

薄板状浮体構造物上を移動する荷重により生成される

表面波及び内部波の数値解析

Surface and internal waves due to a moving load on a very large floating structure

鹿児島大学大学院・理工学研究科 柿沼 太郎 (Taro Kakinuma)*

鹿児島大学大学院・理工学研究科 山下 啓 (Kei Yamashita)*

*Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

1. 序 論

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、堺ら (1998) は、津波が入射する際の薄板状浮体と流体の干渉問題に関して、鉛直断面内の運動を対象とした水理実験及び数値解析により調べた。また、Hermans (2000) は、海上空港を想定し、平面方向に広がりのある薄板状浮体構造物上を荷重が移動する場合を対象として、浮体の応答の数値シミュレーションを行なった。

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、鉛直断面内の 2 層流体を対象とした数値解析を実施して、薄板状浮体構造物の振動に伴い内部界面が共振する場合のあること、また、薄板状浮体構造物に作用する圧力が 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、表面波のみならず内部波も発生するであろう。従って、こうした内部波が、周辺水域や浅水域に伝播する場合、浮体構造物の動揺が、水温変化等を通じて、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、薄板状浮体構造物と、1 層流体、あるいは、2 層流体との相互干渉問題に適用可能な数値モデルを適用し、超大型浮体構造物である海上空港を想定した数値シミュレーションを実施する。すなわち、まず、薄板状浮体構造物上に作用する点荷重の移動に伴い生成される表面波及び内部波の、1 次元伝播問題の数値解析を行なう。次に、超大型浮体空港上における航空機の離発着に伴い生成される表面波の、2 次元伝播問題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・非圧縮性の多層流体の非回転運動を対象とする。図-1 において、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。本研究では、第 i 層の速度ポテンシャルを $\phi_i(x, z, t) = \sum_{\alpha=1}^{i-1} \{f_{i,\alpha}(x, t) \cdot z^\alpha\}$ 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・内部波方程式系が得られる (柿沼, 2001)。

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

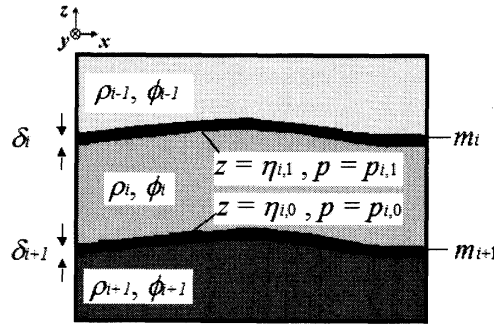


図-1 薄板状構造物と多層流体

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

ここで、添え字 α , β 及び γ に関して、積の総和規約を導入している。 $\eta_{i,0}(\mathbf{x}, t)$, $\eta_{i,1}(\mathbf{x}, t)$, $p_{i,0}(\mathbf{x}, t)$, $p_{i,1}(\mathbf{x}, t)$ 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）の密度及び第 i 板の板厚である。なお、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ は、水平方向の微分演算子であり、重力加速度 g は、 9.8 m/s^2 とする。

一方、十分に薄い第 i 板の運動は、古典理論より、次式で表わされる。

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

ここで、 B_i は、第 i 板の曲げ剛性率である。

代表的な波長、水深及び密度をそれぞれ l , h 及び ρ とし、諸量を次式のように無次元化する。

$$x^* = \frac{x}{l}, \quad y^* = \frac{y}{l}, \quad z^* = \frac{z}{h}, \quad t^* = \frac{\sqrt{gh}}{l} t, \quad \nabla^* = \nabla, \quad \frac{\partial}{\partial t^*} = \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)^* = \frac{l}{\sqrt{gh}} \frac{\partial}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\eta_{i,e}^* = \frac{\eta_{i,e}}{h}, \quad m_i^* = \frac{m_i}{\rho}, \quad B_i^* = \frac{B_i}{\rho g l^4}, \quad p_{i,e}^* = \frac{p_{i,e}}{\rho g h}$$

式(3)を式(2)に代入して、次式を得る。

$$\left(\frac{h}{l} \right)^2 m_i^* \delta_i^* \frac{\partial^2 \eta_{i,1}^*}{\partial t^{*2}} + B_i^* \nabla^{*2} \nabla^{*2} \eta_{i,1}^* + m_i^* \delta_i^* + p_{i-1,0}^* - p_{i,1}^* = 0 \quad (4)$$

