

半潜水型石油掘削船の 動的復原性評価プログラムについて

影本 浩**・高井隆三*

On a Computer Program for the Evaluation of Dynamic Stability of Semisubmersible Drilling Rigs

By

Hiroshi KAGEMOTO and Ryuzo TAKAI

Abstract

As a part of works in the Special Project on the stability of semisubmersible drilling rigs, which were conducted at the Ship Research Institute of Japan, a computer code for the calculation of behaviours of semisubmersible drilling rigs under dynamic loads was developed.

Dynamic behaviours of semisubmersible drilling rigs in heavy environmental conditions have attracted much attention with the focus on the slow drift oscillations and resultant mooring forces. Although it is undoubtful that the behaviours in heavy environmental conditions are vital problems for the safety of semisubmersible drilling rigs, transient motions due to mishaps such as breakings of mooring/towing lines, floodings, unexpected cargo movements, collisions etc. could experience such large displacements/inclinations that might endanger the safety of the semisubmersibles.

On the contrary to the behaviours in heavy sea conditions, however, such transient behaviours have attracted little attention so far. Therefore, using the developed computer code, the authors have carried out simulations of such transient behaviours of semisubmersibles as well as behaviours in heavy environmental conditons and examined the accuracy of the calculated results through the comparisons with available experimental data.

The objective of this paper is to describe the specifications of the developed computer code and to present the simulation results obtained by the code, which might benefit the future developments of similar computer codes.

目 次

1. 緒言	30	2. プログラムの仕様	30
		2.1 座標系及び運動方程式	30
		2.2 流体力	31
		2.3 波による力	31
		2.4 潮流力及び粘性流体力	32
		2.5 風による力	32

** 東京大学(研究当時 海洋開発工学部)

* 海洋開発工学部

原稿受付：平成元年3月1日

2.6 復原力	32
2.7 その他の力	32
2.8 時間積分法	33
2.9 計算のフロー	33
3. 適用例	34
3.1 流体力	34
3.1.1 周波数領域の付加質量, 造波減衰係数	34
3.1.2 メモリー影響関数	34
3.1.3 造波減衰係数のチェック	36
3.2 係留力特性	36
3.3 波・風中の運動	36
3.3.1 規則波中の運動	36
3.3.2 不規則波中の運動	40
3.4 過度運動	40
3.4.1 自由動揺	40
3.4.2 係留ライン破断後の運動	47
3.4.3 曳航ライン破断後の運動	49
3.4.4 浸水時の運動	49
3.5 シミュレーション結果の画像化	52
4. 結言	52
参考文献	52

1. 緒 言

Alexander Kielland(1980年)や, Ocean Ranger (1982年)等の半潜水型石油掘削船(セミサブリグ)の事故を契機として, 復原性基準の見直しに向けてセミサブリグの復原性に関する研究が各国で行われた。わが国においても, (株)日本造船研究協会 SR192 研究部会や, 各造船会社において研究が実施されたが, 船舶技術研究所でも昭和58年度より4ヶ年に亘る特別研究「浮遊式海洋構造物の係留システムの評価法に関する研究」の一環として, セミサブリグの復原性の評価法に関する研究を行なった。その成果の詳細は既に著者らにより報告し¹⁾, また IMO (国際海事機構)の場における復原性基準見直し作業に対する我が国提出資料の一部としても発表されている²⁾。

上記研究の一部は, 船舶技術研究所と(株)日本造船研究協会 RR743 分科会との共同研究として行なわれ, セミサブリグの静的, 動的挙動をシミュレーション計算するためのプログラムが開発された。これらのプログラムについては文献1)にその概要を紹介したが, 本報告ではこれらのプログラムのうち, セミサブリグの

動的挙動をシミュレーション計算するために開発した「動的復原性評価プログラム」の詳細について紹介し, さらにそのプログラムによる各種計算結果及び実験結果との比較を通じて, 計算法についての考察を行う。

セミサブリグに波力, 風力等の動的な力が加わった場合の挙動については, セミサブリグの長周期運動の推定に関連して多くの研究がなされているが, 復原性の観点からはこのような風浪中の挙動と共に, 係留ラインや曳航ラインの破断, 浸水, 荷崩れ, 他船との衝突などによって生じる過度運動時の挙動の推定も非常に重要である¹⁾。「動的復原性評価プログラム」とは, このような過度運動をも含めた動的な挙動の時刻歴をシミュレーション計算し, セミサブリグの安全性に対する動的挙動の影響の評価を行なうことを目的として開発したものである。

2. プログラムの仕様

2.1 座標系及び運動方程式

Fig.2.1 に示すように, 外力の働かない状態の係留浮体の釣合い位置の長手方向をX軸, それと直角方向をY軸とし, 鉛直上方をZ軸の正方向とする空間固定座標を用いる。

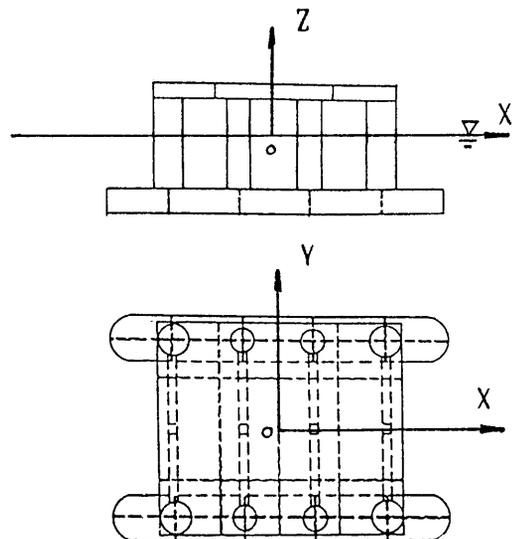


Fig.2.1 Coordinate system

運動方程式としては、メモリー効果を考慮した次式を用いる。

$$\sum_{j=1}^6 \{ (M_{kj} + m_{kj}) \ddot{x}_j + \int_0^t K_{kj}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + \frac{1}{2} \rho S C_D \dot{x}_j | \dot{x}_j | + C_{kj}(x_j) \} = F_K \quad (2.1)$$

$$(k=1, 2, \dots, 6)$$

ここで

x_j : 浮体の6自由度変位

M_{kj} : 浮体の質量, 慣性モーメント ($M_{kj}=0$ if $k \neq j$)

m_{kj} : 付加質量, 付加慣性モーメント

K_{kj} : メモリー影響関数

C_D : 抗力係数

$C_{kj}(x_j)$: 静的復原力 (静水圧による力及び係留系による力)

F_k : 波, 風, 潮流等による環境外力

x_1, x_2, x_3 は各々 X, Y, Z 軸方向の変位, x_4, x_5, x_6 は各々 X, Y, Z 軸回りの回転であり, 外力, 流体力も空間固定の $X-Y-Z$ 座標系に対して定義する。

2.2 流体力

流体力 m_{kj} , K_{kj} は, 周波数領域における解析から求められる付加質量 $a_{kj}(\omega)$, 造波減衰 $b_{kj}(\omega)$ より次式で計算する。

$$K_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{kj}(\omega) \cos \omega t d\omega \quad (2.2)$$

$$m_{kj} = a_{kj}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^\infty K_{kj} \sin \omega \tau d\tau \quad (2.3)$$

(2.2) 式において, $0 < \omega < \infty$ の範囲で $b_{kj}(\omega)$ を求めるのは実際上不可能であるため, Fig.2.2に示す

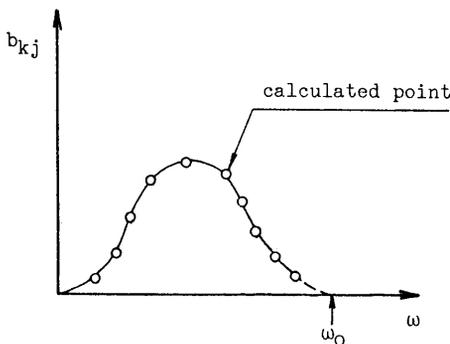


Fig.2.2 Inter/Extrapolataion of calculated hydrodynamic coefficients

ように限られた ω の範囲で何点か求められた $b_{kj}(\omega)$ に対し, スプライン補間を用いて外挿を行ない, その外挿値がゼロになる ω_0 を求めて $0 < \omega < \omega_0$ の範囲で積分を行なっている。

また, (2.3) 式で m_{kj} は ω に関係のない定数であり, 原理的には ω に関係なく同一の m_{kj} が求められるはずであるが, 実際には異なる $a_{kj}(\omega)$ に対して得られる m_{kj} は多少差があるため, 数点の ω に対する $a_{kj}(\omega)$ から求められる m_{kj} の平均値を用いる。

2.3 波による力

水面変位 $\zeta(t)$ が

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N \zeta_i \cos(\omega_i t - k_i x \cos \alpha - k_i y \sin \alpha + \varepsilon_i) \quad (2.4)$$

と与えられるとき, この波によって浮体に働く k 方向の変動力 F_k は

$$F_k(t) = \sum_{j=1}^N e_k(\omega_j) \cos(\omega_j t - k_j x \cos \alpha - k_j y \sin \alpha + \varepsilon_j) \quad (2.5)$$

で計算する。ここで, $e_k(\omega_j)$ は入射角 α で進行する周波数 ω_j の規則波により浮体に加わる k 方向の力であり, 付加質量, 造波減衰と共にあらかじめ適当な数の周波数, 入射角 (30度毎12点) について計算しておく, 指定の ω , α に対する値を内挿により求める。

水面変位の与え方としては, 波のスペクトル $S(\omega)$ を指定する場合 (ISSC型及びJONSWAP型) と $\zeta(t)$ そのものを指定する場合との2通りを選択できる。スペクトルを指定した場合には, ζ_i は

$$\zeta_i = \sqrt{2S(\omega_i) \Delta \omega_i} \quad (2.6)$$

で計算する。スペクトルの分割数 N 及び考慮する ω の最小値 ω_{\min} , 最大値 ω_{\max} は入力データで指定し, 周波数の分割幅 $\Delta \omega$ は ω_{\min} と ω_{\max} の間を不等分割し, 同波形の繰り返しを避けるようにしている。位相 ε_i は乱数位相を用いている。

時刻歴の場では不規則波中の応答の実験結果とシミュレーション計算結果を比較するためには, 水面変位の時刻歴 $\zeta(t)$ そのものを実験と一致させる必要がある, その場合には (2.4) 式において $\zeta_i, \omega_i, \varepsilon_i$ ($i=1, 2, \dots, N$) を入力データによって与える。 $\zeta_i, \omega_i, \varepsilon_i$ は水面変位の計測値のフーリエ解析, あるいは造波信号からの推算等により与えられる。

波漂流力 $F_k(t)$ は運動の影響は無視して, Pinkster

の近似式³⁾により

$$F_k(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_k((\omega_i + \omega_j)/2) \zeta_i \zeta_j \\ \times \cos\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j) + \\ (k_i - k_j)(x \cos \alpha - y \sin \alpha)\} \quad (2.7)$$

で計算する。ここで $d_k((\omega_i + \omega_j)/2)$ は入射角 α で進行する周波数 $(\omega_i + \omega_j)/2$ の規則波による k 方向の漂流力であり、 e_k と同様にあらかじめ計算しておく。ただし、漂流力による揚力やモーメントは無視してゼロとしている。

この漂流力の計算は、最も時間のかかる部分の一つであり、波成分の数 N の増加と共に計算量は N^2 で増大する。従って、計算時間を短縮するために、浮体の運動が漂流力に及ぼす影響や、浮体に働く漂流力による揚力、モーメントは無視することとした。

