

橋梁のレーダ映像のマスキング特性とレーダ反射強度

学生会員○住本幸也（広島商船高等専門学校）、正会員 水井真治（広島商船高等専門学校）、
正会員 山田多津人（海上保安大学校）、正会員 月坂明広（中電技術コンサルタント株式会社）

要旨

我が国には、島と島を結ぶ架橋が数多く存在する。特に瀬戸内海は狭航路周辺にいくつかの架橋が架設されており、船舶の安全運航を考える上で橋梁のレーダ映像のマスキング特性とレーダ反射強度の解析は重要であると考えられる。本研究では、船舶交通の安全性を向上させるため、形状の高さ、部材などが違う 2 つの異なる架橋の幅員方向のマスキング特性や反射強度について解析した。従来、小型船舶などの小物標のレーダ反射強度は、映像内の最大信号強度により評価してきたが、小型船舶などの小物標とは異なる巨大かつ強反射体である架橋について、レーダ反射強度の新たな評価方法を試みたので報告する。

キーワード：航海計器・計測、安全航海、レーダ反射強度、レーダ映像の拡大効果、橋梁

1. はじめに

1.1 背景

我が国は領土がすべて島で構成されており、北海道・本州・四国・九州・沖縄の 5 つの本土と 6,847 の離島に分けられている。瀬戸内は特に、海を隔てて数多くの島が存在しており、本土との行き来を船舶のみに依存した時代では気象海象によって輸送が一時的に途絶えることが多々あった。しかし、技術と経済活動の発展により、大型架橋の建設が多く行われ、本州と四国・九州地方、そして離島が経済的に結ばれている。

特に、昭和 40 年代 50 年代に瀬戸内海を中心に明石海峡大橋、来島大橋、瀬戸大橋、安芸灘大橋等多数の橋梁が建設された。

こうした橋梁の建設により、船舶用レーダの活用について、つぎの問題があると考えられる。

- (1) 架橋建設後のレーダ偽像の発生
- (2) 上記 (1) が航行に有害な偽像かどうかの判別（有害な場合にはその対策）
- (3) 視界制限状態における橋梁付近の小型船舶の存在識別の困難に対する課題

こうしたことから瀬戸内海等の狭い航路周辺に架設された橋梁のレーダ映像強度や映像のマスキング特性が重要であると考えた。

1.2 目的

レーダ映像の橋梁通過に際して、本研究では次の項目を明らかにしたいと考える。

- (1) 強反射体である橋梁の幅員方向のマスキング特性を明らかにすることで、視界制限時の船舶交通の安全性を向上させたい

- (2) 架橋の反射強度の新たな評価方法を確立したい

2. 観測の概要

2.1 観測方法

本観測では、広島商船高等専門学校所属の小型艇「ひかり」及びこれに搭載のレーダを使用した。「ひかり」の主要目を表 1 に、レーダの主要目を表 2 に示す。

表 1 練習船「ひかり」の船体諸元

総トン数	16.0 トン
全長	17.4m
型幅	4.1m
深さ	1.62m
アンテナ高さ	5.0m

表 2 レーダの主要目

メーカー	光電製作所株式会社
形式	MD3210
送信周波数	9410±30MHz
送信出力	10kW
パルス幅	0.3 μs
水平ビーム幅	1.2 度
垂直ビーム幅	22 度
方位分解能	2.0 度以下
距離分解能	20m 以下

本観測は 2 種類の架橋を対象とし、レーダ映像のマスキング特性並びにレーダ反射強度の解析を行うため、取得したデータはレーダ画像処理装置を介して解析用 PC に転送した。

2.2 観測システムの構成

図1に構成を示す。信号変換器には検波信号レベル変換器、掃引及び回転パルスレベル変換回路があり、信号レベル変換器からの出力はレーダ画像処理装置の高速A/D変換器、高速バッファメモリ、そして高速DIOカードから表示用PCへと通される。レーダ画像処理装置はPCに対して1画像で約40Mbyteの大量のデータを転送している。本システムにより、レーダ受信信号(ビデオ信号)を12bitsのデジタル値としてA/D変換し、1画面のレーダ画像データとして高速DIOカード経由でPCに転送し、PCのハードディスク内に収録・再生することができる。