ここでは、各層が相対的に浅い場合を対象とし、 $O((h/l)^2) \ll 1$ を仮定する。すると、式(4)の(左辺第1項)が無視される。この項を無視し、式(4)を有次元量に関する式に戻して、第 i 板の方程式が次式となる。

$$B_i \nabla^2 \nabla^2 \eta_{i,1} + m_i g \delta_i + p_{i-1,0} - p_{i,1} = 0 \quad (5)$$

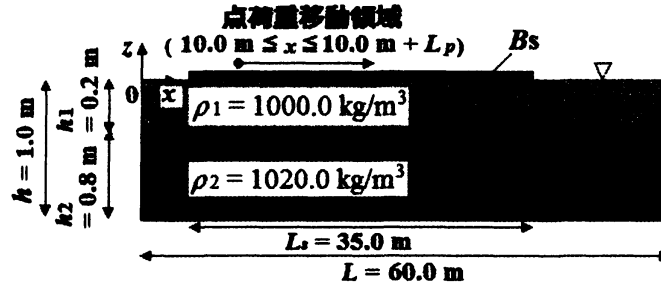


図-2 薄板状浮体構造物と2層流体

式(1a), (1b) 及び (5) を基礎方程式として, 波の1次元伝播を対象とした Nakayama・Kakinuma (2010) を2次元伝播問題が扱えるように拡張した差分法を用いて解く. 簡単のために, 壁面及び底面における摩擦を無視する. また, 初期状態において, 速度ポテンシャルの重み係数 $f_{i\alpha}(x,0)$ をすべて0, すなわち, 初期流速を0とする.

本解析手法の検証のために, 1層問題を対象とし, 数値解析結果と既存の水力実験結果とを比較して, 薄板状浮体の応答の再現性を調べた. すなわち, 劉・堺 (2000) は, 造波水路内に, 曲げ剛性率を有する薄板状浮体を設置し, 津波の来襲を想定して, 薄板状浮体に孤立波が入射する場合の水力実験を行なったが, この水力実験結果に対する本解析手法の再現性は, 良好であることが確かめられた (山下ら, 2011).

3. 薄板状浮体構造物上の点荷重の移動に伴い生成される表面波及び内部波の1次元伝播解析

3. 1 薄板状浮体構造物上の点荷重の移動速度が表面浅水波の波速に近い場合の数値解析

薄板状浮体構造物と2層流体の相互干渉を扱う. そして, 飛行機の離着陸時のように, 薄板状浮体構造物上に作用する点荷重が移動する場合に生成される表面波及び内部波の1次元伝播問題を対象とした数値解析を行なう.

初期静水状態において, 表面形, 界面形及び速度ポテンシャルの重み係数をそれぞれ $\zeta(x,0) = 0$ m, $\eta(x,0) = -h_1$ 及び $f_{i\alpha}(x,0) = 0$ ($i=1$ and 2) とする. 計算格子間隔及び計算時間間隔は, それぞれ, $\Delta x = 0.05$ m 及び $\Delta t = 2.0 \times 10^{-5}$ s とする.

計算対象領域を図-2に示す. 曲げ剛性率 B_s を有する全長 $L_s = 35.0$ m の薄板状浮体構造物を 5.0 m $\leq x \leq 40.0$ m の領域に設置する. 薄板状浮体構造物上に働く点荷重の大きさ及び移動速度は, それぞれ, $0.2\rho_1gh$ 及び $v_p = k\sqrt{gh}$ とし, とともに一定値であるとする. 薄板状浮体構造物上に点荷重が移動する領域は, 10.0 m $\leq x \leq 10.0$ m + L_p とする.

図-3に, 薄板状浮体構造物の曲げ剛性率を $B_s = 500.0$ Nm², 点荷重が移動する距離を $L_p = 5.0$ m とし, 速度ポテンシャルの展開項数を $N = 2$ としたときの, 各時刻における表面形を示す. ここで, 図中の ∇ は, 各時刻における点荷重の作用点を示している.

