

波方向スペクトル形状を考慮した縦曲げモーメント の長期最大期待値推定

正会員 岡 正義* 正会員 馬 沖*
正会員 陳 曦*

Estimation of the Long-term Maximum Expected Value of Vertical Bending Moment
taking the Shape of Directional Wave Spectra into account.

by Masayoshi Oka, *Member* Chong Ma, *Member*
Xi Chen, *Member*

Summary

The two-dimensional wave spectrum obtained by the hindcast are fitted on the function of the Ochi-Hubble spectrum and Mitsuyasu directional distribution namely 4-parameter spectrum and analyzes the trend of the spectrum shape in the actual sea area in the North Atlantic. The effect on the vertical bending moment (VBM) of a container ship are evaluated. A method to get the long-term maximum expected value utilizing the shape parameters of spectrums is proposed.

The occurrence probability of multi-peak spectra tends to be low in sea conditions with high significant wave heights in which occur the maximum wave load. The long-term maximum expected value by using the 4-parameter spectrum was estimated to be larger than the value by using 2-parameter Pierson-Moskowitz spectrum, and contributed to approaching the true value gained directly using the hindcast wave spectrum. A method for efficiently estimating the long-term maximum expected value by using the shape parameters (λ, s) was presented. There is a higher possibility of estimating a larger load when using the realistic shape parameters than when using the IACS2023 spectrum.

1. 結 言

船舶の設計荷重にはさまざまな不確実性があることが知られており、最近では特に Epistemic uncertainty¹⁾が多く議論されている。これには、実際に遭遇する海象と設計で想定する海象の違い（航路選択、操船影響、船長判断）、波浪や波浪スペクトルモデル化の影響、荷重計算に用いるシミュレーションツール自体の問題、などがあり、さらに、波浪表現の前提によるもの（例えば Airy 波の線形ランダム重ね合わせ）、短期・長期予測する際の確率分布などへの当てはめ、なども含まれる。最近のトピックとして、AIS 等の運航データにより、船が実際に遭遇した海象が分かるようになったことが挙げられる。遭遇海象を統計解析することで荒天避航操船が長期の波浪及び波浪荷重に与える影響を定量的に示すことができた^{2), 3), 4)}。本研究では、短期予測に焦点を当てて、波浪スペクトルのモデル化が縦曲げモーメントの長期最大期待

値に与える影響を検討する。短期海象を表すスペクトルを、有義波高と平均波周期の 2 パラメータだけで表現するのではなく、パラメータを 2 つ追加することで波浪スペクトルの形状を表現でき、波浪スペクトルのモデル化による影響が示される。

また短期海象の波浪を正確に表すことによって CFD 等を利用した時刻歴シミュレーション⁵⁾や荷重計測のための水槽実験技術⁶⁾の利用促進にも寄与することができる。

外洋の波浪は周波数スペクトルと方向分布関数で表現され、船舶の設計用の波浪スペクトルとしては一般に、2 パラメータ(有義波高 H , 平均波周期 T)の Pierson-Moskowitz 型スペクトルが用いられる⁷⁾。従来の IACS 推奨規則では P-M 型スペクトルを採用してきた⁸⁾。2 パラメータでは、スペクトルのエネルギー集中度の違いによるスペクトルの幅やピークの鋭さの形状を表現できないため、波浪中応答を精度よく推定できない可能性がある。また、波方向についても \cos^2 乗分布に限定することが多く、スペクトル形状を表現していない。

著者らは前報で、波浪追算による 2 次元スペクトルをそのまま利用して、縦曲げモーメントの長期予測を行なった⁹⁾。その結果、長期最大期待値に関係する大波高の海象においては、スペクトル形状が P-M 型スペクトル(及び \cos^2 乗分布)

* 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

よりも急峻で、かつピークが 1 つのシングルピークスペクトルであることが分かった。これが正しいとすれば、対象海域に応じて形状パラメータをひとつ決めれば、有義波高 H と平均波周期 T の波浪頻度分布を持ってきて、シングルピークスペクトルを仮定することで、追算スペクトルを介さずに効率的に長期予測することができるようになる。この方向性を目指して調査・研究を行なった。

最近の動向として、IACS により推奨スペクトルが見直された¹⁰⁾。Ewans ら^{11),12)}は、波浪追算データ及び波浪レーダによる観測データを利用して JONSWAP スペクトルの集中度を表す係数 γ を合理的に与えるためのガイダンスの構築を検討した。Hauteclouque ら¹³⁾は ERA5¹⁴⁾の波浪統計データを用いて、波スペクトルの統計的な解析を行い、波スペクトルの形状及びパラメータの変化が船体応答に与える影響を調べて、推奨スペクトルの見直しを提言した。IACS は Hauteclouque らの調査結果を参考にして、設計用の波スペクトルを見直した¹⁰⁾。波スペクトルは JONSWAP 型を採用し、集中度係数を $\gamma=1.5$ とした。方向分散関数は $\cos(n)$ 乗であるが $n=2$ から $n=3$ へ変更した。IACS が修正した推奨スペクトルを本論では「IACS2023」と呼ぶ。IACS2023 では、形状パラメータは $[\gamma, n]$ の組み合わせになるが、本研究では用いた、Ochi-Hubble スペクトル及び光易型方向分布関数の形状パラメータは $[\lambda, s]$ の組み合わせになる。Ochi-Hubble を採用した理由は、マルチピークのスペクトル形状を表現できることによる。

本研究では、北大西洋海域を対象に、日本気象協会が提供する波浪追算スペクトル¹⁵⁾を関数モデルに近似することで、長期最大期待値に関係する大波高の海象の波スペクトル形状の傾向を確認して、波浪スペクトルの取り扱いが縦曲げモーメントに与える影響を評価する。結果を踏まえて、スペクトルの形状パラメータ (λ, s) を用いることで、追算スペクトルを介さず効率的に長期最大期待値を推定する方法を提案する。

2. 波浪追算による 2 次元スペクトル

2.1 追算スペクトル

(一財)日本気象協会の全球波浪推算データベース¹⁵⁾に含まれる波浪追算による 2 次元スペクトル (以下、追算スペクトル)を使用した。追算スペクトルの概要を Table 1 に示す。短期海象 1 時間毎に、波周波数(25)×波方向(36)で離散化した素成波のエネルギーデータが収録されている。式中においては「Hindcast」の添え字を付す。

Table 1 Summary of wave spectrum data.

