

大型海洋構造物の動揺解析システムについて

旭置 武志 国栖 広志
関本 恒浩

要 旨

港湾工事の施工時ならびに港湾完成後の荷役作業の安全性を確保するとともに、効率化をはかるためには、施工時の海洋構造物・作業船の流体力・動揺特性ならびに係留船舶の挙動特性等を把握することはきわめて重要である。

本報は、当社の保有の動揺解析システムについて概要を説明するとともに、システムの妥当性を検討するため実施した、他の計算方法との比較・検討結果ならびに実際問題への適用事例についてまとめたものである。

1. はじめに

近年、沿岸部は過密に利用され、より大水深域で、海洋構造物や人工島などが建設されるようになった。これに伴い海上での作業は波浪条件のより厳しい環境で行われるようになり、作業の安全性や効率化を図る上で、施工時の海洋構造物や作業船に対する流体力や動揺特性を把握する必要がある。また港湾計画においても荷役作業の効率化を図る上で、港内における静穏度のみならず、係留船舶の動揺特性についても把握することが、利用目的を満足するかどうかを確認する上で必要である。

そこで、当社の保有の海洋構造物に対する動揺解析プログラムについて、以下にこのシステムの概要を説明するとともに、このシステムの妥当性を検討した結果や実際問題への適用事例について簡単に説明する。

2. システムの機能と概要

2.1 システムの機能

本システムの解析対象は、図-1に示すように、係留時及び曳航時の浮体に働く流体力・波力および動揺特性の解析ならびに着底式構造物に働く波力と地震時の流体力の解析である。

本解析システムは、三次元特異点分布法により構造物が単体の場合及び複数体の場合の流体力および波力を求め、これを用いて運動方程式から動揺特性を求めるものである。

解析の対象とする自然条件は、波、風、潮流であり、構造物としては、自由浮体、係留浮体、着底式構造物を扱うことができる。

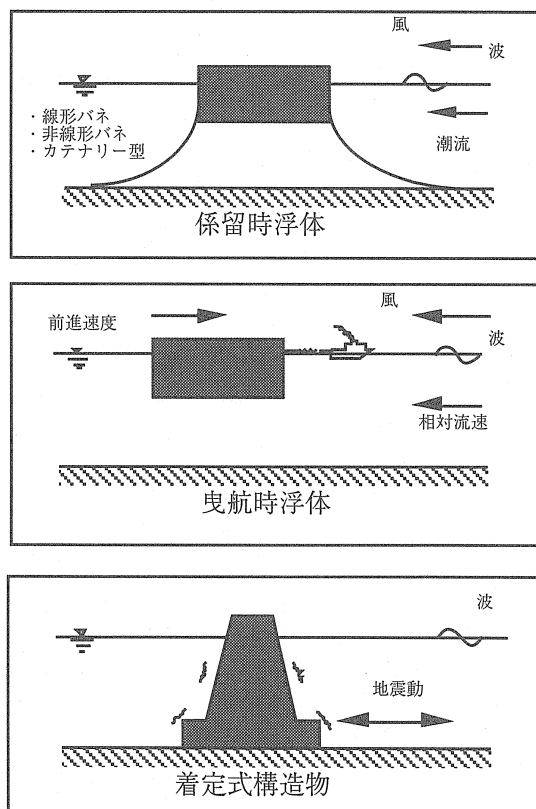


図-1 動揺解析の対象条件

このシステムの主な仮定と機能については、以下の通りである。

- ・波の理論としては微小振幅波理論を仮定する。
- ・海洋構造物は、剛体と考えて動揺を解くものとする。
- ・波力、風加重については、不規則外力として取り扱える。

- ・風加重や潮流力については抗力係数を用いて、高さ方向、深さ方向の分布を考慮して力が求められる。
 - ・係留の種類については、線形バネ、カタナリーバネ、非線形バネ(3方向を考慮可)のモデルについて取り扱える。
 - ・岸壁前面に係留する場合は、岸壁前面からの反射波を考慮して解析を行うことが可能である。
 - ・浮体の運動は、規則波に対する定常解(周期解)と不規則波に対する時系列シミュレーションによる取り扱いが可能である。
 - ・曳航時の流体力、波力の解析が可能である。
 - ・地震時の流体力の解析が可能である。
- ここで機能の一覧を表-1に示す。

表-1 機能一覧

構造形	解析項目	機能	適用
浮遊式構造物	流体力・波力	規則波	微小振幅波理論により、3次元特異点分布法を用いて算定する。
		不規則波	規則波線形重ね合わせ。ワースベクトルとしてBretschneider・光易、ISSC、ITTC、Pierson・Moskowitz及び任意のスペクトルが与えられる。
		曳航時	前進速度を考慮したGreen関数を用いる。
	風加重	定常風	海面上の高さ方向の速度成分を考慮する。
		変動風	変動風のワースベクトルとしてはDavenport、日野のスペクトルを用いる。
	潮流力	定常流	深さ方向の流速分布を考慮する。
	係留力	線形バネ	合計20本まで考慮できる。
		カタナリー型バネ	
		非線形バネ	
	動揺解析	周波数応答(周期解)	粘性減衰係数を考慮し、非線形方程式を解く。
時系列シミュレーション			
波圧・動水圧	規則波		
着定式構造物	波力	規則波	微小振幅波理論により、3次元特異点分布法を用いて算定する。
	流体力	地震時	地震時のGreen関数を用いる。
	波圧	規則波	
	動水圧	地震時	

2.2 システムの概要

プログラム全体のシステムフローは図-2に示す通りである。

2.3 計算に用いる座標系

このシステムに使われている座標系を図-3に示す。ここで、 $z=0$ のとき静水面を、 $z<0$ が水面下を示している。 H_i は動揺振幅(6モード)を表しており、

- H_1 : Surge 振幅 (m)
- H_2 : Sway 振幅 (m)
- H_3 : Heave 振幅 (m)

- H_4 : Roll 回転振幅 (度)
- H_5 : Pitch 回転振幅 (度)
- H_6 : Yaw 回転振幅 (度)
- α_i : 上記 H_i の位相のずれ (度)

を示す。構造物の動揺は、 $H_i \cdot \cos(-\omega t + \alpha_i)$ (ただし、 $i = 1 \sim 6$ 、 $\omega = 2\pi/T$ 、 $T =$ 波周期) で表される。

