

多方向不規則波浪場における浮揚式発電所の動揺と計算法

池野正明*・丸山康樹**・平口博丸*・鹿島遼一***

1. はじめに

電力中央研究所では、逼迫する電源立地の解決に役立てるため、海上に浮体係留方式で発電所を建設する技術を検討している。この方式の発電所では、係留装置が波浪に十分耐え得るか、浮体の動揺量が許容範囲におさまるかを適切に評価する必要がある。浮体の3次元動揺解析法としては、規則波および一方向不規則波が作用した場合の計算法が提案されている。しかし、実際の海の波は多方向不規則波であるため、この波により生じる浮体の3次元動揺量が一方向不規則波の場合に比べてどのように異なるかを適切に評価する必要がある。

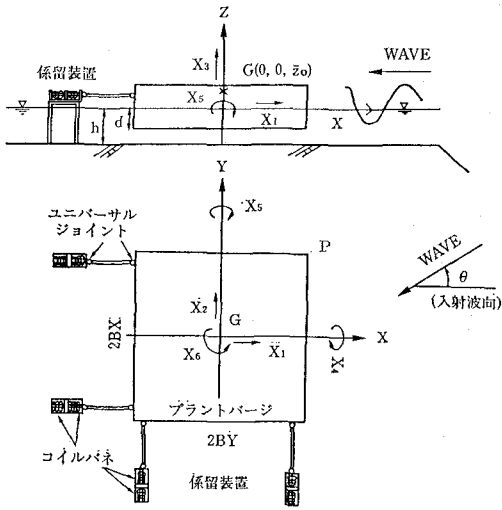
本研究は、多方向不規則波浪場における浮体の3次元動揺計算法を開発し、これと多方向不規則波を用いた模型実験とにより、波浪外力の方向分散性が、発電所搭載浮体の動揺に及ぼす影響を検討したものである。

2. 多方向不規則波浪場における浮体の動揺解析法

波浪外力と係留力の線形性を仮定して、定常解析により入射波各成分波に対する浮体運動の周波数・波向応答関数（単位入射波に対する動揺の振幅と位相）を算定し、これと成分波の水面変動の複素フーリエ係数を基に、逆フーリエ変換により動揺時系列を求める。この応答関数は、規則波が作用した場合の境界要素法（直接法、清川ら、1983）を用いた3次元動揺解析により、作用波の周波数と波向を変化させて算定する。入射波の各成分波に対する動揺は、以下の2種類の方法を用いて合成する。

（1）シングルサメーション法（SS法）

入射波の水面変動を周波数が異なる N_f 個の成分波に分割し、各周波数成分について1つの代表波向を選定する。次に、この成分波の複素フーリエ係数と、周波数・波向の組合せに対応した浮体運動の応答関数との掛け合わせにより、各周波数につき1つの波向に対する動揺成



図一1 浮体の動揺6成分の定義

分で代表させる方法である。この場合、動揺時系列は次式で表わされる。

$$X_j(t) = \text{Real} \left[\sum_{l=1}^{N_f} H_l(f_l, \theta_l) \cdot \hat{X}_j(f_l, \theta_l) \cdot e^{i2\pi f_l t} \right] \quad (j=1 \sim 6) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 t は時間、 X_j は動揺時系列であり、添え字 j は1~6が図一1に示す、Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw の運動6成分を表わす。 f は周波数、 θ は波向、 $\hat{X}_j$ は f と θ に対応する動揺の応答関数、添え字 l は成分波の周波数番号である。 H_l は座標原点における入射波のうち f と θ に対応する成分波の複素フーリエ係数であり、SS法の場合次式で表わす。

$$H_l(f_l, \theta_l) = a_l (\cos 2\pi \gamma_l + i \sin 2\pi \gamma_l) \\ a_l = \sqrt{2S(f_l) \cdot \Delta f} \dots\dots\dots (2)$$

$S(f)$ は入射波の周波数スペクトル、 γ_l は初期位相を定めるための一様乱数である。各周波数における代表波向は、多方向不規則波の方向分布特性を規定する方向関数を確率密度関数とみなして、0から1の値をとる一様乱数を発生させて決定する。

