船用レーダによる海洋波浪面取得と超短期波浪面予測（第一報）

正会員 平 川 嘉 昭* 正会員 須 崎 寛 則**
 佐々木 清 志** 正会員 高 山 武 彦*
 正会員 松 田 秋 彦*** 正会員 平 山 次 清*

Acquisition of Ocean Wave Surface by X-band Ship Radar and Very-short-term Wave Surface Prediction

by Yoshiaki Hirakawa, *Member* Hironori Susaki, *Member*
 Seishi Sasaki Takehiko Takayama, *Member*
 Akihiko Matsuda, *Member* Tsugukiyo Hirayama, *Member*

Summary

The fact that the crest-line-like lines can be seen in the PPI image of ship radars was known from relatively old days. Many trials obtaining wave information as wave directional spectrum, significant wave height and wave mean directions were also done. Recently, products giving such information and supporting navigation are also developed and becoming in use. Considering such a situation, wave radar will become a necessary item as a standard equipment for ships, in not a so long future. On the other hands, Hirayama et al. Showed, that by the PPI image, individual waves are recognized and very short term predictions, for example, a few minutes after, will be possible. If the prediction of individual waves is possible, then ship motion on them become possible, including dangerous conditions, and finally contribute to the safety navigation of ships. This paper reports about the results of the demonstrative examination of individual waves done in the actual sea and this will be the first in the world.

1. 結 言

船用レーダに波峰線らしきものが映ることは比較的古くから知られており、1959 年出版のレーダ関係テキスト¹⁾の口絵写真にも、海面反射（シークラッター）により波浪が PPI 画面に出る例が示されている。もっともレーダ使用者にとっては、海面反射は雑音であり、レーダ技術者は海面反射を如何に消すかに腐心してきたのであって、その海面反射を活用して波浪情報を抽出しようと試みたのは、船舶の耐航性能研究者であった。その例は 1975 年の造船研究協会の報告 SR132 研究部会報告書²⁾にも見られ、レーダ画像から波向き解析を実施している。

その後レーダ画面をアナログ処理、あるいはデジタル処理して波浪の方向スペクトル、ひいては有義波高や波向きなどの情報を得る試みも多く実施され、最近では航海支援や海上作業の一端を担う製品も実用化されつつある³⁾。こういった状況を考えると、船舶の標準備品として装備が義務つけられる時代も遠くないと予想される。

また、最近ではドップラーレーダーによる水面変位の高精度計測技術も開発されつつある^{4, 5)}。一方、更に進んで、船

用レーダ（主として X バンド）画像から個別波を捉え、数十秒から数分といった短時間後の個別波の予報（ここでは超短期予測と呼ぶ）が可能であることが、平山らの数値的研究^{6, 7, 8)}により示された。個別波の予測が可能となれば時々刻々の船体運動の予測も可能となり、船舶等の安全運航や省エネ航海にも大きく寄与できるものと考えられる。今回の報告は、個別波予測の数値的研究を実海域で実証的に検討した結果を報告するものであり、実証としては世界で初めてであると言える。

通常「短期予測」は、波浪のスペクトルが一定、別の表現では、「波浪の統計量（有義波高など）が一定である期間（20 分程度から数時間、十数時間）」での船体応答等の予測の場合に使われるが、ここでは波浪面計測時点から数十秒・数分後といった短時間後の予測という意味で超短期波浪面予測と表現した。

2. 理論・数値計算手法

レーダの PPI 画面の輝度の強い領域は、主として風によって生じた「漣」による後方散乱（ブラッグ共鳴と言われている）であることが知られており、波の峰付近に相当すると考えられる。この強弱は必ずしも水面変位あるいは水面傾斜等に比例するわけではなく、それがどちらにより強く対応しているかは、必ずしも明確にはなっていないが、これは後出の「予測」が「計測」と高精度で合う結果となった時点で、逆推定的に判断可能となると考えられる。

* 国立大学法人 横浜国立大学
 ** 古野電気株式会社
 *** (独)水産総合研究センター水産工学研究所

今, PPI 画面の時刻 t における輝度分布を (x, y, t) とした場合, PPI 画面の3次元フーリエ変換は(1)式のように表現される. 但し実際には離散フーリエ変換であり, 積分範囲も PPI 画像中で設定した解析範囲, 計測時間に限定される(9, 10, 11, 14, 15, 16). ここで k_x, k_y は波数ベクトルの成分, ω は波数に対応する角周波数である.

