浮遊型海洋構造物の方向スペクトル波中実験 に基づく方向周波数応答関数推定 (その3)

正員 竹 沢 誠 二* 正員 平 山 次 清*
正員 上 野 誠 也* 正員 陳 剛*

Estimation of directional frequency response functions of a floating offshore structure based on experiments in directional spectrum waves (3rd report)

by Seiji Takezawa *Member* Tsugukiyo Hirayama *Member*
Seiya Ueno *Member* Chen Gan *Member*

Summary

Estimation of directional frequency transfer functions of floating offshore structures is important to estimate their behaviours in realistic short crested irregular waves (such waves are called as directional spectrum waves).

Of course, there are some theoretical calculation methods for such directional response functions, but it seems that there are not so many experimental results confirming such theoretical ones. For that purpose, square basins are needed.

In two previous reports, the authors showed the inverse estimation of directional transfer functions of a floating offshore structure only using results of a few experiments in directional spectrum waves in a long towing tank.

The response functions of wave exciting forces are treated in this paper. The precisions of estimated directional frequency response functions are confirmed using theoretical data.

1. 結 言

短波頂不規則波である海洋波中での浮体の動的応答を推定することは非常に重要である。その推定のために波浪と浮体に作用する波強制力の関係を表わす応答関数の果たす役割は大きく、それを求めることは必要である。その応答関数は、波の入射角と波の周波数の2種類の独立変数で表わされる方向周波数応答関数となる。

方向周波数応答関数は、従来から理論的立場から求める方法が提案されているが、それらを実験により確認している例は多くない³⁻⁵⁾。方向応答関数は、入射角の異なる長波頂波中の実測を多数繰り返すことにより、角度ベースで求めることができるが、そのためには角水槽等の設備が必要となり、実験量も多くなる。

著者らは、前報¹⁾²⁾において方向波中の運動計測のみを用いて波周波数領域での、すなわち線形1次応答としての浮体運動の方向周波数応答関数を推定する手法を提案した。

これは、長水槽において多分割造波装置を用いた方向スペクトル波の造波を行い、半潜車型海洋構造物の運動等の計測を実施し、そのデータのみから推定する手法である。方向スペクトル波の造波により、構造物の1次元の運動応答スペクトルと入射した方向波の2次元スペクトルが実測され、それらを数種組み合わせることにより、2次元の方向周波数応答関数が推定された。理論値を一部使用する文献⁶⁾と異なり、実測データのみによる手法であり、実機にも直ちに適用可能である。

本報では波浪の浮体に作用する波強制力について、その方向周波数応答関数を推定することを試みる。推定の原理は前報と同様であり、これにより浮体の任意の方向周波数応答関数が推定可能であることを示す。波強制力も運動と同じく、自明な応答関数値が存在する波向角が存在する場合にはそれを拘束条件として利用し、精度を高めている。また、長波頂波の応答関数値が計測可能な波向角に対しても同様に拘束条件として扱っている。さらに、本報では、理論的な波の方向スペクトル関数と仮定した方向周波数応答関数を用いて計算された波強制力スペクトルデータを用

* 横浜国立大学工学部

いて方向周波数応答関数を推定し、計算精度を確認した。それを用いて、計算精度の改善に関する検討を加えた。さらに波強制力の有義値に方向スペクトル波の方向分布及び波主方向が及ぼす影響を調べた。

2. 推定方法

本報で提案する方向周波数応答関数の推定手法について概略を説明する。詳細は前報¹⁾に記述されているので、ここでは改良点を中心に概略の説明にとどめる。まず、波による浮体の線形波強制力のスペクトルは次式で与えられる。

$$S(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} W(\omega, \chi) |H(\omega, \chi)|^2 d\chi \quad (1)$$

S は 1 次元波強制力スペクトルであり、 W は方向波のスペクトル関数、 H は浮体の方向周波数応答関数である。 ω は周波数、 χ は浮体の x 軸正方向を 0 度 (従って、向い波は 180°) とする波向角である。方向波を用いた水槽実験では、浮体の波強制力スペクトル $S(\omega)$ と方向波スペクトル $W(\omega, \chi)$ が計測される。著者らが提案する方法は、これらのデータを用いて方向周波数応答関数の振幅比部分の $|H(\omega, \chi)|$ を逆算するものである。

