研　究　速　報
特　集　5
UDC 627.034.2：551.46

多方向海洋波中の浮体の挙動

The Behavior of Floating Body in Multi-Directional Waves

宮 島 省 吾*・趙　孝 済**・前 田 久 明*
Shogo MIYAJIMA, Hyo Jae JO, Hisaaki MAEDA

1．緒　　　言

近代物質文明の発展に伴い指数関数的にエネルギー需要が増大し，海洋石油の開発が急務とされ海洋石油掘削・生産のための海洋構造物が多数稼働するようになった．最近はさらに，マンガン団塊，深層水利用，海洋空間利用のための多種多様な海洋構造物が開発され，実用化されつつある．しかし，従来の船舶と異なる形状を持つ海洋構造物は経験が浅いこともあって，稼働中の事故が多発し貴重な人命が失われてきた．

そこで，各国研究機関は海洋構造物の安全という観点からその復原性および安全性基準を見直すために多数の研究を行った．1989年には移動式海底資源掘削船構造設備規則（IMO MODU Code）が改定された．その規則では，半潜水式構造物の復原性に対してはその現象の複雑さのためにすべて傾斜試験が必要になるなど，従来の規則に比べてかなり厳しいものになっている．しかしながら，それらの規則の中では入射する海洋波の方向性は考慮されていない．

そこで著者らは，海洋波の方向性が浮遊海洋構造物の運動モードにどのような影響を及ぼすかを明らかにすべく研究を開始した．そのためにまず多方向波中での浮遊海洋構造物の応答を時間領域で計算するシミュレーションプログラムを開発した．また，千葉実験所の2方向波造波水槽での応答実験と計算結果を比較することにより，シミュレーションプログラムの妥当性を確認した．そしてそのプログラムを用い，多方向波の方向分布や主方向を変えながら浮遊構造物の運動を計算し，1方向不規則波の場合の応答と比較して入射波の方向性が浮遊海洋構造物の応答に及ぼす影響を検討した[1)～5)]．

本報では，半潜水式海洋構造物を例に多方向波中での1次応答に着目して報告する．

*東京大学生産技術研究所　第2部
**釜山大学非常勤講師（元大学院学生）

2．多方向波の表現

一般的な多方向波は異なる方向に異なる周波数を持って進行する規則波の線形重ね合わせによって表現できると仮定すれば，

$$\zeta(x,\ y,\ t) = \sum_{N}^{i=1} \sqrt{2S_\zeta(\omega_i,\ \theta_i)\,\Delta\omega_i\Delta\theta_i}\,cos(k_i x\,cos\theta_i + k_i y\,sin\theta_i - \omega_i t + \varepsilon_i) \qquad (2.1)$$

のようになる．ただし，位置的，時間的に定常性を持たせるために各方向毎に同じ周波数の波が重ならないようにした[6)]．方向波のスペクトル $S_\zeta(\omega,\ \theta)$ は，

$$S_\zeta(\omega,\ \theta) = D(\omega,\ \theta)S_\zeta(\omega) \qquad (2.2)$$

のように，方向分布関数 $D(\omega,\ \theta)$ と1次元波スペクトル $S_\zeta(\omega)$ を用いて表わすことができる．方向分布関数の一般的なモデルは周波数に独立な *cos* 関数で次のように表すことができる．

$$D(\theta) = \frac{\Gamma(S+1)}{\sqrt{\pi}\,\Gamma(S+1/2)}\,cos^{2S}(\theta-\theta_0) \qquad (2.3)$$