$$F(k_x, k_y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y, t) \cdot e^{-i(k_x \cdot x + k_y \cdot y + \omega \cdot t)} dx dy dt \quad (1)$$

またフーリエスペクトル F は複素数であり,

$$F(k_x, k_y) = F_{real}(k_x, k_y) + i \cdot F_{imag}(k_x, k_y) \quad (2)$$

とすれば, 組成波の位相 ϕ は, (3) 式となる.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{F_{imag}(k_x, k_y)}{F_{real}(k_x, k_y)} \right) \quad (3)$$

PPI 画面には移動する波浪以外の, 移動しない物体あるいは波では無い移動物体の輝度も現れるから, それを波と区別するために, 水波の分散関係が使用される. 即ち, 深水波の, 船速 U による変形を受けた周波数波数関係は(4)式, Fig.1 のように表現される. ここで矢印付はベクトルを意味する. Fig.1 の曲面は分散シェル (Dispersion Shell) と呼ばれる.

$$\omega = \sqrt{g \times k} + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (4)$$

Fig.1 Example of the Dispersion Shell of surface wave (U=15knots)

(1) 式の共役複素数の積から求められる波のパワースペクトルを波数・周波数空間で図示すれば, Fig.1 のような曲面上に強弱分布として現れるはずである. 逆に波以外の物体からの反射輝度はこの曲面からはずれるから, この曲面上のパワーと波のパワーとの関係づけがなされれば, 通常の点スペクトルの場合と同様に, パワーの積分値から有義波高 $H_{1/3}$ が, 周波数方向のモーメントから波の平均周期 T 等が求められる ((5, 6, 7, 8) 式). ここで L_x, L_y, T はそ

れぞれ x, y 平面での解析範囲, 解析信号時間長, P は方向スペクトル, S は点スペクトル, m_n は n 次のモーメント, T はモーメントから求められる平均周期を意味する. 但し, 実際には Fig.2 の様に, 完全な曲面にはならず “ゆらぎ” があり, 分散シェルの面の上下に跨った形で現れるから, 分散シェル面に上下幅を許容する必要がある, どこまでを波のパワーとするかは若干の試行錯誤が必要である. なお Fig.2 は概念図のためスケールは省いた. また図中の四角は「その面でカットした場合のスペクトル強度分布」を示したものである. 以上の濃淡を (k_x, k_y) 平面に落としたものが波数平面の方向スペクトルとなる. またこれを極座標 (波数の絶対値 k ・方向 θ) で表現し, $\omega = \sqrt{g \cdot k}$ なる関係を用いれば (周波数・方向) スペクトルを得る.

Fig.2 Example of power-spectrum-density over the dispersion shell.

$$P(k_x, k_y) = 2 \frac{\int_{\omega > 0} |F(k_x, k_y, \omega)|^2 d\omega}{L_x \cdot L_y \cdot T} \quad (5)$$

$$S(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} P(\omega, \theta) d\theta \quad (6)$$

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S(\omega) d\omega \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{1/3} &= 4.01 \cdot \sqrt{m_0} \\ T_{01} &= 2\pi \cdot \frac{m_0}{m_1} \\ T_{02} &= 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2.1 波浪情報抽出法

海面に後方散乱を生ずる漣がある場合, 船用レーダ等の PPI 画像の濃淡は海洋波の凹凸あるいは傾斜に対応したものを示していると考えられる (山・谷などの部分からの反射については, 予測と実測の詳細比較により明らかになる). ここでは PPI 画像の (x, y) 軸方向の強度分布および, t 方向

の変化による 3 次元 FFT と、波浪分散シェルをフィルターとした波浪方向スペクトル推定法について述べる。一般的に後方散乱は、レーダアンテナ位置から見て風上方向海面が強くなるので、解析画面は風上方向にとることとした。