2.4 潮流力及び粘性流体力

F_k のうち、潮流力及び (2.1) 式左辺中の粘性流体力は、まとめて次式で計算する。

$$F_k = \frac{1}{2} \rho C_D S_k |v_k| v_k \quad (2.8)$$

ここで

- ρ : 流体密度
- S_k : k 方向の流れに対する代表面積
- C_D : 抗力係数
- v_k : 物体と流体との k 方向の相対速度

S_k, v_k の初期値及び C_D は入力データとして与えるもので、運動による S_k, v_k の変化は浮体の水平面内の回転運動のみを考慮して時々刻々再計算を行なう。ただし、浮体の没水部をブロックに分割して、それぞれのブロックの体積中心での相対速度を代表速度にとりブロックに働く力を求め、その力を積分することにより全体に働く力を求める。

モーメント M_k も同様に

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = \underline{P} \times \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

で計算する。ここで、 \underline{P} は各ブロック中心点の位置ベクトルである。

2.5 風による力

F_k のうち風による力 F_k 及びモーメント M_k は

$$F_k = \frac{1}{2} \rho C_D S_k |v_k| v_k$$

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = \underline{P}_1 \times \begin{pmatrix} F_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \underline{P}_2 \times \begin{pmatrix} 0 \\ F_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

で計算する。

ここで

- ρ : 空気密度
- S_k : k 方向の流れに対する代表面積
- C_D : 抗力係数
- v_k : 物体と風との k 方向の相対速度
- \underline{P}_k : k 方向から風が当たったときの着力点の位置ベクトル

であり、 S_k, v_k の取り扱いが潮流の場合と同様で、 \underline{P}_k も入力データで与える。抗力係数 C_D は、デッキについては 1.0、コラムについては 0.5 としている。

2.6 復原力

(2.1) 式中の復原力 $C_{kj}(x_j)$ のうち、係留系に基づくものは時々刻々の係留点とアンカー点からカテナリー理論によって計算する。ただし、係留ラインの伸びも考慮できる。 $C_{kj}(x_j)$ のうち、静水圧に基づくものは

$$\begin{aligned} C_{33}(x_3) &= \rho g A_w x_3 \\ C_{44}(x_4) &= \overline{GM}_1 \cdot x_4 \\ C_{55}(x_5) &= \overline{GM}_2 \cdot x_5 \end{aligned} \quad (2.11)$$

A_w : 水線面積

\overline{GM}_1 : x_1 軸まわりの \overline{GM}

\overline{GM}_2 : x_2 軸まわりの \overline{GM}

で計算するが、 C_{44}, C_{55} についてはあらかじめ適当な数の傾斜に対して別のプログラムで計算した GZ を用いて、各傾斜に対する GZ を内挿によって求めることもでき、ローワーハル型セミサブリグのように静水圧に基づく復原力の傾斜に対する非線形性が大きい場合に有効である。

2.7 その他

外力 F_k としては、データとして任意の時系列データを与えることも可能であり、風あるいは潮流の速度が一定でないような場合も変動外力に換算して入力することにより考慮ができる。

水面上の風速の gradient や、風による揚力、漂流力に対する運動の影響、渦の影響等、本プログラムで考慮していないものは多々あるが、それらは少なくとも本プログラムで考慮している外力に比べて高次の量

であると考え、計算を単純にするために無視した。

2.8 時間積分法

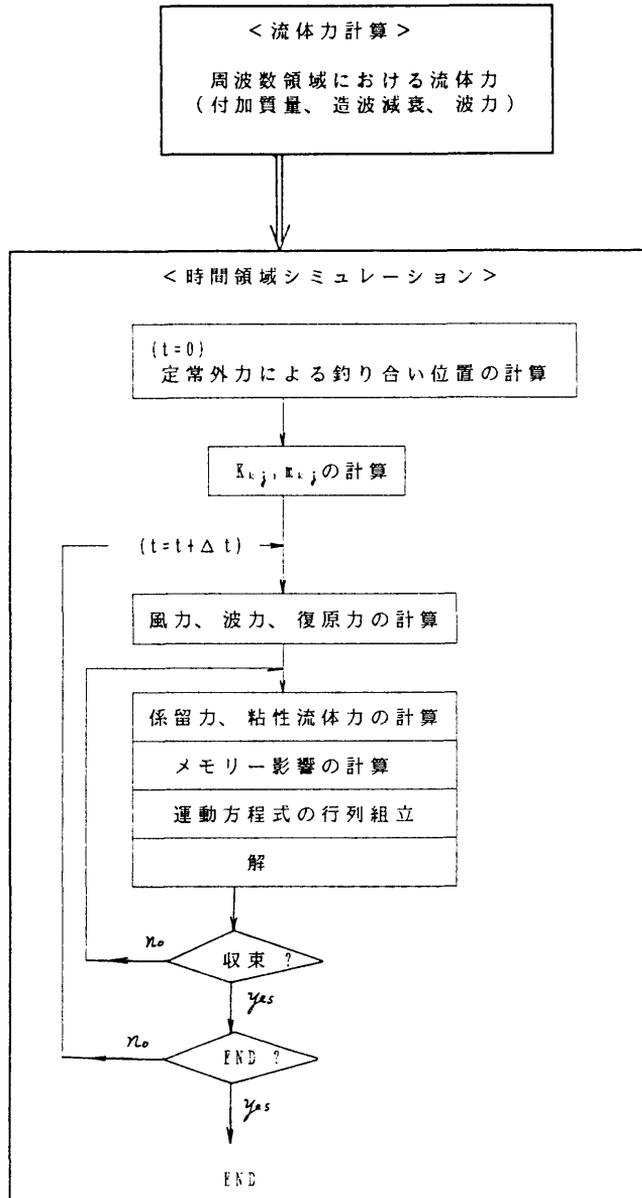
まず、風、潮流による定常的な力と係留系との静的な釣合位置を繰り返し計算により求めた後、その釣合

位置を初期値として Newmark - β 法 ($\beta = 1/4$) により (2.1) 式を時間積分する。

2.9 計算のフロー

計算の流れ図を Table 2.1 に示す。

Table 2.1 Flow chart of calculation



3. 適用例

3.1 流体力

3.1.1 周波数領域の付加質量, 造波減衰係数

(2.1)式中の付加質量 m_{kj} , メモリー影響関数 K_{kj} は既に述べたように(2.2)式, (2.3)式によって求める訳であるが, その際に必要な周波数領域における付加質量係数 $a_{kj}(\omega)$, 造波減衰係数 $b_{kj}(\omega)$ を, Fig.3.1に示すセミサブブリグについて計算した結果をFig.3.2に示す。計算は特異点分布法によっているが, 実線はセミサブブリグ全体をパネルに分割(分割数512)して

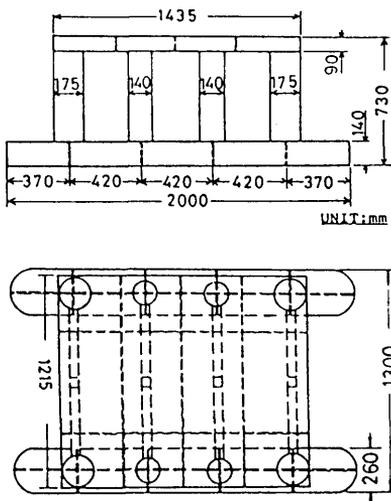
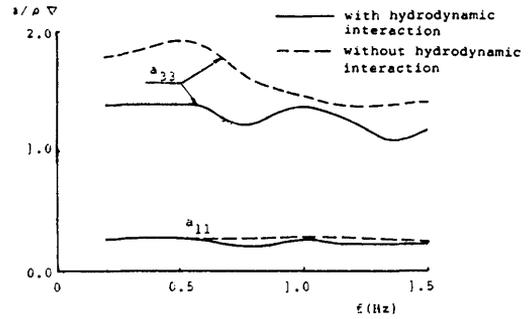


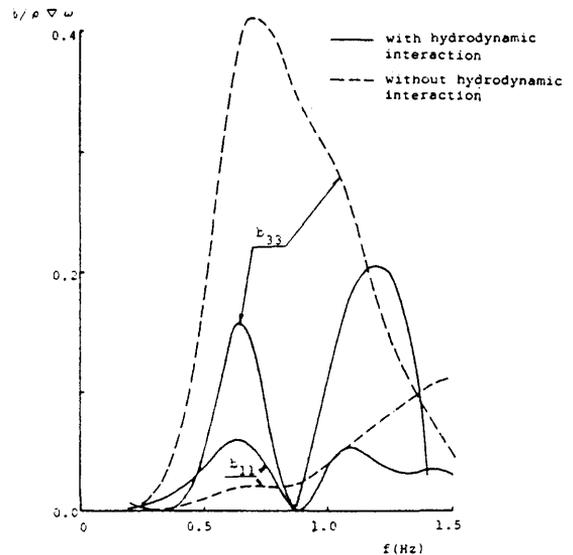
Fig.3.1 General view of the calculation model

解析した結果であり, 破線はセミサブブリグを8本のコラム, 2個のローハルに分けて, 各々が単独で存在するときの流体力を計算した結果を単純に足し合わせた値である。

この図よりわかるように, この2通りの計算法による結果の間には, 付加質量については数10%の差があり, 造波減衰係数についてはその差は数倍にも達し定性的にも一致していない。この差は, コラムやローハル間の流体力学的相互干渉によるものである。従って, 流体力の場だけでみると, 各要素浮体の流体力の足し合わせとして全体の流体力を求めるHooftの手法⁴⁾では適正な値を求めることができない場合がある。



(a) added mass



(b) wave making damping

Fig.3.2 Hydrodynamic coefficients

3.1.2 メモリー影響関数

周波数領域における流体力係数は上述のようにコラム, ローハルの流体力学的相互干渉を考慮した場合とそうでない場合とで大きな差があったが, その結果を用いて(2.2)式によってメモリー影響関数 K_{kj} を求めた結果を比較したのがFig.3.3(a), (b)である。即ち, Fig.3.3(a), Fig.3.3(b)が各々Fig.3.2中の実線, 破線で示した流体力を用いて計算した結果を示す。この図から, メモリー影響関数 K_{kj} の場においても流体力の相違による差が明確に現れており, セミサブブリグのコラムやローハル間の相互干渉効果が大きいことがわかる。