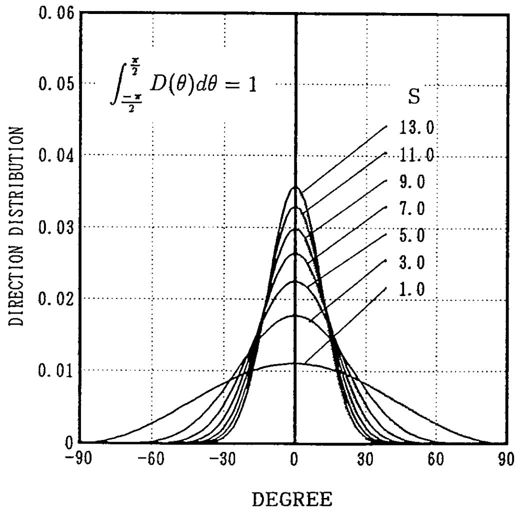

Fig. 2-1　Directional distribution function

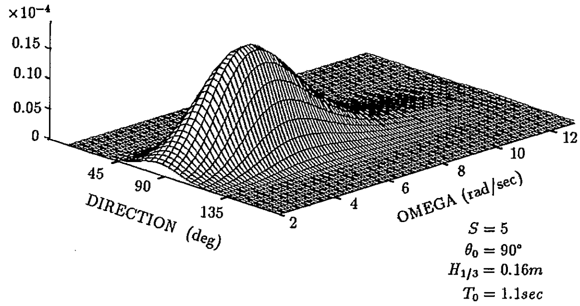

Fig. 2-2　Directional Wave Spectra for Wave Simulation

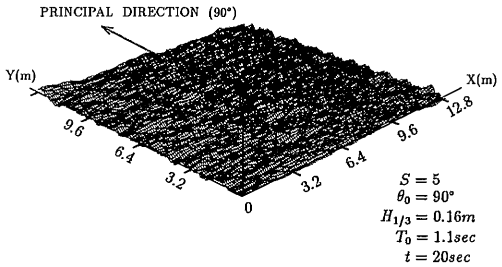

Fig. 2-3　Simulated Directional Irregular Waves

ただし，θ_0は進行波の主方向を表し，Ｓは方向分布の広がりを表すパラメータであり，S→∞になると１方向波，すなわち長波頂波になる．方向分布関数の一例をＳを１から13まで変化させて Fig. 2–1 に示す．Fig. 2–2 に方向波スペクトルの一例を，Fig. 2–3 にそこから作成した擬似波面を示す．

3．時間領域シミュレーション

3.1　運動方程式

座標系と３次元特異点分布法のための要素分割を Fig. 3–1 に示す．対象とする構造物は２ロワーハル，８カラムの半潜水式海洋構造物を１/100模型スケールで考える．細長い部材で構成された構造物の運動を推定する場合，粘性減衰力等の非線形流体力も考慮して時間領域で解析する方法が最も厳密である．そこで本研究では流体力としてメモリー影響関数と運動速度との畳み込み積分を用いた項と，運動速度の２乗に比例する抗力項を考慮した時間領域の運動方程式を採用した．

$$\sum_{6}^{j=1}[\{M_{kj}+m_{kj}(\infty)\}\ddot{x}_j(t)+\int_0^\infty K_{kj}(t-\tau)\dot{x}_j(\tau)d\tau+b_{okj}\dot{x}_j(t)|\dot{x}_j(t)|+C_{kj}x_j(t)]=F_k(t)$$
$$(k=1, 2, \ldots, 6) \qquad (3.1)$$

x_j：浮体重心の各方向変位
M_{kj}：浮体の広義の質量
$m_{kj}(\infty)$　：周波数無限大での広義の付加質量
K_{kj}：メモリー影響関数
b_{okj}：粘性減衰力係数

