航海用レーダとレーダ・トランスポンダを使用した 新しい海難救助システムのシミュレーション

末内 潔*・古東 啓吾**・矢島 武***

A Computer Simulation of a New Marine Search and Rescue System
Utilizing the Marine Radar and a Radar Transponder

Kiyoshi SUEUCHI, Keigo KOTOH and Takeshi YAJIMA

Abstract

This paper reports a computer simulation of a new marine search and rescue system, which is applicable under any weather condition, utilizing the marine radar and radar transponder-SART (Search And Rescue Transponder). The purpose of this simulation is to study the relationship between the search distance and consistency of recognition of the new system under various circumstances. Based on the results obtained from this simulation, the performance of this now can be said:

1. the maximum search distance is 13 nautical miles under condition of Beaufort Scale 8 and Sea State 7, and
2. 10% consistency of recognition under any heavy weather and sea condition is indicated within 10 nautical miles in radius.

Also, the simulation results under the same sea conditions as those of the sea trials which were carried out at not so heavy weather conditions coincide with the actual results.

1. はじめに

現在の海難救助システムにおいては、在来通信による遭難者のSOS信号、または2MHzの遭難位置通報送信機(EPIRB)に対する救助船の方向探知機による遭難方位検出をベースに遭難海域に急行し、捜索者が双眼鏡、または目視で遭難者を捜索・救出している。荒天、濃霧、夜間などの場合、漂流している微小な目標物体である遭難者の発見はむずかしく、またその効率の良い。そこで救助船の航海用レーダを利用し、遭難者が新規開発された“捜索救助用レーダ・トランスポンダ(SART=Search And Rescue Transponder)”を使用する新しいレーダ・ロケーティング・システムが提案されている。このシステムの有効性は、すでに海上実験により検証されているが、危険を伴う海象・気象の悪条件の場合は実験による確認が困難であるので、シミュレーションにより検証する以外にない。シミュレーションの概略は口頭による報告⁽¹⁾が行われたが、本論文ではシミュレーションの核心をなすモデル構築、ならびにシミュレーションの結果について述べる。

2. 新しい海難救助システムの概要

レーダを使用する新しい捜索・救助システム(以下“新システム”)は、GMDSS(Global Maritime Distress and Safety System)のロケーティングに使用されるもので、救助船は既存の航海用レーダを利用し、一方で遭

* 正会員 中部大学(〒487 春日井市松本町1200)

** 正会員 三菱電機株式会社通信機製作所(〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)

*** 正会員 三菱電機株式会社コンピュータ製作所(〒247 鎌倉市上町屋325)

図1 新しい海難救助システムのモデル

難者がSARTを使用する場合(図1), 遭難者の位置と方位を図2に示すようにレーダのPPIスコープ(以下“PPI”)上に直接表示しようとするものである。

SARTは超小型のマイクロ波送受信装置である。遭難者がこれを携帯し、電源をONにして受信待ちのところへ、救助船からレーダ信号が入力されると自動的に応答信号を発信する。この信号をレーダが受信すると、PPIの一般映像の上に20点などの多輝点列として遭難者の位置と方位を表示する。ここで遭難者の位置は、多輝点列のうちでPPIの中心(救助船の自船位置)にもっとも近い第1点である(図2)。なおPPIでの多輝点列は救助船が遭難者に接近するに従って次第に同心円弧状に広がり、0.5海里以内に到達すると同心円に変化する。救助船はこの映像変化によって、減速、停船などの操船の情報を得、最終的には目視距離に接近し、肉眼で遭難者を発見・救出する。なお、このシステムでレーダとSARTの使用周波数帯がXバンド(9GHz)であるので、この周波数帯の電波の直進性はシミュレーション・モデル構築での基本条件の一つとなる。

3. 問題

救助船のレーダと遭難者の作動するSARTで構成される新システムのロケーティング・システムとしての有効性を、定量的に把握することが必要である。そこで問題をつぎのように設定する。

“種々の海象・気象条件のもとで、救助船のレーダと遭難者の作動するSARTの間の距離が、いくらのときに、どれぐらいの割合で遭難者を発見できるか”。

現在のロケーティング・システムでは、救助船に乗船している数名の捜索者のうちの何名が、双眼鏡、または目視で漂流中の遭難者を発見できるか、すなわち、発見確率を有効性の尺度としている。この“どれぐらいの割合で発見できるか”を、“現認性(Consistency of Recognition)”(Cr)とし、捜索する距離の関数であると考え。さらに、ここで述べる新システムではこの考え方を発展させて、レーダ・オペレータがレーダ・アンテナの何回転に何回、PPI上の多輝点列映像として漂流中の遭難者を捕捉できるかを“現認性”と定義する。