点荷重の移動速度が表面浅水波の波速と等しい $k = 1.0$ の場合, 浮体を伝播する浮体波の表面波モードが顕著に増幅される. 一方, 点荷重の移動速度が表面浅水波の波速より大きい $k = 2.0$ の場合, $k = 0.5$, または, 1.0 の場合と比較して, 先行する短波長の浮体波が増幅される. これらは, 点荷重と, この移動速度に近い波速を有する浮体波の成分波の共振作用による.

また, $k = 1.0$ の場合, 点荷重の作用点における勾配 $\partial\zeta/\partial x$ は, 点荷重が移動している間, 正の

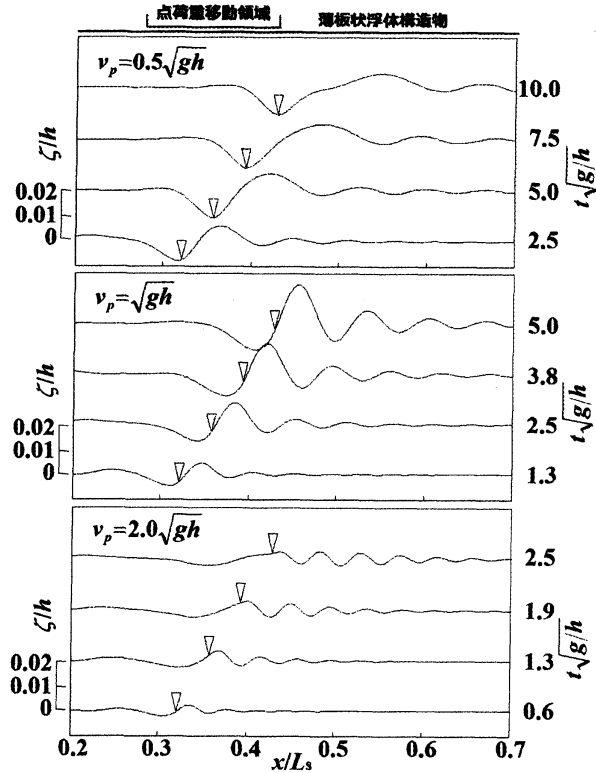


図3 各時刻の表面形 ($B_s = 500.0 \text{ Nm}^2$, $L_p = 5.0 \text{ m}$ 及び $N = 2$ としている。図中の ∇ は、各時刻における点荷重の作用点の位置を示す。)

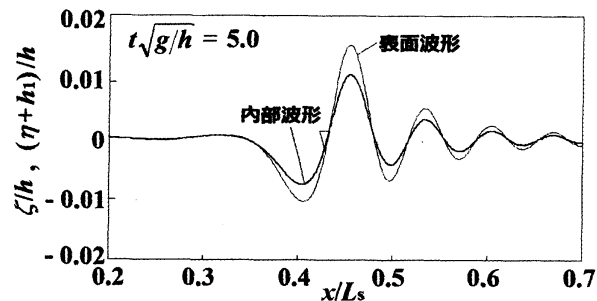


図4 点荷重の停止時刻 $t\sqrt{g/h} = 5.0$ における表面形及び界面形 ($B_s = 500.0 \text{ Nm}^2$, $L_p = 5.0 \text{ m}$, $N = 2$ 及び $k = 1.0$ としている。図中の ∇ は、点荷重の作用点の位置を示す。)

値を示し、点荷重は、上り勾配の斜面を移動している。このように、点荷重が上り勾配の斜面を移動する結果は、遠藤 (2000) で扱われた場合と類似している。

一方、 $k = 2.0$ の場合、 $t\sqrt{g/h} \leq 1.9$ において、点荷重は、上り勾配の斜面を移動し、 $t\sqrt{g/h} = 2.5$ において、点荷重の前方を伝播する浮体波の峰を点荷重が追い越そうとしている。

図4 に、 $k = 1.0$ の場合の、点荷重の停止時刻 $t\sqrt{g/h} = 5.0$ における表面形及び界面形を示す。界面においては、点荷重の移動に伴い、表面波モードの内部波が増幅されている。

