橋によるレーダー偽像の理論的考察

鈴木 務* , 荒井 郁男* , 木村 小一**
 庄司 和民***, 飯島 幸人***, 杉崎 昭生***
 今津 隼馬***, 林 尚吾***

Theoretical Considerations in the Radar False Echoes Produced by a Bridge

Tsutomu SUZUKI, Ikuo ARAI, Koichi KIMURA,
 Kazutami SHOJI, Yukito IJIMA, Akio M. SUGISAKI,
 Hayama IMAZU and Shogo HAYASHI

Abstract

In a recent year, it has been pointed out that the steel bridges crossing over the waterways sometimes produce the false echoes. To determine whether such echoes cause navigational hazards or not, we must know the false-echo levels.

In this paper, we first get the radar equations for the false echoes, and point out the necessity of the radar cross section of a bridge to calculate the echo levels. Second, we consider theoretically how to calculate the radar cross section of the complex reflectors such as a bridge.

The calculated results of the radar cross section of a bridge agree approximately with the measured values obtained from Oshima-Ohashi Bridge.

1. はじめに

レーダーで橋を観測すると橋の形状が広がって見えたり、ひずんで見えたりする現象が見られる。このような場合も橋の形状の判別を誤ったり、橋のすぐそばにある他船が橋のエコーで隠されるなどの問題を生じるが、航海者にとって最も危険なのは偽像が航路上付近に生じ、他船のエコーを隠したり、他船と誤って判定しやすい場合である。このようなレーダー偽像に対し適切に対処するには橋による偽像レベルを定量的に把握することが必要となるが、この試みは過去に例がない。そこで、本文は橋によるレーダー偽像の受信電力レベルを理論的に求める方法を考察する。

2. 偽像発生メカニズム

図1のごとく船 S がレーダーアンテナを回転しながら橋に接近する場合を考える。アンテナの回転によってレーダービームが照射する橋の部分が順次左から右へと移動する。図1にはレーダービームが B 点を照射しているときを示す。 B 点に当てられた電波は橋から反射される。橋の構成材料は複雑な形状、配置をしており、単なる平面とは限らないので複雑な反射指向特性をもって電波が散乱する。いま橋への入射角 θ_i に対して、反射角 θ_r 方向に建物や山などの物標 T があると、その物標に反射電波が当たり、物標で反射され、再び橋で反射

* 正会員 電気通信大学（調布市調布ヶ丘 1-5-1）

** 正会員 運輸省電子航法研究所（三鷹市新川 6-38-1）

*** 正会員 東京商船大学（江東区越中島 2-1-6）

図 1 偽像発生とその強さの説明図

G_T : 送信アンテナ利得

A_R : 受信アンテナ実効開口面積

R_1 : 船と橋の照射点との距離

R_2 : 照射点と近傍物標との距離

σ_t : 物標のレーダー反射断面積

$\sigma_b(\theta_i, \theta_r)$: 入射角 θ_i , 反射角 θ_r における橋のレーダー反射断面積

$\sigma_b(\theta_r, \theta_i)$: 入射角 θ_r , 反射角 θ_i における橋のレーダー反射断面積

である。

実際には, $\sigma_b(\theta_i, \theta_r) \doteq \sigma_b(\theta_r, \theta_i)$

$$, A_R = \frac{\lambda_0^2 G_R}{4\pi}$$

λ_0 は使用電波の波長, G_R は受信アンテナの利得である。

図 2 に示すごとく現実には距離 R に比較してアンテナ高 h_1 や橋の高さ h_2 が小さいので, 海面で電波が反射して, 照射点 B では直接波と反射波との合成した電波が当たると考えられる。また, 逆経路で橋から反射した電波が船に戻る場合も同様に直接波と反射波の合成となる。橋と陸上との間でも, この

図 2 海面反射がある場合

されてから船上のレーダー受信機で受信される。この場合にアンテナは橋の B 点に向っているので, 偽像は船と B 点との延長上に生じ, B 点と物標 T との間の距離 R_2 と等しい距離だけ B 点から離れた地点に偽像を生じる。すなわち, レーダー指示器上には B 点の方向に船から (船と B 点との距離 R_1) + (B 点と物標との距離 R_2) の位置に偽像が現われる。アンテナの回転に従って照射点が B から橋上を次々と移動する。航路に近い方向にある橋の部分照射したときに生ずる偽像は最も注意を要するエコーと考えられる。

3. 偽像のレーダー方程式

図 1 に示す位置関係において船上 S において受信される偽像の受信電力は直接波のみについて考えると

$$P_r = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_R}{(4\pi)^4 \cdot R_1^4 \cdot R_2^4} \sigma_t \cdot \sigma_b(\theta_i, \theta_r) \times \sigma_b(\theta_r, \theta_i) \quad (w) \quad (1)$$

