U.D.C. 627.223.4/6

矩形浮体構造物の波浪応答に関する数値解析
Numerical Simulation on Wave Response of a Rectangular Floating Structure

高村　浩彰* Hiroaki Takamura
多田　彰秀* Akihide Tada

要　約

大規模浮体構造物を用いてインフラストラクチャーを沖合立地させようという動きが活発化しつつある．このような中で，波浪や流れ，風などに伴う浮体構造物の動揺特性および係留力特性を正確に予測することは，浮体構造物の設計および施工の上から重要なことである．

本報では，上述のような背景を考慮し，始めに，3次元特異点分布法を用いた任意形状浮体の波浪応答解析プログラムを開発する．次いで，浅吃水の矩形浮体模型を用いた波強制力実験を行い，得られた実験値と数値解析結果との比較から開発された解析プログラムの有効性を検証する．最後に，その解析プログラムを用いて，矩形浮体模型に作用するRadiation流体力の特性並びに自由浮体の波浪応答特性に関して数値シミュレーションを試み，考察を加えている．

目　次

§1．はじめに
§2．理論解析
§3．波強制力実験
§4．Radiation 流体力特性
§5．自由浮体の波浪応答特性
§6．おわりに

§1．はじめに

近年，浮体構造物は，海上空間に新たな利用価値をもたらすものとして注目されている．特に，海上空港[1]や沖合港湾[2]および廃棄物処理プラント[3]等に代表されるインフラストラクチャーを沖合に大規模浮体構造物で立地させようとする動きが活発化しつつある．このような浮体構造物は，波浪や流れ，風などに代表される環境外力が作用するために複雑な応答特性を有している．さらに，台風や津波などが襲来する際も，船舶のように避難することなく，その大半が定位置に係留されるものと考えられる．したがって，環境外力に伴う浮体構造物の動揺特性並びに係留力特性を正確に予測することは，設計

*技術研究所海洋技術課

上および施工上からも極めて重要なことである．

一般に，浮体構造物に作用する環境外力としては，波浪，波漂流力，風および流れが考えられる．本報では，プログラム開発の第1段階として波浪による浮体構造物の動揺特性を予測計算できる数値解析手法の開発を目的としている．船舶の動揺解析に用いられる手法と同様に，浮体構造物に作用する波浪外力は，固定された浮体に作用する波強制力並びに浮体の動揺に伴って周囲流体を攪乱させて生じるRadiation流体力とに分けることができる．両者は，速度ポテンシャルに関する境界値問題として定式化することにより，理論的に算定することが可能である．この基本的な考え方に基づいて，3次元特異点分布法を用いた任意形状浮体の波浪応答解析プログラムを開発する．さらに，水理模型実験より得られた波強制力の実験値と数値解析結果との比較から本研究で開発した解析プログラムの妥当性を検証する．最後に，波強制力実験で用いた模型に作用するRadiation流体力の特性並びに自由浮体の波浪応答特性について数値解析を試み，その結果について考察を行っている．

§2．理論解析

2－1　基本仮定および座標系

基礎方程式の定式化に際し，次のような基本仮定を設けた．

①流体は非粘性，非圧縮性の完全流体とし，その運動が非回転と仮定すれば，速度ポテンシャルの存在が保証される．

②波高は微小と仮定し，圧力についても高次項を無視できる．

③浮体構造物による流体攪乱も微小と仮定し，無限領域の解析は線形理論の範囲で論じられるものとする．

④流体および浮体構造物は周期運動するものとし，それぞれの定常状態を論じる．

⑤浮体構造物は剛体とする．

⑥海底の起伏はなく，水深は一定とする．

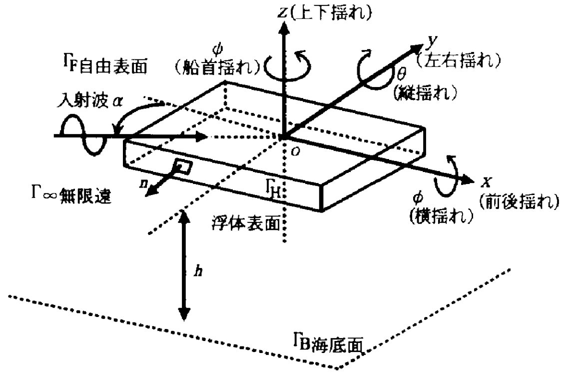
ここで用いる座標系を**図－1**に示す．

2－2　基礎方程式および境界条件

基本仮定④より浮体構造物が（1）式に示すような周期運動を行うものとすれば，速度ポテンシャル$\Phi(x,y,z,t)$は（2）式で表される．

$$X_j = \mathrm{Re}\{x_j e^{-i\omega t}\} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\Phi(x,y,z,t) &= \mathrm{Re}\{\phi(x,y,z)e^{-i\omega t}\}\\ &= \mathrm{Re}\{(\phi_0+\phi_d-i\omega\sum_{j=1}^{6}x_j\phi_j)e^{-i\omega t}\}\end{aligned} \tag{2}$$



