

実船モニタリングに向けた波浪情報の推定・活用

藤本 航*, 見良津 黎*, 石橋 公也*, 朱 庭耀*

1. はじめに

近年、船舶分野において実船モニタリング・デジタルツイン技術の開発が活発に行われている。例えば、推進性能分野においては、海事クラスター共同研究として「実海域実船性能評価プロジェクト(OCTARVIA)」が実施されており¹⁾、この中で船舶が遭遇する気象・海象を把握することが必要不可欠とされている²⁾。また、構造分野においても船体構造デジタルツインの研究が進められており、遭遇海象の推定についても高い関心が寄せられている³⁾。2022年3月に開催された日本船舶海洋工学会関西支部/KFR・KSSG共催シンポジウム「実船モニタリングの最前線」においては、両分野のモニタリング技術においても、波浪情報の推定・利用が共通項であり、多様な波浪情報があることが認識された⁴⁾。そして、波浪情報を安全かつ高度に活用していくには、それぞれの長所と注意点を踏まえて活用していく必要がある。

本会は業界の研究開発を促進すべく、各種モニタリング・デジタルツインプロジェクトに参画し、波浪データ解析も実施してきた。こうした取り組みの中で、各種アプリケーションに対する波浪データの要件について一定の知見を得た。

本稿においては、船舶構造デジタルツイン等も含む意味で「実船モニタリング」と総称し、実船モニタリングに対する波浪データの活用について検討する。まず初めに、一般に普及している観測機器や解析手法を概説した後、主要な波浪情報の特徴を俯瞰的に比較しつつ、実船モニタリングへの活用に対する適合性について考察する。

2. 船上観測値：レーダーを中心として

船体周辺の広い波浪場を観測する機器として、レーダーが有力であり、近年注目を集めている。ただし、波の山に隠れて直接観測できない範囲が多いため、その範囲を何らかの手法で補間する必要がある。以降、レーダーの観測原理と、種類、特徴や注意点について概要を説明する。

2.1 レーダーの原理

マイクロ波は、表面張力波の波長と近いため、Bragg共鳴散乱という機構によって、マイクロ波の照射方向と反対側に強く散乱する(図1)。そのため、レーダーで波浪を観測できるのは、表面張力波が生じるほどに風速がある場合に限られる。なお、表面張力波とはその名の通り表面張力を復元力として生じるさざ波である。

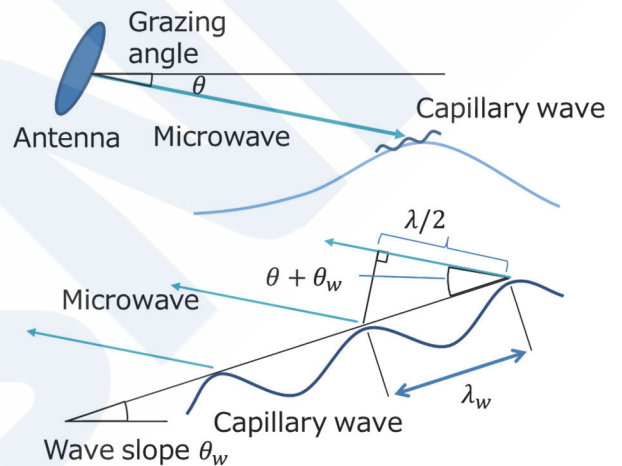


図1 マイクロ波レーダーによる波浪観測の概念図(上)アンテナと海洋波の配置(下)表面張力波のスケールでの拡大図。 $\lambda/2 = \lambda_w \cos(\theta + \theta_w)$ の時に、Bragg共鳴散乱によってアンテナ側にマイクロ波が強く反射される。

レーダー反射断面積は、下記のようなメカニズムによって変化する⁵⁾。

① Shadowing modulation

レーダーから見て、波の山の反対側が隠される効果(図2)。船用レーダーの設置高さは数十m程度である一方、Xバンドレーダーの観測半径は数km程度であり、レーダーから離れたエリアほどShadowingが支配的になる。波浪予測では可能な限り遠くの観測値を用いる必要があるため、Shadowing modulationは重要である。

② Tilt modulation

波面の傾きによって、レーダー反射が変化する効果(図2)。レーダーから離れるほど、波の山

* 技術研究所

のみが観測されるようになり、そこでは波面の傾きが小さくなり、tilt modulationは弱くなる。レーダーから近い範囲はtilt modulationが強いものの、反射が強すぎるために観測範囲から除くことも多い。

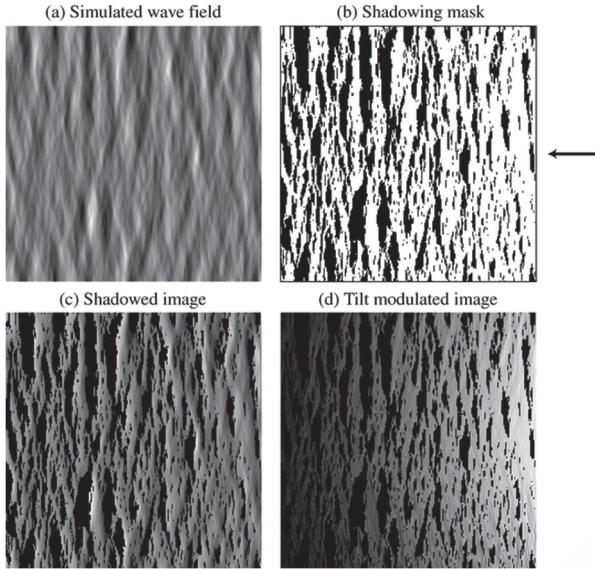


図2 Shadowing modulation, tilt modulationのイメージ図⁵⁾。© American Meteorological Society. Used with permission.