で表わされる。

P_T : レーダー送信電力

ような反射波干渉を考慮すると偽像電力のレーダー方程式は

$$P_r' = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_R}{(4\pi)^4 \cdot R_1^4 \cdot R_2^4} \cdot \sigma_t \cdot \sigma_b^2(\theta_i, \theta_r) \cdot 4^4 \\ \times \sin^4\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda_0 R_1}\right) \cdot \sin^4\left(\frac{2\pi h_2 h_3}{\lambda_0 R_2}\right) \quad (w) \quad (2)$$

となる。ここで h_1 は船のレーダーアンテナの高さ、 h_2 は橋の照射点の高さ、 h_3 は近傍物標の高さである。

(2) 式で示した偽像レベルは最大値において直接波のみによる偽像レベル P_r ((1) 式) より 4^4 倍すなわち 24 dB も多く受信されたことになる。もしも橋と物標との間の地上の反射点が陸上にあると、海面反射のように反射波が強くないので直接波のみについて考えればよく、船と橋との間の海面反射のみ干渉があるとする偽像電力 P_r'' は

$$P_r'' = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_R}{(4\pi)^4 \cdot R_1^4 \cdot R_2^4} \cdot \sigma_t \cdot \sigma_b^2(\theta_i, \theta_r) \cdot 4^2 \\ \times \sin^4\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda_0 R_1}\right) \quad (w) \quad (3)$$

となり、 P_r'' の最大値は直接波のみの 4^2 倍、すなわち 12 dB 高いレベルで受信される。

大島大橋（大島瀬戸）付近の観測において、偽像が出現したレベルと使用したレーダーの諸元から計算した偽像レベルを比較すると、船と橋との間の海面反射のみを考慮すればよいことが、判明したのでレーダー偽像レベルの計算には (3) 式を用いることにした。すなわち直接波レベルに 12 dB 加えた値を偽像レベルに採用する。そこで、最大値としては (3) 式より

$$P_r''' = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_R}{(4\pi)^4 \cdot R_1^4 \cdot R_2^4} \cdot \sigma_t \cdot \sigma_b^2(\theta_i, \theta_r) \cdot 4^2 \quad (w) \quad (4)$$

を偽像レベルの計算に使用することにした。

4. 橋のレーダー反射断面積

(4) 式を用いて偽像レベルを計算する場合に、 σ_t と σ_b 以外はレーダーの仕様と距離測定から求められる。物標の反射断面積 σ_t は個々の物標毎に入射角の関数となる。

そこで、橋の照射点近くにレーダーを設置して、物標毎に反射断面積を観測で求めた。地図上に近傍物標のレーダー反射断面積の強度分布を示したものをエコーレベルマップとよぶ。図3はエコーレベルマップをとる時の配置図を示す。橋の照射点付近に船を停船させ、船上レーダーで物標からの反射電力を観測する。例えば、物標 a からの反射電力を P_a とすると

$$P_a = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_R}{(4\pi)^2 \cdot R_a^4} \cdot \sigma_a \quad (5)$$

となる。(5) 式は σ_a の評価を厳しくするため、直接波のみの式を用いた*。

(5) 式より物標 a のレーダー反射断面積 σ_a は

$$\sigma_a = \frac{P_a \cdot (4\pi)^2 \cdot R_a^4}{P_T \cdot G_T \cdot A_R} \quad (\text{m}^2) \quad (6)$$

となる。受信電力 P_a と距離 R_a を観測すれば、その物標のレーダー反射断面積 σ_a が (6) 式から求められる。

橋のレーダー反射断面積 $\sigma_b(\theta_i, \theta_r)$ は、物標への入射角 θ_i と反射角 θ_r が異なる場合に、その物標のレーダー反射断面積を bistatic radar cross section

図3 各物標からの反射エコーマップの作成の説明図

* 海面反射を考えると (6) 式は $\sigma_a = \frac{P_a \cdot (4\pi)^2 \cdot R_a^4}{P_T \cdot G_T \cdot A_R} \frac{1}{4^2}$ と、小さく評価される。

とよぶ。bistatic radar cross section は入射角 θ_i と反射角 θ_r 関数となる。実際の橋のような複雑な構造体からのレーダー反射断面積を計算で厳密に求めることは困難である。単純な形状については計算例があるので、橋の実際のレーダー反射断面積を観測して、その値から等価的な単純形状の集合として橋のレーダー反射断面積の理論式を導く方法をとることとする。

