

薄板状浮体構造物上の点荷重の移動に伴う 表面波及び内部波の数値解析

鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 山下 啓
鹿児島大学大学院理工学研究科 正会員 柿沼 太郎
北見工業大学社会環境工学科 正会員 中山 恵介

1. 研究の目的: 近年、海上空港として、または、風力・太陽光発電の基地といった目的で、超大型浮体構造物の利用が考えられるようになった。剛性を有する柔軟な薄板のような挙動を示す超大型浮体構造物は、流体と相互に干渉する構造物である。例えば、Hermans (2000) は、海上空港を想定した薄板状浮体上に作用する移動荷重に対して、薄板状浮体がどのような応答を示すかを調べた。また、堺ら (1998) は、津波の来襲を想定し、孤立波が入射する際の、薄板状浮体と流体の干渉問題を水理実験及び数値解析により調べ、入射波の非線形性が強い場合に、孤立波に先行する振動が薄板状浮体に発生することを見出した。一方、柿沼 (2001) は、薄板状構造物と多層流体の相互干渉を支配する非線形方程式系を提案し、2 層流体を対象とした数値解析を実施して、薄板状浮体の振動に伴い内部界面が共振する場合があること、また、浮体に作用する圧力が 1 層流体の場合と異なることを示した。このように、構造物が覆う水域において、密度成層が形成されている場合、浮体の振動に伴い内部波が発生すると、水温変化等を通じて、構造物の動揺が水圏環境に影響を与える可能性がある。

そこで、本研究では、非線形波動方程式系 (柿沼, 2001) を薄板状浮体と 2 層流体の相互干渉問題に適用し、薄板状浮体構造物上に点荷重が移動する際に発生する表面波及び内部波の数値解析を行なう。

2. 基礎方程式系と数値解析法: 非粘性かつ非圧縮性である多層流体の非回転運動を対象とする。互いに混合しない各流体層を最上層から順に第 i 層 ($i=1, 2, \dots, I$) と呼ぶ。

第 i 層の速度ポテンシャルを $\phi_i(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} \{f_{i,\alpha}(\mathbf{x}, t) \cdot z^\alpha\}$ のように N 個のべき関数の重み付き級数に展開する。変分法を適用すると、次式のような非線形表面波・内部波方程式系 (柿沼, 2001) が得られる。

$$\eta_{i,1}^\alpha \frac{\partial \eta_{i,1}}{\partial t} - \eta_{i,0}^\alpha \frac{\partial \eta_{i,0}}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ (\eta_{i,1}^{\alpha+\beta+1} - \eta_{i,0}^{\alpha+\beta+1}) \nabla f_{i,\beta} \right\} - \frac{\alpha\beta}{\alpha+\beta-1} (\eta_{i,1}^{\alpha+\beta-1} - \eta_{i,0}^{\alpha+\beta-1}) f_{i,\beta} = 0 \quad (1)$$

$$\eta_{i,j}^\beta \frac{\partial f_{i,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta_{i,j}^{\beta+\gamma} \nabla f_{i,\beta} \nabla f_{i,\gamma} + \frac{1}{2} \beta \gamma \eta_{i,j}^{\beta+\gamma-2} f_{i,\beta} f_{i,\gamma} + g \eta_{i,j} + \frac{p_{i,j} + P_i + W_i}{\rho_i} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\eta_{i,0}(\mathbf{x}, t)$, $\eta_{i,1}(\mathbf{x}, t)$, $p_{i,0}(\mathbf{x}, t)$, $p_{i,1}(\mathbf{x}, t)$ 及び ρ_i は、それぞれ、第 i 層の下面の界面変動、上面の界面変動、下面における圧力、上面における圧力及び密度である。また、 $P_i = \sum_{k=1}^{i-1} \{(\rho_i - \rho_k) g h_k\}$ 及び $W_i = \sum_{k=1}^i (-m_k g \delta_k)$ であり、 h_i , m_i 及び δ_i は、それぞれ、第 i 層の静水深、第 i 板 (第 i 層の上面に位置する薄板) の密度及び板厚である。そして、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ は、水平方向の微分演算子である。重力加速度 g は、 9.8 m/s^2 とする。

