

船級規則に用いる波浪統計基準の改正*1

Håvard Nordtveit AUSTEFJORD*, Guillaume de HAUTECLOCQUE**,
Michael JOHNSON***, 朱庭耀****

1. はじめに

全世界で運航される商船は、国際船級協会連合 (IACS) により定められる厳しい波浪環境に構造上耐えるように設計されている。このIACSの勧告 (すなわち、IACS “Rec. No. 34 rev1” (2001)) は、主に有義波高 (H_s) 及び平均ゼロアップクロス波周期 (T_z) の組合せの発現頻度を示す波浪頻度分布の形式で北大西洋における詳細な波浪状況を提供している。

この基礎となる統計データは船舶からの「目視」観測に由来するため、IACSはRec. No. 34 rev1 (2001) に対する一部の批判に直面してきた。このデータはその時点で利用可能な最良のデータではあったが、人による観測値に不正確さがあったことが調査により示された。悪天候回避の影響はデータに取り込まれているが、定量化することができておらず、例えば固定された航路または船種に起因するバイアスも識別することができていなかった。さらに、最後に観測されたデータは1984年にさかのぼるため、それ以降の長期的な変化が欠けていることも懸念される。

近年、数値波浪モデリングの質が著しく向上されるとともに、エンジニアリング分野にさらに容易に利用できるようになってきた。これに加えて、国際海事機関 (IMO) は船舶位置の一般開示 (自動船舶識別装置, AIS) を義務化した。その目的は航海域に対して特定の船舶を支援することにあつたが、このようなグローバルな記録の集約は非常に価値のあるデータセットを提供した。これら2つの進展により、IACSはバイアスのない波浪頻度分布を作成するため、AISデータを北大西洋の同じ場所に示す波浪モデルデータと組み合わせられると考え、2018年にRec. No. 34の改正を検討するプロジェクトチームを提案することとなった。このプロジェクト

チームはその成果をIACS “Rec. No. 34 rev2” として提出した。本稿には、改正された勧告を制定するために実施された技術的作業の大半が公表されている。

本稿では、初めに検討した海域、AISデータと波浪モデルデータの出所を提示し、波スペクトル形状と波の方向性分布に関する勧告の基礎となる作業とともに、「未加工の」波浪頻度分布を計算する方法を示す。次に、未加工の波浪頻度分布のデータから外乱を削除するために採用された平滑化プロセスを説明する。その後、さまざまな船種を対象とした70隻の船舶のデータベースに対し、新しい“Rec. No. 34 rev2”と以前の“Rec. No. 34 rev1” (2001) を比較した場合、船体応答 (船体運動、加速度及び波浪荷重) がどのように変化するかを示す。最後に、用いた手法の既知の制約事項を特定し考察する。

2. データソース

2.1 波浪追算

Rec. No. 34 rev1の波浪頻度分布の基礎となるデータソースは、最後に公表された1986年の船舶からの目視観測である¹⁾。多少の補正が施されているものの、この目視観測データは、とりわけ波周期に関する精度に限界があることが報告されている²⁾。一方、Rec. No. 34 rev1提案がされ後、数値波浪追算解析が一般的に活用されるようになり、いくつかの信頼できる全球データセットが公開されている。さまざまなデータセットの分析に基づいて³⁾、本研究では、Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) のIOWAGA (Integrated Ocean Waves for Geophysical and other Applications) データセットを使用する⁴⁾。IOWAGAデータセットは全方向の波スペクトルを提供しないため、セクション5に記

*1 本論文はProceedings of 9th International Conference on Marine Structuresに最初に発表された。本技報にこの論文を再掲する許可を会議の技術プログラム委員会から得られた。

* Det Norske Veritas, Oslo, Norway

** Bureau Veritas, Paris, France

*** Lloyds Register, Southampton, United Kingdom

**** 一般財団法人日本海事協会 (ClassNK), Tokyo, Japan

述するECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) のERA5 (ECMWF Reanalysis v5) データセット⁵⁾により補完される。

2.2 船位

Rec. No. 34は船が遭遇する波浪を反映することになっているので、航路と波浪データの現実的な組合せを考慮することが重要である^{6) 7) 8)}。これを行うための最良の方法は、何百万もの航海中の船舶位置を同じ位置の波浪データと個々に組み合わせることである。当然ながら、これは実遭遇波浪頻度分布における航路の影響を完全に再現することになる。2万隻以上の船の航海データは、波浪追算データと同じ時間解像度に対し、AISデータをクリーニング及び再サンプリングすることにより確立した。

フリートは90mを超える貨物船と客船に限定した。これは、遠洋商船がほぼ含まれることを意味する。含まれないのは、多数の漁船、オフショア船、軍艦及び例えばFPSOなど固定の場所で作業する船である。

解析期間は2013年から2020年までの7年間である。航海データの収集は図1に定義される北大西洋で行われた。この海域の選択に関してはセクション7でさらに詳しく考察する。近隣諸島の沿岸航行データ(50海里内)は除外した。

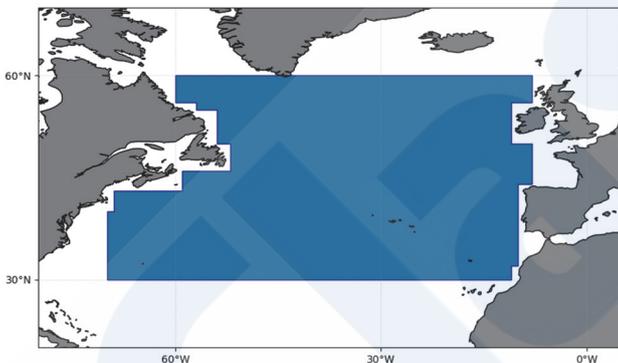


図1 本研究における北大西洋の定義

2.3 船体応答のデータベース

新しい波浪統計基準の最終目的はより良い船体応答の長期予測である。従って、この新しい波浪基準を作成過程でなされたさまざまな仮定や妥協を評価するには、それらを考慮することが重要であり、また、この課題に取り組むために、3次元線形耐航性応答のデータベースを使用した。

表1に対象船を示す。個船ごとに3次元線形境界要素法(BEM)で各種船体応答の計算⁹⁾を実施する。応答関数(RAO)は、表2の種類について出力される。RAOは波との出会角の解像度5°で求められ、4種類の船速(0 knot, 5 knot, Froude数0.1及

