

PS-3 実船搭載を想定した波高計による波向計算プログラムの開発

流体設計系 * 櫻田 顕子、横田 早織

1. はじめに

精度の高い運航評価をするためには船舶の遭遇海象を精度よく計測する必要があり、特に波は波浪中抵抗増加を推定するための重要な情報である。航行中の船が遭遇する波の把握には目視による計測、レーダー波浪計測、気象庁等からの予測値があるが、本研究では波高計を用いる方法に着目し、波向を複数台の波高計の計測値から計算する方法を検討した。さらに実用化に向けてプログラムを開発し、実船搭載を想定して前進速度影響や船体動揺の影響について検証を実施している。

2. 波向の計算方法

複数台の波高計の計測値から波向を計算する方法について検討する。図-1の通り波高計 W_1 、波高計 W_2 、波高計 W_3 があり、 y 軸から α_1 の角度で規則波が向かってくる場合を想定する。波高計 W_1 と波高計 W_2 で計測される波の位相差を ε_{12} 、波高計間距離を L_{12} とし、波高計 W_1 と波高計 W_3 で計測される波の位相差を ε_{13} 、波高計間距離を L_{13} とすると幾何学的関係より波向 α_1 は(2.1)式の通り表すことができる。ここで β は3台の波高計の成す角である。

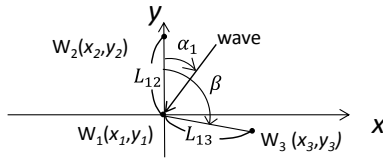


図-1 波高計と波向の座標

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \beta - \frac{\varepsilon_{13} L_{12}}{\varepsilon_{12} L_{13}}}{\sin \beta} \right) \quad (2.1)$$

2.1 相互相関関数のピークの時間差より求める方法

位相差の求め方を2つの方法で検討する。1つ目は相互相関関数のピークの時間差により求める方法である。位相差は規則波の場合は角周波数 ω と波の到達時間差 τ との積により求めることができる。実海域では多方向不規則波であるが、 ω_{p1} を波高計 W_1 でのスペクトラムがピークとなる角周波数、 τ_{p12} を波高計 W_1 と波高計 W_2 の相互相関関数のピークの時間差とすると、規則波の考え方に基づいて波高計 W_1 と波高計 W_2 の位相差 ε_{12} は $\varepsilon_{12} = \omega_{p1} \cdot \tau_{p12}$ と表現することができる。波高計 W_1 と波高計 W_3 の位相差 ε_{13} についても同様に求めることができる。この方法で求められる波向を α_r とする。

2.2 クロススペクトルを用いる方法

2つ目の位相差の求め方としてクロススペクトルを用いる方法を検討する。波高計 W_1 と波高計 W_2 の位相差を求める場合、クロススペクトル $S_{12}(\omega)$ は(2.2)式の通り表現でき、この実数部と虚数部より求められる位相は(2.3)式の通りとなる。ここで $r_{12}(\tau)$ は相互相関関数、 $R_{12}(k)$ は離散化した相互相関関数、 f はサンプリング周波数、 k_+ と k_- はそれぞれ積分範囲の上端と下端のデータであり、相互相関関数がピークとなる時間差を中心として前後に $2\pi \cdot N_w / \omega_{p1}$ データ離れた位置とする。波数 N_w は試行の結果より5とした。

$$S_{12}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} r_{12}(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{12}(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^{k_+ - k_- + 1} R_{12}(k + k_- - 1) \sin\{\omega(k + k_- - 1)f\} \cdot \Delta\tau}{\sum_{k=1}^{k_+ - k_- + 1} R_{12}(k + k_- - 1) \cos\{\omega(k + k_- - 1)f\} \cdot \Delta\tau} \right) \quad (2.3)$$

この方法では任意の角周波数における位相差を求めるため、周波数ピークが2つあるようなスペクトラムを持つ波に対してそれぞれの波向を求めることができる。 ω_{p1} から求められる波向を α_p とする。

3. シミュレーション波形による波向計算

2章で検討した方法についてプログラムを開発し、検証として single summation 法で求めたシミュレーション波形を入力としてその波向を計算する。波設定は1/60スケールを想定しBF6代表海象における波周期、有義波高とする。表-1に波設定を示す。ここで T_p はピーク波周期、 T_{ps} は実船相当のピーク波周期、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $H_{1/3s}$ は実船相当の有義波高である。スペクトラムはJONSWAP型で方向分布関数はコサイン2乗型とする。

表-1 波設定

T_p [s]	(T_{ps}) [s]	$H_{1/3}$ [m]	$(H_{1/3s})$ [m]
0.865	6.7	0.05	3.0

計算による傾向を確認するため、ランダムに10台の波高計を設置して計算を実施する。設定波向を0度(向波)とした場合の推定結果を図-2に示す。横軸は図-1の3台の波高計の成す角 β である。図中 all は全波高計の組み合わせによる結果である。ここで、2組の相互相関関数のピークの値

の積を r_{mn} とすると $r_{mn} \geq 0.7$ でかつ $30^\circ \leq \beta \leq 150^\circ$ の波高計の組み合わせにおける計算結果 ex が適切に設定波向きを表現できていることが分かった。そこで最終波向を ex の平均値として、得られた α_r , α_{cp} それぞれの設定波向 0 度との差を $d\alpha_r$, $d\alpha_{cp}$ として図-2 に示す。いずれの求め方においても 5 度程度の差で求められていることが示された。

