橋梁のレーダ映像のマスキング特性とレーダ反射強度

住本 幸也¹・水井 真治²・山田 多津人³・月坂 明広⁴

Masking Features of the Radar Images of Bridges and Radar Reflection Intensity

Yukiya SUMIMOTO, Shinji MIZUI,

Tatsuto YAMADA and Akihiro TSUKISAKA

Abstract

In Japan, there are a lot of bridges connecting islands. Particularly in the Seto Inland Sea, several bridges are constructed near the narrow channels. When we pursue the safe operation of the vessels, we consider it important to analyze the masking features of the radar images of such bridges and the reflection intensity.

In this study, we analyzed the features by the difference in the structure and the masking features along the direction of the width of the bridge and the reflection intensity about two bridges, in order to improve the safety of ships traffic.

Conventionally, the radar reflection intensity of a small object such as a small ship has been evaluated by the maximum signal intensity in the image. In this study, we tried a new evaluation method for the radar reflection intensity of the connecting bridges those are huge and strong reflection structures, and we report the result.

Keywords : *nautical instruments/measurement, safe voyage, radar reflection intensity, magnification effect of radar, bridge*

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

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橋梁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。

特に瀬戸内海を中心に、昭和50年代には大鳴門橋や瀬戸大橋、昭和60年以降には明石海峡大橋や来島海峡大橋、安芸灘大橋といった大型橋梁が建設されていった。

こうした橋梁の建設で経済活動がより一層発展することとなったが、一方で、船舶用レーダの運用・活用⁽¹⁾については、つぎの課題が発生したと考えられる。

¹ 学生会員 広島商船高等専門学校専攻科海事システム工学専攻(〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野4272番地1)

² 正会員 広島商船高等専門学校(〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野4272番地1) mizui@hiroshima-cmt.ac.jp

³ 正会員 海上保安大学校(〒737-8512 広島県呉市若葉町5-1) yamada@jcga.ac.jp

⁴ 正会員 (株)中電技術コンサルタント(〒734-8510 広島県広島市南区出汐2丁目3番30号) tsukisaka@cecnet.co.jp

- (1) 橋梁建設後のレーダ偽像⁽²⁾⁽³⁾の発生
- (2) 上記(1)が安全航行の支障となる偽像かどうかの判別(支障がある場合にはその対策)
- (3) 視界制限状態における橋梁付近の小型船舶の存在の識別困難についての課題

上記の(1)及び(2)については、橋梁のレーダ反射信号強度の推定が重要であり、また、上記の(3)については、橋梁のマスキング特性が重要である。

前述の通り、瀬戸内海を中心に建設された大型橋梁の建設により、視界制限時等の橋梁通過に際して、レーダ映像取り扱いの上でいくつかの課題がある。本研究では次の二項目を研究目的とする。

- (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向上を図りたい
- (2) 橋梁などの広がりのある構造物の反射強度を適切に評価する手法を確立したい

2. 従来の考察方法と課題

2.1 マスキング特性の課題

橋梁によるマスキングは、橋の下に位置する小型船等が探知できなくなることを意味する。橋梁のレーダ映像は、複数の影響要因によって実際よりも幅広の映像になるといわれている⁽⁴⁾。ここでは、拡大要因による実際の橋梁映像の幅をマスキング幅とする。

一般に、この拡大要因は、①レーダ送信波の幅による距離拡大効果(E_1)、②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(E_2)、③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(E_3)の3つが考えられる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの3つの拡大要因は、それぞれ独立な要素であることから、マスキング幅(W)は、3つの要素関数として表現できると仮定すると次式で表される。

$$W = f(E_1, E_2, E_3) \quad (1)$$

- ① レーダ送信波の幅による距離拡大効果(E_1 による効果)