び航海速度の75%)で用意されている。

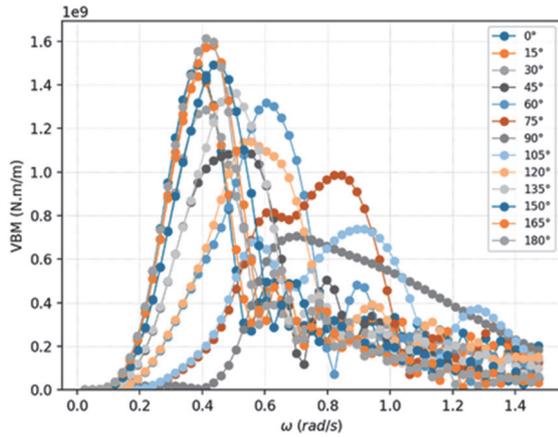
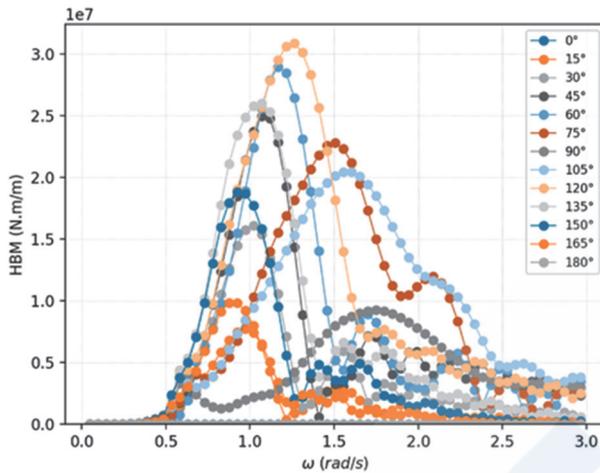
表1 船舶データベース、調査された各船種の船及び積付状態の数

船種	満載	バラスト
タンカー	16	11
ばら積及び貨物船	19	16
コンテナ船	21	10
LNG船	5	0
LPG船	5	0
RoRo船	3	0
客船	5	0
合計	74	37

さらに、参考文献¹⁰⁾の利用可能な回帰手法を用いることで各応答に関しての特徴周期 T_c を求める。参考文献¹⁰⁾から特徴長さ(L/a)は周期 $T_c^2 = (2 * \pi * L) / (g * a)$ に変換される。本研究においては、特徴周期は定量的な導出には用いられず、物理的な解釈を可能にさせるスケールで結果を表示するためにのみ用いられることに留意する必要がある。この応答のデータセットからの例として大幅に異なる特徴周期を有する2つのRAO(長い T_c を有する長い船の垂直曲げモーメントと短い船(短い T_c)の水平曲げモーメント)を図2と図3に示す。

表2 データセットに含まれる船体応答の種類

RAOラベル	説明
VBM	船体中央横断面における垂直曲げモーメント
HBM	船体中央横断面における水平曲げモーメント
VSF	船尾から1/4船長の位置の横断面における垂直せん断力
Pitch	ピッチ運動
Acc. Surge	前後揺れ加速度
Acc. Sway	左右揺れ加速度
Pressure wl	船体中央断面の喫水線における波浪変動圧
Roll	ロール運動

図2 VBM RAOs, 長い船, L=370m, $T_c=18$ 秒図3 HBM RAOs, 短い船, L=90m, $T_c=6$ 秒

3. 離散波浪頻度分布

悪天候回避時の離散波浪頻度分布を導く手法を以下に要約する。

- ・ 7年間（2013年6月1日から2020年6月30日まで）の北大西洋海域内のAISデータ及びIOWAGA波浪追算データをダウンロードする。
- ・ 外れ値の除去と記録の空白を埋めるための内挿を含めAISデータをクリーンにし、3時間解像度に再サンプリングする。各AISデータ点を最も近い波浪追算データ点に紐づけを行う。
- ・ 遭遇した有義波高 H_s 及び平均波周期 T_{0m1} を0.1m及び0.1秒ごとに分類する。ここで、 $T_{0m1}(=2\pi(m_{-1}/m_0))$ は平均波周期、 m_n はn次のスペクトルモーメントである。

4. 統計モデル

前のセクションでは、AISデータと波浪追算データの組合せからRec. No. 34 rev2の波浪頻度分布を導くため、IACSの作業グループが従ったプロセス

を紹介した。

AISデータおよび波浪追算データから得られる波浪頻度分布は統計モデルに当てはめられる。このモデルは、サンプリングの不確かさを取り除き、観測されていない波浪周期まで外挿可能にし、簡潔な形の波浪頻度分布を提供する（この波浪頻度分布は少数の係数を用いることにより希望する任意の解像度に再構築することができる）。

Rec. No. 34 rev2の表1（付録（図19））の基礎となる統計モデルは以下のように表すことができる。

$$p(H_s, T_{0m1}) = p_H(H_s) * p_{T_{0m1}}(T_{0m1}|H_s) \quad (1)$$

ここで、 $p_H(H_s)$ は有義波高の周辺分布、 $p_{T_{0m1}}(T_{0m1}|H_s)$ は平均波周期の条件付き分布である。

4.1 H_s の周辺分布

周辺分布をモデル化するため混合Weibull分布を用いる。係数（表3に示す）は離散波浪頻度分布に基づいてMLE（Maximum likely-hood estimate：最尤推定）により決定する。

$$\begin{aligned} P_H(H_s) &= \chi F_{H,1}(H_s) + (1 - \chi)F_{H,2}(H_s) \\ &= 1 - \chi \exp\left[-\left(\frac{H_s - \varepsilon}{\lambda_1}\right)^{\alpha_1}\right] \\ &\quad - (1 - \chi) \exp\left[-\left(\frac{H_s - \varepsilon}{\lambda_2}\right)^{\alpha_2}\right] \end{aligned} \quad (2)$$

表3 H_s の分布係数

	係数
α_1	1.4230
ε	0.9360
λ_1	1.8150
α_2	1.3940
λ_2	2.8050
χ	0.9499

4.2 条件付きモデル

条件付き平均波周期分布は分裂一般化正規分布（Split generalized normal distribution）としてモデル化される。

$$p_{T_{0m1}}(t|H_s) = \begin{cases} c \cdot e^{-\left[\frac{x_0-t}{\sigma_l}\right]^{d_l}} & \text{for } t < x_0 \\ c \cdot e^{-\left[\frac{t-x_0}{\sigma_u}\right]^{d_u}} & \text{for } t \geq x_0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

$$c = \frac{1}{\sigma_l \Gamma\left(1 + \frac{1}{d_l}\right) + \sigma_u \Gamma\left(1 + \frac{1}{d_u}\right)}$$