レーダーは直接波形を計測しているわけではなく、あくまで反射断面積を計測している点に注意が必要である。レーダー反射から波浪スペクトルを推定する標準的な手法⁵⁾においては、

- ① レーダー反射の時空間データ $\rho(x,t)$ を得て、その長方形の領域を抽出する (図3 (a), (b))。3D FFT (Fast Fourier Transformation) を施し、 (k, ω) の画像スペクトルを得る (図3 (c))。ここ

で、 $\mathbf{x} = (x, y)$ は水平空間座標、 t は時刻、 $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ は水平方向の波数、 ω は角周波数である。

- ② (\mathbf{k}, ω) の画像スペクトルから、線形分散関係に適合する成分のみをバンドパスフィルターする (図3 (d))。ここで流速や船速によるドップラー効果を加味した線形分散関係を用いる。フィルターアウトされた成分はノイズと見なす。
- ③ Shadowing modulationを考慮するために、MTF (Modulation Transfer Function) $M(k)$ を導入する。経験的に、 $M(k)$ はべき乗則に従うことが知られており、 $M(k) = k^{-q}$ として指数 q は他の観測値 (ブイなど) との比較によってチューニングする (図3 (e))黒線はレーダー、赤点線はブイ)。ここで、 $k = |\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ である。
- ④ MTFを用いて画像スペクトルからshadowingの効果を補正し、逆3D FFTをすることで、波面を推定する (図3 (f))。
- ⑤ 有義波高については、ブイとの比較で推定する。すなわち、②でバンドパスフィルターしたシグナルに対し、それ以外をノイズとして扱い、シグナルノイズ比 (Signal Noise Ratio, SNR) とブイで計測した波高を比較して回帰式を作成し、以後は回帰式に基づいて波高を推定する。

精度の良い波浪観測のためには、ブイなどの他の観測機器を用いたレーダーのキャリブレーションが非常に重要である⁷⁾。沿岸に固定された波浪レーダーであれば、気候条件が限られ、ブイなどの観測機器も設置しやすいため、キャリブレーションを比較的行いやすい。一方、外洋を航海する船舶では、気候条件は大きく変化し、参照する別の観測機器を用意するのが難しいケースがある。

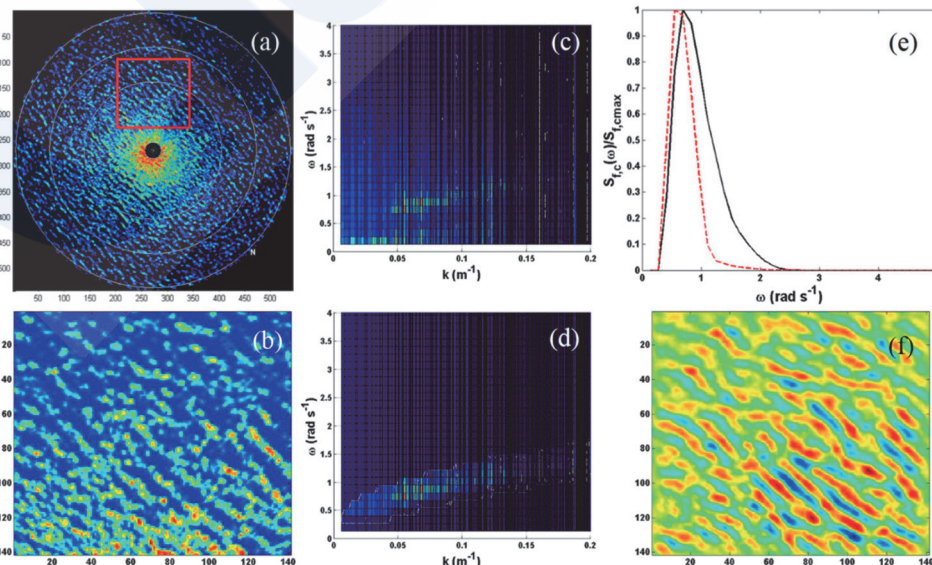


図3 レーダー反射画像の解析のイメージ図⁶⁾。© American Meteorological Society. Used with permission.

2.2 レーダーの種類

レーダーはマイクロ波の波長によって種類があり、主にXバンド（8-12GHz）およびSバンド（2-4GHz）が船用レーダーに用いられている。

Xバンドは表面張力波の波長に近く、散乱の強度、すなわちレーダー反射断面積（Radar Cross Section, RCS）が強いため、空間解像度がSバンドよりも細かい。ただし、降雨時に雨粒によってマイクロ波が散乱され、観測精度が落ちやすいという短所もある。Sバンドも用いられるが、波長がより長いために、解像度がXバンドと比較すると粗い。一方で、波長が長い場合降雨時にも観測精度が下がりにくいという長所もある。

Cheng and Chien (2017)⁸⁾では台湾沿岸に設置したXバンドレーダーとSバンドレーダーの比較をしており、空間解像度の違いや、降雨影響の違いについて分かりやすく図示されている。

セクション2.1の記述は、ノンコヒーレントレーダーという、レーダーから発射する送信波の位相を制御しない形式のレーダーに関する記述である。位相を制御するコヒーレントレーダーというタイプでは、水面上の粒子速度をドップラー効果によって測定する⁷⁾。このタイプをドップラーレーダーとも呼ぶ場合があり⁹⁾、日本船舶海洋工学会誌においてもドップラーレーダーの解説がある¹⁰⁾。

2.3 その他の船上観測値：船用波高計

船上で波浪を計測する機器として、船用波高計も普及している。船用波高計は、主に船首部に設置して、マイクロ波などにより直下の海面とセンサとの間の変動距離（相対水位）を直接計測する¹¹⁾。静水面からの水位（絶対水位）を求めるには、船首部に設置される加速度計などによって求められる船体上下動を、相対水位から差し引く方法がある。波高の信頼性は比較的高い一方、点での波高時系列のみ得られ、波向は計測できない。

3. 波浪モデル

波浪モデルは、全球を網羅した波浪の推定を行うことができ、公的な気象機関や、民間気象会社が波浪モデルデータを提供している。用途としては、船舶に対してはウェザールーティング、固定されている海洋構造物に対しては特定海域における波浪推算のために活発に用いられている。ここでは、波浪モデルが何を解いているのかという原理と、実船モニタリングへの活用に関する観点から注意点を述べる。