図－1　解析座標系

ここで，両式中の記号は以下に示すように定めている．

x_j:変位複素振幅

j:運動方向（1,2,3,4,5,6）

1＝前後揺れ, 2＝左右揺れ, 3＝上下揺れ,

4＝横揺れ, 5＝縦揺れ, 6＝船首揺れ

ω:角振動数

t:時間

ϕ_0:入射波ポテンシャル

ϕ_d:散乱波ポテンシャル

ϕ_j:浮体動揺による発散波ポテンシャル

さらに，振幅a，波数k_0および波入射角αの入射波ポテンシャルϕ_0は，（3）式のように表すことができる．ここで，gは重力加速度，hは水深であり，波数k_0は（4）式の分散関係式を満足している．

$$\phi_0 = -\frac{iga}{\omega}\frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h}e^{ik_0(x\cos\alpha+y\sin\alpha)} \tag{3}$$

$$\frac{\omega^2}{g} = k_0\tanh k_0 h \tag{4}$$

基本仮定①より速度ポテンシャルは，（5）式に示されるラプラス方程式を満足し，これが流場の基礎方程式となる．

$$\nabla^2\phi = 0 \qquad \text{on}\ \Omega \tag{5}$$

また，浮体構造物表面での境界条件は，Diffraction問題とRadiation問題では異なるため分けて表示すると，

Radiation問題；

$$\frac{\partial\phi_1}{\partial n} = \frac{\partial x}{\partial n} \qquad \text{on}\ \Gamma_H$$

$$\frac{\partial\phi_2}{\partial n} = \frac{\partial y}{\partial n} \qquad \text{on}\ \Gamma_H$$

$$\frac{\partial\phi_3}{\partial n} = \frac{\partial z}{\partial n} \qquad \text{on}\ \Gamma_H$$

$$\frac{\partial\phi_4}{\partial n} = \left(y\frac{\partial z}{\partial n} - z\frac{\partial y}{\partial n}\right) \qquad \text{on}\ \Gamma_H \tag{6}$$

$$\frac{\partial\phi_5}{\partial n}=\left(z\frac{\partial x}{\partial n}-x\frac{\partial z}{\partial n}\right)\qquad \text{on } \Gamma_H$$

$$\frac{\partial\phi_6}{\partial n}=\left(x\frac{\partial y}{\partial n}-y\frac{\partial x}{\partial n}\right)\qquad \text{on } \Gamma_H$$

Diffraction問題；

$$\frac{\partial\phi_d}{\partial n}=-\frac{\partial\phi_0}{\partial n}\qquad \text{on } \Gamma_H \tag{7}$$

となる．一方，海底面Γ_B上，自由表面Γ_F上および無限遠Γ_∞の境界条件は，両問題ともに共通であり，以下のように示すことができる．

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\phi_j}{\partial n}=0 &&\text{on } \Gamma_B\\ &\frac{\partial\phi_j}{\partial z}-\frac{\omega^2}{g}\phi_j=0 &&\text{on } \Gamma_F\\ &\lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\left(\frac{\partial\phi_j}{\partial R}-ik_0\phi_j\right)=0 &&\text{on } \Gamma_\infty\end{aligned} \tag{8}$$

$$(j=1,2,3,4,5,6,d)$$

なお，上式でRは原点からの水平距離である．

2－3　流体力

浮体構造物表面に作用する圧力$P(x, y, z, t)$は，線形化されたベルヌーイ方程式によって以下のように表すことができる．

$$P(x,y,z,t)=\mathrm{Re}(i\omega\rho\phi e^{-i\omega t})=\mathrm{Re}\{p(x,y,z)e^{-i\omega t}\} \tag{9}$$

ここで，ρは流体密度である．さらに，(2) 式と (9) 式より，浮体構造物に作用する圧力は，以下のように示すことができる．

$$P(x,y,z,t)=\rho\left\{i\omega(\phi_0+\phi_d)+\omega^2\sum_{j=1}^{6}x_j\phi_j\right\}e^{-i\omega t} \tag{10}$$

この圧力を浮体の没水線に沿って積分することにより，(11) 式に示す浮体に作用するj方向の流体力が導かれる．

$$F_j=F_{0j}+F_{dj}+F_{Rj}=\int_{\Gamma_H}p(x,y,z)n_j d\Gamma e^{-i\omega t} \tag{11}$$

$$F_{Ej}=F_{0j}+F_{dj}=i\omega\rho\int_{\Gamma_H}(\phi_0+\phi_d)n_j d\Gamma e^{-i\omega t} \tag{12}$$

$$F_{Rij}=\omega^2\rho\int_{\Gamma_H}\phi_i n_j d\Gamma e^{-i\omega t} \tag{13}$$

ただし，(12) 式および (13) 式中の記号は，以下のように定義されている．

①F_{0j}：ϕ_0によるもので，浮体の存在によって入射波が乱されないとした時の浮体j方向に作用する波力を示し，Froude-Krylovの力と呼ばれている．

②F_{dj}：ϕ_dによるもので，入射波が浮体によって撹乱されることによって生じる浮体j方向の力で，Diffraction Forceと呼ばれる．

③F_{Ej}：Froude-Krylov力とDiffraction Forceの和であり，波強制力と呼ばれ，固定された浮体に作用する波の力となる．

④F_{Rij}：$\phi_i(i=1, \cdots, 6)$によるもので，浮体がi方向に振動した時に浮体のj方向$(j=1, \cdots, 6)$に作用する力でRadiation流体力と呼ばれる．