Range of frequency (Range of period)	0.0418Hz~0.411Hz (2.4s~23.9s)
Number of frequency divisions	25
Range of direction	0~360deg
Number of direction divisions	36 (10deg. Mesh)

2.2 評価対象地点及び期間

評価対象地点を Fig. 1 に示す。前報⁹⁾と同じく北大西洋海域の 11 地点を対象とした。期間も前報と同じく、2016/10/1~2017/9/30 の 1 年間とした。短期海象は 1 時間とし、短期海象の数は、地点あたり $365 \times 24=8,760$ である。

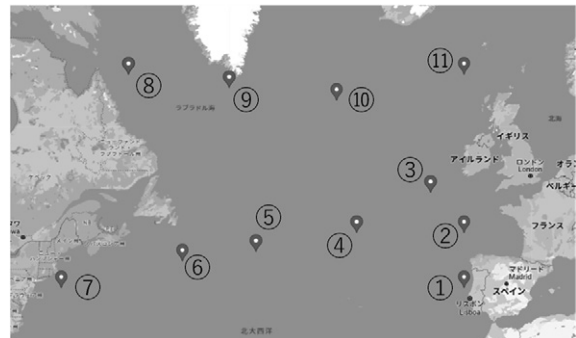


Fig. 1 Points and ID numbers on the area for this research.

3. 波方向スペクトル

Fig. 1 の 11 地点×1 年分の追算スペクトルを波方向スペクトルの関数モデルに近似して、短期海象の各種パラメータを取得する。

3.1 周波数スペクトル

本研究では、Ochi-Hubble のスペクトル¹⁶⁾を使用した。緒言で述べたとおり、Ochi-Hubble にした理由はマルチピークスペクトルを判別するためである。

$$S(\omega|\lambda) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^M \frac{\left(\frac{4\lambda_j + 1}{4} \omega_{pj}^4\right)^{\lambda_j}}{\Gamma(\lambda_j)} \frac{H_j^2}{\omega^{4\lambda_j+1}} \exp\left[-\frac{4\lambda_j + 1}{4} \left(\frac{\omega_{pj}}{\omega}\right)^4\right] \quad (1)$$

H : 有義波高

ω_p : ピーク円周波数 (= $2\pi/T_p$)

T_p : ピーク周期

λ : ピーク形状パラメータ

j : スペクトルのピークの番号

M : スペクトルのピークの数

Γ : ガンマ関数

Ochi-Hubble は、Pierson-Moskowitz 型スペクトルを拡張したモデルであり、形状パラメータ λ により、スペクトルのエ

エネルギー集中度を表現する。マルチピークスペクトルは各ピークの周波数域の和で表現される。λは値が大きいほどエネルギー集中度が高くなり、スペクトルの形状は鋭くなる¹⁶⁾。

(1)式においてM=1, λ=1 のとき, Pierson-Moskowitz 型スペクトルと一致する。P-M 型スペクトルを下式に示す。

$$S(\omega) = \frac{H^2}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \omega^{-4}\right] \quad (2)$$

(2)式は、従来の IACS 推奨スペクトル⁸⁾である。(2)式で用いられるゼロクロス平均波周期 T_z と、(1)式のピーク周期 T_p の間には、以下の関係が成り立つ¹⁷⁾。

$$T_z = 0.7104T_p \quad (3)$$

ただし、(3)式が成り立つのは、形状パラメータがλ=1 の場合だけなので注意を要する。

3.1.1 IACS2023 スペクトルとの関係

IACS2023 の JONSWAP 型スペクトルは、以下の式で表される。(3)式の関係が成り立つとき、(5)式は(2)式と同値である。

$$S(\omega|\gamma) = \alpha S_{PM}(\omega)\gamma \exp\left[-\frac{(\omega/\omega_p - 1)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} H^2 \left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^4 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^4 \omega^{-4}\right] \quad (5)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 \text{ for } \frac{\omega}{\omega_p} \leq 1 \\ 0.09 \text{ for } \frac{\omega}{\omega_p} > 1 \end{cases} \quad (6)$$

γは形状パラメータで、IACS2023 ではγ=1.5 である。αは標準化のための係数でγ=1.5 のとき 0.88633 である。IACS2023 の JONSWAP 型スペクトルを Fig. 2 に示す。Ochi-Hubble のスペクトルはλ=1.5 の近傍で IACS2023 に近くなるが一致することはなく、IACS2023 の JONSWAP 型スペクトルの方がより尖った形状を有する。

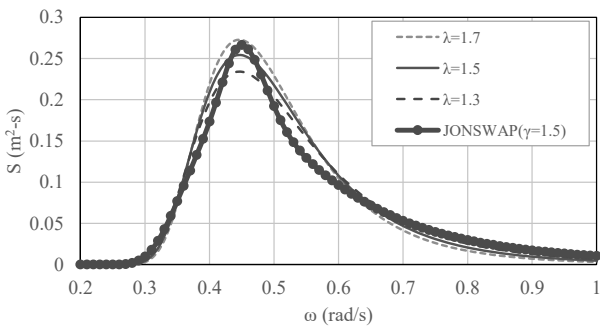


Fig. 2 Ochi-Hubble spectrum and JONSWAP spectrum. ($T_z=10s$)

3.2 方向分布

方向分布の関数Gは、光易らのモデル¹⁸⁾を用いた。

$$G(\delta|s) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma(s+1)^2}{\Gamma(2s+1)} \left|\cos\frac{\delta}{2}\right|^{2s} \quad (7)$$

δ: 波の主方向に対する素成波の進行角

sは波エネルギーの方向分散を表す形状パラメータであり、大きいほどエネルギーの集中度が高い。cos(n)乗の方向分布とは、 $s = 2n + 1$ のときに概ね一致する¹⁸⁾。

3.3 関数近似

追算スペクトルを波方向スペクトルの関数モデル(式(1))及び(式(7))に近似するための要領を付録に示す。付録に従い、短期海象を表現するためのパラメータを取得した。本研究では、平均二乗誤差RMSE(Root Mean Square Error)最小を設定した。

4. 北大西洋の波スペクトルの特性

4.1 マルチピークの発生確率

北大西洋におけるマルチピークスペクトルの発生確率と有義波高との関係を Table 2 に示す。ピークの判別方法及び解析結果の詳細は付録に示した。本論文中、本4.1節及び付録については、北大西洋全域の地点(1,081 地点⁹⁾)を対象とした。

長期最大期待値に関係する大波高の海象では、マルチピークの可能性が低いことが分かった。このことから、本研究では、シングルピーク海象を評価対象とすることとした。ある海象がマルチピークと判別された場合は、エネルギーの最も高いピークの周波数を ω_p とするシングルピーク海象に変換した。変換に際し、スペクトルの全エネルギー、すなわち有義波高は元の値から変えないよう、変換後のスペクトルに係数を乗じて補正した。

Table 2 Average of occurrence probability of short-term sea having multipeak spectrum in North Atlantic.