図2 レーダPPIスコープの映像

この場合、観測者の映像発見の過誤は電波信号のPPI上での残像効果のため、現在のシステムに比べて問題にならないが、システム自体のもつ偶然変動が問題となる。すなわち、この新システムが種々の海象・気象条件による物理的な環境のなかで、SART応答信号をPPI上の映像として形成できるかである。それは、このシステムでの使用電波の直進性のため、波浪によってレーダとSART両アンテナが動揺して受信不能になる、海上電波伝搬のため海面反射波の干渉などによりSARTの応答信号が減衰してレーダの受信感度に達しない、波頂で放射信号が遮断される、などのことが“海”という環境条件のなかでは発生して、現認性に影響するからである。

このような複雑な環境のなかで、海象・気象条件の比較的厳しくない場合は、すでに海上実験により有効性が確認されているが、海難事故の多発する海象・気象条件の悪い場合の検証は、安全上実験することが困難であるので、シミュレーションで評価する以外に方法がない。その場合、このシミュレーション・モデルを構築するためには、波浪状態、救助船と遭難者の波浪に応答した動揺状態、その動揺状態に基づくレーダおよびSART両アンテナの空間座標、電波伝搬の幾何学的関係（光学的見通し距離、および放射信号ビームの相互到達の可能性）、SARTの応答信号の海面反射波の逆位相干渉などによる電力減衰を含めたレーダ受信機到達電力とレーダ受信感度との関係、ならびに波頂による放射信号の遮断などの諸点を考慮しなければならない。

なお、本論文では、遭難者は救命いかだ（以下“イカダ”）に搭乗し、その天幕頂部にSARTをとりつけているものとする。

4. 数 学 モ デ ル

前節の問題と要件をシミュレーション・モデルとして構築するため、数学モデルをつぎのように考える。

4.1 波 浪

この新システムのもっとも重要な環境条件の一つである波浪状態を、海象・気象条件が与えられた場合のエネルギー・スペクトル・モデルを使用して、2次元不規則波として、つぎのように取扱う。

1) 海象・気象条件：このシミュレーションの環境条件のパラメータは海象・気象条件であって、ビューフォート風力階級（以下“風力階級”）と波浪階級で与えられるが、理論的には風速、波の平均周期、有義波高、およびそれに対応する波浪のスペクトルで定義される^{(2)~(13)}。なお、風力階級、ならびに波浪階級に対する風速、波の平均周期、および有義波高の関係は表1⁽¹²⁾⁽¹³⁾に与えられているので、それに準拠する。

表1 ビューフォート風力階級と波の特性値

ビューフォート 風力階級	相当風速 (m/sec)	計 算 値 (2)(3)			
		風 速 (m/sec) 仮 定	平均波周期 (sec)	有義波高 (m)	
5 疾 風	8.0 ~ 10.7	9.4	6.2	2.6	
6 雄 風	10.8 ~ 13.8	12.4	7.6	3.9	
7 強 風	13.9 ~ 17.1	15.5	8.9	5.3	
8 疾強風	17.2 ~ 20.7	18.9	10.3	7.1	
9 大強風	20.8 ~ 24.4	22.6	11.7	9.2	
10 全強風	24.5 ~ 28.4	26.4	13.1	11.5	

2) 風、および波浪の方向：海上での風の方角は波の方角と同じとする。

3) 波浪のスペクトル：一般に海洋の波浪は不規則波であって、海面のある座標点 x における波の高さの時間的な変化 $\zeta(t)$ は、成分波 $\zeta_i \cos(\omega_i t + (\omega_i^2/g)x + \varepsilon_i)$ を重畳して、つぎの式で表わされる。

$$\zeta(x, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \zeta_i \cos(\omega_i t + (\omega_i^2/g)x + \varepsilon_i) \quad (1)$$

ただし ζ_i ：成分波 i の振幅、 $\omega_i = 2\pi i/T$ ：成分波 i の角周波数、 T ：周期、 $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ ：重力加速度、 ε_i ： $[0 \leq \varepsilon_i < 2\pi]$ の間で全くランダムに分布する成分波 i の位相。

ここで振幅 ζ_i は成分波 $i \rightarrow \infty$ において無限小である。

式(1)の2次元不規則波 $\zeta(t)$ は、定常ガウス過程によって近似でき、かつエルゴード性が成立すると仮定すると、エネルギー・スペクトル $S(\omega)$ を $[0 \leq \omega < \infty]$ について定義することが出来る^{(5)~(8)}。この $S(\omega)$ には、つぎのISSCによるModified Moskowitz-Pierson型スペクトル算式^{(9)~(13)}を用いる。

$$S(\omega) = 0.11 H_{1/3}^2 \frac{T_W}{2\pi} \left(\frac{T_W \omega}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{T_W \omega}{2\pi} \right)^{-4} \right\} \quad [\text{m}^2/\text{sec}] \quad (2)$$