また，基本仮定①に基づいて粘性の影響を無視すればRadiation流体力は以下のように表すことができる．

$$F_{Rij}=-M_{aij}\ddot{X}_j-D_{mij}\dot{X}_j \tag{14}$$

上式で，M_{aij}は付加質量係数を，D_{mij}は造波減衰係数を表し，$\ddot{X}_j$および$\dot{X}_j$は浮体のj方向加速度および速度である．(13) 式は，(14) 式を用いることによって (15) 式のように書き直すことができる．

$$F_{Rij}=-\rho\int_{\Gamma_H}\mathrm{Re}[\phi_i]n_j d\Gamma\,\ddot{X}_j+\rho\omega\int_{\Gamma_H}\mathrm{Im}[\phi_i]n_j d\Gamma\,\dot{X}_j \tag{15}$$

2－4　グリーン関数

浮体構造物の形状が複雑な場合には，Radiation問題およびDiffraction問題を理論的に解くことは大変困難である．このため，従来より浮体構造物表面以外の境界条件を満足するグリーン関数を導入し，浮体構造物に関する境界値問題を数値解析的に解いてきた．本報で用いるグリーン関数は，Wehausen & Laition[4] によって誘導された積分表示型および級数表示型であり，以下のとおりである．

$$\begin{aligned}G(P,Q)=&\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\\&+2P.V\int_0^\infty\frac{(\mu+K)e^{-\mu h}\cosh\mu(h+z_P)}{\mu\sinh\mu h-K\cosh\mu h}\\&\times\cosh\mu h(h+z_Q)J_0(\mu R)d\mu\\&+i\frac{2\pi(k_0^2-K^2)}{hk_0^2-hK^2+K}\cosh k_0(h+z_P)\\&\times\cosh k(h+z_Q)J_0(k_0R)\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}G(P,Q)=&i\frac{2\pi(K^2-k_0^2)}{hk_0^2-hK^2+K}\cosh k_0(h+z_P)\\&\times\cosh k_0(h+z_Q)H_0^{(1)}(k_0R)\\&+4\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_n^2+K}{hk_n^2+hK^2-K}\cos k_n(h+z_P)\\&\times\cos k_n(h+z_Q)K_0(k_nR)\end{aligned} \tag{17}$$

上式中の記号については以下のように定義されている．

P　：観測点(x_P, y_P, z_P)
Q　：特異点(x_Q, y_Q, z_Q)
$P.V$：コーシーの主値

$$r_1 = \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2 + (z_P + 2h + z_Q)^2}$$

$K = \dfrac{\omega^2}{g}$ ：深海波数

J_0 ：第1種0次ベッセル関数

$H_0^{(1)}$ ：第1種0次ハンケル関数

K_0 ：第2種0次変形ベッセル関数

k_n ：$k_n \tan k_n h = -\dfrac{\omega^2}{g}$ の実正根 $(0 < k_1 < \cdots < k_n)$

(16) 式および (17) 式で示されるグリーン関数は全く同一のものである．なお，観測点Pと特異点Qが近接している場合には (17) 式の級数表示型では数値解析上の収束が悪くなり，解の精度が著しく低下する．このため，本報では，$k_0R \leqq 0.5$の領域には積分表示型を，$k_0R > 0.5$には級数表示型のグリーン関数を適用した．

2－5　積分方程式

グリーン関数を用いて境界値問題を解く場合には，グリーンの第2定理を一般に利用する．すなわち，

$$\begin{aligned}\iiint_\Omega (\phi_j \nabla^2 G - G\nabla^2 \phi_j) d\Omega &= \iint_{\Gamma_H}\left(\phi_j \frac{\partial G}{\partial n} - G\frac{\partial \phi_j}{\partial n}\right) d\Gamma \\ &+ \iint_{\Gamma_F}\left(\phi_j \frac{\partial G}{\partial z} - G\frac{\partial \phi_j}{\partial z}\right) d\Gamma \\ &+ \iint_{\Gamma_B}\left(\phi_j \frac{\partial G}{\partial n} - G\frac{\partial \phi_j}{\partial n}\right) d\Gamma \\ &+ \lim_{R\to\infty}\iint_{\Gamma_\infty}\left(\phi_j \frac{\partial G}{\partial n} - G\frac{\partial \phi_j}{\partial n}\right) d\Gamma \end{aligned} \tag{18}$$

$(j = 1,2,3,4,5,6,d)$

さらに，境界条件を (18) 式に代入して整理し，観測点Pと特異点Qを用いて書き直すと (19) 式のようになる．

$$-4\pi\phi_j(P) = \iint_{\Gamma_H}\left(\phi_j(Q)\frac{\partial}{\partial n} - \frac{\partial \phi_j(Q)}{\partial n}\right) G(P,Q)\, d\Gamma \tag{19}$$