2.2 波高決定法

PPI 画像の濃淡はバイアスもあり、波高に比例するわけではない。また、バイアスを差し引いた結果がほぼ波高に比例するとみなせるとしても、得られたスペクトルの縦軸（波のパワー）の絶対値は自動的に決まるわけではない。従来はシグナル対ノイズ比と有義波高の関係を、予め実測などで求めておき使用する、といった方法が使われていたが、同じ有義波高でも反射状況は異なる場合もあるわけで、精度には限界がある。尚、バイアスは周波数ゼロの成分である。ここでは、文献^{12, 13)}に示される方法を使用した。即ち船体運動を計測しながらスペクトルの縦軸を随時校正するという方法であり、より高精度な方法（特許取得済）を採用した。具体的には、スペクトルの縦軸を決める c を未知係数として (1) のフーリエスペクトルを周波数・方向スペクトル $F(\omega, \theta)$ に変換したものに船体運動の方向周波数応答関数（方向別指向特性が比較的一様な Heave $Rh(\omega, \theta)$ を使用) の 2 乗を掛けて体積積分したものが Heave の分散 σ_h^2 (計測値) とするという条件から、

$$\sigma_h^2 = \iint c^2 \cdot F(\omega, \theta)^2 \times Rh(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (8)$$

より c を求めた。使用した Heave の周波数応答関数 (NSM により計算) の一例 (船速 0kt, $\chi=180 \sim 0 \text{deg}$ ($\chi=180 \text{deg}$ を向波)) を Fig.3 に示す。ここでの方向の刻みは 45 度であるが実際には 22.5 度刻みの応答関数を使用した。

Fig.3 RAO of Heave (Taka-maru, 0knot)

3. 実証実験

実証実験は比較的小型の国立研究開発法人・水産総合研究センター・水産工学研究所・漁業調査船「たか丸」(Photo1) を使用させていただき、複数回実施した。ただし小型船のために、有義波高 3 m 以上の海象での運用を避けるため、それ以上の海象におけるケースは実証不足である。

なお Photo1 に示すように、試験用ということで、波浪用レーダは別途設置(取り外し可能)したが、既存レーダからの、フィルターを通さない生信号を分岐して使用すれば、既存レーダのアンテナ部分の共用は可能である。

Photo1 “Taka-maru (L_{pp}=25m)” for field measurement.

3.1 YNU (横浜国大) 型超小型方向波浪ブイによる波計測

レーダによる結果（主として有義波高）を検証するため、計測海域に係留なしの方向波浪ブイを短時間漂流させた。使用したものは、通常波浪計測に使用される重量 300kg といったブイに比べると格段に小型の、10kg 程度の YNU 型超小型方向波浪ブイ¹⁷⁾である。今回の海上試験では、センサー、データの無線送信等を改良し、更に精度よく方向スペクトルを推定できるようにした。またブイの周波数応答特性確認の一環として、市販の CFD プログラムによる検討も一部実施した。Fig.4(a)は波浪中のブイの状況とブイの運動を画像解析して得られたブイの Heave のタイムヒストリー例、Fig.4(b)は画像解析によって得られたブイの Heave と、ブイ内部に搭載した加速度・角度センサーから得られたデータを元に解析した波高のスペクトルとの比較である。この場合の解析時間は 3,200 秒である。超小型ブイの加速度センサーは長周期運動での応答特性が懸念され、一方画像解析は短周期運動の解析精度が懸念されたが、Fig.4(b)では両者がかなり近いことから (■印はブイ上下運動の画像解析によるもの、●印は方向波浪ブイによるもの)、それぞれの懸念を解消する結果が得られることがわかった。

Fig.4 (a) Released buoy and time history of heaving motion by image analysis.

