



## 沿岸から離れた海域における波浪特性と船舶運航への活用に関する基礎的研究

笹, 健児

陳, 辰

塩谷, 茂明

若林, 伸和

寺田, 大介

---

(Citation)

土木学会論文集B3（海洋開発）, 71(2):I\_185-I\_190

(Issue Date)

2015

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2015 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002908>



# 沿岸から離れた海域における波浪特性と 船舶運航への活用に関する基礎的研究

笛 健児<sup>1</sup>・陳 辰<sup>2</sup>・塩谷 茂明<sup>3</sup>・  
若林 伸和<sup>4</sup>・寺田 大介<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学准教授 海事科学研究科  
(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

E-mail: sasa@maritime.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 神戸大学海事科学研究科

E-mail: cc198895@hotmail.com

<sup>3</sup>正会員 神戸大学教授 海事科学研究科

<sup>4</sup>神戸大学教授 海事科学研究科

<sup>5</sup>水産総合研究センター 水産工学研究所 (〒314-0408 茨城県神栖市波崎 7620-7)

日本は沿岸波浪の情報は充実しているが、沿岸から離れた海域は未だにデータが少なく、船舶が危険な状況に陥る要因となっている。本研究では国際航海に従事する貨物船を対象に太平洋上の荒天航海時における波浪情報をレーダー式波浪計にて計測し、これを WRF および SWAN といった気象海象モデルにて再現・比較した。このときに同時観測した横揺れ、縦揺れなど船体運動の実測値と波浪データから EUT により推定した値の比較を行った。レーダー式波浪計による計測値をもとに船体運動を推定した場合、若干ほぼ実用的に推定でき、一方数値モデルによる波浪追算は波向および周波数特性を精度よく再現できるが、波高はやや過小評価となることが明らかとなった。この点については船舶からの観測データをネットワーク通信により蓄積し、数値モデルの補正精度を向上させることで波浪情報の充実を図れる。

**Key Words :** ocean wave, ship routing, wave radar analyzer, numerical hindcating, directional spectrum

## 1. 研究の目的

日本は食糧やエネルギー資源を含む輸出入貨物の95%以上を海上輸送に依存しており、我々の日常生活を支える必要不可欠なライフラインを形成している。一方、船舶による海上輸送は海域や季節等により周期的に変動するものに加え、近年の気候変動の影響にて台風の巨大化や複雑化、爆弾低気圧を含めた気象海象の影響を強く受ける。経済的な側面から見ると、世界情勢の複雑化により大きく変動する原油価格、経済情勢により逐次変動する貨物物流など運航コストの最適化も重要な要素である。さらに環境面から見ると、IMO (国際海事機構) にて地球温暖化の防止策として船舶からのCO<sub>2</sub>排出を最小化するための船舶設計や運航管理による規制強化が進められるなど、船舶運航の制約条件は多くの評価項目からの最適解を求めなければならない。このような高度化した船舶運航を求められる一方、現場では経験に依存した判断を下すのが一般的であった。この背景には多岐にわたる要素が

複雑に影響する事象に対しての科学的な評価が必要となる状況に現場で対応しきれていない、かつそのためのツールも十分でないことがある<sup>1)</sup>。安全性および経済性を大きく左右する気象海象について考えると、沿岸波浪はデータベース網が充実し、沿岸航行する船舶運航にも有効活用できる方法論を著者らは示したが<sup>2)</sup>、沿岸から離れた海域ではこれらのデータ量は今も大きく不足している。大洋中の波浪特性を推定する方法はいくつか提案されており、船舶を活用した波浪の計測方法の一つにレーダーの海面反射を応用した技術があり、船体運動を出力信号と考え統計的手法により逆推定するwave buoy analogy<sup>3)4)</sup>、大気および海洋のエネルギーバランスを力学的かつ数値的に求める気象力学<sup>5)</sup>、GPSを活用した船舶からの波浪計測、衛星から撮影された画像データの処理による海面情報の推定などがある。これとは別に船舶に設置されるレーダーによる海面反射の信号をもとに空間波形に変換し、方向スペクトルを推定するレーダー式波浪計<sup>6)</sup>は計測センサーに比べ安価な設置が可能である反面、