Category	Occurrence probability
H>0m	0.303
H>2m	0.239
H>5m	0.075
H>10m	0.002

4.2 有義波高とピーク周期の相関

追算スペクトルの有義波高Hとピーク周期 T_p の関係を Fig. 3 に示す。地点 ID9 のデータである。Hは(5)式により求めた。有義波高が高くなると、波周期が長くなるという一般的な傾向が確認できる。図には土岐¹⁹⁾による有義波高の最大限界値を示した。短周期側で限界を超える波高が確認されるが、

大きな問題はなく、本研究の目的は果たせると考えられる。

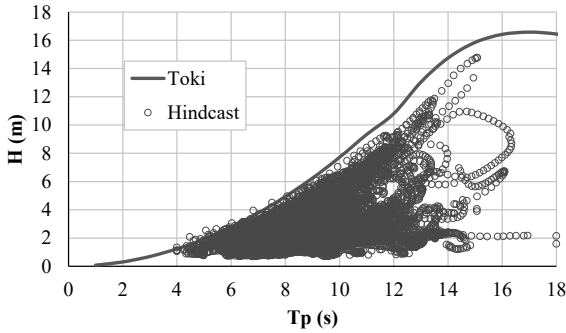


Fig. 3 H and T_p obtained by hindcast data. (ID9)

4.3 周波数スペクトルの形状

周波数スペクトルの形状パラメータ λ と有義波高 H の関係を Fig. 4 に示す. 統計的な波高が最も高い地点 ID9 の結果を示している. λ は、波高が高くなるにつれて徐々に収束する傾向にある. Fig. 5 に、ある波高 H を超える海象での平均と標準偏差を求めた結果を示す. Fig. 5 は、地点 ID1~11 の平均である. 低波高でばらつきが大きい、最悪海象になり得る高波高では $\lambda=2\sim 3$ に収束する傾向が確認される.

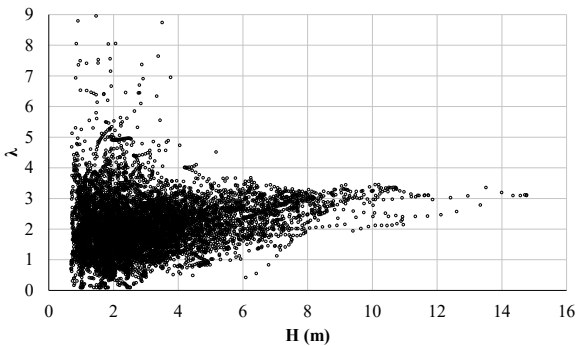


Fig. 4 Relationship between significant wave height and peak shape parameter of the frequency spectrum. (ID9)

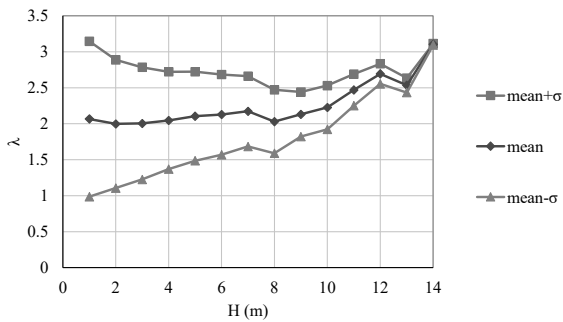


Fig. 5 Mean value and standard deviation of the shape parameter of the frequency spectrum. (ID1~11)

IACS の推奨する $\gamma=1.5(\lambda=1.5)$ は、従来の P-M 型 ($\gamma=1$) よりも実際に近いスペクトル形状になると言えそうである. 一方、 $\lambda=1.5$ に収束しない理由は、気象機関による波浪追算データの違いや選択した地点、サンプル数が異なること、Fig. 2 に示した JONSWAP と Ochi-Hubble の形状の不一致などが挙げられる.

4.4 方向分布の形状

追算スペクトルの方向分布の形状パラメータ s と有義波高 H の関係を Fig. 6 及び Fig. 7 に示す. s も λ と同様、波高が高くなるにつれて収束する傾向にある. 高波高では、 $s=7\sim 10$ に収束する.

IACS2023 の $n=3(s=7)$ は、従来の \cos^2 乗分布よりも実際に近いスペクトル形状を与えていると言えそうである.

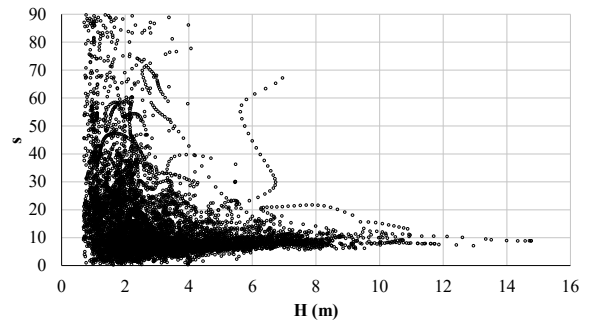


Fig. 6 Relationship between significant wave height and spreading power of directional distribution. (ID9)

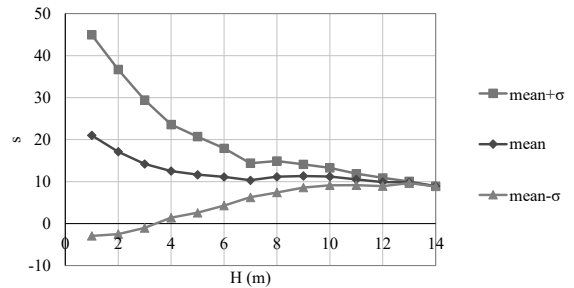


Fig. 7 Mean value and standard deviation of the shape parameter of directional distribution. (ID1~11)

4.5 パラメータの同時分布

周波数スペクトルの形状パラメータ λ と方向分散の形状パラメータ s の同時発現分布を Fig. 8 に示す. 有義波高が 7m 以上の短期海象に限定した. パラメータ間の相関は明確でなく、確率的な評価においては独立事象とみなして問題なさそうである.