$(j = 1,2,3,4,5,6,d)$

次に，浮体構造物内部で調和関数となる速度ポテンシャルϕ'を導入する．浮体構造物内部は観測点Pを含まないために，グリーンの定理によって

$$0 = \iint_{\Gamma_H}\left(\phi'_j(Q)\frac{\partial}{\partial n} - \frac{\partial \phi'_j(Q)}{\partial n}\right) G(P,Q)\, d\Gamma \tag{20}$$

$(j = 1,2,3,4,5,6,d)$

が成り立つ．浮体構造物表面上では$\phi_j = \phi'_j$が成立するので，(19) 式および (20) 式より

$$\phi_j(P) = \frac{1}{4\pi}\iint_{\Gamma_H} \sigma_j(Q) G(P,Q)\, d\Gamma \tag{21}$$

$(j = 1,2,3,4,5,6,d)$

が誘導される．上式で，$\sigma_j(Q) = \left(\dfrac{\partial \phi_j}{\partial n} - \dfrac{\partial \phi'_j}{\partial n}\right)$ は物体表面上の1重層（ソース）の面密度である．さらに，P点に関する法線方向微分を取れば，

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n_P}(P) = \frac{1}{4\pi}\iint_{\Gamma_H} \sigma_j(Q)\frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_P}\, d\Gamma \tag{22}$$

$(j = 1,2,3,4,5,6,d)$

となる．なお，(22) 式の左辺は浮体構造物表面上の境界条件より既知量として与えられる．また，観測点Pを物体表面上の特異点Qに限りなく近づけると，1重層ポテンシャルの導関数に関する定理より，

$$\begin{aligned}\frac{\partial \phi_j}{\partial n_P}(P) &= -2\pi\sigma_j(P)\delta(P-Q) \\ &+ \frac{1}{4\pi}\iint_{\Gamma_H} \sigma_j(Q)\frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_P}\, d\Gamma\end{aligned} \tag{23}$$

$(j = 1,2,3,4,5,6,d)$

となる．(23) 式は第2種Fredholm型の積分方程式であり，$P=Q$の時だけ右辺第1項が付加される．なお，上式での未知数は面密度σ_jである．したがって，(23) 式の数値解析によって面密度σ_jが求まれば，その値を (21) 式に代入することによって，速度ポテンシャルも計算できる．なお，数値解析を実施するに際しては，Papanikolaou,A[5] の離散化手法を用いた．

2－6　自由浮体の波浪応答解析

周波数領域における自由浮体の運動方程式は，質量係数マトリックス $[M]$，付加質量係数マトリックス $[M_a]$，造波減衰係数マトリックス $[D_m]$，復原力係数マトリックス $[B]$，浮体変位ベクトル $\{X\}$ および波強制力ベクトル $\{F\}$ を用い以下のように表すことができる

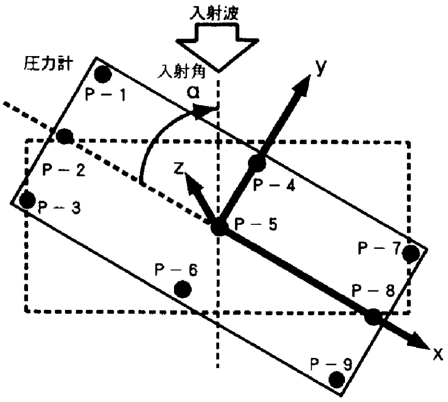
$$\left\{-\omega^2([M]+[M_a]) + i\omega[D_m] + [B]\right\}\{X\} = \{F\} \tag{24}$$

(24) 式中の $[M_a]$ および $[D_m]$ はRadiation問題として，前述した数値解析法を用いて算出される．また，$[B]$ は浮体のメタセンター高さや排水量が既知となれば求まるマトリックスである．

§3.波強制力実験

3－1　実験条件および計測方法

波強制力に関する実験は，西松建設（株）技術研究所



図－2　波強制力実験の概念図

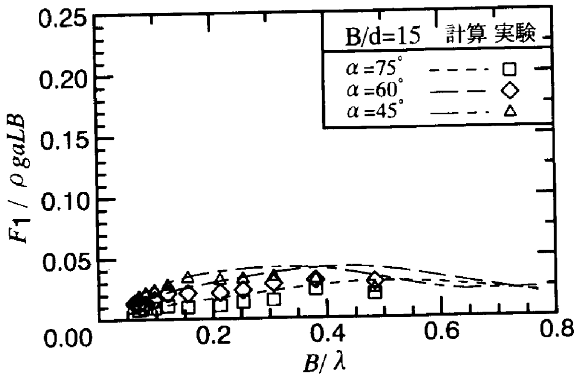
表－1　実験条件および浮体模型の諸元

		実　機		模型(1/100)	
浮体幅　(m)	B	30.0		0.3	
浮体長さ　(m)	L	67.5		0.675	
浮体高さ　(m)	H	10.0		0.1	
浮体吃水　(m)	d	2.0	5.0	0.02	0.05
浮体質量　(kg)	M	4.0×10^6	1.0×10^7	4.050	10.125
横揺れ慣性モーメント (kgm)	I_x	3.3×10^7	5.1×10^7	0.329	0.511
縦揺れ慣性モーメント (kgm)	I_y	1.2×10^7	7.2×10^6	0.121	0.072
浮体重心高さ　(m)	KG	5.6	6.5	0.056	0.065
前後揺れメタセンター (m)	Gm_x	193.0	71.6	1.930	0.716
左右揺れメタセンター (m)	Gm_y	29.6	9.3	0.296	0.093
水深　(m)	h	100.0		1.0	
入射波波振幅　(m)	a	1.5 ～ 2.5		0.015, 0.025	
波周期　(sec)		6.0～19.0		0.60 ～ 1.90	
波入射角　(°)	α	0, 15, 30, 45			
波浪条件		規則波			