精度検証の実績がまだ十分とは言えない。このように決定的に優れた波浪推定の手法は未だ存在しないが、本研究では連続的な観測の容易さとコストを考慮し、国際航海時の貨物船にレーダー式波浪計を搭載、太平洋上の荒天時における一局面の計測を通じ、気象海象の局所数値モデルによる比較検証を組み合わせた波浪情報のあり方を考察する。

## 2. 実海域における連続計測

まず本研究にて実施した実海域での計測状況を概説し、荒天時に観測された事例を示す。

### (1) 対象船舶

国際航海に従事する 20,000DWT 級のばら積み貨物船を対象船舶に設定した。主要目は垂線間長 160.4m、幅 27.2m、満載時の喫水 9.82m、航海速力 14 ノットであり、船舶を管理する会社より一航海ごとに貨物需要に従った航路と寄港地を指定される不定期船である。すなわちコンテナ船、タンカー、旅客船のように定められた航海ルートを持たず、世界中の貨物需要をもとにアジア、オセアニア、北米、南米を中心に幅広い海域を航海しており、太平洋、大西洋、インド洋などが主な航海海域である。

### (2) 計測システムの概略

本船には航海情報、船体運動、機関情報、気象海象の状況を継続的に把握することを目的に計測システムが開発、運用されている。図-1 に対象船舶における計測システムの系統図を示す。

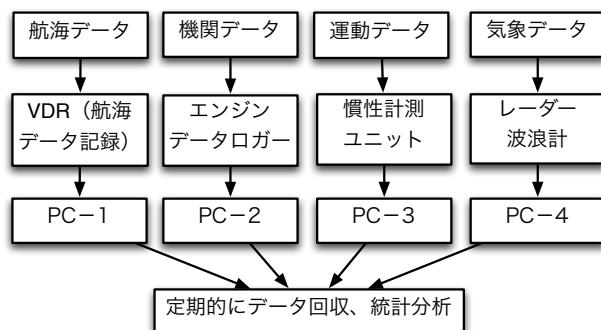


図-1 計測システムの系統図

図より船舶の位置、速力、方位、操舵量などの航海データは VDR(Voyage Data Recorder)に集積、デジタル変換された後に PC-1 に記録、保存され、主機関の回転数、馬力、プロペラ推力、燃料流量など機関データはエンジンデータロガーを介して PC-2 に、慣性計測ユニットに

より縦揺れ、横揺れ、船首揺れなどの船体運動、鉛直方向の加速度などを計測、PC-3 に記録され、波浪情報についてはレーダーから得られる反射信号を付属の解析ソフトにより空間波の波数スペクトルを推定し、これを PC-4 に記録している。これらのデータを適当な間隔で停泊中の本船を訪問、データ回収し、統計分析した。PC は当初 HDD 方式を設置していたが、振動、衝撃による影響にてディスク破損を生じたため、途中で SSD 方式に変更している。計測は 2010 年 7 月より開始し、1 年間のデータを中心に紹介する。

### (3) レーダー式波浪計の概要

レーダーは船舶から放射されるマイクロ電磁波の反射信号をもとに付近に存在する船舶や陸地、構造物などを検出するために設計されている。荒天時に海面が高くなると海面反射と呼ばれる映像が観測され、通常はノイズとして除去されるものを逆利用し、船周りの空間波浪に変換しようとするものである。図-2 に船舶用レーダー式波浪計の概略図を示す。