Fig.4(b) Obtained point spectrum of wave height (shown by circles) and vertical motion of buoy (shown by squares)

3.2 船用レーダによる波浪面計測

波浪計測用レーダとしては市販品（古野製 DRS12A（4フィート・アンテナ），アンテナ回転数：48rpm（サンプリング周波数 0.8Hz）FFT 解析時間 40sec）を用い，海面からの後方散乱信号を抑制しない生信号を取り込み，2節の手法によりスペクトル解析した．レーダ画面（PPI）例を Fig.5(a)に示す．Fig.5(b)は解析範囲拡大図である．日時は図の説明に記載したが，Fig.6 に対応している．この場合本船は停止状態であった．但し天頂は絶対方位ではなく船首方向である．外側の四角形の範囲はプラスマイナス 1500m，即ち 3km 四方，PPI 画面の円の中の小さい四角形は 1km 四方で，スペクトル解析範囲を示す．風は船首方向からであり，解析範囲も風上としている．方向スペクトルの解析結果，波浪としては，3次元 FFT によるスペクトルには 3つのピークがみられ，それぞれを Fig.5 に矢印で示した．PPI 画像では右舷方向からの波が卓越しているように見えるが，細かく見ると，解析結果に対応して，他方向からの波もあることがわかる．

参考までに，対応する方向スペクトルを Fig.6 に示す．縦横軸は角周波数で，Fig.5 と異なり天頂は北である．船首方

位は中心部に矢印でしめされているから，Fig.5 と対応して船尾方向の波が卓越していることがわかる．

波浪面の予測にはパワースペクトルを求める前の，フーリエスペクトル（位相を求めるため）を使用する必要がある．これらの情報はメモリーに蓄え使用したが，アルゴリズム改良により計算速度はアップできるので，最終的にはリアルタイムでの予測が可能となる．

Fig.5(a) Example of PPI image of a radar (Jun.14 2012 12:46). Bow up expression.

Fig.5(b) Enlarged figure of the square part (987.7m × 987.7m) of Fig.5(a)

Fig.6 Example of obtained directional spectrum in frequency domain (North Up expression)

3.3 ブイによる検証結果

ブイはほぼ波浪面に追従して動くので、その時系列自体はかなり正確に波面を捉えていると考えてよい。但し面情報をもとにするレーダが、方向特性をかなり精度良く捉え得るのに対して、ブイは一点での波面上下・傾斜をもとにエルゴード性の仮定に基づき方向分布を推定しているの、レーダによる波浪情報のブイによる精度検証は波高と周期が主体とならざるを得ない。2010年～2012年に実施した海上実験における波高・波周期に関して、レーダとブイを比較したグラフを Fig.7(a), (b) に示す。尚、グラフ中の黒実線は誤差 0%，赤実線は誤差±10%を示している。

Fig.7(a), (b)より、有義波高・平均周期について、ブイを正とした場合の誤差は、波高：±7.0%、周期：±6.6%である。

Fig.7(a) Comparison between radar and buoy from the past field experiments (Wave height)

Fig.7(b) Comparison between radar and buoy from the past field experiments (Wave period)

3.4 波浪面予測と個別波予測結果

レーダ計測によれば、波浪面反射強度は波の進行に伴って移動することがわかる。従ってある時刻の PPI 画像を得ることによって、それを組成波分解（スペクトル）し、組成波に対応する理論位相速度で動かすことによって、 Δt （30 秒、60 秒といった）後の PPI 画像が予測可能となる^{6,7,8)}。

具体的には、フーリエスペクトルの逆変換によって波浪面の時間的変化を予測する場合は、(3) 式の位相 $\phi(k, t)$ に以下の修正を施せばよい。ただし $\omega(k)$ は波数ベクトル k 方向の周波数の意味である。

$$\phi(\omega(k), t + \Delta t) = \phi(\omega(k), t) + \omega(k) \cdot \Delta t \quad (9)$$

更にその PPI 画像内にブイを配置することによって、反射強度の強い点が波頂か傾斜部に相当するかといったことも明らかとなると考えられるが、これについては更に高精度の解析・比較が必要であり今後検討することとしたい。

また予測を時々刻々と連続的に実施することにより、希望する位置での波高タイムヒストリー、あるいは、波面上の希望軌跡に沿った波高時系列、即ち航走船舶の出会い波高の予測が可能となる。これは、船舶等が危険な波浪に遭遇するかどうかの予測に繋がり、安全運航・安全操業にも寄与することになる。

海上試験では、波のある海象に遭遇するとは限らないので、解析ケース数は十分とは言えないが、その中で波浪面予測を実施した結果を示す。

具体的には、2012 年 6 月 14 日（木）12:46～13:00、千葉県館山沖（緯度：34.92、経度 139.61 周辺）にて、水産総合研究センターのたか丸にて実施した。ただしこの時は停船状態である。レーダによる当日の有義波高は 1.8m 程度であった。Photo2 に現場の波浪状況を示す。ビデオカメラの 1 コマであり、白波がたつ状況であることがわかる。

Photo2 Waves by the VIDEO camera on Taka-maru.