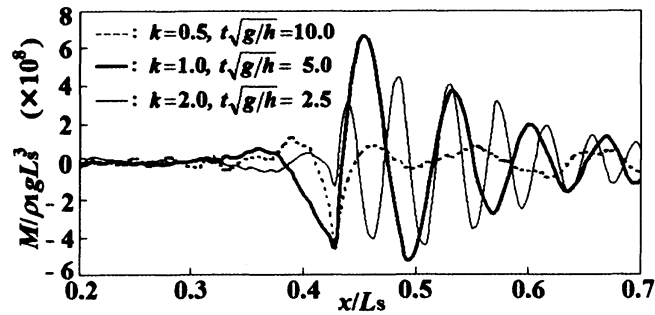


図-5 点荷重の停止時刻における薄板状浮体構造物に働く曲げモーメントの分布 ($B_s = 500.0 \text{ Nm}^2$, $L_p = 5.0 \text{ m}$ 及び $N=2$ としている.)

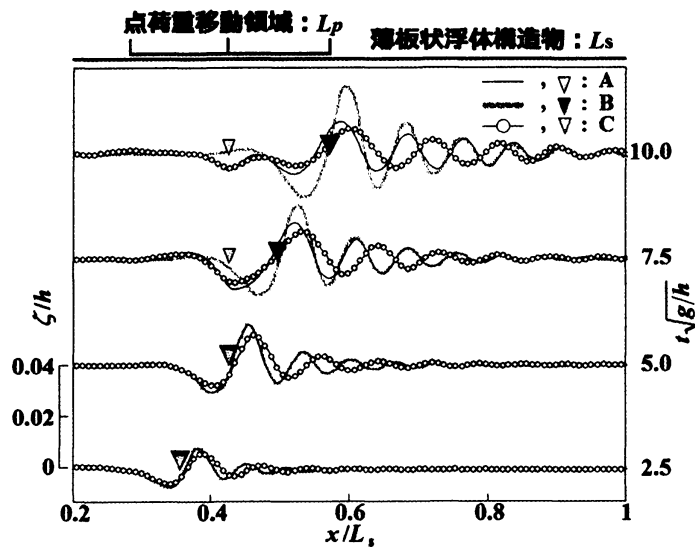


図-6 各時刻における表面形 ($N=2$ 及び $k=1.0$ としている. 図中の ∇ は, 点荷重の作用点の水平位置を示す. A: $L_p/L_s = 0.143$ and $B_s/\rho g L_s^4 = 3.38 \times 10^{-8}$, B: $L_p/L_s = 0.286$ and $B_s/\rho g L_s^4 = 3.38 \times 10^{-8}$, C: $L_p/L_s = 0.143$ and $B_s/\rho g L_s^4 = 6.67 \times 10^{-8}$)

図-5に, $k = 0.5, 1.0$ 及び 2.0 の場合の, それぞれの点荷重の停止時刻における, 薄板状浮体構造物の曲げモーメントの分布を示す. このうち, $k=0.5$ の場合, 点荷重の作用点において, 曲げモーメントの絶対値が比較的大きくなっているが, 点荷重の作用点付近以外の点における曲げモーメントの絶対値は, あまり大きくない. 一方, $k=1.0$ の場合, 浮体波が顕著に増幅されるため, 点荷重の作用点付近以外にも, 曲げモーメントの絶対値が大きくなる点がある. また, $k=2.0$ の場合, 薄板状浮体構造物の変位は, $k=1.0$ の場合ほど大きくないが, 大きな曲率を有する短波長の浮体波が増幅されるため, 曲げモーメントの絶対値が比較的大きくなっている.

薄板状浮体構造物の曲げ剛性率や, 点荷重の移動距離が, 浮体波に与える影響を調べるため, $B_s = 500.0$ or 1000.0 Nm^2 及び $L_p = 5.0$ or 10.0 m とする. 図-6に, $N=2$ 及び $k=1.0$ とした場合の, 各時刻における表面形を示す. 点荷重の移動距離 L_p が長い B の場合に, 生成された浮体波の波高が大きい. また, 薄板状浮体構造物の曲げ剛性率 B_s が大きい C の場合に, 波長が長くなっている.