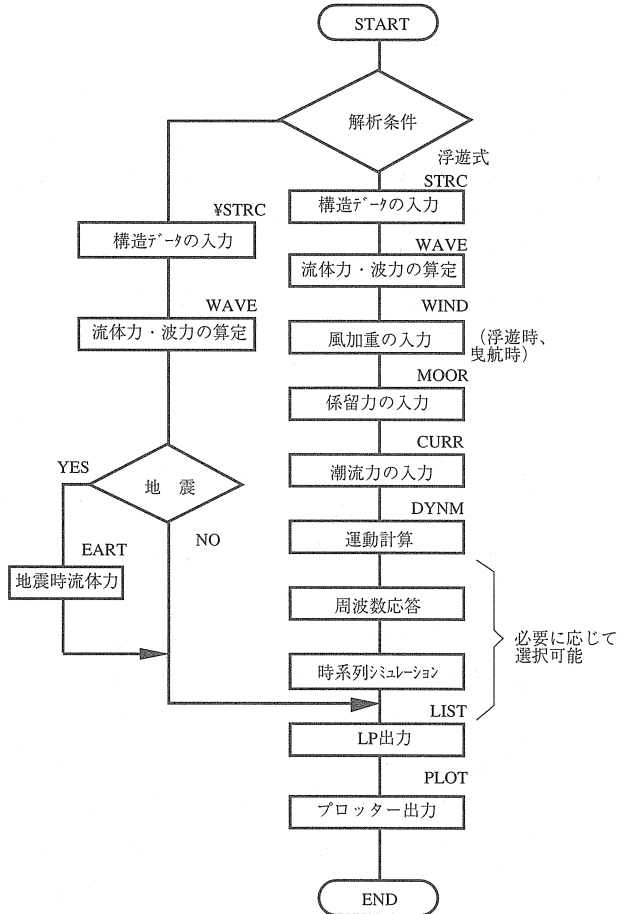


図-2 動揺解析システムフロー図

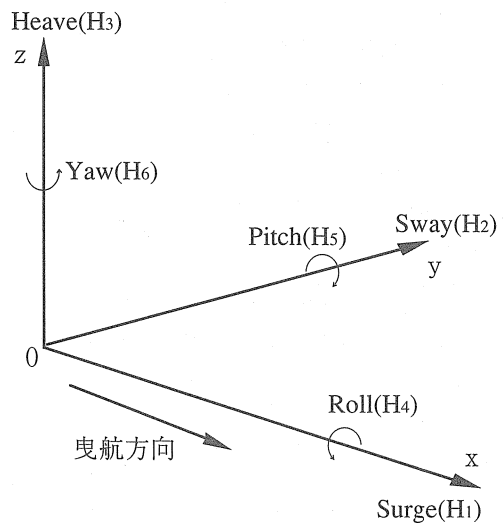


図-3 システムの座標系

2.4 システムの適用限界

解析システムの理論適用範囲は図-4 に示す記号より、

$$0 < 2\pi a / L < 4 \quad (2.1)$$

となる。

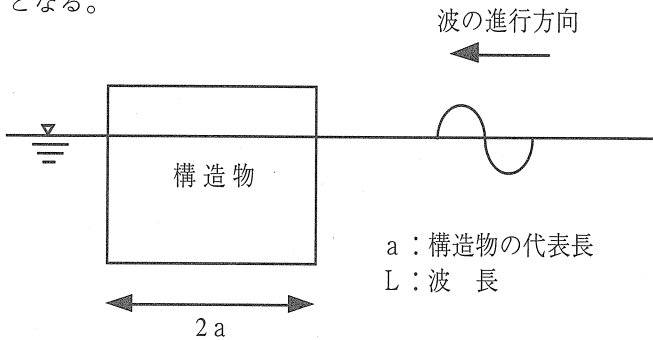


図-4 システムの適用限界

3. 流体力と波力の算定

3.1 三次元特異点分布法

三次元特異点分布法は、流体中の物体表面を要素分割して Green 関数を用いて要素内のわき出しを計算することにより、流れ場の速度ポテンシャルを求め、この速度ポテンシャルから物体表面の圧力を計算し、流体力・波力を求めるものである。

Green 関数は基礎式と境界条件から導かれる。

$$\Phi_j(x,y,z;t) = \phi_j(x,y,z) e^{-i\omega t} \quad (3.1)$$

$$\Phi(x,y,z;t) = \phi_0 e^{-i\omega t} + \sum_{j=1}^7 \phi_j e^{-i\omega t} \quad j=0 \sim 7 \quad (3.2)$$

ここに、

Φ_0 : 入射波の速度ポテンシャル、

$\Phi_1 \sim \Phi_6$: 物体を強制動揺させた時の6モードの速度ポテンシャル (radiation Potential)、

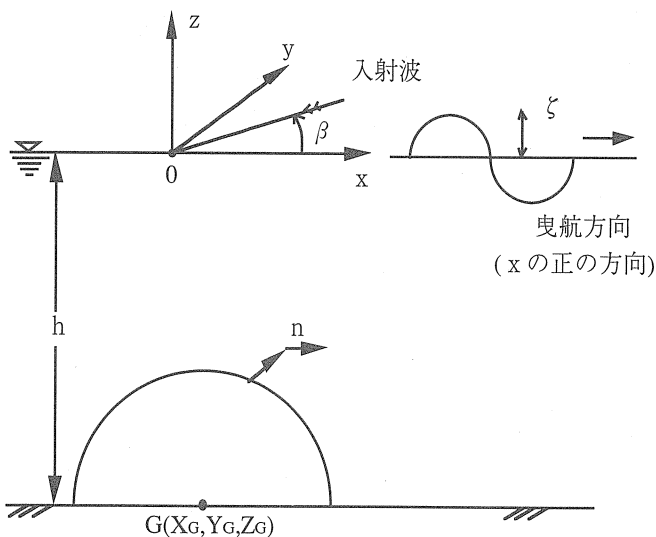


図-5 座標系と波の入射方向

Φ_7 : 散乱波の速度ポテンシャル (diffraction Potential)、

$\phi_0 \sim \phi_7$: 速度ポテンシャルの振幅、

Φ : 全速度ポテンシャルである。

ここで、式中使用されている記号は、

i : 虚数単位 ($=\sqrt{-1}$)、 j : 物体の6方向の動揺モード ($j=1 \sim 6$) でそれぞれ

$j=1$ Surge (x 軸方向) $j=4$ Roll (x 軸回り)

2 Sway (y 軸方向) 5 Pitch (y 軸回り)

3 Heave (y 軸方向) 6 Yaw (y 軸回り)

を示す。なお、回転運動に対しては軸方向右回りを正とする。

$G(x_G, y_G, z_G)$: 重心点 (回転運動の中心)、 ω : 波周波数 (rad/s)、 ω_4 : 波の出合い周波数 (rad/s) ($=\omega + (\omega^2/g)u_0 \cos \beta$)、 β : 入射方向、 u_0 : 前進速度、 ζ : 入射波振幅、 g : 重力加速度、 h : 水深、 k : 波数 ($\omega^2 = gk \tanh kh$ を満足する)、 X : (x, y)、 β : ($\cos \beta, \sin \beta$) をそれぞれ示している。

速度ポテンシャルの時間成分は $e^{-i\omega t}$ なので、以後振幅 $\phi_0 \sim \phi_7$ について考える。

ただし、曳航時には、

$$\Phi_j(x,y,z;t) = \phi_j(x,y,z) e^{-i\omega_4 t} \quad (3.3)$$

となる。

曳航時の物体のまわりのポテンシャルは次のようになる。

$$\Phi(x,y,z;t) = -u_0(x + \phi_8) + \phi_0 e^{-i\omega_4 t} + \sum_{j=1}^7 \phi_j e^{-i\omega_4 t} \quad (3.4)$$

ただし、

$-u_0 x$: 前進速度による定常流れの速度ポテンシャル、

$-u_0 \phi_8$: $-u_0 x$ により引き起こされた定常散乱速度ポテンシャル、

ϕ_0 : 物体からみた入射波の速度ポテンシャルの振幅、

$\phi_1 \sim \phi_6$: 一様流れ中で強制動揺させた時の6モードの速度ポテンシャル (Radiation Potential) の振幅である。

しかし、 $-u_0(x + \phi_8)$ の速度ポテンシャルは時間に対して一定なので、物体表面で圧力積分を行ったときゼロとなる。したがって、物体に働く力を算定するときは、考慮しなくてもよい。

入射波の速度ポテンシャルは、既知で次のように表される。

$h < \infty$ 有限水深の時

$$\phi_0 = \frac{-i g \eta}{\omega} \frac{\cos[k(z+h)]}{\cosh kh} e^{-ikx \cdot \beta} \quad (3.5)$$

$h = \infty$ の時

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh kh} = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{e^{k(z+h)} + e^{-k(z+h)}}{e^{kh} + e^{-kh}} = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{e^{k(z+h)}}{e^{kh}} = e^{kz} \quad (3.6)$$

ただし、 $k = \omega^2/g$

$$\phi_0 = \frac{-ig\eta}{\omega} e^{kz} e^{-ikx \cdot \beta} \quad (3.7)$$

したがって、 $\phi_1 \sim \phi_7$ を求めることにする。
次に $\phi_1 \sim \phi_7$ が満足すべき基礎式と境界条件を示す。
曳航時については、入射波の速度ポテンシャルは次のようになる。

$$\phi_0 = \frac{-ig\eta}{\omega_4} e^{kz} e^{-ikx \cdot \beta} \quad (3.8)$$

3.2 基礎式と境界条件

ここでは、有限水深・前進速度無しの場合の基礎式と境界条件を述べる。

$$\Delta \phi_j(x, y, z) = 0 \quad (j=1 \sim 7) \quad \text{ラプラス方程式} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \phi_j(x, y, 0) - \frac{\omega^2}{g} \phi_j(x, y, 0) = 0 \quad \text{自由表面の条件} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \phi_j(x, y, -h) = 0 \quad \text{水底の条件} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \phi_j(x, y, z) = v_j(x, y, z) \quad \text{物体表面の条件} \quad (3.12)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \phi_j(r, \theta, z) - ik \phi_j(r, \theta, z) \right\} = 0 \quad \text{放射条件} \quad (3.13)$$

次に、物体表面の境界条件は流速 v_j で与えられる。 v_j は複素流速であり、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} v_1 &= -i\omega X_1^0 n_x \\ v_2 &= -i\omega X_2^0 n_y \\ v_3 &= -i\omega X_3^0 n_z \\ v_4 &= -i\omega X_4^0 [(y-y_G)n_z - (z-z_G)n_y] \\ v_5 &= -i\omega X_5^0 [(z-z_G)n_x - (x-x_G)n_z] \\ v_6 &= -i\omega X_6^0 [(x-x_G)n_y - (y-y_G)n_x] \\ v_7 &= -\frac{\partial}{\partial n} \phi_0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