（2）ダブルサメーション法（DS法）

入射波の水面変動を周波数が異なる N_f 個の成分に分

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部 専門役
*** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部 主席専門役

割し、さらに各周波数成分を N_d 個の異なる波向成分に分割する。次に、この $N_f \times N_d$ 個の成分波の複素フーリエ係数と、浮体運動の周波数・波向応答関数との掛け合わせにより、各周波数に対して多数の異なる波向動揺成分を考慮する方法である。この場合、動揺時系列は次式で表わされる。

$$X_j(t) = \text{Real} \left[\sum_{l=1}^{N_f} \left\{ \sum_{m=1}^{N_d} H_I(f_l, \theta_m) \cdot \hat{X}_j(f_l, \theta_m) \right\} e^{i2\pi f_l t} \right] \quad (j=1 \sim 6) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、添え字 l と m は成分波の周波数番号と波向番号、 H_I は DS 法の場合次式で表わす。

$$H_I(f_l, \theta_m) = a_{lm} (\cos 2\pi \gamma_{lm} + i \sin 2\pi \gamma_{lm})$$
$$a_{lm} = \sqrt{2S(f_l, \theta_m) \Delta\theta \cdot \Delta f} \dots\dots\dots (4)$$

$S(f_l, \theta_m)$ は入射波の方向スペクトル、 γ_{lm} は初期位相を定めるための一様乱数である。なお、本研究では、入射波の周波数スペクトルとして Bretschneider—光易型、方向関数として光易型を用いる。

3. 水理模型実験

(1) 実験設備と模型浮体

長さ 35 m、幅 45 m、深さ 1.1 m の平面水槽と 48 枚の造波板（長さ 19.2 m）から成る多方向不規則波造波装置を有する波浪実験設備を用いて、発電所搭載浮体の縮尺 1/100（平面寸法 142 cm×142 cm、喫水 11.6 cm、設置水深 24 cm）の模型実験を実施した。浮体はアクリル模型に串団子状の錘を配置したものである。係留方式は、図—1 に示すように、コイルバネとユニバーサルジョイントを有するドルフィンリンク方式による 2 辺係留とし、係留装置を 1 辺につき 2 基配置した。浮体模型の諸元を表—1 に示す。浮体の設置水深は 24 cm であるが、造波水深が浅くなると造波効率が低下し、所定の波が造波しにくくなる。このため、造波水深を 60 cm とし、造波機前面から 6 m の地点より勾配 1/50 の一様斜面を設置し、図—2 に示すように、斜面中央部に設けた長さ 5 m、幅 10 m の水平床上で水深 24 cm となるようにした。造波機前面から 13 m の位置に相当する水

表—1 模型浮体の諸元

項 目		模 型	想定実機
寸法 (長さ×幅×喫水)		142×142×11.6 (cm)	142×142×11.6 (cm)
全 重 量		233.8 kg	133,800 ton
静水面上の重心高さ		8.8 cm	8.8 m
重心回りの慣性モーメント	I_x	$4.62 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	$4.62 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$
	I_y	$4.73 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	$4.73 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$
	I_z	$6.81 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	$6.81 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$
係留装置 1 基当りのバネ定数		1.3 kg/cm	1300 ton/m (設計案の 1/3)

平床中央に浮体模型を設置し、入射波向が 0°、22.5°、45° となるように模型の設置角度を変化させた。造波された波の回折をできるだけ抑えるため、造波機両端に沿って斜面上に導波板を配置した。

