

大型船と小型船の衝突防止のための小型船のレーダー反射率向上

藤本 修平*, 穴井 陽祐*, 村上 睦尚**,
西崎ちひろ***, 白石耕一郎****

Improvement of radar reflectivity of GFRP boat for preventing collision accident between large ship and small boat

by

Shuhei FUJIMOTO, Yosuke ANAI, Chikahisa MURAKAMI,
Chihiro NISHIZAKI and Koichiro SHIRAISHI

Abstract

In Japan, collision accidents between large ship and small boat occur over 100 cases every year. Main reason for the collision is lack of radar reflectivity of small boat which is made from glass fiber reinforced plastics (GFRP). Aimed at preventing the collision accidents, improvement method for the radar reflectivity of GFRP boat by application of conductive carbon paste was studied. The study was carried out by three steps of choosing appropriate paste, numerical simulation and field test in actual sea. First, properties of various carbon pastes (peeling strength or coating workability) were examined. As the result, the carbon paste which has the same peeling strength (3.0 MPa) as gelcoat is employed. Second, the changes in radar reflectivity (radar cross-section: RCS) with change in application area of the paste was studied by numerical simulation of electromagnetic field. Improvement effect of RCS by application of the carbon paste was confirmed by the simulation. Third, the improvement effect was also confirmed by field test in actual sea. By application of the paste, the visual recognition property of GFRP boat on radar image display was improved.

* 構造基盤技術系, ** 構造安全評価系, *** 東京海洋大学 (研究当時海技研), **** 流体設計系

原稿受付 平成28年5月20日

審査日 平成28年6月29日

目 次

1. まえがき	54
2. 小型船のレーダー反射率向上の方針	55
3. 高導電性ペーストの開発と評価	55
3.1 開発の目標	55
3.2 開発ペーストの評価	56
4. レーダー反射断面積の数値解析	57
5. 実海域でのレーダー反射率向上効果の検証	59
6. まとめ	63
参考文献	64

1. まえがき

船舶の海難事故の種類別分析によると、事故全体に占める割合は「衝突」が最も多い¹⁾。船舶同士の衝突海難を防止するため様々な対策が講じられており、特に、近年の船舶自動識別装置 (Automatic Identification System: AIS) の普及 (大型船への設置義務化) は衝突回避に効果を上げている²⁾⁻⁵⁾。AIS とは、船舶の識別符号、船名、種類、位置 (GPS を利用)、針路、速力、目的地、航行状態等の安全に関する情報を VHF 帯電波で自動的に送受信し、船舶相互間および陸上局 (海上交通管制施設等) との間で情報の交換を行うシステムである。AIS の普及により、従来は目視やレーダー監視のみでしか得られなかった他船の情報を得やすくなったため、衝突海難の抑制につながっている。AIS は、表 1 に示す船舶への搭載が義務化されている^{6),7)}。

表 1 AIS の搭載義務

SOLAS 条約 (The International Convention for the Safety of Life at Sea: 海上における人命の安全のための国際条約)	(1) 全ての旅客船 (2) 国際航海に従事する総トン数 300 トン以上の その他の船舶 (3) 国際航海に従事しない総トン数 500 トン以上の その他の船舶
国内法 (船舶設備規定等)	(1) 国際航海に従事する全ての旅客船 (2) 国際航海に従事する総トン数 300 トン以上の その他の船舶 (3) 国際航海に従事しない総トン数 500 トン以上の 全ての船舶

一方で、大型船 (100 トン以上の船舶) と小型船 (20 トン未満の船舶) の衝突海難は、年間およそ 100 件程度発生している⁸⁾。これは、500 トン未満の内航船舶には AIS の搭載が義務付けられていない (表 1) ことに起因すると考えられる。AIS は双方の船舶に搭載・運用されてこそ効果を発揮するシステムであり、導入コスト等の問題から小型船への AIS 普及が進んでいないことが問題である。これに対して、航海用レーダーは船舶双方に機器を搭載する必要がなく、大型船からの見張り作業において利用頻度の高い航海計器の一つである。

そこで、本研究では航海用レーダーのより効果的な運用を目的とし、小型船のレーダー反射率を向上させ、レーダー上での視認性を改善する手法を検討した。ここで、航海用レーダーとは、自船の周囲に電波 (主に 9.3 GHz ~ 9.4 GHz 帯) を発射し、他船や陸地等からの反射波を受信してレーダー映像上にそれらの位置を表示する装置である。雨や霧あるいは夜間航行中等、視界が悪い状況でも自船周囲の物標の位置を検知できる。航海用レーダーは、表 2 に示す船舶への搭載が義務化されている^{6),7)}。