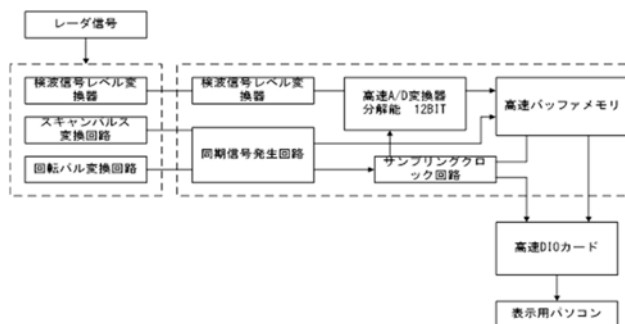


図1 信号変換器及びレーダ画像変換装置の構成

2.3 観測場所

観測対象とした架橋は、広島県呉市の豊島と大崎下島を結ぶ「豊浜大橋」(図2)及び豊島と上蒲刈島を結ぶ「豊島大橋」(図3)の二つであり、前者は3径間連続下曲弦プラットトラス橋、後者は単径間吊橋⁽¹⁾と形状の異なる架橋での比較実験とした(表3)。

表3 観測対象とした架橋の諸元

豊浜大橋	
所在地	呉市豊浜町(豊島～大崎下島) (豊島瀬戸)
橋長	543.0m
最大支間長	240.0m
上部工形式	3径間連続下曲弦プラットトラス橋
最大構高	28.0m
全幅員	8.0m
桁下高さ	23.0m
豊島大橋	
所在地	呉市豊浜町(豊島) ～呉市蒲刈町(上蒲刈島)
橋長	903.3m
最大支間長	540.1m
上部工形式	単径間吊橋
塔の高さ	109.6m
全幅員	9.86m
桁下高さ	50.1m



図2 豊浜大橋の現況



図3 豊島大橋の現況

3. 橋梁映像のマスキング特性

3.1 距離拡大効果

橋梁によるマスキングは、橋の下に位置する実船等が探知できなくなることを意味する。ここでは、橋梁幅員とレーダ映像の拡大要因を合わせた実際の橋梁映像の幅をマスキング幅とする。

橋梁は、複数の影響要因によりレーダ上では拡大された映像となる。一般に、その要因は、送信パルス幅による距離拡大効果、橋梁の両側に取り付けられた手摺等の付属設備による多重反射の影響、橋梁で乱反射したレーダ波が直下の海面で反射することによる影響の3つが考えられる⁽²⁾⁽³⁾。橋梁と海面間の二次反射の発生状況について図4に示した。

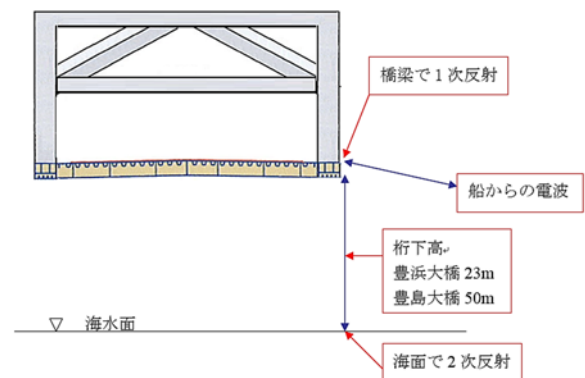


図4 橋梁と海面間の二次反射の発生状況

3.2 送信パルス幅による距離拡大効果の計算

図5に示すように、送信パルス幅による距離拡大効果を α 、橋梁の幅員を β とすると、映像の奥行幅 W は以下の式(1)で表される。 c は電波の速度、 τ はレーダのパルス幅である。