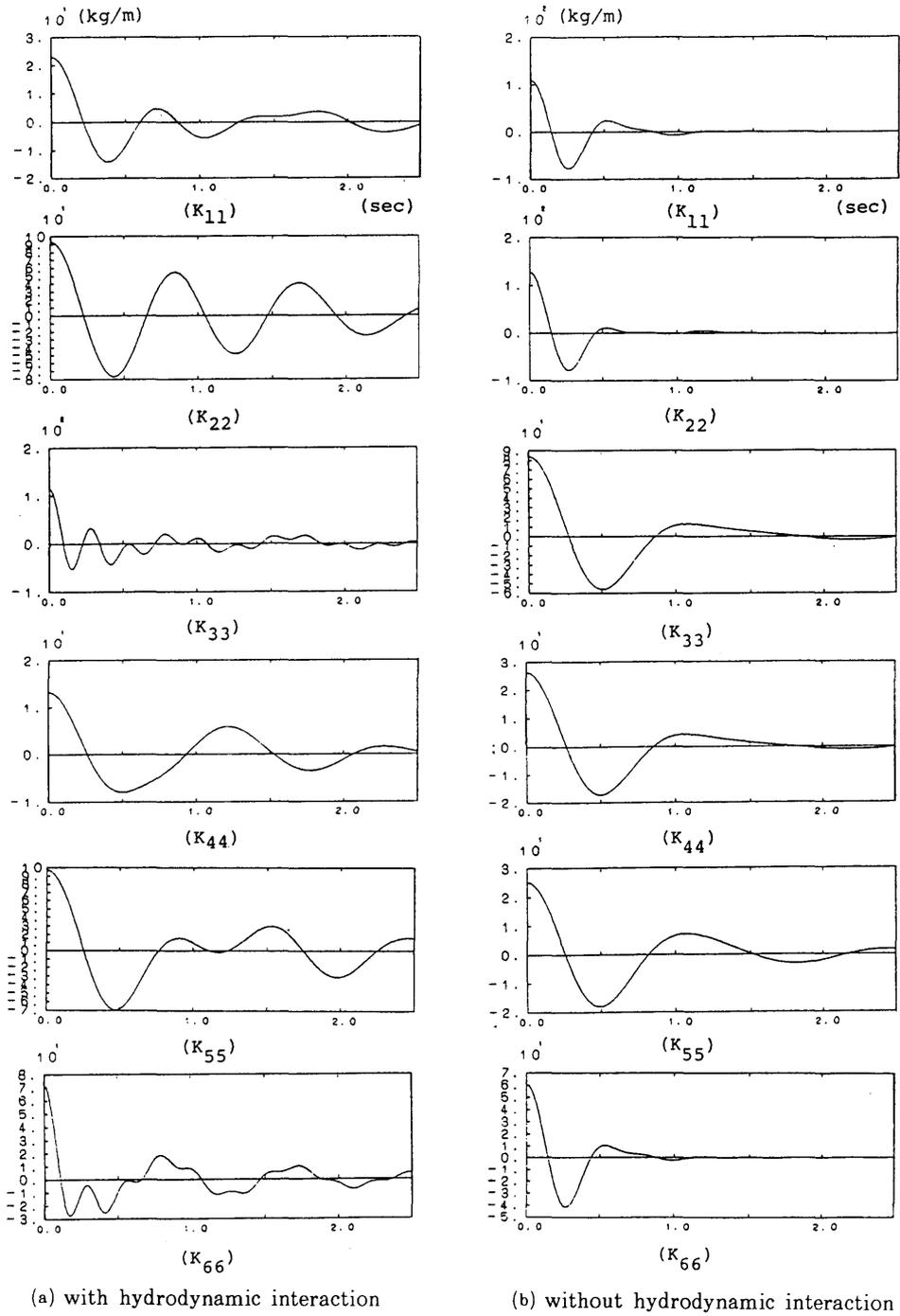


Fig.3.3 Memory effect function

3.1.3 造波減衰係数のチェック

第2章で述べたように、メモリー影響関数を(2.2)式によって求める際には $0 < \omega < \infty$ の範囲で $b_{kj}(\omega)$ を求めて積分を行っているだけでなく、Oortmerssen⁹⁾にならって、限られた ω の範囲で何点かの ω に対して $b_{kj}(\omega)$ を計算し、スプライン補間を用いて外挿を行い、その外挿値がゼロになる ω_0 を求めて $0 < \omega < \omega_0$ の範囲で積分を行っている。従って、計算された ω の内の最大の ω_{max} で、傾き $(d(b_{kj})/d\omega)$ の絶対値が増加する方向にあると外挿値は発散するで、 ω_0 を求めることができない。

Fig.3.4(a), (b)に、セミサブリグについて $b_{kj}(\omega)$ を計算する ω の範囲を2種類に変えたときの結果を示す。Fig.3.4(a)に示す結果では、 $b_{11}, b_{22}, b_{66}, b_{51}, b_{15}$ については ω_{max} において b_{kj} の周波数応答曲線の傾きが増加する方向にある。逆にFig.3.4(b)に示す結果では、すべての b_{kj} について ω_{max} における傾きは減少しゼロに収束する方向になっており、上記の理由により K_{kj} を求める際にはFig.3.4(b)に示す結果を使用すべきであることがわかる。

Fig.3.4(a), (b)に示す b_{kj} を用いて(2.2)式により K_{kj} を計算した結果を示したのが各々Fig.3.5(a), (b)である。 b_{11}, b_{22}, b_{66} については両者の間に大きな差がある。

なお、 $b_{kj}(\omega)$ については ω_{max} における傾きをチェックすると共に、相互干渉等によって流体力の周波数応答曲線がハンプ、ホローを生じない周波数範囲まで計算を行っておくことが必要である。このように K_{kj} を(2.2)式より求めるにあたっては、造波減衰係数 b_{kj} をチェックすることが必要であり、本プログラムにおいても時刻歴計算に入る前に、このような確認を行うこととしている。

3.2 係留力特性

係留力の推定精度を検討するため、Fig.3.1に示すモデルを対象として、各隅1本、計4本のチェーン(各9.45m、水深1.5m)で係留したときの静的係留力特性を本プログラムで計算した例を、実験¹⁾と比較してFig.3.6(a), (b)に示す。(図中、実線が計算値、丸印及び三角印が実験値である。実験値として黒抜きと白抜きの2種類があるのは、セミサブリグの移動方向に対して対称な位置にある2本の係留ラインの各々の反力を示しているためである。)

喫水24.0cmの場合には、実験との一致は良好であるが、喫水38.5cmの場合には実験値との差が大きい。こ

の原因については今のところ不明であるが、Fig.3.6(b)に破線で示すように、試みにアンカー位置をX, Y方向に各々5cmずつ移動させると計算結果は大きく変化し、鉛直方向反力は実験値に近づく。アンカーの位置あるいは、ラインの長さについて(水槽実験で)数cmの誤差が生ずることはありうることであり、今後更に精度の良い実験を行い、計算精度の検証を行なう必要があると考えている。

喫水24.0cmの場合には実験との一致が良いので、この後に示すシミュレーション計算は、特にことわらない限り喫水24.0cmの場合について行っている。

3.3 波、風中の運動

3.3.1 規則波中の運動

規則波中の運動応答の時刻歴をFig.3.1に示したモデルについて計算した例をFig.3.7(a), (b)に示す。Fig.3.7(a), (b)は各々Fig.3.3に示した K_{kj} のうちFig.3.3(a)に示す値(流体力学的相互干渉を考慮したもの)、

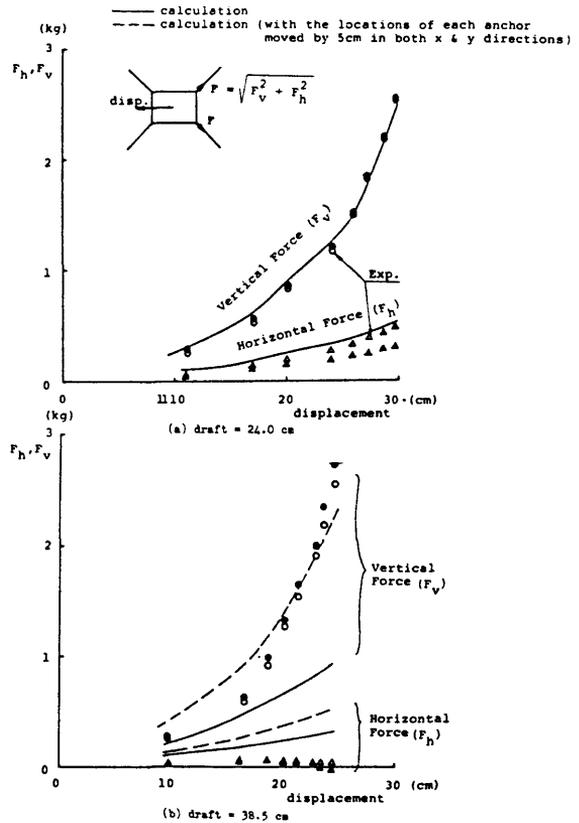
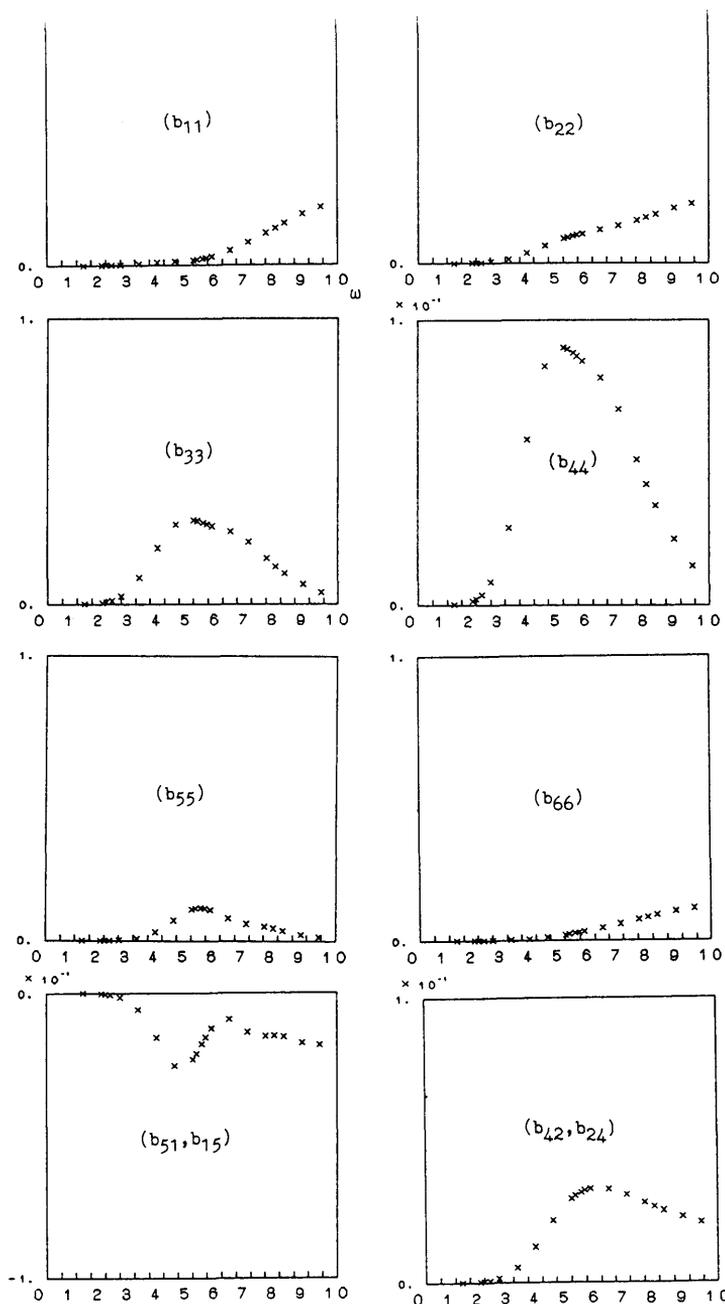
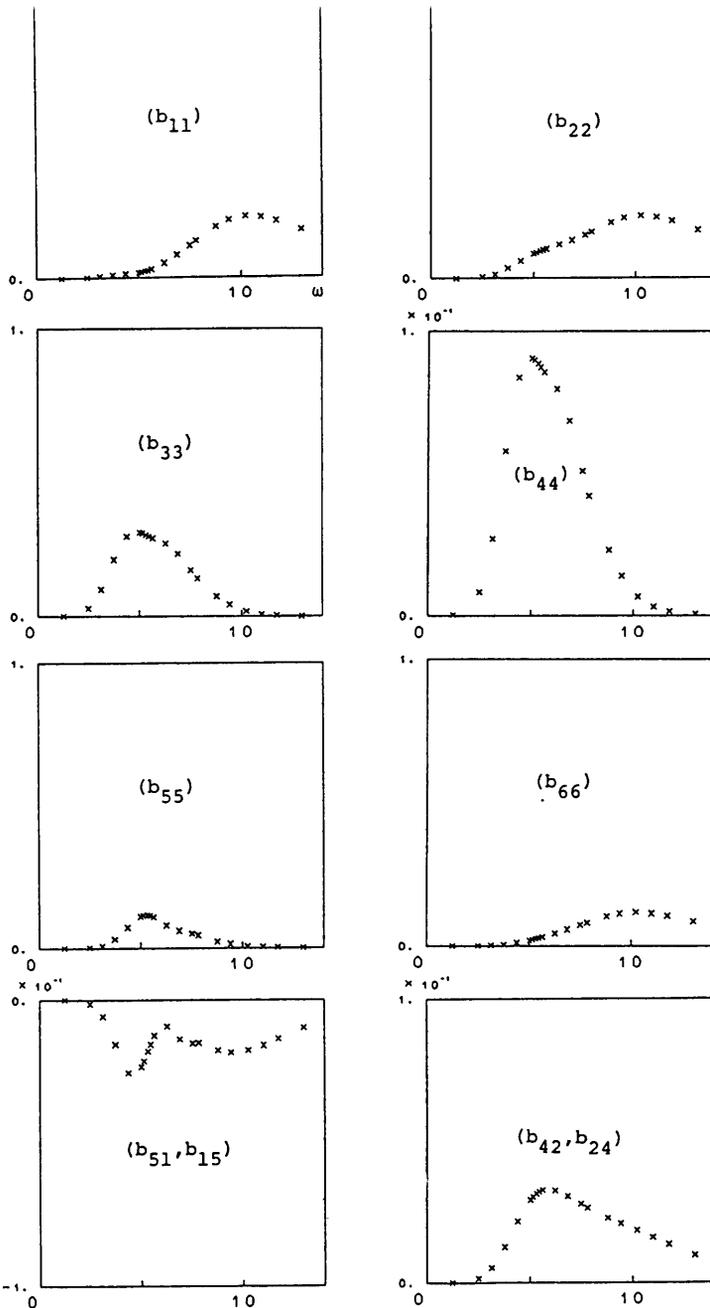


