

複数台の波高計による簡便な波向推定法とその検証

櫻田 顕子*, 横田 早織*

Validation of the Simple Estimation Method for the Wave Angle Using Wave Height Meters

by

Akiko SAKURADA, Saori YOKOTA

Abstract

From 2013, SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) has been mandatory, and since 2019 DCS (Data Collection System) has started. Under the background, performance in actual seas is required higher level than ever. Recently various operation evaluations using monitoring data are carried out for a lot of ships in order to improve the ship energy efficiency. For the evaluation with high accuracy, the input information; encounter weather is important, especially the wave information is important to estimate the added resistance in waves. In this study, the way using wave height meters is focused and how to estimate the wave angle from the measurement data is investigated. For the practical realization, the program to estimate the wave angle is developed. The two methods to estimate the wave angle are considered. One is using the time of the peak of the cross-correlation, and the other is using cross spectrum. The validation was carried out by the simulation wave. The simulation wave is set as the possible wave actually. As a result, the simple estimation method using wave height meters is developed.

* 流体設計系

原稿受付 令和元年10月23日

審査日 令和元年12月3日

目 次

1. まえがき	24
2. 複数台の波高計による波向推定方法の検討	25
2.1 波向の求め方	25
2.2 4台以上の波高計を用いる場合への拡張方法	28
2.3 検証（3台の波高計）	28
2.4 積分範囲の検討	30
2.5 検証（10台の波高計）	31
3. 前進速度影響	34
4. 船体運動の考慮	37
4.1 加速度から上下変位を求める方法	37
4.2 検証	38
5. まとめ	39
参考文献	39

1. まえがき

2013年1月に始まった船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP）の強制化や2019年1月から開始されている燃料消費実績報告制度（DCS）によって、実海域性能はこれまでより一層高いレベルを求められている。このため近年では多くの船で省エネ運航を目的としてモニタリングデータによる運航評価が行われている。精度の高い運航評価をするためには船舶の遭遇海象を計測して評価する必要があり、特に波の計測は波浪中抵抗増加を推定するための重要な情報である。

本研究では波の計測方法として波高計を用いる方法に注目した。波高、波周期は1台の波高計で得られる水面波形からスペクトル解析により計算することができる。実際にドップラー式波高計とFMCW（周波数変調連続波）方式波高計を用いた実海域試験も実施されていて、2つの方式で同等のスペクトル形状が得られることが示されている¹⁾。一方で波向は複数台の波高計による計測値の相関から求める必要がある。実海域は多方向不規則波であり、波は角周波数と波向を変数とした方向スペクトルにより表現することができる。

方向スペクトルを求める標準的な方法としては直接フーリエ法²⁾、分布関数あてはめ法³⁾、パラメータ法^{4),5)}、最尤法⁶⁾がある⁷⁾。直接フーリエ法では一般的に方向分解能が低い、分布関数あてはめ法では仮定された関数以外の方向分布形状を表現できない、パラメータ法ではパラメータの値に依存する、といった課題があり⁸⁾、最尤法では分解能が高いが推定値が発散する場合などいくつかの問題点も指摘されている⁹⁾。実船計測での実用化を目標とすると、方向スペクトルの推定は推定手法による違いもあり定量的な精度評価が難しい。また船体を一つの波浪計とみなして船体運動から波スペクトルを推定する方法についても多く検討されている^{10),11),12),13),14)}。しかし近年では船のサイズが大型化しているため相対的に短波長の波が多くなり、その波長では船体動揺が小さいため精度が下がるという課題がある。

そこで本研究では基礎的かつ簡便な方法として波高計を用いて計測し任意の角周波数に応じて波向を推定する方法について検討し、シミュレーション波形により設定波向との比較を行った。波浪スペクトルそのものではなく、波高・波周期・波向を求める方法として提案されている方法¹⁵⁾を基礎として実際の計測で必要となる前進速度影響の評価を行い、そこで明らかになった課題を解決する方法を検討した。また実用化に向けて船体動揺の除去についても検討しプログラム実装を行った。その内容を報告する。

2. 複数台の波高計による波向推定方法の検討

複数台の波高計による水面波形から任意の角周波数に応じて波向を推定する方法について検討する。

2.1 波向の求め方

(1) 幾何学的関係

図2.1に示す通り波高計が3台(W_1, W_2, W_3)あるとする。規則波を想定して W_1 と W_2 の位相差を ε_{12} 、距離を L_{12} 、 W_1 と W_3 の位相差を ε_{13} 、距離を L_{13} とすると、幾何学的関係より位相差は(2.1)式、(2.2)式のとおり表すことができる¹⁵⁾。ここで k は入射波の波数であり(2.3)式で定義され λ は入射波の波長である。また $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ には(2.4)式の関係がある。

$$\varepsilon_{12} = L_{12}k \cos \alpha_1 \tag{2.1}$$

$$\varepsilon_{13} = L_{13}k \cos \alpha_2 \tag{2.2}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2.3}$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \beta \tag{2.4}$$

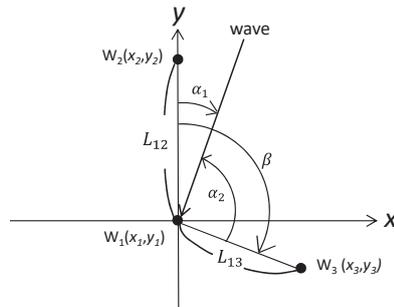


図 2.1 座標

ここで、 ε_{12} と ε_{13} の比をとって(2.4)式を代入すると(2.5)式となり波向 α_1 は(2.6)式の通り表すことができる。

$$\frac{\varepsilon_{13}}{\varepsilon_{12}} = \frac{L_{13}}{L_{12}} (\cos \beta - \sin \beta \tan \alpha_1) \tag{2.5}$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \beta - \frac{\varepsilon_{13} L_{12}}{\varepsilon_{12} L_{13}}}{\sin \beta} \right) \tag{2.6}$$

(2) 相互相関関数

位相差 ε_{12} 、 ε_{13} を求めるために、2組の波高計の組み合わせ W_1 と W_2 、 W_1 と W_3 で得られる波形からそれぞれ相互相関関数を求める。 W_1 と W_2 の相互相関関数は(2.7)式に示す通り求める。実際には離散データのため(2.8)式~(2.10)式の通りとなる。ここで、 $r_{12}(\tau)$ は時間差 τ を変数とした相互相関関数、 x_1 は W_1 より得られる水面変位、 x_2 は W_2 より得られる水面変位、 μ_{x1} は x_1 の全区間の平均、 μ_{x2} は x_2 の全区間の平均であり、 $R_{12}(k_\tau)$ はデータ数 k_τ ずらした場合の離散化した相互相関関数、 m_1 は x_1 の平均、 m_2 は x_2 の平均であり、総和区間は $-k_m$ から k_m とする。 W_1 と W_3 の相互相関関数についても同様に求める。

$$r_{12}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{(x_1(t) - \mu_{x_1})(x_2(t+\tau) - \mu_{x_2})\} dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x_1(t) - \mu_{x_1})^2 dt} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x_2(t+\tau) - \mu_{x_2})^2 dt}} \quad (2.7)$$

$$R_{12}(k_\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{i=2k_m+1} \{(x_1(i-k_m-1) - m_1)(x_2(i-k_m-1+k_\tau) - m_2)\} \cdot \Delta\tau}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=2k_m+1} (x_1(i-k_m-1) - m_1)^2 \cdot \Delta\tau} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=2k_m+1} (x_2(i-k_m-1+k_\tau) - m_2)^2 \cdot \Delta\tau}} \quad (2.8)$$

$$m_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=2k_m+1} x_1(i-k_m-1)}{2k_m+1} \quad (2.9)$$

$$m_2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=2k_m+1} x_2(i-k_m-1+k_\tau)}{2k_m+1} \quad (2.10)$$

