

内部波の減衰に関する実験

京都大学工学部 正員 岩佐義朗

京都大学工学部 正員 井上和也

京都大学大学院 学生員 伊丹文雄

九州電力

吹気正高

1. まえかき

前報¹⁾においては、淡塩水よりなる2成層流の内部波のエネルギー式をもとめるとともに、それにもとづいて、内部波の発達あるいは減衰について三三実験的に考察を行なった。しかし、対象とした実験条件のもとでの現象がきわめて複雑であったため、境界面に作用するせん断応力、混合などの内部波に及ぼす影響を把握することは困難であった。そこで本報では、より単純な実験条件のもとでの内部波の減衰を観測し、岩垣ら²⁾の研究にもとづいて境界面でのエネルギー-逸散を推定しようとしたものである。

2. 実験装置および測定方法

実験に用いた水槽は全長 $L=150\text{cm}$ 、幅 $B=10\text{cm}$ 、深さ 20cm のものである。実験にあたっては、上下層を淡塩水で2層にし、塩水の密度、水深のいくつかの組合せについて行なった。塩水には過マンガン酸カリ溶液を溶かし、境界面を目視しうるようにした。

測定には、水槽内に定常波を発生させ、自由水面と内部境界面のそれぞれに、2本の白金線よりなる波高計を置き、これらをブリッジ回路の一端として増幅器を通し、ペン書きレコーダに記録した。なお、記録は自由水面の変動が静まったからの記録を用いた。

3. 実験結果と考察

1) エネルギー式

x軸を水面軸とする座標系を図-1

のようにとる。上下層を加え合わせた全エネルギーはつぎのようになる(添字1,2をそれぞれ上,下層を示す)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_0^L \rho_2 \frac{g^2}{2} dz + \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_0}^L \rho_1 \frac{g^2}{2} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L \rho_2 u \left(\frac{g^2}{2} + \frac{p}{\rho_2} + gz \right) dz \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^L \rho_1 u \left(\frac{g^2}{2} + \frac{p}{\rho_1} + gz \right) dz + \rho_1 g \frac{\partial}{\partial t} \frac{z^2}{2} + (\rho_2 - \rho_1) g \frac{\partial}{\partial t} \frac{z^2}{2} = R \end{aligned} \quad (1)$$

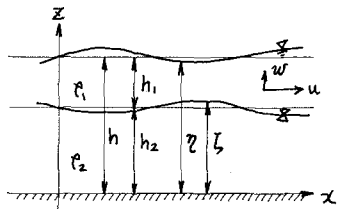


図-1

ただし、 $g^2 = u^2 + w^2$ 、 R :エネルギー損失である。ここで自由水面は静水面に近似し($z=h=\text{const}$) (1)式を水槽内の全体にわたって積分すると3項、4項は消去される。また内部のポテンシャルをつぎのように表わすものと仮定する。(a:内部波の振幅)

$$\phi_1 = \frac{a\sigma}{k \sinh kh_1} \cosh k(z-h) \cos \omega t \cos kx, \quad \phi_2 = -\frac{a\sigma}{k \sinh kh_2} \cosh kz \cos \omega t \cos kx \quad (2)$$

$$g^2 = (\rho_2 - \rho_1) g k / (\rho_2 \coth kh_2 + \rho_1 \coth kh_1), \quad k = 2\pi/\lambda, \quad \lambda: \text{波長}$$

このとき内部波のエネルギー式(1)式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{a^2}{4} (\rho_2 - \rho_1) g \cdot B \cdot L = \int_V R dV \quad (3)$$

11) 内部波の減衰 エネルギー損失を内部摩擦によって生ずるものと、底面、側壁および境界面において生ずるものとに分け、前者は後者に比して無視せうとする。底面および側壁で単位面積、単位時間あたりに逸散されるエネルギーをそれぞれ E_{fb} , E_{fw} とすれば、岩垣ら²⁾により

$$E_{fb} = \frac{\mu \sqrt{R_0}}{2\sqrt{2}} k \frac{a^2 \sigma^2}{\sinh^2 kh_2} (1 + O(\varepsilon_2) + \dots), \quad 2E_{fw} = \frac{\mu}{\sqrt{2}} a^2 \sigma^2 \sqrt{R_0} \frac{\cosh kh_2}{h_2} (1 + O(\varepsilon_2) + \dots)$$

$$2E_{fw} = \frac{\mu}{\sqrt{2}} a^2 \sigma^2 \sqrt{R_0} \frac{\cosh kh_1}{h_1} (1 + O(\varepsilon_1) + \dots), \quad R_0 = \sigma / \nu k^2, \quad \mu: \text{粘性係数}$$