Fig.3.6 Static displacement vs mooring force characteristics



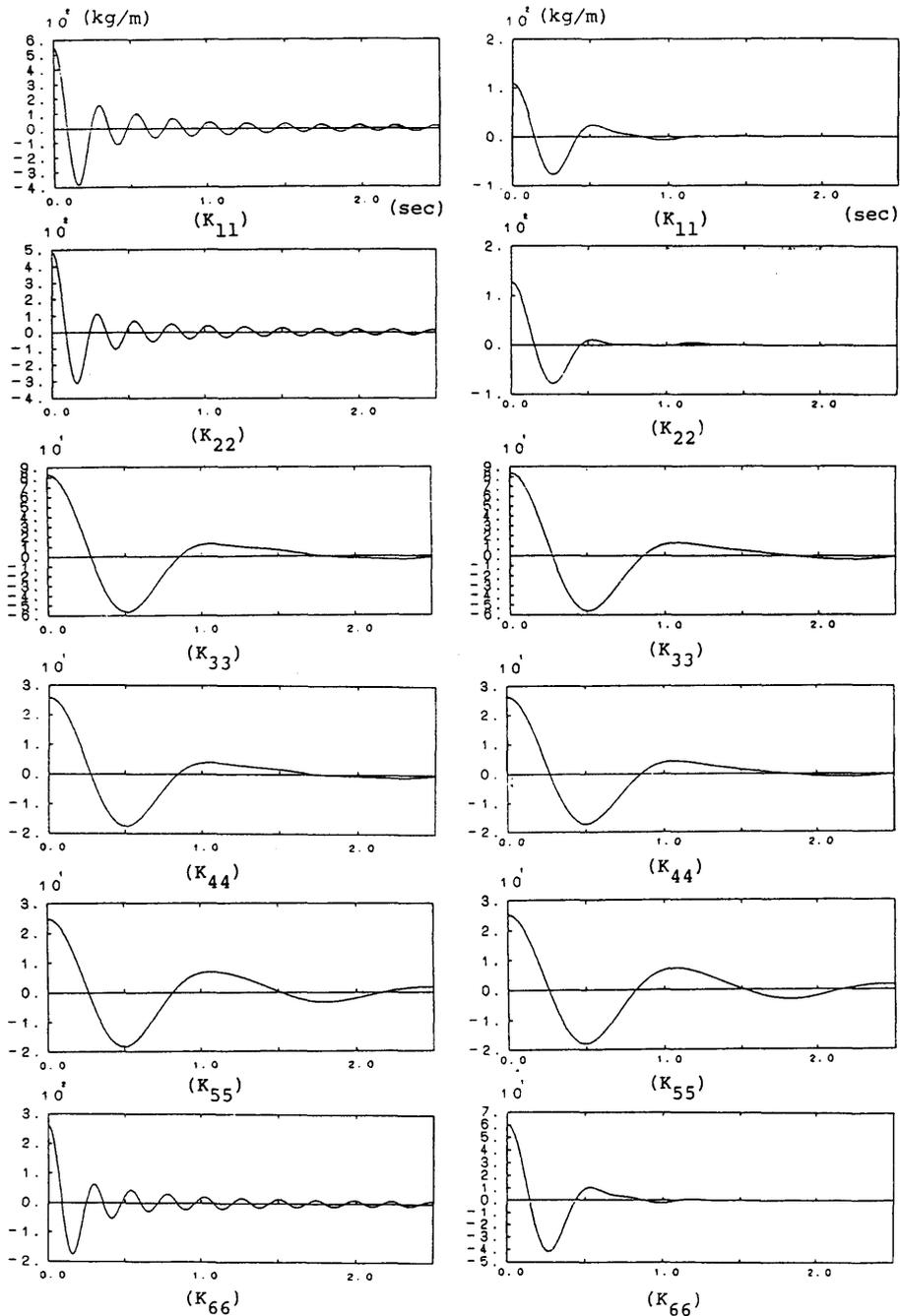
(a) an example in which extrapolation of the calculated values of b_{kj} 's diverge at $\omega \rightarrow \infty$

Fig.3.4(a) Check of calculated damping coefficients



(b) an example in which extrapolation of the calculated values of b_{kj} 's converge to zero at $\omega \rightarrow \infty$

Fig.3.4(b) Check of calculated damping coefficients



(a) calculated by use of b_{kj} 's shown in Fig.3.4 (a)

(b) calculated by use of b_{kj} 's shown in Fig.3.4 (b)

Fig.3.5 Memory effect function

Fig.3.3(b)に示す値(Hooft法⁴⁾的な考え方により各要素部材の流体力を単純に加算したもの)を用いて計算した結果である。Fig.3.2, Fig.3.3に示したように流体力には大きな差があるにもかかわらず、運動応答の場ではあまり大きな差は認められない。この事実はよく知られており、Hooft法が簡便でしかも精度が落ちないため、セミサブリグの運動応答の推定によく用いられている理由である。

3.3.2 不規則波中の運動

不規則波中の運動シミュレーションへの適用例として、日本造船研究協会RR743分科会との共同研究により当所で実施したセミサブリグの斜め不規則波中実験($\chi = 33.7\text{deg}$)(波:ISSC型スペクトラム($H_{1/3} = 16\text{cm}$, $T_{1/3} = 1.4\text{sec}$), 風:波と同方向で定常風(4.1m/sec))(供試模型の概要, 実験時の主要目はFig.3.8, Table3.1参照)結果⁶⁾との比較をFig.3.9(a)~(i)に示す(計算と実験を同じスケールで示している)。

計算に用いた波は、実験で計測された波の時系列をFFT解析し、各周波数成分の振幅、位相を求め、(2.4)式により合成した。ただし、計算時間の都合上、FFT解析で得られた1024成分のうち、パワーの大きな71成分だけを用いた。また、計算は過度運動を抑えるため、最初の10秒間は振幅を徐々に上げてゆき、10秒後に実験と同じ振幅になるようにした。

Fig.3.9(a)に示すように波の時刻歴は実験の波をほぼ再現しているが、運動、係留力の時刻歴については実験との一波、一波の対応は必ずしも十分ではない。係留力については、動的な力を考慮することにより更に精度を上げることができると考えられる。

3.4 過度運動

3.4.1 自由動揺

まず単純な過度運動の計算例として、4隅を係留されたセミサブリグの自由動揺を計算した結果を示す。

ここで示すような過度運動は、波浪中運動のような外力による強制動揺でないため、付加質量の推定誤差が直接動揺周期の差として現れ、減衰力も応答振幅に大きな影響を及ぼす。従って、このような過度運動の計算に際しては、流体力を各要素に働く流体力の足し合わせで求めるのでは不十分で、更に精度の良い流体力を使用する必要がある。以下に示す過度運動の計算にあたっては、Fig.3.3(a)に実線で示した流体力の値を用いた。

第2章で述べたように本プログラムでは、造波減衰以外の減衰力を、抗力係数に速度の2乗をかけた形で

考慮できるようになっている。Fig.3.1に示すモデルについて、 C_D を5.0(初期変位1.08cm)として自由上下揺れを計算した結果をFig.3.10(a)に示す。この自由上下揺れの固有周期は3.29秒($f = 0.303\text{Hz}$)で、Fig.3.2よりわかるように、この周期における造波減衰は非常に小さく、減衰の要因として造波減衰だけを考える場合にはほとんど振幅の減衰がみられない。 C_D を大きくすると減衰率は大きくなるが、 $C_D = 5.0$ でも依然として実験結果に比べて減衰は小さい。ちなみに、自由上下揺れ試験¹⁾の結果得られた C_D は1.73である。実験から得られる C_D よりも大きな値を計算に用いても、なお実験に比べて減衰率が小さいのは、次のような理由によるものと考えられる。

即ち、自由動揺試験において計測された減衰力を、速度の2乗に比例する成分と、速度に比例する成分に分けると、速度に比例する成分も線形ポテンシャル理論で計算される造波減衰力よりかなり大きな値が得られ、粘性等の影響は速度に比例する減衰力にも含まれることがわかる。また、セミサブリグの自由動揺のような周期の長い運動の場合には、速度が小さいため、減衰力として速度の2乗に比例する成分よりも、速度に比例する成分の方が支配的な場合も考えられる。具体的には、速度に比例する減衰力を $2\alpha x$ 、速度の2乗に比例する減衰力を $(1/2)\rho SC_D \dot{x}^2$ としたとき、 $[2A\alpha\omega / (1/2)\rho SC_D \omega^2 A^2] (= \epsilon)$ (A は動揺振幅)が1より大きいときは速度に比例する減衰力が、逆に ϵ が1より小さいときは速度の2乗に比例する減衰力が卓越する。Fig.3.10(b)はFig.3.10(a)に示した計算と同じ条件で、初期変位を10倍(10.8cm)にしたときの自由上下揺れのシミュレーション計算結果を示す。動揺初期の振幅の大きい間は、 $\epsilon < 1$ であるため速度の2乗に比例する減衰力の効果が顕著である。

振幅の小さいときは速度に比例する減衰力も考えなければならぬことがわかったので、この影響を本計算において考慮するために次のような修正を行った。即ち、自由動揺試験により得られた速度に比例する減衰力と計算により求めた固有周期における造波減衰力の差を粘性減衰力であると仮定して、すべての ω に対してその値をFig.3.2に示した造波減衰力に足し合わせた。次にそのようにして得られた減衰力を用いて(2.2)式により $K_{k,j}$ を求め、このメモリー影響関数 $K_{k,j}$ を使って自由上下揺れを計算した(粘性に基づく流体力のメモリー影響を(2.2)式で考慮することは厳密でないが、本計算では速度に比例する減衰力の効果をプロ