ただし、 X_j^0 は j -mode 強制動揺の振幅とする。

式 (3.14) 中の境界条件式を満足する Green 関数を G 、物体表面のわき出し (source) 強さを σ とする。

ここで、

- $P = (x, y, z)$: 流体中の任意点 P (field point)
- $Q = (\xi, \eta, \zeta)$: わき出し点 Q (source point)
- $\sigma(Q)$: わき出し強さ

$G(P, Q)$: Green 関数

S_0 : 物体表面

とすると、 Q 点で強さ $\sigma(Q)$ のわき出しがあるとき、 P 点のポテンシャルは次式で与えられる。

$$\phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{Q \in S_0} \sigma(Q) G(P, Q) ds \quad (3.15)$$

$\sigma(Q)$ は未知量で、物体表面の境界条件を満足するように求める。式 (3.15) の両辺を $\partial/\partial n$ で微分すると、 $\sigma(Q)$ に関する積分方程式となる。

$$\frac{\partial \phi(P)}{\partial n} = \frac{\sigma(P)}{2} + \frac{1}{4\pi} \int_{Q \in S_0} \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \quad (3.16)$$

ここに、 $\partial/\partial n$: P 点での法線方向微分、 ds : Q に関する面積分である。

これに式 (3.14) 中の境界条件を代入し整理する。このとき P 点は S_0 上の点と考える。

$$\sigma(P) = -2v_j(P) + \frac{1}{2\pi} \int_{Q \in S_0} \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \quad (3.17)$$

式 (3.17) はわき出し σ に関する積分方程式となり、これを解いて式 (3.15) に σ を代入すれば、液体中任意点のポテンシャルを求めることができる。

4. 動水圧解析

4.1 流体力・波力・圧力の算定

流体中に存在する構造物には、波の作用による力 (波圧) と構造物が動揺した時に流体から受ける力 (動水圧) が働く。

波力は、波圧を構造物表面で積分することにより求めることができる。波圧を求める時は、構造物が動かないものとして入射波の散乱波を求める (diffraction problem)。そして、入射波と散乱波の和のポテンシャルから圧力を求める。

動水圧は、運動方程式を解く都合上、付加質量と減衰係数として用いることが多い (radiation problem)。

構造物の動揺は 6 モードの重心点回りの自由度として考える。以下、動揺は i, j というサフィックスで表すものとする。

ポテンシャルは、振幅、時間成分を分けて複素数で表すと、

$$\Phi_j(x, y, z, t) = \phi_j(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (4.1)$$

$$\phi_j = |\Phi_j| \quad (4.2)$$

ここに、

ω : 波の周波数、

t : 時刻、

j : j=0 は入射波のポテンシャル、j=7 は散乱波のポテンシャル、j=1~6 は動揺によるポテンシャル、となる。従って、規則波が入射した状態での自由浮体周りの流れ場でのポテンシャルは

$$\Phi = \sum_{j=0}^7 \Phi_j = \left(\sum_{j=0}^7 \phi_j \right) e^{-i\omega t} \quad (4.3)$$

となる。

着定式の場合には (動揺はないと仮定すると)、

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_7 = (\phi_0 + \phi_7) e^{-i\omega t} \quad (4.4)$$

となる。ただし、 Φ_0 、 Φ_7 は単位振幅入射波に対するポテンシャル、 $\Phi_1 \sim \Phi_6$ は単位振幅動揺に対するポテンシャルをそれぞれ表している。

4.2 圧力

ポテンシャルから圧力を求めるには、線形を仮定すれば次のようになる。

$$\begin{aligned} P(t) &= \rho \operatorname{Re} \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) = \rho \operatorname{Re} (-i\omega \phi e^{-i\omega t}) \\ &= \operatorname{Re} (i\rho\omega \bar{\phi} e^{-i\alpha} e^{i\omega t}) = \operatorname{Re} (i\rho\omega \bar{\phi} e^{i\alpha} e^{i\omega t}) \\ &= \rho\omega \bar{\phi} \operatorname{Re} (e^{i\alpha+i\frac{\pi}{2}-i\omega t}) = \rho\omega \bar{\phi} \cos(-\omega t + \beta) \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここに、Re は real part、 $\phi = \bar{\phi} e^{i\alpha}$ 、 α : ポテンシャルの位相のずれ、 $\beta = \alpha + \pi/2$: 圧力の位相ずれ、 ρ : 水の単位体積重量をそれぞれ意味する。

$e^{-i\omega t}$ を除いて求めると、次のようになる。

$$\rho\omega \bar{\phi} = |-\rho(-i\omega)\phi| = |\rho\omega \phi| \quad (4.6)$$

$$\beta = \arg(i\rho\omega \phi) \quad (4.7)$$

を複素圧力の振幅とも呼ぶ。

4.3 波圧と波力

ここで、波圧とは、入射波と散乱波によって引き起こされる構造物表面の圧力のことをいう。従って、ポテンシャルとしては、

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_7 \quad (4.8)$$

を考える。規則波のみを考えると、系全体は、 $e^{-i\omega t}$ という時間成分を共通にもっているため、振幅についてのみ考える。

j-mode の複素波力 F_{Ej} は、運動モードを考慮して波圧を物体表面で積分したものである。

$$F_{Ej} = - \int_S P \cdot g_j \, ds = - \sum_E P(E) \cdot g_j(E) \quad (4.9)$$

$$P(E) = i\rho \omega \phi(E) \quad (4.10)$$

ただし、 $P(E)$ は要素 E の波力であり、 g_j はそれぞれ、

$$\begin{aligned} g_1 &= n_x \\ g_2 &= n_y \\ g_3 &= n_z \\ g_4 &= (y-y_G) n_z - (z-z_G) n_y \\ g_5 &= (z-z_G) n_x - (x-x_G) n_z \\ g_6 &= (x-x_G) n_y - (y-y_G) n_x \end{aligned} \quad (4.11)$$

ここに、 (n_x, n_y, n_z) は要素 E の外向法線ベクトル、 (x, y, z) は要素 E の中心の座標、 (x_G, y_G, z_G) は構造物の重心座標、である。したがって、 F_{Ej} は次式のように表される。

$$F_{Ej} = (-i\rho\omega) \sum_E \phi(E) g_j(E) \quad (4.12)$$

ここで、波力は $|F_{Ej}| = F_j$ 、位相のずれは $\arg(F_{Ej}) = \beta$ 、時間成分を考慮すると波力は、 $F_j \cos(-\omega t + \beta)$ と表される。

4.4 流体力 (付加質量と (造波) 減衰係数)

構造物が動揺するときの動水圧は運動方程式を解く都合上、付加質量と減衰係数に分解して考える。

$$\begin{aligned} F_{Ej} &= - \int_S X_j^0 P_j \cdot g_i \, ds e^{-i\omega t} \\ &= - \sum_E X_j^0 P_j(E) \cdot g_i(E) \cdot e^{-i\omega t} \\ &= (-i\rho\omega) \sum_E \phi_j(E) \cdot g_i(E) \cdot e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (4.13)$$

ここに、 F_{Ej} : j-mode 動揺による i モード方向への作用力、 X_j : $(= X_j^0 e^{-i\omega t})$ j-mode の複素動揺、 X_j^0 : j-mode の動揺振幅 (実数) である。このとき、付加質量 M_{ij} 、減衰係数 N_{ij} は次のように定義される。ただし、 M_{ij} 、 N_{ij} は実数である。

$$F_{ij} = -M_{ij} \ddot{X}_j - N_{ij} \dot{X}_j \quad (4.14)$$

ここに、 \cdot は t による微分である。

このとき、

$$\begin{aligned} \dot{X}_j &= -i\omega e^{-i\omega t} \cdot X_j^0 \\ \ddot{X}_j &= -\omega^2 e^{-i\omega t} \cdot X_j^0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

これらを定義式に代入して、 $X_j^0 e^{-i\omega t}$ で割ると次式のように表される。

$$(-i\rho\omega) \sum_E \phi_j(E) \cdot g_j(E) = \omega^2 M_{ij} + i\omega N_{ij} \quad (4.16)$$

次に、

$$R_{ij} = \operatorname{Re}(\sum_E \phi_j(E) g_j(E)) \quad (4.17)$$

$$I_{ij} = \operatorname{Im}(\sum_E \phi_j(E) g_j(E)) \quad (4.18)$$

とすると、

$$(-i\omega\rho)(R_{ij}+iI_{ij})=\omega^2 M_{ij}+i\omega N_{ij} \quad (4.19)$$

となる。この式で、Real part と Imaginary part を比較すると、 M_{ij} と N_{ij} はそれぞれ以下ようになる。

$$M_{ij} = \frac{\rho}{\omega} I_{ij} \quad , \quad N_{ij} = -\rho R_{ij} \quad (4.20)$$

