航走出会い波浪による波浪方向スペクトルの推定—II.

——分布当てはめ法の応用——

桑 島 進*

Estimation of the Directional Wave Spectrum from
Ship Encounter Frequency Spectra—II.

Susumu KUWASHIMA

Abstract

The profile of encounter waves (which is measured by the ship under-way) is known to be different from that of original waves (which is measured by the stationary ship). That is why the frequency of each component waves are deformed in proportion to ship's speed and relative course to the wave direction. This means that the encounter waves contain the directional information of each component waves.

So, author developed the analyzing method of encounter waves applying "distribution fitting method" to estimate the directional spectrum of original wave. And it was made clear that the directional spectrum is computed by this method with certainty and short time comparatively.

1. は じ め に

沿岸を除く大洋における現実の波浪データの収集は、そのほとんどが船舶の乗組員による主観的な目視観測によって行われてきた。しかしながら最近に至り、航走する船舶において客観的な波浪データを連続的に得ることのできる船用波浪計が開発された⁽¹⁾。このため、大洋の波浪観測も今後、徐々に目視観測から測器観測に移行してゆくことが予想される。

このような航走する船舶で計測する出会い波浪には有義波高や出会い周波数スペクトル情報の外にも波浪成分の方向に関する情報も含まれている。そこで、前報⁽²⁾においては「数理計画法」を応用してその方向情報を抽出し、波浪方向スペクトルを推定する手法を述べた。しかしながらその手法では航走出会い波浪と共に停船しなければ得られない原波浪データをも必要としたため、一般商船等に対しては必ずしも現実的な手法とは言えず、さらにデータに含まれている誤差によって推定精度が大きく影響を受けること、推定のための計算時間が長く、しかもその時間の見積が困難であることなどの欠点があった。

そこで本報告においては航走出会い波浪だけを使い、しかも比較的短い計算時間で安定的に波浪方向スペクトルの推定ができる「分布当てはめ法」について検討したのでその結果を述べる。

2. 波浪方向スペクトル

角周波数 ω と方向 θ の関数である方向スペクトル $D(\omega, \theta)$ は一般に取扱いの容易さから便宜上、周波数スペクトル $S(\omega)$ を用いて

$$D(\omega, \theta) = S(\omega) G(\omega, \theta) \quad \dots\dots\dots(1)$$

と記される。ここで θ は北を基準とする絶対角で示した成分波の来襲方向である。また、 $G(\omega, \theta)$ は波の方向分布関数と呼ばれ、

* 正会員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

$$\int_{-\pi}^{\pi} G(\omega, \theta) d\theta = 1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

という条件を持っている。

すなわち方向スペクトルとは各周波数毎に波のエネルギー成分の方向についての広がりを表したものである。そして、この方向についての広がり度合いを表したものが方向分布関数であり、方向スペクトルの特徴を決定付けるものと言うことが出来る。このため方向分布関数についていくつかのモデル関数型が提唱されているが、いまのところ光易ら⁽³⁾の提唱する

$$G(\omega, \theta) = K(s) \left(\cos \frac{\theta_R}{2} \right)^{2s} \quad \dots\dots\dots(3)$$

の形が最も信頼性が高いという評価がある⁽⁴⁾。ただし上式において s は ω の関数になっており、 θ_R は主波向 θ_M からの偏角である。また $K(s)$ は $G(\omega, \theta)$ が(2)式を満足するように導入した規格化関数で

$$K(s) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

と書き表せる。(3)式における s は分布の形を決定付ける形状母数であり方向集中度パラメータと呼ばれ、 s の値によって図1のような種々の分布形を表すことが出来る。

3. 推 定 原 理

航走する船舶と波との出会い角周波数 ω_E は波の原角周波数 ω と

$$\omega_E = \omega - \frac{\omega^2}{g} V \cos \hat{\theta} \quad \dots\dots\dots(5)$$

の関係がある。但し、 V は船舶の航走速度、 $\hat{\theta}$ は船の針路と波の進行方向とのなす角である。従って、原波浪方向スペクトル $D(\omega, \theta)$ における $d\omega$ と $d\theta$ によって定まる微小部分に上式を適用すれば

$$D_E(\omega_E, \theta) d\omega_E d\theta = D(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad \dots\dots\dots(6)$$

と、出会い方向スペクトル D_E における $d\omega_E$ と $d\theta$ で定まる微小部分が計算できる。但し、 $d\omega_E$ は ω に応じて

$$d\omega_E = \left(1 - \frac{2\omega}{g} V \cos \hat{\theta} \right) d\omega \quad \dots\dots\dots(7)$$

