

(Ⅱ - 9) 内部波における緩勾配方程式と浅水変形に関する基礎的研究

中央大学理工学部 学生員 ○向山 公人 北見工業大学工学部 正 員 内島 邦秀
中央大学理工学部 正 員 山田 正 中央大学大学院 学生員 大島 伸介

1. はじめに：近年、成層化した閉鎖性水域においては底層の無酸素水塊が湧昇する青潮が発生し問題となっている。この原因としては、内部波やセイシュが考えられる。著者らはこれまでに内部波の緩勾配方程式を導き、数値解析によって内部波の浅水変形特性を明らかにしてきた^{1) 2)}。本研究は、内部波の浅水変形に関して理論値と実験値の比較検討を行ったものである。

2. 内部波の緩勾配方程式の導出：連続式、運動方程式は(1)、(2)式で与える。(3)、(4)式の分散関係式を用いて内部波の緩勾配方程式は(5)式となる。ここに、添字sは表面波、iは内部波を示し、n_iは(6)式で表す。(5)式は式上表面波の緩勾配方程式と同型のものになる。

3. 内部波の浅水変形特性：内部波の浅水変形も表面波の場合と同様に扱い、1) 2断面における単位時間当たりの通過波数は等しい。2) 水底面は非常に緩やかな勾配であるとして水底面での反射によっての影響はなく、底面摩擦もない。3) 上下層間のエネルギーの出入りはないものとする。以上の仮定を用いて波高比H/H₀の関係を求めると(7)式となる。

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{k_0 h_1 \operatorname{cosech}^2(k_0 h_1)}{\coth(k_0 h_1) + 1}\right) \sqrt{\frac{1}{k_0 \coth(k_0 h_1) + 1}}}{1 + \frac{k h_1 \operatorname{cosech}^2(k h_1) + k h_2 \operatorname{cosech}^2(k h_2)}{\coth(k h_1) + \coth(k h_2)} \sqrt{\frac{1}{k \coth(k h_1) + \coth(k h_2)}}}} \quad (7)$$

ここに添字0は沖波におけるものである。図1は波高比H/H₀を縦軸、波数kと下層水深h₂を乗じたものを横軸にとり浅水変形の特性を示したものである。この図から、内部波の浅水変形も表面波の浅水変形と同様に斜面上を上がってくるにつれて沖波波高よりも大きな波高を示すことが分かるが、内部波の波高変化は表面波よりも小さい。

4. 実験概要：本実験で用いた水槽は、長さ8000mm、幅234mm、深さ488mmの二次元造波水槽である。底面勾配は1/50であり、それを造波装置から1.5m離れた所より設置した。測定点は1mおきに6点とり各測点では上層厚h₁、下層厚h₂、波高H、周期、波速を測定した。二成層化するにあたっては上層部分に淡水、下層部分に50%塩分濃度の塩水を用いた。本実験では上層厚h₁を5cm、15cm、20cmと変化させ、下層厚h₂を10cmに固定した。

5. 実験結果と考察：実験データと理論値を比較するために上層厚を5cm、15cm、20cmとしたときの結果をそれぞれ図2、図3、図4に示す。ここで、図中の曲線は数値解析の結果から得られた理論曲線を示す。実験結果と理論値を比べてみると内部波の波高が大きくならずに減衰していることがわかる。そこで、各測点における波高Hと沖波波高H₀の比を減衰率((H₀-H)/H₀)として定義し、内部波が緩斜面上に入射してからの斜距離を横軸、減衰率を縦軸にとったものを図5に示す。この図からは上層厚が増加するのに従って波高が減衰

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla Q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial x}, \quad \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial y} \quad (2)$$

$$c_i^2 = \frac{g}{k} \tanh(kh) \quad (3)$$

$$c_i^2 = \frac{g(\rho_1 - \rho_2) \tanh(kh_1) \tanh(kh_2)}{k \rho_1 \tanh(kh_1) + \rho_2 \tanh(kh_2)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = \nabla \cdot \frac{c_i^2}{n_i} \nabla n_i \eta \quad (5)$$

$$n_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (6)$$

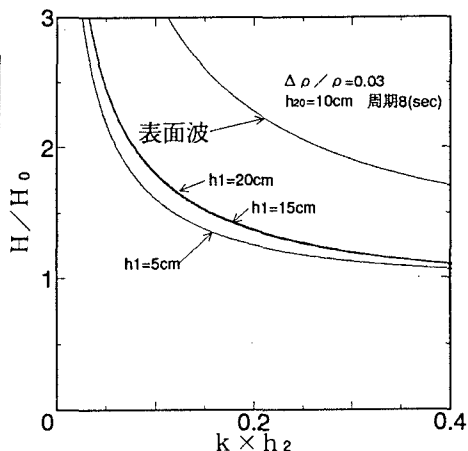


図1 内部波の浅水変形（理論値）

される割合（直線の傾き）が大きくなっていることがわかる。これらの理由として、底面摩擦の影響や、境界面での上層厚による抵抗の影響によって、内部波の波高が減衰していくと考えられる。つぎに内部波による