(3) 位相差

位相差は2通りの求め方を検討する．海洋波は実際には不規則波であるが1つ目の方法では規則波と同様の考え方で相互相関関数のピークの時間差を波の到達時間差， W_1 の波形のスペクトルピークの角周波数（以降卓越角周波数とする．）を代表角周波数と考え， ε_{12} を(2.11)式により求める．ここで， ω_{p1} は W_1 の波形より求められる卓越角周波数， τ_{p12} は W_1 と W_2 の相互相関関数のピークの時間差である．図2.2に求め方を示す． W_1 と W_3 の計測値の位相差 ε_{13} についても同様に求める．この方法より求められる位相差を用いて(2.6)式より推定する波向を α_r とする．

$$\varepsilon_{12} = \omega_{p1} \cdot \tau_{p12} \quad (2.11)$$

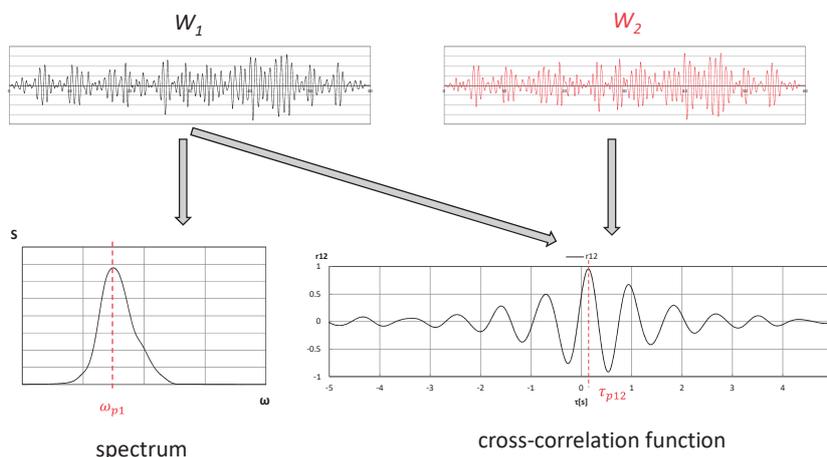


図2.2 位相差の求め方（相互相関関数のピークの時間差を用いる方法）

2つ目は海洋波を実際に即して不規則波にとらえ，クロススペクトルより求める方法である¹⁵⁾． W_1 と W_2 の計測値に関してクロススペクトルは角周波数 ω に応じて(2.12)式より求める．ここで $r_{12}(\tau)$ は W_1 と W_2 の相互相関関数である．

$$S_{12}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} r_{12}(\tau) d\tau \quad (2.12)$$

クロススペクトルは複素数であり, (2.13)式のとおりコスプレクトル C_o とクオドスペクトル Q_u を用いて表現することができ, ε_{12} は(2.14)式で求められる. (2.14)式に(2.12)式, (2.13)式を代入して離散化すると(2.15)式となる.

$$S_{12}(\omega) = C_o(\omega) - iQ_u(\omega) \tag{2.13}$$

$$\varepsilon_{12}(\omega) = \tan^{-1} \frac{Q_u(\omega)}{C_o(\omega)} \tag{2.14}$$

$$\varepsilon_{12}(\omega) = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=k_+}^{i=k_-} R_{12}(i) \sin(\omega\tau) \cdot \Delta\tau}{\sum_{i=k_-}^{i=k_+} R_{12}(i) \cos(\omega\tau) \cdot \Delta\tau} \tag{2.15}$$

代表角周波数は1つ目の方法と同様に W_1 の波形から計算する. この方法では任意の角周波数で位相が計算できるため, 風波とうねりの方向が異なるような場合でも一番高いピークの角周波数と二番目に高いピークの角周波数でそれぞれで波向を求めることで風波とうねりそれぞれの波向を表現することができる.

(2.15)式の k_- は(2.16)式, k_+ は(2.17)式で定義する. f はサンプリング周波数である. これは2つの波形に相関がみられる範囲として, τ_{p12} を中心として ω に応じた周期の N_w 倍離れた時間差までを積分することを表現している. N_w については2.4節で詳細を示す. 図2.3に相互相関関数と積分範囲を, 図2.4に位相差の求め方を示す. W_1 と W_3 の位相差に関しても同様の方法で求めることができる. この方法より求められる波向を α_{sp} とする.

$$k_- = \left(-\frac{2\pi \cdot N_w}{\omega} + \tau_{p12} \right) \cdot f \tag{2.16}$$

$$k_+ = \left(\frac{2\pi \cdot N_w}{\omega} + \tau_{p12} \right) \cdot f \tag{2.17}$$

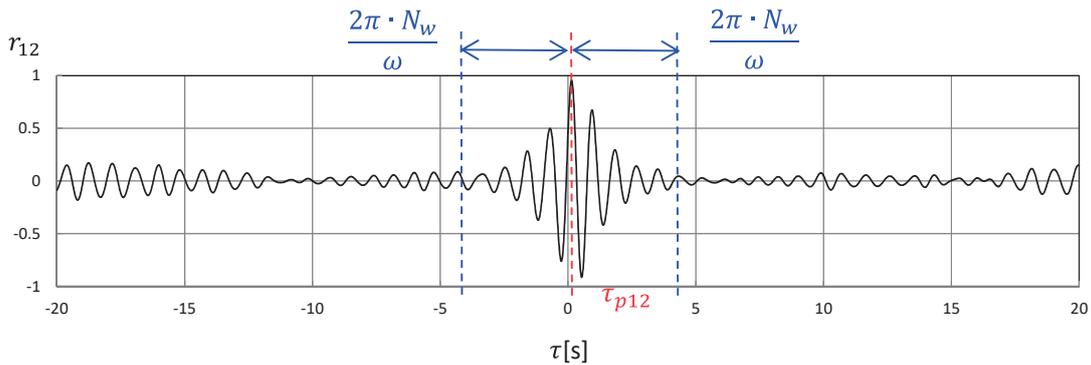


図 2.3 相互相関関数と積分範囲

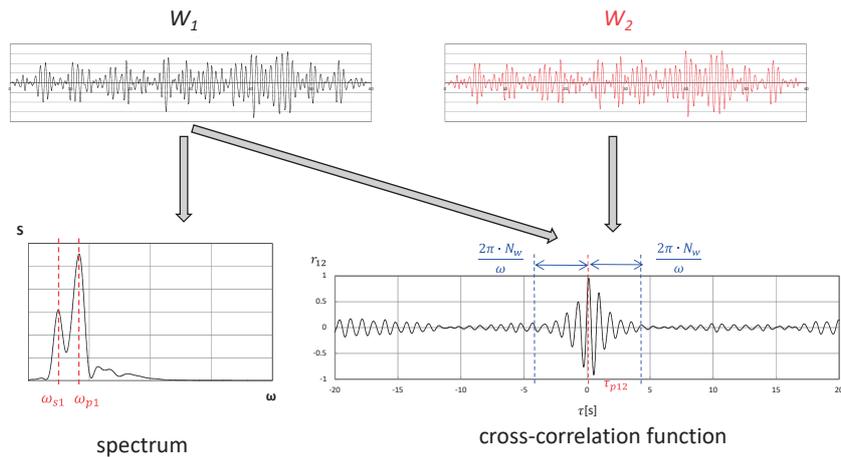


図 2.4 位相差の求め方（クロススペクトルを用いる方法）

2.2 4 台以上の波高計を用いる場合への拡張方法

波向は 3 台の波高計から求めることができるが、4 台以上の波高計があれば波高計が船の波下側にあり計測が難しい場合でも、補間し合うことでより高精度に推定することが可能となる。その場合 3 台の波高計の組み合わせを複数作成して、精度が高いと考えられる組み合わせの結果を平均する必要がある。2.1 節に示した通り、本研究の波向推定では角周波数を一つの波高計のスペクトルから求めて代表させるため、その波高計をメインの波高計 W_p として区別し、3 台のうち 2 台の波高計 W_i , W_j は残りの波高計から抽出する。波高計 $W_1 \sim W_4$ を設置した場合の組み合わせ例を表 2.1 に示す。

