副生フェライトによるレーダ偽像減少効果について

中島 裕^{*1}・林 尚吾^{*2}・荒井 郁男^{*3}
佐藤 尚登^{*4}・田原 正信^{*5}

The Reduction of False Reflections Using Special Absorbing Materials

Yutaka NAKAJIMA, Shogo HAYASHI, Ikuo ARAI,
Naoto SATO and Masanobu TAWARA

Abstract

Lately, large bridges have been constructed across shipping routes. These bridges cause false reflections to be displayed on radar screens. Preventive measures to reduce dangerous false reflections have been taken. These measures include the improvement of bridge structure design and the installation of reflection plates or specially developed absorbing materials. For bridges which have already been constructed the use of absorbing materials is efficacious.

This paper describes experimental results obtained from an unusually large scale model. These results would be difficult to obtain with a normal size model. The following conclusions were obtained:

(1) The reduction of false reflections using absorbing materials was 22 dB for the total round trip. Comparing this to the indoor model there is a difference of about 20 dB.

(2) The climatic drift in strength of false reflections was about 10 dB. This result is important in considering future preventive measures.

1. はじめに

航路を横断して大型橋梁が架橋されるようになり、そのような海域を航行する船舶のレーダに橋梁を反射体としたレーダ偽像が出現している。それらのレーダ偽像の出現報告^{(1),(2)}や出現の予測に関して報告⁽³⁾がなされている。また出現しているレーダ偽像を減少させる試みも実施されている⁽²⁾。レーダ偽像を減少させる方法としては、橋梁構造を改良する方法、橋梁の前面に反射板をつけて上空へ反射させる方法あるいは電波吸収材を装着する方法が考えられる。現在既に完成し、あるいは完成しつつある橋梁にも対策が可能な方法として、橋梁を構成する部材に何らかの表面処理を施工し、レーダの電波を吸収させることで橋梁のレーダ反射断面積を減少させ、レーダ偽像の出現の範囲とその強度を低減させることが可能か否かの実用的な評価を得るために現場実験を実施した。電波吸収材には副生フェライトを使用した塗材を使用した。その結果、実験室内での測定評価や机上の検討段階では考慮しつくせない実用上の問題点も明らかになった。

2. レーダ偽像が発生する機構と減少させる方法

航路上に架設された橋梁が原因となって発生するレーダ偽像を、その発生機構の差異により大別すると次の 2

*1 正会員 大島商船高等専門学校（山口県大島郡大島町小松）
*2 正会員 東京商船大学（東京都江東区越中島 2-1-6）
*3 正会員 電気通信大学（東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1）
*4 正会員 広島商船高等専門学校（広島県豊田郡東野町 3000）
*5 正会員 弓削商船高等専門学校（愛媛県越智郡弓削町下弓削）

種類になる。

- i) 鏡面反射偽像
- ii) 多重反射偽像

鏡面反射偽像はレーダ電波が直接橋に照射されたとき、橋があたかも鏡のように作用してレーダ電波を反射させるために発生する偽像であり、橋の前方にある大きな2次反射体の偽像が橋に対してほぼ鏡像の位置に観測される。一方、多重反射偽像は橋を構成する部材間でレーダ電波が多数回反射して戻ってきたとき、その経路長だけ後方にずれた位置にレーダ映像として観測される偽像のことである。橋梁をレーダで観測した場合に、形状が歪む、拡大される、あるいは点の列が後方に並んで見られるなどの現象は多重反射が原因となっている。

このようなレーダ偽像に対して適切に対処するには、まず偽像の受信レベルを橋梁との関係において理論的に求めることが必要となる。鏡面反射偽像に対してはすでに理論的に解析されており、レーダ偽像レベルをある程度の精度で予測計算が可能となっている⁽³⁾。船で観測されるレーダ偽像の受信レベル P_{fa} は次式で示される。

$$P_{fa} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_R}{(4\pi)^4 \cdot R_1^4 \cdot R_2^4} \cdot \sigma_t \cdot \sigma_b \cdot 4^2 \quad (1)$$