3.1 基礎方程式

現在広く使われている波浪モデルでは、波作用

$N \equiv S(k, \theta)/\sigma$ と呼ばれる保存量に関する時間発達方程式（波作用保存則）を解き、波パワースペクトル $S(k, \theta)$ を得る^{12) 13)}。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial y} \dot{y}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S_{force}}{\sigma} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= c_g \cos \theta + U_x \\ \dot{y} &= c_g \sin \theta + U_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{k} &= -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \\ \dot{\theta} &= -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma^2 = gk \tanh kd$ は成分波の角周波数、 g は重力加速度、 $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ は成分波の波数、 d は水深である。ここで、 $k = |\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ である。 $c_g \equiv \partial \sigma / \partial k$ は群速度、 $\mathbf{U} = (U_x, U_y)$ は海流などによる流速を表している。 σ は海流や潮流などによる流速 \mathbf{U} に沿って移動する座標系での角周波数であることに注意する。さらに、 θ は成分波の波向を表し、 s および m は θ 方向に平行・直角な座標系である。 S_{force} はソースタームと呼ばれる外力項である（後述）。上記の座標系を図4に示した。

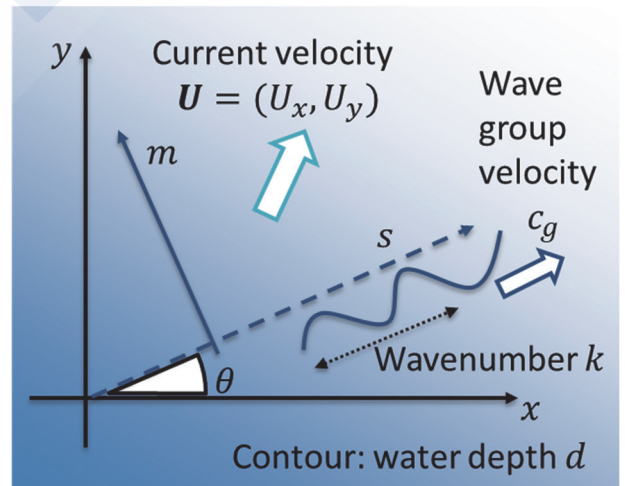


図4 波浪モデルで考える座標系。

まず、式(1)の意味を考察する。 $\frac{\partial}{\partial x} \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial y} \dot{y}N$ は空間方向に関する移流項であり、ナビエ・ストークス方程式の移流項と同様である。式(2)を見てわかるように、波作用 N が移流する速度は、波のエネルギーが伝搬する群速度 c_g と海流・潮流などによる流速 \mathbf{U} による。

波作用方程式の場合は、さらに、スペクトル空間 (k, θ) に関する微分項 $\frac{\partial}{\partial k} kN + \frac{\partial}{\partial \theta} \theta N$ が現れる。この中で、 $\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s}$ や $\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m}$ という水深 d について波方向 θ に平行・直角な座標系 (s, m) の微分が含まれる。これは波の海底地形による回折・屈折を表している。沿岸では地形による回折・屈折の影響が大きいため、水深 d に関する微分項の精度を高める必要があり、空間解像度を上げる必要がある。

さらに、 $\frac{\partial U}{\partial s}$ や $\frac{\partial U}{\partial m}$ という項が現れるが、これは流速 U の波方向 θ から見た速度勾配を表している。この項によって、流速 U による波の屈折を表現する。

有義波高・平均波周期・平均波向などの波浪パラメータは、波浪スペクトル $S(k, \theta)$ を積分することで得られる。気象機関・気象会社によっては、風浪・うねりに対応する複数のスペクトルピークを分解したような波浪パラメータも提供している。波浪スペクトルそのものは、積分された波浪パラメータよりもデータ量が非常に大きくなるので、気象機関・気象会社から提供されない場合もある。

3.2 ソースターム

ソースタームと呼ばれる外力項 S_{force} には、主に以下の項が含まれる。

$$S_{force} = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} + \dots$$

S_{in} は風による波浪の発達を示す。波浪モデルを駆動するには各種気象機関が公開する風速データや、ダウンスケールした気象モデルで独自に計算した風速の推定値を用いる。例えば、気象庁・アメリカ海洋大気庁 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)・ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) が、風速の推定値を公開している。風速の精度はダイレクトに波浪モデルの精度に影響するので、波浪モデルを走らせる前に風速の精度を検証する必要がある。

S_{ds} は砕波 (白波など) による波エネルギーの散逸を表す。波浪場へのエネルギーの流入・散逸を示す S_{in} および S_{ds} は有義波高の推定において重要である。

S_{nl} は、成分波同士の非線形相互作用を表す¹⁴⁾。線形波であれば成分波のエネルギーは常に一定であり、波スペクトルは不変であるが、非線形性により成分波がエネルギーを交換し合って波スペクトルが変化する。この項は波スペクトルの形状に大きく関わっている。

これ以外にも、波浪と海底の摩擦や、波浪と海氷の相互作用を S_{force} に組み込むなどして、様々な物

理過程を波浪モデルで考慮できる。

3.3 波浪モデルのプログラム

現在波浪予報に主に用いられている波浪モデルは、第三世代波浪モデルと呼ばれ、セクション3.1や3.2に示したような、詳細な物理過程をスペクトル空間で明示的に解く。主要な第三世代波浪モデルのプログラムを紹介する。

WAM (WAve Modeling) は、欧州を中心に世界の波浪研究者を集めた WAMDI グループ (The Wave Model Development and Implementation Group) によって開発された、最初の第三世代波浪モデルである^{15) 16)}。ECMWFはECWAMと呼ばれるWAMから派生した内部モデルを開発している¹⁷⁾。

WAVEWATCH III¹⁸⁾はNOAAを中心に開発されている。オープンソースであるため、大学や研究機関によって積極的に改良が続けられている。

デルフト工科大学によって開発されたSWAN (Simulating WAVes Nearshore)¹⁹⁾は、当初から沿岸域の波浪を解析することを主目的にしており、現在も沿岸域や高潮の予測を中心に用いられている。こちらもオープンソースである。

気象機関・気象会社によっては、独自モデルを開発している。気象庁で運用されている波浪モデルは、気象研究所で開発されたMRI-IIIである²⁰⁾。

3.4 時間軸による違い

大気循環はカオスとしての性質を持っており、初期値鋭敏性により、初期値に誤差があると予報値の誤差も指数関数的に増大していく。例えば、中緯度の低気圧などの気象擾乱の誤差は、2~3日程度で倍になり、10日程度で誤差が最大になる²¹⁾。つまり10日程度が中緯度における気象の予報限界と考えられる。