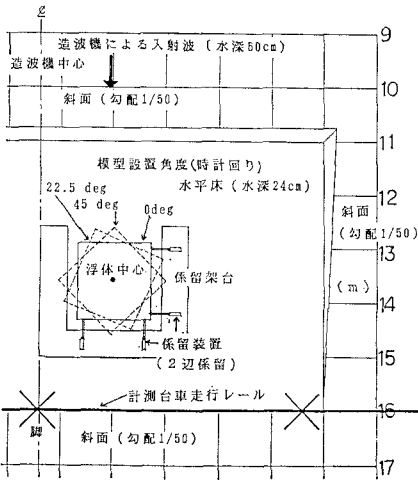
(2) 入射波と計測方法

入射波は、規則波、一方向不規則波および多方向不規則波を用いた。規則波実験では、浮体運動の周波数・波向応答関数を検証するため、波高を 1~2 cm、周期を 0.1 s 刻みで 0.8~2.5 s とした。不規則波実験では、波浪外力の方向分散性が浮体の動揺に及ぼす影響を検討するため、有義波高を 3 cm、有義波周期を 1 s とし、光易型方向関数の方向集中度パラメータの最大値 S_{max} の値を 10、50 および無限大とした。多方向不規則波の造波信号は SS 法および DS 法により作成し、SS 法では 1024 個および 512 個の成分波を、DS 法では周波数 1024 個×波向 90 個および周波数 512 個×波向 90 個の成分波を重ね合わせた（平口ら、1990）。浮体の動揺の計測には、6 台のレーザ変位計を用い、箱型浮体を構成する 3 平面を反射面として 6 カ所の変位を同時計測し、剛体としての座標変換により、重心位置での動揺 6 成分および 8 頂点の変位を算出した（池野ら、1991）。実験データは 1 動揺成分当り、規則波実験では 0.02 s 刻みで 1024 個、不規則波実験では 0.05 s 刻みで 8192 個（入射波 400 波分に相当）計測した。

4. 浮体運動の周波数・波向応答関数

(1) 計算条件

浮体運動の応答関数の計算では作用波の周波数を 0.05 Hz 刻みに 0.25~2.0 Hz、波向を 5° 刻みに -180°~180° 変化させた。従って、計算点として 2592 点である。浮体の没水表面をパネル要素に分割する時の要素長



図—2 模型浮体の設置状況

は、数値解の収束性から波長の $1/10$ 以下に満たすように配慮した。

(2) 応答関数の特性

図-3 は、入射波向 22.5° に対する X_1 , X_3 に関する周波数応答倍率を実験結果と解析結果とで比較したものである。図中、●印は規則波による実験結果、△印は一樣水深 24cm での計算結果、□印は一樣水深 40cm での計算結果、○印は一樣水深 60cm での計算結果である。実験は造波機水深 60cm から立ち上がった一樣斜面中央部に設けた水深 24cm の水平床上で実施した。しかし、解析は一樣水深を仮定したグリーン関数を利用した境界要素法である。実験結果と計算結果とを比較すると、動揺成分によっては、入射波の周波数が 0.8Hz 以下になると、実験値が水深 24cm よりも深い水深の計算結果に近くなった。この傾向は入射波向 0° と 45° に対しても同様の結果となった。そこで、この動揺成分については、解析に用いる水深を、共振周波数における応答値と一致するように、一樣水深 40cm で応答関数を

算定することにした。紙面の都合上省略するが、応答関数の位相の計算値は水深 24cm と 40cm とで大きな差異は生じていない。

図-4 は、 X_1 , X_3 , X_5 , X_6 に関する周波数・波向応答関数の振幅コンター図である。コンターは、応答関数の計算点 2592 点の実数部と虚数部を 0.01Hz と 1° 刻みに補間して出力している。浮体は $x-z$ および $y-z$ 平面についてほぼ対称なため、 X_2 と X_4 に関する応答関数は X_1 と X_3 について波向を 90° ずらした応答特性となる。図-4 によると、各動揺成分は、周波数と波向により応答値が様々変化し、 X_1 と X_3 は、係留バネ定数と浮体の慣性によって決まる共振周波数付近で、波向が運動方向に平行な場合に応答値が最大を示す。これに対して X_5 は、係留バネ定数と係留装置の配置間隔によって決まる共振周波数 0.8Hz、浮体に非対称に作用する波向 22.5° で応答値が最大を示す。また、 X_6 は周波数が低くなるに従って応答値が大きくなるものの、 X_1 に比べて波向に対する応答特性が鈍感である。

