

建設省正員 吉田 延雄
 大阪大学工学部 正員 室田 明
 国立公害研究所 正員 平田 健正

1. はじめに

筆者等は深い湖や海洋の温度躍層部を対象に、全層に亘り密度勾配が一定である単純化された密度場を設定しそこに生起する内部波の挙動特性を実験的に検討している。今回は長径25cm, 短径20cmの楕円を長径に沿って切断した半楕円形の造波部(plunger type)を用いて実験を行った。実験条件は表1に示す通りブルントバイサラ振動数 N は4種類であり、全水深 h は全て47cmと一定にしている。その結果、1次モードの内部波が生起している状態で、波束構造を有する波動(ray waveと称する)が発生し、しかもray waveの周波数は1次モード波のそれより小さいことが見いだされた。本研究は基本モードの波動特性を把握するとともに、共鳴理論を適用してray waveの発生機構を説明する。

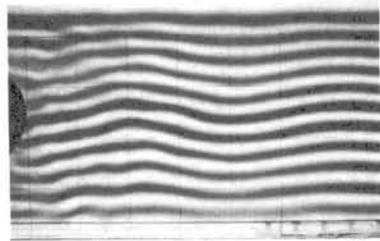
表1 実験条件

| Case | N | Symbol |
|------|------|--------|
| 1 | 0.82 | ○ |
| 2 | 0.74 | ▽ |
| 3 | 0.69 | △ |
| 4 | 0.60 | □ |

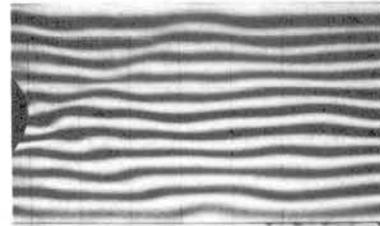
2. 実験結果

2.1 内部波の基本特性: 写真1はブルントバイサラ振動数 $N=0.82 \text{ sec}^{-1}$ の密度場内に

内部波を生起させたとき、外力周波数 σ の違いによる密度場の応答特性の相違を示したものである。写真中のメッシュ間隔は10cmで、写真左端に半楕円形の造波板が見えている。これらの可視観測から、周波数がブルントバイサラ振動数付近では1次モードの内部波(写真1.(a))が、周波数の減少とともに5次モードの内部波(写真1.(b))が発生するようだ。この結果を確認するために、内部波の水平方向波長 L について実験値と理論値を図1に比較している。図中の曲線はモード数 n を与えたとき、次式の分散関係から算出した L の理論値を表す。



(a) $N=0.82 \text{ sec}^{-1}$, $\sigma=0.73 \text{ sec}^{-1}$



(b) $N=0.82 \text{ sec}^{-1}$, $\sigma=0.50 \text{ sec}^{-1}$

写真1 内部波の可視化像

$$(\sigma/N)^2 = k^2 / (k^2 + l^2) \quad (1)$$

ここに、 k は水平方向波数、 l は鉛直方向波数で $l = n\pi/h$ である。前回から、実験値は1次モードと5次モードの理論値とほぼ合致し、可視観測結果が裏付けられる。以上のように、周波数の減少に伴って生起する内部波も1次モードから5次モードへと変化し、その間に両者が混在する状態も見られたが、本実験では3次モードの内部波の発生は観測されなかった。

2.2 ray waveの発生: 1次モードの内部波のみ生起する周波数帯で1~2分間実験を継続すると造波部近傍にこぶ状の凸起が出現し、写真2に見られるような波束構造を有するray waveへと発達して行く。同写真ではray waveは左上方から斜め下方へと伝播し、この角度が各実験においてほぼ一定値をとることから、ある単一の周波数成分を有すると推察される。さらに、このray waveの振幅は発達し、遂には破波する(写真2の中央部で等密度線のoverturnが明瞭に認められる)。1次モード

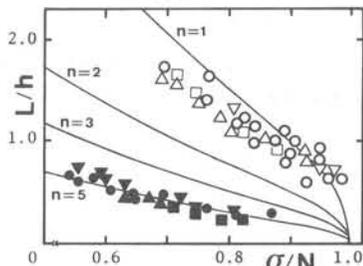


図1 内部波の波長

波の周波数 σ_1 とray waveの周波数 σ_2 の関係を示せば図2の通りである。両者に正の相関は認められるものの、 σ_2 は σ_1 よりかなり小さく、ray waveは外力に反応して直接発生したとは考え難い。

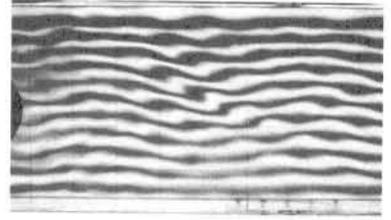


写真2 ray wave ($N=0.82\text{sec}^{-1}, \sigma=0.172\text{sec}^{-2}$)