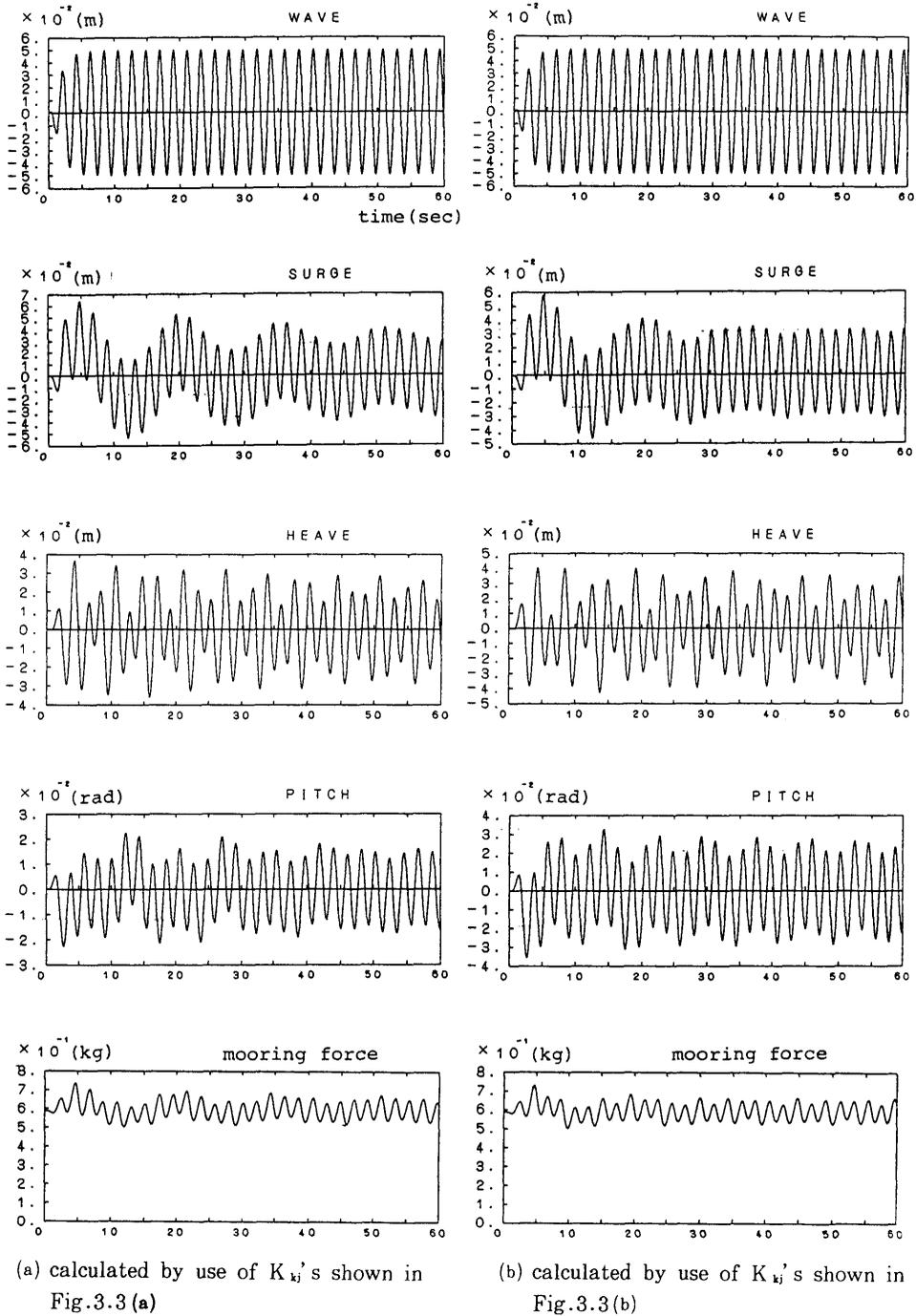


Fig.3.7 Responses in regular waves

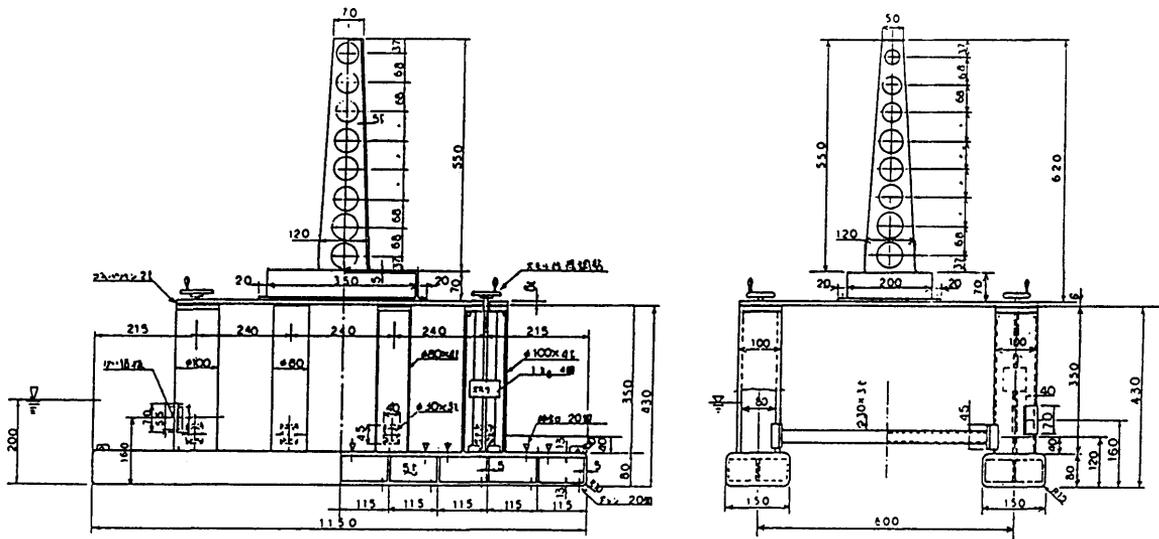


Fig.3.8 General view of an experimental model

Table 3.1 Particulars of the experiment

喂水	(m)	0.20	T surge (sec)	no data
排水量	(kg)	33.4	T sway (sec)	no data
k_{xx}	(m)	0.350	T heave (sec)	2.48
k_{yy}	(m)	0.331	T roll (sec)	8.10
k_{zz}	(m)	0.405	T pitch (sec)	8.59
KG	(m)	0.191	T yaw (sec)	6.69
GM	(m)	0.01, 0.005, 0	α surge (sec^{-1})	no data
Line length	(m)	9.85	α sway (sec^{-1})	no data
Line weight (g/m) (in air)		41.6	α heave (sec^{-1})	0.0528
			α roll (sec^{-1})	0.2916
Line weight (g/m) (in water)		35.5	α pitch (sec^{-1})	0.1595
			α yaw (sec^{-1})	0.0942

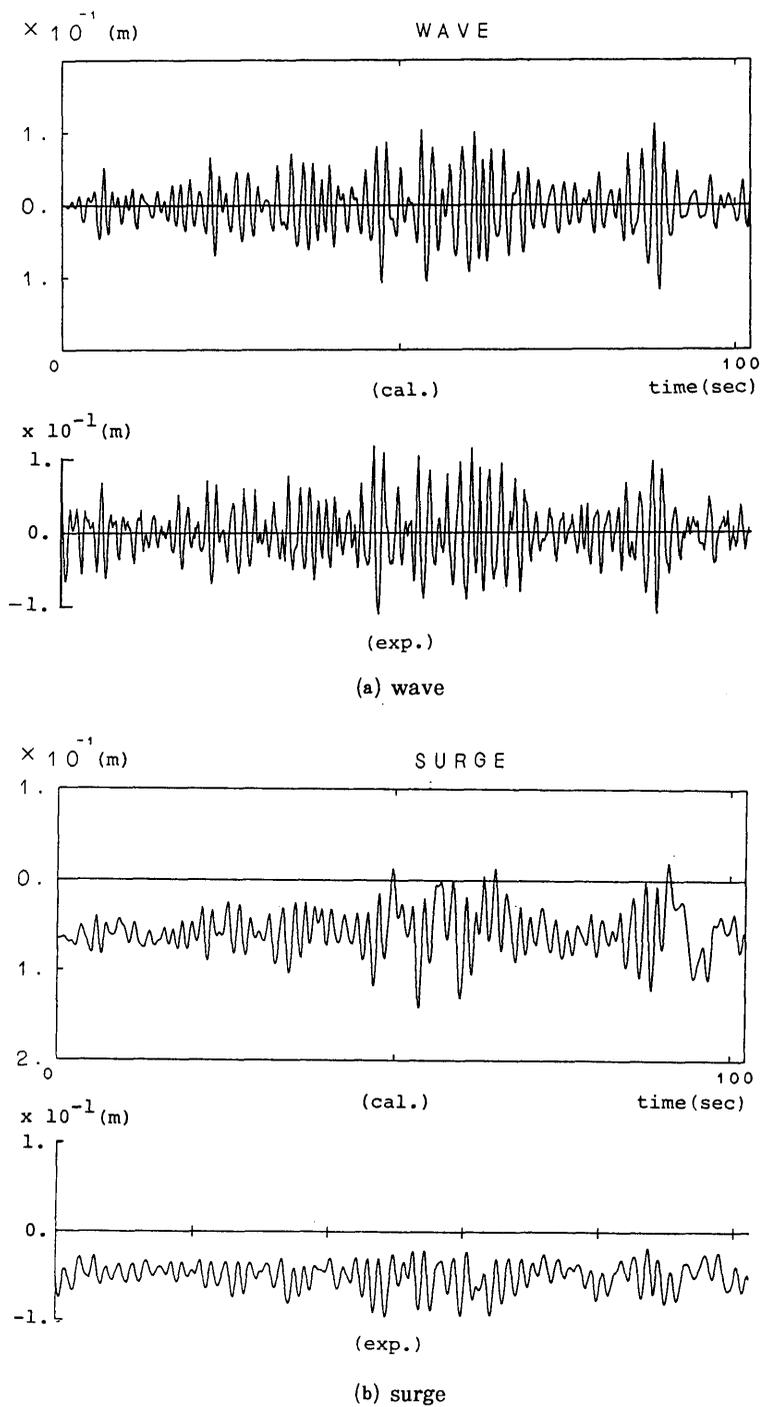
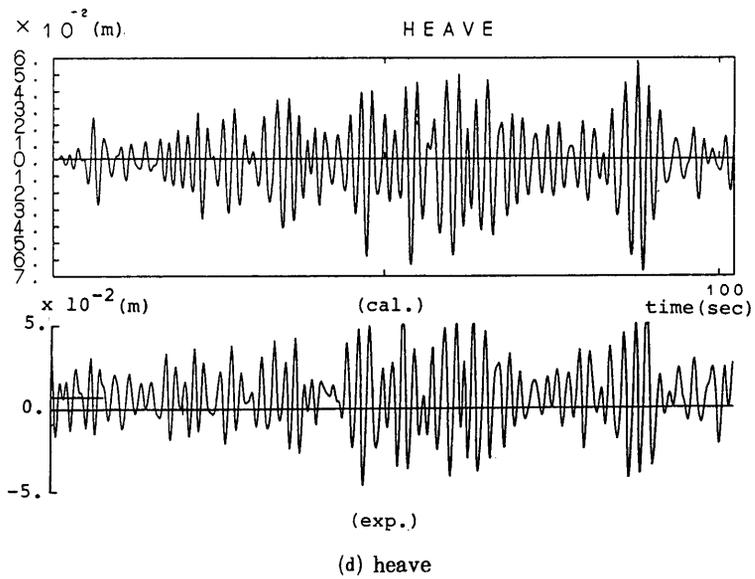
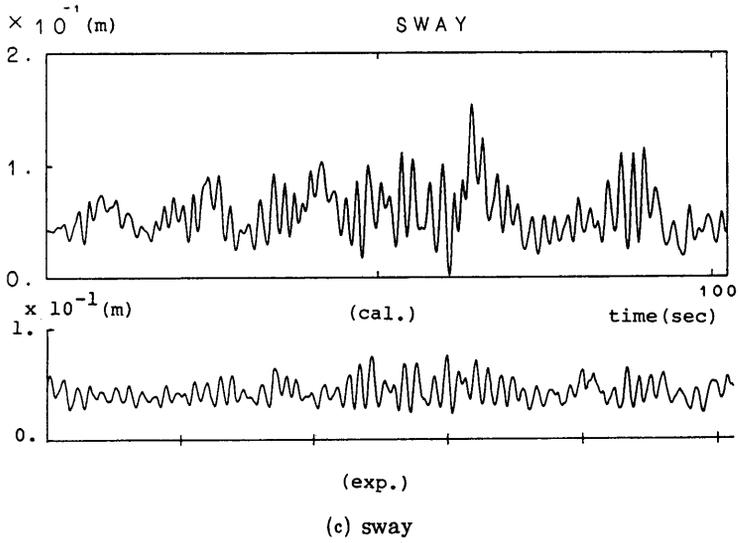
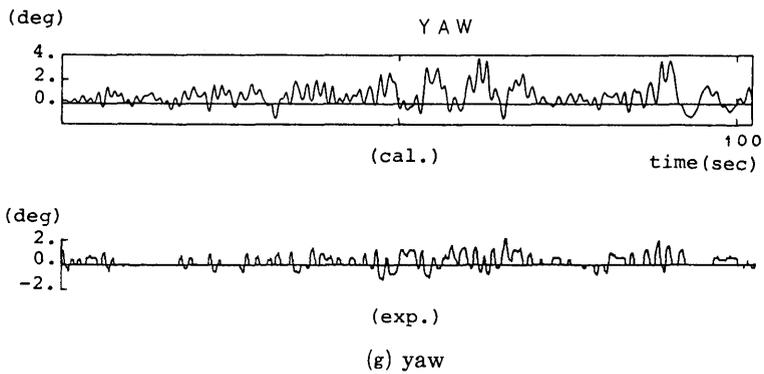
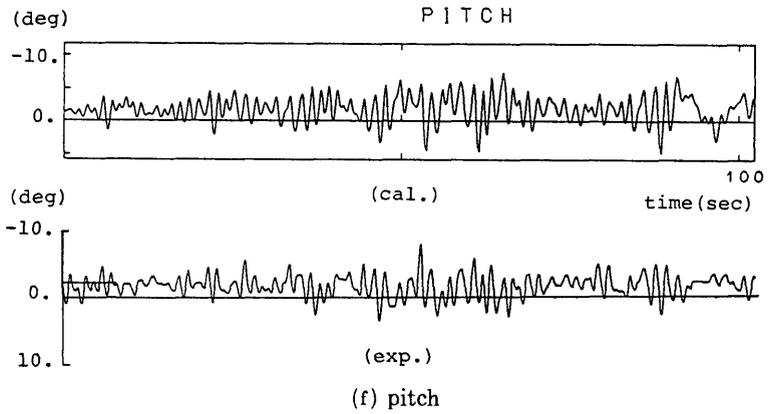
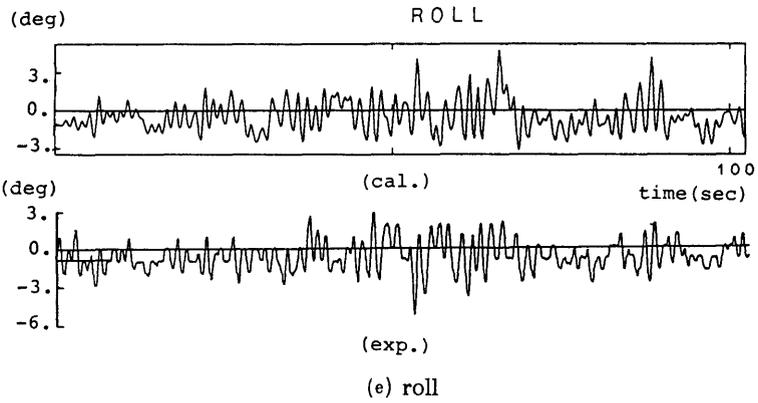
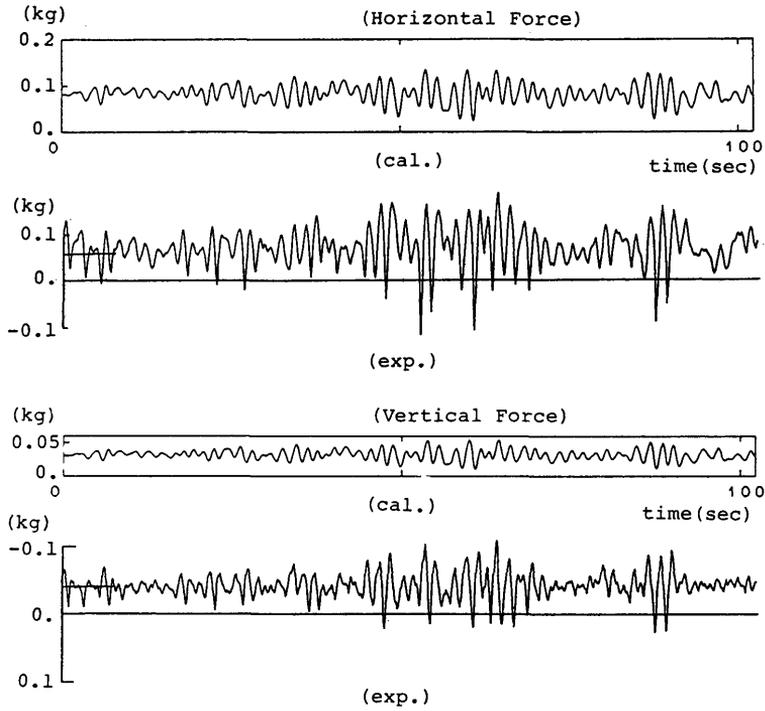