(ε : 底面での最大本粒子速度と波速の比で1に比し十分小さい)

とあらわされる壁面が生ずる層流境界層内でのエネルギー逸散)。境界面でのエネルギー逸散を E_{fi} とすれば、以上のことより、(3)式の右辺は、

$$\int_V R dV = E_{fb} \cdot BL + 2(E_{fw} h_1 + E_{fw} h_2)L + E_{fi} \cdot BL$$

となる。さらに、 $E_{fi} = E'_{fi} a^2$, $H = 2a$ (波高) とすれば、(3)式はつぎのようになる。

$$\frac{dH}{dt} = -(d_b + d_w + d_i)H, \quad d_b = \frac{8 E_{fb}}{p_2 - p_1} g, \quad d_w = \frac{16 (E_{fw1} + E_{fw2})}{p_2 - p_1} g, \quad d_i = \frac{8 E'_{fi}}{p_2 - p_1} g$$

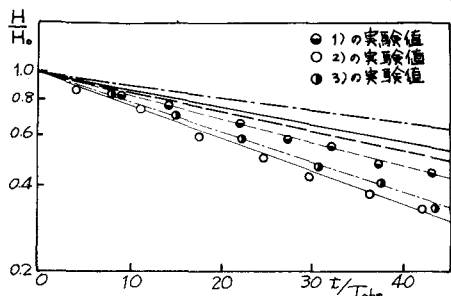
11) 結果と考察 実験にあたっては、水槽内にわざと擾乱を与えて内部波を生ぜせた。その波長はつねに水槽長の2倍であることが観測された。またこの波にきわめて波高の小さい高周波数の波が重なっていたが、この成分による影響は微小なものとみなした。

図-2は実験より得られた内部波の減衰状態を示したものである。ここで H_0 は記録とり始めの波高 (やく1cm) であり、 T_{obs} は観測した周期である。図中の太線は、上述の $(d_b + d_w)$ による減衰を示すものであるが、図-2は、内部波はより速く減衰しており、その差が境界面に与けるエネルギー損失による減衰 (d_i) とみなせる。また図で、波高が時間とともに直線的に減衰していることから、この範囲内の波高は $(d_b + d_w + d_i)$ に無関係であることがわかる。

図-3は d_i と h_1/h_2 の関係を示したもので、 $\times 10^{-2}$ 上層水深が大きくなるにしたがって、境界面での損失による減衰が大きくなる傾向がみられる。

また、図-4は $F_2 = \frac{c}{\sqrt{p_2 - p_1}} g h_2$ と d_i との関係で、 F_2 と d_i に正の相関がみられる。

実験ケースも少なく、条件も限られているので今後さらに実験を行ない、考察を進めたいと考えている。



- 1) --- $d_w + d_b$ ($h_1 = 4.0 \text{ cm}$, $h_2 = 11.0 \text{ cm}$, $p_1 = 1.082$)
2) --- $d_w + d_b$ ($h_1 = 5.0 \text{ cm}$, $h_2 = 10.0 \text{ cm}$, $p_1 = 1.082$)
3) --- $d_w + d_b$ ($h_1 = 6.0 \text{ cm}$, $h_2 = 9.0 \text{ cm}$, $p_1 = 1.082$)

図-2

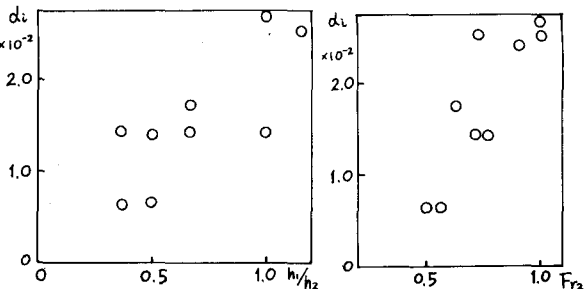


図-3

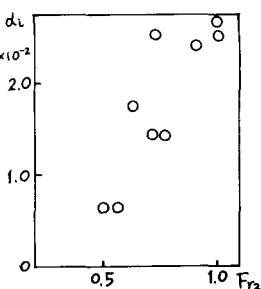


図-4

文献 1) 若佐義朗, 井上和也 "内部波の発生に関する一考察" 昭和45年度土木学会関西支部年次学術講演会概要 2) 岩垣隆一, 土屋義人, 坂井俊行, 陳浩隆 "海底摩擦による波高減衰機構に関する研究" 昭和41年3月京大防災研究所年報第9号