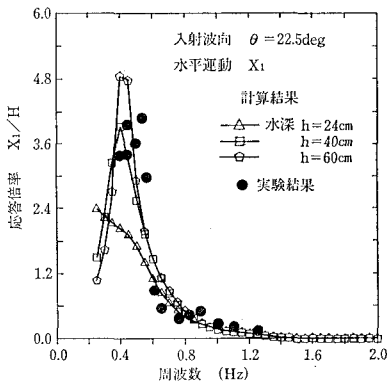
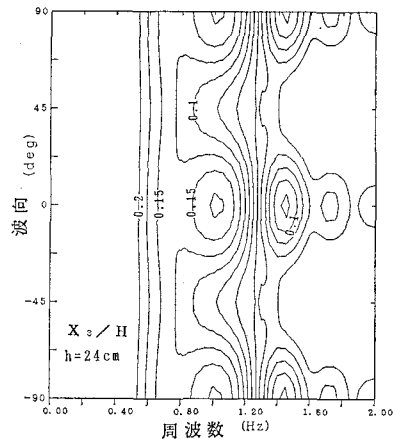
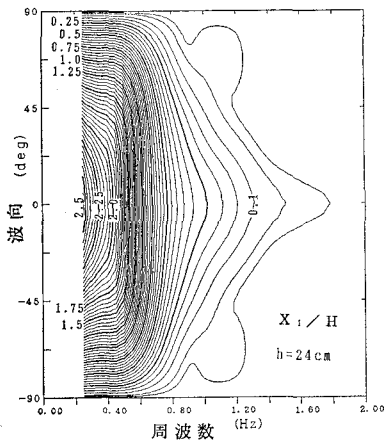
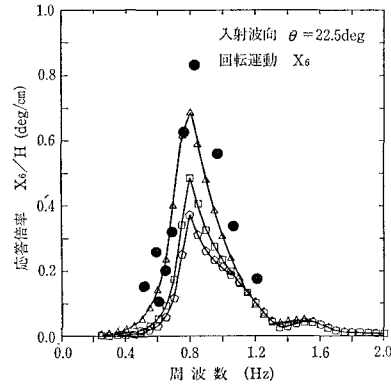
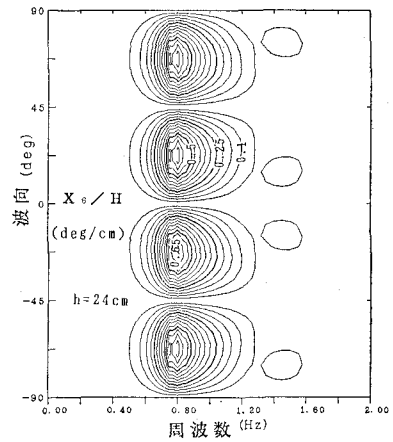
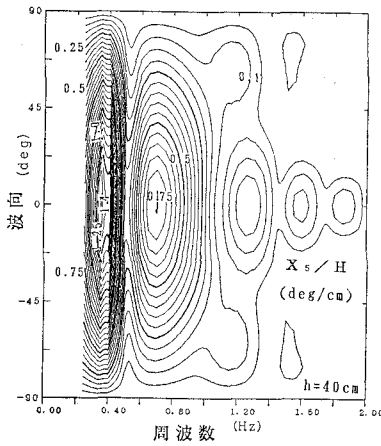