入射と反射が同じ場合に物標が示す反射断面積を monostatic radar cross section がとよぶ。

図 4 に示すごとく矩形板、 $a \times b$ 、に斜めに電波を照射したときの monostatic 断面積 $\sigma_b(\theta, \phi)$ は、矩形板を完全平面とし、 $a \gg \lambda_0$ 、 $b \gg \lambda_0$ とすると、

$$\begin{aligned} \sigma_b(\theta, \phi) = & \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \phi \cdot \left[\frac{\sin(K_0 a \sin \theta \cdot \cos \phi)}{K_0 a \sin \theta \cdot \cos \phi} \right]^2 \\ & \times \left[\frac{\sin(K_0 b \sin \theta \cdot \sin \phi)}{K_0 b \sin \theta \cdot \sin \phi} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b \sin \phi \cdot \cos \theta)}{K_0 b \sin \phi \cdot \cos \theta} \right]^2 \\ & \times \left[\frac{\sin(K_0 a \sin \phi \cdot \sin \theta)}{K_0 a \sin \phi \cdot \sin \theta} \right]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 $A = a \times b$ 、 $K_0 = 2\pi/\lambda_0$ 、 λ_0 = 波長である。ここで、

垂直入射、垂直反射

$$\sigma_b(0, 0) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A^2 = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a \times b)^2 \quad (8)$$

水平面入、反射

$$\sigma_b(\theta, 0) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A^2 \cos^2 \theta \cdot \left[\frac{\sin(K_0 a \sin \theta)}{K_0 a \sin \theta} \right]^2 \quad (9)$$

垂直面入、反射

$$\sigma_b(0, \phi) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A^2 \cos^2 \phi \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b \sin \phi)}{K_0 b \sin \phi} \right]^2 \quad (10)$$

となる。

図 5 に示すごとく斜材の反射断面積は (x, y) 座標を (θ, ϕ) 座標に変換することから求められる。指向特性を与える関数 $D(\theta, \phi)$ は、

$$D(\theta, \phi) = \left[\frac{\sin(K_0 a x)}{K_0 a x} \right] \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b y)}{K_0 b y} \right] \quad (11)$$

となる。ここで

図 4 monostatic radar cross S

図 5 斜め部材のレーダー反射断面積

$$\begin{cases} x = \theta \cdot \sin \xi + \phi \cdot \cos \xi \\ y = \theta \cdot \cos \xi - \phi \cdot \sin \xi \end{cases} \quad (12)$$

である。従って、monostatic 反射断面積 $\sigma_b(\theta, \phi) = \sigma_b(x, y)$ は、

$$\sigma_b(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a \times b)^2 \cdot D^2(\theta, \phi) \quad (13)$$

$$\therefore \sigma_b(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a \times b)^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 a x)}{K_0 a x} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b y)}{K_0 b y} \right]^2 \quad (14)$$

で求めることができる。

bistatic cross section と monostatic cross section の換算方法を図 6 に示す。波長に比べて反射体の寸法が大きいとき、入射角 θ_i 、反射角 θ_r の bistatic な反射断面積は、単位入射ベクトル $\dot{A}_i$ と単位反射ベクトル $\dot{A}_r$ のベクトルの和 $\dot{V} = \dot{A}_i + \dot{A}_r$ の方向の等価 monostatic 反射と等しい*。

図 6 から等価ベクトル $\dot{V}$ の方向 δ は、

$$\delta = \frac{\theta_r + \theta_i}{2} \quad (15)$$

となる。ここで複号は、入、反射方向が同一象限のとき+をとる。

図 6 の例では、 $\delta = (\theta_r - \theta_i)/2$ の方向の monostatic 反射断面積と等しくなる。そこで bistatic な反射を monostatic な反射として計算できる。

$$\sigma_b(\theta) = \sigma_b(0) \cdot \cos^2 \delta \left[\frac{\sin(K_0 a \delta)}{K_0 a \delta} \right]^2 \quad (16)$$

となる。鏡面反射 $\theta_i = \theta_r$ では、 $\delta = 0$ となる。

$$\therefore \sigma_b(\theta) = \sigma_b(0)$$

となり、垂直入、反射と等しい。

入射波と反射波が同一の象限にあるとき、(図 7)

$$\delta = \frac{\theta_i + \theta_r}{2} \quad (17)$$

となる。図 7 の場合は δ は下向き方向となる。

理想平面矩形板からの反射断面積は、前述のごとく計算できるが実際の部材は理想平面矩形板とはならず、面

図 6 bistatic cross section と monostatic cross section の換算方法

* G. T. Ruck: "Radar Cross Section Handbook", Vol. I, p.p. 11.

図 7 入射波と反射波が同一象限の場合

の凸凹，形状が矩形板ではなく任意形状で然も立体的であることや，複数の部材間の干渉などにより，電波が散乱して一般に観測値は図 8 に示すごとく計算値より，ピーク値 $\sigma(0)$ が小さくなり，方位 θ に対するひろがり方は広く観測される。

このことから，レーダー断面積は実際の寸法より等価矩形で計算した方が現実とよく合致すると考えられる。ここで， a_e , b_e は等価矩形寸法である。

$$\begin{cases} a_e = \sqrt{\alpha_h} \cdot a \\ b_e = \sqrt{\alpha_v} \cdot b \end{cases} \quad (18)$$