パラメータ σ_u , σ_l 及び x_0 は, MLEにより H_s の分類グループごとに当てはめられる。次に, これらのパラメータの H_s に対する依存性は最小二乗法を用いて式(4)のとおりに当てはめられる。表4に得られた係数を示す。

$$x_0(h_s) = l_0 + 1.0 * h_s + l_1 * h_s * \sqrt{h_s}$$

$$\sigma_u(h_s) = \begin{cases} su_2 + su_1 * \left(1 - \cos\left(\frac{\pi * h_s}{su_0}\right)\right) * 0.5 & \text{for } h_s < su_0 \\ (su_2 + su_1) * \cos(\sigma_d * \pi) & \text{for } h_s \geq su_0 \\ \text{with } \sigma_d = \frac{1}{1 + e^{-su_3 * (h_s - su_0)}} - 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_l(h_s) = sl_0 * h_s + sl_1$$

$$d_u = 2$$

$$d_l = 3$$

表4 条件付きモデルの係数

	係数
l_0	5.427251
l_1	-0.085340
su_0	2.549443
su_1	2.435955
su_2	0.705177
su_3	0.133225
sl_0	0.018557
sl_1	1.005918

最後に, 最終的な波浪頻度分布を得るため, 1m及び1秒の分類グループに離散化する。各分類グループにおける値は, 完全積分が用いられる $H_s = [0.0m, 1.0m]$ を除いて, 中間点を用いて計算される。得られた離散波浪頻度分布を付録(図19)に示す。

4.3 寄与係数

新たに定義された波浪頻度分布を用い, セクション2.3で紹介された船舶データベースを活用すると, 最大荷重と疲労荷重の海象に対する感度を表す寄与係数を求めることができる。これらの寄与係数の知見は簡易評価を必要とする際に, 関連する海象の優先順位を決定することができる。

寄与係数は, $\gamma = 1.5$ のJONSWAPスペクトルと \cos^3 の方向性分布を仮定することにより, セクション2.3に示している応答データセットを用いて計算される。

図4から, 最大荷重に最も寄与する海象の H_s は,

大まかに言うと7.5mと16.5mの間である。特徴周期は観察されたばらつきをおおむね説明可能であり, 短い T_c は低い H_s と関連し, 長い T_c は高い H_s と関連している。簡素化のため, 以下では $H_s > 10m$ の海象を極限海象とみなすこととする。

一方で, 疲労損傷に寄与する海象のレンジはより低く, [3m, 7m]の間である(図5)。

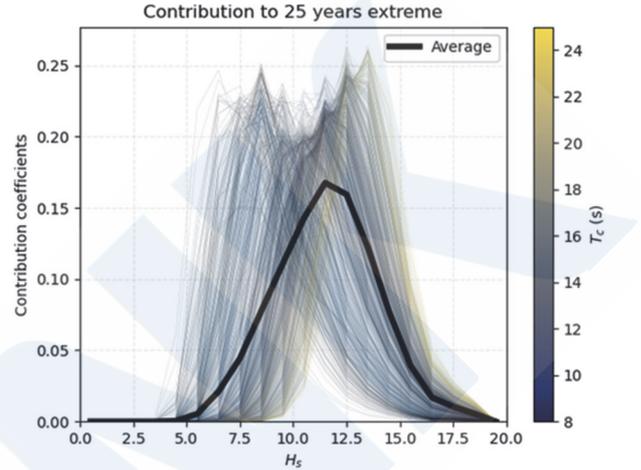


図4 最大荷重に関する寄与係数

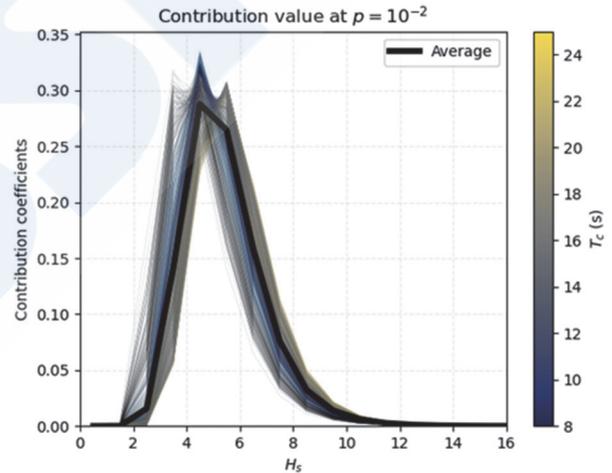


図5 疲労荷重に関する寄与係数

5. 波スペクトル形状

Rec. No. 34 rev1において, 波スペクトル形状は \cos^2 の方向性分布と関連したツーパラメータPierson-Moskowitzスペクトル($\gamma = 1.0$ を有するJONSWAPスペクトルに相当)である。現段階の研究においては, 波浪追算データからの全方向の波スペクトルの解析は, 極限海象を表すためには $\gamma = 1.5$ のJONSWAPスペクトルと \cos^3 の方向性分布がより適切であるということを示していた。さらに, この波スペクトル形状は疲労荷重に関しても正確な結果をもたらす。このセクションでは背景にあるい

くつかの根拠を示す。

ここで解析される全方向のスペクトルデータは、25年間に及ぶ（1990年～2014年）北大西洋に位置する単一の点における波浪モデルERA5からのものである。

図6は、25年間の最大荷重に最も寄与している306個の T_{0m1} によって正規化された海象スペクトル形状（ $\sim H_s > 10m$ ）を示す。極限海象は極めて一定の形状をしており、無次元ピーク形状パラメータ $\gamma = 1.5$ のJONSWAPスペクトルによってよく表現されているようだ。この1.5の値は最小二乗法により得られた。また、適合している T_{0m1} 或いは T_p は T_z よりもはるかに良い結果をもたらす¹¹⁾。

H_s とともに増加する γ の若干の傾向が観察されたが、 H_s の関数として γ を設定することは船体応答全体の精度を大きくは改善しないことが分かった。従って、簡略化と実用化の観点から、 γ の値として一定値(1.5)を推奨する。

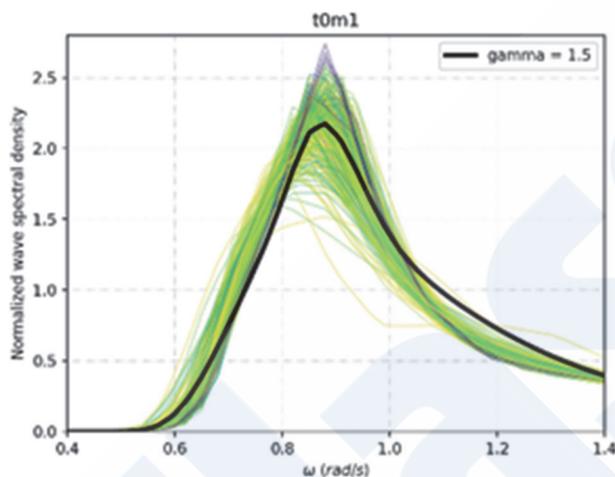


図6 25年の波浪追算データに基づく寄与スペクトル形状（ $H_s > 10m$ ）と選択されたパラメータ化スペクトル（JONSWAP, $\gamma = 1.5$ ）