の関係がある。

一方、航走出会い波浪による出会い周波数スペクトル $S_E(\omega_E)$ は出会い方向スペクトル D_E と

$$S_E(\omega_E) = \int_{-\pi}^{\pi} D_E(\omega_E, \theta) d\theta \quad \dots\dots\dots(8)$$

の関係にある。

このように原波浪方向スペクトル $D(\omega, \theta)$ からは簡単に出会い周波数スペクトル $S_E(\omega_E)$ を計算することが出来る。そこで未知の原波浪方向スペクトルに種々の値を設定し、その設定原波浪方向スペクトルに対し、上記の変換計算を行って得た出会い周波数スペクトルの中から現実の出会い周波数スペクトルに最も近くなるものを採用すればよい。但し、(8)式の積分結果としての出会い周波数スペクトルには細かい方向分布情報が含まれていない。即ち、一つの出会い周波数スペクトル $S_E(\omega_E)$ に対応する原波浪方向スペクトル $D(\omega, \theta)$ は方向の分布に関して数多く考えられる。

そこで、数多くの設定方向スペクトルの中から、第二の針路（または速力）の航走出会い波浪から得られる出会い周波数スペクトル $S_E(\omega_E)$ に最も対応するものを選べばよいことになる。

4. 分布当てはめのための方向分布関数の設定

前節の推定原理より、最初から真に近い原波浪方向スペクトルが設定できれば推定計算が少なくて済む。その

図1 光易型方向分布関数の分布形

ために、原波浪方向スペクトルを(1)式に示すごとく原波浪周波数スペクトル $S(\omega)$ と方向分布関数 $G(\omega, \theta)$ に分けて考える。

そして、まず方向分布関数 $G(\omega, \theta)$ の設定について考えてみる。現実の波浪方向分布は測定毎に複雑で千差万別の分布形が予想されるが主波向に対する分布割合について大きく分類すれば(3)式の光易型分布関数で表せる。

光易型の方向分布型は図1で示すように方向集中度パラメータ s の値によって大きく異なった形を示すが、 s は一般に風波などの周波数の高い領域では10、減衰距離の短い「うねり」領域では25、減衰距離の長い「うねり」(低い周波数領域)では75程度の値をとるとされている⁽⁵⁾。

しかしながらこれらの値は大体の目安であり現実の波に常に当てはまる訳ではない。そこで、方向集中度パラメータ s は周波数 ω の関数であることから、真値に近い値になるであろう ω に応じたいくつかのパターンを設定し、その中で最も誤差の少なくなるものを採用することとする。

即ち、風浪にたいする方向集中度パラメータ s は波浪成分の周波数 $f (= \omega/2\pi)$ に応じて

$$s = a \log f + b \quad \dots\dots\dots(9)$$

で表せるものとする。但し、上式において常数 a , b は

(I) 周波数 1 Hz ~ 0.05 Hz の間でパラメータ s は 5 ~ 30 の値となる。

(II) 周波数が高ければ高いほど方向集中度(パラメータ s の値)は小さくなる。

ものとして図2に示すようなAからJまでの10通りのパターンを想定した。これは、風浪の方向分布をその周波数に応じて図2に示す10通りのパターンの中の何れかで近似しようとするものである。

さらに方向分布関数は成分波ごとに主波向 θ_M からの偏角 θ_R の関数でもあることから主波向 θ_M の関数とも言える。通常、風浪の主波向 θ_M は風向に一致するものとされているが、各周波数全てについて常に一致しているかは疑問である。そこで主波向 θ_M についても周波数 f に応じて

$$\theta_M = a_M \log f + b_M \quad \dots\dots\dots(10)$$

で変化しているものとした。ただし上式における定数 a_M , b_M については「周波数 1 Hz ~ 0.05 Hz の間で θ_M は風向に対して左右 10° 以内の値をとる」ものとして図3に示すようなIからVまでの5通りのパターンを設定した。これは、風浪の主波向を風向に対して図3に示す5通りのパターンの中の何れかで近似しようとするものである。

図2 風浪に対する方向分布関数集中度パラメータの設定パターン

5. 仮原波浪方向スペクトルの設定

もしも船舶が停船して波浪を測定するならば、そのデータより簡単に原波浪周波数スペクトル $S(\omega)$ は得られる。しかしながら船舶が航走しながら測定した波浪データから得られるものは出会い周波数スペクトル $S_E(\omega_E)$ である。