表 2.1 波高計組み合わせ例

W_p	W_i	W_j
W_1	W_2	W_3
		W_4
W_2	W_1	W_3
		W_4
W_3	W_1	W_2
		W_4
W_4	W_1	W_2
		W_3
	W_2	W_4

2.3 検証（3 台の波高計）

2.1 節で検討した波向推定方法について検証を実施する。検証には single summation 法¹⁶⁾で求めたシミュレーション波形（不規則波）を用いた。波形作成においては時系列の繰り返しを避けるため、周波数分割を不等間隔にしている。波設定は BF6 代表海象とした。表 2.2 に波設定を示す。ここで、 T_p は卓越波周期、 T_{ps} は 1/60 の模型船を想定した実船相当の卓越波周期、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $H_{1/3s}$ は 1/60 の模型船を想定した実船相当の有義波高である。周波数スペクトラムは JONSWAP 型、方向分布関数はコサイン 2 乗型とした。(2.16)式、(2.17)式の N_w は試行により 5 として検証を実施した。この妥当性については 2.4 節で検証する。また解析時間は実用的に船上で確認して随時操船へフィードバックするような場合も想定して 60 秒（実船スケールで約 8 分程度）とし、角周波

数の刻み幅による波向推定精度への影響を小さくするため、スペクトル解析ではスプライン補間により 0.01[rad/s] 刻みの角周波数を求めている

表 2.2 波設定

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

波高計位置を図 2.5 に示す。 W_1 と W_2 , W_1 と W_3 の波高計間距離は 0.2[m] であり、実船スケールで 1.2[m] である。設定波向は y 軸のプラスからマイナスへ向かう方向を 0 度、右回りを正として、0 度~330 度の 30 度刻みとした。また設定波向 0 度の W_1 , W_2 , W_3 それぞれの波高計位置で得られた波形を図 2.6 に示す。水槽試験を模して造波開始から停止までの水面波形を使用した。

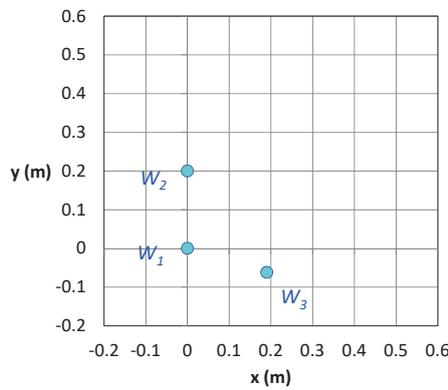


図 2.5 波高計位置 (3つの波高計)

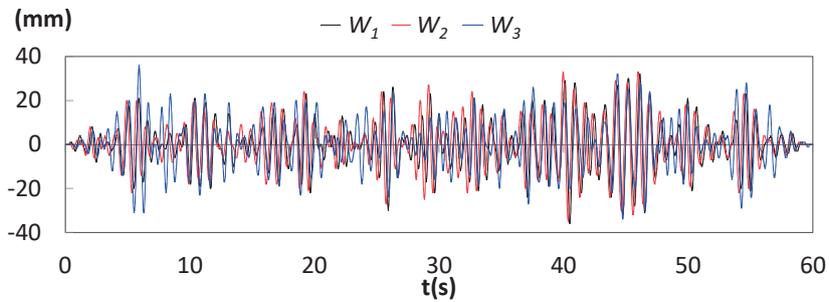


図 2.6 波形時系列例

設定波向ごとの計算結果を図 2.7 に示す。 $d\alpha_r$ は相互相関関数のピークの時間差で求めた α_r と設定波向 α_0 との差、 $d\alpha_{cp}$ はクロススペクトルで求めた α_{cp} と設定波向 α_0 との差であり、(2.18)式、(2.19)式により計算する。それぞれの設定波向で 3 点ずつ結果があるが、メインの波高計を W_1, W_2, W_3 とした場合のそれぞれの結果である。図 2.7 よりおおよそ ± 10 度以内で推定が出来ていることを示した。

$$d\alpha_r = \alpha_r - \alpha_0 \tag{2.18}$$

$$d\alpha_{cp} = \alpha_{cp} - \alpha_0 \tag{2.19}$$

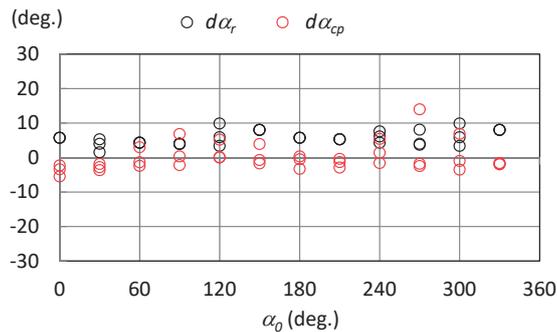


図 2.7 設定波向と推定結果との差

2.4 積分範囲の検討

これまでの検討では試行計算により $N_W=5$ としていたが、その妥当性の検証として 2.3 節の波高計位置、波設定の波形により N_W を変化させた場合の波向とコヒーレンスを求めた。コヒーレンスは(2.20)式に示す通りである。

ここで $\text{coh}^2(\omega)$ は x と y のコヒーレンス、 $S_{xy}(\omega)$ は x と y のクロススペクトル、 $S_{xx}(\omega)$ 、 $S_{yy}(\omega)$ はそれぞれ x 、 y のスペクトルを示す。

$$\text{coh}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \quad (2.20)$$

W_1, W_2, W_3 それぞれの波形より得られる自己相関関数と相互相関関数を図 2.8, 図 2.9 に示す。ここで R_{11}, R_{22}, R_{33} はそれぞれ W_1, W_2, W_3 の波形より得られる自己相関関数であり、 R_{12} は W_1 と W_2 、 R_{13} は W_1 と W_3 、 R_{23} は W_2 と W_3 より求められる相互相関関数である。 τ は自己相関関数、相互相関関数における時間差である。自己相関関数 R_{11} は(2.21)式の通り求める。ここで x_1 は W_1 より得られる水面変位、 k_r は移動するデータ数、 m_1 は x_1 の平均で(2.9)式より求め、総和区間は $-k_m$ から k_m とする。 R_{22}, R_{33} も同様に求める。また相互相関関数は(2.8)式より求める。なお自己相関関数、相互相関関数はピークで 1 となるように無次元化している。

$$R_{11}(k_r) = \frac{\sum_{i=1}^{i=2k_m+1} \{(x_1(i-k_m-1)-m_1)(x_1(i-k_m-1+k_r)-m_1)\} \cdot \Delta\tau}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=2k_m+1} (x_1(i-k_m-1)-m_1)^2 \cdot \Delta\tau} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=2k_m+1} (x_1(i-k_m-1+k_r)-m_1)^2 \cdot \Delta\tau}} \quad (2.21)$$

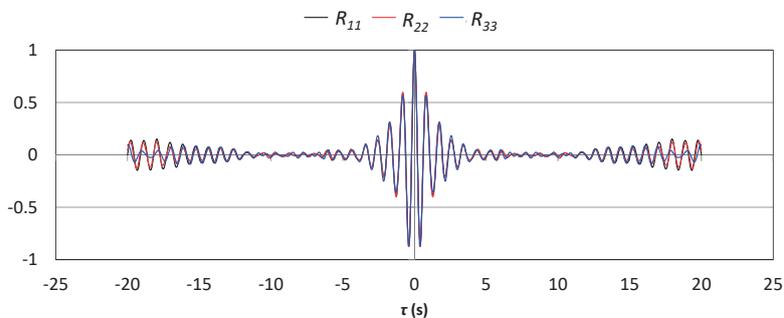


図 2.8 自己相関関数

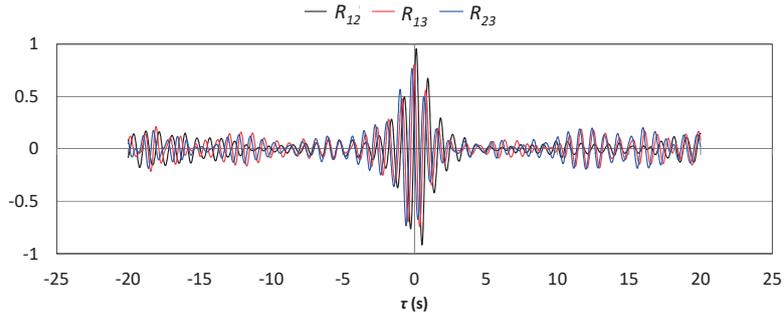


図 2.9 相互相関関数

ω をピークの角周波数 ω_p とし、 N_w を変更してコヒーレンスと波向を計算した結果をそれぞれ図 2.10, 図 2.11 に示す. 図 2.10 では W_1 をメインの波高計とした結果を左上に、 W_2 をメインの波高計とした結果を右上に、 W_3 をメインの波高計とした結果を下に示す. ここで coh12, coh13, coh23 はそれぞれ W_1 と W_2 , W_1 と W_3 , W_2 と W_3 より得られるコヒーレンスである. また図 2.11 中 $d\alpha_{cp1}$ は W_1 をメインの波高計とした場合の、 $d\alpha_{cp2}$ は W_2 をメインの波高計とした場合の、 $d\alpha_{cp3}$ は W_3 をメインの波高計とした場合の設定波向と推定波向との差を示す.

