

3.2 大型浮体構造物や大型没水構造物と相互干渉する表面波及び内部波の数値計算

3.2.1 序論

近年、メガフロートのように大規模な浮体構造物の技術開発が進められている。こうした大型浮体構造物の動搖は、流体運動と相互に干渉する。また、密度成層が発達した水域では、構造物の揺れに呼応して、内部界面が振動を始めるであろう。この内部界面の振動は、浮体構造物に覆われた水域の温度や塩分に影響を与えるのみならず、内部波として構造物周囲の水域に伝播し、広範囲の水圏環境に影響することが予想される。そして、成層水域に設置された浮体構造物には、流体の密度が一様である場合と異なる応力が作用する。

本研究では、浮体構造物や没水構造物の振動と、表面波及び内部波との相互干渉について検討した。基礎方程式は、水面、または、水中で柔軟に振動する、水平方向に大きなスケールを有する薄板状構造物と、多層流体との間の相互干渉を支配する非線形方程式系である。多層モデルでは、密度の異なる流体が混合しないと仮定する。このため、密度界面は、幾つかの物理量が不連続である境界面となるが、だからこそ、二つの異なる流体層の間に柔軟な薄板を挿入することができる。この状態は、恰も流体が薄板に挟まれたサンドイッチ(図-1)のようである。こうして、曲げ剛性を有する弾性薄板に接する流体の運動を調べることが可能となるのである。

浮体構造物の利用法として、空港、橋梁、居住区や処理場といった様々な用途が考えられている。他方、平面的に大きな没水構造物としては、消波のための没水平板、貯蔵プラントや人工漁礁等が考えられる。

ここでは、鉛直断面内の2層流体を対象とする。まず、水面上の大型弾性浮体が流体に強制振動を与えるときの内部界面の共振現象について調べる。浮体構造物に働く圧力について、構造物の振動の周波数や波長を変えて検討し、内部界面が存在しない1層の場合と2層問題とを比較する。次に、浮体や水面に初期変位を与えてから放置することによって系に自由振動を発生させた場合の、水面、または、水面下に浮かぶ薄板構造物と流体との相互干渉について、その初期変位の波長や構造物の曲げ剛性を変えて解析する。更に、水面の一部を覆う浮体構造物や、曲げ剛性が場所的に変化する浮体構造物を対象として、自由振動の場合及び進行波が入射する場合の解析を行なう。

3.2.2 表面波及び内部波の長波方程式系

互いに混合しない非粘性・非圧縮性流体の非回転運動と、平面的に大規模な薄板との相互干渉を考える。このとき発生する表面波及び内部波の完全非線形方程式系が柿沼^{1), 2)}により導かれている。本稿では、各層(流体を上から順に、第1, 2, …, I層

と呼ぶ。)が浅水域にある場合を対象とし、長波近似を行なう。そして、次式のような非線形・非分散性の表面波・内部波の方程式を基礎方程式とする。

$$\frac{\partial \eta_{i,1}}{\partial t} - \frac{\partial \eta_{i,0}}{\partial t} + \nabla \{(\eta_{i,1} - \eta_{i,0}) \nabla \phi_i\} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \phi_i)^2 + g \eta_{i,1} \\ + (B_i \nabla^2 \eta_{i,1} + p_{i-1,0} + P_i + W_{i-1}) / \rho_i = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 ϕ_i は、流体の第*i*層の速度ポテンシャル、 ∇ は、水平方向の微分演算子、 $\eta_{i,j}$ (*j*=0, 1)は、第*i*層が有する二つの界面の位置であり、 $p_{i,j}$ は、 $z = \eta_{i,j}$ における圧力である。また、 g は、重力加速度であり、 B_i は、第*i*層の流体の上面に接する第*i*板の曲げ剛性率であって、式(2)では、薄板の慣性項が相対的に無視されている。なお、中立面と板表面の曲率及びねじり率の差の影響を無視している。また、 P_i 及び W_i は、それぞれ、次式によって定義される。

$$P_i = \sum_{k=1}^{i-1} \{(\rho_i - \rho_k) g h_k\} \quad (3)$$

$$W_i = \sum_{k=1}^i (-m_k g \delta_k) \quad (4)$$

ここで、 $h_i(\mathbf{x})$ は、第*i*層における静水深であり、また、 m_i 及び δ_i は、それぞれ、第*i*板の密度及び鉛直方向の幅である。