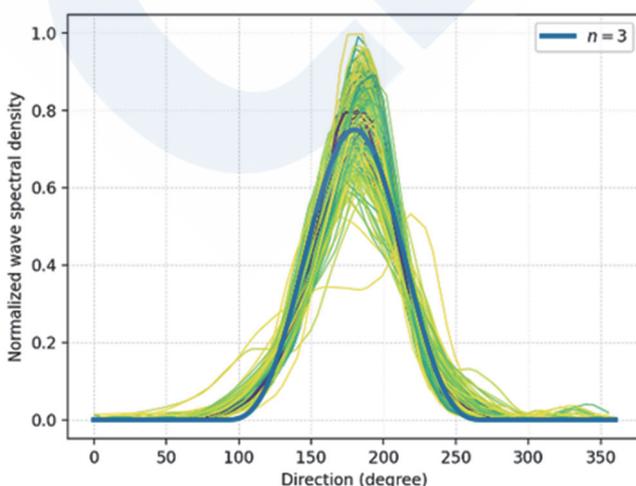


図7 方向性分布の関数としての寄与スペクトル形

状（ $H_s > 10m$ ）及びパラメータ化された方向性分布形状（ \cos^3 ）

同様に、図7は最大荷重に寄与する海象の方向性分布形状を示す。波浪頻度形状のように、方向性分布はさまざまな海象において非常に類似し、 $n=3$ の \cos^n 定式化により十分に近似される。

最後に、この単純なパラメータ化により引き起こされる精度の低下を評価するため、セクション2.3に紹介された船のRAOデータセット及び本セクションで紹介されたERA5方向性の波浪データセットを用いて検証を行った。25年最大値は全ての船体応答に関して以下のように計算される。

- ・ 全方向の波スペクトル（基準値）を用いる
 - ・ $\gamma = 1.0$ 及び $n=2$ （Rec. No. 34 rev1）を用いる
 - ・ $\gamma = 1.5$ 及び $n=3$ （Rec. No. 34 rev2）を用いる
- 最大荷重に関しては、Rec. No. 34 rev1の形状は、ベンチマークの全方向の波スペクトルの場合と比較すると、7%の二乗誤差となる。一方、Rec. No. 34 rev2のパラメータを用いるとその二乗誤差が、5%までに減少する。

疲労荷重（参考値として超過確率 10^{-2} における値を用いる）はスペクトル形状に対して感度が低い。同じ船のRAOデータセットを用いてベンチマークの場合と比較すると、Rec. No. 34 rev1とRec. No. 34 rev2はそれぞれ二乗誤差2.7%と3.2%を示す。これらの誤差はほぼ同等であり容認できる。

以上の結果はいくつかの場所で実施された類似の解析により裏付けされる¹¹⁾。

6. 運航プロフィール

Rec. No. 34 rev1は、異なる海象条件下において船がどのように運航されると仮定するか勧告が記載されている。船の波との出会角では均等確率が規定され、最大波浪荷重（強度評価）を評価する際は船速は0ノットと仮定する。

本セクションでは、セクション2に記述されているAISデータセットと波浪追算データセットとの組合せ結果を用いて、船速と波との出会角の確率分布を推定する。図1に示す北大西洋を航行する90mを超える全ての船種の商船が対象とされる。

船速及び波との出会角が有義波高との相関関係は複雑である。以下では、船速と波との出会角は別々に調査できると仮定する。

6.1 波との出会角

H_s の全範囲を含むAIS-IOWAGAデータを考慮に入れると、Rec. No. 34 rev1に仮定されているよう

に、波との出会角のプロファイルはほぼ均等確率(図8)であることが確認できる。従って、均等分布は疲労評価に完全に適合する。

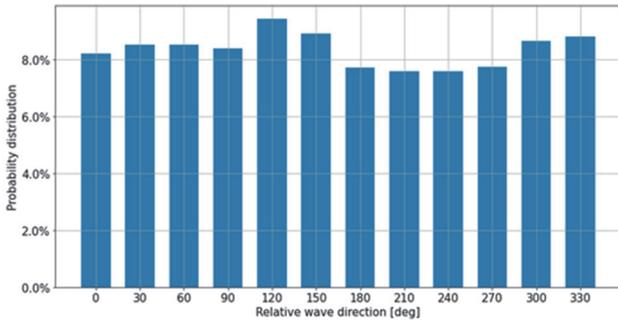


図8 波との出会角分布図, 全データ

しかしながら、極限海象のみに着目すると状況は異なる。すなわち、図9に示されるように横波の可能性は低い。この図は北大西洋のみのデータを示しているが、全球データを用いて確認しても北大西洋と同様の状況が得られている。以下に示す2つの要因がこの確認を説明できる。

- ・ 厳しい天候では、船長は横揺れ運動を制限して船の安定性を増すため横波を回避する。
- ・ 厳しい天候は、航路が主に東西の位置で、支配的な波向きが西からの場合が起こる。

上記要因の一つ目が主因であると考えられるが、図9に示されているデータからはこの2つの影響を区別することができない。どのような原因であったとしても、実際の影響は同じであり、船体応答のデータベースでその影響は評価される。

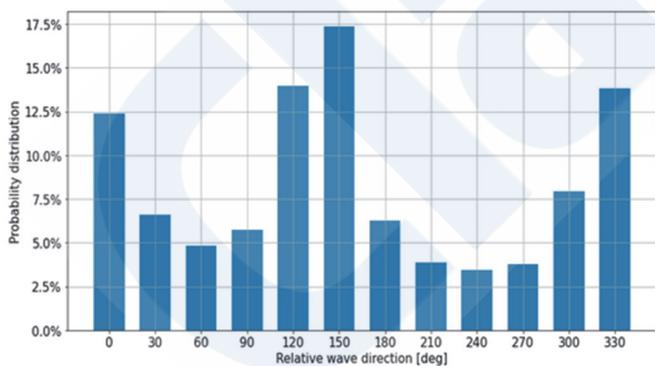


図9 波との出会角の分布図 ($H_s > 10m$)