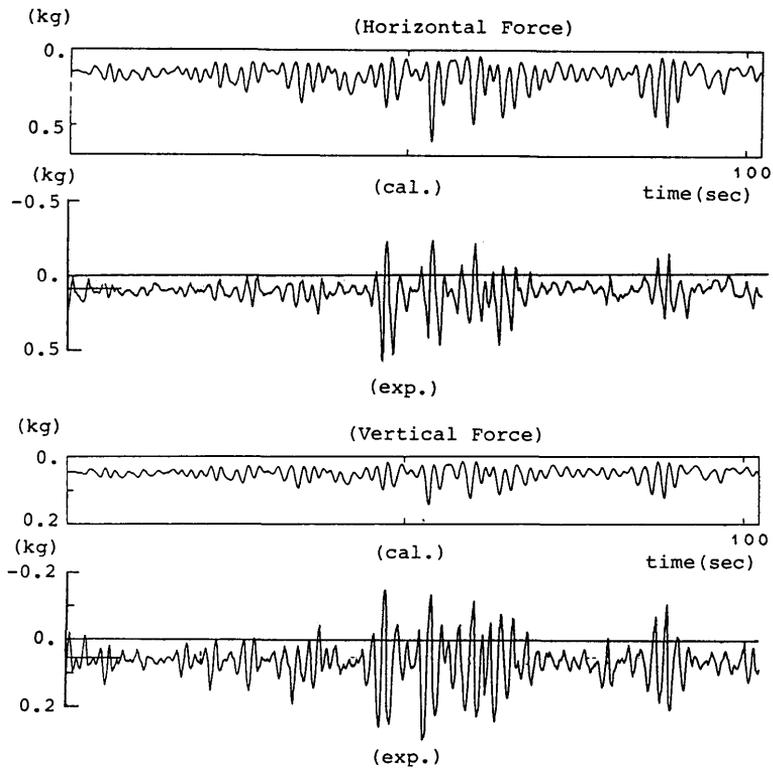
Fig.3.9 Responses in oblique irregular waves







(h) mooring force on a leeward line



(i) mooring force on a windward line

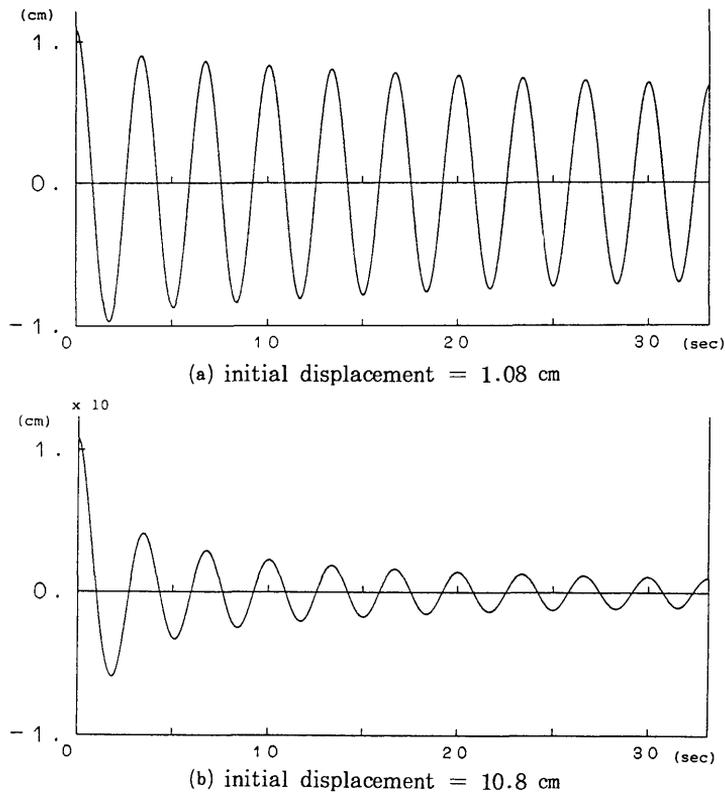


Fig.3.10 Free heave oscillation($C_D=5.0$)

グラムを改造する事なく調べるために便宜上このようにした)。結果をFig.3.11に示す。速度に比例した減衰力の効果が明白であるが、振幅が小さくなる領域においては、なお実験の減衰の方が大きく、また周期も多少異なる。更に実験との良い一致を得るためには、振幅の減衰率に関しては減衰力のモデル化の再検討が必要であり、周期の変化に関しては静水圧あるいは係留系に基づく非線形復原力の考慮方法の検討が必要である。

Fig.3.12(a), (b)には、各々Fig.3.11に示した計算と同様の方法で計算した前後揺れ、縦揺れの自由動揺の結果を実験結果¹⁾と比較して示す。実験値との一致はあまり良くないが、セミサブリグの自由動揺は微少な力の差により誘起されるものであり、流体力、係留力、復原力を更に精度良く推定する必要があるものと考えられる。

3.4.2 係留ライン破断後の運動

係留ライン破断後の運動も自由動揺といえるが、破断後は係留に基づく復原力が前後、左右で非対称なもので、6自由度すべてのモードが連成して動揺することになり、挙動のシミュレーションはさきに示した単純な自由動揺よりも複雑である。

Fig.3.13にセミサブリグの4隅にとりつけた計4本の係留ラインのうち、1本が破断した時の運動をシミュレーション計算した結果を実験¹⁾と比較して示す。

減衰力は自由動揺の場合と同様に、速度の2乗に比例する力と共に、自由動揺試験により求められる速度に比例した力を造波減衰力に足し合わせた値を用いた。前後揺れ、左右揺れについては、実験値と計算値の差が非常に大きい。この原因については、いまのところ不明であるが、自由動揺と同様に微少な力の収支に基づく運動であるために、計算法と共に実験法(計測系の摩擦等)も検討する必要があると考えている。