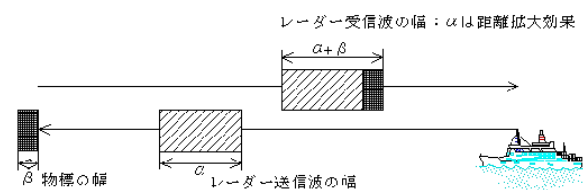


図5 送信パルス幅による距離拡大効果

$$W = \alpha + \beta = c \times \tau / 2 + \beta \quad \dots (1)$$

これにより、豊浜大橋及び豊島大橋の 2000m 付近における映像の奥行幅を算出し、実測データと比較した。観測時のパルス幅は $0.3 \mu s$ である。

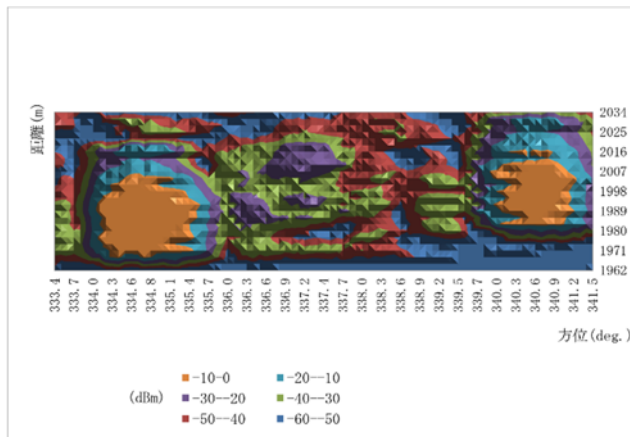


図6 2000m 付近の豊浜大橋の反射強度

豊浜大橋について、計算によって求めた奥行幅は 53m であり、観測データから求めた奥行幅はおおよそ 66m であった。一方の豊島大橋について、計算によって求めた奥行幅は 55m であり、観測データから求めた奥行幅はおおよそ 60m であった。なお、実測データの反射強度のしきい値は、船舶運航者の設定する常用感度を参考に -50dBm とした (図6に豊浜大橋の反射強度を示す)。

解析結果より、送信パルス幅による距離拡大効果で実際の奥行幅に加えて 45m ほど拡大することが考えられるが、観測データはそれ以上に拡大していることから、観測データから送信パルス幅による距離拡大効果を差し引いた余剰分が多重反射や海面反射による拡大効果であると考えられる。

4. レーダ反射強度

4.1 一般的なレーダ反射強度の計算

観測データの解析を行うにあたり、以下のレーダ方程式(2)を用いた。レーダの送信電力を p_t 、アンテナ利得を G_t 、波長を λ 、物標のレーダ反射断面積を σ 、物標までの距離を R 、反射信号強度を p_r とする。なお、第1項については直接波、第2項については、海面による反射波の干渉効果 (図7) を考慮し加えたものである。なお、物標までの距離が遠くなる時は、アンテナ高さ H 及び物標高さ h について、地球の曲率による影響を補正する必要がある。

$$p_r = 10 \log_{10} \left(\frac{p_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \right) + 10 \log_{10} \left\{ 16 \sin^4 \left(\frac{2\pi h H}{\lambda R} \right) \right\} \quad \dots (2)$$

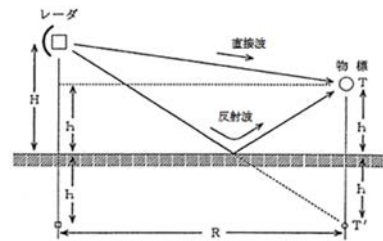


図7 直接波と反射波の干渉

4.2 新たなレーダ反射強度の評価方法

橋梁の側面は、多種の形状や部材で構成されており、反射時に熱損失や乱反射などの損失を生じさせやすい。また、橋梁の寸法は第一フレネル領域と同程度かむしろ大きい⁽⁴⁾。このことから、橋梁への入射波を球面波と考えることとし、以下の式(3)を用いてフレネル半径を算出した。フレネル半径を rF 、送信点と架橋間の距離を R とする。

$$rF = \sqrt{\frac{\lambda \times R}{2}} \quad \dots (3)$$

レーダ波を球面波と考えた場合、反射に関わるエリアは第一フレネル領域になる。当該領域からの反射強度として評価するため、方位方向の範囲(x 方向の切り出し範囲)をフレネル半径と距離から計算した角度分、奥行幅(y 方向の切り出し範囲)をパルス幅分とした (図8)。この範囲内を平均化した数値により反射強度を評価する方法(今回提案する反射強度の評価方法)の結果をグラフ (図9 及び図10) に示した。

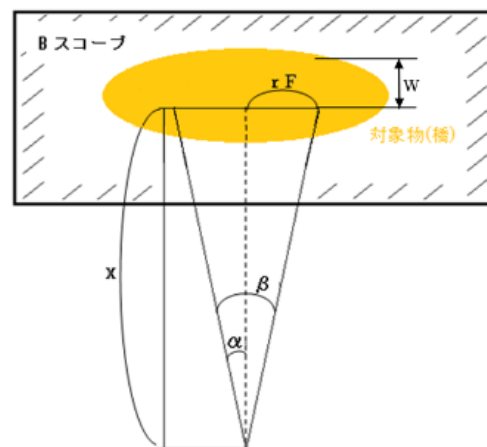


図8 解析方法の略図

距離に対する橋梁の最大反射強度を○、提案する評価方法(以下、「平均強度」と呼ぶ。)による反射強度を▲でグラフ上(図9及び図10)に示した。両者共に3000m付近までの観測データを示した。豊浜大橋は1800m付近からの観測データとなっているが、観測時に使用したレーダ受信機特性から、近距離の飽和した数値は解析の対象外とした。