とおくと， $\sqrt{\alpha_h}$, $\sqrt{\alpha_v}$ はそれぞれ横と縦寸法の変換

係数となる。垂直入射の場合はピーク値となり，この反射断面積 $\sigma_b(0)$ は，理論値の

$$\sigma_b(0) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a \times b)^2 = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A^2 \quad (19)$$

に対して，実際は

$$\sigma_{be}(0) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_e \times b_e)^2 = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A_e^2 \quad (20)$$

と表わせる。ピーク値の比は，

$$\therefore \frac{\sigma_{be}(0)}{\sigma_b(0)} = \alpha_h \cdot \alpha_v, \text{ または } \frac{\sigma_{be}(0)}{\sigma_b(0)} = \alpha_h + \alpha_v \quad (\text{dB}) \quad (21)$$

$$\text{ここで } \sqrt{\alpha_h \cdot \alpha_v} < 1 \quad (22)$$

図 8 反射断面積の観測値と計算値の比較

となり，これは前述したとき理由で反射電波が鏡面反射とならず散乱を生ずるためである。

図 4 で示した斜め入，反射の monostatic 反射の場合は図 10 のように $a \rightarrow a_e$, $b \rightarrow b_e$ において

$$\begin{aligned} \sigma_b(\theta, \phi) = & \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A_e^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \phi \cdot \left[\frac{\sin(K_0 a_e \sin \theta \cdot \cos \phi)}{K_0 a_e \sin \theta \cdot \cos \phi} \right]^2 \\ & \times \left[\frac{\sin(K_0 b_e \sin \theta \cdot \sin \phi)}{K_0 b_e \sin \theta \cdot \sin \phi} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b_e \sin \phi \cdot \cos \theta)}{K_0 b_e \sin \phi \cdot \cos \theta} \right]^2 \\ & \times \left[\frac{\sin(K_0 a_e \sin \phi \cdot \sin \theta)}{K_0 a_e \sin \phi \cdot \sin \theta} \right]^2 \end{aligned} \quad (23)$$

$\phi \ll 1$, $\theta \ll 1$ とすると近似的に

図 9 等価矩形寸法

図 10 monostatic radar cross section の近似法

$$\sigma_b(\theta, \phi) \doteq \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A_e^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 a_e \theta)}{K_0 a_e \theta} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b_e \phi)}{K_0 b_e \phi} \right]^2 \quad (24)$$

となる。さらに

$$K_0 a_e \theta \geq \frac{\pi}{2} \quad (25)$$

ならば, (24) 式は,

$$\sigma_b(\theta, \phi) \doteq \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A_e^2 \cdot \left(\frac{1}{K_0 a_e \theta} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{K_0 b_e \phi} \right)^2 \quad (26)$$

で近似できる。(図 10)

図 11 のごとく橋を完全平面と
考え, A と B へ斜め入射する場
合を考える。橋を完全平面とみな
し, 電波の進路を光のごとく鏡面
反射すると考えたとき, A 点では
入射角が小さく, 反射波ビームの
広がり狭いので, 狭いビーム幅
となり, 反射レベルが大きいはず
である。 B 点ではビームが広が
り, 反射レベルが小さくなるはず
である。しかし, 実測では逆に A
点からの反射の方が広がったパ
ターンが観測されている。

このことは, 反射波を考えると
き, 反射点 A, B において横幅
 L_A と L_B のアンテナ放射と等価
となり, さらに斜めに入射するほ
ど正面より内部の部材の寄与分が
増加するためと考えないと説明が
つかない。すなわち完全平面から
の反射と異なる反射パターンを示
す。

図 11 鏡面反射と実測との反射パターンの差異

図 12 橋の反射指向特性の測定

図 12 は、橋のレーダー反射断面積 $\sigma_b(\theta_i, \theta_r)$ を求めるための橋の反射指向特性の観測方法を示した。「やしま」から発射したレーダー電波を橋で反射させ、「いつくしま」のレーダー受信機で受信した。「いつくしま」が点線のごとき橋に平行した航路を走って受信電力を観測すると、図 13 のごとき橋のレーダー反射指向特性が得られる。横軸は方位角 θ_r 、縦軸は受信電力 P_r' で示した。

図 13 は大島大橋第 3 橋脚部 (B 点) から得られた反射波パターンであり、反射指向特性は実線で示すごとく複雑な変化の指向特性をもっている。このデータを平滑して点線のごとき特性を反射パターンと考える。図 13 には横幅の小さい縦部材 (50 cm 幅) からのビームのひろがり計算した図も示した。縦部材からの反射波のひろがり

は理論的には約 0.1° 位であり、横部材からの理論的なひろがり 10^{-4} 位の鋭い指向性となるが、実際には数度位にひろがった指向特性が観測されている。このことは反射波の散乱と合成によるものである。