いま、ある針路、速力で航走する船舶で得られた出会い周波数スペクトルを $S_E(\omega_E)$ とすると、図4の左端で示されるように任意の周波数における成分 $S_E(\omega_E) d\omega_E$ はその針路、速力のときに遭遇するであろう出会い方向スペクトル $D_E(\omega_E, \theta) d\omega_E d\theta$ と

図3 風浪に対する周波数別主波向の設定パターン

$$S_E(\omega_E) d\omega_E = \int_{-\pi}^{\pi} D_E(\omega_E, \theta_E) d\omega_E d\theta \quad \dots\dots\dots(11)$$

の関係にある。ただし、上式における θ_E は成分波の見掛け来襲方向であり、成分波浪の進行方向と船の針路との相対角の絶対値が $\pi/2$ より大きい（向い波）範囲ならば θ に等しいが、 $\pi/2$ より小さい（追い波）範囲で、しかも船の速度がその成分波の速度より大きい（船が波を追い越す）ときには、その成分波は見掛け上、向い波となり θ の反方位に等しくなる。図4の中央は遭遇するであろう出会い方向スペクトルを示したものであるが、その方向分布は全く未知であるため、ここではとりあえず全方向に対し均等に分布しているものと仮定しておく。

図4 スペクトル成分の対応関係（左：出会い周波数スペクトル，中央：出会い方向スペクトル，右：原波浪方向スペクトル）

そして各出会い方向スペクトル区分に対応する原波浪方向スペクトル区分を使って(11)式を数値計算用に離算量で表せば、

$$S_E(\omega_E) \Delta\omega_E = \sum_{j=1}^M D_J(\omega_J, \theta_J) \Delta\omega_J \Delta\theta \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。上式において添字 J は全方向を M 個に分割したときの、それぞれの方向を表す順番号であり、 ω_J とは θ_J 方向に対して ω_E と(5)式の関係にある原波浪周波数を示している。

ここで上式の右辺各項は(1)式で示す通り

$$D_J(\omega_J, \theta_J) \Delta\omega_J \Delta\theta = S(\omega_J) G(\omega_J, \theta_J) \Delta\omega_J \Delta\theta \quad \dots\dots\dots(13)$$

と書き直すことが出来る。結局、 $S_E(\omega_E)$ に対応する原波浪方向スペクトルの各 (ω_J, θ_J) 成分は(13)式を使って求められる筈であるが、(13)式の右辺、真の原波浪周波数スペクトル $S(\omega_J)$ はいま、未知である。そこで $S(\omega_J)$ の代わりに任意の仮原波浪周波数スペクトル $\hat{S}(\omega_J)$ を設定することで仮原波浪方向スペクトル $D_J(\omega_J, \theta_J)$ を求めておくこととする。ただし、 $\hat{S}(\omega_J)$ は任意の値とは言え現実の出会いスペクトル値 $S_E(\omega_E)$ と(12)式の関係を持たねばならない。したがって仮原波浪方向スペクトルの (ω_J, θ_J) 成分は

$$\hat{D}_J(\omega_J, \theta_J) \Delta\omega_J \Delta\theta = \hat{S}(\omega_J) G(\omega_J, \theta_J) \Delta\omega_J \Delta\theta \frac{S_E(\omega_E) \Delta\omega_E}{\sum_{j=1}^M \hat{S}(\omega_J) G(\omega_J, \theta_J) \Delta\omega_J \Delta\theta} \quad \dots\dots\dots(14)$$

により求められる。

このように、(14)式を利用して全ての出会い周波数 ω_E の成分について対応する原波浪方向スペクトルの微小部分を次々に求めれば、結果的に出会い周波数スペクトル $S_E(\omega_E)$ に応じた仮原波浪方向スペクトル $\hat{D}(\omega, \theta)$ が一応設定できることになる。

6. 繰り返し計算による最適値への収束

前節(14)式を利用することにより、ある航走状態における第1出会い周波数スペクトル $S_E(\omega_E)$ に対応した仮原波浪方向スペクトル $\hat{D}(\omega, \theta)$ が設定される。但し、この設定の過程において $\hat{S}(\omega)$ あるいは $G(\omega, \theta)$ はそれぞれ任意に仮定した値であった。結局、多くの任意に設定した $\hat{D}(\omega, \theta)$ の中から最も真に近いものを捜すことになるが、真に近いかな否かを判定するためには第2の航走条件による出会い周波数スペクトル $S_E(\omega_E)$ を利用すればよい。

すなわち、設定した $\hat{D}(\omega, \theta)$ の $\Delta\omega$ と $\Delta\theta$ で規定されるそれぞれの微小区間に対し第2の航走条件に応じた(5)