ただし ω ：成分波の角周波数、 $H_{1/3}$ ：有義波高[m]、 T_W ：平均波周期[sec]、 $H_{1/3}$ および T_W は海象・気象

条件について与えられる。

Willard J. Pierson, Jr. 等によれば, 式(1)の $\zeta(t)$ は次式となる^{(2)~(8)}。

$$\zeta(x, t) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} \left[\sum_{i=0}^N \cos(\omega_i t + (\omega_i^2/g)x + \varepsilon_i) \times \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega} \right] \quad (3)$$

従って, 有義波高 $H_{1/3}$ と平均波周期 T_W を与えたとき, 波浪のスペクトル $S(\omega)$ を式(2)で計算し, $[0 \leq \varepsilon_i < 2\pi]$ に一様に分布する確率変数 ε_i により式(3)に従って不規則波を発生させることが出来る。

4.2 救助船の動揺応答

任意の時刻 t における救助船のレーダ・アンテナの座標を求めるために, 4.1 で発生した波浪に対する救助船の動揺応答をつぎのように求める。

1) 救助船の動揺に対する考え方: 一般に船体動揺は, 船の重心 G を原点として船首方向を x 軸, 船体の x 軸に直角横方向の平面座標軸を y 軸, 船体の垂直縦方向を z 軸とする 3 次元座標軸を考えると,

線運動: x 軸方向の前後揺れ (surge), y 軸方向の左右揺れ (sway), z 軸方向の上下揺れ (heave)

回転運動: x 軸の周りの横揺れ (roll), y 軸の周りの縦揺れ (pitch), z 軸の周りの船首揺れ (yaw) の複合運動⁽¹³⁾であるが, このうちレーダ・アンテナの高さを左右するのは, x 軸の周りの回転運動の横揺れ, y 軸の周りの回転運動の縦揺れ, z 軸方向の線運動の上下揺れであるので, この 3 運動だけを考えることにする。

2) 不規則波中における救助船の動揺応答: 固有の船体動揺特性をもつ救助船が, 式(2)のエネルギー・スペクトル $S(\omega)$ で与えられる不規則波浪のなかにあるときの船体の横揺れ, 縦揺れ, 上下揺れに対する動揺応答は表 2 のようになる。

表 2 出合角度 χ の波を受けた場合の船体動揺応答^{(3), (5), (7), (8), (13)}

	横揺れ	縦揺れ	上下揺れ
船体動揺特性	$\frac{\varphi_a}{\theta_w} = f_r(\omega F_n, \chi)$	$\frac{\theta_a}{\theta_w} = f_p(\omega F_n, \chi)$	$\frac{z_a}{\zeta_a} = f_h(\omega F_n, \chi)$
波のエネルギー・スペクトル $S(\omega)$ に対する船体の動揺応答	$S_r(\omega) = \left(\frac{\varphi_a}{\theta_w} \right)^2 \left(\frac{\omega^2}{g} \right)^2 S(\omega)$	$S_p(\omega) = \left(\frac{\theta_a}{\theta_w} \right)^2 \left(\frac{\omega^2}{g} \right)^2 S(\omega)$	$S_h(\omega) = \left(\frac{z_a}{\zeta_a} \right)^2 S(\omega)$
出合角度 χ の波を受けた場合の船体の動揺応答	$S_r(\omega_e) = \frac{S_r(\omega)}{1 - \frac{2\omega}{g} V \cos \chi}$	$S_p(\omega_e) = \frac{S_p(\omega)}{1 - \frac{2\omega}{g} V \cos \chi}$	$S_h(\omega_e) = \frac{S_h(\omega)}{1 - \frac{2\omega}{g} V \cos \chi}$
船体動揺の位相	$\phi_r = \Phi_r(\omega F_n, \chi)$	$\phi_p = \Phi_p(\omega F_n, \chi)$	$\phi_h = \Phi_h(\omega F_n, \chi)$

注. φ_a : 横揺れ角, θ_a : 縦揺れ角, z_a : 上下揺れ変位, θ_w : $2\pi\zeta_a/\lambda_w$: 最大波傾斜角
 ζ_a : 波の振幅, $F_n = V/\sqrt{gL_0}$: Froude 数, χ : 出合角度, $\omega = \sqrt{2\pi g/\lambda_w} = K\sqrt{L_0/\lambda_w}$: 波の角
 周波数, V : 船速, L_0 : 船体の長さ[m], $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$, K : 定数,
 λ_w : 波の波長[m], ω_e : 出合い角周波数

3) 任意の時刻 t における船体動揺: 任意の時刻 t における不規則波中の船体の動揺状態は, 船体の規則波成分に対する動揺応答(表 2)を重畳して, つぎのように与えられる。

$$\text{横揺れ} : \varphi(t) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} \left[\sum_{i=0}^N \sqrt{2S_r(\omega_{ei})\Delta\omega_{ei}} \cos(\omega_{ei}t + \phi_{ri} + \varepsilon_i) \right] + \varphi_s(U^2/U_s^2) \sin \chi \quad (4a)$$

$$\text{縦揺れ} : \theta(t) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} \left[\sum_{i=0}^N \sqrt{2S_p(\omega_{ei})\Delta\omega_{ei}} \cos(\omega_{ei}t + \phi_{pi} + \varepsilon_i) \right] \quad (4b)$$

$$\text{上下揺れ} : z(t) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} \left[\sum_{i=0}^N \sqrt{2S_h(\omega_{ei})\Delta\omega_{ei}} \cos(\omega_{ei}t + \phi_{hi} + \varepsilon_i) \right] \quad (4c)$$