一方、水平方向の長さスケールに比べて十分に薄い第 i 板の運動は、古典理論より、次式によって記述される。

$$m_i \delta_i \frac{\partial^2 \eta_{i,1}}{\partial t^2} + B_i \nabla^2 \nabla^2 \eta_{i,1} + m_i g \delta_i + p_{i-1,0} - p_{i,1} = 0 \quad (3)$$

ここで、 B_i は、第 i 板の曲げ剛性率である。

これらの基礎方程式に基づき、時間発展に Nakayama・Kakinuma (2010) に類似した差分法を用いて数値解析を行なう。

3. 表面孤立波の伝播の数値解析: 多層流体モデルを 1 層流体に適用し、計算結果を既存の水理実験結果 (劉・堺, 2000) と比較する。図-1 に、各地点における水面変動の時系列を示す。ここで、薄板状浮体構造物が、 $10.0 \text{ m} \leq x \leq 20.0 \text{ m}$ の領域を覆っており、この領域に津波を想定した孤立波が入射している。速度ポテンシャルの展開項数 N が 2, または、3 の場合、計算結果は、実験結果で現れている津波高さの減衰及び先行する振動の発生を比較的高い精度で再現している。

4. 薄板状浮体構造物と 2 層流体の相互干渉: 図-2 に示す鉛直断面内の運動を対象とし、飛行機の離着陸時のように、薄板状浮体構造物に作用する点荷重が構造物上を移動する場合の数値解析を行なう。点荷重の移動速度を一定値 v_p とする。点荷重の大きさは、 $4 \text{ m} \leq x < 4.25 \text{ m}$ 間で $0.2 \rho_1 g h$ まで徐々に増加させ、 $4.25 \text{ m} \leq x \leq 12 \text{ m}$ 間で $0.2 \rho_1 g h$ で一定とする。また、速度ポテンシャルの展開項数を $N=1$ とし、計算の格子間隔及び時間間隔をそれぞれ $\Delta x = 0.05 \text{ m}$ 及び $\Delta t = 2.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ とする。

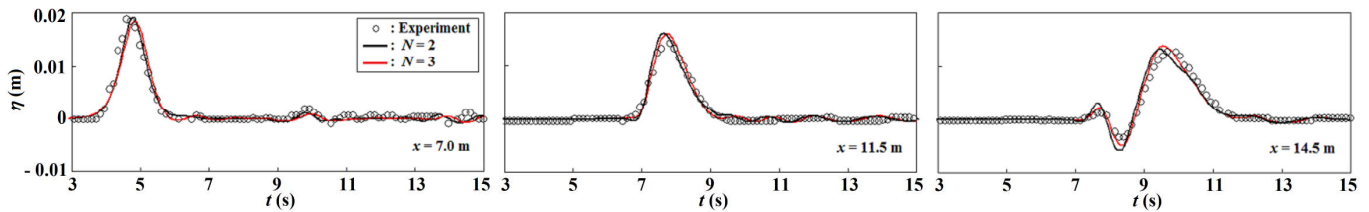


図-1 $x = 7.0, 11.5$ 及び 14.5 m の各地点における水面変動 (静水深及び入射波波高は、それぞれ、 0.2 及び 0.02 m であり、浮体構造物の曲げ剛性率は、 450.0 Nm^2 である.)

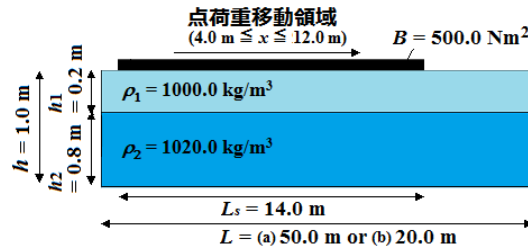


図-2 薄板状浮体構造物と2層流体 (浮体構造物に作用する点荷重の最大値は、 $0.2\rho_1 gh$ である。ここで、 h は、全静水深である.)