- ただし P_T : レーダ送信尖頭電力
 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 : 船と橋梁の照射点までの距離
 R_2 : 照射点と2次反射体までの距離
 σ_t : 2次反射体のレーダ反射断面積
 σ_b : 橋梁のレーダ反射断面積
 4^2 : 海面反射を考慮した係数

橋梁が原因となって発生する偽像のレベルは大島大橋（山口県）で観測された例では、最大 -40 dBm（送信尖頭出力 50 kW 級）程度であることが知られている⁽²⁾。一方、船用レーダの一般的な最小受信可能電力は -99 dBm 程度であり、また通常の使用状態ではレーダの感度は -65 dBm 前後に設定されているので橋梁に何らかの対策を講じる必要がある。レーダ偽像の受信レベルを求める式（前出（1））で橋梁のレーダ反射断面積を減少させる対策を考慮すると次に示す対策が掲げられる。

- i) 電波吸収体を装着して反射波を減衰させる。
- ii) 橋梁の部材をレーダ電波の散乱体構造にするか、散乱体壁で覆う。
- iii) レーダ電波を上空などへ2次反射体のないところへ反射させる。
- iv) レーダ電波の反射方向を自船の方向のみとなるような構造にする。

上記の対策は橋梁部材の一例（矩形板）の考察から導き出されたものであるが、現状ではこれまでに提案された種々の方策についてその効果をより実際に近い環境で試験し評価していくことが急務である。

3. レーダ偽像の減少効果の計測と評価の方法

3.1 計測・評価の方法

この副生フェライトによるレーダ偽像減少効果の測定の目的は、橋梁を構成する部材に何らかの表面処理を施工し、レーダ電波を吸収することで広大な面積を有する橋のレーダ反射断面積を減少させ、レーダ偽像の出現の範囲とレベルを低減させることが可能か否かの実用的な評価を得ることにある。

野外における実験や測定は室内実験のように条件の良い測定環境ではなく、影響を与える要素が多くなる欠点がある。しかし、実験室内での測定評価や実用性への検討段階では考慮しつくせない実用上の問題点について知ることができる利点が重要である。

今回の現場実験では、大三島橋の伯方島側高架橋の上に堅固な取付枠を設置し、複数の大型反射板をなるべく平面度を合わせて取り付けた。測定方法は、防錆処理のみの鉄板と電波吸収体で塗装した同形の鉄板をそれぞれ同枚数だけ用意し、レーダ偽像の出現状況とレベルについて両者の差を比較測定する方法を採用した。この測定にあたっては、反射板周辺の構造物等による影響を減少させるために、鉄板の枚数を1枚から4枚まで増減させ

た場合の状態変化の差を測定し比較するようになされた。

現場実験は実物大の模擬実験により、一般の船用レーダの画面上に偽像を出現させ、その偽像を減少させる工法に関するものなので下記のような内容をもつものとした。

- i) 周波数は 9,375 MHz 帯で、送信尖頭出力は 10 kW 級の船用レーダを対象として考慮する。
- ii) 反射板の大きさは、橋を構成する部材の大きさ程度の面積をもつものとする。
- iii) 偽像の測定を実施する位置は地形上の制約もあるが、使用するレーダ空中線の方位分解能とフレネル・ゾーンとの2つの点から考慮する。

以上の条件のもとに測定・評価を実施するために、測定装置としてはXバンドの船用レーダを使用することとした。偽像レベルの定量的な測定としては、偽像とマイクロ波標準信号発生器の信号のレベルとをオシロ・スコープ上で比較して測定する方法と偽像の発生状況などについてレーダの PPI 画面上で観測し、そのときの利得調整つまみの位置との関係を求める方法をとった。

3.2 レーダ PPI 映像として現われる偽像の変化による計測と評価方法

反射板で発生させる偽像の範囲や強さの関係は、反射板の大きさや取付状態などによるものであり、実際の橋梁を構成している部材との間にも一つの比例関係が得られることが予想できる。