図10は、波との出会角が均等確率であるとみなす最大応答と図9と同じ分布を有する最大応答との間における相対差を示す。簡素化のため、船速を定常の5 knotと仮定した。その影響はわずかであり、従って波との出会角を均等確率に維持することは、簡素化と正確さの間の良い妥協案であると思われる。

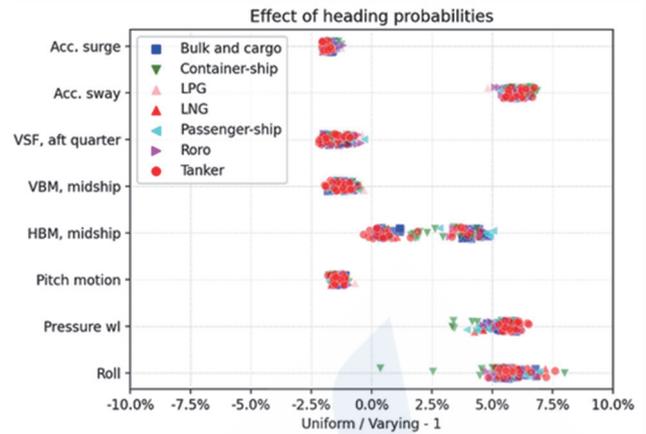


図10 波との出会角の分布に対する応答感度

6.2 船速

同様に、船速と波の出会角との関係が調査される。図11から、向波における船速は波高とともに著しく低下することが見られる。最も妥当と思われる2つの理由は以下のとおりである。

- ・ 船体運動を制限するための自主的な減速
- ・ 波浪中の造波抵抗に起因する意図しない船速低下

さらに詳しく調べると、船速の低下は波との出会角に大きく依存することは明らかである。各波との出会角における船速の低下を図12に示す。この図では、船速の低下は追波よりも向波のほうが大きいことは明らかである。

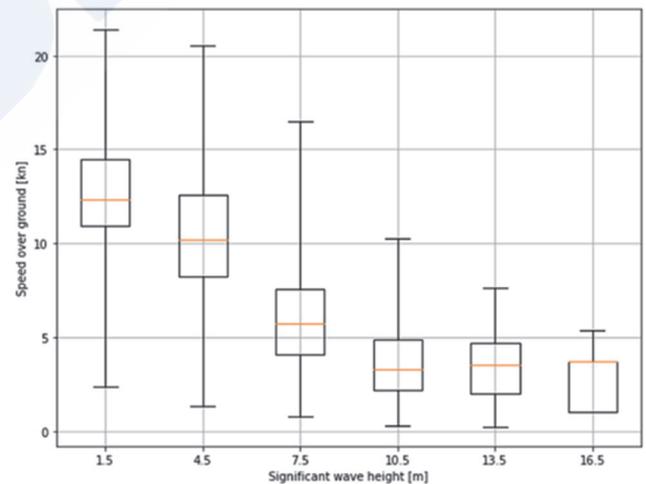


図11 向波における船速と波高の関係 (全ての船)

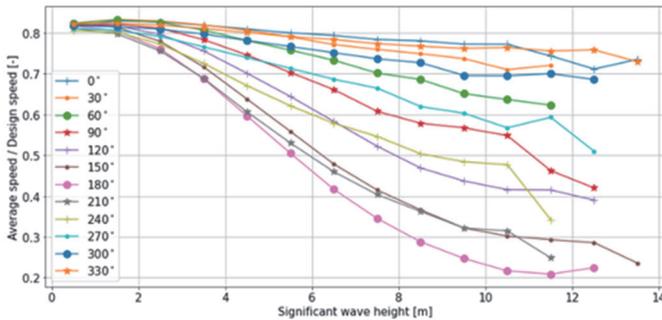


図12 H_s 及び波との出会角の関数としての平均船速 (0° : 追波, 180° : 向波)

船速に関する仮定について長期予測結果の感度を評価するため、図12のデータを使用してRAOデータセットを以下のように簡素化し、最大応答の長期予測を実施した。

- 0° , 30° 及び 330° に関して $0.75 V_s$
- 60° , 90° , 270° 及び 300° に関してFroude数 = 0.1
- 120° , 150° , 180° , 210° 及び 240° に関して5 knot

次に、上記の結果をばら積貨船及び油タンカーのための共通構造規則¹²⁾に従い船速を定常の5 knotと仮定した結果と比較する。波との出会角は両ケースとも均等確率であるとみなされる。

図13から、最大荷重について船速5 knotを仮定することは殆どの応答において影響は小さいことがわかる。しかしながら、横揺れ及び横揺れと関連ある船体応答（例えば喫水線における波浪変動圧）に関しては大きな相違が生じる可能性がある。これは、低いGMを有する船が高速で斜め追波中航行する時に横揺れが大きくなる可能性に関連する¹³⁾。これは適切であるが、我々の計算においては以下の3つの理由によりその相違が過大評価される。

- 船体応答のデータセットに使用されるGMは下限値（満載積付、構造寸法GM）である。しかしながら、船はより大きいGMで平均して運航する傾向にある。
- 船体応答のデータセットにおいては、横揺れ減衰力は線形（6%）であり、船速によって変わらない。実際には、高速航行時にリフト減衰ならびに二次効果は大きな横揺れ角を減衰させる。
- 大きな横揺れ角は、低いGMを有する船が斜め追波中航行する時に起こり得るという事実は知られており、このような条件を回避するための運行ガイダンスが提供されている¹³⁾。AISデータおよび波浪追算データから観測される船速/波との出会角/ H_s の統計データはGMデータを含まず、GMによる影響に関する説明がで