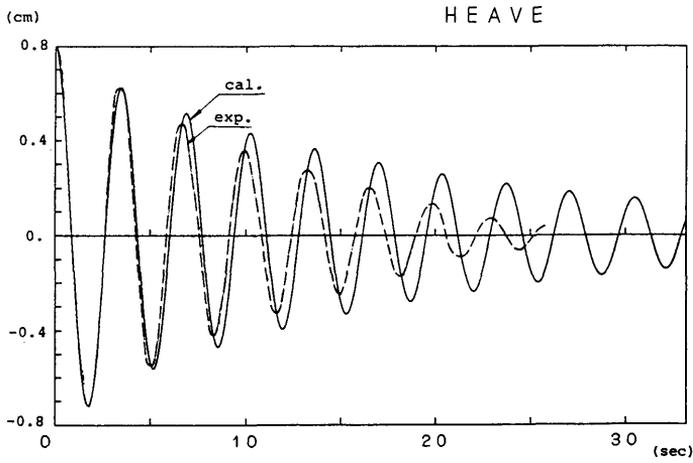
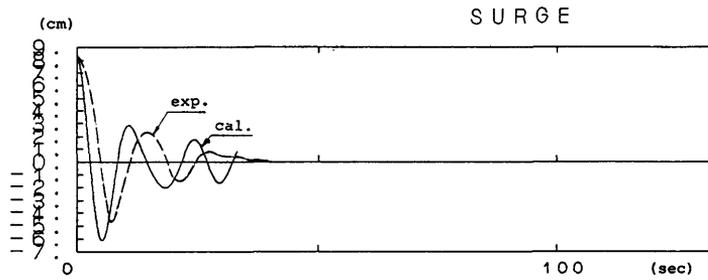
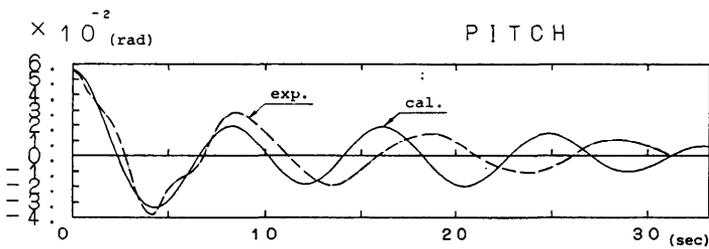


Fig.3.11 Free heave oscillation (comparison with experiments)



(a) surge



(b) pitch

Fig.3.12 Free surge/pitch oscillation

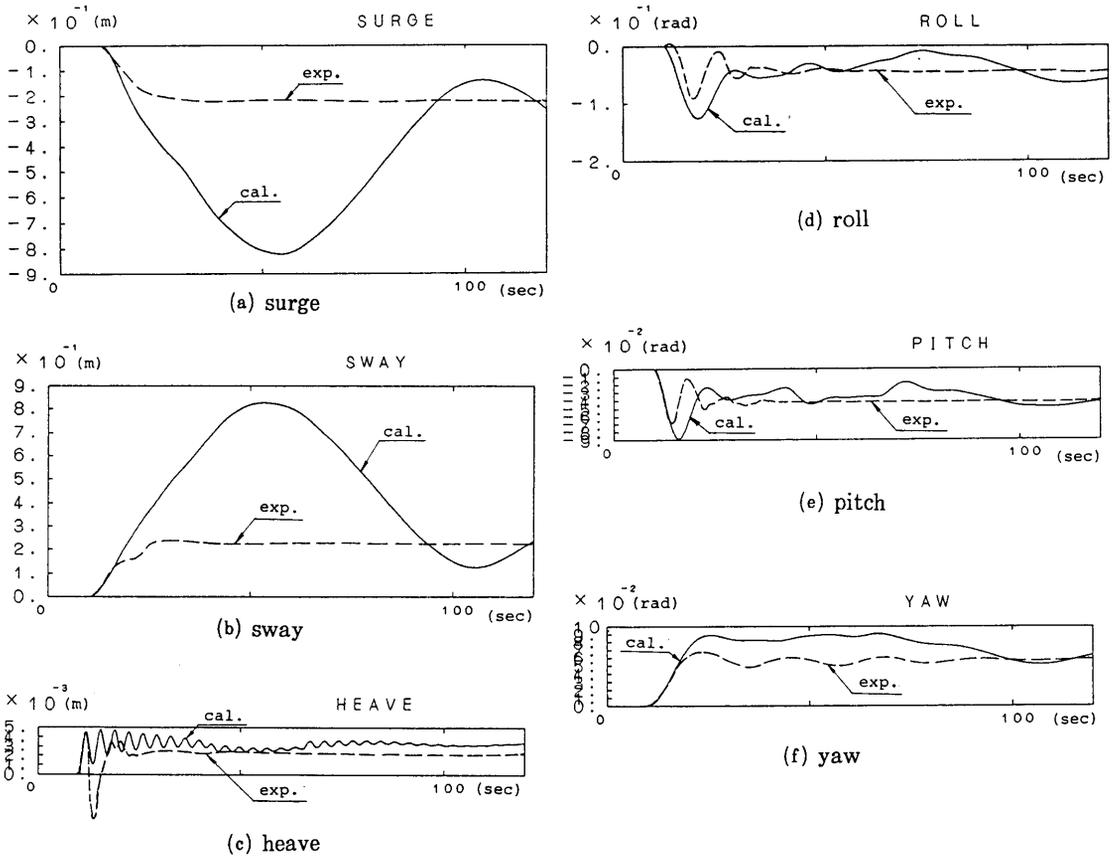


Fig.3.13 Responses after a breaking of a mooring line

3.4.3 曳航ライン破断後の運動

Fig.3.14に示すように、セミサブリグを曳航中、1本のブライドルが突然破断した場合の、セミサブリグの挙動及び残りのブライドルに加わる張力を計算した結果をFig.3.15に示す(ここでsurge, sway, heaveは2.1で述べた空間固定座標系X, Y, Z軸方向の運動を示し, roll, pitch, yawは船体固定座標系(t=0では空間固定座標系と一致)のx, y, z軸廻りの運動を示す)。なお、本計算では曳船の運動は考慮していないため(曳船は被曳船(セミサブリグ)の運動に関わらず一定速度で直進していると仮定)、この結果は水槽試験でセミサブリグを曳引台車で曳航したような場合のシミュレーションと考えることができる。

3.4.4 浸水時の運動

浸水時の運動方程式は

$$(M+at)\ddot{x} + a\dot{x} + C(x) = F \tag{3.1}$$

M: 浮体の質量

a: 単位時間当りの浸水質量

F: 流体力, 浸水重量を含めた外力

であるが、本計算では速度に比例した項(ax)は考慮していない。

Fig.3.16, Fig.3.17に、各々静水中でセミサブリグのローアールの1区画に浸水が定常的(単位時間あたりの浸水量が一定)に起こっている場合、及び規則波(横波)中でコラムの1区画に浸水が定常的に起こっている場合の挙動をシミュレーション計算した結果を実験値¹⁾と比較して示す。

実験、計算からわかるように浸水時の挙動に対する動的な力の影響は小さい。従って、挙動のシミュレーションには付加質量、減衰力等に関連した動的な力より、係留系や静水圧による静的な復原力の精度のよい推定が重要である。特に、セミサブリグのように傾斜