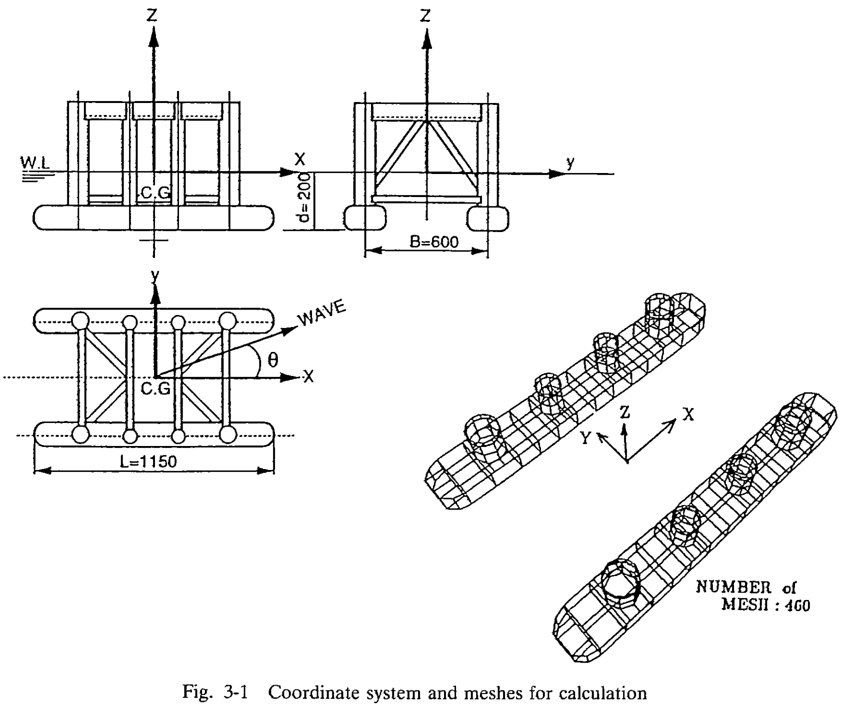

Fig. 3-1　Coordinate system and meshes for calculation

C_{kj}：静的復原力に係留系からの反力を加えた復原力係数

$F_k(t)$：方向波中での波強制力

メモリー影響関数は周波数領域で計算した造波減衰力係数 $b_{kj}(\omega)$ を用いて次式で計算できる.

$$K_{kj}(t)=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} b_{kj}(\omega)\cos\omega t\,d\omega \qquad (3.2)$$

また，粘性減衰力係数は水槽での自由動揺実験から粘性減衰力を推定して計算に用いた.

3.2　波強制力

本研究では，インパルス応答関数を用いて波面変位との畳み込み積分を行うことにより波強制力の時系列を求めた．方向波中での波強制力は Volterra Series の2次項まで取って，任意のN個の方向波中での波強制力に離散化すれば次式のように表せられる.

$$F(t)=\sum_{i=1}^{N}\int_{-\infty}^{\infty} h^{(1)}(\tau, Xi)\,\zeta(t-\tau, Xi)\,d\tau$$
$$+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\iint_{-\infty}^{\infty} h^{(2)}(\tau_1, \tau_2, Xi, Xj)\,\zeta(t-\tau_1, Xi)$$
$$\zeta(t-\tau_2, Xj)\,d\tau_1 d\tau_2 \qquad (3.3)$$

ここで $h^{(1)}$，$h^{(2)}$ は各々1次及び2次のインパルス応答関数であり，1次，2次の伝達関数によって次式のように与えられる.

$$h^{(1)}(\tau, X)=\frac{1}{2\pi}\iint H^{(1)}(\omega, \theta)\,e^{i(kx+\omega\tau)}\,d\omega d\theta$$
$$h^{(2)}(\tau_1, \tau_2, X_1, X_2)=\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2\iiiint H^{(2)}$$
$$(\omega_1, \omega_2, \theta_1, \theta_2)\times e^{i\{(k_1X_1+\omega_1\tau_1)+(k_2X_2+\omega_2\tau_2)\}}$$
$$d\omega_1 d\omega_2 d\theta_1 d\theta_2 \qquad (3.4)$$

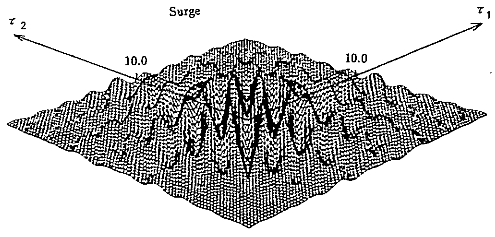

Fig. 3-2 Quadratic Impulse Response Functions (*Surge*, $\theta=35°$)