ただし $\omega_{ei} = \omega_i \{1 - (\omega_i/g)/V \cos \chi\}$: 成分波 i の出合周波数, $\Delta\omega_{ei} = |1 - 2\omega_i(V/g) \cos \chi| \Delta\omega$: 成分波 i に対する出合周波数増分, ω_i : 成分波 i の角周波数, $\Delta\omega$: 成分波に対する角周波数増分, $\varphi_s (U^2/U_s^2) \sin \chi$: 船体が風圧によって傾斜することに対する横揺れの補正項, φ_s : 基準風速 U における船体の定傾斜, U : 風速。

4.3 遭難者の動揺状態

遭難者はイカダにより漂流していて、イカダの天幕頂部に SART を装備している。この場合、

1. イカダの底面は平面であって、イカダは波の傾斜に沿って漂流する⁽¹⁵⁾。
2. SART のアンテナはイカダの底面に対して垂直——従って、波の傾斜に垂直——である。
3. イカダの静水時の底面の中心座標を $x=0, y=0, z=0$ とし、波の方向を x 軸とする。

と仮定し、遭難者の動揺状態をイカダの波に対する動揺応答として以下のように取扱う。

1) イカダの近傍の波の高さ：このシミュレーションで検討する距離 R ($0.5 \leq R < 15$ 海里) では、波の平均波長 λ_w と比較して $R \gg \lambda_w$ であるので、救助船の位置における波とイカダの位置における波は相関がないものと考え、イカダの近傍で x 軸上 x の地点における波の高さは、式(1)からつぎのように与えられる。

$$z = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} \left[\sum_{i=0}^N \sqrt{2S(\omega_i) \Delta\omega} \cos(\omega_i t + (\omega_i^2/g)x + \varepsilon_{wi}) \right] \quad (5)$$

ただし $\varepsilon_{wi} : [0 \leq \varepsilon_{wi} < 2\pi]$ の間でランダムに分布する成分波 i の位相, $\varepsilon_i \neq \varepsilon_{wi}$

2) イカダの底面の中心の座標は、式(5)で $x=0, z=z_{w0}$ とすれば、 z_{w0} は次式で与えられる。

$$z_{w0} = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} \left[\sum_{i=0}^N \sqrt{2S(\omega_i) \Delta\omega} \cos(\omega_i t + \varepsilon_{wi}) \right] \quad (6)$$

3) イカダの中心における波の傾斜は、式(5)からつぎのようになる。

$$\vartheta = \tan^{-1} \left[\lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} \sum_{i=0}^N \sqrt{2S(\omega_i) \Delta\omega} (\omega_i^2/g) \cos\{\omega_i t + \varepsilon_{wi} + (\pi/2)\} \right] \quad (7)$$

ここで $0 \leq \vartheta < \pi/2$ ならば $\xi = \vartheta$, $\pi/2 < \vartheta < \pi$ ならば $\xi = \pi - \vartheta$ (8)

4) SART のアンテナ座標は上述の関係からつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{高さ方向: } z_T &= h_T \cos \xi + z_{w0} \\ x \text{ 軸方向: } x_T &= h_T \sin \xi \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし h_T : SART アンテナのイカダ底面の中心からの高さ。

4.4 アンテナの空間座標

レーダおよび SART の両アンテナの空間座標を求めるため、先づつぎの条件を仮定する。

1. システムの三次元座標系の原点 O を、救助船の静水面における船体中央 (Midship) を通る垂線と、水線面 (Water Line を含む平面) との交点に設定する。
2. 原点 O を通り、イカダの底面の中心 (O' とする) を結ぶ座標軸を X 軸とする。
3. 原点 O を通り、 X 軸に直角の平面座標軸を Y 軸とする。
4. 原点を通る垂直座標軸を Z 軸とする。