数値計算では、図-2に示すような鉛直断面内の2層問題を対象とし、第1層の上面及び下面の位置をそれぞれ $z = \zeta$ 及び $z = \eta$ として、大気圧を0とする。初期状態における速度ポテンシャルは、至る所で0とする。また、広い水域を覆う構造物を想定し、端部の影響が無視できる中央付近を対象とすることとし、構造物の両端を繋ぎ合わせて、空間的に周期的な境界条件を適用する。

3.2.3 曲げ剛性が一様な大規模浮体・没水構造物の振動と表面波及び内部波の数値計算

(1) 強制振動

まず、水面に、一定の周期と波長を持つ強制変位を与える。図-2(a)の水面に浮かぶ浮体構造物の振動が流体運動を励起する場合である。図-3及び4に、 $\zeta = a \sin(2\pi t/T) \cos(2\pi x/L)$ なる水面の振動を与え続けたときの、構造物下面の計算領域中央に位置する点 $(x, z) = (L/2, \zeta)$ における圧力 p_M の時間変化を示す。ここで、破線は、各条件に対応する1層問題における圧力 p_M の時間変化である。

図-3では、共振現象が発生し、内部界面の振幅の増加とともに浮体構造物に働く圧力が大きくなる。なお、内部界面が構造物に接した時点で計算を終了した。

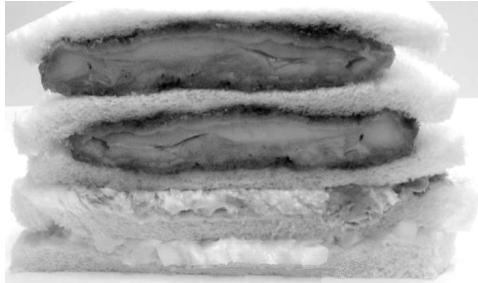


図-1 サンドイッチ

図-4 では、共振現象が発生せず、図-3 のように著しい圧力の増加が見られない。また、強制振動の周期 T が十分に長いと、2層問題における圧力の振幅が1層問題とあまり変わらない。

(2) 自由振動

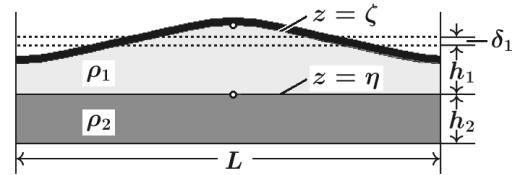
次に、初期状態において水面に変位を与えたときの、薄板構造物と流体の相互干渉を考える。系全体で見ると、外力として重力のみが作用し、自由振動が発生する。初期状態における水面の形状を $\zeta = -a_0 \cos(2\pi x/L)$ とし、これを放置したときの、計算領域中央の内部界面位置 $z = \eta_M(L/2, t)$ の時間変化を図-5～9 に示す。モードの異なる波が重合している。

図-5～7 の場合では、図-2(a) のように浮体が水面にある。無次元化した曲げ剛性率 $B_1^* = B_1/(\rho_1 g L^4)$ が低い程、 η_M の振幅が大きくなっている。また、 $B_1^* = 1$ 及び 10 の場合、初期波形の波長が長い程、各モードの周期が長くなる。

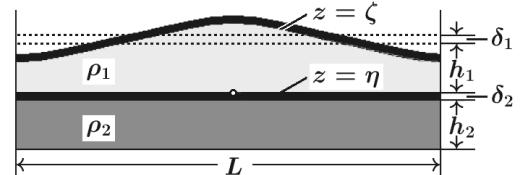
他方、図-8 の場合では、図-2(b) のように曲げ剛性率の等しい浮体が水面と海中の両方にあり、また、図-9 の場合では、図-2(c) のように浮体が海中のみにある。図-8 及び 9 の両者の場合とも、初期状態は、図-6 の場合と同じである。図-5～9 の何れにおいても、無次元化した曲げ剛性率が低い場合に、 $z = \eta_M$ に分裂が見られる。

