方向スペクトル波中航走実験に基づく 船舶の方向周波数応答関数推定

正員 竹 沢 誠 二* 正員 平 山 次 清*
正員 上 野 誠 也* 正員 汪 学 鋒*

Estimation of Directional Frequency Response Functions of a Running Ship Based
on Experiments in Directional Spectrum Waves

by Seiji Takezawa, *Member*, Tsugukiyo Hirayama, *Member*
Seiya Ueno, *Member*, Xuefeng Wang, *Member*

ABSTRACT

Estimation of directional frequency transfer functions of a running ship 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.

On the other hand, recently the authors developed a wave maker which can generate directional spectrum waves in a long towing tank, and many experiments of running ships were conducted in such waves.

In those experiments, obtained results are one dimensional motion spectra and direct comparison with theoretical ones is impossible.

So we tried to make inverse estimation of directional transfer functions of a running ship using both one dimensional response spectrum measured in such waves and measured two dimensional directional wave spectrum.

Estimated results by present method on heave, pitch, roll and vertical acceleration response functions are reported here, but this method will be also applicable to other situations like motions of a running ship in actual seas by measuring its motions and incoming directional waves.

1. 結 言

船体の 2 次元の応答関数、即ち方向周波数応答関数は現実の短波頂不規則海洋波中での船体の運動、波浪荷重等を予測する上で非常に重要である。それらに関しては、従来から主としてストリップ法等に基く幾つかの理論的な方法が提案され、向い波中あるいは追い波中ではその実用性が確認されていると言える。しかし斜波中の応答即ち方向周波数応答関数を実験により確認している例は多いとは言えない(例としては文献[1]などがある)。そのためには曳航可能な角水槽を必要としかつ周波数、出会角の組合せを考えると膨大な実験回数を必要とするからである。

この点に関して著者らは既に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可能にし^{2,3)}その中でコンテナ船モデルの航走実験を行った。そして得られた応答の 1 次元スペクトルに対して実験に使用した波の方向スペクトルと理論応答関数により計算された応答スペクトルとを比較することにより理論値の妥当性を検討した^{4,5,6)}。

しかしこれは方向波スペクトルと方向周波数応答関数の 2 乗を掛け合わせた方向応答スペクトルの、方向に関して積分された 1 次元の応答スペクトルとの比較であり方向周波数応答関数を直接検証した事にはなっていない。文献[6]では、実験で得られた 1 次元の応答スペクトルに基づいて方向周波数応答関数の直接推定を行ったが、手法としては理論応答関数をベースにその修正係数を求めるといったもので実用的に十分とは言えなかった。

* 横浜国立大学工学部

その後更にその手法を発展させて実験による応答スペクトルのみから方向周波数応答関数を直接推定する方法を開発し、それを前進速度の無い浮遊式海洋構造物の方向周波数応答関数の推定に適用した結果はほぼ実用的である事を確認した^{7,8)}。

本論文はその手法を方向スペクトル波中を航走している船舶にも適用し、航走時の方向周波数応答関数の直接推定が可能であることを示し、かつ理論値との比較をした結果について示すものである。

2. 推 定 方 法

方向波中の運動計測タイムヒストリーのみを用いて方向応答関数を推定する方法の概略として先ず(1)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を造波する。(2)次にその中で運動計測を実施し、1次元の運動応答スペクトルを実測により求める。(3)最後にその1次元スペクトルと入射した方向波の実測に基づく2次元スペクトル(方向スペクトル)と組み合わせることにより、(4)2次元の方向周波数応答関数を推定する。

我々は(4)の段階での手法について既に2通りの方法をしめしている^{6,7)}。

1つは文献[6]において報告した。しかし、そこで示した方法は理論線形応答関数をベースに修正係数を求める方法であるため、傾向が大略合っている理論値が存在する場合にのみ適用が制限される。また、修正係数を周波数のみの関数と仮定し、波向角に対しては一定と仮定している欠点があった。

そこで、改良を加え、理論値とは独立に実験計測データのみにより周波数と波向角の関数として表わされるいわゆる線形方向周波数応答関数を求める新たな方法を考案した。しかし推定値が滑かにつながらない場合もある等の問題があったので、それに対して基本的な考えは同じで応答関数の方向分布をフーリエ級数で展開する方法とし提案した(文献[7])。