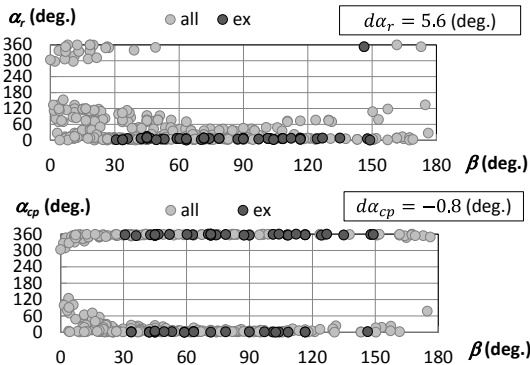


図-2 上: α_r の推定結果, 下: α_{cp} の推定結果

4. 前進速度影響

波高計が船に設置されている場合を想定し、前進速度影響について検証した。前進速度は実船で 20(knot)を想定して 1/60 スケールで 1.33(m/s)とした。図-3 に α_r の検証結果を示す。設定船速を α_0 として前進速度が 0 場合の誤差を $d\alpha_{r0}$, 前進速度がある場合の誤差を $d\alpha_{rv}$ とする。 α_r では前進速度影響は見られず、誤差は全波向で 10 度以内であった。

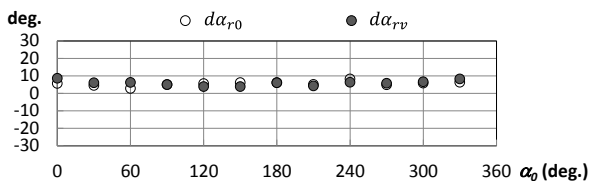


図-3 前進速度がある場合の α_r 推定結果

次に α_{cp} について図-4 に示す。 $d\alpha_{cp0}(w/o w)$ は前進速度が 0 の場合の誤差, $d\alpha_{cpv}(w/o w)$ は前進速度がある場合の誤差であり、前進速度影響が見られる。これは、前進しながら計測した波形による相互相関関数の時間差が大きくなるほど相互相関関数の時系列が乱れるためと考えられる。そこで、時間差の大きい部分の寄与を小さくするためにクロススペクトルの積分計算の際に Parzen ウィンドー¹⁾を掛けて再計算した。その結果を $d\alpha_{cpv}(with w)$ として示す。

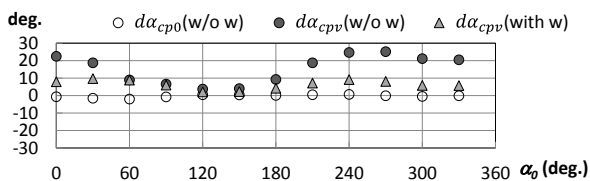


図-4 前進速度がある場合の α_{cp} 推定結果

α_{cp} についても誤差 10 度以内で推定できることが示された。

5. 波高計上下変位の除去

実際に船に取り付けると計測される波形は船体動揺を含んだ値となるが波向推定では船体動揺を除去する必要がある。そこで波高計と同じ位置に加速度計を設置して加速度から波高計の上下変位を求めて差し引くことを想定し、事前処理プログラムを開発した。上下変位は加速度を 2 階積分して求めることができるが、積分の際に累積誤差が生じるため、移動平均によりその誤差を除去する。開発したプログラムを用いて水槽試験結果により検証を行った。図-5 にその結果を示す。模型船は 1/40 スケールで、test が実際に計測された上下変位、cal(w/o ave)が移動平均をしない場合の推定上下変位、cal(with ave)が 20 秒の移動平均をした場合の推定上下変位である。図-5 より移動平均処理をすることにより適切に上下変位が求められていることが示された。

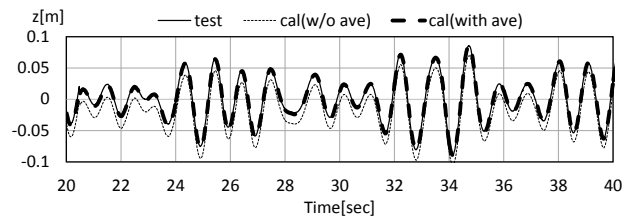


図-5 上下変位推定結果

6. まとめ

複数台の波高計の計測結果から波向を推定する方法を検討しプログラムを開発した。波向推定は相互相関関数のピークの時間差より求める α_r とクロススペクトルを用いて求める α_{cp} を検討し、いずれの方法でも向波で 5 度程度の誤差で推定できることを示した。実船搭載を想定して前進速度がある場合について検証し α_{cp} では波向によっては誤差が大きくなることが分かったが、Parzen ウィンドーを掛けることにより全波向で 10 度以内の差で推定できることを示した。検証では標準スペクトルを仮定したが、実海域ではスペクトルピークが複数あるような波も存在する。 α_{cp} は、その角周波数それぞれに対する波向を求められるため有用である。一方で、波全体としての傾向という意味で α_r の値を併せて参照することで、より波向推定の精度が担保されると考えられる。

実際に実船で波向を推定する場合には波高計の上下運動を除去する必要があるため、加速度から上下変位を推定するプログラムを開発し、水槽試験結果により検証した。

謝辞

本研究は、アルモテック株式会社との共同研究により実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日野幹雄: スペクトル解析 (新装版), 朝倉書店 (2010) .