図 2.10 よりコヒーレンスは $N_w=3\sim 5$ で安定することがわかる. また図 2.11 より $N_w=3\sim 5$ で計算結果と設定波向との差が比較的小さいことがわかる. これより今回の波形では $N_w=3\sim 5$ が妥当であることを示した. 図 2.11 において N_w の増加とともに設定波向と推定波向の差が大きくなっているが、これは相関のほとんどない部分を多く積分範囲に含めていることが原因である.

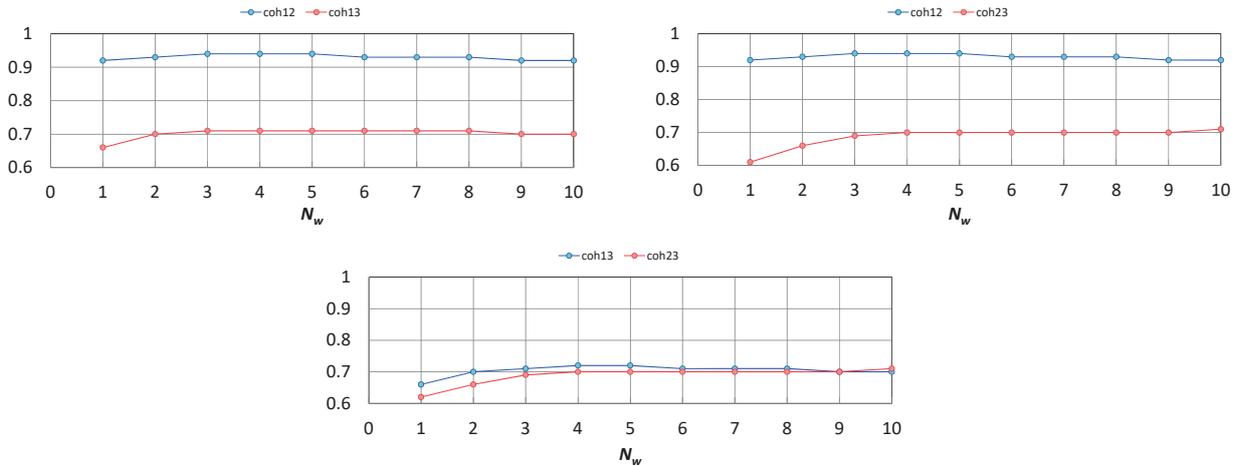


図 2.10 コヒーレンス

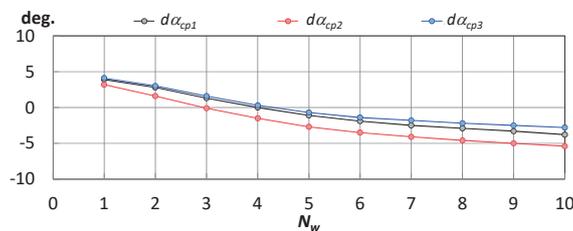


図 2.11 積分範囲変更による設定波向と計算波向の差

2.5 検証 (10 台の波高計)

10 台の波高計による検証結果について示し、高精度に推定できる条件を検討する. 波高計位置はランダムに図 2.12 の通りとした.

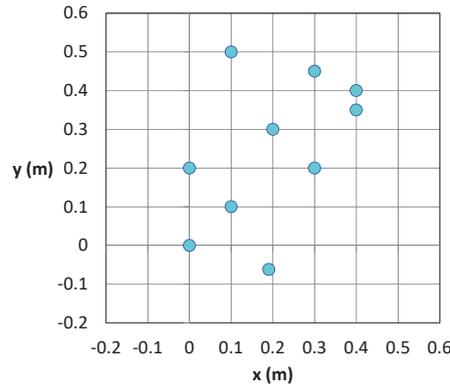


図 2.12 波高計位置 (10 台の波高計)

波設定は表 2.2 とし, 設定波向は 0 度, 90 度, 180 度, 270 度とする. それぞれの設定波向の計算結果を図 2.13 ~ 図 2.16 に示す. 全ての組み合わせで計算した結果を all とし, 波高計のなす角 β が推定精度に影響を与えられることから α_r と β の関係を図中 a に, α_{cp} と β の関係を図中 b に示す. また相互相関関数のピークの値が大きいほど波形の相関が高く精度が高いと考えられる. ここで 3 台の波高計から計算される相互相関関数はメインの波高計を W_p , 残り 2 台の波高計を W_i, W_j とすると W_p と W_i より r_{pi} が, W_p と W_j より r_{pj} が計算されるが, パラメータを減らすために $r_{xm} = r_{pi} \cdot r_{pj}$ とする. 全ての組み合わせで計算した結果を all とし, 相互相関関数と推定波向との関係として α_r と r_{xm} の関係を図中 c に, α_{cp} と r_{xm} の関係を図中 d に示す.

また全ての組み合わせによる検証より β が 30 度以上 150 度以下でかつ r_{xm} が 0.7 以上であれば適切に推定できていることがわかったため, その条件で抽出したデータを ex として示す.

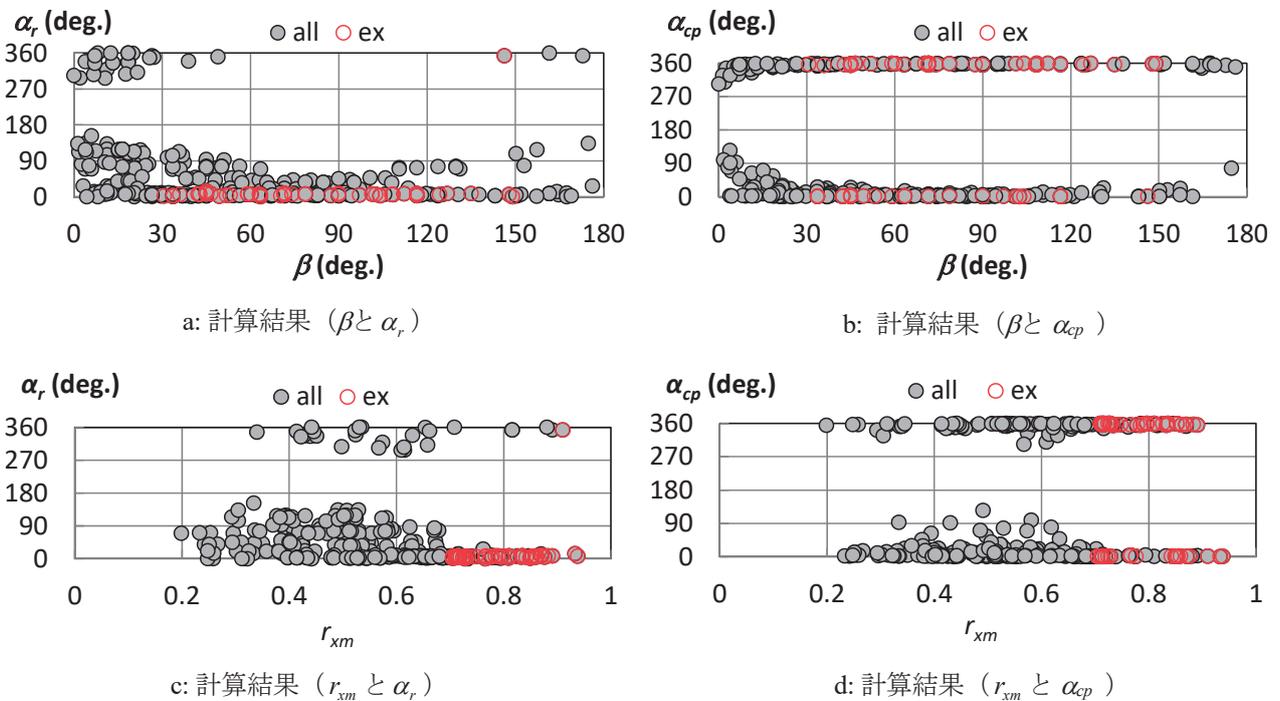


図 2.13 計算結果 ($\alpha_0 = 0^\circ$)