式(4)の救助船の動揺状態におけるレーダ・アンテナと、4.3 のイカダの動揺状態での SART アンテナの相対的な座標関係は、つぎのようになる (図3)。

レーダ・アンテナ座標 (X_R, Y_R, Z_R)

$$\left. \begin{aligned} X_R &= \sqrt{(a \cos \theta - h_R \sin \theta \cos \varphi)^2 + h_R^2 \sin^2 \varphi} \cos(\phi + \delta) - b \cos \phi \\ Y_R &= \sqrt{(a \cos \theta - h_R \sin \theta \cos \varphi)^2 + h_R^2 \sin^2 \varphi} \sin(\phi + \delta) - b \sin \phi \\ Z_R &= h_R \cos \theta \cos \varphi + a \sin \theta + z_h - z_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ただし a : レーダ・アンテナの重心からの距離, b : 重心と Z 軸との距離, h_R : レーダ・アンテナの重心面からの高さ, z_0 : 重心面と水線面の間の距離, $\varphi = \varphi(t)$: 時刻 t における救助船の横揺れ角度 (式(4a)による), $\theta = \theta(t)$: 時刻 t における救助船の縦揺れ角度 (式(4b)による), $z_h = z(t)$: 時刻 t における救助船の上下揺れ変位 (式(4c)による), ϕ : 救助船の進行方向から見たイカダの方位, $\delta = \tan^{-1} [h_R \sin \varphi / (a \cos \theta - h_R \sin \theta \cos \varphi)]$ 。

$$\left. \begin{aligned} X_T &= R - h_T \sin \xi \cos(\chi - \phi) \\ Y_T &= h_T \sin \xi \sin(\chi - \phi) \\ Z_T &= h_T \cos \xi + z_{wo} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$
$$R_{op}=2.22 \times 1852(\sqrt{Z_R} + \sqrt{Z_T}) \quad (12)$$
$$R_0 = \sqrt{(X_R - X_T)^2 + (Y_R - Y_T)^2} \quad (13)$$
$$R_0 < R_{op} \quad (14)$$

(iii) θ_R および θ_T は, つぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_R &= |\sin^{-1} \{[(X_R - X_{RO})l + (Y_R - Y_{RO})m + (Z_R - Z_{RO})n]/h_R\}| \\ \theta_T &= |\sin^{-1} \{[(X_T - R)l + Y_T m + (Z_T - Z_{w0})n]/h_T\}| \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ただし (X_{RO}, Y_{RO}, Z_{RO}) : レーダ・アンテナ高の基点（水線面との交点）の座標、

$$X_{RO} = a \cos \theta \cos \phi - b \cos \phi, \quad Y_{RO} = a \cos \theta \sin \phi - b \sin \phi, \quad Z_{RO} = a \sin \theta + z_h - z_o,$$

l, m, n : 直線 L の方向余弦。

(iv) レーダが漂流中の遭難者を捕捉するためには、つぎの関係が同時に成立することが必要である。

$$\theta_R \leq \theta_{RO} \quad \text{かつ} \quad \theta_T \leq \theta_{TO} \quad (16)$$

4.6 SARTの応答信号のレーダ受信機への到達電力

この新システムでは、一方向電波伝搬⁽¹⁶⁾が成立することが必要である。そのためには、レーダとSARTの間で4.5までの条件を満足すれば、SARTの受信感度に対してレーダの放射信号電力が十分に大きく、SARTは必ず自動応答するものとする、レーダに到達したSARTの応答信号電力 (Q_R [dB]) がレーダの受信感度 (Q_0 [dB]) 以上、すなわち、つぎの条件を満たすことが必要である。

$$Q_R > Q_0 \quad (17)$$

しかし、SARTの応答信号をレーダが受信する場合、海上の電波伝搬であるので、自由空間のそれとは異なり、見通しの直接波と海面での反射波が干渉して両アンテナ間の距離によっては逆位相となるなど、レーダが受信するSART応答信号の電力が著しく減衰することがある。 Q_R はレーダ方程式からつぎの式で与えられる。

$$Q_R = Q_T + G_T - L_T + G_R - L_R - L_S + F_S - L_A \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

ただし [SART] Q_T : 送信機出力, G_T : アンテナ利得, L_T : 送信機—アンテナ間送信信号給電損失; [レーダ] G_R : アンテナ利得, L_R : アンテナ—受信機間受信信号給電損失; [その他] L_S : 自由空間における伝搬損失, F_S : 伝搬途中での直接波と海面反射波の干渉によるレーダ受信電力への影響, L_A : 放射信号電力の大気状態による減衰。

4.7 波頂による放射信号の遮断

SARTの応答信号がレーダの受信感度を満足しても、救助船までの間の波頂によって遮断されて、レーダでの受信が不成功となることがある。そこで、波頂による信号遮断をつぎのように検討する。

(i) レーダ、およびSARTの各アンテナの頂点を $P_R (X_R, Y_R, Z_R)$, $P_T (X_T, Y_T, Z_T)$ とする。

(ii) システムの座標原点 O とイカダの底面の中心 O' を結ぶ直線 (X 軸とする) に沿って、 P_T の X 座標 X_T を基点とした各点の X 座標を次式とする。

$$X_j = X_T - R - j \Delta X \quad (19)$$

ただし $j=1, \dots, n$, $\Delta X = (1/10) \lambda_w$, λ_w : シミュレーション実行条件における波浪の波長。

(iii) X_j における波の高さを次式で計算し、その最大値を波頂とする。

$$Z_j = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta \omega \rightarrow 0}} \left[\sum_{i=0}^N \sqrt{2S(\omega_i) \Delta \omega} \cos \{ \omega_i t + (\omega_i^2/g) X_j \cos(\pi - (\chi - \phi)) + \varepsilon_{wi} \} \right] \quad (20)$$