複雑な橋材のごとき複合部材からの反射を解析的に計算することは非常に困難であり、一般に理論値とかなり異なる値を得ることが多い。理論的に合成断面積は各部材の断面積の代数和ではなくベクトル和となることにもよる。

図 14 のごとく面積が等しい物標が電波の方向に $1/4$ 波長ずれた位置にあると、反射方向の合成電界は零となり、 $\sigma_b=0$ と観測されることでも理解できる。一般に n 個の物体があると、合成反射断面積 σ_0 は、ベクトル和として

$$\sigma_0 = \sum_{j=1}^n \sigma_j = \sum_{j=1}^n |\sigma_j| e^{j\phi_j} \quad (27)$$

図 13 レーダー反射指向特性

となる。 ϕ_j は j 番目の位相差である。各部材の配列が全くランダムだと $\bar{\sigma}_0$ の平均値 $\bar{\sigma}_0$ は、

$$\bar{\sigma}_0 = \sum_{j=1}^n |\dot{\sigma}_j| \quad (28)$$

となり、代数和で求められる。

各部材反射波の位相が同相とすると最大値 $\sigma_{0\max}$ となる

$$\sigma_{0\max} = \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{|\dot{\sigma}_j|} \right)^2 \quad (29)$$

となる。例えば、2 個の部材に対して

$$\bar{\sigma}_0 = \sigma_1 + \sigma_2,$$

$$\text{および} \quad \sigma_{0\max} = \sigma_1 + \sigma_2 + 2\sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

となる。

ここで、 σ_j は j 番目の部材からの反射断面積であり、各部材を等価矩形に置換えて考えるとき (15), (23) の両式より

$$\begin{aligned} \sigma_j = & \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_{ej} \times b_{ej})^2 \cdot \cos^2 \delta_{\theta j} \cdot \cos^2 \delta_{\phi j} \cdot \left[\frac{\sin(K_0 a_{ej} \cdot \sin \delta_{\theta j} \cdot \cos \delta_{\phi j})}{K_0 a_{ej} \cdot \sin \delta_{\theta j} \cdot \cos \delta_{\phi j}} \right]^2 \\ & \times \left[\frac{\sin(K_0 b_{ej} \cdot \sin \delta_{\theta j} \cdot \sin \delta_{\phi j})}{K_0 b_{ej} \cdot \sin \delta_{\theta j} \cdot \sin \delta_{\phi j}} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b_{ej} \cdot \sin \delta_{\phi j} \cdot \cos \delta_{\theta j})}{K_0 b_{ej} \cdot \sin \delta_{\phi j} \cdot \cos \delta_{\theta j}} \right]^2 \\ & \times \left[\frac{\sin(K_0 a_{ej} \cdot \sin \delta_{\phi j} \cdot \sin \delta_{\theta j})}{K_0 a_{ej} \cdot \sin \delta_{\phi j} \cdot \sin \delta_{\theta j}} \right]^2 \end{aligned} \quad (31)$$

ここで、

$$\begin{cases} \delta_{\theta j} = \frac{\theta_{rj} \pm \theta_{ij}}{2} \\ \delta_{\phi j} = \frac{\phi_{rj} \pm \phi_{ij}}{2} \end{cases} \quad (32)$$

(複号は θ_{rj} と θ_{ij} , または ϕ_{rj} と ϕ_{ij} がそれぞれ同一象限内にあるとき+をとる。)

$\delta_{\theta j} \ll 1$, $\delta_{\phi j} \ll 1$ なら (31) 式は近似的に

$$\sigma_j \doteq \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_{ej} \times b_{ej})^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 a_{ej} \cdot \delta_{\theta j})}{K_0 a_{ej} \cdot \delta_{\theta j}} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b_{ej} \cdot \delta_{\phi j})}{K_0 b_{ej} \cdot \delta_{\phi j}} \right]^2 \quad (33)$$

となる。等価矩形寸法と部材寸法との間は、

$$\begin{cases} a_{ej} = \sqrt{\alpha_{hj}} \cdot a_j \\ b_{ej} = \sqrt{\alpha_{vj}} \cdot b_j \end{cases} \quad (34)$$

とかけ、係数 $\sqrt{\alpha_{hj}}$, $\sqrt{\alpha_{vj}}$ は理想平面に対して実際の部材から電波が散乱する度合を示す変換係数と考えられる。

電波の散乱により鏡面反射方向の理想矩形反射断面積 $\sigma_j(0,0)$ は、実際の値 $\sigma_{ej}(0,0)$ に低下する。すなわち

$$\begin{aligned} \sigma_j(0,0) &= \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a \times b)^2 \\ &\longrightarrow \sigma_{ej}(0,0) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_e \times b_e)^2 \end{aligned} \quad (35)$$

となる。同時に方位に対してひろがったパターンを示すようになる。

図 15 に水平方向 θ 成分について反射断面積のひろがりを示した。散乱による変換係数は、部材の形状、面の凸凹、周波数、偏波面、複数部材間の干渉などにより定まる係数で正確な予測は困難である。反射断面積の観測がなされていれば、各部材の平均的な変換係数を求めることができる。等価矩形を用いた (31) 式または (33) 式は、