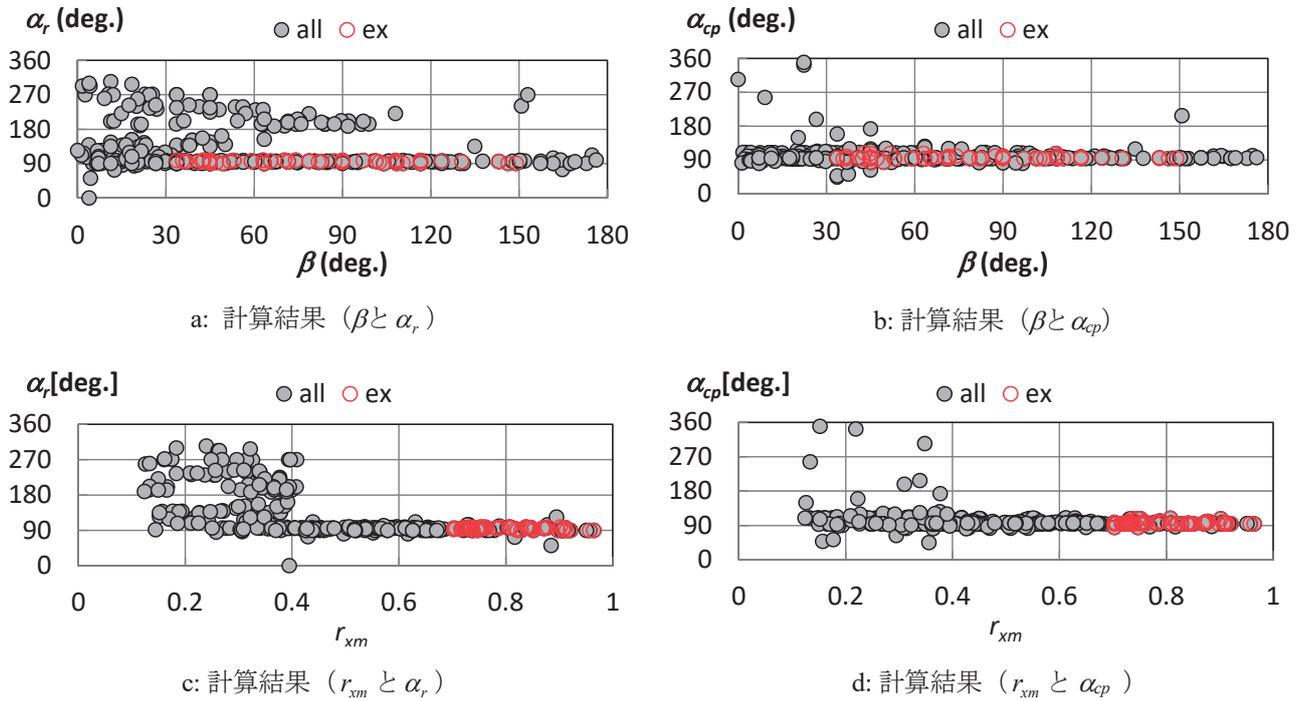


図 2.14 計算結果 ($\alpha_0 = 90^\circ$)

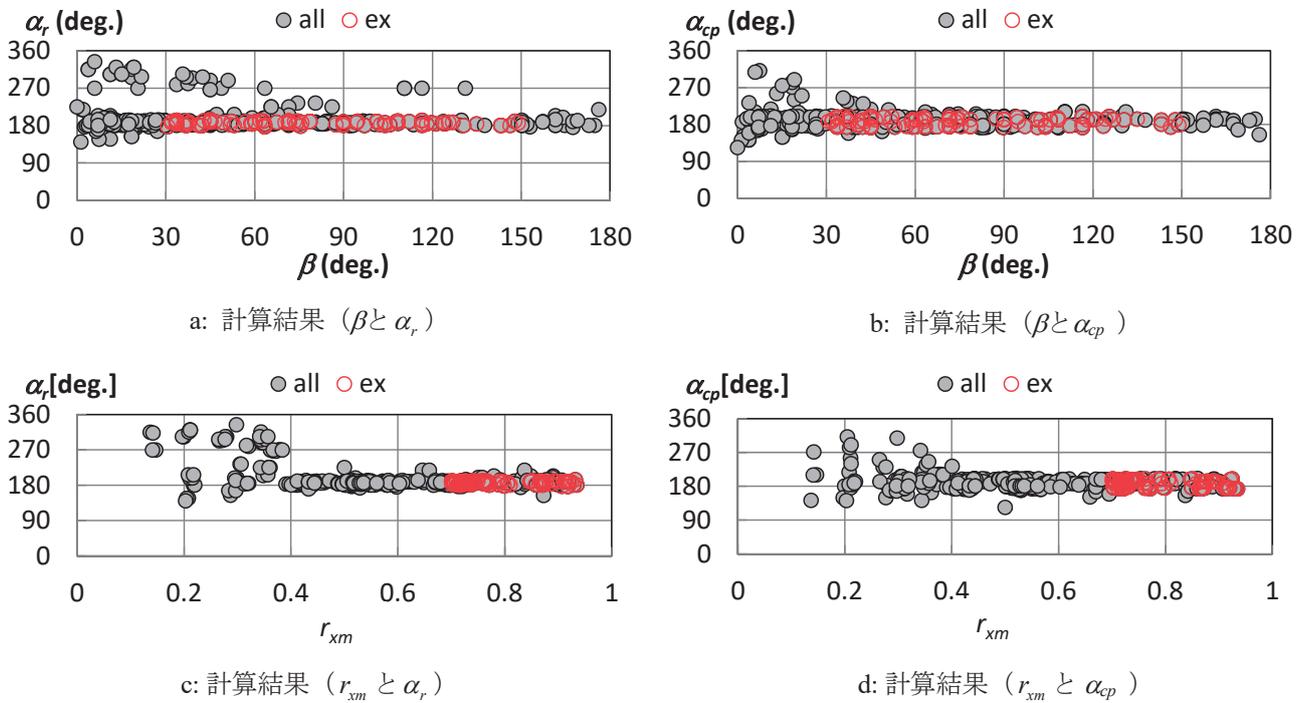


図 2.15 計算結果 ($\alpha_0 = 180^\circ$)

