

II-37

内部波の非線形特性についての理論および実験的研究

東京都立大学大学院工学研究科

手塚浩之

東京都立大学大学院工学研究科 正会員 梅山元彦

1. 研究の背景と目的

海洋の断面を概略的に示すと温度差により比較的水温の高い水面から温度躍層までと低い温度躍層から水底までの二層構造をしていることがわかる。温度躍層内での温度の時間変化を調べてみると温度が急激に変化することがあり、この境界面に内部波が伝播していることが確認できる。内部波とは異なる密度層の境界面に発生する波であり、その存在は古くから現地観測によって確かめられている。内部波は表面波よりもはるかにエネルギーが大きく、大水深海洋構造物に与える影響も大きいと考えられる。成層した海域において、何らかの原因によって引き起こされる内部波の物理的特性を理論および実験によって詳しく知る事は、海洋学の分野のみならず土木や造船の分野においても重要なことである。

本研究では内部波の非線形特性を調べるために、実験水槽に海洋の二層構造を作り内部波の伝播実験を行った。また、摂動法によって二次オーダーまで求めた近似波形と実験結果を比較するとともに、実験波形のスペクトル解析を行うことによって、内部波の非線形特性を確認した。

2. 摂動法による二次オーダーの内部波近似解

有限水深における非線形内部波の上層での速度ポテンシャル、下層での速度ポテンシャル、自由水面変動量、内部境界面変動量および角速度が二次近似で表せるものとする、下記のようにベキ級数展開ができる。

$$\phi_1 = \varepsilon \cdot \phi_1^{(1)} + \varepsilon^2 \cdot \phi_1^{(2)} + o(\varepsilon^3) \quad (1)$$

$$\phi_2 = \varepsilon \cdot \phi_2^{(1)} + \varepsilon^2 \cdot \phi_2^{(2)} + o(\varepsilon^3) \quad (2)$$

$$\eta_1 = \varepsilon \cdot \eta_1^{(1)} + \varepsilon^2 \cdot \eta_1^{(2)} + o(\varepsilon^3) \quad (3)$$

$$\eta_2 = \varepsilon \cdot \eta_2^{(1)} + \varepsilon^2 \cdot \eta_2^{(2)} + o(\varepsilon^3) \quad (4)$$

$$\omega = \omega^{(0)} + \varepsilon \cdot \omega^{(1)} + o(\varepsilon^3) \quad (5)$$

ただし、 ε : 摂動媒介変数、 o : 次数を表す記号である。また、上付きの数はオーダーを示し、下付の数は1が上層、2が下層を示している。二次オーダーの近似解は上層と下層のラプラス方程式、自由水面での運動学的及び力学的境界条件式、水底条件式、内部境界面における上層側と下層側での運動学的境界条件及び力学的釣り合い条件式に式(1)~(5)を代入して摂動展開を行い、一次と二次のオーダーでそれらを解いて求めることができる。Fig.1 は計算によって得られた内部波の時間変動の一例を示したものであり、Fig.2 は同一条件での自由水面の時間変動を描いたものである。

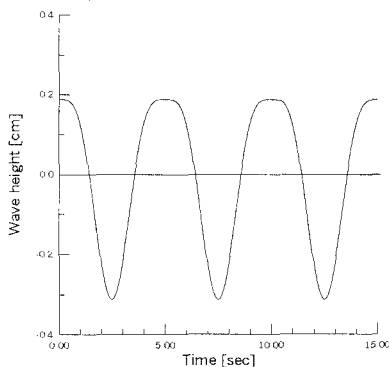


Fig.1 Internal waves

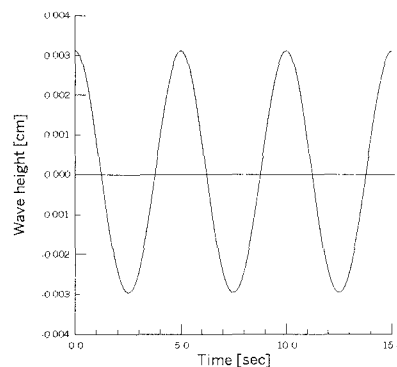


Fig.2 Surface waves

実験条件

周期: 5sec

上層: 10cm

下層: 10cm

上層密度: 1.000 g/cm³下層密度: 1.023 g/cm³

キーワード: 内部波、摂動法

連絡先: 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学大学院工学研究科 TEL0426-77-1111