(3) 没水構造物の初期変位により発生する表面波

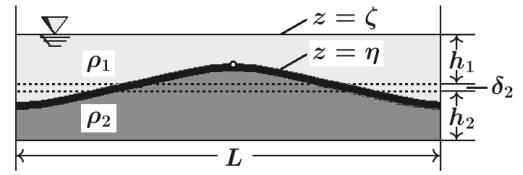
図-2(c) のように、水面下にある薄板構造物に $\eta = -a_0 \cos(2\pi x/L) - h_1$ という初期波形を与えて放置する。このとき発生する表面波の波形 $z = \zeta$ 及び構造物の形状 $z = \eta$ を図-10 に示す。上・下の流体の密度比を逆転させた場合についても計算を行なった。構造物の曲げ剛性があるために、 $\rho_1 > \rho_2$ であっても安定した内部波が形成される。両者の密度比の場合とも、表面に幾つかの峰が生じる。密度比が $\rho_2/\rho_1 = 1/1.025$ の場合に構造物の振動の周期が比較的短くなり、両者に位相のずれが見られる。



(a) 浮体構造物



(b) 浮体構造物と没水構造物



(c) 没水構造物

図-2 薄板構造物と2層流体

3.2.4 曲げ剛性が場所的に変化する浮体や水面の一部を覆う浮体の振動と内部波の数値計算

(1) 浮体の運動により励起される内部界面の自由振動

図-11(a)～(c) に示すように、浮体の曲げ剛性が場所的に変化する場合を対象とし、水面に $\zeta = -a_0 \cos(2\pi x/L)$ という初期波形を与えて放置する。このうち、図-11(a) において、 $B'_1 = 0$ であり、この水域に浮体構造物が存在しない。図-12 に、計算領域中央における内部界面位置 $z = \eta_M(L/2, t)$ の時間変化を示す。無次元化した曲げ剛性率 B'_1 ($B'_1^* = B'_1/(\rho_1 g L^4)$) が低くなる程、 η_M のピークの出現時刻が遅れ、振幅が大きくなる。そして、浮体構造物が間隔を空けて設置されている図-12(a) では、図-12(b) 及び (c) に現れない波形の分裂が見られる。

(2) 進行波の入射に対する浮体の変位

図-11(d) のように、2層流体の水面の一部に浮体が存在する水域に、進行波が入射したときの、構造物中央下面の位置 $\zeta_M(L, t)$ の時間変化を図-13 に示す。ここで、図-11(d) の左端における水面位置を $\zeta(0, t)/h = 0.2/(10^s + 10^{-s})$, $s = \{t(gh)^{1/2}/L - 1.5\}/10$ のように与えて、表面波及び内部波を生成している。また、構造物の右側には、流体表面が自由水面である領域を十分長い距離にわたって設けてある。図-13 によると、上層の水深 h_1 が相対的に浅くなる程、浮体構造物の変動が鈍くなり、峰の高さが低くなっている。

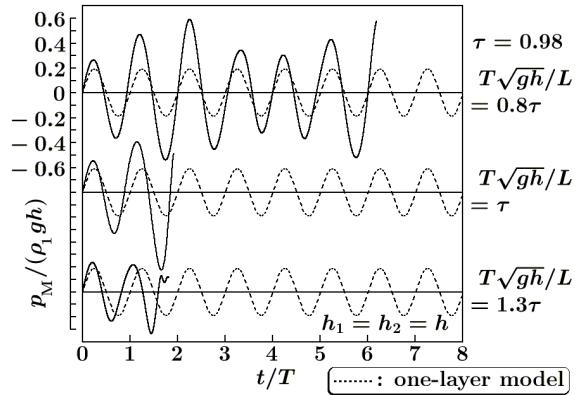


図-3 水面上の薄板構造物の強制振動によって内部界面の共振が生じる場合の板下における圧力の時間変化 ($L/h = 10.0$, $a/h = 0.2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.5$, $x/L = 0.5$)