中緯度帯での気象の予報限界は、波浪予報にとっても重要である。なぜなら、強い温帯低気圧によって波高が高くなる場合があり、台風などの熱帯低気圧の経路も中緯度の気圧配置や偏西風の位置に依存するためである。風によって駆動される波浪予報も、気象の予報限界に制限され、その予報限界は (目安として) 10日程度以下であると考えられる。

実船モニタリングにおいて波浪予報値を使う際、予報期間は10日程度に抑える必要がある。予報限界内において、気象と波浪の予報値の不確実性を考慮するためのデータとして、アンサンブル予報がある。これは、微小な摂動を与えた初期値を数十個程度生成し、それに基づいて大気・波浪モデルを計算するものである。台風の予測、治水や農業に関連した季節予報などにアンサンブル予報が活用されており²²⁾、実船モニタリングへの活用も今後考えられる。

気象庁・NOAA・ECMWFなどの気象機関も波浪のアンサンブル予報を提供している。図5に、ある欧州沿岸の航路を例としてECMWFの波浪アンサンブル予報ENS-WAM²³⁾のデータを可視化した。2021-11-22を初期値とし、4日間の予報を表示している。各アンサンブル (N=50) は色分けされている。予報期間が長くなるほど有義波高などの波浪パラメータのバラつきが大きくなるのがわかる。アンサンブル予報の注意点としては、アンサンブル数が多い分、一個の予報値のみ出す決定論的予報よりも粗い空間解像度で計算されているケースが多い点である。

気象モデルの予報精度を保つには、カオスである大気の状態を気象モデルに反映させ続ける必要がある。そのため、データ同化によって、定期的に観測値をモデルに反映させる²¹⁾。データ同化と時間軸によって気象・波浪モデルの推算値には3種類ある²⁴⁾。第一に実況推定値 (nowcast) であり、数値モデルによる推算値の初期時刻を、観測値によりデータ同化した値である。第二に、予測値 (forecast) であり、実況推定値を元に、その時刻よりも将来を推算した値である。第三に、追算値 (hindcast) であり、解析期間全体にわたって確定した観測値を用い、過去の気象・海象を推算した値である。データ同化できるデータ量は追算値>実況推定値>予測値の順に多くなるため、一般的な傾向として、精度もこの順で良くなる。

過去の船舶の状態を知りたい場合など、リアルタイム性が要求されない場合は追算値の利用が推奨される。また、前述の予報期間の限界を超えた場合に対し、船舶の安全性などを評価するには、波浪追算値を長期間 (数十年程度) 取得し、それを統計解析することが望ましい。

波浪追算値には主に2パターンある。①風速場だけ気象の追算値を使い、波浪はデータ同化しないパターン。②波浪も衛星海面高度計データやブイデータなどを使ってデータ同化するパターン。例えば、本会鋼船規則C編の2022年全面改正にあたり、IOWAGA²⁵⁾とERA5²⁶⁾という波浪追算データを用いている²⁷⁾。IOWAGAは①にあたり、フランス海洋開発研究所 (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, IFREMER) によって、NOAAの風プロダクトCFRSRによりWAVEWATCH IIIを駆動し、海面高度計データやブイデータによってキャリブレーションしている。ERA5は②にあたり、ECMWFによってECWAMを駆動し、衛星海面高度計とのデータ同化によって解析値を得ている²⁸⁾。

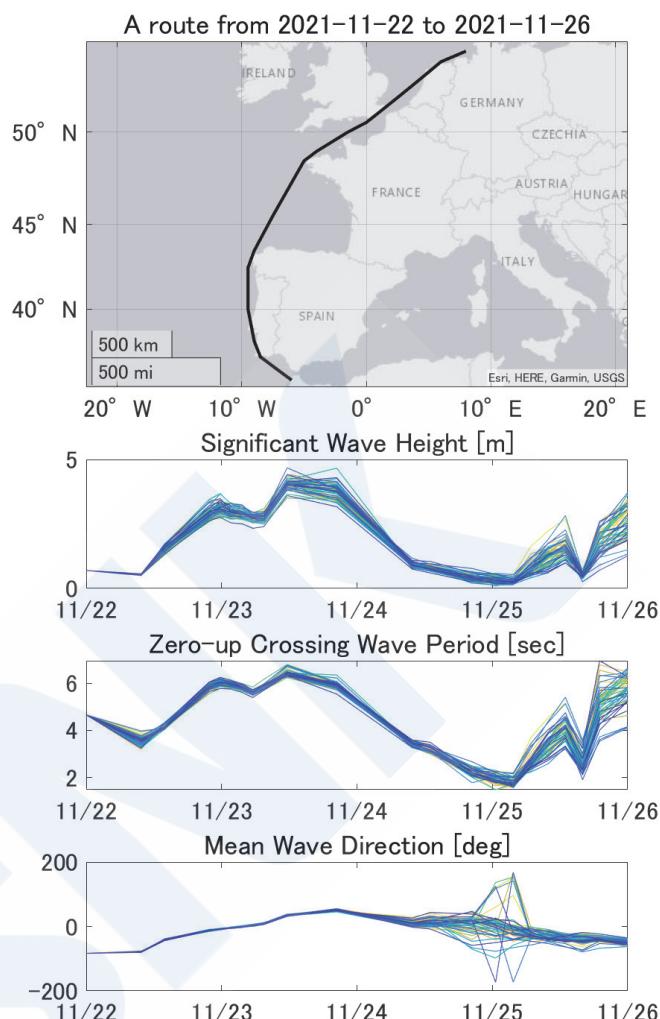


図5 ある欧州沿岸の航路を例としてECMWFの波浪アンサンブル予報ENS-WAM²³⁾のデータを可視化した例。

3.5 波浪モデルの課題

数千キロメートル以上の遠方から到達するうねりの分散関係や散逸などを正確に考慮することには未だに課題がある²⁹⁾。例えば、ブイと波浪モデルを比較したところ、うねりの到達時間には数十時間誤差があるケースが報告されている³⁰⁾。衛星海面高度計などによってうねりをデータ同化することは可能だが、全てのうねりを捕捉することは難しい²⁹⁾。