推算の基本原理解は、応答関数の二乗値を周波数毎に波向角に関するフーリエ級数に展開し、実験データからその係数を最小二乗法により求めるものである。当然ながら、フーリエ係数は周波数の関数として与えられ、方向周波数応答関数の振幅は次式で与えられる。

$$|H(\omega, \chi)|^2 = \sum_{k=0}^{\infty} a_k(\omega) \cos k\chi \quad (2)$$

構造物の対称性を有効に利用すれば、応答関数は波向角の偶関数になる。従って、 $\cos$ 項のみの展開が可能である。波向角に関しての周期は 2π とし、広い波向角範囲での応答関数を求めることを目的とした一般性を持たせている。

推算は離散化して有限区間の周波数範囲で行っている。周波数は使用した波のスペクトルから浮体への波強制力を励起するパワーの存在する範囲を選び、等間隔に分割した。フーリエ級数の項数は全体の傾向が変化しない範囲の中から最小のものを選んだ。これは、単に計算量の減少を目的とするものだけでなく、項数が多いと波向角に対し振動的な応答関数が得られる傾向があるためである。

推算で求めるフーリエ級数は、2 次元の行列要素で表わされる。しかし、周波数に対しては独立であるから、ある周波数 ω_i に対しては 1 次元のベクトル $(a_k)_i$ で記述できる。式 (1) (2) を離散化し、行列形式で表わせば、次式となる。

$$\hat{s}_i = (w_i)^t [C] (a_k)_i \delta\chi \quad (3)$$

添え字 i は ω_i における値を意味し、 $\hat{s}_i$ はスカラーの応答スペクトルの推定値、 w_i は 1 次元の波のスペクトル、 $[C]$ は次式で与えられる行列である。

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & \cos \chi_1 & \cdots & \cos N\chi_1 \\ 1 & \cos \chi_2 & \cdots & \cos N\chi_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cos \chi_n & \cdots & \cos N\chi_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

実測値の応答スペクトルとの誤差を最小とるように、異なる波スペクトルを複数使用して a_k を最小二乗法により求める。

さらに、推定精度を高めるために、長波頂波による応答関数の実測値があるものはこれも使用した。このデータは、著者らの方向スペクトル造波機が長水槽の短辺に設置されたものであるため、方向波の波の主方向と同一方向の長波頂波を用いることになるが、これは狭い方向分布の極限値の波とみなすこともできる。この実測値を推定応答関数が満足するように拘束した。また、 y 軸方向の波に対してはサージ方向に波強制力が発生しないような自明の理論値を拘束点データとして用いた。これらの拘束を追加することにより、最小とすべき関数は推定誤差を ϵ とすれば、次式で与えられる。

$$(\epsilon^2)' = \epsilon^2 + \sum_{p=1}^P \lambda_p ((c)_i (a)_i - (|h_i|^2)_i) \quad (5)$$

χ_i が p 番目の拘束条件を与えられた波向角となるように i が定められるものとする。 λ_i はラグランジェの未定乗数である。この関数を最小とする条件から $(a_k)_i$ と λ_i の連立方程式が導かれ、前報と同様に一般化逆行列を用いて解が求められる⁷⁾。このように拘束条件を複数使用する改良を加えて、前報の推算より精度を高めた推定値を得ることを可能とした。

3. 実験

本報の推定で使用した実測データの計測実験に関して説明する。

使用した半潜車型海洋構造物モデルは SR 192 で使用されたものと同一であり、2 本ローワーハルと 8 本コラムの形状である。モデルは 1/64 スケールであり、ローワーハル長は 1.80 m、2 本の中心線間の間隔は 0.94 m で x 軸に平行に取り付けられている。実験に使用した水槽は横浜国立大学内の長水槽であり、モデルは計測用台車の下部に検力計を介して取り付けられ、運動が拘束されている。モデルの設置状況を図 1 に示す。長水槽の一端に多分割造波装置が設置されており、壁面の反射を有効に利用して方向波を造波することを可能としている⁸⁾。方向波の主方向は水槽の長手方向と一致するため、図 1 の設置条件は波向角は 180° (向い波) となる場合である。検力計の剛性が高いため、構造物の運動は無視できる範囲である。また、固有振動数が本報で示す応答関数の周波数帯より高いため微小レベルで運動が発生しても推算結果に影響を及ぼさないと考えられる。