い。

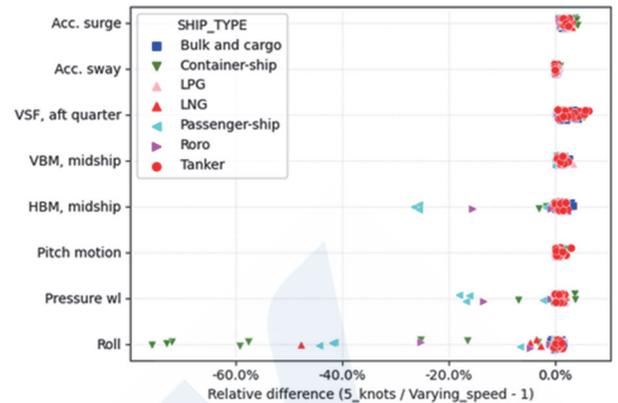


図13 5 knotの仮定の影響

前進速度及び低いGMを有し大きい横揺れがある船の結果を除去することにより、図14に示すとおり5 knotの仮定が許容できる。

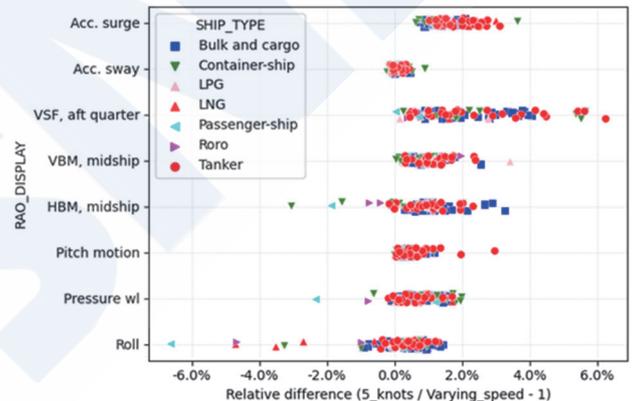


図14 斜め追波中の大きい横揺れを有する船を除く効果

低いGMを有し斜め追波状況において減速せずに航海する船に関して、数値シミュレーションにより横揺れに関連する応答を評価する際には、適切な船速と粘性減衰を適用する必要がある。さらに、これらの影響は個々の船級協会により横揺れ運動の規則算式の開発に考慮されると想定される。

6.3 運航プロファイルに関するまとめ

IACSのばら積貨船及び油タンカーのための共通構造規則（CSR）及びRec. No. 34 rev1に現在使用されている均一な波との出会角分布が確認され、Rec. No. 34 rev2にて継続使用が正当化される。

CSR規則により扱われる垂直せん断力及び垂直曲げモーメント、ならびに油タンカー及びばら積貨船の荷重全般に関して5 knotを使用することは概して保守的である。ばら積貨船及び油タンカーの横揺れに関しては、最大限1%の非保守性が観察される。従って、IACS UR S11とUR S11A における垂直せ

ん断力と垂直曲げモーメント並びにCSR規則における荷重全般の基準として、5 knotを使用することは許容され得るとみなされる。

7. 地理的領域及び荷重レベル

IACS Rec. No. 34は、船舶が運航する最も厳しい海域を代表する北大西洋ルートから得られた波浪データに基づいている。厳しい設計波浪環境を使用する基本的な考えは、船舶はその運航に関して地理的な制限を設ける必要があってはならない。

北大西洋を定義する厳密な多角形を決めることは議論の対象である。波浪の特性は全海域に渡り均一ではない。より厳しい天候の小さな海域を選ぶことは、多角形を拡大しあまり厳しくない海域を含めるよりも、より厳しい波浪頻度分布をもたらすであろう。海域選択の結果を理解するために波浪荷重レベルの評価が実施される。

さまざまな船種と主要目の船1,500隻に関して、2次元ストリップ解析が実施された。個船は30°間隔の波との出会角に関してゼロから全前進速度まで多数の船速で推定された。

本研究における全世界のフリートに関するAISデータは、最低1年間のデータを有し、長さが90m以上の商船に限定される。結果として得られた44,000隻の船は、船種、船長、船幅及び航海速度に関して上記1500隻の船に最も近い流体力学モデルと照合される。AISデータをIOWAGA波浪追算データと照合することにより、個船は既知の一連の波高、波周期、波との出会角及び船速を有することとなる。これは1年の再現期間ならびに超過確率 10^{-2} における船体中央横断面における垂直曲げモーメントの長期応答推定に使用される。

Rec. No. 34 rev2を用いて得られる25年設計モーメントにより正規化された実際の運航からの1年モーメントの間の比を図15に示す。また、 10^{-2} モーメントに関して、実際に遭遇する荷重とIACSのばら積貨船及び油タンカーのための共通構造規則(CSR)における疲労評価に用いられる設計荷重との比を図16に示す。

異なる2つの地理的領域（一つは最終的に選択される地理的領域よりもある程度小さい）が評価される。より小さく厳しい海域は25年最大設計波浪荷重を若干増加させ、25年設計値を超える船はより減少するであろう。疲労に関しては、小さい海域では設計値を超える船はおそらく無くなり、これは疲労荷重が過度に保守的になることを意味する。航行量の多いビスケー湾を含めた影響は検討されたが、

荷重に対して何も変化をもたらさず、最大荷重において概して±0.3%未満の影響であることが分かった。

異なる船種は同じ海象に必ずしも遭遇するとも限らないということも明らかになった。さまざまな船種に関して異なる波浪頻度分布を提供するオプションも検討されたが、実用的ではないと判断され、すぐに退けられた。一方、図15と図16からの知見は、この検討結果を考慮する部分安全率のさらなる開発の可能性を残している。

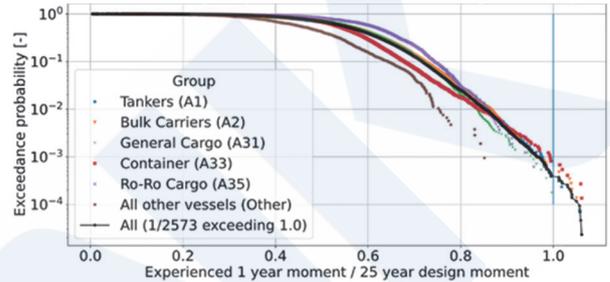


図15 25年最大設計モーメントの1年当たり超過確率

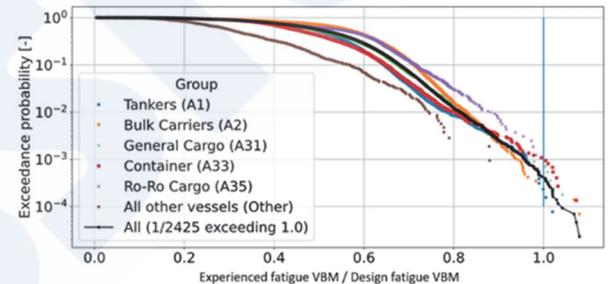


図16 10^{-2} 疲労設計モーメントの超過確率

この研究は、世界のフリートが経験する荷重レベルと比較した設計荷重レベルの初期の考えを提供するとともに、荷重と耐力両方を含む最終安全レベルがIACSにより基準化される際のインプット値として役割を果たすことができる。

8. 影響評価

Rec. No. 34 rev1からRec. No. 34 rev2への変更点を表5に要約する。最も顕著な変更点は、荷重が相対的に低くなる波浪頻度分布それ自体である。次に、より狭いスペクトル及び方向性分布がそれぞれ荷重を若干増加させる傾向にある。最後に最大値の新たな定義（再現期間（RP）= 25年対超過確率 $p = 10^{-8}$ ）により荷重がわずかに減少する。

