

国立公害研究所 正 員 平田 健正
大阪大学工学部 正 員 室田 明
大阪大学大学院 学生員 吉田 延雄

1. はじめに：温排水や河口流出を伴う海域では密度が鉛直方向に連続的に変化している。このような密度場は各種の混合を経た後の最終的な姿と考えられ、そこに生長する内部波は当然密度分布の影響を受けることになる。さらに、不均質な波動場に生起する内部波は二層系のような均質流体中の内部波とはその波動特性に際立った相違を示す。一例として、連続密度場における内部波は水平方向だけでなく鉛直方向にも波数成分を持ち、波動エネルギーは水平方向とある角度をなして伝播すること等が挙げられる。そこで、本研究は密度分布として直線分布を選び、局所的に内部波を生起させてその波動特性を実験的に調べるとともに、不均質な波動場の特性についても併せて報告する。

2. 実験装置と方法：本実験は長さ300cm、深さ50cm、幅15cmのアクリル製水路に連続密度場を作成し、自由表面下5cmの位置に設置したフラップ・タイアの造波機を用いて内部波を生起させる。密度分布は図-1に示すような全層にわたって密度勾配が一定な直線分布と、中間地点から密度勾配を変化させた2種類を設定した。本研究では前者をtype-I、後者をtype-IIとして区別する。また、水路内に密度の小さいものから順に供給して密度場を作るが、この時、透明な塩水と染料で着色した塩水を交互に入れ、密度場を可視化した。実験は内部波の規模を変えるため、造波板長 L_0 と内部波周期を種々変化させて行い、等密度変位の可視化像はビデオシステムで撮影・記録した。なお、全層厚はいずれの実験も47cmと一定にし、ブルント・バイサラ振動数はtype-Iで0.80、type-IIでは上層(N_1)が0.94、下層(N_2)が0.59である。

3. 実験結果と考察

3-1 波動特性の概要：密度が直線分布をする時、ブルント・バイサラ振動数 N ($N^2 = -\frac{g}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dz}$; ρ は密度)は近似的に一定と見なせる。この時、内部波の分散関係は次式で与えられる。(ただし、 $N > 0$)

$$\sigma/N = \{k^2/(k^2 + K^2)\}^{1/2} = \sin \theta \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 σ ：周波数、 k ：水平方向波数、 K ：鉛直方向波数、 θ ：エネルギーの伝播方向と水平方向とのなす角度、である。上式から周波数 σ は水平方向波数 k と鉛直方向波数 K の関数となり、したがって内部波の規模は周期(あるいは波長)によって一義的に決定されず、ただ波動の伝播方向が規定されるにすぎないことになる。写真-1(a),(b)は長さ20cmと40cmの造波板を用いたtype-Iの実験結果である。写真中に見られる波線(写真-1(a)の矢印)はエネルギーの伝播方向を示しており、一方位相についてはエネルギーの伝播方向と90°をなしているため、同写真では位相は斜め上方に伝播している。これらの実験ではブルント・バイサラ振動数と内部波の周波数はほぼ同じ値としているため、エネルギーの伝播方向にはほとんど差異は認められない。しかしながら、造波板長 L_0 が長い

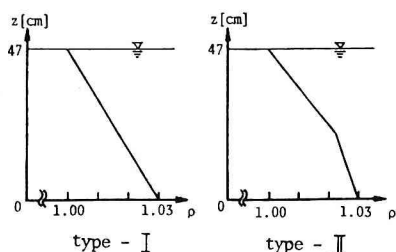


図-1 密度分布

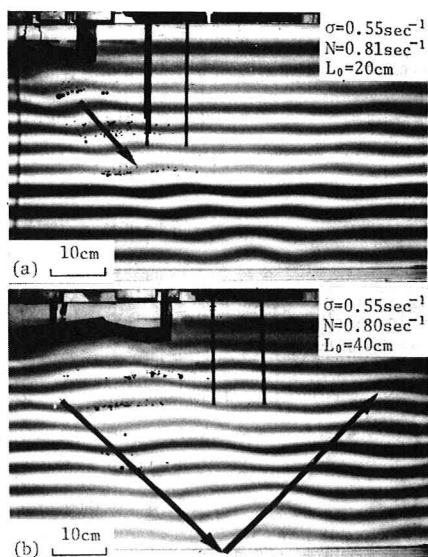


写真-1 内部波の伝播形態 (type-I)