本論文では文献[7]の方法を踏襲し、更に航走時の出会い周波数をも考慮に入れた本推定法の妥当性について検討を加える。従って具体的解析手法については基本的には文献[7]と同じであり概略を説明するにとどめるが主として異なる点は航走状態である為に出会い周波数で考える必要があるという事である。

まず、浮体の運動応答スペクトルは次式で与えられる。

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

ここで、 S は1次元応答スペクトルであり、 W は方向波のスペクトル、 H は船体の方向周波数応答関数である。 ω_e は出会い波周波数、 χ は向い波状態を180度とする波との出会い角である。方向波を用いた水槽実験では複数回の実験により、船体の応答スペクトル $S(\omega_e)$ と方向波のスペクトル

$W(\omega_e, \chi)$ を複数個(今回の実験では8種類)計測する。

本方法は、これらのデータを用いて方向応答関数の振幅比部分 $|H(\omega_e, \chi)|$ の2乗を推定誤差の2乗を最小とする様に逆算するものである。但し H は通常波の絶対周波数 ω_0 で即ち波長をもとにして表現されるので周波数の変換を(2)式によりする必要があるが、本論の場合は入射波向 χ が90度から270度の範囲に限定されているので、同一 χ において ω_e と ω_0 が1対1対応になるので問題は無い。それ以外の範囲では1対1対応とならなくなるので特別の考慮が必要である。なお V は船速、 g は重力の加速度である。

$$\omega_0 = (1 - \sqrt{1 - 4V\omega_e \cdot \cos \chi / g}) / (2V \cdot \cos \chi / g) \quad (2)$$

次に方向応答関数をフーリエ級数に展開する。特に、船体の左右対称性を用いれば、方向周波数応答関数は波向角 χ に対して 2π を周期とする偶関数となるため、cosine 項のみで展開が可能である。文献[7]には示していないがフーリエ級数に展開せず直接 H を求める方法も最初に検討したが滑かな結果とならない場合も見られたのでフーリエ級数で展開する方法を考えたものである。

$$|H(\omega_e, \chi)|^2 \approx \sum_{k=0}^N a_k(\omega_e) \cos k\chi \quad (3)$$

この式における係数 a_k を推算すれば、方向周波数応答関数の2乗が求められる。推算は以上の式を離散化して行うため、以下の説明では行列表現を用いる。列ベクトルを()で、行列を[]で記述する。

(1)式の離散化表現は波方向を n 個として、1つの出会い周波数において

$$s = (w_n)^T (|h_n|^2) \delta\chi \quad (4)$$

と書ける。

$w, |h_n|^2$ は、それぞれ、周波数 ω_e における波のスペクトルと浮体の方向応答関数を表わし、 $\delta\chi$ は波向角の離散幅である。肩字の T は行列及びベクトルの転置を意味する。

本法では m 種類の波浪中での実験より $|h_n|^2$ を推定するので s は更に m 行の列ベクトル (s_m) となる。又(3)式の行列表現は次式となる。

$$(|h_n|^2) \equiv \begin{bmatrix} 1 & \cos x_1 & \cdots & \cos Nx_1 \\ 1 & \cos x_2 & \cdots & \cos Nx_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cos x_n & \cdots & \cos Nx_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} \equiv [C](a) \quad (5)$$

以上より1つの出会い周波数において、応答の1次元スペクトルの推定誤差の2乗を最小にする条件式は次式

$$\begin{bmatrix} ([W][C])^T ([W][C]) (\delta\chi)^2 & cI \\ cI & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (a_n) \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ([W][C])^T (s) \delta\chi \\ (|h_n|^2)_t \end{pmatrix} \quad (6)$$

で与えられる故これを解けば応答の方向分布を表現するフーリエ係数が求まる。但しこれは周波数毎に異なるので出会い周波数毎に(6)式を解く必要がある。

なお行列 $[W]$ の要素は

$$[W] = \begin{bmatrix} (w)_1^T \\ (w)_2^T \\ \vdots \\ (w)_m^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

となっている。

ここでは、前述した様にスペクトルの異なる方向波中のデータを複数 (m 種類) 利用して、係数ベクトルを求めているが、(6)式ではさらに精度を上げるために、可能な場合は長波頂波中の実験データも利用する表現となっている。即ち、波向角 x_i における周波数応答関数 $(|h_n|^2)_i$ が測定されているものとする、波向角が x_i の時に応答関数がこの値をとる条件が拘束条件として(6)式に付加されている。即ちラグランジェの未定乗数 λ を導入している。