(iv) 式(20)の波の高さの計算において、 O' 点から第 k 番目の波頂点を P_k (ただし $k=1, \dots, K$) とすれば、波頂 $P_k (X_k, Z_k)$ と $P_T (X_T, Z_T)$ を結ぶ直線が水平面となす角は次式となる。

$$\beta_k = \tan^{-1} \{ (Z_k - Z_T) / (X_k - X_T) \} \quad (21)$$

(v) また、 P_T と P_R を結ぶ直線が水平面となす角は次式で与えられる。

$$\beta_T = \tan^{-1} \{ (Z_R - Z_T) / (X_R - X_T) \} \quad (22)$$

(vi) 従って、SARTの応答信号が波頂によって遮断されず、レーダとSARTの間で放射信号の相互到達が行われるためには、つぎの条件を満足することが必要である。

$$\beta_k \leq \beta_T \quad (23)$$

5. シミュレーション・プログラム

前節の数学モデルに従って、シミュレーション・プログラムをつぎのように構成する (図4)。

1) 条件の設定: シミュレーションを行うために必要な初期条件、ならびにデータをつぎのように与える。

救助船船体諸元, 救助船の動揺特性, レーダ諸元, SART諸元, 海象・気象条件, 救助船・イカダ・波の間

の方位関係, その他。

2) アンテナ座標計算: 前項のデータに基づき波浪を発生し, それに対する救助船, およびイカダの動揺応答を求め, レーダと SART 両アンテナの座標をつぎの順序で算出する。

(i) 波浪のスペクトル: Modified Moskowitz-Pierson 型の波浪のエネルギー・スペクトルを計算する。

(ii) 救助船の動揺状態: 波浪のスペクトルに対する救助船の動揺応答を求め, それを救助船が出合角度 χ で進行する場合の動揺応答に変換し, 任意の時刻の救助船の動揺状態を計算する。

(iii) イカダの位置: (i) のエネルギー・スペクトルをもつ不規則波に応答したイカダの位置を求める。

(iv) アンテナ座標: (ii) で求めた救助船の動揺状態に基づくレーダ・アンテナ座標と, (iii) で求めたイカダの波浪上の位置における SART アンテナ座標をそれぞれ計算する。

3) 搜索成功の検討: 前項で求めた両アンテナの相対的座標関係において, 不規則波の環境下のレーダと SART の間の電波伝搬の成否を, 光学的見通し距離, 放射信号ビームの幾何学的相互到達の可能性, SART の応答信号のレーダ受信機到達電力レベルと受信感度の関係, 波頂による放射信号遮断についてしらべる。

4) “搜索距離一現認性” の計算: シミュレーションを多数の時刻について行い, 搜索成否の検討結果に基づき, 各搜索距離ごとに 現認性 (C_R) = 搜索成功回数 / シミュレーション回数 を計算する。

5) “搜索距離一現認性” の出力: 前項までの結果を計算結果として出力する。

6. シミュレーション結果

前節に述べたシミュレーション・プログラムを使用して, 表 3 の条件によりつぎのことを行った。

1) 新システムの有効性を確認するため, 風力階級 8 (風速 18.9 m/sec), 波浪階級 7 (有義波高 7.1 m, 平均波周期 10.3 sec) の荒天下の状態を中心としたシミュレーション,

2) 実際の海上実験結果と, それと同様な海象・気象条件下でのシミュレーション結果との比較。

表 3 シミュレーションの条件

	Case 1	Case 2	Case 3						
1. 海象・気象条件： ビューフォート風力階級 風速 (m/sec) 波浪階級 有義波高(m) 平均波周期 (sec)	(海上実験と同様な条件) — 8.0 — 0.42 2.5	*** 6 12.4 5 3.9 7.6	*** 8 18.9 7 7.1 10.3						
2. 救助船： 船速 (ノット) Froude 数 風速 2.6 m/sec における定傾斜 レーダ アンテナ高(m) レーダ受信電力 受信感度レベル (dBm) レーダ垂直放射パターンの半電力幅に対する角度	16.5 0.350 -6° 14.5 -94.5 +10°	9.43 0.200 -6° 14.5 -94.5 +10°	9.43 0.200 -6° 14.5 -94.5 +10°						
3. 救命いかだ SART アンテナ高(m) 垂直放射パターンの半電力幅に対する角度	1.56 +20°	1.56 +20°	1.56 +20°						
4. 方 位									
出合角度 (X)	90°	150°	180°	90°	150°	180°	90°	150°	180°
救命いかだの方位 (φ)									
-60°	—	—	—	—	—	—	—	*	—
-30°	—	—	—	—	*	—	—	*	—
0°	**	*	—	**	*	*	**	*	*
30°	—	—	—	—	—	—	*	*	*
60°	—	—	—	—	**	—	*	**	*
90°	—	—	—	*	*	**	*	*	**