構造物に作用する波強制力の計測はこの検力計を用い

た。検力計は、ヒープとサージ方向の力とピッチ軸回りのモーメントを計測するように設置されている。検力計の計測点は、構造物重心から z 軸方向に離れているため、以下の解析では重心点での波強制力値に換算して用いている。

使用した方向スペクトル波の計測解析されたスペクトルを図 2-a に示す。図中には平均周期の異なる 5 種類の波のデータが示されている。データのスケールはすべて実機スケールに換算されている。図 2-b には、方向分布関数の平均値が示されている。波の主方向を中心に対称型であり、 $\cos^2$ 分布と類似した形である。1 回の造波により広範囲の角度からの波の入射を期待するために、このような広い分布特性を持つ波を使用した。なお、方向分布関数は周波数

に対する平均値を正規化している。次章で使用する波はすべてこの分布をなす波である。

波の計測には、非接触型の計測システムを使用した。水没させた光源から発射されたレーザービームを水面上からカメラで測定する方式を採用した。詳細な計測原理等は文献 9 に記述されている。

方向波の造波は約 10 分間行い、波の特性が均等化された区間のデータのみを使用して解析した。取得データはすべてアナログ信号であるが、サンプリング周期 0.1 秒で AD 変換し、パーソナルコンピュータで記録し、解析等もデジタル処理で行った。これらの解析条件は前報と同一である。

4. 波強制力の方向周波数応答関数推定

本章では、実測された波強制力のスペクトルと実測された波の方向スペクトルから、構造物の持つ方向周波数応答関数を推算した結果を示す。実験に使用した波は図 2-a に示す平均周期 7.3 秒 (実機換算) から 10.4 秒までの 5 種類のスペクトルを持つ波である。いずれも、波の主方向を中心に図 2-b に示す比較的広い方向分布を持つ波であり、波の主方向が x 軸と一致する向い波状態での実験データを用いた。波の実測された方向分布関数は周波数によってばらつきが見られる。これを推算に用いたが、図 2-b に示す平均値と大きな差はない。方向スペクトル波の実験データは 5 回だけの計測であるが、さらに精度を上げるために、向い波の長波頂過渡水波の実験を 1 回追加している。このように実験回数が少なくても良い精度で推算できる点が本手法の特長である。

サージ波強制力の方向周波数応答関数の推算結果を図 3 に示す。実線は理論計算による応答関数であり、*印の付いた線は実測データに基づく推算結果である。推算には 3 方向の拘束条件を含めている。90° と 270° はサージ波強制力の発生しない方向であるから、応答関数値を 0 に指定し、180° の向い波状態では長波頂過渡水波による実測値を満足させている。波のパワーの少ない高周波領域と波の主方向から離れた領域 (横波付近) では理論値との差がみられるが、波のパワーが大きく構造物に影響の与える領域では関数の形状が非常に良い一致を見せている。

図 4 にヒープ波強制力の方向周波数応答関数を示す。推算に用いた拘束条件は 180° の 1 点のみである。使用した波の主方向が向い波状態だけであるので、90° (270° も同様) 付近における推算精度は低いと考えられる。推算に使用した一般化逆行列の性質により、この領域においては、推算結果は真の値よりも低い値をとる傾向を持つ。この点を除けば理論値との比較は良い一致が確認できる。

ピッチ波強制モーメントの推算結果を図 5 に示す。拘束条件はサージの場合と同じく 3 点である。低周波領域では関数の形状は似た傾向を示しているが、定量的な差が生じている。高周波領域では関数の形状も理論値と異なること

Fig. 1 Configuration of experiments

Fig. 2-a Spectral functions of directional waves measured by experiments

Fig. 2-b Mean directional distribution functions of wave measured by experiments

SURGE EXCITING FORCE

HEAVE EXCITING FORCE

Fig. 3 Directional distribution of transfer functions of surge wave exciting forces (The experimental datum were used in the present method)