ただし、 $(c)_i$ はフーリエ級数行列 $[C]$ の第 i 行ベクトルである。左辺の既知行列は正則とは限らないため、この一次方程式の解法には文献[7]では一般化逆行列を用いたが本論文ではガウスの消去法を使用して特に問題はなかった。これにより、求められた係数ベクトルを(3)式に代入して平方根をとれば方向応答関数が求められる。

平方根をとっているのが値がゼロに近い所で応答関数の尖りが表現される事になる。

3. 数値シミュレーションによる本推定方法の検証

本推定法の妥当性を検討する為にストリップ法 (NSM) に基づく理論計算による方向周波数応答関数を使用して数値的なシミュレーションを行い推定方法の検討を行った。

通常理論計算は波の絶対周波数ベースで計算するので、 ω_0 ベースの理論方向応答関数と ω_0 ベースの方向波スペクトルにより運動の2次元スペクトルを ω_0 ベースで得る。更にこれを出会い周波数 ω_e ベースに変換する。次に変換された2次元の運動スペクトルを角度方向に積分し、得られた運動応答の1次元のスペクトルを実験によるスペクトルとみなして本推定法を適用した。

最終的にはこの様にして推定された方向周波数応答関数を再度 ω_0 ベースに変換し与えた方向周波数応答関数に戻るか否かまたフーリエ級数の項数及び方向スペクトル波の組合せ数の影響等をみた。

対象船としては次節で述べるコンテナ船 (SR 108 型) とした。船速はフルード数で 0.275 である。主要目を表 1 に示す。ビルジキール付きで、ロールの減衰係数としては模型実験による 10 度及び 20 度の N 係数を用いて等価減衰係数を求めて使用した。波の1次元スペクトル型としては ITTC 型とし、平均周期 (T 02) はモデルスケールで 0.8, 1.0, 1.2 sec の3種類、及びスペクトルの方向分布関数は $\cos(x)$ の $2n$ 乗分布で $2n=2, 4, 12$ とし関数で与えた。これらは $\cos(x/2)$ の $2s$ 乗表現の場合の $s=5, 10, 25$ に相当する。なお方向分布関数は ω によらず一定とした。波の主

Table. 1 Principal dimensions of a container ship

I T E M S	S H I P		M O D E L	
	SPECIFIED VALUE		EXP. VALUE	
LENGTH (P.P.)	175.0 (m)	2,000 (m)		
BREADTH	25.4 (m)	0,2900 (m)		
DEPTH	15.4 (m)	0,1760 (m)		
DRAFT	9.5 (m)	0,1086 (m)		
DISPLACEMENT	24742 (ton)	36,032 (kg)	35,810 (kg)	
BLOCK COEFF.	0.562	0,562		
C.G. FROM KEEL	9.52 (m)	0,1088 (m)	0,1086 (m)	
C.G. FROM M.S.	-3.164 (m)	-0,0362 (m)	-0,0360 (m)	
LONGI. RADIUS OF GYRATION	0.24 Lpp	0,24 Lpp	0,2385 Lpp	
TRIM	0.000 (m)	0,0000 (m)		
GM	1,000 (m)	0,0114 (m)	0,0115 (m)	
KM	10,520 (m)	0,1202 (m)		
T (HEAVE) $F_n = 0$ $F_n = 0.275$			0,779 (s) 0,784 (s)	
T (PITCH) $F_n = 0$ $F_n = 0.275$			0,781 (s) 0,725 (s)	
T (ROLL) $F_n = 0$ $F_n = 0.275$			1,921 (s) 1,910 (s)	
SCALE	1,0	2/175		

方向は実験に合わせて 180 度 (向い波) とした。

結果を図 1 に示す。左半分が周波数応答関数の方向分布、右半分が方向別の周波数分布で上からヒープ、ピッチ、ロールとなっている。実線は理論値であるが全体的なものは後出の図 6 の左半分を参照されたい。理論計算の実線に対して逆算値の○印は殆ど一致していた。従ってここでは後の実験によるものと比較して理論値との食い違いが見られたケースに絞って例示した。これより本方法が基本的に正しい事が判る。