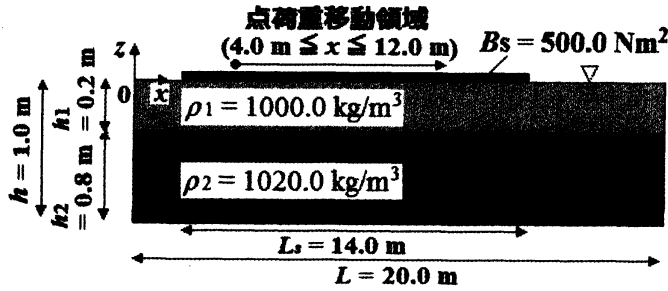


図-7 薄板状浮体構造物と2層流体

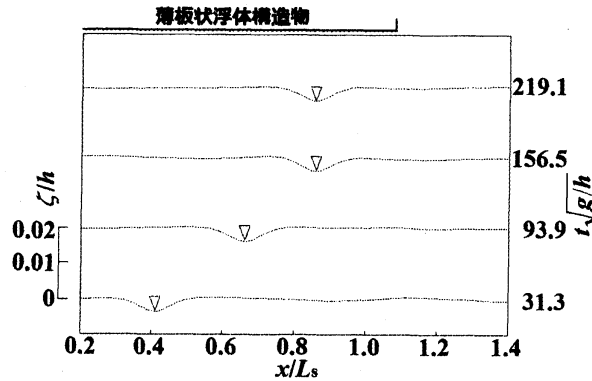


図-8 各時刻における表面形 ($N=1$ 及び $\kappa=1.0$ としている。図中の ∇ は、点荷重の作用点の位置を示す。)

3. 2 薄板状浮体構造物上の点荷重の移動速度が内部浅水波の波速に近い場合の数値解析

計算対象領域を図-7に示す。曲げ剛性率 $B_s = 500.0 \text{ Nm}^2$ を有する全長 $L_s = 14.0 \text{ m}$ の薄板状浮体構造物を $1.0 \text{ m} \leq x \leq 15.0 \text{ m}$ の領域に設置する。薄板状浮体構造物上を点荷重が移動する領域は、 $4.0 \text{ m} \leq x \leq 12.0 \text{ m}$ とし、点荷重の移動速度を一定値 $v_p = \kappa \sqrt{\epsilon g h_2 / h}$ ($\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$) とする。点荷重の大きさは、 $4.0 \text{ m} \leq x < 4.25 \text{ m}$ において、0 から $0.2 \rho_1 g h$ まで徐々に増加させ、 $4.25 \text{ m} \leq x \leq 12.0 \text{ m}$ において、一定値 $0.2 \rho_1 g h$ とする。

図-8に、 $\kappa = 1.0$ の場合の、各時刻における表面形を示す。ここで、速度ポテンシャルの展開項数を $N=1$ としており、図中の ∇ は、点荷重の作用点の位置を示している。点荷重の移動速度が内部浅水波の波速と等しい場合、点荷重の作用点近傍の浮体の撓んだ部分が、点荷重の移動とともに移動するに留まり、有意な波高を有する浮体波が生成されない。なお、 $\kappa = 0.5, 1.0$ 及び 2.0 の場合に、 $N=1 \sim 3$ として、有意な波高を有する浮体波が生成されないことを確認した。

他方、図-9に、 $\kappa = 1.0$ の場合の、 $N = 1 \sim 3$ としたときの、各時刻における界面形を示す。このように、点荷重の移動速度が内部浅水波の波速と等しい場合、内部波モードの内部波が顕著に発達する。移動荷重によって励起された内部波モードの内部波は、構造物が覆う水域から、その周辺水域に伝播していく。ところで、一様斜面上を伝播する内部孤立波の数値解析により、斜面上の内部波の波高は、浅水変形に伴い、波高水深比が 0.5 程度になるまで増加する場合のあることが示されている(山下ら, 2010)。波高が増加した内部波は、その後、砕波現象を通じて、水圏環境に影響を与える可能性がある。従って、例えば、薄板状浮体構造物の設置位置が、沿岸の浅水

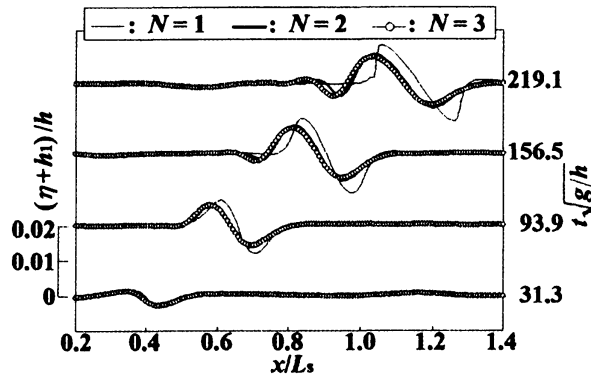


図-9 各時刻における界面形 ($\kappa=1.0$ としている.)