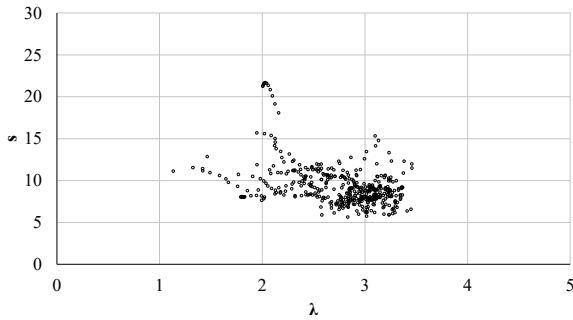


Fig. 8 Joint distribution between peak shape parameter λ and spreading power s . (ID9 ; $H>7m$)

5. 長期最大期待値の推定

追算スペクトルを関数モデルに近似した波方向スペクトルを用いて、コンテナ船の波浪中縦曲げモーメント (*VBM*) の長期予測を行なう。

5.1 解析条件

フルロード状態のポストパナマックスコンテナ船 ($L=283.8m$)²⁰⁾、船速 V はゼロ、出会い波向の確率は一様分布とした。

地点は、Fig. 1 の 11 地点、波向きは 30 deg 刻みとして全方位 12 ケースを対象とした。従って、対象期間 1 年間、8,760 時間での短期海象の数は (時間×地点数×波向き数) 8,760 × 11 × 12 = 1,156,320 であり、短期海象を 1,000 波とすると 10^8 を超える波数を得ている。

本研究でを使用した応答関数を Fig. 9 に示す。波高に対して線形な *VBM* 応答を仮定した。

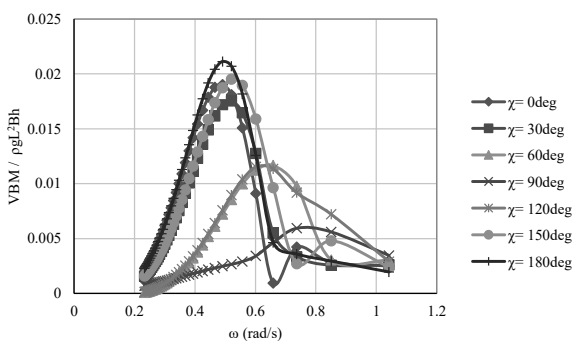


Fig. 9 Response amplitude operator of *VBM* on container ship. ($V=0$)

5.2 長期予測

短期海象での応答の標準偏差 R を元に長期予測を行って長期超過確率 Q 及び長期最大期待値を求めた。

標準偏差 R は、下式により求めることができる。

$$R = \sqrt{\int_{-90^\circ}^{90^\circ} \int_0^\infty [A(\omega, \chi - \delta)]^2 S(\omega) G(\delta) d\omega d\delta} \quad (8)$$

R : 波との出会い角 χ の短期海象中での応答標準偏差

$A(\omega, \chi)$: 波浪中応答関数

χ : 出会い波向き

$S(\omega)$: 周波数スペクトル

ω : 成分波の円周波数

$G(\delta)$: 方向分布関数

δ : 波の主方向に対する素成波の進行角

S 及び G は、追算スペクトルを関数モデルに近似して得られた S 及び G を使用する。(8)式で求めた標準偏差 R の頻度分布を用いて、下式により長期超過確率 Q を求めることができる。

$$Q(x > x_1) = \int_0^\infty q(x > x_1 | R) p(R) dR \quad (9)$$

$p(R)$ は、標準偏差の値が R となる短期海象の発生確率で、 R の頻度分布から求めることができる。 $q(x > x_1 | R)$ は、標準偏差 R の短期海象において応答値 x_1 を超える確率で、本研究ではガウス過程のもとレイリー分布を仮定した。

$$q(x > x_1 | R) = \exp\left(-\frac{x_1^2}{2R^2}\right) \quad (10)$$

長期予測の結果を Fig. 10 に示す。縦軸は、*VBM* を船体の主要目で正規化して表記している。図には、

- ① 追算スペクトルを式(1)及び式(7)に近似したスペクトルを用いた結果
- ② 追算スペクトルを式(2)の P-M 型スペクトル(及び \cos^2 乗分布)に近似したスペクトルを用いた結果⁹⁾
- ③ 追算スペクトルをそのまま用いた結果⁹⁾

を示す。①は 4 パラメータ (H, T, λ, s)、②は 2 パラメータ (H, T) となる。また、真値は③とみなす。

$Q=10^{-8}$ に相当する *VBM* の長期最大期待値は、4 パラメータが最も大きいことが分かる。長期最大期待値は、波のピーク周波数と RAO のピーク周波数が近いときに発生しやすく、ピーク周波数が一致したとき、波スペクトルのピーク周波数が急峻である方が、(8)式の $[A(\omega)]^2 S(\omega)$ に相当する応答スペクトルの面積が大きくなる。応答スペクトルの面積は応答の分散値であり、標準偏差の 2 乗である。4 パラメータは 2 パラメータよりも急峻なピークの形状を表現できることから、2 パラメータに比べて *VBM* の標準偏差を大きく見積もる結果となった。

前報⁹⁾で示した 2 パラメータの推定値は真値よりも小さかったが、4 パラメータスペクトルを用いることで推定値は大きくなり、真値に近づく方向に作用した。4 パラメータス

ペクトルは様々な条件に対してよく傾向を捉えきることができるので、より正確な荷重を推定できると言える。

定量的にみると、4 パラメータの推定値は真値を上回り、2 パラメータの方が真値に近づいている。この理由は以下と考える。真値とした追算スペクトルは広い範囲にエネルギーが分布しているのに対し、モデル化した周波数スペクトルは狭帯域であり、また同様に、追算スペクトルの波方向は $\theta=0\sim 360\text{deg}$ の全方位に分布しているのに対し、モデル化した波方向は主方向から $\pm 90\text{deg}$ と狭くなるため、2 パラメータ 4 パラメータに関わらずスペクトルが狭帯域になる。2 パラメータの標準偏差は、モデル化によって大きくなる分と、スペクトルピーク形状が実際より鈍ることで小さくなる分が相殺し、結果として真値に近づいた。