程内部波の水平方向波長も大きくなることわかる。また、造波板長を一定にした場合、周期を変化させても生起する内部波波長がほとんど変わらないことも確認している¹⁾。すなわち、連続密度場では水平方向と鉛直方向の波数が(1)式を満足さえしていれば、波動を励起させる外力の規模によって任意規模の内部波動が発生し得ると考えられる。つぎに、中間地点で密度勾配を変化させた type-II の実験結果について検討する。写真-2(a)は $N_1 = 0.94 \text{ sec}^{-1}$, $N_2 = 0.59 \text{ sec}^{-1}$ (N_1, N_2 はそれぞれ密度変化点より上層と下層のブルント・バイサラ振動数) の密度場に $\sigma = 0.56 \text{ sec}^{-1}$ の内部波を生起させた可視化像である。造波板から斜め下方に伝播した内部波は $\sigma < N_2 < N_1$ であるため、下層中にも伝わる。また、 N 値の違いにより上層と下層で波動の伝播方向が若干変化しているのが認められる。一方、写真-2(b)は同じ密度場で $\sigma = 0.67 \text{ sec}^{-1}$ の内部波の伝播形態を示したものであるが、この場合 $N_2 < \sigma < N_1$ であるため下層へは進行できず、密度変化点で上層中への反射が生じている。すなわち、不均質な波動場は特定の周波数 ($N > \sigma$) の波動エネルギーのみを伝達する選択効果を有することを意味する。このことから、一般の密度場でもある特定の周波数帯の内部波が躍層内に *entrap* される可能性があり、そこでは躍層はあたかも導波管としての役割を果たしているかの様である。

3.2 エネルギーの伝播角度：エネルギーの伝播角度 θ の実験値と理論値を図-2 に比較している。縦軸は θ 、横軸は周期 T を限界周期 $T_B (= 2\pi/N)$ で除した無次元周期であり、図中の曲線は(1)式を表している。実験値にばらつきはあるものの、理論値と一致する傾向にある。また内部波周期が限界周期付近になるとエネルギー伝播角度は 90° に近づき、水粒子運動が鉛直平面内に限られることもわかる。

3.3 位相の変化：境界面で内部波が反射する時、入射波と反射波の間に位相の変化が生ずる。まず、底面で反射する場合、固定壁面上ではこれに直交する水粒子速度が 0 であるから、位相変化は常に 180° になる。この様子は写真-1(b)中の矢印で示されているが、入射波と反射波の間に 180° の位相変化が明確に見られる。つぎに、type-II の場合、Orlanski²⁾ にならって入射波と反射波および下層について、それぞれの鉛直方向水粒子速度 w 、圧力 P をセツ動 (たとえば、 $w = W \cdot \exp i(kx + k_2 z - \sigma t)$ のように) の形に仮定する。そして、基礎式 $\rho \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{\partial P}{\partial z}$ と密度変化点での境界条件を用いると、 W_I と W_R (W_I, W_R はそれぞれ入射波と反射波による w の振幅部分) は

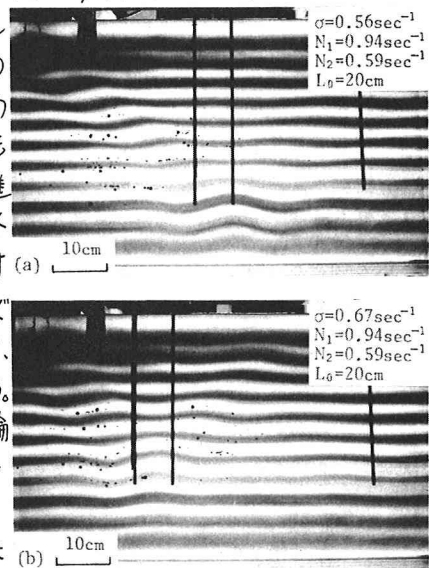


写真-2 内部波の伝播形態 (type-II)

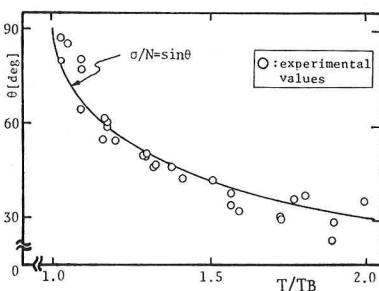


図-2 エネルギー伝播方向の周期による変化

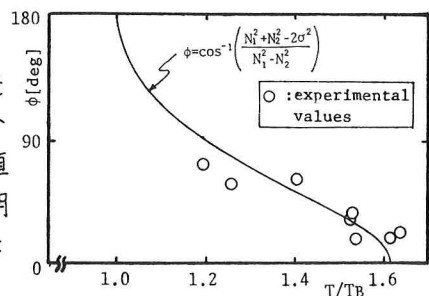


図-3 反射による位相変化

参考文献. 1): 室田・平田・吉田, 昭和 58 年度関西支部年講

2): Delisi, D.P. & Orlanski, I. (1975), J. Fluid Mech. vol. 35, part 3.