表5 変更点のまとめ

	Rec. No. 34 rev1	Rec. No. 34 rev2
波浪頻度分布	目視観測	波浪追算
スペクトル	Pierson- Moskowitz	JONSWAP $\gamma = 1.5$
方向性分布	Cos^2	Cos^3
最大荷重の定義	$p = 10^{-8}$	RP=25年
波との出会角分布	均等	均等
疲労荷重の参考値	NA	$p = 10^{-2}$

これらの更新点を組み合わせた影響について、セクション2.3に示される船体応答のデータセットを用いて、最大荷重及び疲労荷重を評価した。

全ての船体応答についてRec. No. 34 rev1およびRec. No. 34 rev2両方における最大荷重の影響を図17に示す。船及び応答の種類によって、最大荷重は10%から30%減少される。この減少は短い特徴周期の応答に関して比較的大きく、殆どのばらつきは特徴周期のみで説明される。従って、新しい勧告は、最大荷重について短い船に対し減少が大きい。

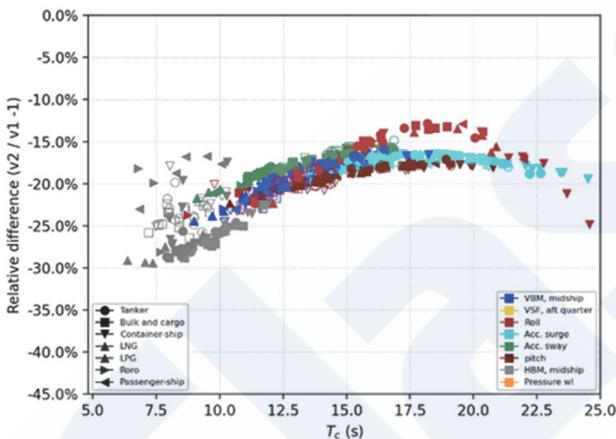


図17 最大荷重に関する影響

全ての船舶の応答においてRec. No. 34 rev1およびRec. No. 34 rev2両方に関して超過確率 $p = 10^{-2}$ で評価される疲労荷重の影響を図18に示す。Rec. No. 34 rev1と比較すると、疲労荷重は5%から50%の減少となり、平均的に著しく減少される。最大荷重に関しては、応答の特徴周期が殆どのばらつきを説明する。一方、ここでは長い応答（すなわち、長い船）について、疲労荷重の減少量が大きい。

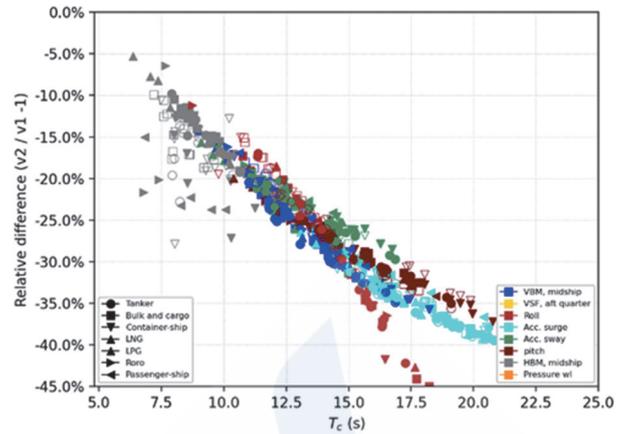


図18 疲労荷重に関する影響

9. 制約事項

本研究においてRec. No. 34の改良版に寄与するためにIACSにより使用される技術およびデータは、本論文作成時点においては最新であると考えられるが、既知の制約事項がある。これらの制約事項をここに取り出して強調する。

9.1 波浪モデル

IACS Rec. No. 34 rev2は数値波浪追算データに大きく依存する。このデータはブイのデータと衛星海面高度計との比較を通して検証されているが、ある程度の不確かさは残る。波浪モデリング研究は活発な学術分野であり、全球波浪モデルの精度は年々改良が続くと考えられる。

9.2 気候変動

IACSにより提案された改正波浪環境勧告は、現時点のスナップショットであり気候予測変動の影響を何ら含んでいない。作業グループは気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の作業を検討して、海上輸送に関連する影響について膨大な量の不確かさがあったことを見いだした。しかしながら、IPCCの予測による北大西洋の最大波高に関する変化の最高値が0.5m（正負いずれか）でさえも、導出手順のロバスト性があるため、IACS Rec. No. 34 rev2の波浪頻度分布に与える影響は無視できると考えられる。さらに、航行中の船舶は、新しい波浪頻度分布に含まれた荒天回避レベルで荒天を回避し続ける。実際には、IACS Rec. No. 34 rev2の波浪頻度分布はある程度の将来性を含んでいる。

9.3 悪天候回避

この研究に取り入れられている悪天候回避は、世界の海上輸送の現在の性能レベルを示すものである。デジタル化を目指す現在の業界の潮流の下で、ウェザールーティングサービスの技術的な品質、利用可能性及び普及が進んでいる。従って、新しい勧告は

時の経過とともにやや保守的なバイアスを含んでいると考えられ、これらの改良点はより確実になる。

9.4 統計データ

船舶の位置と一致させた気象データはわずか7年間に限られた。これは、膨大な数の船（約4,500隻／年）の位置が用いられたという事実、及びこの7年間後半の年は記録の中で最も厳しい悪天候の一つであったという事実により補完された。使用されたデータの量は、25年間の船体応答を正しく評価するためには十分であると考えられるが、非常に低い確率（すなわち、非常に長い再現期間）における船体応答を評価するため、提案された波浪頻度分布を使用する際にはこの制約に留意しなくてはならない。たとえそうであっても、新しい波浪頻度分布は、目視観測から導かれたRec. No. 34 rev1に対する非常に大きな改良であると考えられる。

最後に、波浪頻度分布を用いるこの業界標準の設計手法は、それ自体が一つの近似手法である。時系列データを $H_s - T_{0m1}$ 分類グループに分けることにより、海象の系列相関は失われ、過大評価バイアスを生じ得る¹⁴⁾。大型船舶に関してはVBMにおいて最大5%保守的である可能性がある。

10. おわりに

船舶位置データセットと組み合わせた最先端の波浪データソースを用いて、新しい波浪基準が定められる。波浪頻度分布は大幅に修正され、悪天候回避の影響が含まれる。さらに、波のスペクトル形状及び方向性分布形状はRec. No. 34 rev1より若干狭くなる。