本研究では、マルチピーク海象をシングルピークに変換したので、高い確率の期待値に影響が生じる可能性がある。特に疲労強度評価に適用する際は留意する必要がある。しかし、Fig. 10 を見る限り、疲労に支配的とされる $Q=10^{-2}$ の期待値には 4 パラメータ①と真値③の間に差はなく、シングルピークに変換したことによる影響は少ないと考えられる。

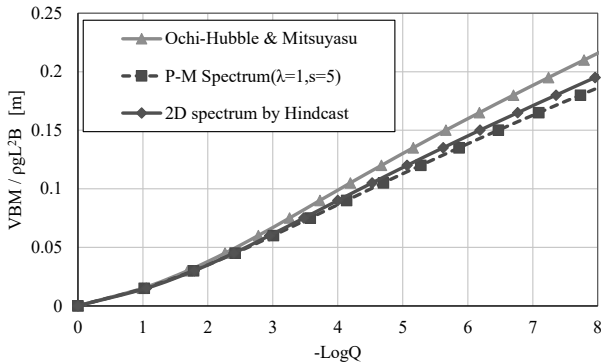
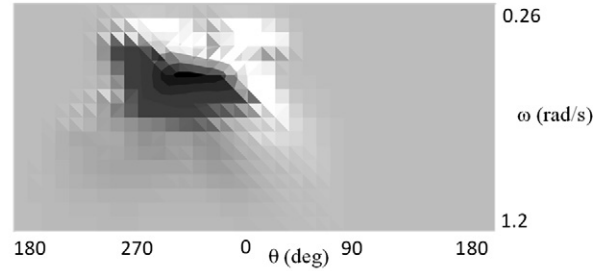


Fig. 10 Long-term prediction of VBM. ($V=0$)

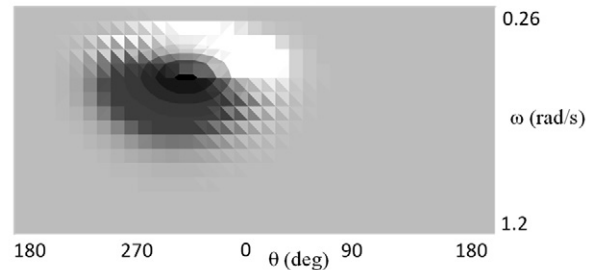
5.3 最悪海象のスペクトル

縦曲げモーメントの標準偏差が最大になった最悪海象での追算スペクトル、及び、追算スペクトルを式(1)及び式(7)に近似したスペクトルを Fig. 11(a),(b)に示す。また、このときの周波数スペクトルを Fig. 12 に示す。この最悪海象での有義波高及びピーク波周期は、 $H=14.8\text{m}$ 、 $T_p=15.1\text{s}$ 、形状パラメータは $\lambda=3.12$ 、 $s=8.93$ であった。Fig. 12 の周波数スペクトル $S_{Hindcast}(\omega)$ は、2 次元スペクトル $S_{Hindcast}(\omega, \theta)$ を波向き方向に積分して求めた。

$$S_{Hindcast}(\omega) = \int_0^{360^\circ} S_{Hindcast}(\omega, \theta) d\theta \quad (11)$$



(a) Hindcast



(b) Fitted on Ochi-Hubble and Mitsuyasu model

Fig. 11 2D wave spectrum at the worst sea state.

Fig. 11(a),(b)を比べると、波浪追算(a)の方がピークの峰が $30\text{deg}\sim 210\text{deg}$ の範囲に広がっているが、違いは確認しづらい。そこで Fig. 12 の周波数スペクトルを比べると、波浪追算には $\omega=0.6\sim 0.8\text{rad/s}$ の付近にエネルギーがあるが、Ochi-Hubble ではこれを再現できていないことが分かる。 $\omega=0.6\sim 0.8\text{rad/s}$ の付近のエネルギーを下げた分だけピークのエネルギーが高くなり、標準偏差すなわち縦曲げモーメントに違いが出た。Fig. 12 の周波数スペクトルの不一致が、4 パラメータでの長期最大期待値が真値よりも大きくなった理由のひとつである。

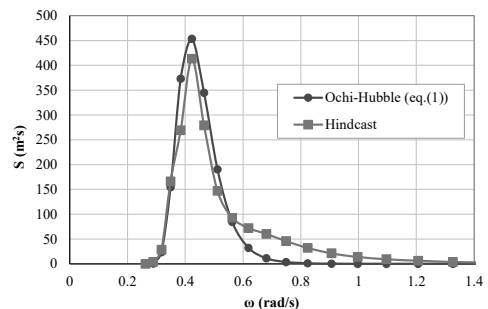


Fig. 12 Comparison of frequency spectrums at the worst sea state.

5.4 感度解析

波方向スペクトルの形状パラメータ λ 及び s を用いて超過確率 $Q=10^{-8}$ に相当する長期最大期待値を推定する方法を検討した。

形状パラメータと長期最大期待値との関係を調べるため、

λ 及び s を変数として感度解析を行なった。具体的には、(1)式及び(7)式の λ 及び s をある値に固定した関数モデルを作成し、このモデルに追算スペクトルを近似して長期予測を行なって長期最大期待値を求めた。 λ, s の組み合わせを変えて長期予測を行うことにより長期最大期待値の分布を求めた。

感度解析による長期最大期待値の分布を Fig. 13 に示す。長期最大期待値は λ 及び s の増加に伴い横ばいに近づく傾向がある。Fig. 5 より、高波高の海象で $\lambda=2\sim 3$ とすると、 $\lambda=1$ (P-M 型) のときよりも長期最大期待値は 7~9%増加する。波方向については、Fig. 7 より、 $s=10$ とすると $s=5$ (cos2 乗) よりも約 7%増加する。

λ と s の組み合わせで見ると、 $\lambda=1, s=5$ (P-M 型 & cos2 乗) と比較して、Fig. 8 による平均値 $\lambda=3, s=7$ の組み合わせで約 13%増加、Fig. 8 による最悪の組み合わせ $\lambda=3.5, s=15$ で約 22%増加する。IACS2023 に近い組み合わせ $\lambda=1.5, s=7$ のときは、P-M 型(& cos2 乗)での VBM に比べて約 7%増加する。評価対象とした 11 地点の形状パラメータを用いた場合、IACS2023 スペクトルの形状パラメータを用いた場合と比べて、長期最大期待値は 6%~15%大きいと推定される。