図1に示す通りレーダ送信波の幅を α 、橋梁の幅員を β とすると送信パルス波の幅による距離拡大効果は、式(2)で表される。なお、 c は電波の速度、 τ はレーダのパルス幅である。

$$E_1 = \alpha + \beta = c \times \tau / 2 + \beta \quad (2)$$

例えば、奥行きが無い平板からのレーダ反射信号で

図1 レーダ送信波の幅による距離拡大効果

も、幾何学的にはレーダ送信波の幅に相当する広がりを持つ。一方、今回の橋梁のように奥行きのある物標は、物標の幅に相当する距離をレーダ電波が往復する。レーダは往復の伝搬距離を片道の距離として表示することから、レーダ送信波の幅による距離拡大効果は、パルス幅の半分に相当する大きさに物標の幅を加えた値として評価できると考える。

②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(E_2 による効果)

この要因は、橋梁の両側に取り付けられた手摺等の付属設備において、船から発せられた電波が多重反射することにより、橋梁背後に尾を引くような映像となる。レーダーの発信地点と橋梁の手摺等との位置関係によって反射角度は変化するため、多重反射が定常的にどの位置にでも発生することにはならないと考えられるが、橋梁の幅員(β)の整数倍として評価可能と考える。

③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(E_3 による効果)

橋梁と海面間の二次反射の発生状況について図2に示した。この要因は橋梁と海面間の桁下高(H)の距離差分ずれた位置に、映像が発生する現象である。設定するパルス幅によって幾何学的に推測可能なマスキング幅は①のみであるが、実際には橋梁の形状や高さ等により②及び③による影響が①と共に重畳され、レーダ映像となり距離拡大効果があると考え

図2 橋梁と海面間の二次反射の発生状況

られる。すなわち、設定感度による影響も踏まえて、実際のレーダ映像のマスキング幅の評価を行う必要がある。さらに、地形や陸上構造物の影響が考えられる、本論では検討対象としていない。

2.2 レーダ反射強度に関する課題

従来、レーダ映像に映る比較的小さい物標や船舶などのレーダ映像強度は、映像強度を A/D 変換することによりその映像の反射強度の最大値により評価を行っている⁽⁵⁾。その観測値の概算モデル式として例えば、以下のレーダ方程式(3)を用い計算による概算が可能である。

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

ここで、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 としている。なお、第1項については直接波、第2項については、図3に示すように海面による反射波の干渉効果を考慮し加えたものである。なお、アンテナ高さは H 、物標高さは h として、地球の曲率による影響を考慮している。

図3 直接波と反射波の干渉説明図

しかしながら、空間的に広がりのある大規模な陸上構造物や大型橋梁などの物標については、従来の反射強度の最大値による評価では、過大にレーダ反射強度を評価している可能性が考えられる。すなわち、レーダ反射強度を過大に推定することで、橋梁による偽像発生を過大に評価する恐れがある。また、そのために過剰な安全対策が必要と判断されるといったデメリット等が想定される。

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。このことから、一定の範囲内の平均化処理を行う必要があると考えた。入射波を球面波と考えることとし、以下方法を提案する。

①広がりのある映像を最大値による評価ではなく、「フレネル領域と1/2パルス幅によるエリアの信号強度の平均」及び②「水平ビーム幅と1/2パルス幅によるエリアの信号強度の平均」で評価する二つの方法を提案する。これにより反射強度の評価をより正確に評価できると考えられる。そこで、瀬戸内海に位置する大型橋梁を事例として強度データを観測し、同データの解析方法を後述する。

3. 観測方法

3.1 観測に利用した船舶及びシステムの概要

使用したデータは、広島商船高等専門学校所属の小型練習船「ひかり」及びこれに搭載のレーダにより取得した。観測船舶の主要目を表1に、使用したレーダの概要を表2に示す。