図-3 入射波向 22.5° に対する動揺の周波数応答特性



(a) 並進運動 X_1 と X_3

図-4 動揺の周波数・波向応答関数の振幅コンター図

(b) 回転運動 X_5 と X_6

図—4 動揺の周波数・波向応答関数の振幅コンター図

図—4 によると、波向に対する応答特性が敏感な運動成分については、波の方向分散性を考慮した場合としない場合とで動揺特性が異なることが予想される。

5. 多方向不規則波による浮体の動揺特性

(1) 計算条件

入射波の複素フーリエ係数は、Bretschneider—光易型周波数スペクトルを $0 \sim 2.5$ Hz について 2.44×10^{-3} Hz 刻みに 1024 個に等分割し 光易型方向関数を主波向から $\pm 90^\circ$ の範囲について 2° 刻みに 90 個に等分割した。浮体運動の応答関数は、周波数 $0.25 \sim 2.0$ Hz、波向 $-180^\circ \sim 180^\circ$ について、計算点 2592 点の実数部と虚数部を入射波の分割点と一致するように $f-\theta$ 平面で補間して用い、その他の周波数帯では 0 とした。つぎに、入射波の複素フーリエ係数と応答関数を掛け合わせ、逆 FFT 解析により 0.05 s 刻みで 8192 個の動揺 6 成分の時系列を計算した。また、一方向不規則波の場合は、SS 法において各周波数における代表波向を同一にした。

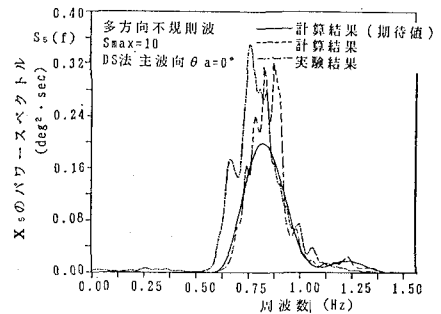
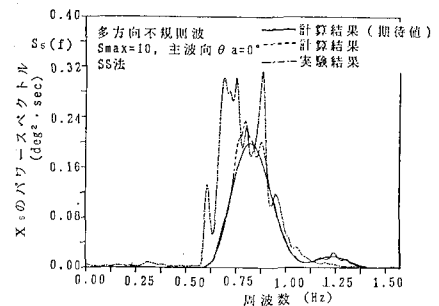
(2) 多方向波と一方向波による動揺特性の比較

① パワースペクトル

一方向波の場合と異なる多方向波の統計的性質として、成分波の初期位相 (SS 法では周波数と波向の組合せの選び方) により理論的にもパワースペクトルが変動する (磯部・古市, 1986)。しかし、成分波の数を非常に多くとれば、動揺のパワースペクトルは次式 (期待値) に収束する。

$$S_j(f) = \int_{-\pi}^{\pi} \hat{X}_j(f, \theta) \cdot \hat{X}_j^*(f, \theta) \cdot S(f, \theta) d\theta \quad (j=1 \sim 6) \quad (5)$$

図—5 に、多方向不規則波による X_5 のパワースペクトルを示す。図中、一点鎖線は造波信号を DS 法で作成した場合の実験結果、点線は DS 法による計算結果、実線は式 (5) で与えられるパワースペクトルの期待値で

図—5 多方向波 (DS法) による X_5 のパワースペクトル図—6 多方向波 (SS法) による X_5 のパワースペクトル

ある。計算結果と実験結果は Hanning のデジタルウィンドウを 40 回 (近傍周波数 15 個の平均に相当) 施して平滑化した。図—5 によると、DS 法による計算結果は、期待値の周りを変動している。実験結果と計算結果は、概ね一致している。図—6 に、SS 法による X_5 のパワースペクトルを示す。図中、一点鎖線は造波信号を SS 法で作成した場合の実験結果、点線は SS 法による計算結果、実線はパワースペクトルの期待値である。図の実験結果は成分波の数が 1024 個の場合であるが、512 個の

場合でも大きな差異は認められなかった。SS 法の計算結果も、DS 法と同様に期待値の周りを変動している。図-5 と 図-6 の実験結果同士を比較すると、DS 法と SS 法で大きな差異は認められず、ほぼ同様の傾向を示している。図-7 に、一方向不規則波による X_5 のパワースペクトルを示す。図中、一点鎖線は実験結果、点線は計算結果である。計算結果と実験結果は Hanning のデジタルウィンドを20回施している。図-5 と比較すると、波向成分が X_5 の運動方向へ集中しているため、実験値・計算値とも大きくなっている。