4.5 運動方程式と動水圧と流体力の関係

浮体の運動方程式は、1 質点系の剛体運動として解くものとし、自由度は 6 を考えることとすると、運動方程式は以下のように表される。

$$(m_{ij}+M_{ij})[\ddot{X}_j]^t+(N_{ij})[\dot{X}_j]^t+(k_{ij})[X_j]^t=[f_i] \quad (4.21)$$

(i,j=1~6)

$$(m_{ij}) = \begin{pmatrix} m & & 0 \\ & m & \\ 0 & & I_x \\ & & I_y \\ & & I_z \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

ここで、 m ：質量、 I_x 、 I_y 、 I_z ：慣性モーメント、 M_{ij} ：付加質量、 N_{ij} ：減衰係数、 k_{ij} ：復元力係数、 f_i ：波力をそれぞれ表す。

これを、以下のように整理する。

$$(m_{ij})[\ddot{X}_j]^t+(k_{ij})[X_j]^t+(M_{ij})[\ddot{X}_j]^t+(N_{ij})[\dot{X}_j]^t=[f_i] \quad (4.23)$$

ここで、

$$(M_{ij})[\ddot{X}_j]^t+(N_{ij})[\dot{X}_j]^t = -\sum_{j=1}^6 f_{ij} = S_i \quad (4.24)$$

は、動水圧による項を表す。ただし、

$$f_{ij} = \operatorname{Re} F_{ij} = \rho \omega \{ \operatorname{Im} A \cos \omega t - \operatorname{Re} A \sin \omega t \} \quad (4.25)$$

$$A = X_j^0 \sum_E \phi_j(E) g_i(E) \quad (4.26)$$

$$S_i = \sum_E Q(E) \cdot g_i(E) \quad (4.27)$$

$$Q(E) = \sum_{j=1}^6 X_j^0 \overline{P_j(E)} \cos(-\omega t + \alpha_E) \quad (4.28)$$

となり、 α_E は要素 E の圧力の位相のずれを、 $Q(E)$ は要素 E の動水圧による力を表す。

5. 時系列シミュレーション

ここでは、流体力、波力、動揺の周波数応答は、すべて微小変位を仮定して解いていることから、全体座標系

と物体座標系は一致している。

しかし、時系列シミュレーションを実施する場合、定常外力の存在が問題となる。つまり、潮流力、定常風等の定常力と係留系の釣り合い状態を求める場合および定常力と不規則荷重が混在する場合、曳航時等の解析を行う場合には、微小変位では解くことが出来ない。

そこで、 x 、 y 方向の変位 (surge、sway) と z 軸回りの回転運動 (yaw) については、変位を考慮して荷重を算定する。

Runge-Kutta法で、時系列シミュレーションを解く時の変数は次のように考える。

x (surge)、 y (sway)、 z (heave)

：全体座標系 (x,y,z) から見た重心点の変位

θ (roll)、 ϕ (pitch)

：物体座標系 (x',y',z') から見た回転変位

ψ (yaw)：Heading angle の変位

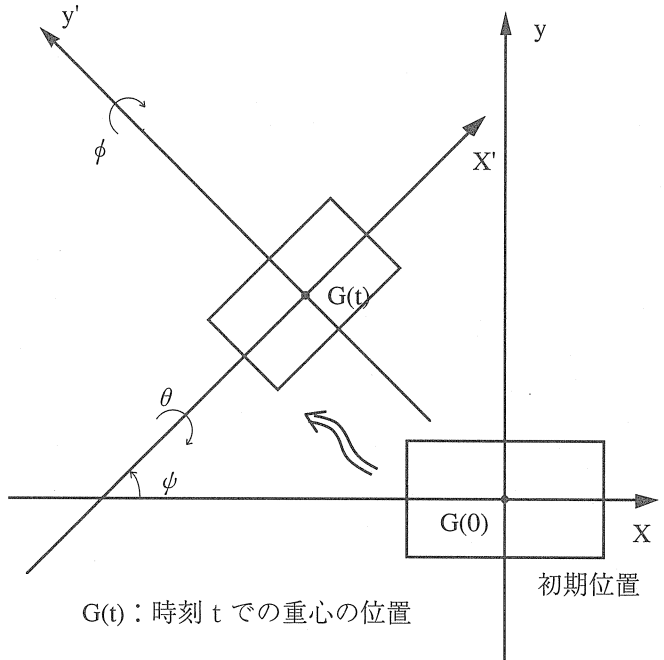


図-6 変位後の回転軸方向

運動方程式は次のようになる。

$$[M]\{\ddot{X}\}+[C]\{\dot{X}\}+[C']\{\dot{X}_i|\dot{X}_i|\} + [K]\{X\} + \{F_M(X)\} = \{F(t)\} \quad (5.1)$$

ここで、 $[\]$ ：マトリクス、 $\{\ \}$ ：ベクトルを示す。

また、

$[M] = (m_{ij})$ ：質量マトリクス、

$[C] = (C_{ij})$ ：線形減衰マトリクス、

$[C'] = (C'_{ij})$ ：粘性減衰マトリクス、

$[K] = (k_{ij})$ ：線形剛性マトリクス (復元力+線型バネ)、

$\{F_M(X)\} = (F_{Mi}(X))$ ：非線形係留力、

$\{F(t)\} = (F_{Mi}(X))$: 外力 (波力+風荷重+潮流力)、
であり、

$$(F_{Mi}(t)) = (F_{Ai}(t)) + (F_{Bi}(t)) + (F_{Ci}) \quad (5.2)$$

である。ここに、 F_A :波力、 F_B :風荷重、 F_C :潮流力である。

6. 動揺解析システムの比較検討

6.1 モデルケースの設定

ここでは、動揺解析システムの妥当性を検討するために土木学会の海岸工学委員会では実施された、各計算方法による検討結果と比較した。モデル構造物は、浅海域 ($h=30m$) における図-7に示すような長方形浮体で、簡単のため係留はされていないものとした。浮体の諸元および波の条件は以下に示す通りである。

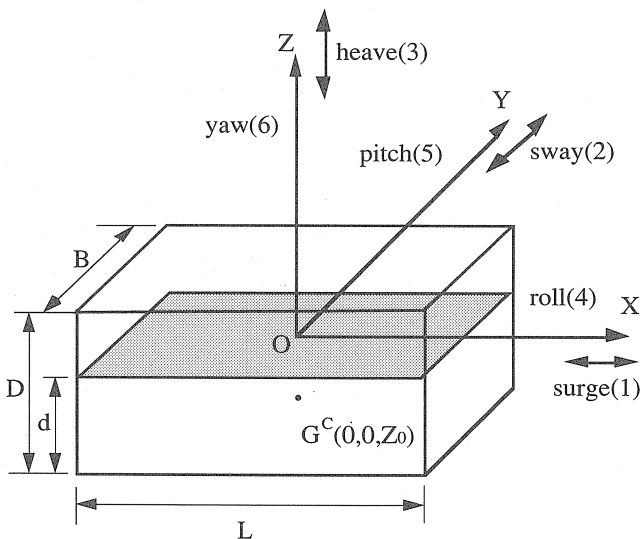


図-7 浮体諸元を表す記号及び運動モードの定義

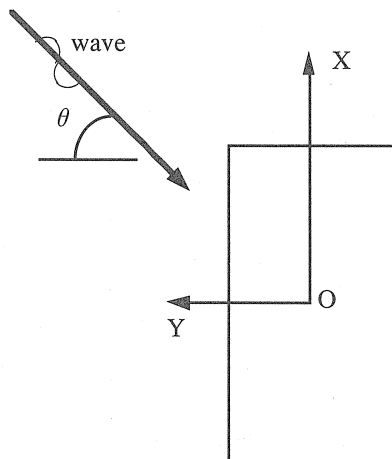


図-8 波向き定義

[浮体構造物諸元]

- ・水深 : 30 m
- ・浮体長 : 390 m
- ・幅 : 97 m
- ・型深さ : 26 m
- ・重量 : 550615.65 tonf
- ・吃水 : 14.2 m
- ・重心高 : -5.9 m (水面を基準)
- ・重心回りの慣性モーメント :
 - $I_x = 4.59 \times 10^{11} \text{ kgm}^2$
 - $I_y = 7.42 \times 10^{11} \text{ kgm}^2$
 - $I_z = 7.42 \times 10^{11} \text{ kgm}^2$
- ・静的復元力 : 38775.75 tonf / m
- ・メタセンタ :
 - ・roll : 54 m
 - ・Pitch : 891.4 m