式を適用することにより設定による第2出会い周波数スペクトル $\hat{S}_E(\omega_E)$ を求めることができる。したがって、これと現実の第2出会い周波数スペクトル ${}_2S_E(\omega_E)$ との差が最小になる仮原波浪方向スペクトル $\hat{D}(\omega, \theta)$ が求められるものとなる。

ところで、 $\hat{S}(\omega)$ の設定についても任意とは言うものの出来るだけ真に近いものが望まれる。そのために「とりあえず全ての波浪を長波頂波と見なして現実の ${}_1S_E(\omega_E)$ から(5)式を利用して初期設定原波浪周波数スペクトル $\hat{S}_0(\omega)$ を求める。」ことなどが考えられるが、それでも最初から真値を見い出すことは困難である。

しかしながら、仮原波浪方向スペクトル $\hat{D}(\omega)$ は(14)式で示すように、現実の出会い周波数スペクトル ${}_1S_E(\omega_E)$ で整形されている。そして、さらに現実の第2出会い周波数スペクトル ${}_2S_E(\omega_E)$ に最も対応のよい仮原波浪方向スペクトル $\hat{D}(\omega, \theta)$ が選ばれることから、結果として、最初の $\hat{S}_0(\omega)$ から得られる最適原波浪方向スペクトル $\hat{D}_0(\omega, \theta)$ の各 ω ごとの全方向積分 $\hat{S}_1(\omega)$

$$\hat{S}_1(\omega) = \sum_j D_0(\omega, \theta_j) \Delta\theta \quad \dots\dots\dots(15)$$

は最初に設定した $\hat{S}_0(\omega)$ 以上に真の原波浪周波数スペクトル $S(\omega)$ に近づいているはずである。したがって、この $\hat{S}_1(\omega)$ を改めて仮原波浪周波数スペクトルとして(14)式に代入するという繰り返し計算を行えば、現実への近似度はますます高まる筈である。

そこでこの様子を調べるために数値シミュレーションを行ってみた。シミュレーションのデータとしては風速10m/sに対応するPierson-Moskowitz型のスペクトルを原波浪周波数スペクトルに採用し、それに組み合わせる方向分布関数としては光易型モデルで図2のB、主波向は図3のIIに示すようなパターンを採用した。これらの初期条件をもつ原波浪方向スペクトルを作成したのち、出会い波浪データに変換すべく速力10ノットの船舶が針路を $0^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の各方向に航走した場合の出会い周波数スペクトルを求めた。このようにして求めた5つの航走針路による出会い周波数スペクトルのうちから二つずつの針路を選び、表1に示すように5ケースの組合せデータを作成した。

表1で第1データとは、種々の仮原波浪方向スペクトルを設定するための出会い周波数スペクトル ${}_1S_E(\omega_E)$ のことであり、第2データとは設定された仮原波浪方向スペクトルから第2航走条件に対応して算出される計算出会い周波数スペクトル $\hat{S}_E(\omega_E)$ を比較検証するための出会い周波数スペクトル ${}_2S_E(\omega_E)$ のことである。

図5は各々のケースについて推定精度とその収束度合いを示したものである。ただし、このシミュレーションにおいては仮原波浪周波数スペクトル $\hat{S}_0(\omega)$ は全く不明として各周波数とも全て等しい値(白色)に設定して計算を開始した。

繰り返し計算1回ごとに方向分布関数の設定を図2に示すA～Jの10通り、主波向の周波数分布を図3に示すようなI～Vの5通りの組合せによる計50通りの設定値の中から最もデータに良く対応した原波浪方向スペクトルを算出(推定)した。

図5の縦軸は繰り返し計算ごとの検証のための第2データと計算による推定値との誤差(率) E

$$E = \frac{\int_0^\infty |{}_2S_E(\omega_E) - \hat{S}_E(\omega_E)| d\omega_E}{\int_0^\infty {}_2S_E(\omega_E) d\omega_E} \quad \dots\dots\dots(16)$$

表1 出会い波浪データの組合せ

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
第1データ	針路 180°	135°	270°	45°	0°
第2データ	針路 270°	180°	180°	180°	180°

図5 推定スペクトル誤差の繰り返し計算による収束状況

を表している。また図中の○や×の印は各々の回の推定計算における50通りの設定値の中で、誤差Eが最小を示した設定値は真値（データ作成に用いた値）に対し

○印は主波向周波数分布形および方向分布形共に等しい（この計算では図2のB、図3のIIとなる）ことを示し、

△印は方向分布形だけが等しく

▽印は主波向周波数分布形だけが等しく

×印は主波向周波数分布形、方向分布形共に等しくない

ことを示している。

従って、図5において誤差率Eが小さくなったからと言って、その推定方向スペクトルが○印の設定分布形で推定されていなければ、正しく推定されたことにはならない。逆に、誤差Eがそれほど小さくなくても○印で推定されていれば一応、真値に近い分布形のスペクトルが得られていることになる。