注. * および ** はシミュレーションを実施した組合せを示す。* は ϕ と χ の関係が 90° である。*** は表 2 計算値による。

図 4 シミュレーション・プログラムの構成

なお、レーダ・アンテナ高：14.5m、レーダ・スキャンニング回数：27回/分、SARTアンテナ高：1.56m、放射信号電力の大気状態による減衰（式(18)の L_A ）を0とした。

6.1 シミュレーションの実施例

図5は風力階級8、波浪階級7、船速 $V=9.43$ ノットにおけるシミュレーション結果である（条件：表3）。搜索距離—現認性の関係において、現認性が5%の搜索距離を“最大搜索距離”と定義すれば、図5の結果では最大搜索距離は13海里である。

図5 シミュレーション結果（ビューフォート風力階級8，波浪階級7）

6.2 シミュレーション結果の検討

シミュレーションを表3の条件で行った結果、つぎのような諸点が明らかになった。

1) 海象・気象条件の影響：海が荒れるほど現認性は低くなるが、最大搜索距離は伸びる（図6）。この原因は海が荒れた場合、つぎのように考えられる。

(i) 波浪に対する動揺応答により両アンテナの傾斜が大きくなったり、アンテナ位置が沈下するため、光学的見通し距離が短くなる、放射信号ビームの幾何学的相互到達の条件を満足しない、波頂による放射信号の遮断が発生する、などで電波伝搬が実現しない場合が多くなり現認性が低下する。その状況の一例を図7に示す。

(ii) その反面、波高が高くなり、救助船とイカダが波頂付近に位置することがあれば、両方のアンテナ高が高くなり、光学的見通し距離が長くなるため、最大搜索距離（現認性5%の距離）が伸

注 出合角度 $\chi=150^\circ$ 、イカダ方位 $\phi=0^\circ$ *は風速8m/sec、有義波高0.42m
図6 海が荒れるほど現認性は下るが、最大搜索距離は伸びる

びることがある。すなわち、式(12)で Z_R および Z_T が高くなれば R_{op} が伸びて、式(14)から両アンテナの間の距離 R_0 を長い距離まで許容することになる。

2) 出合角度 χ とイカダ方位 ϕ の関係：漂流しているイカダが波の進行方向と直角方向 ($\chi - \phi = \pi/2$) の場合、現認性がもっとも高くなっている (図5)。これは図7 ($\chi = 150^\circ$ の場合) に示すように、 $\phi = 60^\circ$ ($\chi - \phi = 90^\circ$) の場合のみ、波頂により放射信号遮断が発生しない (搜索不成功率 = 0) ことによるものである。

3) 荒天条件での10%現認性の搜索距離は10海里：風力階級8、波浪階級7の荒天条件のもとでも、最大搜索距離は13海里であり、10%の現認性を確保する搜索距離は10海里となった (表4)。現認性10%とは、レーダ・スキャンニング10回に1回遭難者を捕捉できることであって、レーダ・スキャンニングが毎分22回の場合、27.3秒に1回捕捉できることになる。

6.3 海上実験とシミュレーション結果の比較

この新システムの有効性を評価するための海上実験が昭和52年12月、伊勢湾と遠州灘で行われた。この実験での海象・気象条件は、風速 1~8 m/sec (風力階級 2~4)、有義波高 10~55cm (波浪階級 2)、快晴であった。そこで筆者等はこのモデルを使用して実験と同様な海象・気象条件—風速 8m/sec、有義波高0.42m—でシミュレーションを行い比較した結果は、図8の搜索距離—現認性曲線のようにほぼ一致をみた。

図8で搜索距離8~8.5海里付近に曲線のくぼみが見られる。これはSARTの応答信号がレーダへの伝搬途中で海面で反射し、この反射波と直接波が逆位相で重畳 (海面が鏡面に近いほど反射波の影響は強くなる) して、レーダ到達電力がレーダの受信感度以下となり、レーダのPPI上に多輝点列を表示しなかったためである。

7. むすび

以上、救助船がレーダを利用して搜索し、遭難者がそれに応答するSARTを使用して漂流する場合の新しいレーダ・ロケーティング・システムとしての有効性を評価するため、種々の海象・気象条件についてシミュレーションを行い、その数学モデルとシミュレーションの結果について述べた。その結果、風力階級8、波浪階級7

図7 搜索不成功原因分析例

表4 シミュレーション結果：10海里における現認性

ϕ	風力/波浪階級	χ	6/2			8/7		
			90°	150°	180°	90°	150°	180°
-60°	—	—	—	—	—	—	15.7	—
-30°	—	—	—	40.5	—	—	17.2	—
0°	100.0	100.0	85.8	45.9	41.4	70.1	20.8	19.0
30°	—	—	—	—	—	22.7	26.0	20.5
60°	—	—	—	84.9	—	11.2	61.9	26.6
90°	—	—	20.2	48.3	86.7	10.0	19.6	70.7