域である場合、生成された内部波は、波の方向分散による波高減衰があまり生じることなく、海底地形や水深の影響により波高が増加し、そして、砕波に至る。こうして、有意な物質輸送や鉛直混合を通して、内部波が水圏環境に影響を及ぼし得る。

なお、図-9において、 $N=1$ として波の非分散を仮定した際に見られる波形の急峻化は、 $N=2$ 、または、3として波の分散を考慮したときには、抑制されている。

4. 薄板状浮体構造物上の点荷重の移動に伴い生成される表面波の2次元伝播解析

4. 1 航空機の離陸に対する薄板状浮体空港の応答

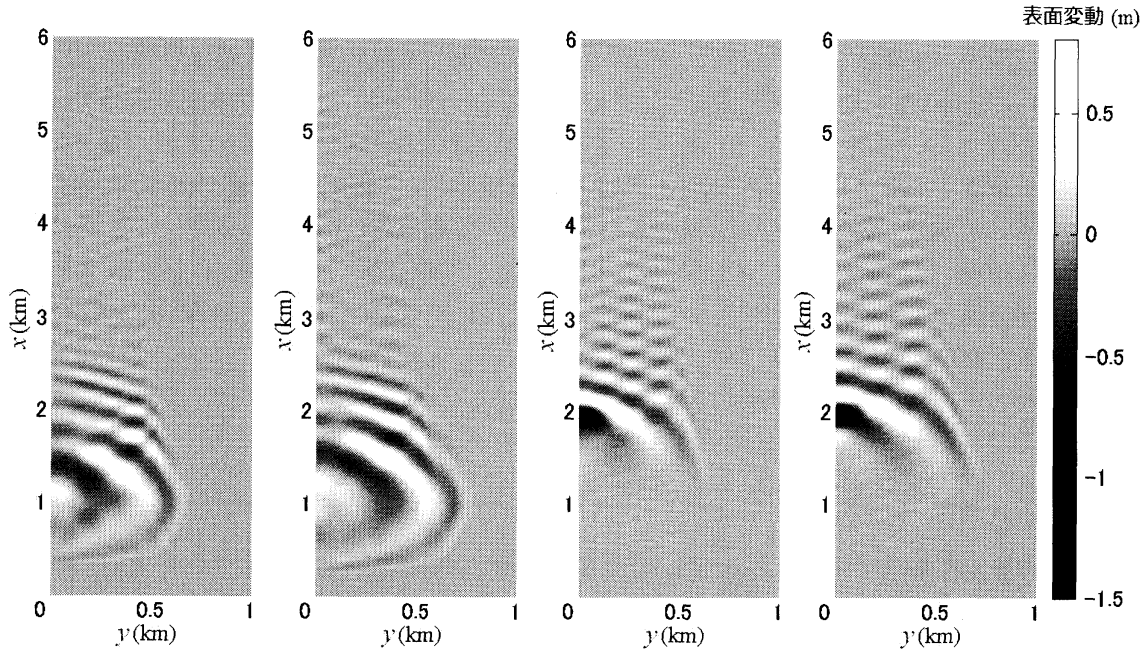
薄板状浮体構造物である海上空港から、航空機が離陸する場合の、表面波と相互干渉する浮体の数値シミュレーションを行なう。海上空港を長さ5 km、幅1 kmの超大型浮体構造物と設定する。そして、この薄板状浮体構造物の曲げ剛性率を一様に $1.0 \times 10^{11} \text{ Nm}^2$ とする。