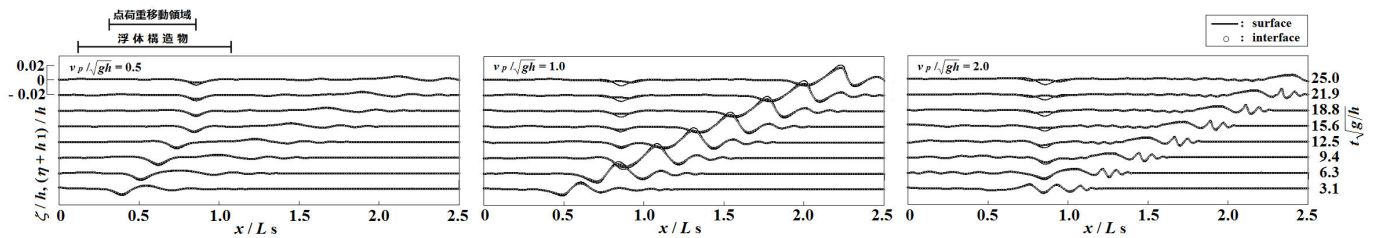


図-3 各時刻における表面波及び内部波の波形 (点荷重の移動速度を v_p とする.)

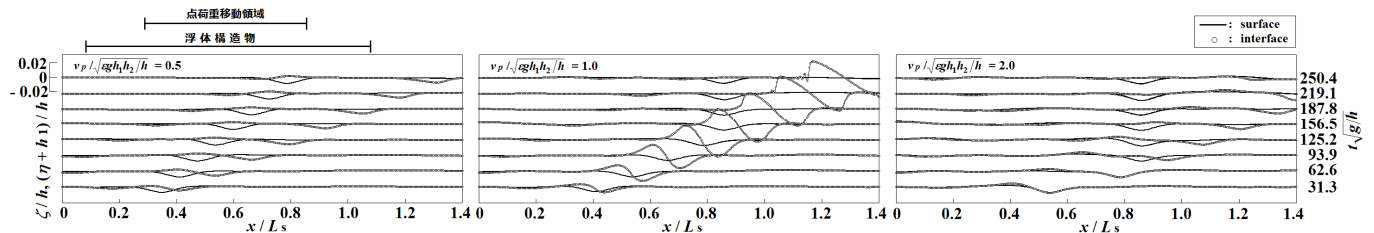


図-4 各時刻における表面波及び内部波の波形 (点荷重の移動速度を v_p とする.)

図-3 に、点荷重の移動に伴う表面波及び内部波の波形を示す。領域長は、 $L = 50.0$ m である。 $v_p = \sqrt{gh}$ の場合、点荷重の移動に伴い、表面波モードが顕著に増幅している。他方、 $v_p = 2.0\sqrt{gh}$ の場合、 $v_p = \sqrt{gh}$ の場合よりも短い波長の表面波モードが発生している。これらは、点荷重の移動速度と、これに近い伝播速度を有するたわみ波の成分波の共振による。

図-4 に、点荷重の移動に伴う表面波及び内部波の各時刻における波形を示す。領域長は、 $L = 20.0$ m である。この場合、 $v_p = \sqrt{\varepsilon gh_1 h_2 / h}$ ($\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$) のとき、点荷重の移動に伴い、内部波モードが顕著に増幅している。

5. 結 論: まず、表面孤立波の伝播を対象とし、数値解析結果を既存の水理実験結果と比較した。本数値モデルの計算結果は、実験結果に見られる津波高さの減衰及び先行する振動の発生を再現した。次に、2層流体上の薄板状浮体構造物に作用する点荷重が構造物上を移動する場合を対象とした。点荷重の移動速度が表面浅水波の波速と等しい場合、表面波モードが顕著に増幅し、また、点荷重の移動速度が内部浅水波の波速と等しい場合、内部波モードが顕著に増幅した。

参考文献

- 柿沼太郎 (2001): 海面や海中で振動する大規模薄板構造物と相互干渉する表面波及び内部波の非線形数値計算, 海洋開発論文集, 第 17 巻, pp. 181-186.
- 堺 茂樹・笹本 誠・劉 曉東・影佐拓也・平賀健司 (1998): 津波来襲時の大型弾性浮体の変形について, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 896-900.
- 劉 曉東・堺 茂樹 (2000): 大型弾性浮体下での孤立波の分裂に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 31-35.
- Hermans, A. J. (2000): A boundary element method for the interaction of free-surface waves with a very large floating flexible platform, J. Fluids and Structures, Vol. 14, pp. 943-956.
- Nakayama, K. and Kakinuma, T. (2010): Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 62, pp. 574-590.