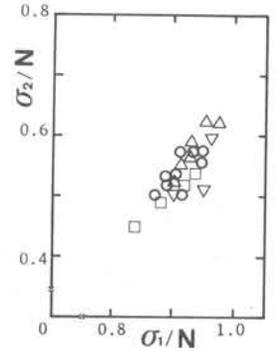


図2 周波数の比較

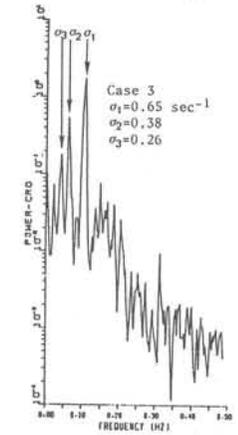


図3 濃度変動スペクトル

ここで、ray waveの発生因について調べてみよう。まず、反射波について本実験条件下での内部波速は2.5~6.0cm/secの範囲にあり、水路長が4.0mであることから2分程度の実験時間ではこの影響は現れない。

さらに、造波部における乱れや局所的な不安定現象に起因するとも考えられるが、ray waveは卓越した周波数成分を有し伝播すること、および1次モード波の水粒子速度に基づく局所リチャードソン数 R_i を計算したところ R_i は100のオーダーとなり、いずれの仮定も退けられる。そこで、塩分濃度変動を検出し、周波数解析をしたのが図3である(スペクトルはデータ数4096, サンプル間隔は10HzでFFT法による)。同図より、1次モードの周波数 σ_1 で最大のピークが現れており、 σ_1 より低周波側にさらに2つのピークが存在している。この内、高い方の周波数は可視化実験から求めたray waveの周波数 σ_2 に合致する。残された今一つの卓越周波数を σ_3 とすれば三者の間に $\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_3$ の関係が成立することが理解されよう。すなわち、これは共鳴条件の一つを満たし、ray waveは非線形相互干渉によって励起されている可能性が強く示唆される。

3. 共鳴理論の適用

ここでは共鳴理論を適用して、ray waveの発生機構に接近する。共鳴条件²⁾(1)式の分散関係と

$$\sum_{j=1}^3 \sigma_j = 0, \quad \sum_{j=1}^3 k_j = 0, \quad \sum_{j=1}^3 l_j = 0 \quad (2)$$

であり、3つの波動が(1)式と(2)式を満足するとき、これらの波動間でエネルギー交換が生じ、resonant triadを構成することになる。ここに、添数字1,2はそれぞれ1次モード波とray waveに、添数字3はresonant triadを構成する他のナンバーである。 σ_j, k_j, l_j の内、 σ_1 と k_1 は実験的に既知であり、したがって未知数は7個、一方、方程式は(1)式と(2)式の合計6個となる。すなわち、進行波についてはモード数を規定する条件がなく、方程式が1個不足することになる。そこで、本研究ではray waveの波数 k_2 を実験値として与え、逐次個々の諸量を求める。この内、ray waveの周波数について計算値 σ_{2t} と実験値 σ_{2e} を比較することにより共鳴理論の適用性を吟味する。結果は図4に示す通り、両者に良好な合致が見られる。周波数解析による推察も考え合わせれば、本実験で観測されたray waveは非線形相互干渉、いわゆる共鳴現象によって励起されていると言って良さそうだ。最後に、 σ_1/k_1 の符号を正にすると σ_2/k_2 のそれも正となり、1次モード波とray waveの位相は同一方向に伝播することを意味し、可視観測でも確認している。他方、 σ_3/k_3 の符号は負となり、これらの波動とは逆方向に進行することを表す。この添数字“3”の波動について、周波数スペクトルには明確に現れているが、可視化実験では他の波動と識別することはできなかった。

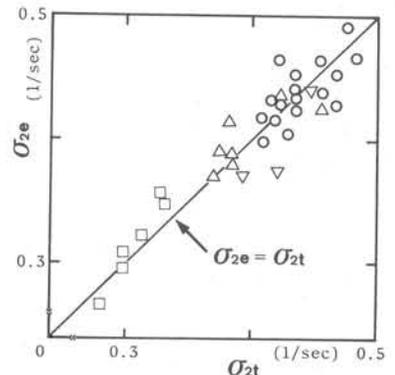


図4 共鳴現象の検証

参考文献 1) 吉田 室田 平田(1981): 第36回土木学会年次学術講演会概要集
2) McEwan, A.D.(1971): J. F. M., vol. 50, part 3, pp 431~448.