本研究を実施するためにこれまでの観測システムを改良し、Xバンドレーダによる船舶交通の観測システムを新たに開発した。使用したXバンドレーダの主要概要及びシステム概要をそれぞれ表2及び図4に示す。本システムは、レーダ映像をJPG画像として出力・記録するモードと共に、信号強度に対応するビデオ信号を出力・記録できる2つの異なるモードを持つことに特徴があるシステムである。

観測は2種類の橋梁を対象とし、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データ処理パソコンに転送した。

レーダ画像変換装置の構成を図5に示した。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⁽⁶⁾ができる。A/D変換強度を反射強度に変換するために、観測船上で行われた校正実験のデータを用いた。基準信号発生器による校正実験で得られたデータを

図 6 に示す。校正実験データにより A/D 変換値を反射強度に変換することができる。

表 1 観測船舶の主要目

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 使用したレーダの概要

空中線部	輻射器	195cm (回転数 24rpm)
	水平ビーム幅	1.2°
	垂直ビーム幅	22°
	パルス幅	0.3 μs (観測時)
	送信出力	10kW
指示機	表示器	20 インチモノクロブラウン管
	表示解像度	1024×768 ドット
	距離精度	8m またはレンジの 1%
	レンジ	3NM

図 4 観測システムの構成概要

図 5 レーダ画像処理装置の構成

図 6 システム校正実験の結果

3.2 観測対象と日時

観測対象とした橋梁は、広島県呉市の豊島と大崎下島を結ぶ「豊浜大橋」⁽⁶⁾を図 7 に及び豊島と上蒲刈島を結ぶ「豊島大橋」⁽⁷⁾を図 8 に示す。

図 7 豊浜大橋の現況⁽⁶⁾図 8 豊島大橋の現況⁽⁷⁾

前者は 3 径間連続下曲弦プラットラス橋、後者は単径間吊橋と形状の異なる橋梁での比較実験とした。表 3 に観測対象とした各橋梁の諸元等を示す。

観測実験の実施回数は 2 回となっており、観測日時を表 4 に示す。

表 3 観測対象とした橋梁の諸元

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

表 4 観測日時

回数	観測日	観測時間
第 1 回	平成 27 年 5 月 16 日 (土)	13:00~15:00
第 2 回	平成 28 年 4 月 26 日 (火)	12:00~16:00

4. 橋梁映像データの解析

4.1 マスキング特性

2.1 節で述べた特性を踏まえたうえで、マスキング幅の検討を行った。検討は、設定感度(閾値値を -40dBm 、 -50dBm 、 -60dBm とした)による影響も考慮して、レーダ映像のマスキング幅との比較を行った。

理論上のマスキング幅の概算は、 E_i による効果により (2) 式により求めることができる。 E_2 による効果は橋梁幅の整数倍と考えられる。レーダと対象物の距離が離れているほど影響力は弱く、また、 E_i による距離拡大効果と重なっている可能性が高いと考える。

図 9 豊浜大橋から 2000m 付近のレーダ画像 (PPI スコープ映像データ一例)

図 10 豊浜大橋から 2000m 付近のレーダ画像 (図 9 について B スコープ映像データの一例)

対象とした橋梁の比較のためのレーダ映像 2000m 付近とした。本論では E_2 による効果は E_i の拡大効果に含まれているものとし、計算上のマスキング幅に考慮しないこととした。 E_3 による効果については、豊浜大橋の場合桁下高さが 23m であることから、橋梁から 23m 以上離れた地点に生じている映像は E_3 による効果による映像拡大が要素として考えられる。

一方で豊島大橋は、桁下高さが約 50m であることから、橋梁から 50m 以上離れた地点に生じている映像は E_3 による映像の拡大が要素として考えられる。

豊浜大橋及び豊島大橋から 2000m 付近における映像の奥行幅を算出し、設定感度別の実測データと比較した。観測時のパルス幅は $0.3\mu\text{s}$ である。実験時に取得したレーダ画像の一例を図 9 及び図 10 に示す。