波浪荷重の変化は均一ではなく、荷重の種類及び船種と船の寸法に依存する。従って、理論的には鋼材が個船またフリート全体にどのように配分されるかを最適化する。

Rec. No. 34は重要な資料ではあるが、規則開発に対するインプットとしての機能を果たす一部分に過ぎない。ここで観察される平均波浪荷重減少は、必ずしも構造寸法を直ちに減少させることにはならない。例えば、現在のコンテナ船に関するIACS UR S11Aは、Rec. No. 34 rev1が悪天候回避を正しく考慮していないという事実を修正するため、ルーティング係数を考慮している。従って、この係数はRec. No. 34 rev2を用いる際に調整されなくてはならない。

現在、IACS内でIACS UR S11, IACS UR S11A及びばら積貨船及び油タンカーのための共通構造規則¹²⁾などダウンストリームドキュメントを更新す

るための追加検討が進められている。

謝辞

ここに報告された研究作業は国際船級協会連合による支援を受けました。著者らは、日本海事協会の山本規雄博士、BVのQuentin DerbanneとMarine Lasbleis, DNVのDr. Eivind Ruth, Dr. Elzbieta Maria Bitner-GregersenとDr. Tormod R. Landet及びLRのDr. Zhenhong Wangによるこの研究作業に対する貢献に謝意を表します。

参考文献

- 1) Hogben, N: "Global Wave Statistics", British Maritime Technology, 1986.
- 2) Bitner-Gregersen, EM, Cramer, EH & Korbijn, F: "Environmental Description for Long-Term Load Response of Ship Structures", the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1995.
- 3) de Hauteclocque, G, Zhu, T, Johnson, M, Austefjord, H & Bitner-Gregersen, E: "Assessment of Global Wave Datasets for Long Term Response of Ships", OMAE2020, Volume 2A: Structures, Safety, and Reliability, 2020.
- 4) Arduin, F, Hanafin, J, Quilfen, Y, Chapron, B, Queffeulou, P & Obrebski, M: "Calibration of the IOWAGA Global Wave Hindcast (1991–2011) Using ECMWF and CFSR Winds", 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawaii, 2011.
- 5) Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, Horányi, A, Sabater, JMTN, Nicolas, J, Radu, R, Schepers, D, Simmons, A, Soci, C & Dee, D: "Global Reanalysis: Goodbye ERA-Interim, Hello ERA5", ECMWF Newsletter No. 159, pp. 17–24, 2019.
- 6) Eisinger, E, Bloch, H & Storhaug, G: "A Method for Describing Ocean Environments for Ship Assessment", Proc. 6th International Maritime Conference on Design for Safety, Hamburg, 2016.
- 7) Miratsu, R, Fukui, T, Matsumoto, T & Zhu, T: "Quantitative Evaluation of Ship Operational Effect in Actually Encountered

Sea States”, 2019.
<https://doi.org/10.1115/OMAE2019-95121>.

8) Miratsu, R, Fukui, T, Matsumoto, T & Zhu, T: 2020, “Study on Ship Operational Effect for Defining Design Values on Ship Motion and Loads in North Atlantic”, 2020.
<https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18193>.

9) Chen, XB: “Hydrodynamics in Offshore and Naval Applications - Part I”, Keynote lecture of 6th International Conference on Hydrodynamics, Perth, Australia, 2004.

10) de Hauteclocque, G, Monroy, C, Bigot, F & Derbanne, Q: “New Rules for Container-Ships - Simplified Formulae for Wave Loads.”, the Proceedings of 13th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS2016), Copenhagen,

Denmark, 2016.

11) de Hauteclocque, G & Lasbleis M: “Extreme Seastate Parametrization and Its Consequences on Ship Responses”, the Proceedings of 15th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS2022), Dubrovnik, Croatia, 2022.

12) IACS: “Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers”, 2014.

13) IMO: “Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions”, 2007.

14) Mackay, E, de Hauteclocque, G, Vanem, E & Jonathan, P: “The Effect of Serial Correlation in Environmental Conditions on Estimates of Extreme Events”, Ocean Engineering, Vol 242, 2021.

付録

		Mean wave period, T_{0m1} (s)														Sum			
		4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5		18.5	19.5	
Significant wave height, H_s (m)	0.5	6.82	202.00	333.61	187.76	45.59	4.74	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	780.73
	1.5	0.33	2028.35	12750.82	11693.39	7215.76	3006.80	846.07	160.77	20.63	1.79	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37724.81
	2.5	0.00	3.38	2805.81	8517.74	7835.85	5885.37	3608.30	1805.81	737.71	246.00	66.96	14.88	2.70	0.40	0.05	0.00	0.00	31530.96
	3.5	0.00	0.00	23.06	2742.51	4666.81	4100.83	2936.41	1713.38	814.68	315.65	99.66	25.64	5.38	0.92	0.13	0.01	0.00	17445.07
	4.5	0.00	0.00	0.00	82.06	1759.81	2069.19	1715.42	1151.29	625.51	275.12	97.96	28.24	6.59	1.24	0.19	0.02	0.00	7812.64
	5.5	0.00	0.00	0.00	0.08	149.74	811.81	791.81	609.66	375.67	185.26	73.12	23.09	5.84	1.18	0.19	0.02	0.00	3027.47
	6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	147.59	305.37	271.71	190.23	104.79	45.42	15.49	4.16	0.88	0.15	0.02	0.00	1086.83
	7.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.77	88.62	107.20	86.26	53.35	25.36	9.27	2.60	0.56	0.09	0.01	0.00	378.09
	8.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	9.40	38.70	36.80	25.95	13.63	5.33	1.55	0.34	0.05	0.01	0.00	131.78
	9.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	9.34	15.15	12.51	7.39	3.12	0.94	0.20	0.03	0.00	0.00	48.88
	10.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	5.73	5.96	4.08	1.90	0.60	0.13	0.02	0.00	0.00	19.23
	11.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	1.29	2.68	2.23	1.18	0.40	0.08	0.01	0.00	0.00	7.89
	12.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	1.01	1.14	0.72	0.27	0.06	0.01	0.00	0.00	3.32
	13.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.51	0.42	0.18	0.04	0.00	0.00	0.00	1.37
	14.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.19	0.21	0.12	0.03	0.00	0.00	0.00	0.57
	15.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.09	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.22
	16.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08
	17.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04
	18.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
Sum	7.15	2233.73	15913.30	23223.54	21674.58	16031.12	10301.81	5868.69	2909.77	1230.31	437.79	129.62	31.47	6.11	0.92	0.09	0.00	100000.00	

図19 Rec. No. 34 rev2 波浪頻度分布表