図5によれば、第1データとして追い波を使った場合（case 1）は推定計算を10回繰り返しても真の値は推定できていない。これに反し、第1データに向い波を使った場合（case 5）には2回の繰り返し計算をするだけで十分に真の値に近づいていることが解る。そして、第1データとして向い波と追い波の中間の針路によるデータを用いた場合には、向い波から追い波状態の針路になるに従って収束状況も悪くなって行く様子が解る。

繰り返し計算の回数に応じて推定原波浪周波数スペクトルを真のスペクトルと対比して描いたものが図6である。図6は図5における case 3 を描いたものであるが、始め（繰り返し計算回数0回目）の白色（0～1 Hzにおける周波数のスペクトル値が全部同じ）スペクトルに対し計算回数が増すにしたがって真値に近づいて行く様子が解る。

図6 繰り返し計算による周波数スペクトルの収束状況

7. 「うねり」に対する推定手法

前節までは主として風浪に対する方向スペクトルを念頭に議論を進めてきた。しかしながら一般に風浪は「うねり」と共存している場合が多い。このような風浪と「うねり」を一つの分布形で表すような分布形モデルは現在のところ考えられていない。しかしながら、風浪の部分に対しては4節で述べた方向分布関数を設定し、「うねり」に対しては別の分布形を設定することにより、風浪と「うねり」が共存する場合にはそれらの設定分布関数を合成することが出来る。

(1) 「うねり」の方向分布関数

「うねり」の方向分布形については、その方向集中度が大きく光易型方向分布関数で表せば、その方向集中度パラメータ s の値は25～100程度の値をとるとも言われている。そこで本報においては「うねり」の方向分布形も光易型モデルで表せるものとするが、その方向集中度パラメータ s_w は「うねり」の角周波数 ω_w に応じて

$$s_w = 20 + \frac{30}{\omega_w} \quad \dots\dots\dots (17)$$

の値をとるものとする。これは、一般に「うねり」の方向分布幅は周波数が低ければ低いほど狭く、 s_w の値としては0.15 Hz以下の周波数の「うねり」に対しては50以上の値をとるものと想定されるからである。上式を図示したものが図7-aである。パラメータ s の値が50以上になると方向に対する分布度合は図1に示すように非常に狭く、パラメータの少しの違いに対して余り大きく変化しない。従って、「うねり」の最適集中度パラメータを捜すためには本来、風浪に対して行ったように各種の値を設定して試行計算を行うべきだが、上述のようにその変化が小さく、それほど大きな誤差は生じないことから、周波数によって一義的にきまる(17)式の値に固定させることとした。

(2) 「うねり」の周波数スペクトル分布

「うねり」のスペクトル周波数分布についても、その分布幅が非常に狭いことから図7—bに示すようにその分布係数は「うねり」の中心周波数 f_0 (Hz)におけるスペクトル値を1とし、周波数分割幅 Δf を0.02Hzとしたとき、

(I) $f_0 + \Delta f$ におけるスペクトル値は0.5

(II) $f_0 - \Delta f$ におけるスペクトル値は0.1

(III) その他の周波数においては、 f_0 から Δf

離れるにしたがって f_0 側隣接周波数領域の

0.1倍とする。

さらに「うねり」のスペクトル値 $S_w(f)$ は「うねり」の波高 H_w と

$$H_w = 4 \sqrt{\sum S_w(\omega) \Delta \omega}$$

.....(18)

の関係を持たせるように係数を調節することによって「うねり」部分の原波浪方向スペクトルを設定することができる。

従って、後は「うねり」の主方向 D_w 、波高 H_w 、中心周波数 f_0 さえ定めれば具体的な原波浪方向スペクトルが計算できることになる。これらの値に対しては風浪における推定と同じく、各種の値を試設定して最適値を求めればよい。

ただし、試行計算の回数を少なくするため各々の値については「うねり」の目視観測特性⁽⁶⁾を参考にして設定することが出来る。すなわち

(a) 「うねり」の設定周期は目視観測周期に対し、その0.9倍、1.0倍、1.1倍の3種類を設定する。

(b) 「うねり」の設定主方向は目視観測方向及びその値に $\pm 10^\circ$ を加えた3種類の方向を設定する。なお、「うねり」のスペクトル周波数分布幅も狭いことから周波数の違いによる方向の違いはないものとする。