Fig. 4 Directional distribution of transfer functions of heave wave exciting forces (The experimental datum were used in the present method)

PITCH EXCITING MOMENT

が示されている。計算精度については次章で検討を加えるが、本手法の精度が高いことが示される。

5. 推定結果の検証

5.1 理論計算データによる推算

本章では推算された方向周波数応答関数の精度に関する検討を行う。前章では実測されたデータを用いて推算した結果を示したが、その精度に関しては真の応答関数が未知であるため確かなことが言えなかった。そこで、仮定した波スペクトルと応答関数を用いて数値計算により算出した波強制力のスペクトルデータから本手法により応答関数を推算し、仮定した応答関数と比較して計算精度の検討を示す。

計算に使用した波のスペクトルと方向分布関数を図 6 に示す。前章で計測された波とほぼ同一の特性を持つ波である。スペクトルは JONSWAP 型、方向分布関数は $\cos^2$ 分布である。波強制力のスペクトルはこの波と理論値の方向周波数応答関数とを用いて算出した。

推算結果を図 7~9 に示す。前章同様に、実線は理論値、*印の付いた線は推算結果である。計算精度が高ければ両者は一致することから、計算結果の信頼性が示されている図である。尚、推算には 180° における理論値を拘束条件として用いている。

Fig. 5 Directional distribution of transfer functions of pitch wave exciting moments (The experimental datum were used in the present method)

Fig. 6-b Mean directional distribution functions of wave (Theoretical values)

Fig. 6-a Spectral functions of directional waves (Theoretical values)

SURGE EXCITING FORCE HEAVE EXCITING FORCE

Fig. 7 Directional distribution of transfer functions of surge wave exciting forces (The theoretical values were used in the present method, direction of wave is 180°, constraint points are 90° and 180°.)

Fig. 8 Directional distribution of transfer functions of heave wave exciting forces (The theoretical values were used in the present method, direction of wave is 180°, constraint point is 180°.)

PITCH EXCITING MOMENT

Fig. 9 Directional distribution of transfer functions of pitch wave exciting moments (The theoretical values were used in the present method, direction of wave is 180° , constraint points are 90° and 180° .)

図7に示されたサージ波強制力は波の主方向に対して $\pm 45^\circ$ 程度の範囲で良い一致が示されている。この範囲で本手法の精度は良いと言える。

図8に示されたヒープ波強制力は、横波方向の一致が得られないために、主方向付近にも若干高目の値が示されている。これは推算に用いた関数が波方向角に対して高周波成分を有さないために生じたものと考えられる。

ピッチ波強制モーメントに関する推算結果を図9に示す。サージと同様に、波の主方向に対して約 $\pm 45^\circ$ の範囲で良い一致が確認される。

図10, 11は、それぞれ、実測データ、理論計算データに基づく推算結果を横軸を周波数としてプロットした図である。*印が推定結果、実線が理論値である。いずれも、波向角 150° の値である。理論データによる推算値が良い一致を示していることにより、本推算法の精度は高いものと考えられる。従って、前章で示した実測データによる推算値が理論値と一致しない理由は、本手法に起因するものではないと言える。

Fig. 10 Frequency distribution of transfer function of pitch exciting moment (The experimental datum were used in the present method)

Fig. 11 Frequency distribution of transfer function of pitch exciting moment (The theoretical values were used in the present method)

5.2 高周波領域の精度と波の平均周期分布

前章では主に波のパワーの存在する周波数領域の推算結果を示した。さらに高周波数領域における推算精度と使用した波の平均周期の分布範囲とに関する考察を加える。図12はピッチ波強制モーメントに関する、 $\omega=0.859$ rad/sの周波数における応答関数である。理論値は実線で示されているように多峰状の関数である。推算値と理論値に一致する範囲が波主方向に対し $\pm 30^\circ$ と狭いことが示されている。高周波成分を含む波を追加して推算を行った。使用し

Fig. 12 Directional distribution of transfer functions of pitch wave exciting moment in high frequency

Fig. 13-a Spectral functions of directional wave (Theoretical values)

Fig. 13-b Mean directional distribution function of wave (Theoretical values)