Fig. 10 では、②(P-M 型; $\lambda=1, s=5$)は、③(真値)よりも約 6%低く推定されるが、Fig. 13 によると $\lambda \geq 2$ とすることで真値よりも高い推定値を得ることができる。 s は λ ほどの影響は出ないが、 $s > 11$ ($n=5$)で真値よりも高くなる。見方を変え、真値に近い推定値が得られる組み合わせを調べると、 $[\lambda, s]=[1.5, 6] \sim [2, 5]$ の間にあり、IACS2023 はこれに近い値を推奨しているとも言える。

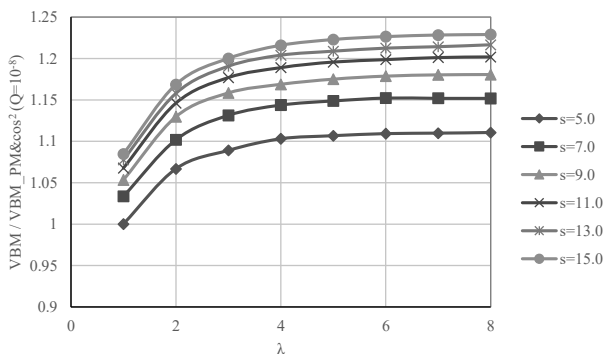


Fig. 13 Long-term value at $Q=10^{-8}$ for various λ and s .

5.5 今後の方向性について

前節で示した方法は、使用する応答関数を入れ変えることで、縦曲げモーメント以外の応答やコンテナ船以外の船種にも適用できる。設計利用のためには、波浪データを増やす必要があり、海域や年代の違いによって、形状パラメータの感度がどのように変化するかを把握する必要がある。また当然

ながら、船舶が遭遇したという条件付も重要である。本論で設けた仮定と異なり、高波高でマルチピークが頻繁に起きる場合は、多方向波中での数値シミュレーション技術や水槽試験技術の向上が重要になる。

波浪データの精度もまた重要である。本論では用いた波浪追算のデータは正しいと仮定したが、異なる複数の波浪データを使用して傾向を把握する必要がある。特に、大型船や横揺れ等の長周期にピークがある応答関数を扱う場合や、出会い波周期が大きく変わるような船速を扱う場合、長周期側のデータが重要になるが、Fig. 3 では $T_p=18s$ ($T_z=12.8s$)までしかなく、長周期の波の情報が整備されていないことがうかがえる。解決の一案として、大型船の構造応答から長周期の波を観測する方法²⁾を活用して波浪データの精度向上を図ることが望まれる。

6. 結 言

北大西洋海域の波浪追算による 2 次元スペクトルを利用して、波浪スペクトルのモデル化が縦曲げモーメントに与える影響を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 有義波高が高い海象ではマルチピークスペクトルの発現確率は低くなる傾向を確認した。北大西洋海域では、マルチピーク海象が船体強度設計の最悪海象になる可能性は低いと考えられる。
- 2) ポストパナマックスコンテナ船の $Q=10^{-8}$ に相当する長期最大期待値は、スペクトルのピーク形状を表現可能な 4 パラメータスペクトルを用いることで、2 パラメータスペクトルのときよりも大きくなり、真値に近づく方向に作用した。4 パラメータスペクトルは様々な条件に対してよく傾向を捉えきることができるので、より正確な荷重を推定できる。
- 3) 波方向スペクトルの形状パラメータ(λ, s)を用いて、追算スペクトルを介さず効率的に長期最大期待値を推定する方法を提案した。評価対象とした 11 地点の形状パラメータを用いた場合、IACS2023 スペクトルの形状パラメータを用いた場合と比べて、長期最大期待値は 6%~15%大きいと推定された。

謝 辞

本研究は科研費 (21H01556) の助成を受けたものである。また、本研究は防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) Parunov, J. et al. Uncertainties in modelling the low-frequency wave-induced global loads in ships, *Marine Structures* (86), doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103307, 2022.
- 2) Oka, M., et al.: Estimation of Wave Loads acted on Ships in Service based on AIS Data, *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* (28), pp. 89-97, doi.org/10.2534/jjasnaoe.28.89, 2018 (in Japanese).
岡正義他：AIS データに基づく実運航船の波浪荷重推定－最大荷重に対する操船影響の評価法－, 日本船舶海洋工学会論文集第 28 号, pp.89-97, 2018.
- 3) Oka, M., Ma, C. : Long-term prediction for vertical bending moment utilizing the AIS data and global wave data, *Journal of Marine Science and Technology* (13), doi: 10.1007/s00773-023-00949-2, 2023.
- 4) Miratsu, R., et al. : Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model, *Marine Structures* (86), doi:10.1016/j.marstruc.2022.103293, 2022.
- 5) Takami, T., Iijima, K. : Numerical investigation into combined global and local hydroelastic response in a large container ship based on two-way coupled CFD and FEA, *Journal of Marine Science and Technology* (7), doi:10.1007/s00773-019-00668-7, 2019.
- 6) Komoriyama, Y. : A Novel Technique to Estimate Hull Structural Response in Waves by means of Hydrodynamic Pressure Measurement - 1st report: Estimation for vertical bending moment - , *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* (35), pp. 77-85, doi.org/10.2534/jjasnaoe.35.77, 2022 (in Japanese).
小森山祐輔：水圧計測による波浪中船体構造応答の推定手法, 日本船舶海洋工学会論文集第 35 号, p. 77-85, 2022.
- 7) ISSC: Report of the Committee I. Environmental Conditions, *Proceedings of 2nd ISSC*, 1964.
- 8) International Association of Classification Societies (IACS) : Recommendation No. 34, Standard Wave Data, 2001.
- 9) Oka, M., et al.: Estimation of Wave Loads based on Two-dimensional Wave Spectrum by Hindcast, *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* (36), pp. 125-135, doi.org/10.2534/jjasnaoe.36.125, 2022 (in Japanese).
- 岡正義他：波浪追算による 2 次元波スペクトルを利用した波浪荷重推定, 日本船舶海洋工学会論文集第 36 号, pp.125-135, 2022.
- 10) International Association of Classification Societies (IACS): Recommendation No. 34, Standard Wave Data, Rev2, Dec 2022.
- 11) Ewans, K., McConochie, J.: Optimal methods for estimating the JONSWAP spectrum peak enhancement factor from measured and hindcast wave data, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 143(2), 2020.
- 12) Ewans, K., Hansen , H. F., Zeeberg, A.R. : A spectral description for extreme sea states offshore Denmark Part I : Power spectrum, *Ocean Engineering*, volume 246, 110351, 2022.
- 13) Hauteclouque, G. and Lasbleis, M.: Extreme seastate parametrization and its consequences on ship responses, 15th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures PRADS 2022, Dubrovnik, Croatia, 2022.
- 14) Hersbach, H. et al.: The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, volume 146(730), pp.1999-2049, 2020.
- 15) Matsuura, K., et al.: The estimation of meteorological and oceanographic and its accuracy, *KANRIN / Bulletin of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* (77), pp.6-10, 2018 (in Japanese).
松浦邦明他：気象海象の推算とその精度, 日本船舶海洋工学会誌第 77 号, pp.6-10, 2018.
- 16) Ochi, M.K., Hubble, E.N.: Six-parameter wave spectra. *Coastal Engineering*, No.15.17, pp.301-328. 1976.
- 17) Hineno, M., Yamanouchi, Y.: Spectrum in ocean wave. *Techno marine / Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan*, vol.609, pp.160-180, 1980.
日根野元祐, 山内保文：海洋波のスペクトル, 日本造船学会誌 609 号, pp.160-180, 1980.
- 18) Mitsuyasu, H., et al.: Observation of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Clover-Leaf Buoy, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 5, 1975.
- 19) Toki, N.: A Study on the Determination of Design Wave Condition (2nd Report), *Journal of Seibu Zosen Kai/ Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects*, vol.93, pp.121-133, 1996.
土岐直二：設計海象の設定法に関する研究 (その 2) , 西部造船会会報 第 93 号, pp.121-133, 1996.