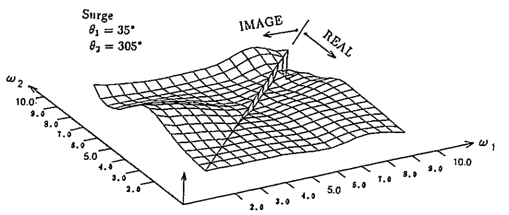

Fig. 3-3 Quadratic Transfer Function of Surge Motion ($\theta_1=35°$, $\theta_2=305°$)

(3.3) 式の右辺第1項が1次の波強制力であり，第2項が2次の波強制力で定常成分と長周期変動成分が含まれる．さらに，粘性による定常漂流力も Morison 式の粘性抗力項から推定した．Fig. 3−2 に Surge の2次インパルス応答関数を，Fig. 3—3 に Surge の2次伝達関数を示す.

4．結果および考察

4.1　2方向波中での運動

多方向不規則波中での浮体運動シミュレーション法の妥当性の確認のために2方向波発生用造波水槽で実験を行い，浮体運動の実験結果とシミュレーション結果を比

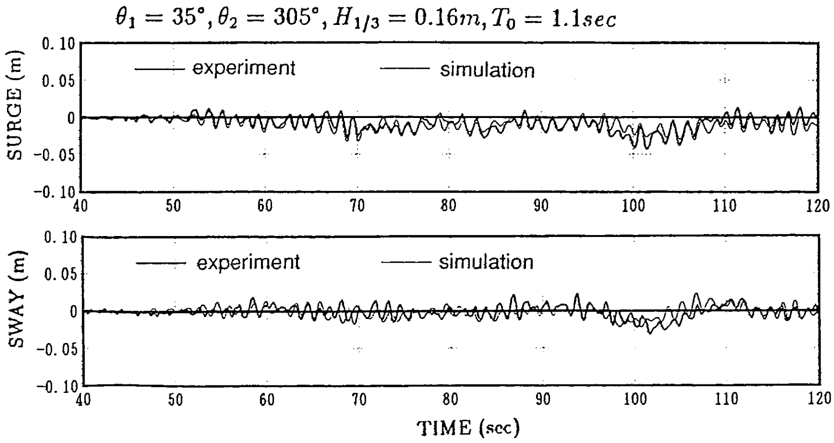

Fig. 4-1 Comparison of Time Histories of Motions in 2 Directional Irregular waves

研　究　速　報

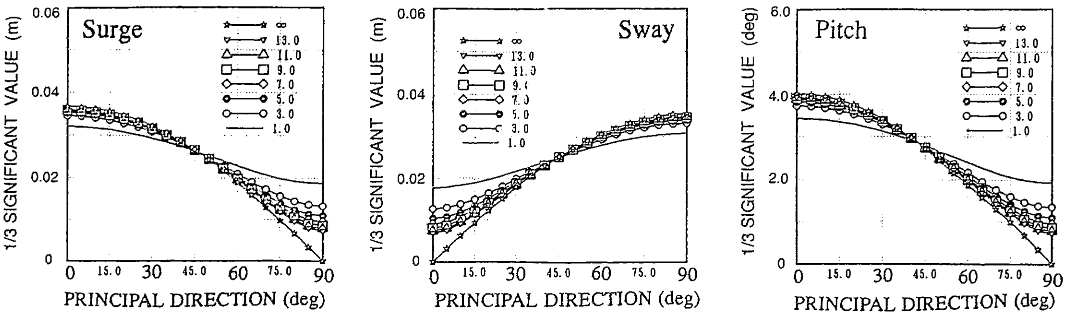

Fig. 4-2　Significant Values of Motions for Various Principal Directions and parameters of direction function