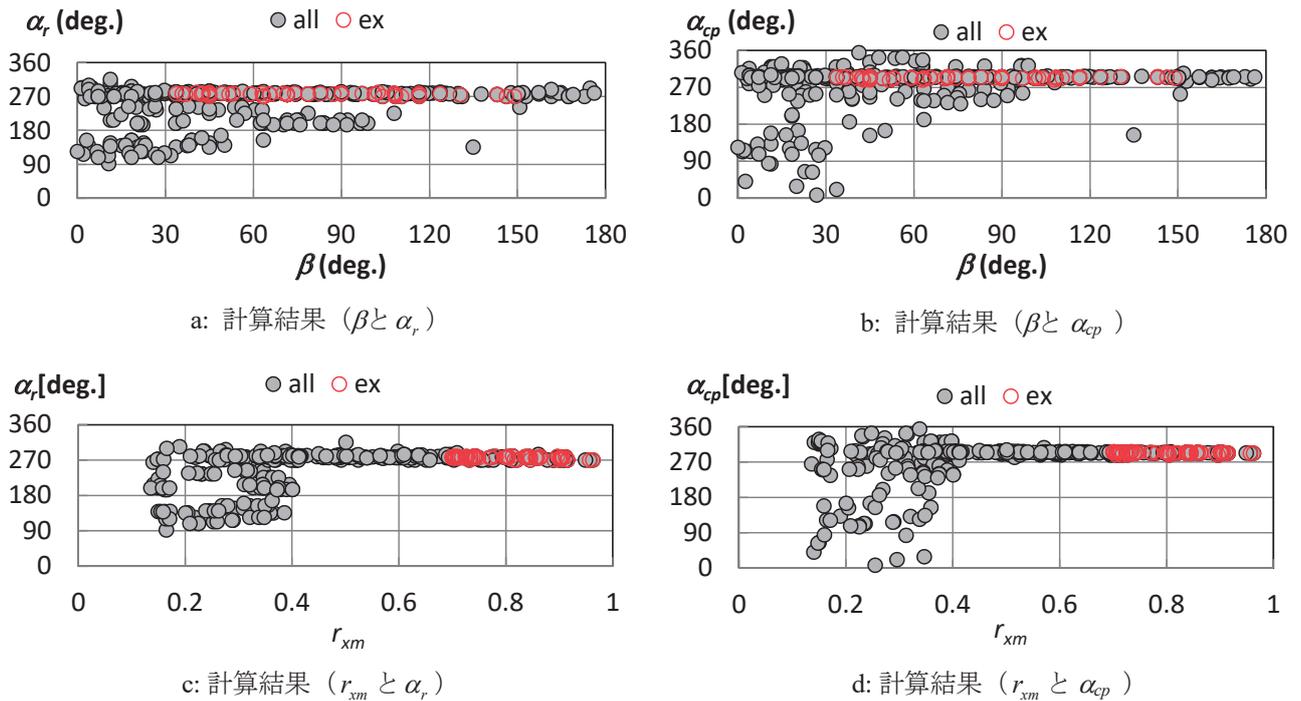


図 2.16 計算結果 ($\alpha_0 = 270^\circ$)

それぞれの波向について最終波向を ex の平均より求め、設定波向との差を表 2.3 に示す。表 2.3 より設定波向と推定波向の差が ± 10 度以内で推定できることを示した。

船上計測する場合、波下に設置した波高計は船の陰になって適切に計測できない場合もある。そのような場合でも条件抽出することで波高計の数が多いほど補完して適切に最終波向が推定できることを示した。

表 2.3 設定波向と推定波向の差

α_0 [deg.]	$d\alpha_r$ [deg.]	$d\alpha_{cp}$ [deg.]
0	5.6	-1.0
90	5.0	-0.9
180	6.1	-0.4
270	4.9	-1.2

設定波向と推定波向の差は相互相関関数のピークより計算する波向とクロススペクトルより計算する波向でいずれも ± 10 度以内で推定できていて、検証した波設定であればどちらの方法でも適切に抽出すれば同程度の精度で波向を求めることができると考えられる。クロススペクトルより波向を求める方法では、風浪とうねりのように 2 方向波でそれぞれの角周波数が異なる場合には対応した波向が得られるため有用である。一方で相互相関関数のピークより計算する波向は計算方法が非常に単純であることから波全体のおおよその波向を 1 つ求める際には有用であるが、多方向波で複数の角周波数が混ざり合った波には適用できない。

3. 前進速度影響

これまでは観測点が静止している状態を想定していたが、波高計が船に取り付けられている場合を想定して前進速度影響について検討する。

(1) 検証方法

前進速度を想定したシミュレーション波形を作成して検証を実施した。前進速度は実船スケールで20knotを想定して1/60スケールで1.33[m/s]とする。波設定は2章の検証と同じ表2.2の設定とする。波高計位置は図2.12とし、設定波向は0deg.~330deg.で30度刻みとする。推定波向は β が30度以上150度以下でかつ r_{xm} が0.7以上を抽出して平均した値とする。ここでは波の位相速度が船の速度より速い場合を対象にしているが、船の速度が波の位相速度より速く、追波の場合には計測値から向波と追波の判別がつかないため注意が必要である。

(2) 波向計算結果

設定波向との差 $d\alpha_r, d\alpha_{cp}$ について図3.1に前進速度なしの結果を、図3.2に前進速度ありの結果を示す。

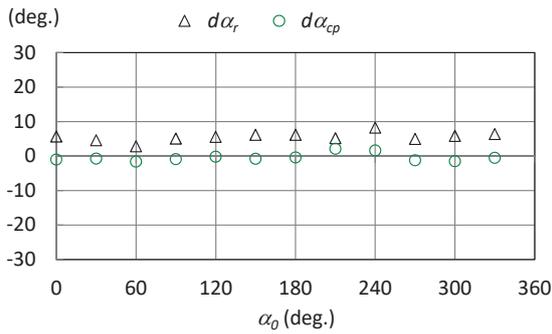


図 3.1 波向計算結果 (前進速度なし)

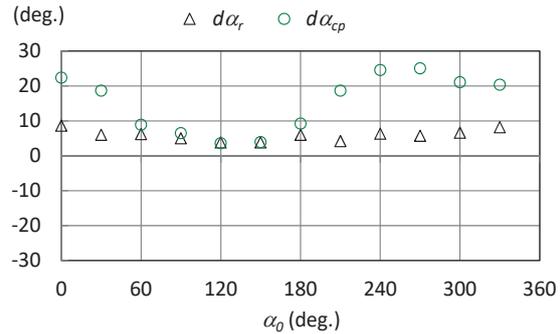


図 3.2 波向計算結果 (前進速度あり)

図3.1, 図3.2より $d\alpha_{cp}$ は前進速度がある場合に設定波向によるバラツキが大きく、最大で30度程度の差があることがわかった。

(3) 相互相関関数における前進速度影響

W_1 と W_2 の相互相関関数 r_{12} (無次元値)について前進速度なしの結果を図3.3に、前進速度ありの結果を図3.4に示す。前進速度がある場合は相互相関関数のピークの時間差(τ_p)から時間が離れるに従い相互相関関数が乱れる傾向がある。ここで、これまでの検討における積分範囲を図3.3, 図3.4にboxとして示すと、前進速度がある場合は積分範囲に相互相関関数の乱れた部分を含んでいることが分かる。そこで τ_p で1となり積分範囲の端で0となるようなウィンドーをかけることにより τ_p から離れた部分の寄与を小さくすることを検討した。

ウィンドーは(3.1)式に示すhanningと、(3.2)式に示すparzenの2つを検討した。図3.3, 図3.4にhanning, parzenとして示す。hanningはスペクトルの計算でよく用いられるウィンドーであるが、parzenは位相を求める際のウィンドーとしてhanningよりも好ましい結果を与えると考えられる¹⁷⁾。ここで、 τ_m は(3.3)式に示す通りである。

$$D_{hm}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi\tau}{\tau_m - \tau_p} \right) & (|\tau - \tau_p| < \tau_m) \\ 0 & (|\tau - \tau_p| > \tau_m) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$D_p(\tau) = \begin{cases} 1 - 6 \left(\frac{|\tau - \tau_p|}{\tau_m} \right)^2 + 6 \left(\frac{|\tau - \tau_p|}{\tau_m} \right)^3 & \left(\tau_p - \frac{\tau_m}{2} \leq \tau < \tau_p + \frac{\tau_m}{2} \right) \\ 2 \left(\frac{|\tau - \tau_p|}{\tau_m} \right)^2 & \left(-\tau_m \leq \tau < \tau_p - \frac{\tau_m}{2}, \tau_p + \frac{\tau_m}{2} \leq \tau < \tau_m \right) \\ 0 & \tau < -\tau_m, \tau_m \leq \tau \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\tau_m = \frac{2\pi N_W}{\omega_p} \tag{3.3}$$