航空機は、大型旅客機を想定し、質量を $m=228.4 \text{ t}$ 、タイヤ接地総面積を $A_t=1.631 \text{ m}^2$ とする。本研究では、航空機を点荷重と考え、航空機静止時の点荷重の応力を $p_s = mg/A_t = 1.37 \times 10^6 \text{ Pa}$ とする。航空機が離陸する際の加速度を 3 m/s^2 で一定とし、滑走時間を25 sとする。すると、離陸する瞬間の滑走速度が 270 km/h となり、滑走距離が約 938 m となる。

流体の速度ポテンシャルの展開項数は、 $N=1$ とする。

海上空港を設置する水域の静水深 h が 10 m である場合の、離陸時刻 $t=25 \text{ s}$ における浮体及び水面の変動を図-10(a) に示す。ここで、各計算条件は、次の通りである。すなわち、 $0 \text{ km} \leq x \leq 6 \text{ km}$ かつ $0 \text{ km} \leq y \leq 1 \text{ km}$ の領域が計算対象領域であり、この水域全体で静水深が $h=10 \text{ m}$ で一様である。そして、 $0.5 \text{ km} \leq x \leq 5.5 \text{ km}$ かつ $0 \text{ km} \leq y \leq 0.5 \text{ km}$ に海上空港が存在する。航空機は、 $x=1 \text{ km}$ より出発し、 $y=0 \text{ km}$ の x 軸上を滑走する。現象が x 軸に関して線対称であると考え、 $y=0 \text{ km}$ の位置に完全反射の鉛直壁を置き、ここで鏡面条件を成り立たせている。すなわち、 x 軸が、海上空港の滑走方向の中央軸となる。また、他の側面には、Sommerfeldの開境界条件を課す。航空機が出発点に到着してから即座に滑走を開始すると仮定し、時刻 $t=0 \text{ s}$ に、応力 p_s を作用させ始め、同時に航空機が滑走を開始する。航空機は、次第に加速して、時刻 $t=25 \text{ s}$ に離陸する。滑走開始時刻 $t=0 \text{ s}$ に応力を $p=p_s$ とし、離陸時刻 $t=25 \text{ s}$ に $p=0 \text{ Pa}$ となるよう、時間に関して線形に応力を減少させる。離陸時刻以降は、海上空港に対する載荷を行なわない。

図-10(a) に示す離陸時刻において、航空機の前方に浮体波が進行している。そして、海上空港の



(a) 離陸 ($h=10\text{ m}$) (b) 離陸 ($h=20\text{ m}$) (c) 着陸 ($h=10\text{ m}$) (d) 着陸 ($h=20\text{ m}$)
 図-10 航空機の離着陸時の表面波 (時刻 $t=25\text{ s}$ における浮体及び水面の変動が描かれている。)

撓みにより、航空機は、上り勾配斜面を滑走する。また、多数の表面波が四方八方に伝播し、海上空港の端部で反射して、波の重合により、海上空港に格子状の振動場が形成されている。

また、海上空港を設置する水域の静水深が $h=20\text{ m}$ である場合の、離陸時刻 $t=25\text{ s}$ における浮体及び水面の変動を図-10(b) に示す。この場合にも、海上空港に格子状の振動場が形成されている。図-10(a) と図-10(b) を比較すると、静水深が大きい後者的場合の方が、薄板状浮体構造物の変動幅並びに波速が大きいことがわかる。

4. 2 航空機の着陸に対する薄板状浮体空港の応答

薄板状浮体構造物である海上空港に、航空機が着陸する場合の、表面波と相互干渉する浮体の数値シミュレーションを行なう。離陸の場合と同様に、海上空港を長さ 5 km 、幅 1 km の超大型浮体構造物と設定し、この薄板状浮体構造物の曲げ剛性率を一様に $1.0 \times 10^{11}\text{ Nm}^2$ とする。

航空機は、大型旅客機を想定し、航空機静止時の点荷重の応力を $p_s = 1.37 \times 10^6\text{ Pa}$ とする。航空機が着陸する瞬間の滑走速度を 270 km/h とし、滑走時の加速度を -3 m/s^2 で一定とする。すると、滑走時間が 25 s となり、滑走距離が約 938 m となる。