例として当日のレーダ解析による点スペクトルを Fig.8 に示す。Fig.6 を方位方向に積分したものになっている。横軸は角周波数 (rad/s) である。縦軸はパワーであるが、相対値（2.2 節で述べた縦軸の絶対値を決める前の状態）であり、絶対値は既述したように、船体上下運動から決定している¹³⁾。この例では、有義波高 2.03m、平均周期 (T_{02}) 8.47sec となっており、うねり性の波が卓越していると言える。尚ブイによる値はそれぞれ 1.48m、4.34sec となっている (Fig.9)。この例で、ブイによる波高が小さめとなっている以外周期が大分短めになっている点については Fig.9 のスペクトルにも見られるように、ブイの方が短周期となる風浪成分に敏感で

ある点によるものと思われる. 従ってスペクトルモーメントによる平均周期の比較ではレーダによるものが長めとなる場合があるから注意が必要である.

Fig.8 Example of point spectrum at 12:46 obtained from radar analysis. $H_{1/3}=2.03\text{m}$, $T_{02}=8.47\text{sec}$ (from the radar), Wind Speed= 3.0m/s

Fig.9 Power spectrum of wave by ultra small buoy, $H_{1/3}=1.48\text{m}$, $T_{02}=4.34\text{sec}$ (from the buoy)

また, Fig.10 に, 船首方位 (□印) と方向スペクトルから得られた, 第一 (△), 第二 (○) ピークに相当する波方向の時間的変化 (20 分間) を示す. 尚, 方向に対応した記号ではなく, スペクトルピーク値が大きい方を第一 (△) ピークとしているので記号の上下入れ替わりがみられる点に注意されたい. 縦軸は $0\sim 360$ 度となっているが, 北方向からの波が 0 度である. 船首方位 (□) が大きく変化している部分は 360 度の不確定性の為であるから, 360 度引き算すればほぼ一定方向となっていることがわかる. Fig.9 に示すブイによる結果では第一ピークに相当する波の方向は 135deg であった.

Fig.10 Change of the ship heading-angle (□), primary (△) and secondary (○) direction obtained from directional wave spectrum by wave radar, according to the time. Wave direction 0deg . means “wave from north”.

Fig.11 に波浪面の予測と実際の比較を示す. Fig.11 の左側が 30 秒後の予測 ((9) 式で Δt を 30sec とした場合) 波浪面, 右側は比較のため, 30 秒後の実際の波浪面を濃淡で示した. 画像は北基準で図の真上が北, 図示範囲は船体位置を中心に $987.7\text{m} \times 987.7\text{m}$ 四方である.

PPI 上解析範囲と異なり本船周囲としているが, これは本研究の目的が, 安全運航の観点から本船まわりの波浪を予測することであるからであり, 組成波が把握できれば解析範囲を超えて波浪予測は可能であることが根拠となっている.

Fig.11 で見ると波進行方向は斜め右上方向でありこれは Fig.6 に現れている左下のスペクトルに対応している. ただし 30 秒後の実際の波浪面 (右図) はレーダ PPI 画像そのものではなく, PPI 画像をもとに, 不要波成分やバイアスを除去した後, 予測時間 = 0 として再構成した波浪面を示した.

これだけだと凹凸の絶対値がわかりにくい, 短時間予測で, 予測も実際にスペクトルはほぼ一致しているため有義波高も両者では一致している (固定点での上下振幅等の比較については次報以降で示す予定である).

レーダアンテナ位置に対応する中央部分では, 通常は船体の存在のために, PPI 画像では波も映らないが, 本手法では波も表現されている. これは, レーダ位置を含まない解析範囲から, レーダ位置の波浪面を予測する本手法の利点でもあると考えられる.