前述の通り (セクション3.1)、流速 U は波浪を移流させたり、屈折させたりする効果がある。世界には強い海流がいくつか存在しており、代表的なものとしてはメキシコ湾流・黒潮・アガラス海流などがある。海流に含まれる10-100kmスケールの渦によって波高が影響されるという指摘もある³¹⁾。波浪モデルに海流の影響があるかどうか、計測値などと比較検証することが推奨される (注: 前述のIOWAGAやERA5については、北大西洋においてブイ計測値と良好な一致を示すことを確認している³²⁾⁻³⁴⁾)。気象庁気象研究所では、日本近海の波浪モデルの予報値を、海流の予報値で修正する式を考案

しており³⁵⁾、気象庁の波浪予報図には海流の影響を受ける海域が図示されている³⁶⁾。

船舶の燃費向上のために、海流に沿って船舶が航行する場合がある。そういった場合に、船舶の燃費性能を把握するには、海流の位置精度、また海流による波浪への影響を確認することが望ましい。

4. 検証用観測値

波浪モデルやレーダーなどは、ブイや衛星海面高度計など船上以外での観測データで検証、またはキャリブレーションされていることが多い。本稿は船舶への波浪データの活用がテーマであるが、背景知識として、船上以外の検証用観測値についても紹介する。

4.1 ブイ

ブイは最も基本的かつ信頼度の高い波浪観測データとされる。ブイはz方向の変位を計測することにより、波高や周波数スペクトルを推定可能である。x, y, z方向変位・波傾斜などのデータを観測できれば、最大エントロピー法³⁷⁾などにより2次元の周波数・方向の波浪スペクトルも推定可能である。

日本においては、国土交通省港湾局などによって運営されている波浪情報観測網NOWPHAS³⁸⁾に、GPS波浪計のデータも集約されている。このGPS波浪計はGPSによって数cmの精度でブイの位置を測定しており、海岸から約10~20km、水深100~400mの海域で、一点係留で設置されている³⁹⁾。大型のブイであり、直径5~7m、全高10~19mとなっている。東北沿岸、東海から九州にかけての沿岸に18基設置されている。

他にも、NOAAが太平洋・大西洋にブイを展開し、情報を公開しているほか⁴⁰⁾、欧州についてはCMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) がウェブ上でデータを公開している⁴¹⁾。

近年ではより小型のブイが登場している。例えば、米Sofar Ocean社は直径42cm、重さ7.5kgほどのSpotterと呼ばれる小型ブイを開発している⁴²⁾。彼らはこのブイを2019年から展開し、現在では全球をカバーするほどの観測ネットワークになっている(図6)。彼らはこれらのブイを使って、波高だけでなく波周期や波向もデータ同化し、うねりの予測精度を向上することを試みている⁴³⁾。他にも、多くの種類の小型ブイがあり、詳細な解説記事がある⁴⁴⁾。

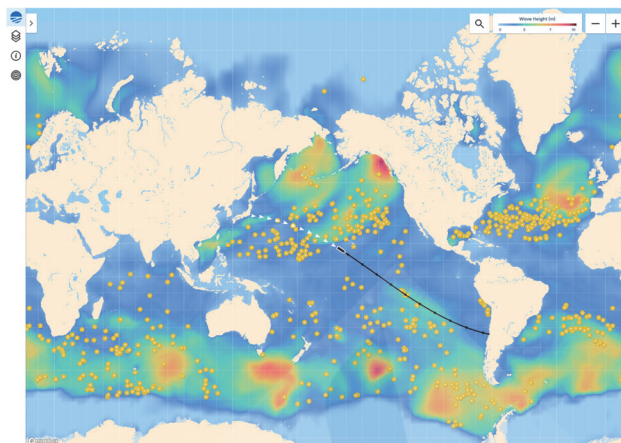


図6 米Sofar Ocean社の2022年7月現在でのブイ展開図⁴⁵⁾ (黄点：ブイ，コンター：波高の実況値)。

4.2 衛星海面高度計

衛星海面高度計は、マイクロ波を海面に射出し、反射した電波を受信して伝達時間を計測することで、有義波高を計測できる(論文⁴⁶⁾のセクション3.3.1)。波浪モデルの精度検証・キャリブレーション・データ同化などに用いられている。

衛星海面高度計全球を周回し、その軌跡は毛糸玉のようになっており(例：図7)、10~35日程度で元の位置に戻る。現在では複数の衛星海面高度計が運用されており、同時にカバーできる範囲は広がっている。しかし、あくまでデータは移動する点のように得られ、全球で面的に密にデータが得られるわけではない。全球の波浪を面的に把握するには波浪モデルが必要である。

衛星海面高度計のデータをブイとキャリブレーションし、複数の衛星の30年以上の観測データを結合したデータセットも登場している^{47) 48)}。

最近では、合成開口レーダー(SAR, Synthetic Aperture Radar)を用いて波浪スペクトルを推定する衛星もある。このタイプの衛星については⁴⁶⁾が詳しく記述している。