図 11 は 2000m 付近の豊島大橋の反射強度を示している。図 12 は図 11 のグラフを設定強度別の一例として示したである。青色の部分 -50dBm 以上の反射強度、緑色の部分を -50dBm を下回る反射強度としている。同図中の画像の中央付近にはゆらぎがあり一概にマスキング幅を考えることは難しい。そこで、最もゆらぎの少ない反射強度が最も強い橋脚部分を基準として幅員の広がりを検討した。図 12 においては同図中に示す部分が橋脚である。

図 11 豊島大橋から 2000m 位置の反射強度

図 12 豊島大橋から 2000m 位置の反射強度 (設定強度別(閾値 -50dBm) の一例)

閾値別のグラフより閾値別のマスキング幅を求めた。なお、実測データの反射強度の閾値は、船舶運航者の設定する常用感度を参考に-50dBmを基準とした上で±10dBmの-40dBm、-60dBmにおける3種類のマスキング幅を求めた。

設定感度ごとに比較した結果を表5にまとめて評価を行った。豊浜大橋について、計算によって求めた E_1 の効果によるマスキング幅は、53mであった。一方、豊島大橋について、 E_1 の効果によるマスキング幅は、55mであった。ただし、これらの概算については観測時のパルス幅が $0.3\mu s$ であるため、 E_1 による効果と E_2 及び E_3 による距離拡大効果及び橋梁幅(A)と重畳していると考えられる。そこで、それぞれの橋梁について、閾値別の実際のマスキング幅と比較した。

表5の評価により、閾値-40dBの豊島大橋のマスキング幅を除き、豊島・豊浜大橋の他のすべての閾値において実際の橋梁幅よりも45mを超えて拡大することが確認できた。(ただし、その数値は設定パルス幅に大きく依存する。)閾値によって橋梁映像の空間的広がりが変わってくるが、 E_2 及び E_3 による距離拡大効果の要素が含まれ橋梁の映像がさらに拡大していると考えられる。3種類の閾値別に観測データのマスキング幅を同表中に示した。当然、閾値が小さくなると観測したマスキング幅は大きくなる。表の下段には、観測したマスキング幅と E_1 による距離拡大効果の概算値の比率を整理した。

一般的に、レーダ送信波の幅による橋梁映像の拡大

大効果は、レーダの設定と橋梁幅から計算できる。一方、他の要因は単純に数値として計算するのは困難である。この理由から、計算可能な要素を基準にして、実際の橋梁のマスキング幅を設定感度ごとに比較することで、マスキング効果の評価を行った。さらに、マスキング幅については、 E_1 による距離拡大効果による影響が最も大きいことが確認できる。橋梁断面積のより大きいトラス橋である豊浜大橋の方が、吊橋形式の豊島大橋よりマスキング幅が増大されていると推定される。これによりパルス幅を変更した場合もマスキング幅の推定する可能性がある。すなわち、式(2)の数値を基準として橋梁形式などにより、マスキング幅を設定感度とパルス幅等により正確な値を導くことができる可能性を示した。なお、今回の解析は、ロングパルスのみ観測を行った。

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⁽⁸⁾⁽⁹⁾。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、式(4)を用いてフレネル半径を算出できる。フレネル半径を rF 、送信点と橋梁間の距離を R とする。

$$rF = \sqrt{\lambda \times R / 2} \quad (4)$$

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。そこで、新たな評価方法にフレネル領域と1/2パルス幅による範囲、そして、レーダ波を平面波と考えた場合の水平ビーム幅と1/2パルス幅によるエリアの信号強度の平均を用いること提案する。Bスコープにおける横軸(方位)方向をフレネル領域、縦軸(距離)方向をパルス幅分とし、当該範囲内を平均化した数値により反射強度を評価した。その状況を図13に整理した。