レーダ PPI 映像として現われる偽像をレーダの利得調整つまみ（あらかじめ、つまみの位置と受信電力の関係を測定してある）と対応させながら、

- i) 最初に偽像の出現が認められる位置
- ii) 2 番目の偽像の出現が認められる位置
- iii) 3 番目の偽像の出現が認められる位置

と調べ、かつ段階的に受信可能な電力の閾値でレーダの PPI 画像を撮影しておき観測資料とし、他の観測資料と比較検討する方法をとった。

3.3 A-Scope による偽像の計測と評価方法

偽像のレベルの定量測定の方法としては、A-Scope で偽像レベルをオシロスコープにより観測し、比較信号として注入されているマイクロ波標準信号発生器の信号とレベルを合わせることによって測定する基本的な方式がとられた。この方法では測定対象の偽像のレベルが早い周期で変動する場合には測定が容易ではないが、このような場合にはレベルの最大、最小および最頻値の3点について計測することにより、測定誤差を低減するようにつとめることとした。中間周波増幅回路の利得を調整して増幅率の最大の範囲で測定を実施すれば、およそ ± 1 dB の単位でレベルを読み取ることが可能である。

3.4 橋梁への仮装着による偽像減少効果の計測と評価方法

電波吸収体を塗装した鉄板を橋梁の垂直面をなす部材の前に取り付けて、取り付け前に出現していた偽像が消滅し、あるいは減少するか否かの現場的な偽像減少効果の評価を行なうにあたり、次の事項について考慮した。

- i) 橋梁は水平・垂直および斜方向などの部材で構成され、入射したレーダ電波はさまざまな方向に反射されるので、橋梁の一部について偽像減少対策を実施しても減少効果が明確に認められないことが予想される。そのため可能ならばレーダ電波が照射される全範囲にわたって偽像減少対策が実施されていることが望ましい。
- ii) 塗装鉄板の仮装着により偽像が減少するか否かを観測するので、あらかじめ陸上地点において偽像を観測調査しておき航路の保安上にも危険とならない範囲で顕著な偽像の存在している部分を定めておく。

観測、測定および評価の方法は 3.2 項および 3.3 項で述べられている方法による。

4. 大型反射板の設置と副生フェライトを使用した電波吸収塗材の特性

4.1 大型反射板の設置

大型反射板は図1で示したように大三島橋伯方島側取付橋上に設置された。大型反射板が所定の位置および角度に設置されていることが、観測船位置から照射されたレーザ光線で測定され、その結果レーザ光線は大型反射板で反射されヤリアゲ鼻近傍に到達している事が確認された。またレーダ電波についても簡易型マイクロ波受信機を使用して確認された。

反射板は横幅 3 m、縦 6 m であり、比較のための電波吸収塗材を無塗装の鉄板 4 枚と被測定用の塗装鉄板 A

図 1 実験場所および大型反射板の設置位置

社用およびB社用各4枚の合計 12 枚を用意した。

4.2 副生フェライトを使用した電波吸収塗材の特性

電波吸収材料として、工業排水中から金属類を除去するフェライト化処理法で得られる副生フェライトを使用している。電波吸収材料としてその実用性を考える場合、吸収体として有効であるばかりでなく防食塗料としての適性、耐候性および施工性などの技術的な面を考慮しなければならない。副生フェライトを使用した電波吸収体の特性を図 2 に示す。反射損失が最大値を示す周波数を整合周波数と呼び、その時の吸収材の厚さを整合厚という。このような整合形の吸収体の特性は膜厚に大きく依存するので施工時には膜厚の管理が重要である。

電波吸収塗材としては A, B の 2 社の製品を使用した。副生フェライトを使用した電波吸収塗材の組成については、若干の差異はあるが表 1 に B 社の塗材の基本配合を示す。

表 1 副生フェライトを使用した電波吸収塗材の基本配合

原 材	エポキシ樹脂	硬 化 剤	フェライト	顔料および添加剤	計
Wt %	16.0	8.0	70.0	6.0	100

電波吸収塗材の施工については、実験室段階の特性データに基づいて塗装工事の管理膜厚は 2.30 ± 0.15 mm として施工された。

A 社はエアースプレー方式で塗装し、表面は粗く大小の凹凸がある状態になっている。この表面状態は斜方向入射特性の改善のためといわれている。膜厚は重量平均膜厚による方法で管理され、平均膜厚 2.38 mm で標準偏差 0.2 mm であった。