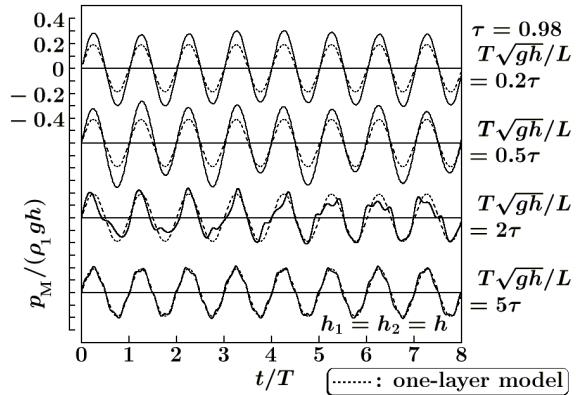


図-4 水面上の薄板構造物の強制振動によって内部界面の共振が生じない場合の板下における圧力の時間変化 ($L/h = 10.0$, $a/h = 0.2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.5$, $x/L = 0.5$)

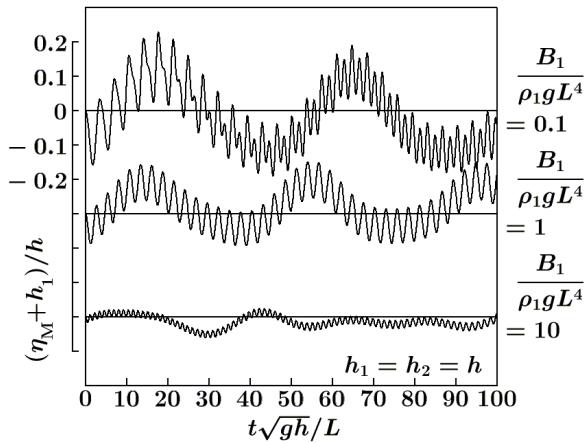


図-5 初期状態において水面上の薄板構造物に変位を与えたときの内部界面の変動 ($L/h = 6.0$, $a_0/h = 0.2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $x/L = 0.5$)

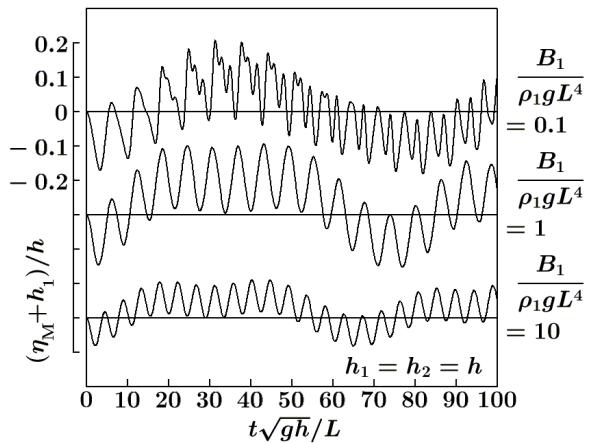


図-6 初期状態において水面上の薄板構造物に変位を与えたときの内部界面の変動 ($L/h = 10.0$, $a_0/h = 0.2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $x/L = 0.5$)

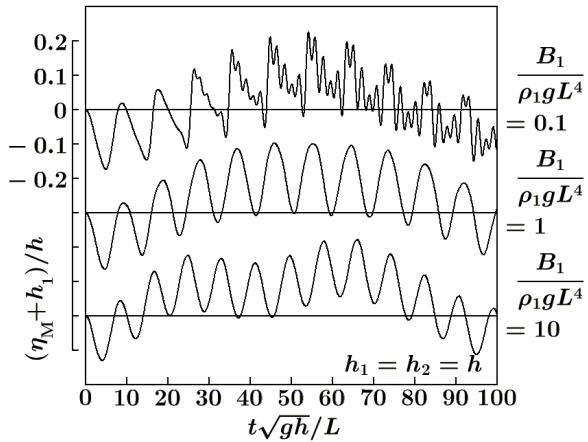


図-7 初期状態において水面上の薄板構造物に変位を与えたときの内部界面の変動 ($L/h = 14.0$, $a_0/h = 0.2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $x/L = 0.5$)