次に使用する方向波スペクトルの種類数の影響について図 2 に加速度の応答関数の方向分布の 1 例を示す。図中の N_{um} は組み合わせたスペクトルの種類の数 (m) で 9 と 4 の場合が示されている。Fixed は 180 度での値を指定値 (この場合は理論値) に拘束する条件を入れた場合、No fix は入れない場合である。 $N_{um}=9$ の場合は No fix も計算したが殆ど Fixed と違いが無かった。これより組合せ数が 9 程度であれば十分で、4 程度と少ない場合は 180 度の応答関数だけでも判っていて拘束条件として使用すれば $N_{um}=9$ の場合と同程度の良好な推定が得られる事が判る。

最後にフーリエ級数に展開した時の項数 N の影響について見てみたのが図 3 である。これはヒープの例であるが図中の Step 数が項数 N を意味している。これでも判る様に項数が 4, 5, 6 では良好であるがそれ以上或は以下であっても良好で無くなる事が判る。従って今回の実験による方向周波数応答関数推定には項数としては 5 を選んだ。また方向波スペクトルの種類としては分布関数の違い 2 種類、平均周期の違い 4 種類計 8 種類で更に 180 度の値を過渡水波による計測値で束縛した。

4. 実験

表 1 に示すコンテナ船モデルについて横浜国立大学の曳航水槽において曳航実験を行った。計測方法概略を図 4 に

Fig. 1 Examination on the accuracy of present method for estimating directional transfer function of ship motion by numerical simulation. W_0 means wave absolute frequency and not encounter frequency. Solid curves are theoretical ones.

Fig. 2 Effect of the number of spectral shape and constraint on estimation

Fig. 3 Effect of the number of the term of Fourier series on estimation

示す。水槽は長さ100m幅8m水深3.5mで8m幅に方向スペクトル波造波用に24セットのプランジャー式スネークタイプ造波機が設置されている。船速はフルード数0.275相当の1.217m/sで想定実船の常用速度22.1ノットに相当する。運動はヒープ、ピッチ、ロールをポテンシオメーターで、81/2（オフセンター）での上下加速度を歪

Fig. 4 Schematic view of the way of measurement of motion and waves in directional spectrum waves

Fig. 5 Variety of directional wave spectra (one dimensional spectra and directional distribution function) measured in experiments.

ゲージタイプの加速度計で計測した。スウェー、ヨー、サージは固定である。方向スペクトル計測用の出会い波高計は本学で開発したレーザービーム型の波面計を使用した⁹⁾。

水中発射されたレーザービームは水面傾斜に従って屈折し水平に置かれた投影盤に光スポットを生ずる。そのx,y座標をカメラ1で捉え電気信号に変換し演算により2方向

の波面傾斜を求める。又、カメラ2でレーザービームが水面を貫通する点の上下座標即ち水面の上下変位を捉える。

ビームの本数は多い程良いが今回使用したビームは1本でこれにより前述の様に波高および2方向波面傾斜、都合3種類の波面情報を得、最尤法 (MLM) により方向スペクトルを推定した。本波面計は計測点において攪乱作用が無

いため高速航走時の計測にも適しているといえる。

造波した方向スペクトル波はほぼ3節のシミュレーション計算で利用したものと同じ種類と考えて良いが実験で利用した方向波の計測されたスペクトルの具体例を図5に示す。図5に示された方向波は平均周期 (T02) 0.9秒から1.4秒の4種類のITTC型スペクトルであるが詳細な変

Fig. 6 Left : Theoretically (NSM) calculated directional transfer functions
Right : Experimentally estimated directional transfer functions

は図中に示されている。例えば有義波高は 5 cm 程度(実船で約 4.4 m)となっている事がわかる。また、方向分布は比較的広い分布を持つものであり、 $\cos(x)$ の 2 乗および 4 乗分布に近いものである。

本学の水槽の有効長さを考えると一回の有効計測時間は約 60 sec であるので出会いの波数を 200 山程度を目標に各々 3 回曳航を行いそれらの平均スペクトルを求めた。

スペクトル解析は FFT 法としてブロックサイズは 512, ラグ数 64, サンプリング周期 0.05 sec でウィンドウはハニングウィンドウを使用した。

5. 推 定 結 果

逆算された方向周波数応答関数の全体の傾向を見る為に 3 次元表示したものを図 6 に示す。横軸は計測による出会い周波数を波の絶対周波数に変換している。奥行きが波の出会い角で中央が 180 度即ち向い波状態である。比較的高速曳航状態であるため出会い周波数から絶対周波数への変換の影響が大きく出てくる格好になっている。角度別のラインは 5 度おきとしている。但し波のエネルギーがピークの 10% 程度以下しか無い周波数および角度領域では当然誤差が大きくなるのでカットした。