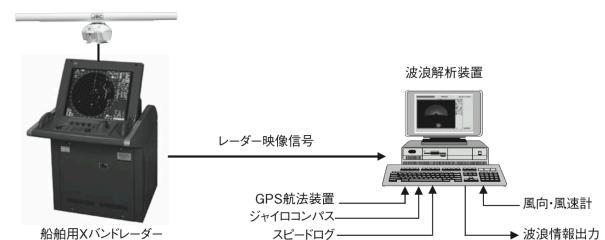


図-2 船舶用レーダー式波浪計の概略図

図に示すとおり、レーダーにて検出される海面反射の映像信号が解析装置にデータ転送され、航海計器から得られる針路、速力、風向、風速等の情報とともに二次元高速フーリエ変換、クロススペクトルの演算を繰り返することで船から 3.8km 以内の海域における 1,920m × 1,920m の領域を対象に波数スペクトルが求められる。領域内のデータ点数は 256 × 256 であり、 $x$  および  $y$  方向の波数を  $k_x$  および  $k_y$  とすれば波数スペクトルを  $E_w(k_x, k_y)$  とすれば、周波数ベースの方向スペクトル  $D_w(f, \theta)$  は以下の変換式により求められる。

$$D_w(f, \theta) = \frac{16 \cdot 2\pi^4 f^3}{g^2} E_w(k_x, k_y) \quad (1)$$

これより有義波高  $H_{1/3}$ 、平均波周期  $T_{02}$  は

$$H_{1/3} = 4.0 \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty D_w(f, \theta) df d\theta} \quad (2)$$

$$T_{02} = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty D_w(f, \theta) df d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty f^2 D_w(f, \theta) df d\theta}} \quad (3)$$

#### (4) 荒天航海時の波浪観測例

図-3は2010年7月5日～6日にかけて本船がアラスカ沖で航行中に荒天に遭遇した時の波浪をレーダー式波浪計により観測した方向スペクトルの例を示す。

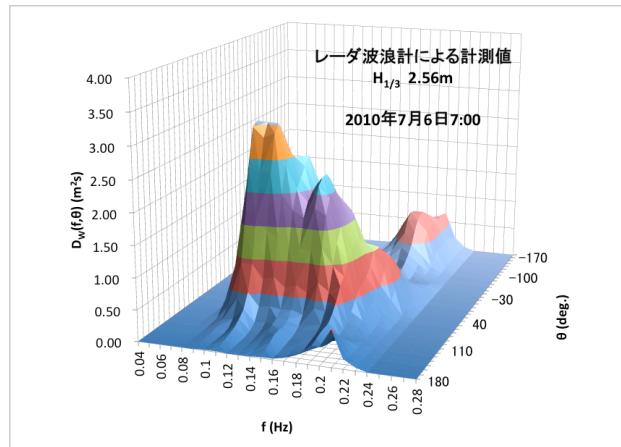
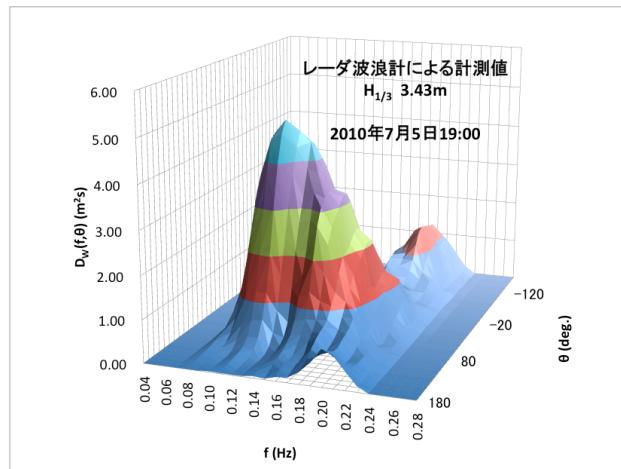
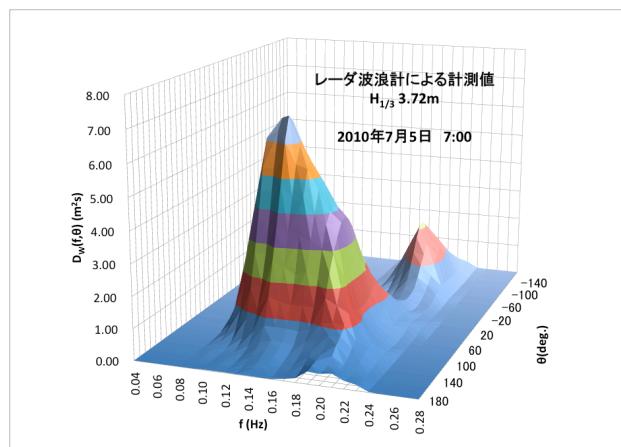