Bスコープは横軸を方位としているため、式(4)式によって求めたフレネル半径 rF と自船から橋梁までの距離 R によって角度 A を算出した。これにより、フレネル領域(角度 B)を決定し、横軸(方位)方向の評価範囲とした。縦(距離)方向の評価範囲は1/2パルス幅としているため、式(2)の α より45mとなる。

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)と

表5 マスキング幅の解析結果

		豊浜大橋	豊島大橋
実際の橋梁幅員(A)		8	10
式(2)による E_1 の効果(B)		53	55
観測データ 上のマスキ ング幅(C)	閾値 -60dBm	69	60
	閾値 -50dBm	66	51
	閾値 -40dBm	54	30
比率 (C)/(B)	閾値 -60dBm	1.3	1.09
	閾値 -50dBm	1.25	0.92
	閾値 -40dBm	1.02	0.55

図 13 解析対象の範囲を説明する略図

図 14 反射強度と距離の関係
(豊浜大橋の解析例)

図 15 反射強度と距離の関係
(豊島大橋の解析例)

最大値 1 点での評価(従来の評価方法)の解析結果を比較することとした。第一フレネル領域と 1/2 パルス幅の拡大効果による範囲の反射信号の平均値を対象物の信号強度として評価することを提案した。本研究ではレーダ波を球面波と考える一方で、レーダ

波を平面波と考えた場合の対象物の反射強度を算出し比較することとした。そこで、後者を水平ビーム幅と $1/2$ パルス幅の拡大効果の範囲とし、本研究で使用したレーダの水平ビーム幅 1.2° 分をレーダ映像の横方向の切り出し範囲として解析を行った。

評価方法であるレーダ波を球面波と考えた場合の反射強度(以下、フレネル強度という)を▲、レーダ波を平面波と考えた場合の反射強度を×で図 14 及び図 15 に示した。縦軸を反射強度、横軸を自船からの距離とし、豊浜・豊島大橋の反射強度と距離の関係を表している。

理論値については、レーダ反射断面積(以下、 σ という)の値によって実測値への適合性が変化する。図14及び図15の理論値における σ の値については、新たな評価方法により求めた反射強度を理論式に当てはめ、実測値に適合する σ を算出した。豊浜大橋は σ を649 m²、豊島大橋については28 m²である。両者共に3000m付近までの観測データを示した。豊浜大橋と豊島大橋を従来の評価方法別、新たな評価方法別に比較したところ、どちらも豊浜大橋の反射強度がより強いことが確認できる。

つぎに、評価方法の違いによる反射強度の差を考える。小さい物標の反射強度は最大値のみの評価方法が従来^{(5) (10) (11) (12) (13) (14)}とされているが、橋梁のように空間的に広がりのある物標の信号強度を最大値での評価は同強度を過大に評価している可能性があると考えた。この最大値による評価方法では、空間的に広がりのない小さい物標についても同強度を過大に評価する恐れがある。本研究では、フレネル領域とパルス幅により評価範囲を設定し、この範囲内を平均化した数値を反射強度として新たに評価した。

従来の解析方法によって得た反射強度と新たな評価方法で得た反射強度を比較すれば、後者(フレネル強度)が前者(最大強度)を下回るのは当然であるが、評価方法の違いによって両者に 10dB 程度の違いが生じている。一方で、フレネル強度と水平ビーム強度を比較すると、豊浜・豊島大橋とも両者に大きな差は見られなかった。フレネル強度と水平ビーム強度の評価方法は同様の結果を示したため、橋梁のレーダ反射強度の評価においては両者ともに評価が可能ではないかと考える。空間的に広がりのある(反射断面積の大きな物標)のある橋梁など大型構造物の反射強度を評価する場合には、フレネル領域とパルス幅で定める範囲の平均強度によって評価を行った。

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) 形状等が大きく異なる2つの橋梁を対象として、レーダ送信波の幅による距離拡大効果を基準にしたマスキング幅(幅員方向の拡大)の拡大比率を求めることにより、マスキング特性が評価可能である。また、マスキング幅(幅員方向の拡大)はレーダの送信パルス幅による影響が最も大きいと考えられる。