B 社はコテ塗り方式で塗装され、表面の状態は平滑である。膜厚はウェットゲージによる方法で管理され、硬化後にはノギスで実測された。平均膜厚は 2.30 mm 標準偏差 0.17 mm であった。

5. 計測結果と解析

5.1 現場実験の経過

昭和 53 年 3 月より同 7 月まで合計 4 回にわたって現場実験が実施された。実験項目は第 3 章で述べた計測と評価の方法に従って進められ、特に反射板を交換した際の再現性の有無について綿密な調査がなされた。その調査結果からは全 25 例中 4 例の傾向から外れるものがあったが、今回は相対的な比較測定法が採用されていることと取り付けボルトの締め直しなどの補足実験の結果から、再現性は有るものとした。また実用面からの調査から、電波吸収塗材表面に撒水したときのレーダ偽像の変化も測定された。

使用したレーダ装置は観測船に搭載されている古野電気（株）製 FR-151G 型が使用されたが、実験後半から

図 2 電波反射損失特性（周波数 9.41 GHz 表面平滑）

は陸上移動レーダ（日本無線（株）製 JMA-149 型）も併用された。

5.2 A-Scope による計測結果と解析

2 次反射体の反射係数は同一観測日の間には大きな変化はないものとして、電波吸収塗材を塗装した鉄板と無塗装の鉄板と比較した測定結果を図 3 に示す。A 社製および B 社製ともに約 22 dB の減少効果が認められ、鉄板の枚数が減るとともに偽像のレベルも減少している。塗装鉄板の反射損失について実験室内での測定値では約 20 dB とされているので、偽像減少効果としては往復で約 40 dB と予想されるが、現場作業での塗装精度等の原因によるものから 40 dB の減少効果は得られなかった。

電波吸収塗材の塗装面への撒水時の特性変化については、塗装面の状態による差から撒水終了後の水の流滴下や蒸発につれる偽像レベルの降下が観測された。特に A 社製の塗装鉄板は表面の凹凸に水がたまるためと考えられる影響があった。従って電波吸収材を実用に供する場合には降雨および海塩成分の表面付着などによる反射特性の変化についても考慮する必要がある。

5.3 レーダ PPI で観測される偽像について

レーダ PPI で観測を行う場合、A-Scope による測定方法と比較して、目視観測で映像の輝度比較を行うことの困難性や偽像のレベルが陰極線管の輝度と直線的な比例関係にないことなど留意すべき点が多い。しかし、観測条件をできるだけ理想状態におくことにより個人差も含めて 1~2 dB 程度の差につとめた。A-Scope による測定結果と 1 つ目の偽像が PPI で観測されたデータとの比較を図 4 に示した。

A-Scope による測定結果では塗装鉄板の場合にも PPI 上で偽像の出現が予想されるが、-90 dBm 程度の偽像のレベルでは PPI 画像として観測されない。またこの程度の受信機感度ではサイドローブによる偽像やその他の雑音も目立ち画面上での識別は困難になってくる。さらに偽像のレベルも短かい周期で変動しており雑音との識別は難しい。また陰極線管の蛍光の閾値付近での調整の微妙な点もあり、偽像の出現は観測されなかった。

図 4 A-Scope と PPI データとの比較

波の照射範囲より狭く、約半分であったために偽像減少効果は顕著ではなかった。

6. 降雨による 2 次反射体の特性変化

6.1 降雨による 2 次反射体の特性変化

図 6 偽像のレベルの経時変化

図 5 吸収体塗装板装着前後の偽像のレベルの変化

5.4 橋梁への仮装着による偽像減少効果の測定結果

B社製の塗装鉄板を 4 枚連結し 6m×12m の大きさとして、図 5 の中に示されているようにアーチリブ側面と仮置栈橋の 2ヶ所に仮装着し偽像の減少効果を調査した。仮装着する部位については 3.4 項で述べた測定・評価の方法によって決定された。測定結果を図 5 に示すが、橋梁に仮装着させた塗装鉄板がレーダ電