Fig. 7 Estimated directional distribution of transfer function

図6では左半分が理論値、右半分が逆算による推定値である。上からヒープ、ピッチ、ロール、上下加速度の順となっている。但しロールの理論値はスウェーの連成を含むが実験ではスウェーを拘束している違いがある。全体的に傾向は合っていると言えるが特に ± 90 度近くの値に変化が大きく出ている。

これを応答関数の方向分布として3つの周波数位置で見たのが図7である。各段の運動モードは図6と同じである。各段共3種類の周波数での方向応答関数が示されているが周波数は必ずしも同じにしていらないので注意されたい。これは応答関数の有意な周波数範囲が異なるので有意な範囲で3箇所示した為である。

これで見ると 180 度 ± 60 度程度の範囲で理論値と実験値は大体一致していると言える。但しロールは図1下段のシミュレーション結果にくらべて一致度は悪い。これはロ

ールの応答が大きくなる 90 、 270 度近傍で波のエネルギーが小さく、方向波のスペクトル及びロールの1次元スペクトルの解析精度が良くないと思われるがどちらに主原因があるかは確認出来ていない。また理論値の傾向との食い違いは実験ではスウェーを固定している点も影響あると思われる。

更に周波数ベースの応答関数で見てみたのが図8である。並べ方は図7と同じであるが各段3種類の図は出会い角の違いに対応しており、 180 、 135 、 110 度を選んでいる。ここでも 110 度となると理論値との違いが目立つ、又ロールも違いが見られるが全体に比較的良好な推定が出来ていると思われる。

6. 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

Fig. 8 Estimated frequency transfer function at some encounter angle

浮体運動を計測し、得られた1次元スペクトルから、波周波数と波向角の関数として表現される2次元の線形方向周波数応答関数を直接推定する新たな方法を航走船舶の運動応答関数推定に適用し理論値と比較した例を示した。結論を要約して、以下に示す。

但し方向波スペクトルの方向分布は、正面向い波を180度とし、左右対称形で180度±90度以内、主方向は長水槽の長手方向に限られている場合の結論である点に注意されたい。

1. 著者らが先に示した方法⁷⁾によれば数種（ここでは8種類）の方向スペクトル波中で、向い波状態で航走中の船体の運動計測結果からも線形方向周波数応答関数の振幅比部分が実験的に求まる。
2. 数値シミュレーションの結果によると長波頂向い波中での周波数応答関数がわかっていればそれを束縛条件として取り入れることにより4種類程度の方向スペクトル波を用意するだけでも比較的良好な結果が得られる。但し波及び応答のスペクトルが精度良く求まっている場合についてである。
3. 今回使用した標準的な波スペクトル中の実験では実用上十分な推定精度は方向スペクトル波の主方向に対し±60°の範囲内に限られるようである。
4. 今回ロールの推定と理論値との間に不一致が見られたが90度及び270度近傍の波エネルギーが極めて小である事が主原因と思われる。
5. 本手法の応用として、実船でも種々の方向スペクトル波中での応答を計測し、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。

なお方向応答関数を求める目的に対しては十分広い方向分布、周波数範囲の波を使用する必要がある。海洋構造物の場合⁸⁾と同様にモデルが停止状態であれば横波状態でも計測する事によって主方向を90度変えた事になり分布が広がった効果が期待できる。

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。ここに謝意を表する。又本研究の実験を担当された平成2年度浮体運動学研究室の船チームの学生諸君にも謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 小林顕太郎, 小保方準: “コンテナ船型の斜波中船体運動および波浪荷重試験”, 住友重機械技報, Vol. 29, No. 86 (1981)
- 2) 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)
- 3) 竹沢誠二, 小林顕太郎, 笠原昭夫: 長水槽内で発生させた方向スペクトル波について, 日本造船学会論文集, 第163号, (1988)
- 4) 竹沢誠二, 平山次清: 長水槽における方向スペクトル波中航走時船体運動試験, 日本造船学会論文集, 第165号, (1989)
- 5) Tekezawa, S., Hirayama, T., Acharyya, S., 'Towed Ship Motion Test in Directional Spectrum Waves in a Long Tank (Part 2)', Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 166, (1989)
- 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) 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)
- 8) 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)
- 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)