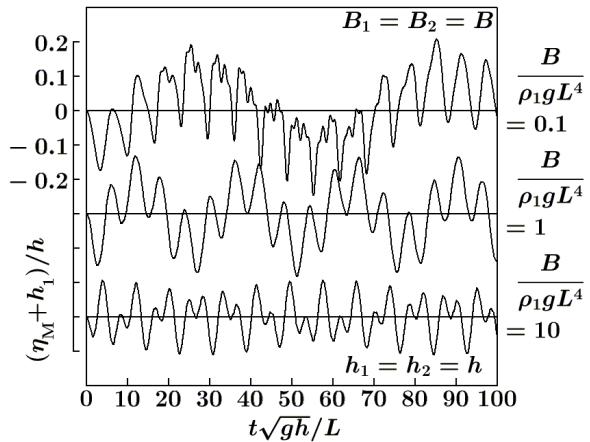


図-8 初期状態において水面上の薄板構造物に変位を与えたときの水面下の薄板構造物の振動 ($L/h = 10.0$, $a_0/h = 0.2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $x/L = 0.5$)

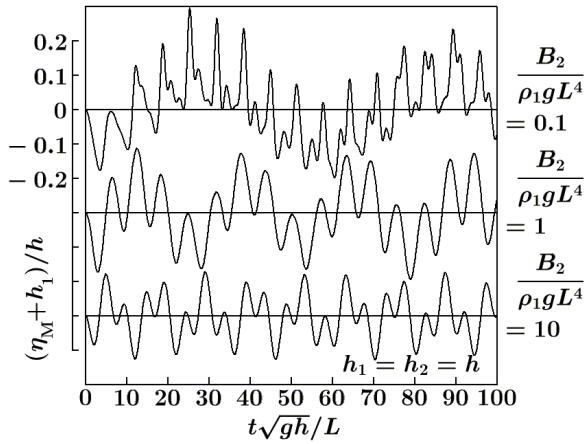


図-9 初期状態において水面に変位を与えたときの水面下の薄板構造物の振動 ($L/h = 10.0$, $a_0/h = 0.2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $x/L = 0.5$)

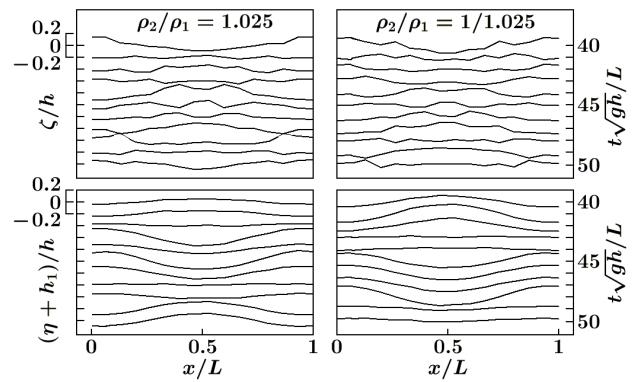
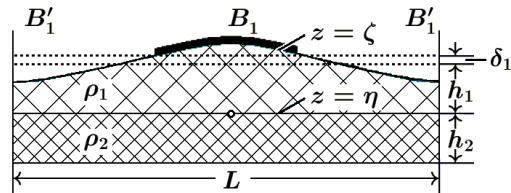
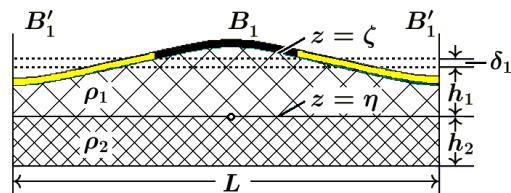


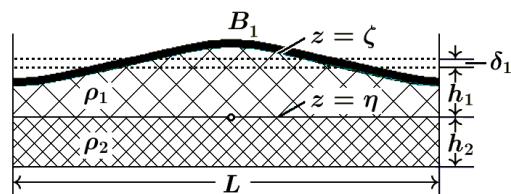
図-10 初期状態において水面下の薄板構造物に変位を与えたときに発生する表面波と構造物の振動 ($h_1/h = 0.4$, $L/h = 4.5$, $a_0/h = 0.5$, $B_2/(\rho_1 g L^4) = 0.1$, $h = (h_1 + h_2)/2$)