大型反射板によるレーダ偽像の観測は通算 11 日にわたって実施された。反射板の枚数変化に対する傾向の変化はほぼ予想した通りの観測結果が得られたが、観測日のちがいや鉄板の配置換えなどに対して 10 dB 以上の差がある。この原因を種々検討したところ観測当時の天候によって、2 次反射体であるヤリアゲ鼻の含水率の経時変化がレーダ反射断面積の変化をもたらしたのではないかと推定された。経時変化による偽像のレベルの変化と観測当時の天候状況を図 6 および表 2 に示した。しかし、降雨による 2 次反射体のレーダ

表 2 観測当時の天候の状況

日	時	天候の状況
昭和53年 3月28日	午前	小 雨
	午後	くもり 夕方にかけてもやが発生
3月29日	午前	快 晴
	午後	快 晴
3月30日	午前	快 晴
	午後	快 晴
3月31日	午前	快 晴

反射断面積を観測した例はほとんどなく、推定値を見積ることも難しい。レーダ偽像を検討する際に、これまでは橋梁のレーダ反射断面積ばかり注目しているが、偽像レベルは2次反射体のレーダ反射断面積にも比例しているので2次反射体の特性変化を解明することは大きな意義がある。

6.2 降雨による2次反射体の特性変化の観測と結果

2次反射体の特性変化を長期間観測するにあたり、観測場所としては地形、土質、草木の種類および付近の環境などがヤリアゲ鼻に出来るだけ似た反射面であることが望ましく、観測の長期化などの点から観測器材を大島商船高等専門学校内に設置した。2次反射体としては付近の小高い山の斜面を選定した。この斜面は大島商船高等専門学校の北方にあたる飯ノ山の南斜面でミカン等の草木が多いが人家2~3軒と石垣がある程度の場所である。

図7 降雨による受信電力の変化

降雨前後の上述の斜面からの反射波の受信電力を観測した結果を図7に示す。この結果では1月29日に1.9 mm/Hの降雨があり降雨中および雨がやんでから5時間位までは受信電力が約5dB低下していることがわかる。しかし、その後の変動は約2dB位であり、ヤリアゲ鼻で観測された偽像レベルの変動(約10dB)は今回の観測では得られなかった。この原因としては今回の観測に選定した斜面は、ヤリアゲ鼻よりも地面の露出が少ないことや土質の相異によることなどの影響と考えられる。このような2次反射体の性質を把握するための実験、研究は今後とも継続して進めていく必要がある。

7. む す び

模擬実験によりレーダ偽像を人工的に出現させ、偽像のレベルが定量的に測定され、反射板と偽像に関する膨大なデータが得られ、それらの大部分について理論的な解析・検討が加えられ、以下に述べる種々の成果が得られた。

- i) 副生フェライトによる電波吸収塗材による偽像減少効果は約22dB(往復)であった。
- ii) レーダ偽像を検討するには降雨による2次反射体の特性の変化を考慮する必要がある。

その他、今回の野外実験により、室内実験や机上の計算では得られない点もわかり、今後さらに研究を進めたいと考えている。

謝 辞

この「副生フェライトによるレーダ偽像減少効果について」の研究は、本州四国連絡橋公団が(財)海洋架橋調査会に委託して調査報告がなされた「偽像減少工法現場実験調査報告書」⁽⁴⁾としてまとめられたものの一部である。

この研究を進めるにあたり御指導、御教示戴いた庄司和民、飯島幸人両東京商船大学教授、鈴木務電気通信大

学教授，木村小一電子航法研究所衛星航法部長ならびに御協力戴きました西本金三弓削商船高等専門学校教授，その他多くの関係者の方々に深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 飯島，林 他：昭和 49 年度東京湾船舶航行調査報告書 第 2 章，東京商船大学付属船舶運航研究施設，昭和 50 年 3 月
- (2) 萩野，中島 他：マイクロ波レーダにおける大型橋による偽像とその対策，電子通信学会技術研究報告，EMCJ 78-33
- (3) 庄司 他：昭和 51 年度，昭和 52 年度および昭和 53 年度架橋が船用レーダ映像に及ぼす影響について，日本海難防止協会
- (4) 中島 他：偽像減少工法現場実験調査報告書，(財) 海洋架橋調査会，昭和 54 年 3 月