図-3 レーダー式波浪計により観測した方向スペクトル (2010年7月5日～6日, アラスカ沖)

なお図中に示す波向きは船に対する相対方向であり、船尾を $0^\circ$ として真横を $90^\circ$ , 船首を $180^\circ$ と定義している。図-4に7月4日～6日における有義波高、平均波周期、主波向の変化を示す。

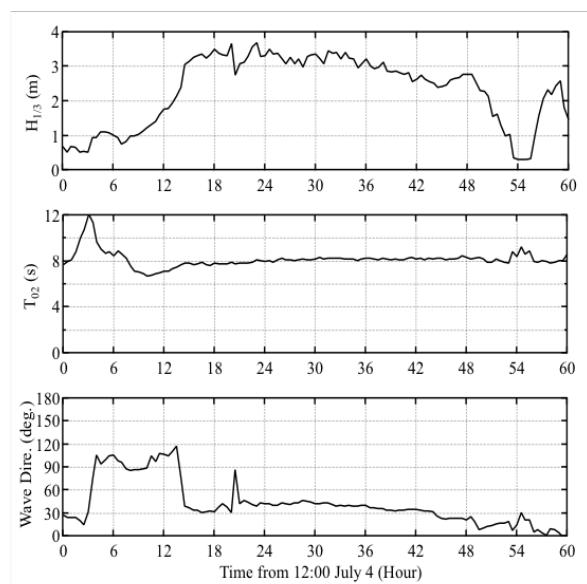


図-4 船舶位置での波浪状況の変化 (2010年7月4日～6日)

図より7月5日の未明から波高が上昇し、3～4mの状態が1日半ほど継続していることが分かる。平均周期は12sから8sになり、ほぼ一定であった。相対波向は7月4日の12:00～7月5日の0:00にかけて約 $90^\circ$ 、すなわち船の真横方向から波を受けており、7月6日から約 $30^\circ$ （船尾から $30^\circ$ ）に変化している。この時の船首方位、平均風向および平均風速の変化を図-5に、横揺れおよび縦揺れの変化を図-6に示す。これより波高が上昇した直後である7月5日6:00ごろ（図中の18時間以降）から約12時間にわたって船首方位に大きな変動が認められる一方、横揺れ、縦揺れが大きくなり始めている。その後6時間後（図中の24時間付近）で一旦減少した後、再び増加している。これより横波を避けるために意図的な操舵を行ったと考えられる。しかし、斜め後方からの波向になったために横揺れは一時的にしか減少していない。

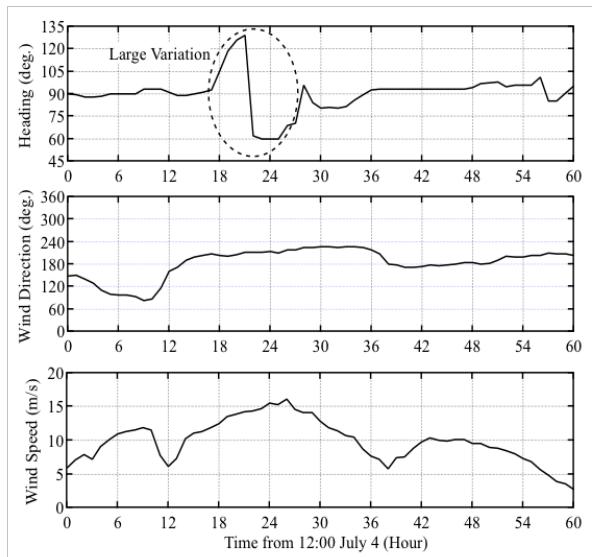


図-5 船首方位、風向、風速の変化 (2010年7月4日～6日)