図 14 反射方向の合成電界が零となる場合

図 15 反射断面積のひろがり

$$K_0 a_e \delta_\theta \geq \frac{\pi}{2}, \quad K_0 b_e \delta_\phi \geq \frac{\pi}{2}, \quad \delta_\theta \neq 0, \quad \delta_\phi \neq 0 \quad (36)$$

のとき

$$\sigma_j \doteq \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_{ej} \times b_{ej})^2 \cdot \left(\frac{1}{K_0 a_{ej} \delta_{\theta j}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{K_0 b_{ej} \delta_{\phi j}} \right)^2 \quad (37)$$

で近似できる。

図 16 に大島大橋の反射特性を観測したときの配置を示す。水平方向は鏡面反射点で $\theta_i = \theta_r$ となり、上下角 ϕ_i は、 $\phi_i = \phi_r = \phi$ となる受信点において j 番目部材からの bistatic な反射断面積 $\sigma_b(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r)$ は等価 monostatic 断面積に置き換えて (15) 式より

$$\delta_\theta = \frac{\theta_r - \theta_i}{2} = 0 \quad \text{および} \quad \delta_\phi = \frac{\phi_i + \phi_r}{2} = \phi_j \quad (38)$$

となるので, (33), (35) 式より

$$\sigma_j(0, \phi_j) \doteq \sigma_{ej}(0, 0) \left[\frac{\sin(K_0 b_e \phi_j)}{K_0 b_e \phi_j} \right]^2 \quad (39)$$

図 16 大島大橋の反射特性の観測

$$\sigma_{ej} = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_{ej} \times b_{ej})^2 \quad (40)$$

$$a_{ej} = \sqrt{\alpha_{hj}} \cdot a_j \quad \text{および} \quad b_{ej} = \sqrt{\alpha_{vj}} \cdot b_j \quad (41)$$

a_j, b_j は j 番目部材の横寸法と縦寸法である。 $\sqrt{\alpha_{hj}}$ と $\sqrt{\alpha_{vj}}$ は j 番目部材からの反射波の散乱による寸法の変換係数である。

図 17 に大島大橋中央部 (C 点) を示す。各部材に番号をつけて区別する。縦材 4 本, 斜材 3 本は ϕ 方向に対して同一反射特性を示すので合わせて考えると, 6 種類の部材からの合成反射を計算すればよい。合成反射断面積の平均値をとると,

$$\bar{\sigma}_0 = \sum_{j=1}^6 \sigma_j = \sigma_1 + \sigma_2 + 4\sigma_3 + 3\sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6 \quad (42)$$

図 17 大島大橋中央部 (C 点)

受信方向で同相に加わるときは、 σ_0 は最大値となり、

$$\begin{aligned}\sigma_{0\max} &= \left(\sum_{j=1}^6 \sqrt{\sigma_j} \right)^2 \\ &= (\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2} + 4\sqrt{\sigma_3} + 3\sqrt{\sigma_4} + \sqrt{\sigma_5} + \sqrt{\sigma_6})^2\end{aligned}\quad (43)$$

各部材の寸法、 a_j , b_j , 入, 反射角 ϕ_j , 使用波長および変換係数 $\sqrt{\alpha_j}$ が求めれば (42) 式または (43) 式から受信方位における bistatic な反射断面積を計算することができる。実際の部材からの合成は (42) 式と (43) 式の間値となると考えられる。

ここで、変換係数 $\sqrt{\alpha_j}$ は、部材からの散乱を考慮した値で、各部材で異なる値を持つが、照射範囲を一枚の等価矩形に置き換えると全部材からの平均変換係数 $\sqrt{\alpha}$ が求められる。

大島大橋の反射パターンは、図 16 の構成で観測した。水平方向 (θ) の反射特性は鋭いピーク値の集りとして、観測された。

図 18 にその一例を示す。ここで、各々の鋭いピークは各部材からのエレメントパターンであり、エンベロープは散乱による合成のエネルギー分布特性である。橋の反射はエンベロープ特性で考える。各部材 (j 番目) からの合成を、図 19 のごとく一枚の等価矩形で考える。この場合の a_e , b_e は散乱を考慮した等価横幅と縦幅である。そこで合成断面積 σ_0 は、

$$\sigma_0(\theta, \phi) = \sum_j \sigma_j \quad (\text{平均値})$$

または

$$\sigma_0(\theta, \phi) = \left(\sum_j \sqrt{\sigma_j} \right)^2 \quad (\text{最大値}) \quad (44)$$

であり、 σ_j は j 番目部材の反射断面積

$$\sigma_j(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_{ej} \times b_{ej})^2 \cdot D_j^2(\theta, \phi) \quad (45)$$