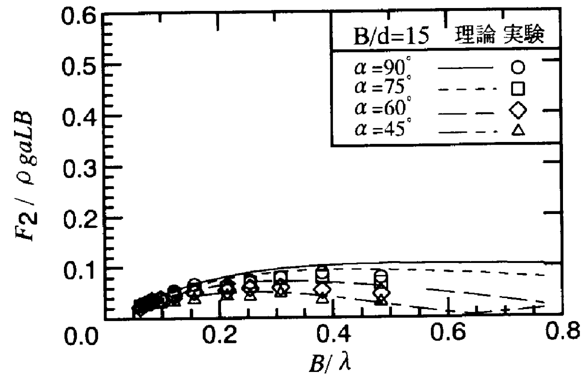
所有の平面水槽（長さ×幅×水深＝25m×18m×1.5m）を用いて実施された．波周期，波入射角αおよび浮体吃水dを実験パラメーターとして変化させるとともに，固定した単体の浮体ユニットに規則波を入射させて，浮体に作用する波強制力と浮体底面での圧力を計測した．**図－2**に実験概念図を，**表－1**に実験条件を示す．なお，**表－1**には，§5で後述する自由浮体の波浪応答解析で必要となる浮体重心等の諸元も併記した．

3－2　実験結果および考察

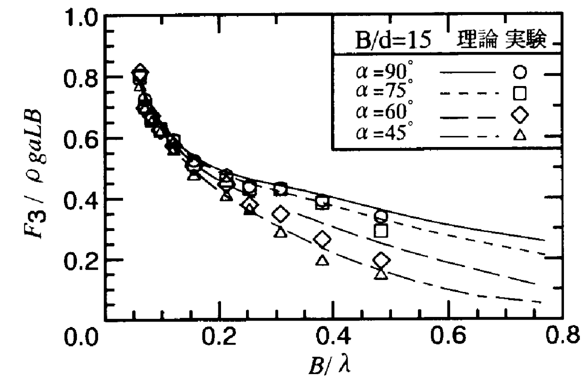
図－3，**図－4**および**図－5**は，それぞれB/d＝15（吃水0.02m），波振幅a＝0.015mとし，波の入射角αを90°，75°，60°および45°と変化させた場合のx軸，y軸およびz軸方向の波強制力に関する実験結果を示している．これらの図では，縦軸に無次元化した波強制力が，横軸に波周波数を表す無次元波数B/λが採用されている．ここで，Bは浮体幅（m），ρは流体密度（N/m），gは重力加速度（m/s^2），Lは浮体長さ（m），aは波振幅（m）およびλ



図－3　x軸方向波強制力 (B/d＝15)



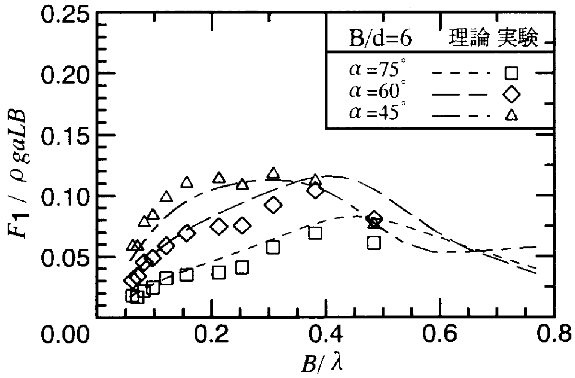
図－4　y軸方向波強制力 (B/d＝15)



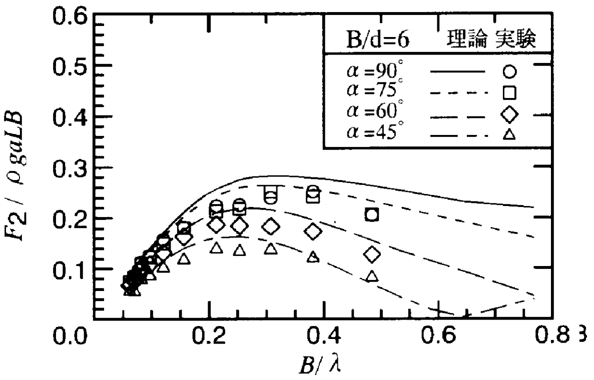
図－5　z軸方向波強制力 (B/d＝15)

は波長（m）である．図中の4個のシンボルおよび4種類のラインは，それぞれ波の入射角αが90°，75°，60°および45°の場合の実験結果並びに3次元特異点分布法による計算結果を示している．