注. χ : 出合角度

ϕ : イカダの方位

*は風速8m/sec、有義波高0.42m

の荒天条件のもとでも（ただし、レーダ・アンテナ高14.5m, SARTアンテナ高1.56m), 最大搜索距離（現認性5%）は13海里であり、現認性10%（レーダのPPI上に1分間に2回遭難者の位置と方向を多輝点列の映像として表示する）の搜索距離は10海里となった。このシミュレーションの結果、新製品や新システムの開発に対する技術要件とか、新システムの運用に関する留意点なども明らかにすることができた。

このシミュレーションについては、運輸省、郵政省、海上保安庁、(財)日本船用機器開発協会、(社)日本造船研究協会、東京大学、東京商船大学をは

じめ、官・学関係、海事関係諸団体の各位の御支援、ならびに京都大学名誉教授・関西大学教授 三根 久博士、運輸省船舶技術研究所運動性能部長 高石敬史博士の御指導をいただいたことに対し厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) Kiyoshi Sueuchi, Keigo Kotoh, and Takeshi Yajima: Simulation of Marine Search and Rescue Operations Using Newly Developed Radar Beacons, Proceedings of The 13th Annual Simulation Symposium (March 1980).
- (2) Willard J. Pierson and Wilbur Marks: The Power Spectrum Analysis of Ocean-Wave Records, Transactions of American Geophysical Union, Vol. 33, pp. 834-844 (1952).
- (3) M. St. Denis & W. J. Pierson, Jr.: On the Motions of Ships in Confused Seas, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 61, pp. 280-357 (1953).
- (4) Willard J. Pierson, Jr.: An Interpretation of the Observable Properties of "Sea" Waves in terms of the Energy Spectrum of the Gaussian Record, Transactions of American Geophysical Union, Vol. 35, pp. 747-757 (1954).
- (5) 山内保文: 応答理論と船体運動, 造船協会誌, No. 382, pp. 13-26 (昭36).
- (6) 山内保文: 海洋波及び船の応答解析, 磯部 孝編 "相関函数およびスペクトル" (1968) 東京大学出版会.
- (7) 山内保文: 海洋波中の応答, "耐航性に関するシンポジウム" (昭44) 日本造船学会.
- (8) 山内保文: 海洋波について (その2), 日本造船学会誌, No. 493, pp. 13-21 (昭45-7).
- (9) "Report of Committee on Environmental Conditions", Proceedings of Second International Ship Structure Congress-Delft (1964).
- (10) "Report of Committee on Environmental Conditions", Proceedings of Third International Ship Structure Congress-Oslo (1967).
- (11) Proceedings of 12th International Towing Tank Conference-Rome (1969).
- (12) 高石敬史, 吉野泰平, 高木又男, 斎藤公男: 一軸高速コンテナ船の斜め波中における動揺特性, 日本造船学会論文集, No. 129, pp. 67-81 (昭46-6).
- (13) K. J. Rawson & E. C. Tupper: Basic Ship Theory, Vol. 1 & Vol. 2, 2nd Ed. (1976).
- (14) 高城勇造: 航海力学とその応用 (昭50) 成山堂書店.
- (15) Osamu Nagata, Masayuki Tsuchiya and Osamu Miyata: Experimental Studies on the Stability of Inflatable Life Raft, Papers of Ship Research Institute, Tokyo, Japan, No. 56 (March 1979).

注, —●—: シミュレーション結果 (風速 8 m/sec, 有義波高 0.42 m, 船速 16.5 ノット, 出合角度 $\lambda = 150^\circ$, イカダ方位 $\phi = 0^\circ$)
—○—, —×—: 海上実験結果

図 8 シミュレーション結果と海上実験結果の比較

- (16) Merrill I. Skolnik, ed. : Radar Handbook, Chap. 2 (1970) McGraw-Hill, Inc..
- (17) Peter Beckmann and André Spizzichino : The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces (1963) Pergamon Press.

質 疑 応 答

林 尚吾：シミュレーション結果の一例の中に示されているビューフォート5の時の8マイル近辺にある現認性が低下している部分の理由は、海面反射波との干渉による受信電力の低下によるものですか。

末内 潔：御指摘のとおりであります。風速 8 m/sec, 有義波高 0.42m, 出合角度 $\chi=150^\circ$, イカダ方位 $\phi=0^\circ$, 船速 $V=16.5$ ノット, レーダ・アンテナ高 14.5m, SARTアンテナ高 1.56mでシミュレーションを行いました際の搜索不成功原因のデータでは、波頂による放射信号遮断が原因で8海里で7.9%, 8.5海里で17.5%などとなっております、図8に示したデータがそれであります。