[波の条件]

- ・波長 : 388 ~ 97 m
- ・周期 : 8.05 ~ 23.5 s
- ・波向 : 0° 、 45°
- ・波高 : 1.0 m

6.2 計算結果の比較

6.1 で述べたモデル浮体について、表-2に示すように、9種類の三次元計算と二次元計算による計算結果を用いて、本シミュレーションによる計算結果との比較を行った。

比較はすべて無次元量を用いて行っており、無次元化に用いた諸量を表-3に示す。

6.2.1 波強制力

図-9は $\theta = 0^\circ$ の場合の、Sway、Heave、Rollの波強制力の振幅を示したものであるが、有限水深の三次元計算において、同様の手法を用いているにもかかわらず、特にSwayでの波強制力において B/L の大きな領域でばらつきがあるものの、本シミュレーションの計算結果はほとんど他の三次元計算の結果と一致した結果を得ている。

図-10は $\theta = 45^\circ$ の場合の計算結果であり、 $\theta = 0^\circ$ の時のようなばらつきはなくなり、計算結果は他のモデルとほぼ一致している。

6.2.2 流体力係数

図-11は付加質量係数の対角要素 (Sway、Heave、Roll に対応するもの) と非対角要素 (運動モード間の連成影

表 - 2 線形計算における各計算法別計算手法一覧

次元	計算手法	要素分割数				特異点処理	備考
		x	y	z	Total		
三次元	本システム グリーン関数 (間接法)	26	10	4	548	数値積分	$K_r = 0.1$ で積分型と級数型を使い分け
	A(1) グリーン関数 (間接法)	30	8	2	392	長方形の解析積分	打ち切り誤差 (級数: 0.2%、積分: 0.4%)
	A(2) グリーン関数 (間接法)	36	10	3	636	同上	同上
	B グリーン関数 (間接法)	40	10	2	600	数値積分	$K_r = 0.1$ で積分型と級数型を使い分け
	C グリーン関数 (間接法)	42	12	3	828	数値積分	$K_r = 0.2$ で積分型と級数型を使い分け
	D グリーン関数 (直接法)	40	10	2	600	パネルを円で近似	$r = 0$ のみ積分型を使用、細分パネルを使用
	E ハイブリッド型境界要素法	16	4	3	464		8接点アインパラメトリック要素を使用
	F グリーン関数 (直接法)	60	25	2	1840	長方形の解析積分	$r = 0$ のみ積分型を使用
	G 領域分割法	40	10		100		固有関数展開の項数は4
H グリーン関数 (間接法)	40	10	2	600	長方形の解析積分	無限水深に対応 (計算法はBに同じ)	
二次元	I 領域分割法						固有関数展開の項数は10
	J 境界要素法	浮体没水線を36分割					水面、水底、及び仮想境界面は合計100分割
	K ストリップ法						二次元グリーン公式、ストリップ断面は10

表 - 3 無次元化に用いた諸量

項目	波力および動揺振幅		流体力係数および応答関数		
	i=1,2,3	i=4,5,6	i=1,2,3 and j=1,2,3	i(j)=4,5,6 and j(i)=1,2,3	i=4,5,6 and j=4,5,6
波強制力(F_i)	$\rho g a/b$	$\rho g a/Bd$			
付加質量(a_{ij})			ρLBd	$\rho LBdh$	$\rho LBdh^2$
減衰係数(b_{ij})			$\rho LBd \mu$	$\rho LBdh \mu$	$\rho LBdh^2 \mu$
動揺振幅(X_i)	a	a/B(i=4) a/L(i=5,6)			

響を表す項)のうち Sway と Roll に関するものを示したものである。 a_{24} および a_{42} はそれぞれ Roll による Sway の、および Sway による Roll の付加質量係数を表している。対角要素については他の計算結果にほぼ一致した結果を得ている。しかし、非対角要素については、 a_{24} と a_{42} で流体係数間の相反関係によると互いに等しくなければならないが、全体的傾向はほぼ一致しているものの個々の計算結果をみると、相反性がかなり崩れている場合も見受けられる。そしてこれは、本システムによる計算結果についてもいえる。

図-12は減衰係数の対角要素 (Sway、Heave、Roll に対応するもの) と非対角要素 (運動モード間の連成影響を表す項)のうち Sway と Roll に関するものを示したものである。 b_{24} および b_{42} はそれぞれ Roll による Sway の、および Sway による Roll の減衰係数を表している。これについても付加質量係数の場合と同様の結果を得たものの、各計算結果のばらつきは付加質量係数のものと比べて著しい。

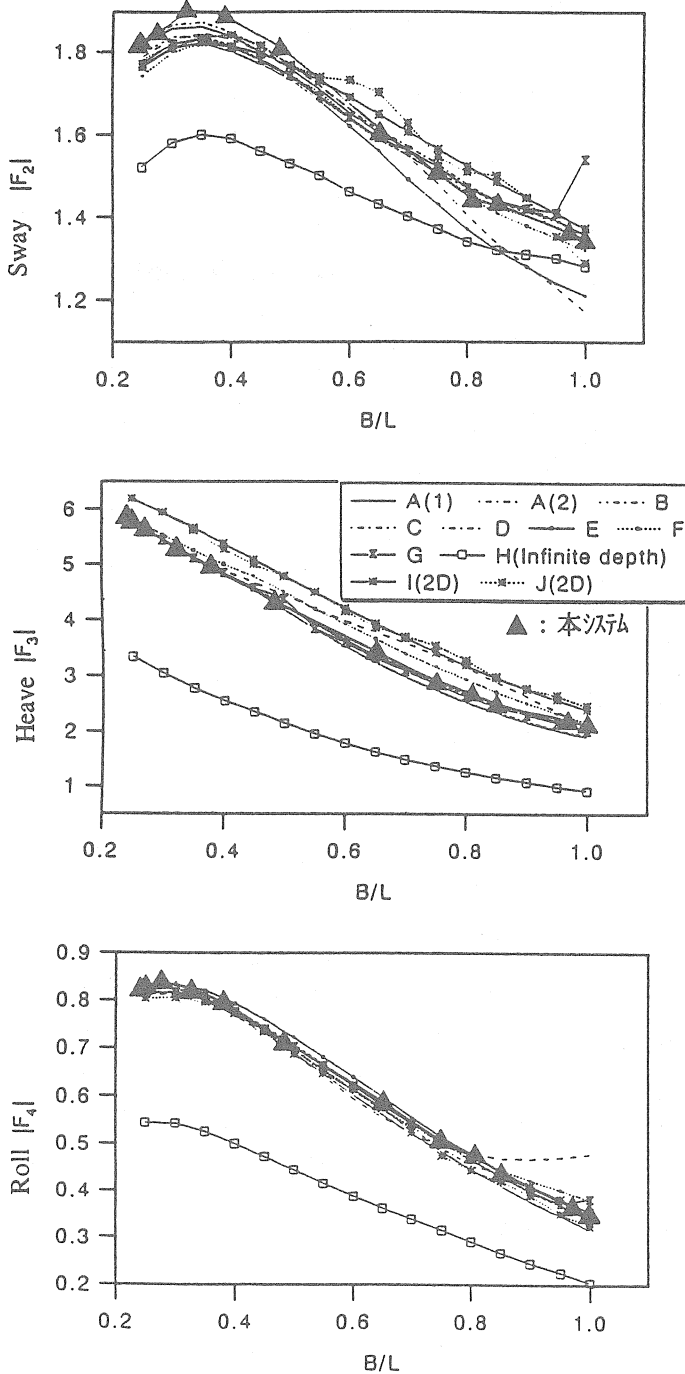


図-9 波強制力 ($\theta = 0^\circ$)