(c) 「うねり」の設定波高については目視観測波高に対し、その0.5倍、1.0倍、1.5倍、2.0倍、2.5倍の5種類を設定する。

ことである。

8. 数値シミュレーションによる推定例

ここで二方向からの「うねり」を含んだ原波浪方向スペクトルに対して数値シミュレーションによる推定を行ってみた。

シミュレーション用に作成した原波浪データとしては主風向 0° 、風速10m/sのPierson-Moskowitz型のスペクトルを持つ風浪と 135° 方向から周期12秒、波高2mの第1の「うねり」、そして 225° 方向から周期10秒、波高1mの第2の「うねり」が重なったものとした。データ作成に用いたスペクトルの方向分布係数や周波数分布係数などは6節で述べたものと全く同じである。

この原波浪方向スペクトルに対して第1出会い波浪データとして針路 0° (向い波)、速力10ノットで航走して得た出会い周波数スペクトルを、第2データとして針路 180° (追い波)、速力10ノットで航走して得た出会い周波数スペクトルを作成し、原波浪方向スペクトル推定のためのシミュレーションデータとした。これらのデータを示したものが図8である。図8には比較のために原波浪周波数スペクトルも太い実線で示した。

図7—a 「うねり」の方向分布関数設定集中度パラメータ

図7—b 「うねり」の設定周波数スペクトルの形

図8 シミュレーション用出会い周波数スペクトル

図9 シミュレーションによる原波浪方向スペクトルの推定結果（2次元表示）

図10 シミュレーションによる原波浪方向スペクトルの推定結果（3次元表示）

これらの第1および第2の出会い周波数スペクトルから元の原波浪方向スペクトルを推定するわけであるが、「うねり」を含んでいる場合の推定方法としては、始めに「うねり」部分の原波浪方向スペクトルを設定することとし、「うねり」の数が複数の場合はそれぞれ独立に設定し、合成すればよい。そして、設定した「うねり」部分の原波浪方向スペクトルを第1の航走方法に対応した「うねり」部分だけの出会い周波数スペクトルに変換する。この「うねり」部分の設定出会い周波数スペクトルと、データとしての第1出会い周波数スペクトルを周波数毎に比較して少しでも設定スペクトルの方が大きい場合は始めの「うねり」部分の設定が大き過ぎることになるため、「うねり」設定のやり直しをすればよい。

逆に、設定スペクトルが小さい場合にはデータとしての第1出会い周波数スペクトルから設定スペクトルを差し引いて風浪部分だけの出会い周波数スペクトルデータを抽出しておく。従って、後は抽出された風浪部分だけの方向スペクトルについて前項までに述べた風浪に対する方法に従って推定すればよい。

シミュレーションにおいては推定の初期設定に用いる原波浪の周波数スペクトル $\hat{S}_0(\omega)$ に対し、データ作成に用いた Pierson-Moskowitz 型スペクトルをそのまま用いたのでは1回の推定計算で終わってしまうため、ここではスペクトルの周波数分布は全周波数領域で等しい（白色）とした値を初期設定した。

その結果、繰り返し計算を3回行った後に得られた推定原波浪方向スペクトルが図9である。図9では風浪部分のスペクトル分布に対し「うねり」部分のスペクトル値の方が大きいものの分布存在領域がかなり小さく描かれてしまったために改めて図10のように表現してみた。図10の鉛直軸はスペクトルの値 ($\text{m}^2 \text{sec/rad.}$) を対数軸で表してある。

この図10によれば、 135° 方向、 0.8Hz 付近にピークを持つ第1の「うねり」および 225° 方向 0.1Hz 付近にピークを持つ第2の「うねり」がはっきり読み取れる。また風浪部分のスペクトルは 0.8Hz 以上で比較的方向分布幅も広く 0.14Hz 位にピークを持っていることが読み取れる。

図10の推定原波浪方向スペクトルを各周波数毎に方向について積分して求めた推定原波浪周波数スペクトルは当然のことながら図8に示すデータ作成用の原波浪周波数スペクトルにほとんど一致した。

この推定計算においては二つの「うねり」を設定したために、その方向、周波数、波高について $3 \times 3 \times 5$ 通り、さらに風浪部分について周波数毎の主波向分布、周波数方向分布で 5×10 通り、そして周波数スペクトルの周波数分布係数を繰り返し計算で設定した3回分の合計 13500 種類の仮原波浪方向スペクトルを設定し、検討したことになる。この結果、計算機の演算時間は東京大学計算機センターのM-200Hで、「うねり」の無い場合の約3秒に対し、約21分と大幅に増加した。