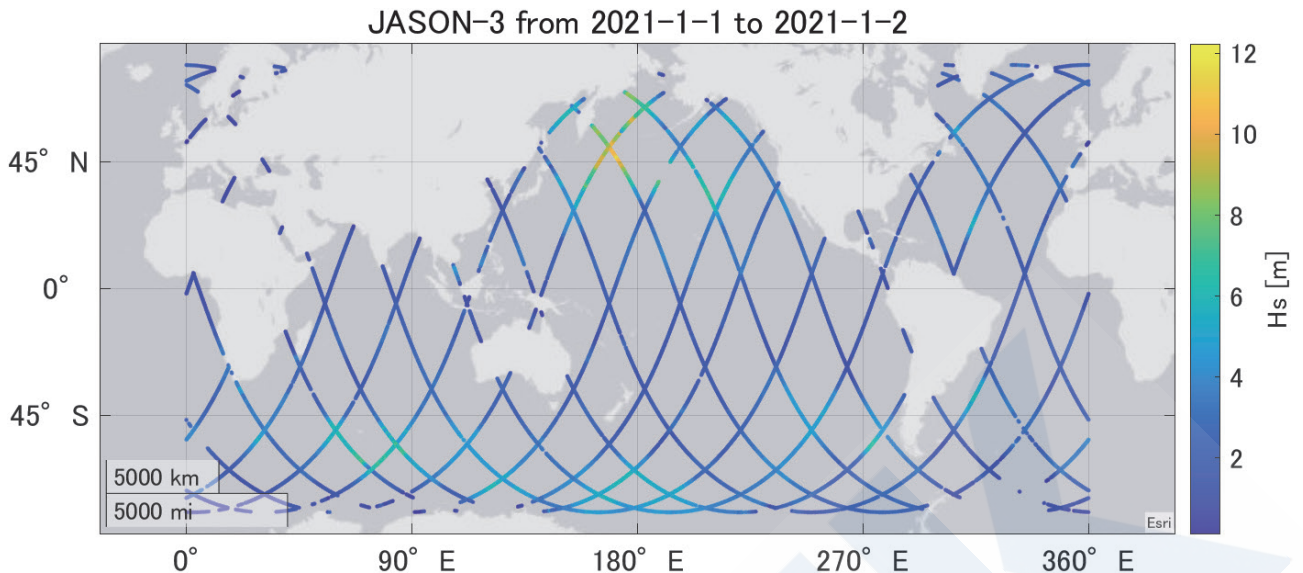


図7 衛星JASON-3のある1日における軌道と観測された有義波高の例。Ribal & Young(2019)のキャリブレーション済みデータ⁴⁷⁾を使用。

5. 考察：各種実船モニタリングへの応用

船体構造デジタルツインや実海域性能モニタリングなどにおいて、船体運動・応力・波浪中抵抗増加などの各種応答を求めている。そのための基本的な手法は、線形周波数領域で求めたRAO (**R**esponse **A**mplitude **O**perator) に波浪スペクトルを掛け合わせるという順解析の手法であり、いわゆる応答の短期予測である。応力などの応答の計測値を反映するデータ同化・キャリブレーションを用いた手法もあるものの、順解析の手法は応答計測値を必要としないという意味で、単純で解析コストが低い。以下では、順解析の手法を想定して、各種実船モニタリングを実現するための、波浪データの要件を考察する。

まず得られる波浪パラメータが重要である。特に、波高・波周期・波向は、ありとあらゆる船体応答(運動・応力・波浪中抵抗増加等)に対して必須のデータである。波浪モデルやレーダーから得られる波浪スペクトルの有用性について考える。RAOがなだらかな形状をしている場合、応答の波浪スペクトル形状への依存性は小さい。逆に、RAOのピークが鋭い形状をしている場合、応答の波浪スペクトル形状への依存性は大きいと考えられる。例えば、横揺れ(Roll)については、RAOのピークが鋭いケースが多く、ピークはGMや船速に応じて敏感に変化する。RAOのピークが鋭い応答を短期予測するためには、波浪スペクトルデータの活用が有効である可能性があるが、今後の検討が必要である。

次に、時間的な範囲である。疲労評価や、燃費性能評価などでは、リアルタイム性が要求されず、事

後解析で十分な場合がある。そのようなケースでは、多くの観測値でデータ同化されていて一般的に実況値より精度が良いとされる追算値が適している。波浪レーダーなどの船上観測データは、当然過去から現在までのデータしか得られない。将来の応答を予測したい場合、波浪モデルによる予報値が必要である。予報限界内(10日程度)における予報の不確実性はアンサンブル予報で評価すれば、予報値の不確実性に由来する応答の不確実性も評価することが可能と考えられる。

最後に、空間的な範囲である。波浪モデルは、ほぼすべての海域をカバーでき、船位における波浪データを抽出可能である。船上観測データは、船同士で融通しない限り、船位における波浪のみを観測する。

こういった要件を元に、どの波浪データがどのような種類の実船モニタリングに適しているかを、大まかに整理したのが、表1である。

表1 各種実船モニタリングに向けた波浪データの適合性（○は適用可能，△は場合により適用可能，×は適用不可を表す）

カテゴリ	データの種類の	データの性質				
		推定可能パラメータ			カバー範囲	
		波高	波周期・波向	波浪スペクトル	時間	空間
波浪モデル	追算値	○ 観測値とデータ同化済	○	○	過去	○ ほぼ全海域・船位でも取得可 ただし、沿岸に近い場合は高解像度な波浪モデルが必要
	実況値	○	○	○	現在	
	決定論的予報値	○	○	○	未来	
	アンサンブル予報値	○ ただし決定論的予報値より空間解像度が粗いケースが多い			未来（予報値の不確実性を考慮）	
船上観測値	波浪レーダー	○ 降雨やキャリブレーションに注意	○	○	現在	○ 船上観測
	船用波高計	○	× 波向は不可	×		
検証用観測値	衛星海面高度計	○	△ 最近では波浪スペクトルを推定する衛星も一部ある ⁴⁶⁾		過去・現在	全球をカバーデータの空間密度は低い
	ブイ	○	○ 3自由度以上の計測データが必要			

カテゴリ	データの種類の	応用先				
		過去		現在	将来	
		疲労評価（応力）	燃費性能評価（波浪中抵抗増加）	船体運動・応力 波浪中抵抗増加		
波浪モデル	追算値	○ リアルタイム性を要求されないのであれば、一般的に精度が良い追算値が適する			/	/
	実況値	○	○	○		
	決定論的予報値	/	/	/	○	
	アンサンブル予報値	/	/	/	○	
船上観測値	波浪レーダー	○	○	○	/	/
	船用波高計	△ 波高のみ計測するため、他のデータと組み合わせる必要がある			/	/

6. おわりに

本稿では、盛んに研究開発がなされている実船モニタリング技術への応用に向け、各種波浪データの概要等を紹介し、比較した。波浪の推定に関する技術は多岐にわたり、日進月歩で進んでいる。本稿では紙面が限られているため、一般的に普及している観測機器や解析手法のみを解説した。また、本稿は各技術の概要を簡単に紹介しているが、詳細については、参考文献を参照されたい。