表2 航海用レーダーの搭載義務

SOLAS 条約	(1) 全ての旅客船 (2) 総トン数 300 トン以上のその他の船舶
国内法（船舶設備規定等）	(1) 国際航海に従事する全ての旅客船 (2) 国際航海に従事する総トン数 300 トン以上のその他の船舶 (3) 国際航海に従事しない総トン数 150 トン以上の旅客船 (4) 国際航海に従事しない総トン数 300 トン以上のその他の船舶

2. 小型船のレーダー反射率向上の方針

船舶航行時における衝突海難の防止には航海用レーダーを使用した監視が有効であるが、小型船はそもそもレーダー観測対象として小さいことに加え、それらのほとんどはレーダー反射性の低いガラス繊維強化プラスチック（Glass Fiber Reinforced Plastics: GFRP）製である等、レーダー監視に不利な点が多い。このため、衝突海難防止のためには何らかの対策により小型船をレーダー上で捕捉しやすくすることが必要である。レーダーの出力を増加させる等のレーダー側での対策は、コストの問題に加えて有限なレーダー資源の有効活用や電磁環境両立性（Electromagnetic Compatibility: EMC）の点からも現実的ではない。

こうした背景から国際的にも議論が行われ^{9), 10)}、大型船のレーダーによる小型船の捕捉が容易になるよう、小型船のレーダー反射率を高める措置を講ずることが国際規則となっている。また、これを受け、国内関連法令においては、衝突の危険度が比較的高いと想定される夜間航行の小型船舶に対してのみ、航海用レーダー反射器の搭載・設置が義務付けられ、平成22年には性能基準に関する改正が行われた。しかし、夜間航行時にマスト等高所に取り付けることが必要なレーダー反射器は、その取り付け方法によっては十分な反射効果が得られない場合があり、また、新規に購入・装備する必要性や保管場所の確保を要する点等から、小型船のユーザーにとっては必ずしも望ましいレーダー反射率の向上対策とはなっておらず、普及もあまり進んでいない¹¹⁾。衝突海難は夜間のみに発生している訳ではないため、昼間に航行する小型船に対しても有効な方法が必要である。これらの課題を解決可能なレーダー反射率向上手法として、小型船に高導電性のペーストを塗布する方法を検討した。

3. 高導電性ペーストの開発と評価

3.1 開発の目標

本研究では、従来の GFRP 船の建造工程を大幅に変更することなく、レーダー反射率向上を達成することを目指した。そこで、まず FRP 船建造現場の実態調査を行った。調査の結果から、GFRP を積層し船体を形成する際に、船体外壁面にあたる箇所には黒色の液状樹脂（バックコート）を吹き付ける工程に着目した。このバックコートに高い導電性を付与することができれば、従来の建造工程に大きな影響を与えずに小型船のレーダー反射率向上が達成できると考えた。また、高導電性バックコートの施工箇所としては、海面からの位置が高くなる上部構造がレーダー反射率の向上に効果的であると判断した。そこで、バックコートとして使用可能であり、かつ高い導電性を有する黒色カーボンペーストを開発することとした。なお、黒色カーボンペーストは、バックコートとして使用可能な液状樹脂に、カーボン粒子を混入させて作成する。

3.2 開発ペーストの評価

カーボンペーストをバックコートとして使用するためには、十分な剥離強度をもち、かつ良好な施工性を有する必要がある。剥離強度はペーストの剥がれにくさの指標であり、ペーストを FRP に塗布し硬化させた後に、ペーストを FRP から引き剥がす際に要する引張応力として評価する。また、施工性とは作業のしやすさである。例えば、ペーストの粘度があまりに高すぎるとスプレーや刷毛・ローラー等による塗装作業が困難になるため、作業性が悪くなる。