界面での水粒子の動きであるがこれは図6に示すように内部波の進行方向を左手にとると時計まわりの楕円軌道を描く。この結果として内部波の砕波は、内部波の進行方向と逆向きに引き起こされ表面波の砕波とは全く逆向きである。二成層が崩れはじめ境界面が不安定になってくると内部ソリトン状の”こぶ”があらわれる。このときの境界面での水粒子の動きを図7、図8に示す。

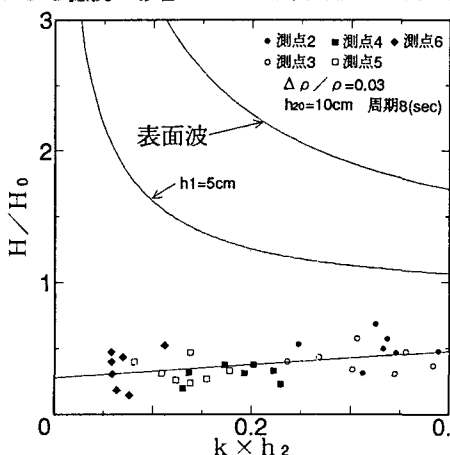


図2 内部波の浅水変形

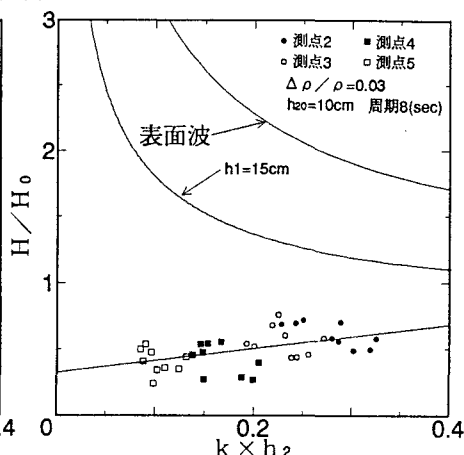


図3 内部波の浅水変形

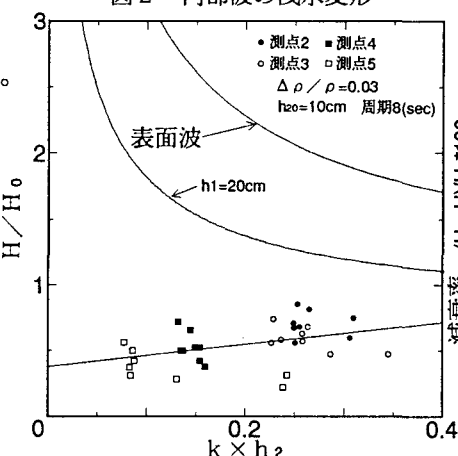


図4 内部波の浅水変形

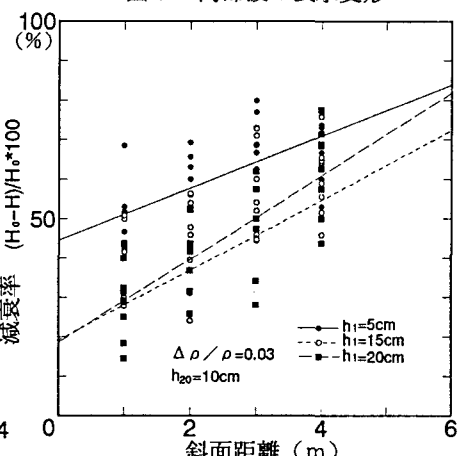


図5 内部波の斜面距離に対する減衰率

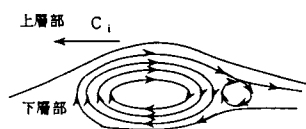


図6斜面上における水粒子の動き 1

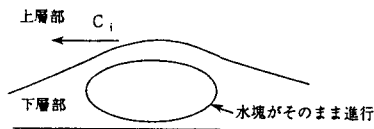


図7斜面上における水粒子の動き 2

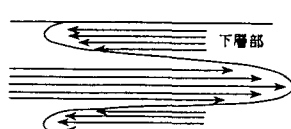


図8下層部分の流速分布

6. まとめ：本実験において(1)内部波の浅水変形によって波高は増加することなく減衰された。(2)上層厚が増加すると内部波の波高は、上層厚が小さいものに比べて減衰の仕方が大きい。(3)内部波による界面での水粒子の動きは、波の進行方向を左向きとすると時計まわりになる。(4)内部波の砕波は内部波の進行方向と逆向きに発生する。(5)密度分布によっては内部ソリトン状の”こぶ”が現れる。以上のことがわかった。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費（試験研究(B)(1), 研究代表者 山田正）の補助を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献：1) 桑嶋知哉・山田正：内部波の緩勾配方程式と浅水変形に関する研究, 土木学会関東支部1992年技術研究発表会要旨集, pp. 98-99, 1992. 2) 山田正・桑嶋知哉・高橋克人：内部波の緩勾配方程式に関する研究, 土木学会関東支部1993年技術研究発表会要旨集, pp. 78-79, 1993.