さらに波浪分野について調査されたい読者に向け、いくつか教科書を紹介する。

- ① 『海洋波の物理』光易恒 著⁵⁰⁾
初学者に適した本であり、波浪の統計・信号処理、波浪の生成・発達過程、ブイによる観測などについて本質を平易に書かれている。絶版であるため入手が難しい。
- ② 『波浪の解析と予報』磯崎一郎・鈴木靖 著⁵¹⁾
海洋波の基礎から、観測、海上風、波浪モデルについて網羅されている。特に日本近海での波浪モデルの運用について詳しく書かれている。
- ③ 『The Interaction of Ocean Waves and Wind』, Peter Janssen著⁵²⁾
ECMWFの波浪専門家によって書かれた、波浪モデルについてより詳しく説明された教科書。
- ④ 『Ocean Wave Dynamics』, Ian Young and Alexander Babanin編⁵³⁾
2019年出版と最近の研究成果まで網羅された、大学院生・研究者向けの教科書。波浪モデル、衛星観測、非線形波など各分野の専門家によってオムニバスのように書かれている。

また、日本船舶海洋工学会 学会誌KANRIN第98号に「海洋波研究の最前線」という特集⁵⁴⁾、KANRIN第77号に「船舶海洋分野における気象情報の利用」という特集⁵⁵⁾が組まれている。さらに、オーストラリアの波浪研究グループが、将来に向けた波浪の研究課題について整理している²⁹⁾。ここでは、研究機関・政府関係者・民間企業等で波浪に関わるステークホルダーにアンケートし、運営委員会が整理、再度ステークホルダーに投票してもらった結果をまとめている。現状の波浪データの・モデルの限界、波浪研究の今後の課題について、関心のある読者はこちらの記事も参照されたい。なお、この記事において、*Better engagement of maritime industries with research*が課題の一つとして挙げられている。

§1「はじめに」で述べたように、実船モニタリングにおいては、現在提供されている波浪データを、その有用性と限界を踏まえながら、活用していくことが必要である。本稿が、実船モニタリングへの波浪データ活用の促進につながれば幸いである。さらに、実船モニタリングの海事産業への展開を通じて、*Better engagement of maritime industries with research*が実現されることを願う。

参考文献

- 1) 海上技術安全研究所，“海事クラスター共同研究 実海域実船性能評価プロジェクト (OCTARVIA) フェーズ2の開始について,” 2022. <https://www.nmri.go.jp/news/press/press20220315.html>
- 2) 粉原直人 and 米澤挙志，“実船モニタリングデータからの実船性能評価,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng.* = 威臨日本船舶海洋工学会誌, vol. 82, pp. 6-11, 2019.
- 3) 藤久保昌彦，“船体構造デジタルツインの研究開発,” 溶接学会誌, vol. 90, no. 1, pp. 36-43, 2021, doi: 10.2207/jjws.90.36.
- 4) 牧敦生，“関西支部だより,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng.* = 威臨日本船舶海洋工学会誌, vol. 102, p. 48, 2022.
- 5) J. Nieto Borge, G. R. Rodríguez, K. Hessner, and P. I. González, “Inversion of Marine Radar Images for Surface Wave Analysis,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 21, no. 8, pp. 1291-1300, Aug. 2004, doi: 10.1175/1520-0426(2004)021<1291:IOMRIF>2.0.CO;2.
- 6) Y. Qi, W. Xiao, and D. K. P. Yue, “Phase-resolved wave field simulation calibration of sea surface reconstruction using noncoherent marine radar,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 33, no. 6, pp. 1135-1149, 2016, doi: 10.1175/JTECH-D-15-0130.1.
- 7) W. Huang, X. Liu, and E. W. Gill, *Ocean wind and wave measurements using X-band marine radar: A comprehensive review*, vol. 9, no. 12. 2017. doi: 10.3390/rs9121261.
- 8) H.-Y. Y. Cheng and H. Chien, “Implementation of S-band marine radar for surface wave measurement under precipitation,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 188, pp. 85-94, 2017, doi: 10.1016/j.rse.2016.10.042.

- 9) N. Braun, F. Ziemer, A. Bezuglov, M. Cysewski, and G. Schymura, "Sea-Surface Current Features Observed by Doppler Radar," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 4, pp. 1125-1133, 2008, doi: 10.1109/TGRS.2007.910221.
- 10) 林昌奎, "ドップラーレーダによる沿岸域海洋波の定点観測," *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 咸臨 日本船舶海洋工学学会誌*, no. 98, pp. 8-11, 2021.
- 11) 武田誠一, "実船による波浪計測," *日本造船学会誌*, vol. 831, pp. 36-41, 2002.
- 12) K. Hasselmann *et al.*, "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)," *Deutsches Hydrographisches Institut*, 1973.
- 13) H. L. Tolman and N. Booij, "Modeling wind waves using wavenumber-direction spectra and a variable wavenumber grid," *Glob. Atmos. Ocean Syst.*, vol. 6, pp. 295-309, 1998.
- 14) K. Hasselmann, "On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory," *J. Fluid Mech.*, vol. 12, no. 04, p. 481, 1962, doi: 10.1017/S0022112062000373.
- 15) T. WAMDI Group, "The WAM model - A third generation ocean wave prediction model," *Journal of Physical Oceanography*, vol. 18, no. 12, pp. 1775-1810, 1988. doi: 10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2.
- 16) G. J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. doi: DOI: 10.1017/CBO9780511628955.
- 17) S. Park, "Part VII : ECMWF Wave Model IFS DOCUMENTATION - Cy38r1 Operational implementation 19 June 2012 PART VII : ECMWF WAVE MODEL Table of contents Numerical scheme," no. June, pp. 1-79, 2012.
- 18) H. L. Tolman, "User manual and system documentation of WAVEWATCH III," 2016.
- 19) R. C. Ris, L. H. Holthuijsen, and N. Booij, "A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification," *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 104, no. C4, pp. 7667-7681, Apr. 1999, doi: <https://doi.org/10.1029/1998JC900123>.
- 20) 峯松宏明, "気象庁で現業運用している波浪モデル," *天気*, vol. 56, pp. 669-674, 2009.
- 21) 三好建正, "ビッグデータ同化と気象予測," *応用物理*, vol. 90, no. 8, pp. 470-475, 2021.
- 22) 山口宗彦, "気象データの利用におけるリスクマネジメントへさまざまなアンサンブル予報の形態へ," 2020.
- 23) ECMWF, "Ocean Wave Model Ensemble 15-day forecast (Set IV - ENS-WAM)." <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iv>
- 24) 松浦邦明, 前田正裕, 中野知香, 黒木健太郎, 越田理, and 佐藤淑子, "気象海象の推算とその精度 : 推算値の特徴を踏まえた利用のために (特集 船舶海洋分野における気象情報の利用)," *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 咸臨 日本船舶海洋工学学会誌*, no. 77, pp. 6-10, 2018.
- 25) M. Alday, F. Arduin, M. Accensi, and G. Dodet, "A global wave parameter database for geophysical applications. Part 3: improved forcing and spectral resolution," 2021.
- 26) H. Hersbach *et al.*, "The ERA5 global reanalysis," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049, 2020, doi: 10.1002/qj.3803.
- 27) 見良津黎, 福井努, and 朱庭耀, "船舶の実遭遇海象に基づく操船影響の定量的評価," *ClassNK 技報*, vol. 5, pp. 71-74, 2022.
- 28) ECMWF, "Forecast User Guide, 2 The ECMWF Integrated Forecasting System, 2.2 Ocean Wave Model - ECWAM," 2022. <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/2.2+Ocean+Wave+Model+-+ECWAM>
- 29) D. Greenslade *et al.*, "15 Priorities for Wind-Waves Research: An Australian Perspective," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 101, no. 4, pp. E446-E461, 2020, doi: 10.1175/BAMS-D-18-0262.1.
- 30) H. Jiang, A. V Babanin, and G. Chen, "Event-Based Validation of Swell Arrival Time," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 46, no. 12, pp. 3563-3569, 2016, doi: 10.1175/JPO-D-16-0208.1.
- 31) F. Arduin *et al.*, "Small-scale open ocean