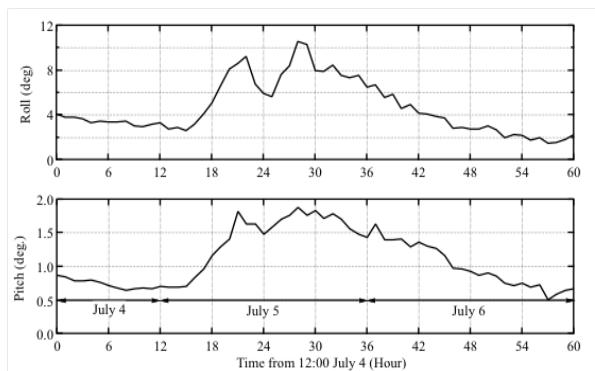


図-6 横揺れおよび縦揺れの変化 (2010年7月4日～6日)

前進速度を持って波浪中を航行している船の場合、横波だけでなく斜め追い波状態でも大きな横揺れが発生し転覆に至ることが、船舶海洋工学の分野にて理論的および実験的に明確とされている<sup>7)</sup>。ここで観測された現象も横波状態を避けようと操船したが、斜め追い波となったため横揺れ自体は大きな減少は生じていないものと推論できる。波浪の方向スペクトルについては、3つの時点とも周波数および波向のピーク、形状もほぼ同じであるが、時間の経過とともにスペクトルの分散が24時間で若干大きくなっている。風については7月5日未明には一旦弱まった後、徐々に強まり最大で15m/s程度の強風の中で波高も上昇し、船舶も操舵を行っていることから低気圧に近づいて航行している中で観測されたものと考えられ、全体的な観測結果より波浪の状況はほぼ矛盾なく計測できていると推察される。

### 3. 数値モデルによる追算

前章で示した荒天時の観測結果に対し、気象海象の数値モデルによる追算を実施し、再現性を比較検証する。

#### (1) 数値モデルの概略

計算機性能の高度化に伴い、気象海象の数値予報に関する研究が数多くなされている。波浪モデルはいくつか提案されているが、沿岸波浪を中心とした実績のあるSWAN (Simulating Waves Nearshore)をここでは使用した<sup>8)</sup>。初期データとしてはNOAAから配信されるNCEP (National Centers Environment Prediction)<sup>9)</sup>を使用するが、データの解像度が1°と粗いため、まず大気(風)の計算を行う必要がある。ここでは最近の研究で利用実績の高いWRF (Weather Research and Forecasting)を用いた<sup>10)</sup>。船舶への影響を評価するにあたり、気象海象が変化しない時間規模とされる30分で船舶が航行する距離である6~10海里、すなわち0.1°の解像度と設定した大気の計算をまず行うこととした。計算の手順としては大気の計算

にてNCEPの再解析値をもとに助走期間を1週間として再現したい領域および時間について、WRFにより海面上の風ベクトルを計算する。つぎにSWANにてこの結果を読み込み、対象領域における方向スペクトルのエネルギー平衡の方程式について差分スキームを数値的に解き決定される。表-1にWRFおよびSWANにて計算を行ったときの条件設定を示す。時間ステップは10s、計算領域はWRFの方をやや大きめに取っているが、これは風の再現にあたり、可能な限り広い範囲を設定しようとしているためである。

表-1 WRF および SWAN による計算の条件設定

計算条件	WRF	SWAN
計算領域	35N~65N, 130W~170W	45N~58N, 140W~165W
格子点数	400×300×28	150×130
格子間隔	0.1°	0.1°
時間間隔	10s	10s

#### (2) 荒天航海時における波浪追算例

数値モデルWRFおよびSWANにより荒天時の波浪追算として図-2に対応する海域、日時に応する追算を行い、波浪の方向スペクトルの計算結果を図-7に示す。

図より3点ともレーダー式波浪計の計測結果に比べスペクトルの形状が若干尖っている、すなわち周波数および方向分散が小さい傾向にある。また有義波高もレーダーの波浪計の計測値に対して0.7~1m程度小さくなっていることが分かった。一方、ピーク周波数と主波向については表-2および表-3のような関係となった。

表-2 ピーク周波数の比較

	ピーク周波数(レーダー)	ピーク周波数(波浪追算)
7月5日 7:00	0.14 Hz	0.13 Hz
7月5日 19:00	0.13 Hz	0.12 Hz
7月6日 7:00	0.12 Hz	0.10 Hz

表-3 ピーク波向の比較

	ピーク波向(レーダー)	ピーク波向(波浪追算)
7月5日 7:00	20 deg.	60 deg.
7月5日 19:00	60 deg.	50 deg.
7月6日 7:00	40 deg.	60 deg.