9. 実データによる方向スペクトル推定例

データとして1987年7月22日、千葉県州の崎灯台西方5マイル沖付近で計測した航走出会い波浪を用いた。計測に用いた船舶は1987年2月に進水したばかりの東京商船大学の練習船、新「汐路丸」(425 t) 垂線間長さ49.9 mであり、計測センサー位置は旧「汐路丸」と同じく船首先端である。

計測当時、同海域においては、船橋の有義波高計で81cmの波高が表示されており、目視では200°方向（南南西）から約8m/sの風によって約60cmの波高の風浪が卓越しており、170°方向からは周期7秒、波高30cm程度の「うねり」が認められた。

計測時は第1データとして向い波となる針路206°方向に速力13.2ノットで、第2データとしては追い波となる26°方向に速力14.3ノットで航走しながら出会い波浪を計測した。図11はそれらのデータをFFT法により周波数スペクトルで表したものである。なおFFT法による周波数スペクトル解析においてはサンプリング周期0.25秒で1024点（観測時間256秒）のデータを用いた。

図11における○印は方向スペクトル推定の過程において推定された原波浪の周波数スペクトルであり、本来、同図における点線で示した停船時の計測波浪データによる周波数スペクトルと一致すべきものである。しかしながら結果は図に見られる通り必ずしも正確な一致とはなっていない。この誤差の原因としてはデータの計測誤差、周波数スペクトルの解析誤差⁽⁷⁾、そして本法における方向スペクトル推定計算誤差などが重なっているものと思われる。ただし、その誤差量は図11に見られる通り、周波数0.1Hz～0.6Hzを中心としてスペクトル値の5割内外に納まっており、「でたらめな」推定結果というよりは「真値に近づいた」推定結果と言えよう。

この誤差の「程度」は次に示す図12の推定原波浪方向スペクトルにも当てはまるものである。本データの場合、風浪と「うねり」はその方向および卓越周期の差が小さいために図中における明確な区別がつきにくい、詳細に点検すれば、0.14Hz付近において異なった波浪（風浪とうねり）成分が混在していることが認められる。これらの詳細については数値計算結果に明らかにされており、それによれば風浪成分については有義波高71cm、風浪成分の方向分布関数の方向集中度パラメータ s は図2におけるA型であり、風浪成分の主波向 θ_M は190°を中心とする図3に示すⅢ型である。そして「うねり」成分については主方向が160°、周期7秒、波高30cmであると出力された。

10. 最適航走条件と繰り返し計算回数

推定の精度を上げるためには第1データとして出来るだけ風上側の針路による出会い周波数スペクトルを用いるべきことは6節で述べた通りである。このことは同じデータを単に交換しただけの図5のcase1とcase3を比較すれば明らかである。これは第1の出会い周波数スペクトルから原波浪周波数スペクトルを推定する際に、追い波の場合には一つの出会い周波数領域に対し複数の原波浪周波数領域が対応しているため、出会いスペクトル成分を適切に原波浪スペクトル成分領域に配分できなくなるためである。

但し、「うねり」のような存在周波数領域が狭ければ対応する原波浪周波数領域を特定できるため、それほど問題にはならない。したがって、風浪と異なった方向からの「うねり」が存在していても第1データを得るためには、あくまで存在周波数領域の広い風浪に対して向い波となるよう、すなわち風上に航走して計測したほうが良いことになる。

図11 方向スペクトル推定に用いた出会い周波数スペクトル実データ

図12 実データによる原波浪方向スペクトル推定結果

一方、推定計算における繰返し計算回数も推定精度に関係してくる。図5で調べたように、ほぼ正しく推定した原波浪周波数スペクトルの真のスペクトルに対する誤差(率)は 10^{-2} 以下である。そしてこの誤差以下に達するまでの繰返し計算回数は、向い波で2回、横波で5回、斜め追い波で10回となっている。但し、この回数はスペクトルの初期設定周波数分布係数を周波数に対して白色(一定)として計算を始めた値であることから、より真値に近い形を初期値として与えられるならば、繰返し数はさらに少なくて済むはずである。

実際の手順としては繰返し計算における打ち切り回数を定めておく必要がある。この場合、現実のデータにはシミュレーションデータと異なり若干の誤差を含んでいることなどから、打ち切り回数 N_c は

$$N_c = 3 + \frac{|\theta_w - CO_1|}{30} \quad \dots\dots\dots (19)$$

程度が適当であろう。ただし θ_w は風向であり、 CO_1 は第1のデータの針路である。こうすることによって第1のデータの針路が風下になるにしたがって推定のための繰返し計算回数を多くさせている。