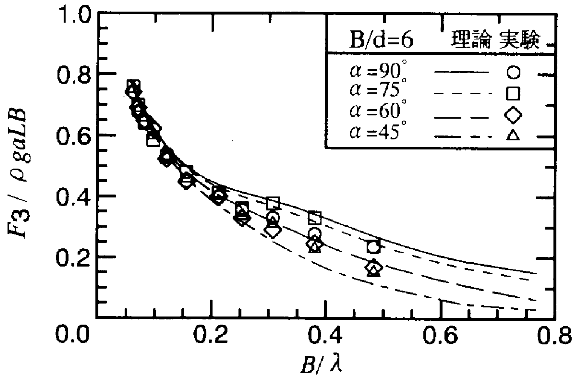
波の入射角αが90°から45°まで減少するに従い，y軸方向の波強制力が小さくなることが**図－4**から読み取れる．一方，**図－3**からは波の入射角αの減少に伴ってx軸方向の波強制力が増加することが確認される．これは，α＝90°の時にy軸方向だけに作用している波強制力が入射角αの減少に伴ってx軸方向にも分配されるためである．また，z軸方向の波強制力の結果から，B/λが小さ



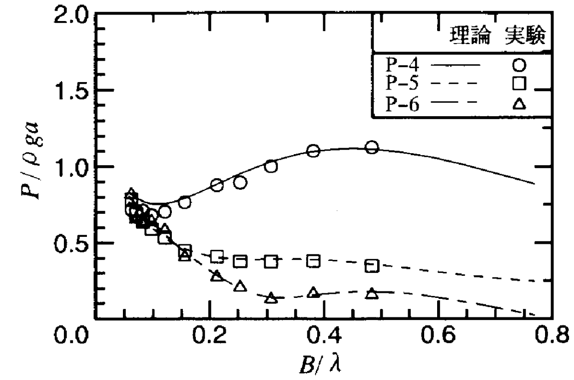
図－6　x軸方向波強制力 (B/d=6)



図－7　y軸方向波強制力 (B/d=6)



図－8　z軸方向波強制力 (B/d=6)



図－9　圧力(B/d=15, α=90°)

い領域（長周期側）では，入射角αに関係なく波強制力がほぼ一定値であることが分かる．一方，B/λの大きな短周期側では，αの減少とともにz軸方向の波強制力が小さくなる傾向も読み取れる．

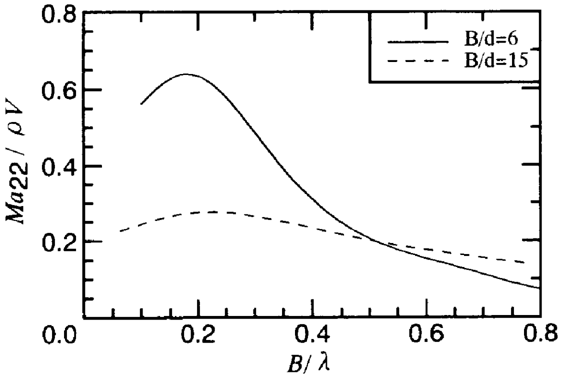
次に，波振幅（a=0.015m）を一定として吃水dをB/d=15（0.02m）からB/d=6（0.05m）に変化させた時の波強制力を**図－6**～**図－8**に示す．**図－6**および**図－7**から，x軸およびy軸方向の波強制力の大きさは，B/d=15の実験結果よりも倍増していることが分かる．すなわち，x軸およびy軸方向の波強制力は，吃水変化の影響を直接的に受けやすい特性を有している．一方，z軸方向の波強制力は，B/d=15の場合の実験結果とほとんど変化がなく，吃水の変化に依存しないことがわかる．

図－9は，波の入射角α=90°、B/d=15（吃水0.02m）の場合の浮体底面中央部に作用する圧力（P-4～P-6）の実験結果を数値解析の結果と一緒に示したものである．縦軸には無次元化した単位面積当たりに作用する圧力が，横軸には波周波数に対応する無次元波数B/λが採用されている．図中の○，□および△は各計測点での実験結果を示している．さらに，図中の実線，破線および一点鎖線は，P-4，P-5およびP-6における3次元特異点分布法による計算結果である．計測された圧力は，B/λの小さい領域（長周期側）で3者ともほぼ同一の値となっているものの，B/λが大きくなる（短周期側）に従って波入射側の圧力（P-4）と波透過側の圧力（P-6）の差が増大していく傾向も読み取れる．これは，浮体に入射する波の周期が小さくなるほど，浮体前面（P-4側）から浮体背面（P-6側）に伝播する波の比率（透過率）が小さくなるために生じたものと解釈される．さらに，3次元特異点分布法を用いて計算された圧力は，実験結果をよく再現していることも分かる．