図 18 大島大橋における水平方向 (θ) の反射特性の観測結果一例

図 19 各部材 (j 番目) からの合成

である。ここで、 a_{ej} , b_{ej} は j 番目部材の等価横幅と縦幅であり、 $D_j(\theta, \phi)$ は、指向特性を表わす。

$$D_0^2(\theta, \phi) = \left[\frac{\sin(K_0 a_e \theta_0)}{K_0 a_e \theta_0} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b_e \phi_0)}{K_0 b_e \phi_0} \right]^2 \quad (46)$$

$$D_j^2(\theta, \phi) = \left[\frac{\sin(K_0 a_{ej} \theta_j)}{K_0 a_{ej} \theta_j} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b_{ej} \phi_j)}{K_0 b_{ej} \phi_j} \right]^2 \quad (47)$$

θ_j , ϕ_j は、 j 番目部材への水平角と上下角を表わす。

図 19 のごとく、 θ に対して鏡面反射方向および上下角 ϕ が一定の位置で受信観測すると、合成断面積 σ_0 は

$$\sigma_0(\theta, \phi) = \left[\frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a \times b)^2 \right] \cdot [\alpha_h \cdot \alpha_v] \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b_e \phi_0)}{K_0 b_e \phi_0} \right]^2 \quad (48)$$

となる。第一項の $[\]$ は、照射されている部分の全面積からの反射，第二項の $[\]$ は散乱による理想平面からの減少分，第三項の $[\]$ は指向方向による特性を表わしている。

この合成断面積は、例えば平均値では各部材断面積の和 $\sum_j \sigma_j$ で表わせる。すなわち、

$$\begin{aligned} \sigma_0(\theta, \phi) = \sum_j & \left[\frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_j \times b_j)^2 \right] \cdot [\alpha_{hj} \cdot \alpha_{vj}] \\ & \times \left[\frac{\sin(K_0 b_j \sqrt{\alpha_{vj}} \cdot \phi_j)}{K_0 b_j \sqrt{\alpha_{vj}} \cdot \phi_j} \right]^2 \end{aligned} \quad (49)$$

(49) 式を書き直すと

$$\sigma_j(\theta_j, \phi_j) = \left[\frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_j \times b_j)^2 \right] \cdot [\alpha_{hj} \cdot \alpha_{vj}] \cdot [D_j(\theta_j, \phi_j)]^2 \quad (50)$$

で表わせる。第一項の $[\]$ は j 番目部材を理想平面と考えたときの反射断面積，第二項の $[\]$ は、散乱を考慮した変換係数で理想平面と実際の部材との相違を表わす。第三項の $[\]$ は、斜め方向の入，反射を考慮した指向関数である。

図 16 で示したごとく測定系の配置構成において観測した場合について観測値と計算値とを比較してみる。

図 20 のごとく、橋の一部の形状を近似させる。各部材に①～⑪の番号を付し、各部材の高さと観測したレーダーの高さを右に示す。斜材の傾角 ξ を表 1 に示す。すべての部材を矩形と考える。部材⑧と⑨は左右対称，④と⑤も左右対称である。

レーダー発射船は距離 $R=650$ m 離れていた。各部材の諸元を表 2 に示す。

鏡面反射点で受信した場合を考える。(39) 式より j 番目部材の反射断面積 σ_j は、

$$\begin{aligned} \sigma_j(0, \phi_j) &= \sigma_{ej}(0, 0) \cdot \left[\frac{\sin(K_0 \cdot b_e \cdot \phi_j)}{K_0 \cdot b_e \cdot \phi_j} \right]^2 \\ &= \left[\frac{4\pi}{\lambda_0^2} (a_j \times b_j)^2 \right] \cdot [\alpha_{hj} \cdot \alpha_{vj}] \cdot \left[\frac{\sin(K_0 b_j \sqrt{\alpha_{vj}} \cdot \phi_j)}{K_0 b_j \sqrt{\alpha_{vj}} \cdot \phi_j} \right]^2 \end{aligned} \quad (51)$$

図 20 大島大橋、 P_3 部 (B 点)

で求められる。 σ_j が求まれば合成断面積 σ_b は, (44) 式で計算できる。

各部材に対して, 上下, 水平方向ともに鏡面方向 ($\phi_j=0$) にあり, 各部材は理想平面とすると, 合成反射断面積 σ_b は,

$$(\text{平均値}) \quad \sigma_b = \sum_{j=1} \sigma_j = 1.2 \times 10^8 = (81 \text{ dB})$$

$$(\text{最大値}) \quad \sigma'_b = \left(\sum_{j=1} \sqrt{\sigma_j} \right)^2 = 6.9 \times 10^8 = (88 \text{ dB})$$