これよりピーク周波数は3点ともほぼ一致しており、ピーク波向は7月5日7:00では40°の違いがあるものの、他の2点は10°の違いであることが分かった。これより波高の再現性に比較して計測値と追算値はよく一致していると言える。

### 4. 船体運動との関係から見た考察

荒天航海時の一局面における波浪の計測値および追算値を比較し、スペクトル形状は実用的な範囲で再現で

きていることを確認した。しかし、スペクトルのエネルギーレベルに生じている違いについて、同時に観測された横揺れ、縦揺れの船体運動量から検証を行う。レーダー式波浪計の観測値より式(1)により方向スペクトル  $D_w(f, \theta)$  に横揺れ、縦揺れの応答関数  $H_R(f, \theta)$  および  $H_P(f, \theta)$  の 2乗を乗じれば、船体運動の方向スペクトル  $D_R(f, \theta)$  および  $D_P(f, \theta)$  が推定される。

$$D_R(f, \theta) = D_w(f, \theta) |H_R(f, \theta)|^2 \quad (4)$$

$$D_P(f, \theta) = D_w(f, \theta) |H_P(f, \theta)|^2 \quad (5)$$

横揺れ、縦揺れの応答関数を求める手法はいくつか提案されているが、前進速度を有する船舶に対する解析手法として実績のある EUT(Enhanced Unified Theory)<sup>11)</sup>をここでは用いた。波浪の場合と同様に式(2)により横揺れ、縦揺れの有義振幅  $R_{1/3}$  および  $P_{1/3}$  が求められる。

$$R_{1/3} = 4.0 \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty D_R(f, \theta) df d\theta} \quad (6)$$

$$P_{1/3} = 4.0 \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty D_P(f, \theta) df d\theta} \quad (7)$$

図-8 は 2010 年 7 月 5 日 7:00～6 日 7:00 の間で計測された横揺れ、縦揺れの計測値から求めた有義振幅とレーダー式波浪計の観測値から式(4)～(7)を用いて計算した推定値との比較を示す。横揺れおよび縦揺れの相関係数はそれぞれ 0.24, 0.26 と決して高くないが、データ数が 50 程度であったことも影響していると考えられる。今後、データ量を蓄積し、再検証する必要がある。一方、レーダー式波浪計にて観測された結果を用いた推定結果が計測値を特に過大評価している傾向も見られないことから、図-3 に示す方向スペクトルの方が図-7 のそれよりも実際の波浪状況を精度よく表していると言える。このため、WRF および SWAN による推定値は波向および周波数特性はほぼ実用的に再現できているが、エネルギー(振幅)については過小評価する傾向があるため、補正係数  $\alpha$  として 3 ケースの有義波高の比を取ると、1.2, 1.4, 1.8 となっている。この点については今後もデータを蓄積した上で議論を進める必要がある。

## 5. 船舶における波浪情報の可能性と課題

船舶でのレーダー式波浪計による観測結果と船体応答を用いた船体運動の推定より、波浪情報としての妥当性を太平洋上にある荒天を対象に実証できた。一方、気象

海象の数値モデルを用いる場合、波向、周波数は再現できているが、波高については過小評価となることも明らかとなった。このため図-9 に示すような船舶からのレーダー式波浪計等によるネットワーク通信を活用した、沿岸から離れた海域における波浪情報の高精度化を実現する流れを構築することが必要と考えられる。今後は気象海象の解析モデルについて、高解像度とした計算やアルゴリズムの改良を図る必要があり、一方でレーダー式波浪計等の船舶から計測されるデータの蓄積を同時に図り、ネットワーク通信によるデータの幅広い共有と数値計算による値に対する補正精度の向上も図る必要がある。