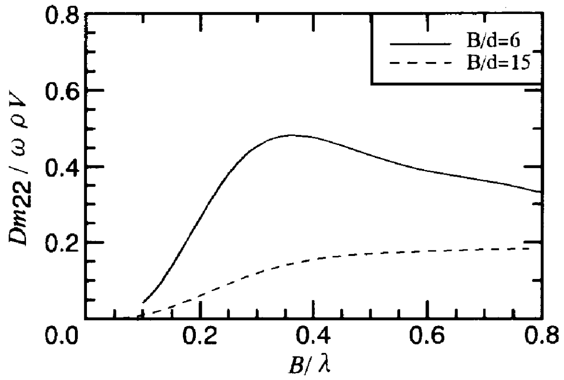
以上のことをまとめれば，波強制力および圧力の数値解析結果は，実験値をよく再現しており，ここで開発した3次元特異点分布法による波強制力解析プログラムの有効性が確認できた．なお，本解析プログラムは，波強制力ばかりではなく Radiation 流体力も算定できるため，浮体構造物に作用する波浪外力をすべて算定できることになる．これによって，浮体形状や設置水深など設計条件が変更されても，ここで開発したプログラムを用いることによって波浪外力を予測することが可能である．

§4．Radiation 流体力特性

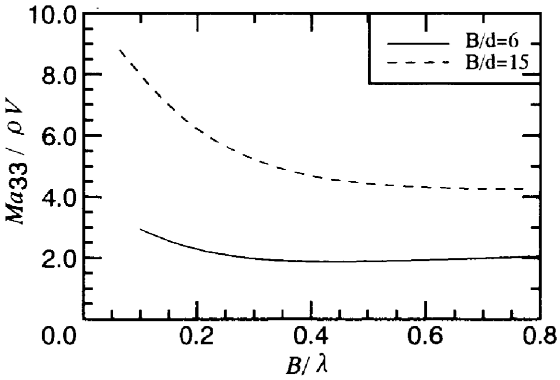
浮体吃水をパラメーターとして，波強制力実験で用い



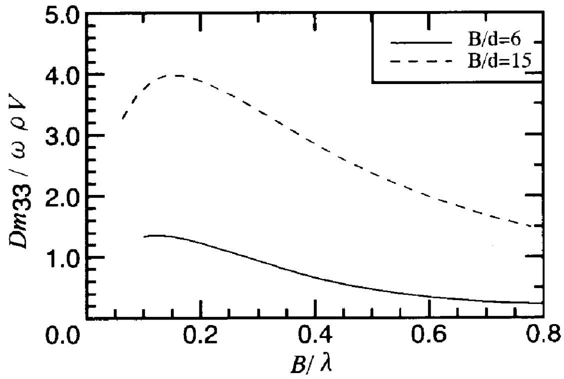
図—10　左右揺れ付加質量係数



図—12　左右揺れ造波減衰係数



図—11　上下揺れ付加質量係数



図—13　上下揺れ造波減衰係数

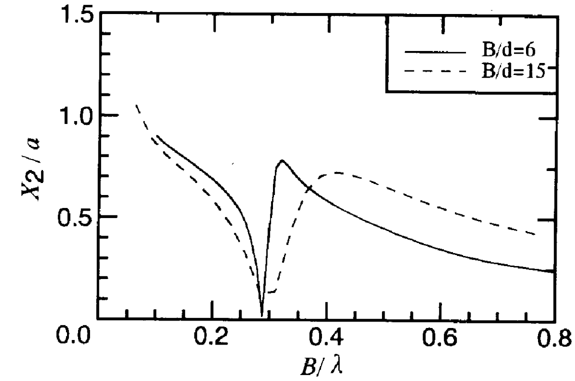
た模型に作用するRadiation 流体力の特性について数値解析より検討した．(14) 式で示したように，Radiation 流体力は（付加質量係数×加速度）並びに（造波減衰係数×速度）の項から構成されている．ここでは，それらの流体力係数と波周期との関係について考察した．すなわち，**図—10**および**図—11**に左右揺れおよび上下揺れの付加質量係数を，**図—12**および**図—13**に左右揺れおよび上下揺れの造波減衰係数の計算結果を示す．これらの図では，縦軸に無次元化した付加質量係数および造波減衰係数が，横軸には波周波数を表す無次元波数B/λが採用されている．ここで，V $(=BLd)$ は浮体没水体積 (m^3) およびωは円周波数 (s^{-1}) である．さらに，図中の実線および破線はそれぞれ$B/d=6$および$B/d=15$の計算結果を示している．なお，図中の結果において$B/d=15$の無次元値が$B/d=6$の無次元値の2.5倍の時に両者の有次元値は等しい．

図—10および**図—12**にそれぞれ示される左右揺れの付加質量係数および造波減衰係数は，両図とも有次元値において吃水の大きい$B/d=6$が$B/d=15$よりも大きな値となっていることがわかる．これは，波強制力と同様に，受圧面の大きい吃水$B/d=6$でRadiation 流体力が大きく作用することを示唆している．また，B/λが0.35より小さな領域での左右揺れの造波減衰係数は，B/λの減少とともに急激に小さくなっている（**図—12**参照）．このことは，長周期の浮体動揺では水粒子の撹乱度が小さく，そのために造波減衰も小さくなるものと解釈される．