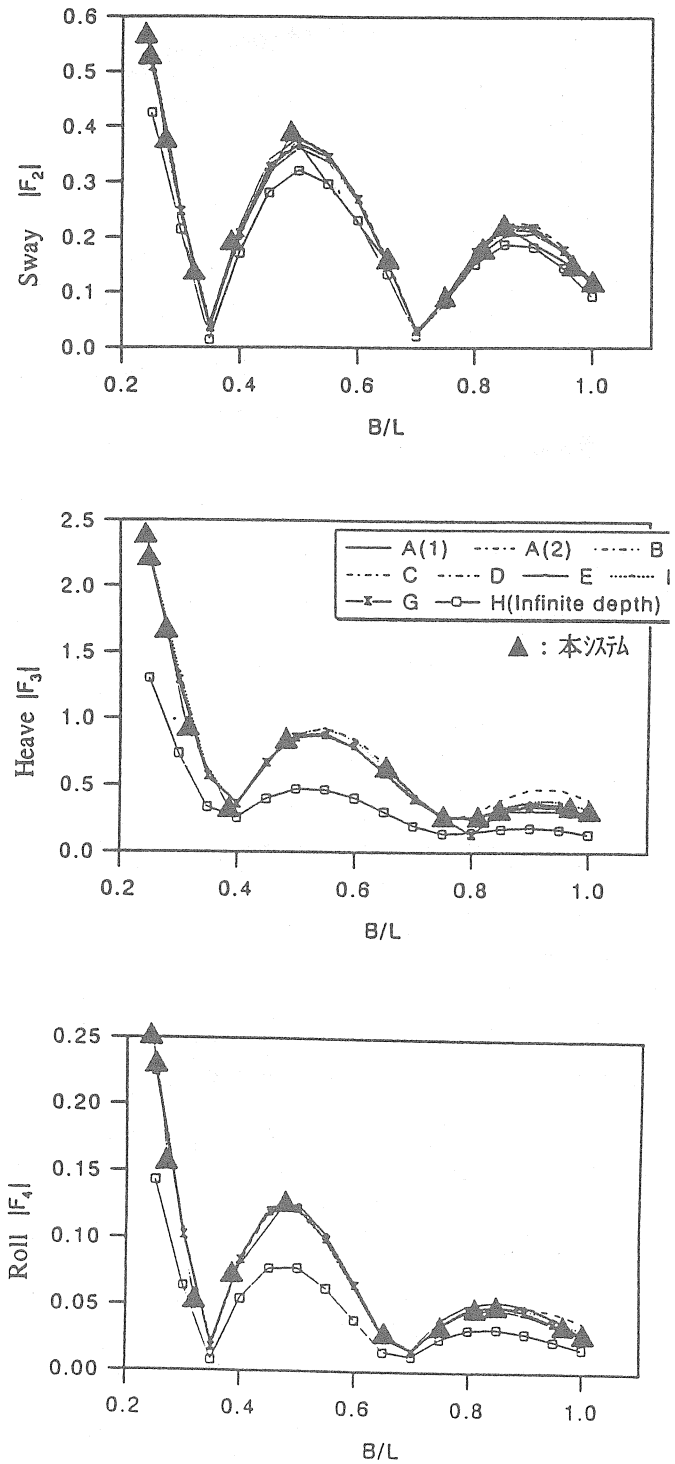


図-10 波強制力 ($\theta = 45^\circ$)

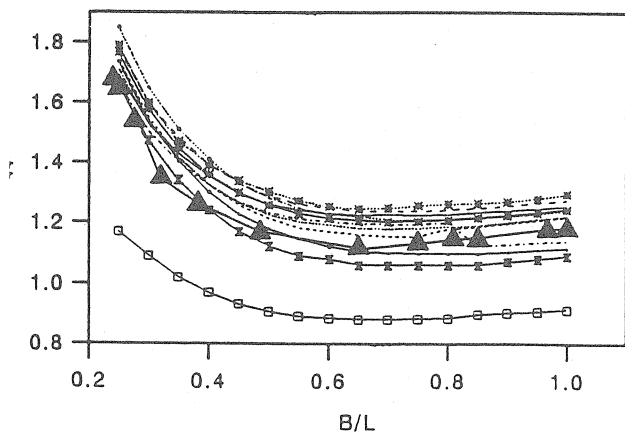
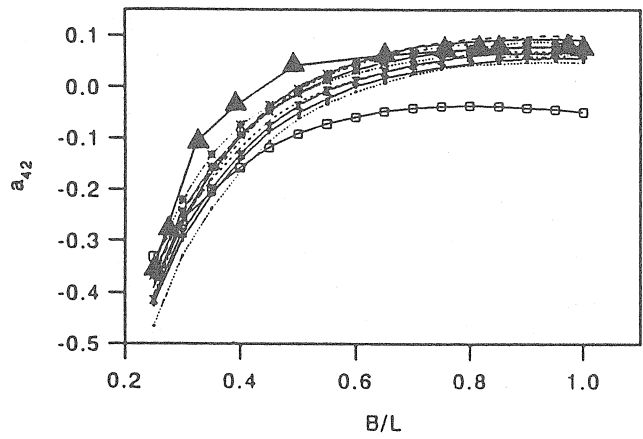
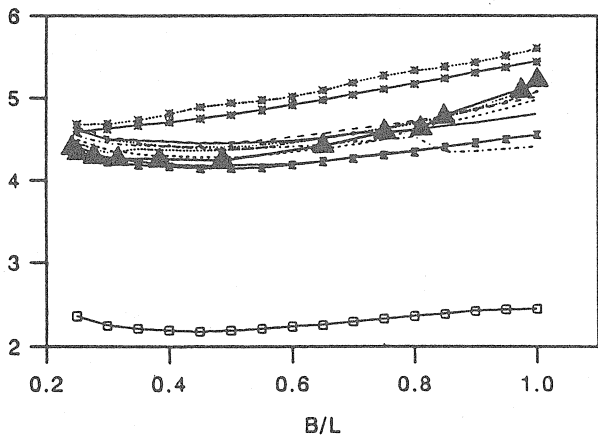
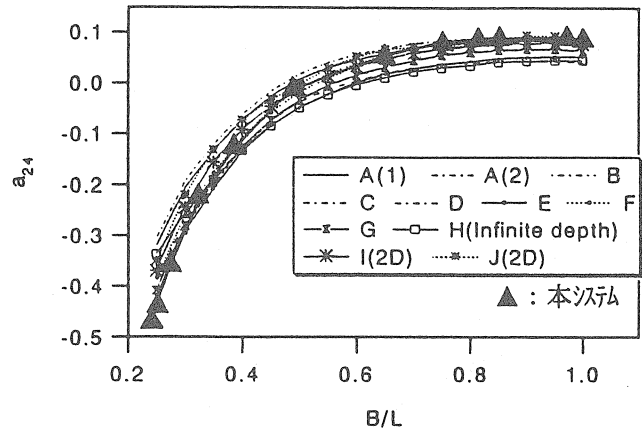
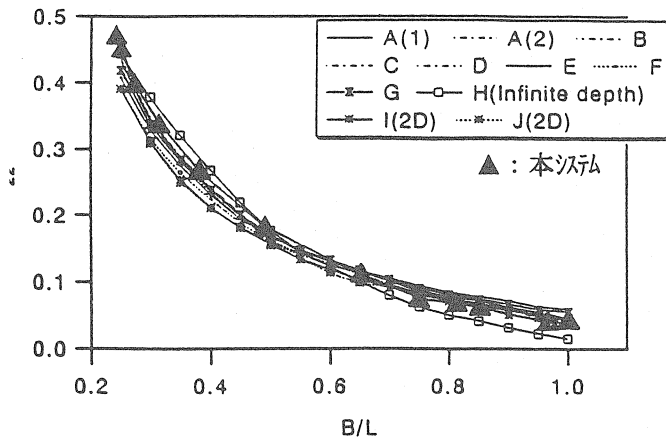


図-11 付加質量係数 (対角要素と非対角要素)