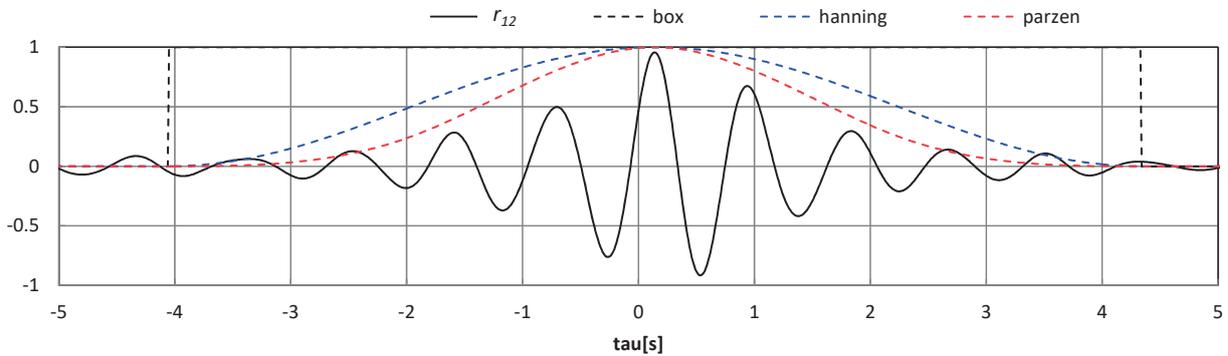


図 3.3 波高計 W_1 と波高計 W_2 の相互相関関数とウィンドー（前進速度なし）

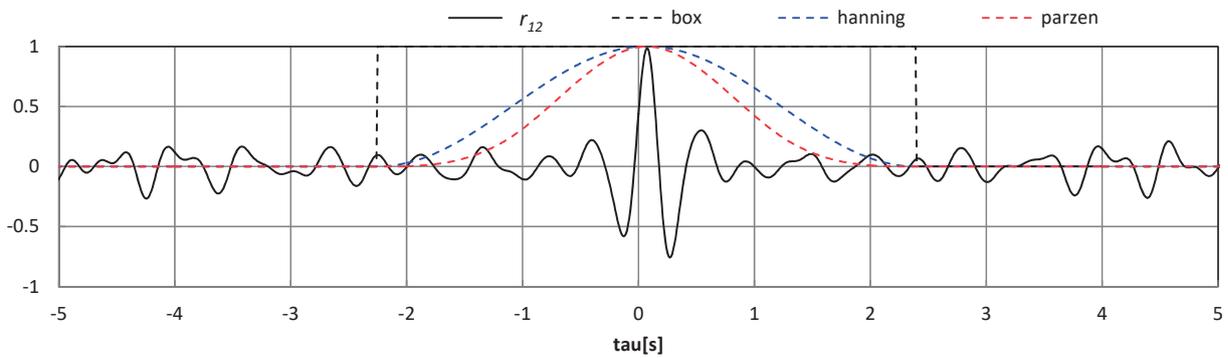


図 3.4 波高計 W_1 と波高計 W_2 の相互相関関数とウィンドー（前進速度あり）

それぞれのウィンドー (box, hanning, parzen) によって得られた結果 $d\alpha_{cp}(b)$, $d\alpha_{cp}(h)$, $d\alpha_{cp}(p)$ と参考として $d\alpha_r$ を, 前進速度がない場合を図 3.5 に, 前進速度がある場合を図 3.6 に示す.

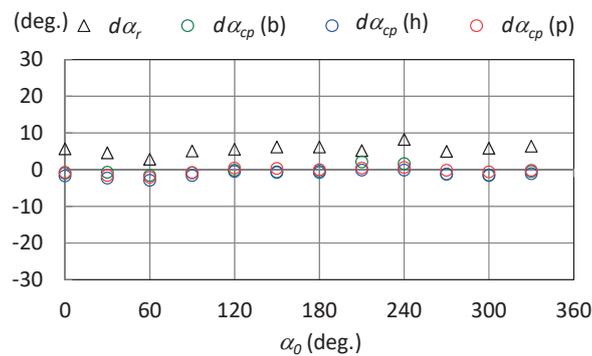


図 3.5 ウィンドーによる波向計算結果の違い（前進速度なし）

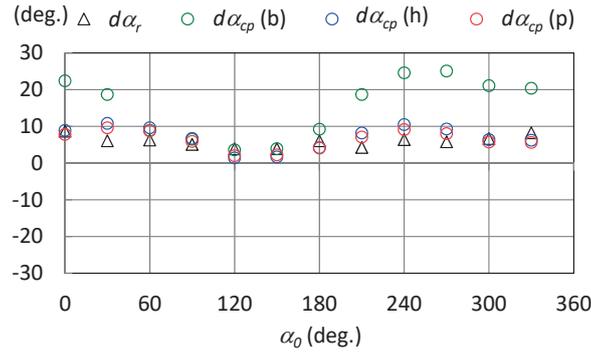


図 3.6 ウィンドーによる波向計算結果の違い (前進速度あり)

図 3.5 より前進速度がない場合はウィンドーが hanning, parzen でも box と同等の精度で推定できていることがわかる. 図 3.6 より, 前進速度がある場合は box では推定結果にばらつきがあり設定波向とも差があったがウィンドーとして hanning, parzen を適用させると推定結果は明確に向上している. わずかな差ではあるが hanning よりも parzen の方がより設定波向に近い推定結果となった. また設定波向との差は 10 度以内である. 以上よりウィンドーとして parzen を用いることで前進速度がある場合でも前進速度がない場合と同等の精度で推定できることが確認できた.

4. 船体運動の考慮

実際に船で計測することを想定すると, 事前処理として計測された水位から船体運動を除去する必要がある. 波高計は船上に設置するため船体運動を把握して上下変位分を除去する必要がある. ここでは波高計と加速度計を同じ場所に設置する場合を想定して加速度計の計測値から上下変位を適切に求める方法を検討する. なお船自身がつくる非定常波についてはその影響が小さくなるような場所 (船首部や張り出し部) に設置することを想定する.

4.1 加速度から上下変位を求める方法

波高計と加速度計が同じ場所に設置されている場合を想定し, 波高計の計測値から船体運動を差し引いた水面変位を求める方法を検討する. ζ を船体運動を差し引いた水面変位, ζ_{ob} を船上(onboard)で計測された水面変位, z_{ob} を船上(onboard)で加速度計から得られる船体運動による上下変位とすると(4.1)式の通りとなる.

$$\zeta = \zeta_{ob} - z_{ob} \tag{4.1}$$

上下変位は加速度 a_n を(4.2)式~(4.6)式に示す通り 2 回積分して求める. 積分ごとにオフセット修正を行い, 累積誤差修正として移動平均を差し引く. ここで, v_n は加速度を 1 回積分させた速度, τ_s はサンプリング周期, v_{ave} は計測範囲の $v(n)$ の平均, $v_2(n)$ はオフセット修正をした速度, v_{2ave} は $v_2(n)$ の移動平均, $v_3(n)$ は移動平均を差し引いた速度, $z(n)$ は $v_3(n)$ を 1 回積分して得られる上下変位, z_{ave} は計測範囲の $z(n)$ の平均, $z_2(n)$ はオフセット修正をした上下変位である.

$$v(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \{ \alpha(i-1) + \alpha(i) \} \cdot \tau_s \tag{4.2}$$

$$v_2(n) = v(n) - v_{ave} \tag{4.3}$$

$$v_3(n) = v_2(n) - v_{2ave} \tag{4.4}$$

$$z(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \{ v_3(i-1) + v_3(i) \} \cdot \tau_s \tag{4.5}$$

$$z_2(n) = z(n) - z_{ave} \quad (4.6)$$

4.2 検証

検証は実船で計測された上下方向の加速度計データにより実施する。対象船は船長 190m の自動車運搬船であり、検証用データの加速度計はブリッジに設置しているが、波向推定としては波高計と同じ位置に設置することを想定している。図 4.1 に加速度のデータ a を示す。ここで加速度の平均値が 9~10 [m/s²] にオフセットしているがこれは重力加速度の影響である。上下変位への変換ではオフセット修正をしているのでこの影響は除去される。