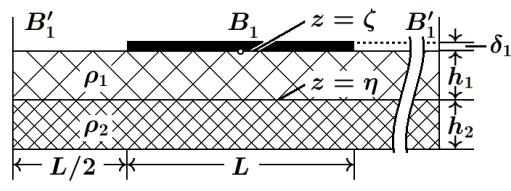
(a) 間隔を空けて設置された浮体構造物



(b) 曲げ剛性が異なる 2 種類の浮体構造物の連結



(c) 水面全体を覆う曲げ剛性が一様な浮体構造物



(d) 水面の一部を覆う浮体構造物（静水状態）

図-11 曲げ剛性が場所的に変化する浮体構造物

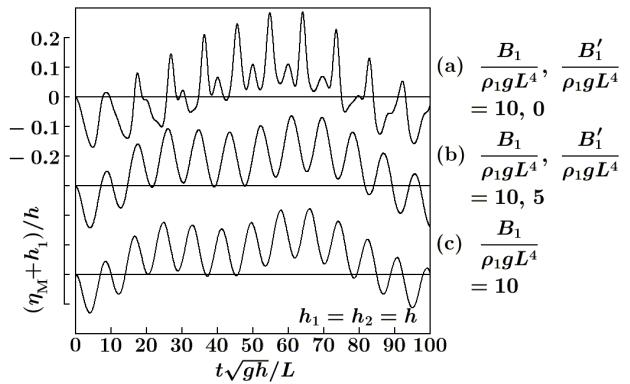


図-12 初期変位の与えられた水面が放たれたときの内部界面の変動 ($L/h = 14.0$, $a_0/h = 0.2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $x/L = 0.5$; (a) ~ (c) の浮体構造物は、それぞれ、図-11(a) ~ (c) に対応する。)

—: one-layer model
-o-: two-layer model ($h_1/(h_1 + h_2) = 0.5$)
-□-: two-layer model ($h_1/(h_1 + h_2) = 0.2$)

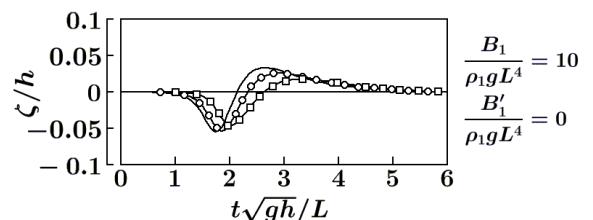


図-13 浮体構造物が水面の一部を覆う水域（図-11(d)）に進行波が入射したときの構造物の変位 ($L/h = 4.0$, $h = (h_1 + h_2)/2$, $\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $x/L = 1.0$)

3.2.5 結論

薄板状の浮体・没水構造物と多層流体との非線形相互干渉について、鉛直断面内の2層問題を対象として数値解析を行なった。水面上の柔軟な構造物が強制振動を発生させる場合、1) この振動によって内部界面が共振する条件が存在し、また、2) 強制振動の周期が十分に長いと、2層問題における圧力の振幅が1層問題とあまり変わらないことがわかった。また、水面や水面下の薄板構造物に初期変位を与え、構造物と表面波・内部波との相互干渉の解析を行なった結果、3) 何れの場合も、無次元化した曲げ剛性率が低い場合に内部波に分裂が見られ、また、4) 浮体が水面にある場合、曲げ剛性率が低い程、内部界面の振幅が大きくなつた。更に、曲げ剛性が場所的に変化する浮体や、水面の一部を覆う浮体を対象とし、後者が存在する水域に進行波が入射する場合についても数値計算を行ない、5) 曲げ剛性率の低い浮体と連結すると、浮体の振動の周期が長く、振幅が大きくなり、また、6) 上層の相対水

深が浅い程、進行波に対する浮体の応答が鈍くなるといった特性のあることを示した。

大規模浮体構造物は、水圏の有限領域を覆うが、その運動の影響は、表面波及び内部波として伝播し、この領域外の流体の密度構造をも変化させるであろう。従って、環境アセスメントでは、内部界面の存在に留意する必要がある。また、底泥が海底表層を構成するといった場合には、浮体構造物の振動が海底面と相互干渉する可能性がある。なお、流体層が浅水域にない場合や、構造物が大きく変位する場合には、高次項の影響も考慮して検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 柿沼太郎: 大型浮体構造物や大型没水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19巻, pp. 371-376, 2003.