- 20) Oka M., et al. : High-precise Load Measurement of Post-panamax Container Ship in Oblique Waves, The 10th Research Presentation Meeting of National Maritime Research Institute, pp.167-174, 2010 (in Japanese).
 岡正義他：斜波中におけるポストパナマックスコンテナ船の高精度荷重計測試験，独立行政法人海上技術安全研究所研究発表会講演集第 10 号, pp.167-174, 2010
- 21) Chen, X., et al. : Estimation of directional wave spectra and hull structural responses based on measured hull data on 14,000 TEU large container ships, Marine Structures (80), 10.1016/j.marstruc.2021.103087, 2021.

付録 マルチピーク海象の発現確率

A.1 マルチピーク海象の判別方法

波浪追算による波方向スペクトルがマルチピークであるかどうかを判別するため判別方法を検討した。ここでは本研究で採用した判別方法を説明する。追算スペクトルにピークが複数ある場合でも、ピークが微小である場合や、ピークの周波数が近接している場合は、無効なピークとして扱うのが適切と考えて、条件とその閾値を設定した。条件は以下の 3 つとした。判別のイメージを Fig. A1 に示す。

- 条件 1 ピーク値間の谷の深さ (C/P)
- 条件 2 ピーク波向の偏差 ($\Delta\theta$ 又は $\Delta\omega$)
- 条件 3 ピーク値の比率 (P_2/P_1)

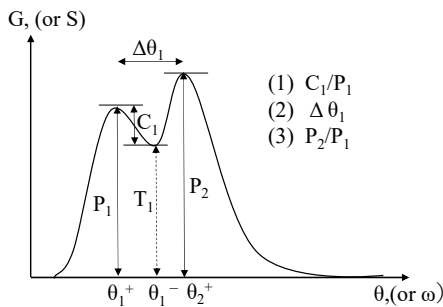


Fig. A1 Image diagram of multi-peak spectrum discrimination.

- 1) 以下の式により，波浪追算による 2 次元波スペクトルの有義波高を求める。

$$H_{Hindcast} = 4.004 * R \tag{A1}$$

$$R = \sqrt{\int_0^{360^\circ} \int_0^\infty S_{Hindcast}(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

R : 標準偏差

- 2) 下式に従い，2 次元波スペクトルの方向分布関数 G を求める。積分値が 1 になるよう分散(R2)で正規化している。

$$G_{Hindcast}(\theta) = \int_0^\infty S_{Hindcast}(\omega, \theta) d\omega / R^2 \tag{A2}$$

- 3) $G_{Hindcast}(\theta)$ において極大値 P_i 及び極小値 T_i ，これらが発生する波向き θ_i^+ , θ_i^- ，及び極大値間（ピーク間）の谷の深さ C_i をそれぞれ求める。

$$C_i = G(\theta_i^+) - G(\theta_i^-) = P_i - T_i \tag{A3}$$

Fig.A1 において，開始点 ($\theta = 0$) は $G_{Hindcast}(\theta)$ が最小値 $\min(G(\theta))$ となる波向きと定める。これにより， $\theta_i^+ < \theta_i^-$ となるよう i を定めている。また，終了点 ($\theta = 2\pi$) でも G は最小値になるので， $G(\theta_{i_{max}}^-) = T_{i_{max}} = \min(G(\theta))$ となる。

- 4) 無効にする可能性のあるピークは，谷の両側にあるピークの低い方なので，以下の条件式で判別をする(条件 1)。

$$\min\left(\frac{C_i}{P_i}, \frac{C_i}{P_{i+1}}\right) < D_1 \tag{A4}$$

- 5) 残ったピークが複数のとき，(条件 2) で判別する。ピーク間の偏差を以下の式で求める。

$$\Delta\theta_i = \theta_{i+1}^+ - \theta_i^+ < D_2 \tag{A5}$$

のとき， $G(\theta_i^+)$ と $G(\theta_{i+1}^+)$ の小さい方はピークとしてカウントしない。

- 6) さらに残ったピークが複数のとき，(条件 3) で判別する。

$$\frac{\max(G(\theta_i^+), G(\theta_{i+1}^+))}{\min(G(\theta_i^+), G(\theta_{i+1}^+))} > D_3 \tag{A6}$$

のとき， $\min(G(\theta_i^+), G(\theta_{i+1}^+))$ はピークとしてカウントしない。

- 7) 代表波向を $\theta_i (i = 1 \sim N)$ とするシングルピーク方向分布 $G_{Hindcast}(\theta|\theta_i)$ を(7)式で近似して，分散パラメータ $s_i (i = 1 \sim N)$ 及び $G(\theta|\theta_i, s_i)$ を得る。マルチピークスペクトルの方向分布 $G(\theta)$ は，シングルピークスペクトル $G(\theta|\theta_i, s_i)$ の和で表すことができる。

$$G(\theta) = \sum_{i=1}^N G(\theta|\theta_i, s_i) \tag{A7}$$

本研究では，各シングルピークスペクトル $G(\theta|\theta_i, s_i)$ の和として表された $G(\theta)$ 全体として， $G_{Hindcast}(\theta)$ との差が最小となるよう，個々のシングルピークスペクトルの分散パラメータ s_i を決めた。また，分散パラメータ s は周波数に依存しないとした。すなわち周波数軸と波向き軸が直交する Fig. 11 のようなコンター図で表すと，山の等高線は周波数軸または波向き軸が長軸の楕円形になる。