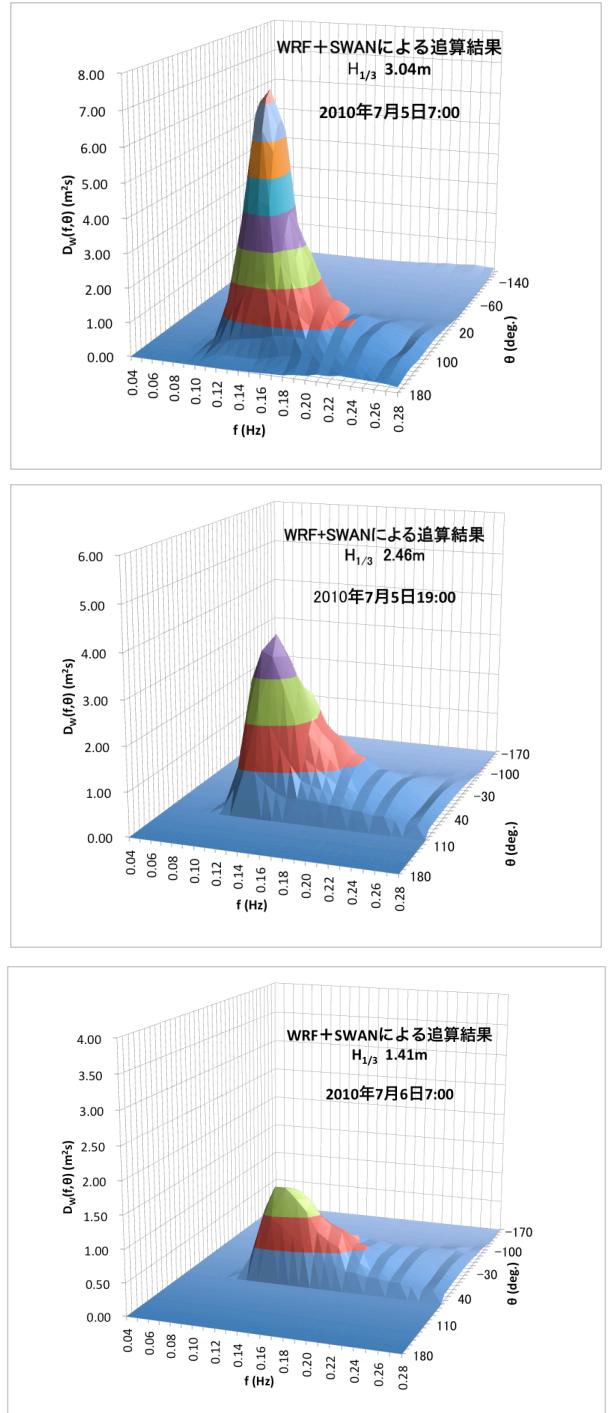


図-7 方向スペクトルの計算結果 (2010 年 7 月 5 日～6 日)

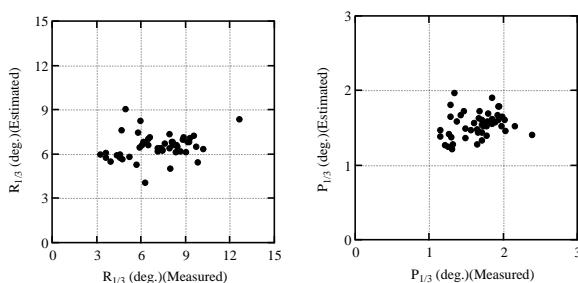


図-8 横揺れおよび縦揺れの有義振幅についての計測値と実測値の比較 (2010年7月5日7:00~6日7:00)