② 動揺6成分の有義値

図-8 に主波向 $\theta_a=0^\circ$ 、 $S_{max}=10$ 、50 および一方向不規則波による動揺6成分の時系列をゼロアップクロス法により波別解析した有義値を比較したものである。白色が造波信号を DS 法で作成した実験結果、黒色が DS 法による計算結果である。図によると主波向に平行な運動となる X_1 と X_5 は、入射波の波向成分が集中する一方向波の動揺量の方が大きい。主波向に直角な運動となる X_2 と X_4 は、逆に多方向波の動揺量の方が大きい。これに対して、 X_3 は波向に対する応答が X_1 に比べて鈍感なため、多方向波と一方向波とで差異は生じていない。計算結果はこれらをよく再現している。周波数 0.8 Hz、波向 22.5° で応答関数が最大を示す X_6 について、多方向波と一方向波の場合を比較すると、多方向波では動揺量が增大している。一方向波の計算結果は 0 に近いが、実験結果は動揺が生じている。これは、造波された波の回折効果により、一方向波の場合でも若干方向分散が生じているものと考えられる。多方向波の計算値は実験値を若干下回るものの、方向分散性が増すに従い、動揺量が増加する傾向をよく再現している。また、成分波が 512 個の場合の SS 法による有義値の実験結果は DS 法による実験結果とよく一致した。

③ 浮体頂点の重心に対する運動履歴

図-9 に、主波向 $\theta_a=0^\circ$ の場合の多方向波と一方向波による浮体の頂点 P の重心 G に対する相対運動の履歴を実験と解析とで比較したものである。図によると、多方向波では主波向に直角な運動成分や Yawing が增大するため、一方向波と運動履歴が明らかに異なっている。

6. おわりに

浮体運動の周波数・波向応答関数を用いた計算法を開発し、これと模型実験とにより、多方向不規則波と一方向不規則波による動揺特性の差異を明かにした。

最後に、数値計算には電力計算センターの大西浩史氏の協力を得たことを付記して謝意を表する。

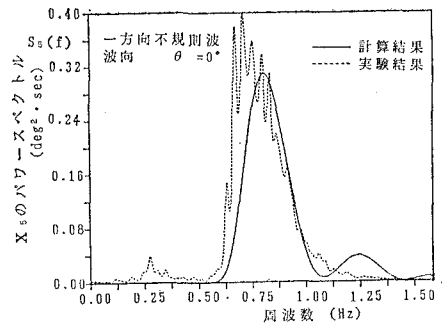


図-7 一方向波による X_5 のパワースペクトル

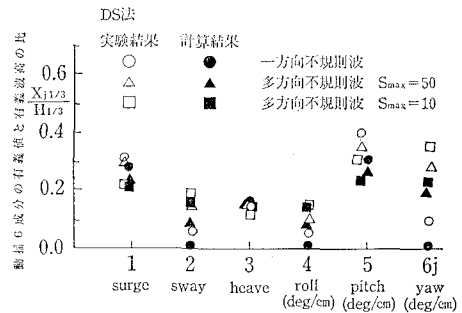


図-8 ゼロアップクロス法による波別解析結果の比較

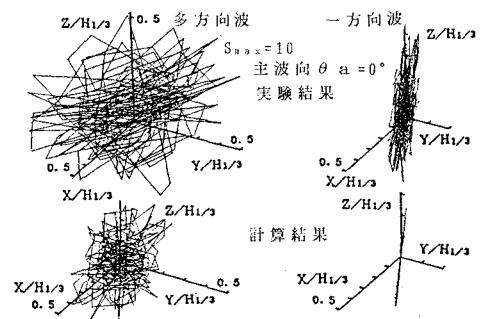


図-9 浮体の頂点 P の重心 G に対する相対運動の履歴

参考文献

- 池野正明他 (1991): レーザ変位計を用いた箱型浮体の 3 次元動揺計測法, 第 46 回年譜概要集, II-450, pp. 940-941.
- 磯部雅彦・古市耕輔 (1986): 不規則波に対する統計量の変動に関する理論的考察, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 159-163.
- 清川哲志・大山 巧・小林 浩 (1983): グリーン関数法による任意形状浮体の動揺解析, 土木学会論文集, 第 332 号, pp. 55-65.
- 平口博丸他 (1990): 多方向波造波システムの効率化とその造波特性, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 140-144.