- 8) 波浪追算による 2 次元波スペクトルから代表波向 $\theta_i (i = 1 \sim N)$ での周波数スペクトル $S_{Hindcast}(\omega|\theta_i)$ を抽出する。
 9) $S_{Hindcast}(\omega|\theta_i; i = 1 \sim N)$ に対して，3)~6) と同様の処理を

行ない、 $S_{Hindcast}(\omega|\theta_i; i = 1 \sim N)$ のピーク数 M_i 及びピーク周波数 $\omega_{p_{ij}} (j = 1 \sim M_i)$ を求める。

- 10) $S_{Hindcast}(\omega|\theta_i; i = 1 \sim N)$ を (1) 式に近似して、
 $S(\omega|\lambda_i, \theta_i; i = 1 \sim N)$ を得る。(1)式において、 $j = M_i$ とする。
 11) 下式により、2次元波スペクトル算式 $S(\omega, \theta|\lambda, s)$ を求める。

$$S(\omega, \theta|\lambda, s) = \sum_{i=1}^N S(\omega|\lambda_i, \theta_i) * G(\theta|\theta_i, s_i) \quad (A8)$$

- 12) (A1)式に従い、波スペクトル $S(\omega, \theta|\lambda, s)$ の有義波高 H を求める。ここで、 $H = H_{Hindcast}$ となるよう、 $S(\omega, \theta|\lambda, s)$ を補正する。具体的には、(1)式のパラメータ H_j を補正する。
 13) 以上により、波スペクトルのピークの数 $L (= \sum_{i=1}^N M_i)$ 、各ピークに応じた、 $H_k, \omega p_k, \theta_k, \lambda_k, s_k (k = 1 \sim L)$ 、及びこれらのパラメータを用いて 2次元波スペクトル $S(\omega, \theta|\lambda, s)$ を得ることができる。

A.2 判別のための閾値

本論では、閾値 D_1, D_2, D_3 を以下のとおり与えた。

$$D_1 = 0.3$$

$$D_2 = 30 \text{ deg.}$$

$$D_3 = 4$$

D_1 は、判別された 2次元スペクトルを確認しつつ、主観と違わぬよう適切な値を設定した。 D_2 は、一般的な応答関数の刻み値 30 deg. とした。本論で用いた 2次元スペクトルは 10 deg. 刻みなので偏角は 20 deg. 以上になり、また 30 deg. 未満を除外対象としたため、20 deg. のときだけが除外される。また、 $\Delta\omega$ は本論では設定していない。 D_3 については、4~10 までで試算して傾向を調べたが顕著な差が無かったため 4 を採用した。

A.3 マルチピーク海象の発現確率

マルチピークスペクトルの海象の発現確率を Fig. A2 に示す。また、北大西洋全域の平均値は Table 2 に示したとおりである。有義波高が高くなると、マルチピーク海象の発現確率は低くなるのがわかる。

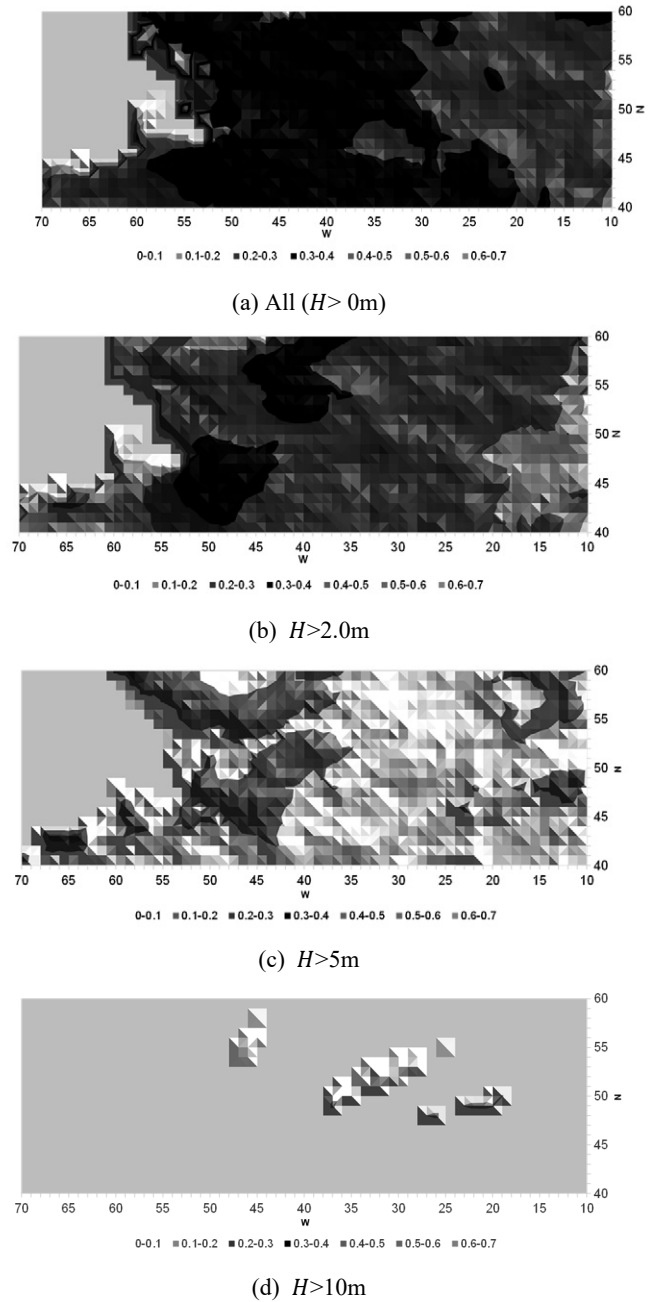


Fig. A2 Distribution of occurrence probability of short-term sea having multipeak spectrum in North Atlantic. (Vertical axis: north latitude, Horizontal axis: west longitude)