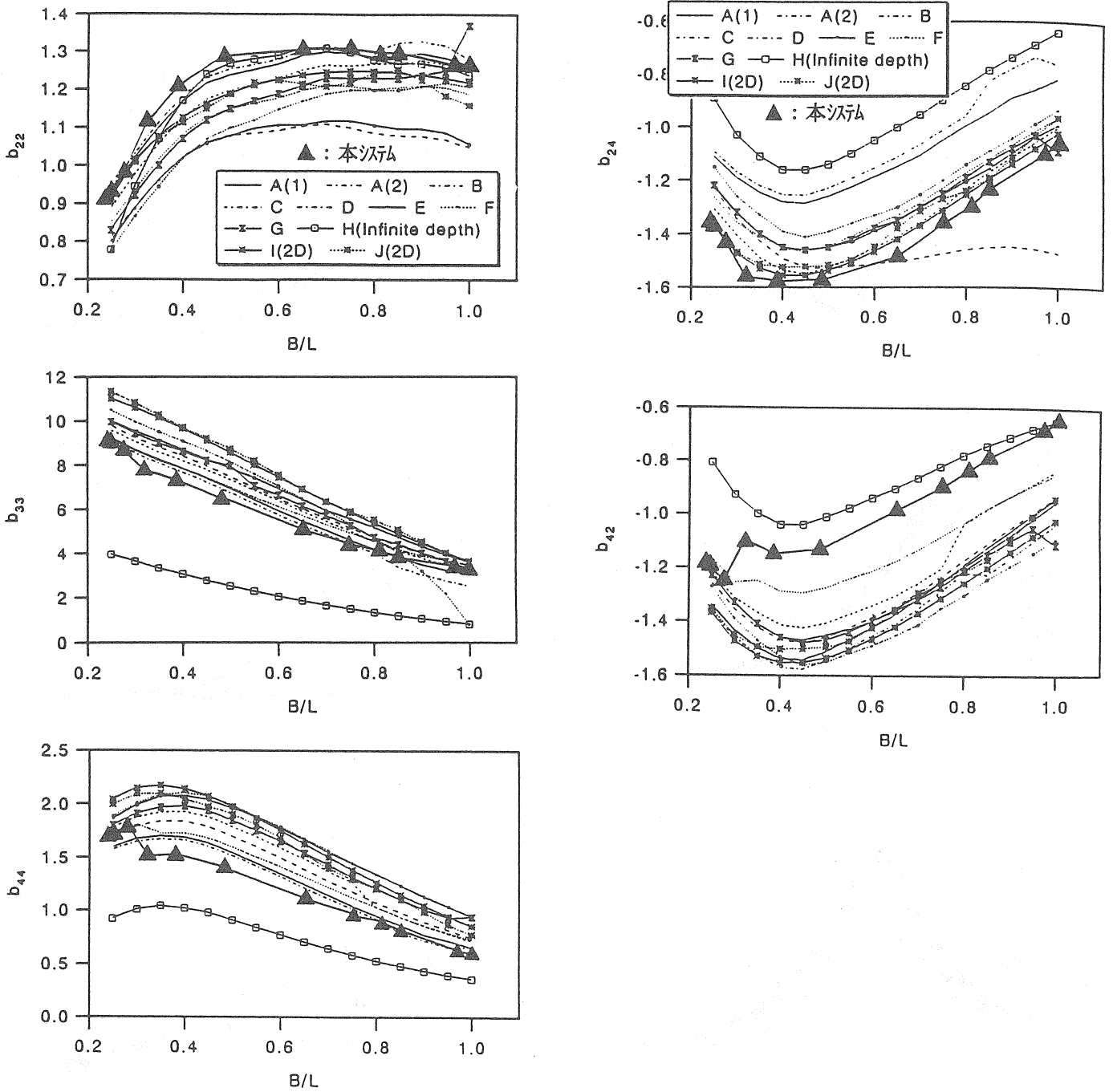


図-12 減衰係数 (対角要素と非対角要素)

6.2.3 動揺振幅

図-13は $\theta = 0^\circ$ のケースに対する動揺振幅 (Sway、Heave、Roll) について模型縮尺 1/50 の模型船 (自由浮体) に対する実験結果 (高山ら、1980) と各計算結果との比較を示したものである。本システムの計算結果は他の計算結果同様、実験値と概ね一致している。

図-14は $\theta = 45^\circ$ の場合の動揺振幅であるが、他の有限水深での三次元計算結果とほとんど一致する結果を得ている。

以上のことより、本システムの妥当性が説明された。

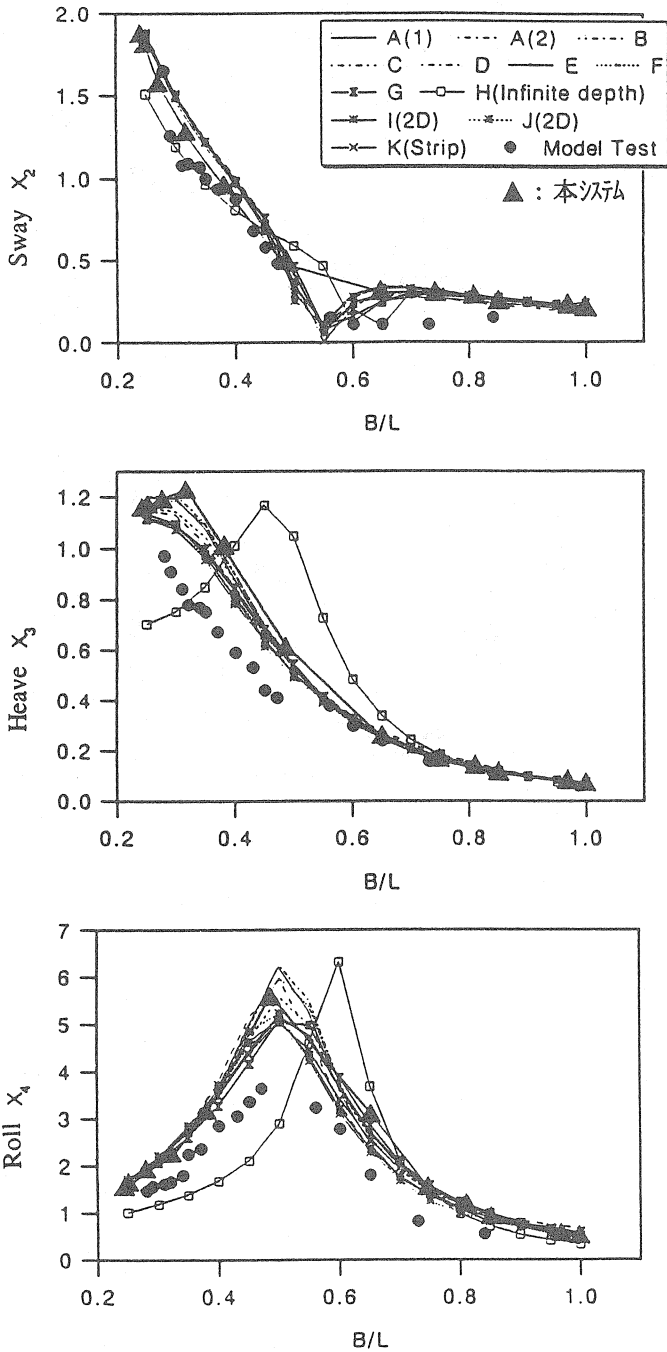


図-13 動揺振幅 ($\theta = 0^\circ$)

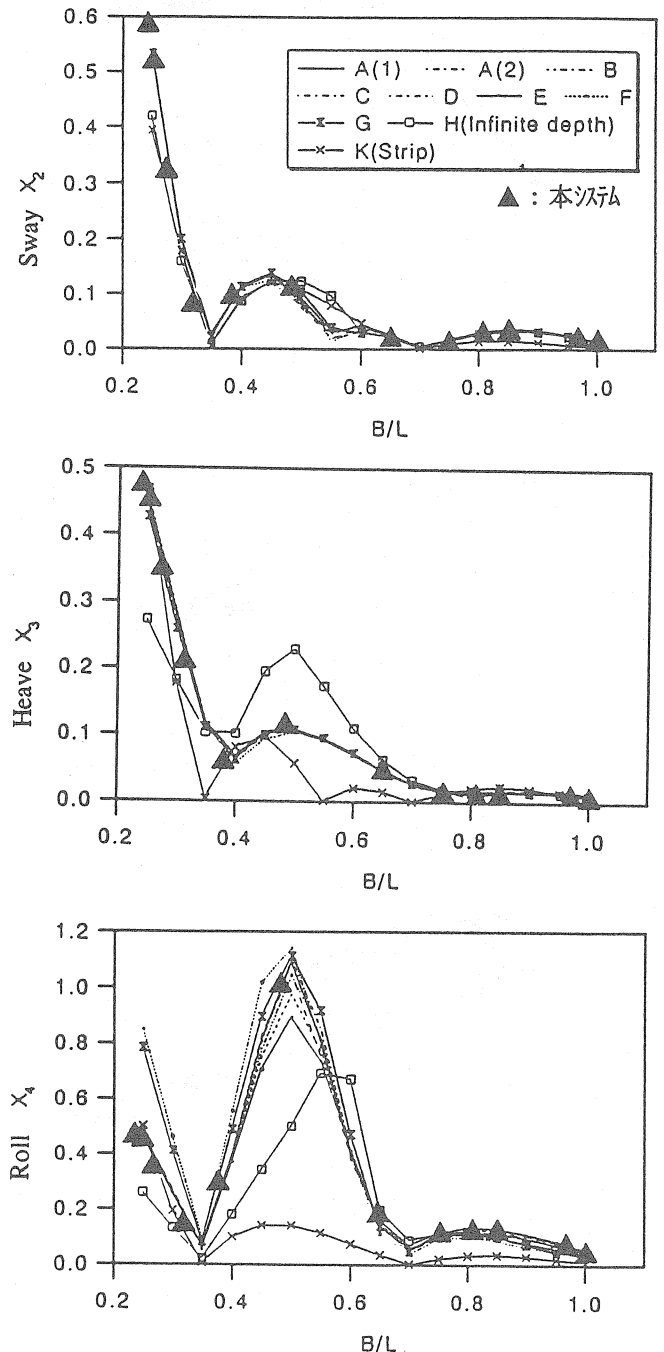


図-14 動揺振幅 ($\theta = 45^\circ$)