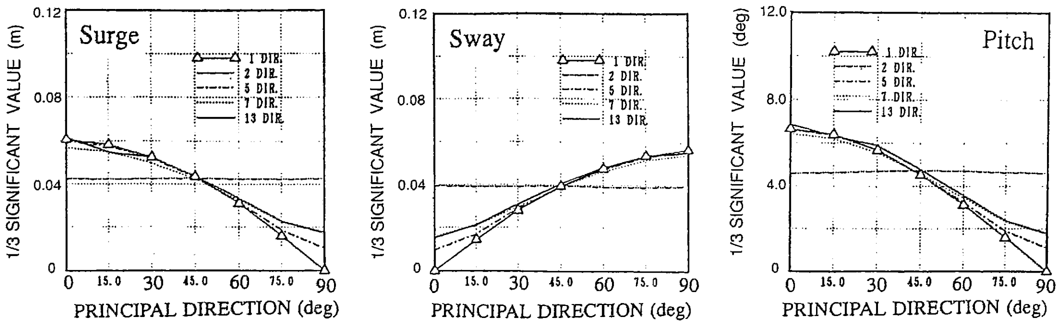

Fig. 4-3　Significant values of motions for various principal directions and number of discrete wave directions

較した．その結果，時系列でも，スペクトル解析結果でも両者は良い一致を示し，シミュレーション法の妥当性が確認された．Fig. 4−1 に 2 方向不規則波中の浮体運動の両者の時系列を比較して示す．

4.2　多方向波中での運動

波の主方向を 0 度から90度まで変化させながら浮体運動の有義値に対するパラメータＳの影響を調べた．36方向波中でＳを 1 から13まで変化させた時の各モードの運動の有義値をＳ＝∞（1 方向波）の場合と比較して Fig. 4−2 に示す．Fig. 4−3 に成分方向波の数を 1 から13方向まで変えた場合の各モードの運動の有義値を示す．13方向まで考えると 1 次応答の有義値は収束し，多方向波の表現として使えることがわかる．なお，Fig. 4−3 の場合，方向波の分布は主方向の±90度に展開しており，パラメータＳは 5 である．以上の結果から，たとえば正面波（主方向 0 度）で波の方向性を考えると，主方向モードである Surge，Pitch の運動は小さくなるが 1 方向波中では現れない運動モード（Sway，Roll）も出現することがわかる．

5．結　　　言

多方向波中での浮体運動を推定する時間領域シミュレーション法を開発し，半潜水式海洋構造物を例に浮体運動におよぼす波の方向性の影響を調べた．その結果，浮体の 1 次応答は波の方向性を考えると一方向波の場合に比べて主方向モードの運動が小さくなる場合もあるが，一方向波のみでは現れないモードの運動が発生する場合があることがわかった．今後の係留設計等に注意を要する問題である．

（1992年 6 月25日受理）

参　考　文　献

1)　前田，趙，宮島：方向波中での半潜水式海洋構造物の安全性に関する考察，関西造船協会誌第215号，1991.3
2)　趙，前田，宮島：多方向波中での半潜水式海洋構造物の長周期運動に関する研究，関西造船協会誌第217号，1992.3
3)　趙孝済：係留式浮遊海洋構造物の応答特性に及ぼす多方向波の影響に関する研究，東京大学博士論文，1991.9
4)　Jo, H.J., Maeda, H. and Miyajima, S.: Effects of Directional Waves on the Behavior of Semi-Submersible Rigs, Practical Design for Ships and Offshore Structures, Newcastle upon Tyne, 1992. 5
5)　H. Maeda, H.J.Jo, S. Miyajima: Effects of Directional Waves on the Low-Frequency Motions of Moored Floating Structures, The 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, 1992. 6
6)　前田，笠原：2 次元不規則水波の発生法と解析法（その 1，その 2），関西造船協会誌，第202号，第204号，1986, 1987