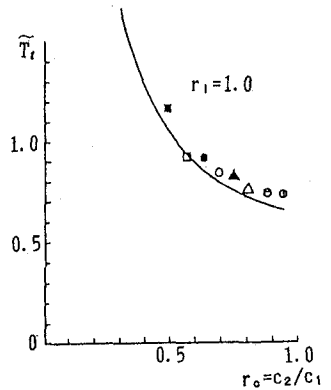


図-4 無次元周期 $\tilde{T}_r$ と r_0 の関係
(自由振動)

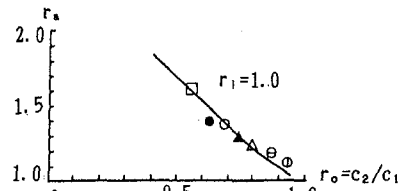


図-5 領域(1)と領域(2)の最大振幅の比 r_a と波速比 r_0 の関係(自由振動)

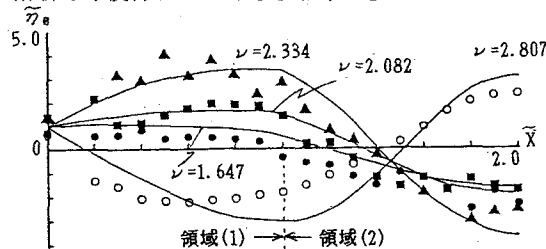


図-6 $\nu = \tilde{T}_r / T_1$ に伴う強制振動波形の変化
($r_1=1.0$, $r_0=0.564$, $T_1=25.3(\text{sec})$)

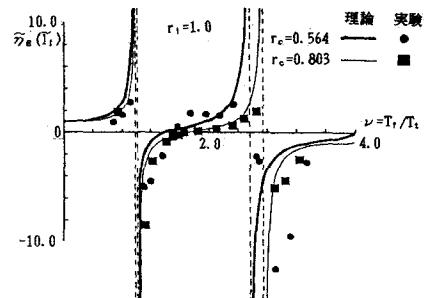


図-7 接続部 $\bar{x}=l_1$ での振幅 $\bar{\eta}_a(\bar{T}_1)$