- currents have large effects on wind wave heights,” *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 122, no. 6, pp. 4500-4517, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/2016JC012413>.
- 32) T. Kodaira, K. Sasmal, R. Miratsu, T. Fukui, T. Zhu, and T. Waseda, “Uncertainty in wave hindcasts in the North Atlantic Ocean,” pp. 1-15, 2022.
- 33) G. de Hauteclocque, T. Zhu, M. Johnson, H. Austefjord, and E. Bitner-Gregersen, “Assessment of global wave datasets for long term response of ships,” *Proc. Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng. - OMAE*, vol. 2A-2020, no. August, 2020, doi: [10.1115/omae2020-18874](https://doi.org/10.1115/omae2020-18874).
- 34) K. Sasmal, T. Kodaira, Y. Kita, R. Miratsu, and T. Zhu, “Modeled and satellite-derived extreme wave height statistics in the North Atlantic Ocean reaching 20 m,” *ESSOAr*, 2021.
- 35) 久保剛太 and 高野洋雄, “波浪に対する海流の影響調査,” *測候時報*, vol. 77, pp. S141-S157, 2010.
- 36) 高野洋雄 and 山根彩子, “「航行に危険な荒れた海域情報」の波浪予想図への追加,” *測候時報*, vol. 85, pp. 1-12, 2018.
- 37) 橋本典明, “最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定,” *港湾空港技術研究所 報告*, vol. 24, no. 3, pp. 123-146, 1985.
- 38) 国土交通省港湾局, “全国港湾海洋波浪情報網 : NOWPHAS.” <https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>
- 39) 伊藤吉孝, “港湾用語の基礎知識「GPS波浪計」,” *港湾*, vol. 3, p. 56, 2017.
- 40) NOAA, “National Data Buoy Center.” <https://www.ndbc.noaa.gov/>
- 41) C. M. E. M. Service, “In Situ TAC.” <http://www.marineinsitu.eu/dashboard/>
- 42) Sofar Ocean, “Spotter Buoy.” <https://www.sofaroccean.com/products/spotter>
- 43) P. B. Smit *et al.*, “Assimilation of significant wave height from distributed ocean wave sensors,” *Ocean Model.*, vol. 159, 2021, doi: [10.1016/j.ocemod.2020.101738](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101738).
- 44) 平川嘉昭, “外洋域における船舶・海洋構造物の遭遇波浪観測,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 威臨 日本船舶海洋工学学会誌*, vol. 98, pp. 12-16, 2021.
- 45) Sofar Ocean, “Sofar Ocean.” <https://weather.sofaroccean.com/>
- 46) F. Ardhuin *et al.*, “Observing Sea States,” *Frontiers in Marine Science*, vol. 6, 2019.
- 47) A. Ribal and I. R. Young, “33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations,” *Sci. Data*, vol. 6, no. 1, p. 77, 2019, doi: [10.1038/s41597-019-0083-9](https://doi.org/10.1038/s41597-019-0083-9).
- 48) F. Laboratoire d’Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), CNRS, IRD, Ifremer, IUEM, Univ. Brest, Brest, “The Sea State Climate Change Initiative dataset is available,” 2019.
- 49) 早稲田卓爾, “世界の海洋波研究の動向と課題,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 威臨 日本船舶海洋工学学会誌*, no. 98, pp. 1-7, 2021.
- 50) 光易恒, *海洋波の物理*. 岩波書店, 1995.
- 51) 磯崎一郎 and 鈴木靖, *波浪の解析と予報*. 東海大学出版会, 1999.
- 52) P. A. E. M. Janssen, *The interaction of ocean waves and wind*. Cambridge University Press, 2004.
- 53) I. R. Young and A. V. Babanin, *Ocean Wave Dynamics*. WORLD SCIENTIFIC, 2019. doi: [doi:10.1142/11509](https://doi.org/10.1142/11509).
- 54) 日本船舶海洋工学学会編, “海洋波研究の最前線,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 威臨 日本船舶海洋工学学会誌*, vol. 98, 2021.
- 55) 日本船舶海洋工学学会編, “船舶海洋分野における気象情報の利用,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 威臨 日本船舶海洋工学学会誌*, vol. 77, 2018.