た波は図13に示す8種類のスペクトル分布の波である。方向分布は前例と同じ $\cos^2$ 分布である。推算結果を図14に示す。改善はされるものの、図12と比べて著しい差はない。

この周波数領域での改善が要求されれば他の対策をとる必要がある。しかし、応答関数も入射される波のパワーも共に低い領域であるために、対象とした構造物に与える影響は少ないと考えられる。従って、前章で用いた波の周波数領域は妥当なものであり、本手法はその領域での海洋構造物の波強制力を推算するに十分な精度を有していると言える。

5.3 拘束条件と波の主方向の関係

本手法は過渡水波の実験データを用いて推算関数の拘束条件として使用している。波の主方向の異なる波を入射することによりこの拘束点を取り除くことの可能性について検討を加えた。理論計算によるデータを用いて、波の主方向が向い波と横波の2種類のデータにより推算を行った。

図15, 16は、それぞれ、ピッチ波強制モーメントとヒープ波強制力の応答関数である。拘束条件は 180° のみに減らし、使用するデータを2種類の波主方向に増やした推算結果である。前者の場合は図9で良好な推算結果を示していたのに対して、図15では横波付近での精度が低下している。一方、後者では図8で一致しなかった範囲で改善されていることが確認できる。両者の違いは応答関数のレベルにある。図15のように応答レベルの低い領域では拘束条件が必要であり、逆に、図16のようにレベルの高い領域では波の主方向が異なる波によるデータがあれば、拘束がなくても精度を上げることができる。応答関数のレベルの低い図15の例では取り除いた拘束条件は自明の0であるため、拘束条件が必要となる点は実験ケース数に影響しないことは明らかである。この結果より、全方向に対してレベルの差が小さいヒープは異なる波主方向のデータを必要とし、一方、方向に対するレベルの差が多いサージ、ピッチ等は自明の拘束点を有効に使用することで精度を上げることができると言える。

Fig. 14 Directional distribution of transfer functions of pitch wave exciting moment in high frequency

Fig. 15 Directional distribution of transfer function of pitch wave exciting moment (The theoretical values were used in the present method, directions of waves are 90° and 180°, constraint point is 180°.)

Fig. 16 Directional distribution of transfer function of heave wave exciting force (The theoretical values were used in the present method, directions of waves are 90° and 180°, constraint point is 180°.)

6. 方向分布関数の波強制力に与える影響

本章では海洋構造物に方向スペクトル波が入射した時に作用する波強制力について、波の主方向と方向分布がどのような影響を及ぼすかを調べる。

図 17 にはヒープ波強制力の方向周波数応答関数の理論値が示されている。波向角が 90°, 周波数が 0.981 rad/s にピークが現れているが、この点は、この波周波数に対応する波長とモデルの y 方向の幅とが一致する場合に対応している。この点の影響が後述の図 18 のヒープに現われることになる。

方向スペクトル波中の波強制力の計算は図 17 に示されているような波強制力の応答関数と波の方向スペクトルを用いて、式(1)により求めた。さらに波強制力の有義値は

Fig. 17 Transfer function of heave wave exciting forces by Hooft method

その面積より推定した。そのような計算を各モードに対して、波の主方向を横波 (90°) から向い波 (180°) の範囲で変化させて行った。このようにして求めた各モードの波強制力の有義値を波の主方向に対してプロットした結果が図 18 に示されている。全ての結果は無次元化されている。使用した波の方向分布関数は $\cos^{2s}(\chi/2)$ なる表現をした時の s パラメータで $s=5, s=30, s=100$ の 3 種類の方向分布を持つ波である。ここで、 $s=100$ の波は長波頂波 ($s=\infty$) を模擬した波である。尚、 $\cos^{2n}\chi$ なる表現の n とは $s=4.3n$ なる関係がある。

図 18 に示されているように、長波頂波中に比べ、方向スペクトル波中ではその有義値が平滑になる傾向が見られる。特に方向分布の広い $s=5$ の場合に、その傾向が強くなり、例えば横波中のサージ波強制力とピッチ波強制モーメントの有義値の減少の程度は向い波中での 60% 程度にしなければならない。これは方向分布が広くなれば主方向が有する重みが小さくなるからである。尚、波の主方向が 135°, 225° の付近では、どの波強制力も方向分布関数の違いによる差がほとんどみられなくなり、ほぼ同一値をとる。