流体の速度ポテンシャルの展開項数は、 $N=1$ とする。

海上空港を設置する水域の静水深が $h=10\text{ m}$ 及び 20 m である場合の、航空機停止時刻 $t=25\text{ s}$ における浮体及び水面の変動をそれぞれ図-10(c) 及び図-10(d) に示す。ここで、各計算条件は、次の通りである。すなわち、 $0\text{ km} \leq x \leq 6\text{ km}$ かつ $0\text{ km} \leq y \leq 1\text{ km}$ が計算対象領域であり、この水域全体で静水深が一様であるとしている。境界条件は、前述した、離陸時の数値解析と同一とする。そして、 $0.5\text{ km} \leq x \leq 5.5\text{ km}$ かつ $0\text{ km} \leq y \leq 0.5\text{ km}$ に海上空港が存在する。航空機は、 $x=1\text{ km}$ の地点に

着陸し、海上空港の滑走方向の中央軸である x 軸上を滑走する。着陸時刻 $t = 0$ s に応力を $p = 0$ Pa とし、航空機停止時刻 $t = 25$ s に $p = p_0$ となるよう、時間に関して線形に応力を増加させる。

図-10(c) 及び図-10(d) より、航空機が着陸する場合にも、航空機の前方に浮体波が進行することがわかる。ただし、着陸時には、航空機は、海上空港の峰を追い越して行く。また、海上空港に格子状の振動場が形成されていることも、離陸時と同様である。図-10(c) と図-10(d) を比較すると、静水深が大きい後者の場合の方が、薄板状浮体構造物の変動幅並びに波速が大きいことがわかる。

更に、図-10(a) と図-10(c)、または、図-10(b) と図-10(d) を比較すると、点荷重の応力が次第に減少していく離陸時よりも、点荷重の応力が次第に増加していく着陸時の方が、薄板状浮体構造物の変動幅の最大値が大きくなることがわかる。

以上より、薄板状浮体構造物の安全性を考える際には、比較的深い水域に海上空港を設置した場合の、特に、着陸時の振動に配慮する必要があると言える。

5. 結 論

薄板状浮体構造物と 1 層流体、または、2 層流体の相互干渉問題の数値解析を行なった。すなわち、飛行機の離着陸時のように、薄板状浮体構造物上に作用する点荷重が移動する場合を対象として、表面波、または、内部波の生成・伝播の数値解析を行なった。そして、以下に示すような結論を得た。

- (1) 点荷重の移動速度が表面浅水波の波速と等しい場合、この移動速度に近い波速を有する浮体波成分が共鳴し、表面波及び内部波の表面波モードが顕著に増幅される。
- (2) 点荷重の移動速度が表面浅水波の波速に等しい、または、それよりも大きい場合、比較的大きな曲げモーメントが薄板状浮体構造物に働く。飛行機の安定した走行の確保のみならず、構造物の耐久性の向上といった観点からも、浮体波の表面波モードの増幅に対して注意を要する。
- (3) 薄板状浮体構造物上の点荷重の移動速度が内部浅水波の波速と等しい場合、内部波の内部波モードが顕著に増幅される。
- (4) 航空機が離陸、または、着陸する際に、海上空港に格子状の振動場が形成される。
- (5) 海上空港設置水深が大きい場合、薄板状浮体構造物の変動幅が比較的大きくなる。また、離陸時よりも着陸時の方が、薄板状浮体構造物の変動幅が大きくなる。

参考文献

- 遠藤久芳: 波浪および飛行機の離着陸荷重を受ける VLFS の挙動, 第 15 回海洋工学シンポジウム, pp. 193-200, 2000.
- 柿沼太郎: 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, 2001.
- 堺 茂樹・笹本 誠・劉 曉東・影佐拓也・平賀健司: 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, 1998.
- 山下 啓・柿沼太郎・中山恵介・及川正行・辻 英一・西川 学: 深水域や碎波点近傍における非線形内部波の挙動, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 26-30, 2010.
- 山下 啓・柿沼太郎・中山恵介: 薄板状浮体構造物上を移動する荷重により生成される表面波及び内部波の数値解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, 2011.

- 劉 曉東・堀 茂樹: 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 卷, pp. 31-35, 2000.
- Hermans, A. J.: 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, 2000.
- Nakayama, K. and Kakinuma, T.: Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 62, pp. 574-590, 2010.