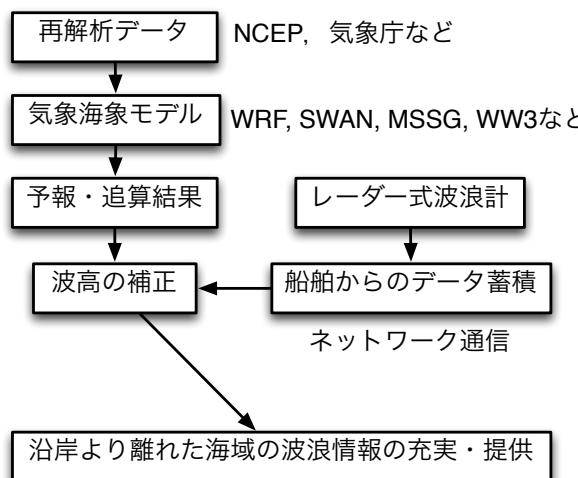


図-9 沿岸から離れた海域での波浪情報の高精度化の実現流れ

**謝辞 :**本研究の実施にあたり、実船実験に多大な協力を得た正栄汽船株式会社の方々に深く感謝の意を表する。波浪レーダーのデータ分析に関し、日本無線株式会社・平山圭一氏には多くの助言を賜ったことに感謝の意を表する。本研究は科学研究費補助金・基盤研究(B)「国際海上輸送における安全性・経済性・海洋環境を統合した新しい最適運航システム」(研究代表者・笹健児、平成25

～27年度)の一環として実施したことと付記する。

### 参考文献

- 1) Sasa, K., Terada, D., Shiotani, S., Wakabayashi, N., and Ohsawa, T.: Current Situation and Difficulty of Wave Forecast from Viewpoint of Ship Management, *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013*, pp.1-8, 2013.
- 2) 笹健児, 寺田大介: 観測波を用いた沿岸航行の船体運動の再現性と欠航判断に関する研究, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.856-860, 2009.
- 3) Iseki, T. and Terada, D.: Bayesian Estimation of Directional Wave Spectra for Ship Guidance Systems, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.12, No.1, pp.25-30, 2002.
- 4) Nielsen, U.D.: Estimations of On-Site Directional Wave Spectra from Measured Ship Responses, *Marine Structures*, No.19, pp.33-69, 2006.
- 5) 曽田泰介, 塩谷茂明, 笹健児: 気象・海象を考慮した数値ナビゲーションシステムの基礎的研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第16号, pp.155-164, 2013.
- 6) 平山圭一, 岡圭一, 馬場満徳: 船舶用レーダー波浪観測装置, 日本無線技報, No.59, pp.30-33, 2010.
- 7) 池田良穂, 梅田直哉, Shin, C., 内藤林: 船体運動・耐航性能(初級編), 成山堂書店, 272p., 2013.
- 8) Holthuijsen, L.H., Booij, N., and Herbers, T.H.C.: A Prediction Model for Stationary, Short-Crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents, *Coastal Engineering*, Vol. 13, pp. 23-54, 1989.
- 9) NOAA: National Centers Environmental Prediction (NCEP), <http://www.ncep.noaa.gov>
- 10) Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W. and Wang, W.: The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance, *Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and George Mrozynski. World Scientific, pp. 156-168, 2005.
- 11) 柏木正, 杉本健, 上田武志, 山崎啓市, 東濱清, 木村校優, 山下力蔵, 伊東章雄, 溝上宗二: 波浪中性能解析システムの開発, 関西造船協会論文集, 第241号, pp.1-16, 2004

## BASIC STUDY ON WAVES FAR FROM COASTAL AREA AND APPLICATION FOR SHIP OPERATION

Kenji SASA, Chen CHEN, Shigeaki SHIOTANI,  
Nobukazu WAKABAYASHI and Daisuke TERADA

There is little information of waves far from coastal zones currently, the possibility of wave information is studied here by using a wave radar analyzer and numerical simulation models, WRF and SWAN. It is assured that measured wave data is practically enough accurate to apply for ship operation. On the other hand, computed results in numerical models underestimate wave heights a little. It is necessary to accumulate wave data in many ships from now on, and it will help to correct wave height accurately. The wave information service far from coastal areas is expected to construct.