文献 3 には本報と同じ手法で、波の主方向が方向波中の構造物の動揺の有義値に与える影響を調べた結果が示されている。両者を比較すると、傾向がよく一致していることが確認されるが、ヒープに関して分布による影響は同じであるが傾向に差が認められる。ヒープの動揺は波の主方向と方向分布関数の変化にあまり関係なく、有義値がほとんど一定であることに対して、波強制力は横波中の有義値が向い波中のものより 20% 以上大きくなることが示されている。それは図 17 に示されている波強制力の応答関数の波向角が 90°, 270° でのピークがその有義値の計算に大きく影響していることが原因と考えられる。

これらのことは海洋構造物の稼働性能や安全性能をより正確に評価する際に、方向スペクトル波を考慮する必要があることを示していると言える。

Fig. 18 The effect of wave spreading on short-term prediction of wave exciting forces for various principal wave directions

7. 結 言

本論では長水槽内で造波された方向スペクトル波中での計測実験から、波周波数と波向角の関数として表現される線形方向周波数応答関数を求める方法について、前報²⁾に引続き線形波強制力に対して適用し、結果及びその精度を検討した。結論を要約して、以下に示す。

1. 本論で示した方法によると主方向が1方向の比較的小数の方向スペクトル波中の実験結果のみから、波強制力の方向周波数応答関数が、約 $\pm 45^\circ$ の範囲で精度良く求まることが確認された。
2. 構造物に影響を与える周波数範囲の推算に使用した方向波の平均周波数分布は本報で示した程度で十分であることが確認された。
3. 自明な拘束条件を有効に用いれば、長波頂波により実験で求めた拘束条件を加える必要がなくなり、実機でも本方法を用いて方向周波数応答関数を求めることが原理的に可能であることが確認された。
4. 波強制力の有義値の波主方向に依存する割合は波の方向分布が広がることにより減少する。これは見方を変えたと長波頂波では小さい有義値となる方向でも主方向が同じである広い方向スペクトル波中での有義値は逆に値が大

きくなるため注意する必要がある。

謝 辞

実験及び解析にあたって本学の宮川清氏、高山武彦氏には御尽力頂いた。また、平成2年度の当研究室海洋構造物チームの卒業研究学生諸君にも御助力頂いた。合わせて謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 竹沢誠二, 平山次清, 上野誠也, 陳剛: 浮遊型海洋構造物の方向スペクトル波中実験に基づく方向周波数応答関数推定, 日本造船学会論文集, 第168号, (1990).
- 2) 竹沢誠二, 平山次清, 上野誠也, 陳剛: 浮遊型海洋構造物の方向スペクトル波中実験に基づく方向周波数応答関数推定(その2), 日本造船学会論文集, 第169号, (1991).
- 3) 竹沢誠二, 小林頭太郎: 方向スペクトル波中における海洋構造物の応答—その1線形一次応答—, 日本造船学会論文集, 第165号, (1989).
- 4) 竹沢誠二, 酒井敏夫: 波浪中の浮遊型海洋構造物に作用する流体力および運動について, 日本造船学会論文集, 第147号(1980).
- 5) 竹沢誠二, 平山次清, セルソ・カズユキ・モロオカ: 係留された半没型海洋構造物の波浪中運動の実用計

- 算法, 日本造船学会論文集, 第 155 号, (1984).
 - 6) Takezawa, S., Hirayama, T., Acharyya, S., 'Towed Ship Motion Test in Directional Spectrum Waves in a Long Tank (Part 3)', Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 167, (1990).
 - 7) Jefferys, E. R. et. al., 'Measuring Directional Spectra with the MLM', Conference on Directional Wave Spectra Application, (1981).
 - 8) 竹沢誠二, 平山次清, 宮川清, 高山武彦: 長水槽用方向スペクトル波発生装置, 関西造船協会誌, 第 211 号, (1989).
 - 9) 竹沢誠二, 宮川清, 高山武彦, 板橋正泰: レーザ光線群による方向スペクトル波計測, 日本造船学会論文集, 第 166 号, (1989).
-