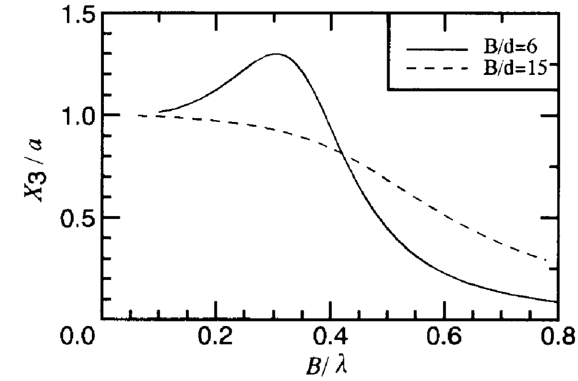
図—11に示す上下揺れの付加質量係数では，B/λの値に関係なく$B/d=15$の値が$B/d=6$の場合の約2.5倍の値となっていることが確認できる．すなわち，両者の有次元値は波の周期に関係なく，ほぼ同一の値となっている．さらに，**図—13**に示す上下揺れの造波減衰係数では，浅吃水である$B/d=15$の方が$B/d=6$の結果よりも大きくなっている．これは，浮体動揺に伴って生じる水粒子の撹乱が，浅吃水ほど短時間に水表面へ到達し，四方に伝播しやすいために，発散波のエネルギーすなわち造波減衰が大きくなっているものと考えられる．

§5.自由浮体の波浪応答特性

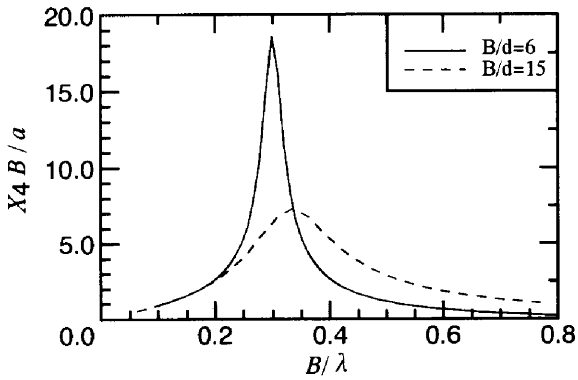
§3および§4と同様の解析モデルを用いて自由浮体の波浪応答特性について数値シミュレーションを行った．その結果を，**図—14**から**図—16**に示す．これらは，すべて波入射角$\alpha=90°$での計算結果であり，縦軸に無次元化した各方向の応答変位を，横軸に無次元波数B/λが採用さ



図−14　左右揺れ応答変位



図−15　上下揺れ応答変位



図−16　横揺れ応答変位

れている．また，図中の実線および破線はそれぞれ，B/d=6およびB/d=15の計算結果を示している．

図−16に示す横揺れ応答変位では，B/λ=0.28の付近に極大値が存在する．これは，横揺れの固有周期と判断される．一方，B/λ=0.28の近傍に認められる左右揺れ応答変位の極小値は，横揺れの共振による影響と考えられる．また，左右揺れの固有周期が存在していないことも**図−14**より確認される．これは，自由浮体であるために左右揺れ方向の復原力が理論的に存在しないためである．さらに，上下揺れ応答変位（**図−15**参照）からは，B/d=6で固有周期がB/λ=0.35付近に存在していることが認められる．一方，B/d=15の結果からは固有周期の存在を判別することができない．これは，既に**図−13**でも説明したように，上下揺れの造波減衰係数がB/d=15で非常に大きいことに起因するものと考えられる．

§6.　おわりに

本報では，3次元特異点分布法を用いた任意形状浮体の波浪応答解析プログラムを開発できた．さらに，浅吃水の矩形浮体構造物を対象とした波強制力実験を行い，得られた実験結果と数値解析結果との比較からここで開発した波浪応答解析プログラムの妥当性を確認することができた．特に，本解析プログラムより計算することができる圧力分布については，浮体構造物の詳細設計に際して，有用な技術資料になるものと予想される．また，本解析プログラムを適用した数値シミュレーションの結果から，矩形浮体模型に作用するRadiation流体力の基本特性並びに自由浮体の波浪応答に関する基本特性についても明らかにすることができた．

最後に，3次元特異点分布法については，日本大学理工学部教授増田光一先生を中心とする研究グループによって開発されたアルゴリズムやサブルーチン等を一部利用させて頂いた．ここに記し，感謝申し上げます．また，波強制力の水理実験で模型を提供して頂いたゼニヤ海洋サービス（株）に謝意を表します．

参考文献

1) 例えば（財）沿岸開発技術研究センター,マリンフロート推進機構：大規模浮体構造物の研究報告書, 1994.
2) 例えば運輸省,（社）経済団体連合会海洋開発推進委員会,（社）鋼材倶楽部：新しい国土の創造-沖合人工島に関する調査報告書（X）, pp130～206, 1990.
3) 例えば大迫健一,金井重夫：浮体方式による洋上終末処理場の建設,建設の機械化'89.9, pp24～30, 1989.
4) J. V. Wehausen, E. V. Laitons : "Surface Waves", Encyclopedia of Physics, vol, 4 Springer, verlag, Berlin, 1960.
5) Papanikolaou,A. : On Alternative Methods for the Evaluation of Green's Function of a Pulsating Three-Dimensional Source for Arbitrary Water Depth and Frequency of Oscillation. Techn. Univ. Berlin, TUB/ISM Rep. No. 83/17, 1983.