豊浜大橋と豊島大橋を最大強度別、平均強度別に比較したところ、豊浜大橋の反射強度がより強いことが分かる。距離に対する反射強度の減衰については、理論値と平均値は両グラフともにほぼ適合しているといえる。小さい物標の反射強度は最大値1点の評価方法が一般的とされているが、橋梁のような大きな物標の信号強度を最大値で見ることが一般的でない。本研究では、フレネル直径とパルス幅分の距離から切り出し範囲を設定し、切り出した範囲内の数値を平均化したものを反射強度と評価した。

従来の解析方法によって得た最大反射強度と新たな評価方法で得た平均反射強度を比較したところ、平均強度が最大強度よりも下回ることが当然であるが、両者に10dB程度の違いが生じており、また、グラフを見ると理論値が平均強度により説明できる。実測値と理論値を比較する上で、本来は理論値を基準にすることは疑問に思われる。しかし、対象物が小型船などの小さな物標と違い、巨大かつ強反射体である橋の反射強度を評価するには、最大強度よりもフレネル領域周辺の平均強度により評価できることが明らかになった。

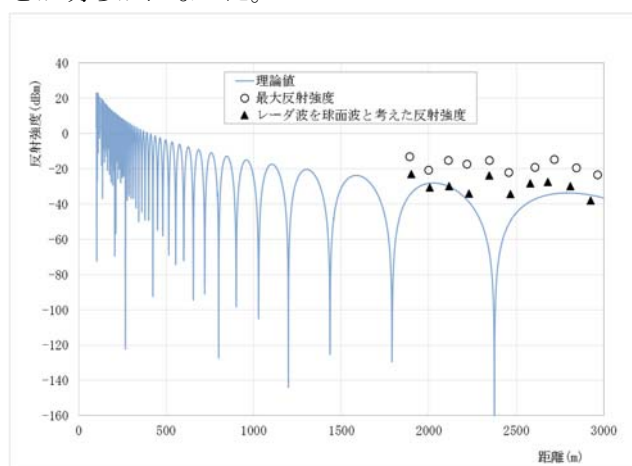


図9 反射強度と距離の関係(豊浜大橋の例)

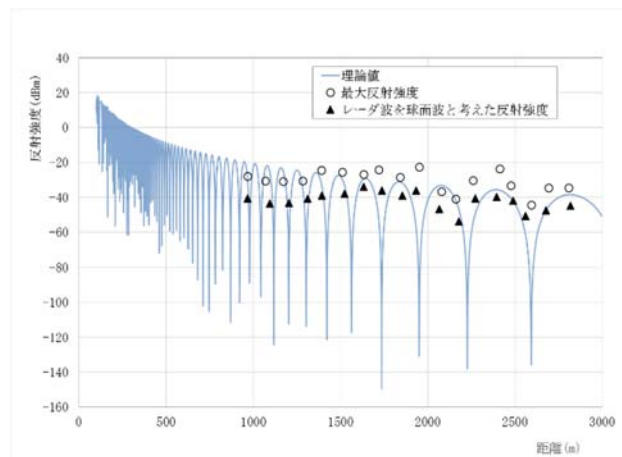


図10 反射強度と距離の関係(豊島大橋の例)

5. まとめ

本研究は橋梁のマスキング特性および反射強度の解析によりつぎに示す知見が得られた。

- (1) 幅員方向の拡大については、レーダの送信パルス幅による影響が最も大きく、拡大効果に影響を及ぼす多重反射や二次反射、架橋の形状や高さ、材質についてはレーダ(送受信点)と架橋との距離が遠いほどこれらの影響は受けにくいと考えられる。
- (2) レーダ反射強度の解析において、平均強度による評価方法を試み、理論値並びに従来の最大強度による評価との比較を行った。これにより、架橋の新たなフレネル領域周辺の平均強度により評価方法を提案した。

本研究で実施した実験は、取得できたデータがやや不足している。マスキング特性および反射強度の解析を考える上では、実験環境の多様化や解析データ数の増加が今後の課題である。

参考文献

- (1) 広島県庁ホームページ：豊浜大橋, 豊島大橋
<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/97/toyohama-bridge.html>, 2015. 3. 11.
<http://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/97/toyoshima-bridge.html>, 2015. 3. 11.
- (2) 瀬戸内海海上安全協会：豊島大橋架設に伴う航行安全対策調査研究報告書[5], 2009. 1.
- (3) 瀬戸内海海上安全協会：第2音戸大橋架設航行安全対策調査研究報告書[6], 2012. 2.
- (4) 竹中, 佐藤：橋梁等におけるレーダ波の反射並びに偽像予測シミュレーションの改善について, 日本航海学論文集 第80号 pp. 69-80, 1989. 3.