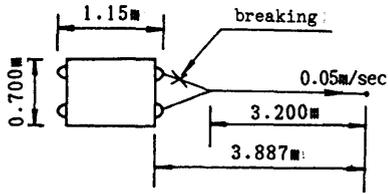


Fig.3.14 Schematic view of a towing

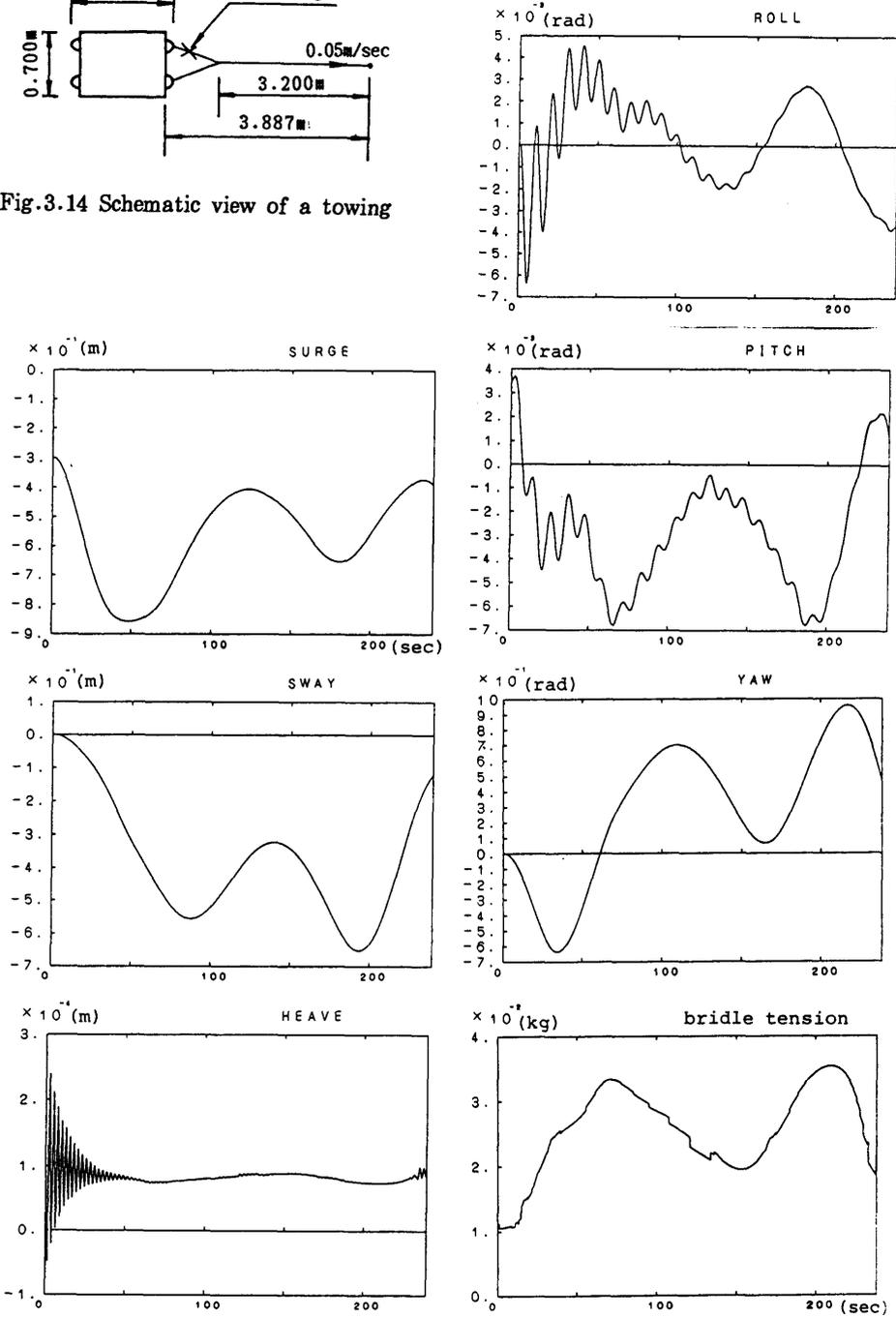


Fig.3.15 Responses after a breaking of a bridle in towing

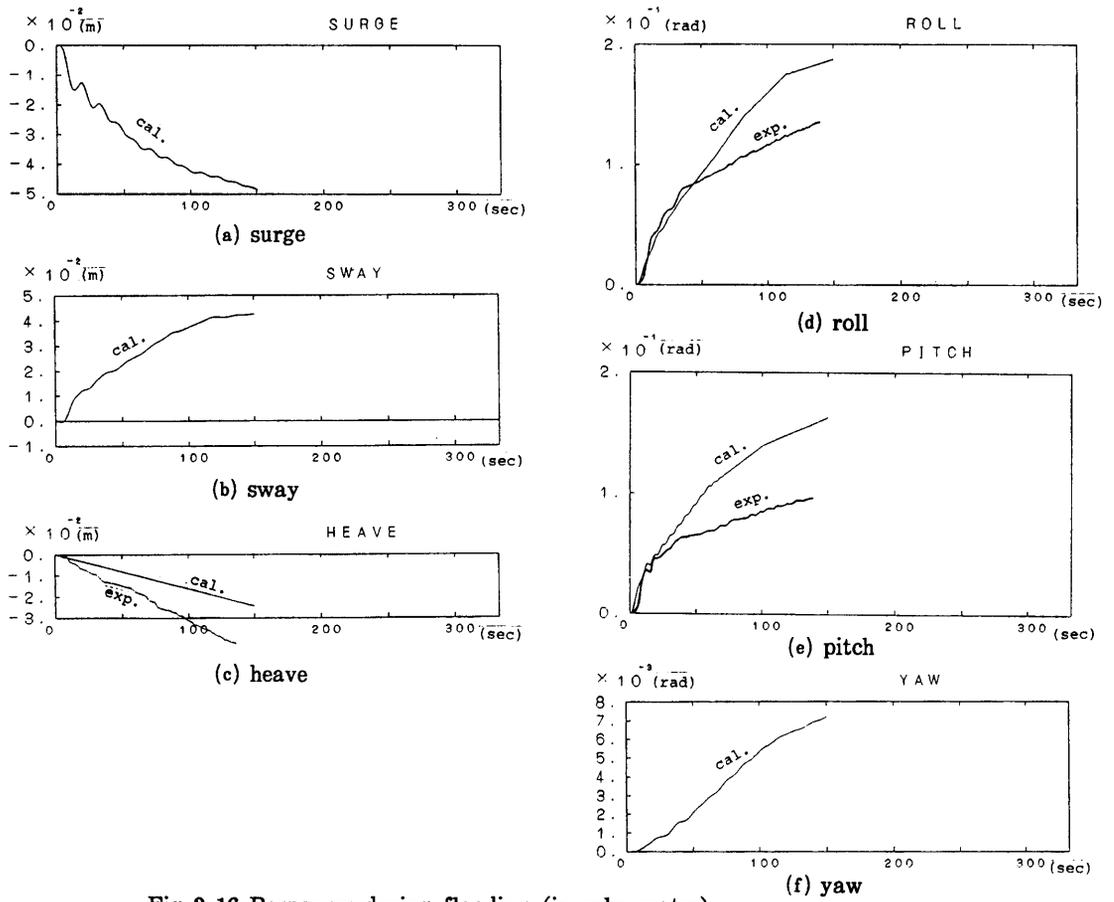


Fig.3.16 Responses during flooding (in calm water)

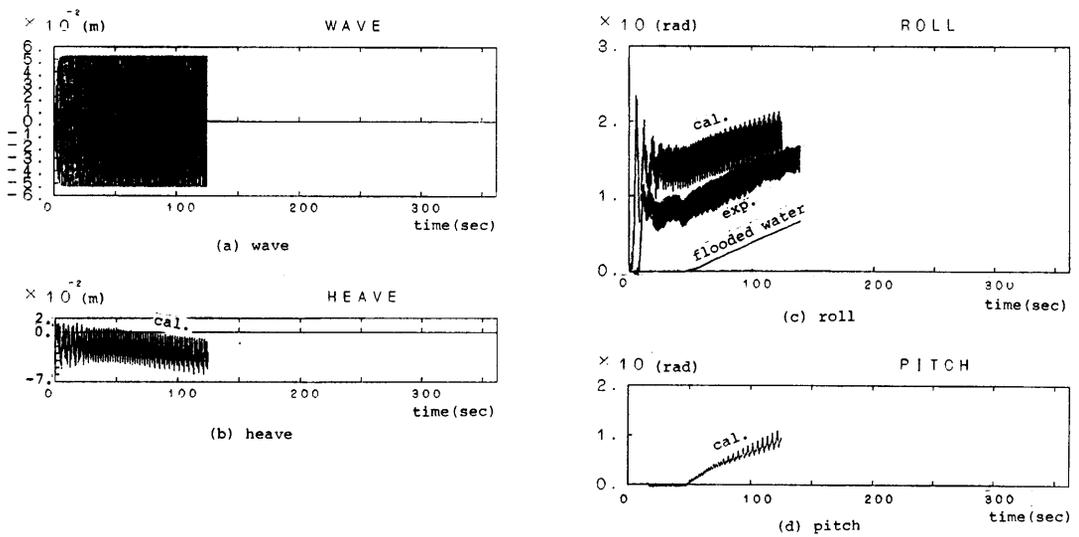


Fig.3.17 Responses during flooding (in beam waves)

に対する復原力の非線形性が大きい場合には、復原力の非線形性を考慮しなければ浸水時の挙動を精度よく推定することができない。

3.5 シミュレーション結果の画像化

本プログラムとは別に、日本造船研究協会(RR743分科会)との共同研究によって、セミサブリグの挙動を画像化するプログラムを(株)数理計画に委託して作成した⁹⁾。このプログラムと本プログラムを組み合わせることにより、時々刻々のシミュレーション計算結果を用いて、セミサブリグの挙動をアニメーションの如く描くことが可能である。

例として、Fig.3.18にセミサブリグの転覆過程を描いたものを示す。

4. 結 言

以上、半潜水型石油掘削船の動的復原性評価プログラムの機能といくつかの適用例について紹介を行なったが、今後のプログラム開発に際して参考になると思われる点を列挙すると、以下ようになる。

- 1) 波、風、潮流等による環境外力((2.1)式の右辺)がない場合の挙動のシミュレーションに際しては、Hooft法では不十分であり、
 - * 動揺周期を正しくシミュレーションするためには、付加質量の精度のよい値を用いることが必要である。
 - * 減衰を正しくシミュレーションするためには、粘性に基づく減衰力として、速度の2乗に比例する力と共に、速度に比例した力の精度のよい値を用いることが必要である。
 - * 浸水時のように準静的な挙動、あるいは大変位を伴うような挙動を正しくシミュレーションするためには、係留系や静水圧に基づく非線形な復原力の精度の良い値を用いることが必要である。
 - * シミュレーション計算との比較に耐える実験データを得るためには、これらの過渡運動が微小な力の収支による運動であるため、高い実験精度が必要である。
- 2) 係留力の推定は、運動計算結果をインプットとする静的カタナリー計算では不十分である。動的な力を考慮する必要があると考えられる。
- 3) メモリー影響関数を造波減衰係数のフーリエ変換によって求める場合には、数値積分の打ち切り点における造波減衰係数のふるまいに十分留意する必要がある。

(200)

なお、本プログラムは冒頭で述べたように(株)日本造船研究協会RR743分科会との共同研究として(株)三井海洋開発に委託して作成したものである。本報告で示した各種計算に際しては、(株)三井海洋開発の沼田敏晴氏をはじめとする方々の多大なる御助力をいただいた。また、2.2で示した流体力の計算には当部の大川技官の作成になる特異点分布法計算プログラムを、3.4.3で示した曳航ライン破断時の計算には当部の星野技官の作成になる曳航ライン張力計算プログラムを使用させていただいた。さらに、前安全性研究室長の足達宏之氏(現在、世界海事大学教授)には、プログラムの開発初期から適切な御指導をいただいた。

各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 高井隆三, 影本浩, 足達宏之, 半潜水型石油掘削船の復原性について(その1: 静的復原性), 船研報告第24巻第6号(1987)
影本浩, 高井隆三, 足達宏之; 半潜水型石油掘削船の復原性について(その2: 動的復原性), 船研報告第24巻第6号(1987)
- 2) Review of the MODU Code, Supplement of the Report of Research Project on the Stability of Semisubmersible MODUs submitted by Japan, (1988)
- 3) J. A. Pinkster: Low Frequency Phenomena Associated with Vessels Moored at Sea, Soc. of Petroleum Engineers of AIME, SPE Paper No.4837 (1974)
- 4) J. P. Hooft; A Mathematical Method of Determining Hydrodynamically Induced Forces on a Semi-submersible, Trans. SNAME, Vol.79 (1971)
- 5) van Oortmerssen G.; The Motion of a Moored Ship in Waves, NSMB Report No. 510 (1976)
- 6) 船舶技術研究所; セミサブ型リグの水槽における総合模型実験報告書(1989)(日本造船研究協会RR743分科会・船舶技術研究所共同研究報告書)
- 7) (株)三井海洋開発編; 浮体構造物動的復原性評価プログラムマニュアル(1986)
- 8) (株)数理計画編; 海洋構造物図示プログラム使用説明書(1986)

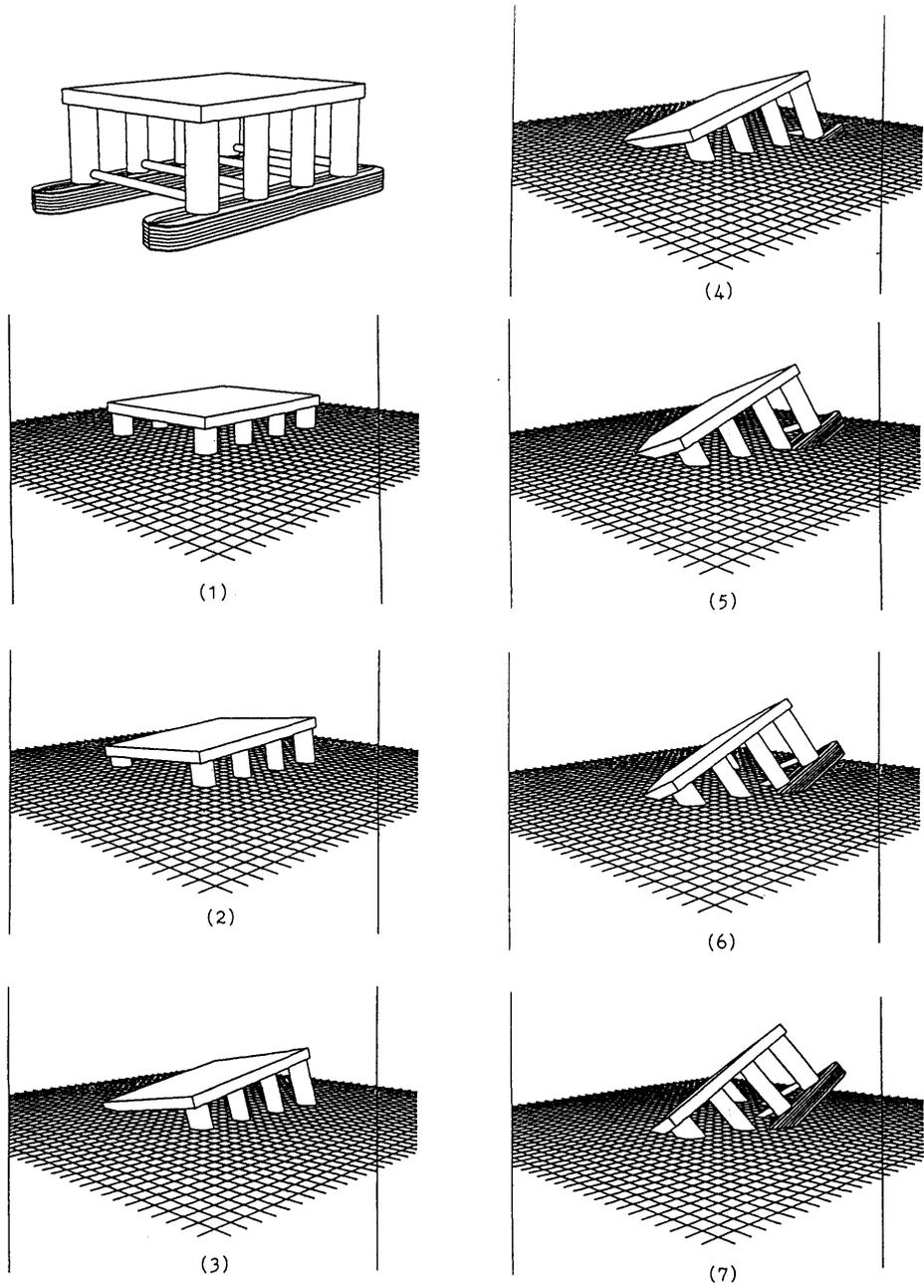


Fig.3.18 Visualization of simulation results