7. 解析事例

このシステムを用いて、いくつかの実際問題への適用を試みた。ここでは、その結果について述べる。

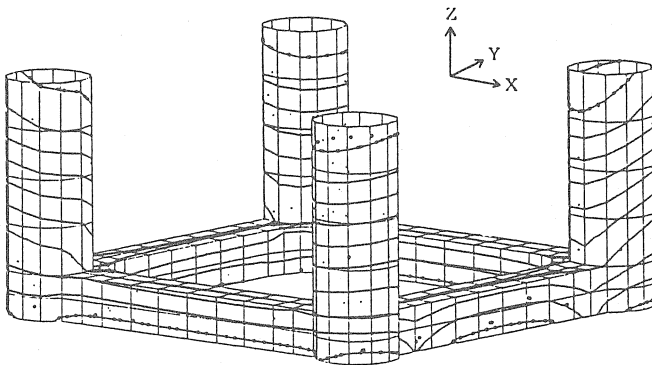
7.1 テンションレグプラットフォーム

テンションレグプラットフォームは、浮遊式海洋構造物をワイヤロープ等で静平衡状態より下方に引き込んで海底のアンカーと接続し、係留ラインに生じる初期張力によって浮遊式構造物の動揺を安定させる方式のプラットフォームである。

波高2.0 m、周期18secの規則波中の波力等の解析結果を図-15に示す。ただし、モデル中では、係留は線形バネを仮定し、これに初期張力をかけた形で計算を行っている。モデルの諸元を以下に示す。

- 幅 : 24.2 m
- 長さ : 24.2 m
- 吃水 : 12.5 m
- 重量 : 728.0 ton
- 重心位置 0.0、0.0、-11.4 (m)

このように、複雑な形状の構造物であっても、波力等の解析をおこなうことが可能である。



DISTRIBUTION OF PRESSURE AMPLITUDE (TONF/M**2)
 WAVE PERIOD 1.08E1 (SEC)
 WAVE HEIGHT 2.00E0 (M) PRESS MAX = 1.02E0 (TONF)
 INCIDENT ANGLE 4.50E1 (DEG) PRESS MIN = 8.75E-1 (TONF)

図-15 テンションレグプラットフォームにおける波圧分布
 (波高2.0 m、周期18.0s)

7.2 係留船舶

係留船舶に作用する波力について解析を行った。なお、線形バネを仮定している。計算例として図-16に波高1.62 m、周期2 s~16 s、船首方向45° (315°) からの入射波向のときの周波数別の波力の計算結果を示す。モデルの諸元を以下に示す。

- 幅 : 21.0 m
- 長さ : 130.0 m
- 吃水 : 8.0 m
- 重量 : 12000 ton
- 重心位置 0.0、0.0、-5.0 (m)

このように構造物の各動揺モードに対する波力の算定を行うことが可能である。

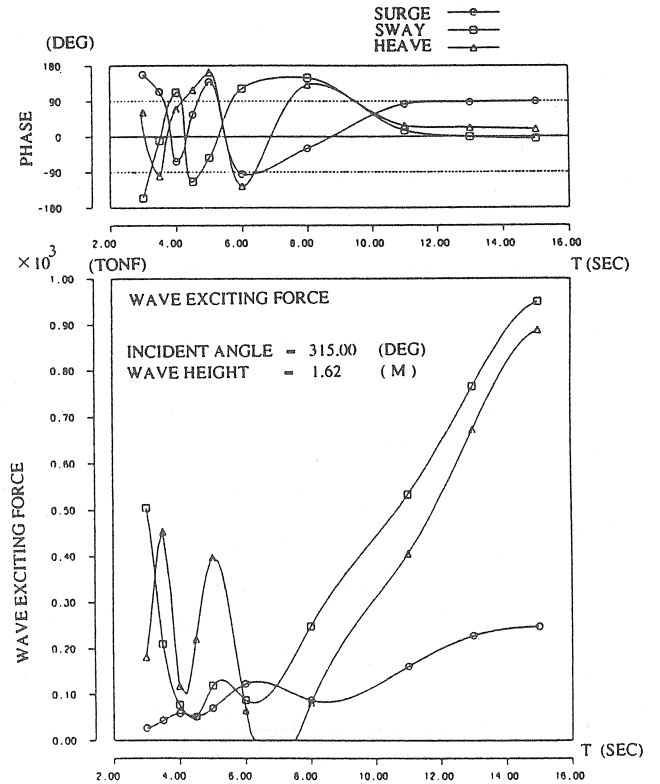


図-16 バースにおける周波数別波力図
 (波高1.62 m、波向315° (45°))

7.3 矩形ケーソン

矩形ケーソン (沈埋函を含む) に関する解析では、自由浮体での動揺量の計算および曳航時の安定性の検討などを行った。ここでは、有義波高0.66 m、有義波周期13.85s、長手方向からの直角入射の不規則波に対する時系列解析結果を図-17示す。モデルの諸元を以下に示す。

- 幅 : 11.5 m
- 長さ : 20.0 m
- 吃水 : 7.597 m
- 重量 : 1875.8 ton
- 重心位置 0.0、0.0、-3.204 (m)

このように、規則波・不規則波の時系列に対する構造物の重心座標やあるいは任意の座標に対して動揺時系列解

析を行うことが可能である。

適用性を向上していく予定である。

参考文献

土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会
 (1994)：海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用の解析法 第IV編】 pp.289～430.
 高山知司・永井紀彦・菊池 治・諸石一幸 (1980)：大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究 (第1報) - 模型実験による検討 -、港湾技術研究所報告、第19巻、第3号、pp.71～103.

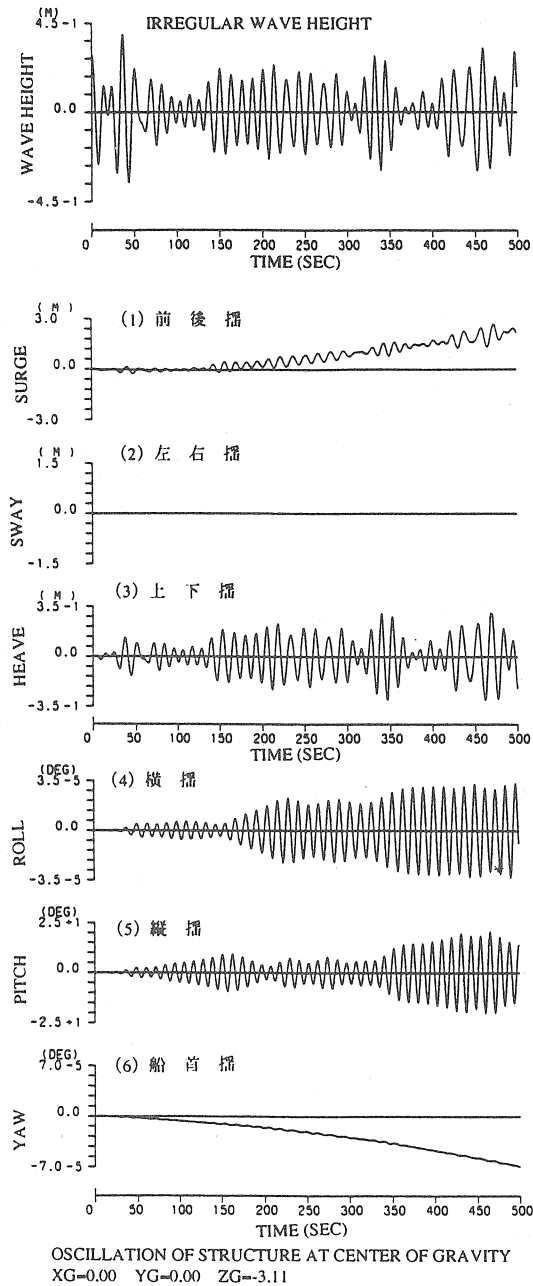


図-17 矩形ケーソンの時系列解析結果
 (有義波高 0.66 m、有義波周期 13.85sec)

8. 今後の検討

今後の検討課題としては、

- ①岸壁からの反射率を考慮した解析、
- ②曳航時の動揺解析、
- ③係留船舶の長周期動揺があげられる。

また、今後は水理実験や現地観測によりモデルの妥当性を検討するとともに、汎用的モデルに改良して、現地