各画像下の数字, 例えば 44, 68 はレーダ回転数を表す. 本レーダの場合は, 1 回転に 1.25 秒かかる. 左図の 44(30) は 44 回転目の PPI 画像を使用して 30 秒後の波浪面(回転数で言うと 68 回転目)を予測したものであること, 右側の 68 は実際に 24 回転 (30 秒) 後の, 68 回転目の実波浪面を意味している. 本例では連続 3 画面の予測例を示したが, 実際の使用状況でも, 次々に予測画面を更新していくことを想定している.

予測は 30 秒後という超短時間後ということもあるが, 波浪面全体の分布傾向としては, 画面の左方向が比較的滑らかな分布であり, 予測と実際はほぼ一致している.

細かく見るために波頂線の動き等を見してみる. レーダによるスペクトル解析で得られた平均周期 8 秒の素成波は, 波長 99.8m で, 12.5m/s の位相速度で進行するから, レーダ 1 回転の間に約 16m (波長の $1/6$) 移動することになる. Fig.11 上

図の斜めの破線 AB は、波頂線に平行に引き、A'B'は平均周期相当の波長のラインを入れたものであり、レーダ画像には波長 99.8m に概略相当する濃淡が現れていることがわかる（全ての図の同じ位置に AB ラインを入れた）。また左右の図、即ち予測と実際を比較しても、主たる波向きと波長はほぼ一致していることがわかる。

Fig.11 Comparison of the predicted wave fields after 30 seconds (left), and obtained wave fields by the radar after 30seconds (right). Numerals, 44 for example, means the number of the rotation of radar antenna. Inserted lines are reference line parallel to crest lines.

尚、AB ラインの直角方向で示される波向きは Fig.6 の波方向と若干ずれがあるようにも見えるが、Fig.6 の方向分布に幅があることから不自然では無い。更に、Fig.11 左図の上、中、下段を比較すると、即ち時間経過を追うと、推定した概略位相速度で、波頂線が固定線 AB ラインを越えて斜め上方に移動していることがわかる。一方右欄の実際波浪面でも、AB ラインを基準にするとほぼ同等の動きがあると言える。このことは、仮に AB ライン付近の波が危険な波である場合は、30 秒後に AB ライン付近に移動する船舶には危険信号を出すことが可能であることを意味している。勿論自船で予測し自船に危険信号を出すことも可能である。但し、左欄

の予測と右欄の実際の動きを比較すると、必ずしも波頂線が対応していない面もあり、今後更に検証を積み重ねる必要があるが、30 秒後の予測波浪面は、概略として実際の波浪面と対応していると言える。

また、これは PPI 画像からの、位相も含む素成波の抽出がほぼ妥当であることを意味していると言える。なお、更に予測時刻を延長すれば固定点での波面変位時系列も得られるわけで、こういった面の定量的な検討については次報以降で示すこととしたい。

4. 結 言

本報告では、船用レーダから波浪面情報、ひいては個別波情報を抽出することによって、短時間後（本報告では 30 秒後）の個別波の予測が可能であることの実例を示すことが目的であった。今後、本手法の精度を更に確認する予定であり、船舶や海洋構造物の安全運航・操業にも貢献できると期待される。

本報告内容は、小型の官庁船で、海上試験の回数も限られており、検証に十分な高波浪面と遭遇できていない面もあるが、以下の点を確認し得た。

- 1). 船用レーダでは波浪の方向分布分解能が高いことを用いて、超短時間（数十秒から数分）後の PPI 波浪面、ひいては、遭遇個別波高の予測が原理的に可能であることを、数値シミュレーションで既に示していたが、今回の海上試験例により実際にも概略可能であることを示した。なお実海域での例示は世界でも初めてである。
- 2). 本波浪面予測法は、レーダポイント（即ち本船位置）を含まない PPI 画像解析範囲での方向スペクトル解析（位相も含む組成波解析）から、本来は得られないレーダポイントでの波浪面も再構成できるという利点がある。