となる。これに対して実際の観測値は約 62 dB であった。この減少分は部材による散乱と斜め入射 ($\phi_j \neq 0$) のためと思われる。

表 1 斜材の傾角

	ξ_2	ξ_4	ξ_8
度	27.5	64.7	68.5
ラジアン	0.48	1.1	1.2

表 2 各部材の諸元

j	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
横 幅 a_j	3.0	0.9	0.9	0.55	0.55	0.5	0.5	0.55	0.55	0.8	3.5
縦 幅 b_j	0.65	16.8	16.8	5.84	5.84	31.8	31.8	34.2	34.2	34.2	23.0
面 積 $a_j \times b_j$	19.5	15.1	15.1	3.2	3.2	16	16	19	19	19	80
$\sigma_j(0,0) (\text{m}^2)$	4.7×10^6	2.8×10^6	2.8×10^6	1.3×10^5	1.3×10^5	3.1×10^6	3.1×10^6	4.3×10^6	4.3×10^6	1.2×10^7	8×10^7
$\sigma_j(0,0) (\text{dB})$	67	65	65	61	61	65	65	66	66	71	79
$\theta_i = \theta_r (\text{deg})$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\phi_j (\text{deg})$	3.1	0	0	3.0	3.0	1.7	1.7	1.7	1.7	1.4	-0.8
$\phi_j (\text{rad})$	0.054	0	0	0.051	0.051	0.03	0.03	0.03	0.03	0.025	-0.014

図 21 大島大橋反射断面積 (平均)

各部材への入射角は幾何学的に求められるが、散乱を考慮した変換係数の評価は観測値と理論値との比較により推定する以外には求めることが困難である。

変換係数 α_{hj} と α_{vj} は各部材ごとに、部材を理想的矩形平面と考えたとき、実際に橋を構成している部材との相違を表わしているもので、電波が部材から鏡面反射ではなく散乱する程度を示すことにもなるので、散乱係数比とよぶことができる。

α_{hj} , α_{vj} は理論的に計算することは不可能であり、実測値と理想的な部材としたときの計算値との比較で求めるしかない。

大島大橋を参考にして実測値と計算値を比較したグラフを図 21 および図 22 に示す。

大島大橋のレーダー反射断面積はレーダー送信機が国鉄棧橋付近に固定しているので、橋の A・B・C・D および E 点に対応する反射点に対して一定の距離と入射角をもって照射したときの橋のレーダー反射断面積しか観測していない。

本節における橋のレーダー反射断面積の計算方法によれば、任意の距離と入射角（水平角と上下角）に対する橋のレーダー反射断面積が計算できる。

図 21, 図 22 のグラフから平均値で考えると、変換係数 $\sqrt{\alpha_v}=1/2$, $\sqrt{\alpha_h}=1/2$ として計算した結果とよく一致する。最大値で考えたときは $\sqrt{\alpha_v}=1/3$, $\sqrt{\alpha_h}=1/3$ が計算値と実測値がよく一致する値となっている。従って、大島大橋は $\sqrt{\alpha_v}=1/2 \sim 1/3$, $\sqrt{\alpha_h}=1/2 \sim 1/3$ として計算してよいことが推定できる。

上述の計算中には、補正項が含まれている。レーダー反射断面積の計算は橋部材の船側の面だけに行い、裏側も照射すると考えると 2 倍 (+3 dB) する必要がある、さらに横部材その他計算を省略した細い部材からの寄与分も考えると 2 dB を加え、合計として計算値に 5 dB を加えた値を橋のレーダー反射断面積とした。

これらの結果を用いれば、任意の船の位置からの橋のレーダー反射断面積が計算できることになる。

図 22 大島大橋反射断面積 (最大)

5. ま と め

本文では、まず橋によるレーダー偽像の受信電力レベルを求めるレーダー方程式を導き、その受信レベルを計算するには橋のレーダー反射断面積を知る必要があることを述べた。次いで、橋のレーダー反射断面積を理論的に求める方法を考察した。

その結果、橋を矩形板の集合と考え、実際の部材と理想平板との差異は変換係数の導入によって近似できることが分かった。具体的な計算例として大島大橋におけるレーダー反射断面積を求め、実測値と比較したところほぼ一致する結果が得られ、本計算法の妥当性が確認できた。

質 疑 応 答

萩野芳造：変換係数はどんな要素の関数になっていますか。

荒井郁男：部材の大きさ、形状面の凹凸、周波数、偏波面などで定まる係数であるが、正確な予測が困難なので、逆に変換係数をパラメーターとして計算し、観測値との比較により推定する方法をとった。

長沢 明：橋に入射（あるいは反射）する際の仰角（俯角）についてはどのように評価されましたか。

荒井郁男：すべての部材について仰角も考慮して計算の中に含めた。

田口一夫：計算式の最後の +2 dB は橋の構造によって異なるか。

荒井郁男：構造が複雑な程、部材全部について計算に入れることが困難になってくるので、とりこぼし分も多くなる。その分だけ密度増加分としてさらに加味する必要がある。