3. 実験

Fig.3 は今回実験に使った実験水槽である。長さは 300cm、幅は 10cm、高さは 25cm であり、中央の両側面 1 m は強化ガラスが張られ他は鋼製である。水槽の一端は造波装置と接続しており、他端は消波構造になっている。実験は水槽内に上層を真水で下層をウォーターブルーで着色した塩水の二層構造を作り、静止状況であることを確かめた後、ピストンによって下層にエネルギーを与えて内部波を発生させた。

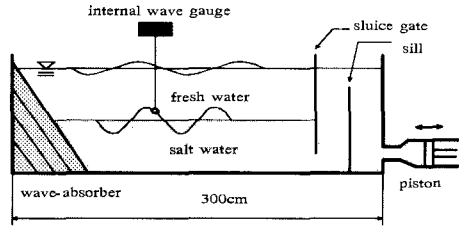


Fig.3 Sketch of apparatus

境界面の変位は濃度感知型の内部波高計によって測定した。実験は上下層の密度及び厚さ、内部波振幅及び周期を様々に変えて行った。

4. 解析及び考察

実験結果と理論計算結果の波形比較の一例を Fig.4 に示す。実験条件は、上層厚が 10cm、下層厚が 10cm、上層密度が 1.000 g/cm^3 、下層密度が 1.050 g/cm^3 、内部波高が 1.2cm、周期が 5 秒である。波形の比較は実験値が安定した後の 3 周期分を取り出してある。なお、この実験データはすでに平滑化を行ってある。実験では周期が 7~10 秒の条件で行ったものは、理論値とはほぼ一致していたが、周期がそれ以下のものでは理論値とは合わなかったり波形が不規則になるものが多く見られた。

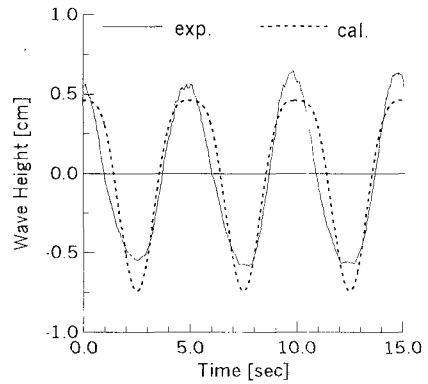


Fig.4 Calculation and measured results

次に実験結果をスペクトル解析したものを Fig.5 に示す。今回の理論は摂動法の二次近似まで求めてあるので、これによって、波形比較では確認しづらい二倍周波数付近のエネルギーの集中を調べた。フーリエ変換に使用したデータポイントは 5120 個、すなわち 102.4 秒間分のデータであり、これは 10~20 波分の内部波群に相当する。波形比較とは異なって周期が短い条件下において、より非線形性が確認できた。

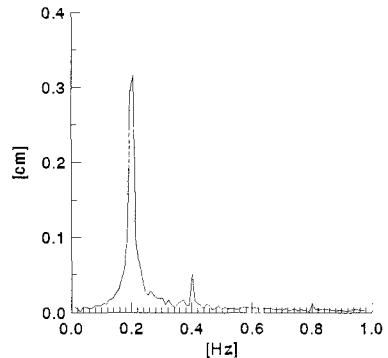


Fig.5 FFT result

今回行った実験では二次オーダーの成分が理論で予測するほど現れなかった。この原因として水槽の長さが挙げられるが、内部波波長の長いときは水槽の全長が一波長分よりも短くなってしまった。また内部波が十分発達できない装置であることもこの理由として考えられるし、当然反射波の影響も十分には軽減できていない。波高計については境界面を計測針が正確にとらえているかという疑問も残る。なぜならば、二層構造を作る段階で上層と下層を完全に分離することは不可能であり、層と層の間に混合層が形成され、計測針が追うべき濃度層が厚くなるためである。

5. 結論

実験において、内部波の非線形性はスペクトル解析において確認できたが、理論値は二次オーダー成分が大きくでる傾向にあり、実験波形とは差が見られた。水槽を長くして、造波装置からある程度離れた波の比較すれば、より理論の整合性を確かめることができる。今後二層構造の作成や造波の仕方を工夫して実験を行う必要がある。