ただし、全体の定量的な一致度など、更に詳細な比較については、第二報以降で示す予定である。また使用した船の海象に対する運航制限等から、有義波高が 3m 以上のケースについての実証も不十分であり、大型船を使用しての実証も検討したいと考えている。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興機構の平成 22 年度研究成果最適展開支援事業、および平成 23 年度研究成果最適展開支援プログラム「波浪予測警報機能付小型船舶用レーダ技術の開発」として実施された研究開発であることを記して謝意を表したい。また水産総合研究センター水産工学研究所の寺田大介氏、漁業調査船「たか丸」の平井船長他乗員の方々には海上実験でご協力頂いた。横浜国立大学産学連携推進本部の西川鈴二産学官連携コーディネーターには支援を賜った。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1). 落合徳臣, 茂在寅男: レーダの理論と実際, 海文堂, 1959.
- 2). 第 132 研究部会: 実船搭載用波浪計に関する研究, 日本造船研究協会報告書, 1975.
- 3). MIROS 社: AS:SM-050 Wave and Current Radar Mk III, <http://www.miros.no/>.
- 4). 林昌奎: マイクロ波ドップラーレーダによる実験水槽波浪観測, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 6 号, pp. 65-73, 2007.
- 5). 林昌奎: 連続波ドップラーレーダによる海洋波浪観測と波浪観測に及ぼすレーダ照射の影響, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 8 号, pp. 61-69, 2008.
- 6). 西村 浩二, 平山 次清, ノミヤマ デニス・アミルトン, 平川 嘉昭, 高山 武彦: 船用レーダーと船体運動シミュレーション活用による避波操船システム, 日本造船学会講演会論文集, 第 4 号, pp91-92, 2004.
- 7). 西村 浩二, 平山 次清, 高山 武彦, 平川 嘉昭, ノミヤマ デニス アミルトン: 波浪中旋回時の非定常横揺れについて-II: 波浪レーダーを用いた遭遇波浪予測に基づく船体運動シミュレーション, 日本航海学会論文集, 第 112 号, pp307-314, 2005.
- 8). 平山 次清, 平川 嘉昭, ノミヤマ デニス・アミルトン, 西村 浩二, 高山 武彦: 船用レーダーによる出会い個別波の識別と予測について, 日本造船学会講演会論文集, 第 5 号, pp87-88, 2005.
- 9). Nieto, Borge JC, Soares CG.: Analysis of directional wave field using X-band navigation radar. Coastal Engineering 40, pp375-391, 2000.
- 10). Takase Fabio K., Hirayama Tsugukiyo : Evaluation of Marine Wave Radar(Part I) : Fundamental Considerations and Numerical Generation of Radar Image, 日本造船学会論文集, 第 187 号, pp85-92, 2000.
- 11). Takase Fabio K., Hirayama Tsugukiyo, Park Seung Geun : Evaluation of Marine Wave Radar (Part II) - Wave Parameters from Radar Images -, 日本造船学会論文集, 第 188 巻, pp225-237, 2000.
- 12). 平山 次清, 朴 承根, 高瀬 ファビオ・カワオカ, 宮川 清, 高山 武彦: 船用レーダを利用した現況波浪情報取得法について, 日本水産工学会学術講演会講演論文集, 第 13 巻, pp147-150, 2001.
- 13). 平山 次清, 朴 承根, 平川 嘉昭, 高山 武彦: 船用レーダーの波浪計化 ―ロバストな新システムの提案・試行, 日本造船学会論文集, 第 191 号, pp51-56, 2002.
- 14). Nomiyama Denis Hamilton, Hirayama Tsugukiyo : Numerical Simulation Applied to Real-time Ocean Wave Analysis : Wave Radar, 日本造船学会講演会論文集, 第 1 号, pp5-6, 2003.
- 15). Nomiyama Denis Hamilton., Hirayama Tsugukiyo : Evaluation of marine radar as an ocean-wave-field detector through full numerical simulation, Journal of marine science and technology, 第 8 巻, 第 2 号, pp88-98, 2003.
- 16). Nomiyama Denis Hamilton, Hirayama Tsugukiyo, Takayama Takehiko, Hirakawa Yoshiaki, Nishimura Kouji, Kabuto Daigo : Wave-Field-Detection by the Marine Radar on a Small Ship, 日本造船学会講演会論文集, 第 2 号, pp139-140, 2003.
- 17). 平川 嘉昭, 高山 武彦, 平山 次清, 西村 浩二: 超小型方向波浪ブイの近距離送信型への改良と計測例, 関西造船協会講演概要集, 第 21 号, pp63-66, 2003.