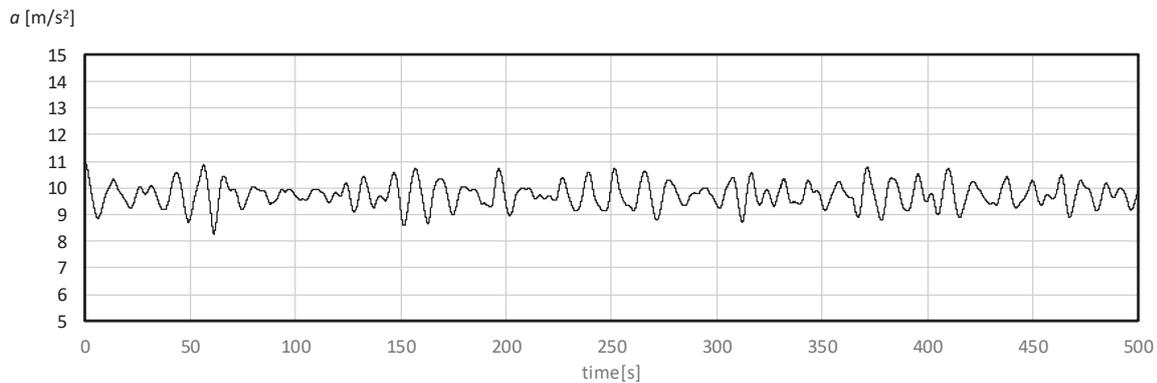


図 4.1 加速度計データ（上下方向）

図 4.1 の加速度計データより(4.2)式~(4.6)式により上下変位 z を求めた。その結果を図 4.2 に示す。ここで w/o rev は移動平均をしていない場合、TN=0.2s は 0.2 秒区間で移動平均をした場合、TN=1s は 1 秒区間で移動平均をした場合、TN=20s は 20 秒区間で移動平均をした場合、TN=60s は 60 秒区間で移動平均をした場合である。なお移動平均はデータの前後の区間を使用しているためそれぞれ最初の移動平均区間の半分の時間（TN=0.2s では 0.1 秒、TN=1s では 0.5 秒、TN=20s では 10 秒、TN=60s では 30 秒）は計算値が存在しない。前半の w/o rev と TN=0.2s は累積誤差の影響で計算結果がグラフの範囲外になっている。TN=1s ではグラフの範囲内ではあるがまだ修正が不足していて、TN=20s、TN=60s では比較的同様の上下変位が求められた。実海域における波周期を考慮すると 60 秒程度の区間での移動平均が適切であるといえる。

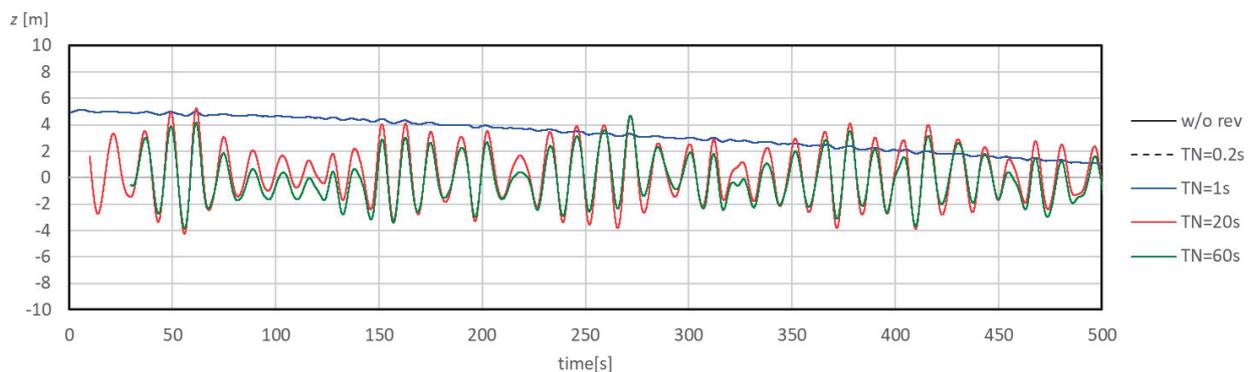


図 4.2 計算結果（上下変位）

加速度から船体の上下変位を求める際に移動平均が必要であることを確認した。検討した方法で実用化に向けて船体動揺の除去プログラムを作成した。

5. まとめ

波向を簡便に求める方法として、相互相関関数のピークの時間差から求める方法と、クロススペクトルを用いて求める方法を検討した。

計算プログラムを作成し、シミュレーション波形により検証を実施した。海洋で遭遇する波を仮定した波高・波周期・スペクトル形状の波を生成して検証し、設定波向と推定波向との差がおおよそ±10度以内で推定できていることを確認した。

クロススペクトルを用いて波向を求める方法において、相互相関関数の積分範囲によって波向推定結果が異なることから、積分範囲を卓越角周波数の波数 N_W を用いて表現することを検討した。コヒーレンスを用いた検証により $N_W=3\sim 5$ とすることが今回の波形では妥当であることを示した。

10 台の波高計による検証結果より波高計の成す角が30度以上150度以下でかつ相互相関関数のピークの積が0.7以上のデータについては精度よく推定できていることを示した。その推定値を抽出して最終波向を平均値とすることで設定波向と推定波向との差が±10度以内になることを示した。

前進速度を考慮した波形により波向を推定すると、前進速度がない場合と比較して設定波向との差が大きくなる結果（最大で30度程度）であった。そこで相互相関関数の積分計算においてウィンドーを用いることによって前進速度がない場合と同等の精度で推定できることを示した。ウィンドーとして hanning と parzen の2種類を検討し、parzen を用いた方がより設定波向と推定波向の差が小さいことを示した。

クロススペクトルより波向を求める方法では、風浪とうねりのように2方向波でそれぞれの角周波数が異なる場合には対応した波向が得られるため有用である。一方で相互相関関数のピークより計算する波向は計算方法が非常に単純であることから波全体のおおよその波向を1つ求める際には有用であるが、多方向波で複数の角周波数が混ざり合った波には適用できない。目的に応じていずれかの波向推定方法を選択し、2つの推定結果から複合的に実際の海象状況を考察することで、モニタリング解析等においては波浪中抵抗増加の推定精度向上に資することができる。

船体に波高計と加速度計を設置することを想定して船体運動の除去について検討した。検証により加速度を2階積分して上下変位を求める際には移動平均により累積誤差を除去する必要があることを確認し、プログラムに実装した。

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。波向推定法に関して助言いただきました関係者の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Yoshinori Ikemoto, Masaru Tsujimoto, Kunihiro Hoshino, Keichirō Hirayama, Mitsunori Baba : Validation of wave height meters using microwaves by onboard measurement, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第24号 (2017), pp.245-246.
- 2) Barber, N.F. : The directional resolving power of an array of wave detectors, Ocean Wave Spectra, Prentice Hall Inc.(1961), pp.137-150
- 3) Borgman, L.E.: Directional spectral model for design use for surface wave, Hyd.Engg.Lab., Univ Calif, Berkeley, HEL 1-12, (1963), pp.56
- 4) Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright and N.D. Smith : Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, Ocean Wave Spectra, Prentice Hall Inc. (1963), pp.111-136
- 5) Panicker, N. N. and Borgman, L. E. : Enhancement of directional wave spectrum estimate, Proc. 14th Int. Coastal Eng. Conf.(1974), pp.258-279

- 6) Capon, J. : High-resolution frequency – wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, Vol.57 (1969), pp.1480-1418
- 7) 吉元博文：実海域における波の方向スペクトルについて—第一報 計測法の検討—, 船舶技術研究所報告 第26巻, 第5号 研究報告 (1989), pp.101-120
- 8) 橋本典明, 永井紀彦, 浅井正, 菅原一晃: 1. 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港湾技術研究所報告, 第32巻, 第1号 (1993), pp.3-25
- 9) 橋本典明, 小船浩治: ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定—入・反射波共存場を対象として—, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号 (1987), pp.3-33
- 10) 井関俊夫, 大津皓平, 藤野正隆: 船体運動データを用いた方向波スペクトルの Bayes 推定, 日本造船学会論文集, 第172号 (1992), pp.17-25
- 11) 井関俊夫, 大津皓平: 船体運動データを用いた方向波スペクトルの Bayes 推定 (第2報), 日本造船学会論文集, 第176号 (1994), pp.99-105
- 12) 吉元博文, 渡辺巖: 航走する船舶が遭遇する方向波スペクトルの推定法について, 日本造船学会論文集, 第176号 (1994), pp.107-116
- 13) 斎藤公男, 前田克弥: 船体運動からの波浪情報の推定について—波スペクトル推定における非線形計画法の応用—, 日本造船学会論文集, 第182号 (1997), pp.231-237
- 14) 斎藤公男, 前田克弥: 船体運動からの波浪情報の推定について (第2報) —波スペクトル推定における周波数変換の取り扱い—, 日本造船学会論文集, 第184号 (1998), pp.159-165
- 15) 高石敬史, 増田光一, 居駒知樹, 嶋村祥嗣: 船載式波浪情報提供システムの開発に関する研究, 日本造船学会論文集第179号 (2002), pp.171-180
- 16) (社) 日本造船学会海洋工学委員会性能部会編: 実践 浮体の流体力学 後編—実験と解析, (株) 成山堂書店, 初版 (2003)
- 17) 日野幹夫 (著): スペクトル解析 新装版, (株) 朝倉書店, 新装版 (2010)