一方、第2データとして変針あるいは減速による異なった航走条件による出会い周波数スペクトルが必要になるが、いずれにしても精度的に言って、出来るだけ第1データと異なった形の周波数スペクトルが望ましい。この意味から第1データと第2データの差を(16)式と同様に計算して0.5%以上になる範囲を望ましい航走条件の変更とすれば、その範囲は図13、14のようになる。図13は変針の範囲を示したものであるが第2データとしては必ず第1データより風下側の針路と言うことから第1データが風下になるにしたがって、その変針範囲は少なくなる。図13によれば速力20ノットで、風向に対する第1データの相対針路が 0° の場合には少なくとも 60° 以上、相対針路が 90° ならば 20° 以上の変針が望ましい事を示している。そして相対針路が 150° になると風下への変針余裕は 30° しか無いが、たとえ 30° いっぱいに変針しても、もはや望ましい第2データは得られないことが解る。従って、このような時は風上側へ変針して、風上側のデータを改めて第1データとするか、変針せずに次に述べる減速による第2データを得る必要がある。

図14は第2データとして望ましい減速の範囲を示したものであるが、第1データの速力が20ノットの場合、風向に対する相対針路が 90° の時は100%減速(停船)しても望ましいデータは得られないが、相対針路が 0° ならば50%以上、 150° ならば20%以上の減速で望ましいデータが得られることを示している。

これらの計算は風速が10m/sの風に対応する波の場合であるが、波が小さくなれば望ましい変針範囲が狭くなる代わりに、望ましい減速率が少なくて済む傾向がある。

11. 結 言

本報においては主として「分布当てはめ法」による原波浪方向スペクトルの推定方法について検討した。その結果、方向スペクトル推定のためには同一海面に対して二つの航走出会い周波数スペクトルがデータとして必要である。そして、データとしての二つの航走出会い周波数スペクトルのうち、一つが停船して測った原波浪周波数スペクトルならば推定計算の計算量が減り、精度も上がることが期待できるが、たとえ停船できず二つとも航走出会い周波数スペクトルのデータであっても十分、方向スペクトルの推定が可能であることが解った。

本報で述べた「分布当てはめ法」は、始めにいくつかのモデルを設定し、その中からデータに最も近いものを採用する方式のため、設定のきめ細かさに応じてその精度も決まってくる。但し、精度を上げるために設定を細

図13 第2データを得るための望ましい変針角

図14 第2データを得るための望ましい減速率

かくすればするほど演算時間が増すことになる。従って、推定精度は演算時間との兼ね合いで決まってくる。そこで精度を落とすことなく演算量を減らすために目視観測値をデータの一部として利用することになるが、利用する目視観測の値が少しくらい真値と異なっている解は設定範囲内で修正されて算出される。

このように「分布当てはめ法」は計算量が解っていること、データに含まれている誤差があっても突飛な解が算出されることはなく妥当な感じを与える解が得られること、などから安定した推定方法と言える。

本法における残された問題点としては、「うねり」の数が多い場合には計算量が飛躍的に増大すること、「うねり」部分の推定精度と風浪部分の推定精度に必ずしも整合性がとれていないこと、などが上げられる。したがって「如何に計算量を増やさず精度を上げることが出来るか」が今後の課題である。

これについては、今後の多くの取得データによる方向スペクトル推定を行うことによって、無駄な設定を除き、必要な部分の設定を細かくするなどの改良を重ねる必要がある。

最後に本研究を遂行するに当たって、多大な協力を賜った東京商船大学の安田明生教授を始め、練習船「汐路丸」の乗組員および実習生の諸氏に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 安田明生, 金居康文, 桑島 進; マイクロ波を用いた船用簡易波高計の開発, 日本航海学会論文集, 第66号, p.p. 31—38, 昭和56年
- (2) 桑島 進; 航走出会い波浪による波浪方向スペクトルの推定, 日本航海学会論文集, 第65号, p.p.115—124, 昭和56年
- (3) Mitsuyasu, H. et al.; Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, Jour. Physical Oceanography, Vol. 5, p.p. 750—760, 1975
- (4) 合田良実 他; 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 45p., 1975
- (5) 合田良実; 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 237p., 昭和52年
- (6) 桑島 進; 船舶における波浪観測について, 未発表, (「航海」96号投稿予定)
- (7) 桑島 進; スペクトル解析におけるウィンドウの種類と役割, 「航海」53号, 日本航海学会, p.p., 1—11, 昭和52年