(2) レーダ反射強度の解析において、新たな評価方法を試み、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、橋梁のフレネル領域と $1/2$ パルス幅で定める範囲と水平ビーム幅と $1/2$ パルス幅で定める範囲の平均強度等によって評価する2つの新たな方法を示した。これにより、空間的広がりのある物標に関しては反射強度を過大に評価するデメリットを改善することができる。

以上から、橋梁の反射強度を適切に評価することができれば、使用するレーダの設定感度や使用条件等との関係からマスキング幅を適切に推測可能となる。対象としたレーダ反射強度とマスキング幅の特性は、大きな関係性がある。

本研究では、橋梁など空間的な広がりのある構造物による偽像評価等のために、レーダ反射強度の過大評価を改善の観点から検討を行った。視界制限時等にこれらの大型構造物周辺のレーダ航行環境は、重要である。上記の通り、例えば、反射強度の正確な評価ができれば、マスキング幅等のレーダを用いた狭い水道の航行環境がより明らかにできる。

ただし、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。マスキング幅はパルス幅の影響を強く受けているため、今後、パルス幅をさらに短くした設定した場合のマスキング幅と比較を行う必要がある。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さらなる増加が今後の課題である。

謝辞

本研究の検討にあたり、ご協力いただいた広島商船高等専門学校・竹内康二技術長他の技術職員に深く感謝いたします。また、本研究は文部科学省・地(知)の拠点事業、プログラム名「離島の知の拠点形成—離島高専の教育研究と離島の振興・活性化—」の安全・防災分野研究の一環として助成を受けた研究であることを付記します。

参考文献

- (1) 庄司るり, 萩原秀樹, 大津皓平, 林尚吾, 浪江宏宗: 東京湾における船舶交通観測レーダネットワークシステムの研究, 日本航海学論文集 第109号 pp. 69-78, 2003
- (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
- (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
- (4) 中島裕: 瀬戸内海における大型橋梁とレーダ偽像, 日本航海学会誌 第115号, pp. 45-55, 1993
- (5) 水井真治, 山田多津人, 月坂明広, 中川義教: 小型FRP船レーダ映像の2次元分布の解析, 日本航海学論文集 第124号 pp. 71-77, 2011
- (6) 広島県庁ホームページ: 豊浜大橋, <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/97/toyohama-bridge.html>, 2015
- (7) 広島県庁ホームページ: 豊島大橋, <http://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/97/toyoshima-bridge.html>, 2015
- (8) 竹中康雄, 佐藤尚登: 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
- (9) 山田多津人, 竹中康雄, 佐藤尚登: フレネル領域を考慮したレーダ信号処理による船舶長さの推定, 日本航海学論文集第96号 pp. 39-46, 1997
- (10) 庄司和民, 飯島幸人, 杉崎昭生, 今津隼馬, 林尚吾, 木村小一, 鈴木務, 荒井郁男: 橋からのレーダ反射パターン及びその反射断面積について, 日本航海学会論文集第59号 pp. 1-10, 1978
- (11) 日本海難防止協会: 架橋が船用レーダー映像に及ぼす影響 調査報告書, 1980
- (12) 庄司和民, 林尚吾, 清水紀雄, 松野達雄: 船舶のレーダ反射強度の2次元的分布に関する研究(その1), 日本航海学論文集 第70号 pp. 93-100, 1984
- (13) 山田多津人, 水井真治, 佐藤尚登, 竹中康雄: 来島海峡における送電線と小型船のレーダ反射信号の解析, 日本航海学論文集 第115号 pp. 59-65, 2006
- (14) 山田多津人, 水井真治, 岩崎寛希: 送電線からのレーダ反射信号の解析, 日本航海学論文集 第122号 pp. 1-6, 2010