図 1 (a) に剥離強度の評価方法を示す。GFRP 板にカーボンペーストを塗布し完全に硬化・乾燥させた後、金属製のドーリーをカーボンペースト表面に瞬間接着剤を用いて接着する。次に、接着したドーリーの外周に沿ってペーストに切り込みを入れ、ドーリー接着面のペーストとその周囲のペーストを切り離す。この状態でドーリーに引張応力を徐々に加えていき、カーボンペーストが GFRP 面から剥離した際の応力を剥離強度として記録する。図 1 (b) はペースト上にドーリーを接着した試験片の例であり、図 1 (c) は強度評価後のペースト剥離の例である。試験は、図 2 に示す剥離強度試験装置を用いて実施した。架台上部の治具にドーリーを固定し、下部に配されたモーターを制御して徐々に引張応力を加えていく。モーターによる荷重をロードセルで計測し、ドーリー接着面の面積で除して引張応力を算出する。

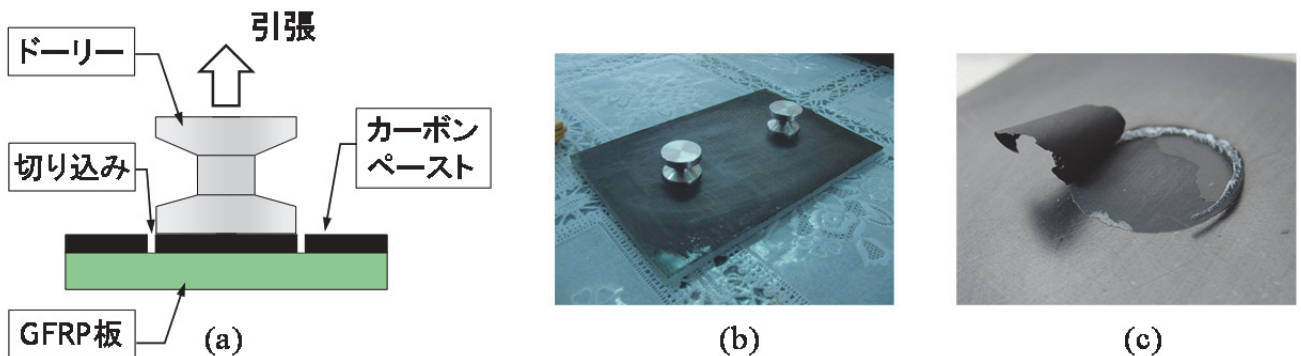


図 1 (a) 剥離強度試験の概要, (b) ドーリーを設置した試験片, (c) ペースト剥離の例

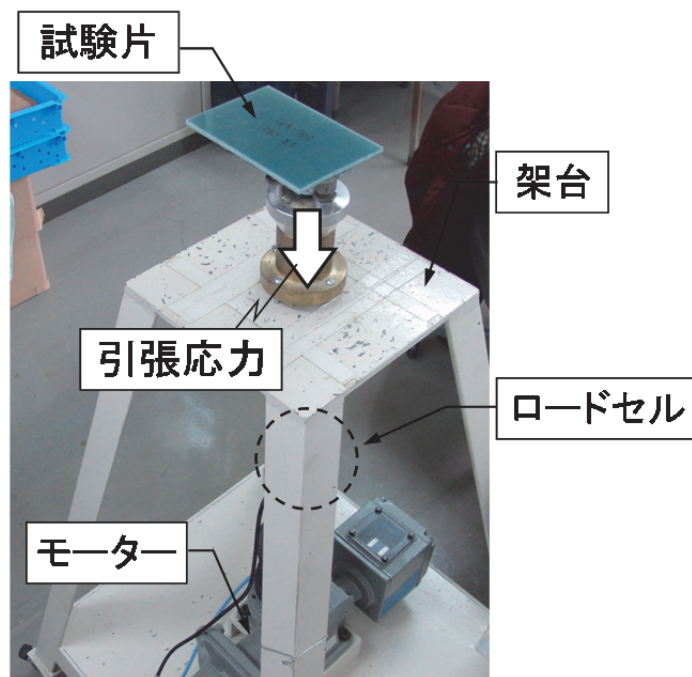


図 2 剥離強度評価装置

図3に剥離強度試験の結果を示す。開発当初の試作品は、0.5 MPa未滿とかなり剥離しやすいものであったが、試作を重ねることで剥離強度が向上し、最終的な開発品としてはFRPの成形時に用いられるゲルコートと同程度の3.0 MPaの剥離強度が得られた。試作段階ではペースト塗布後の硬化方法として、乾燥による硬化（常温乾燥、加熱乾燥）や化学反応による硬化など、種々の手法を試みた。作業性（塗布作業のしやすさや硬化方法の手間）と硬化後の剥離強度の両面を考慮した結果、最終的に赤外線ヒーターを用いた加熱乾燥による硬化方法を選択した。

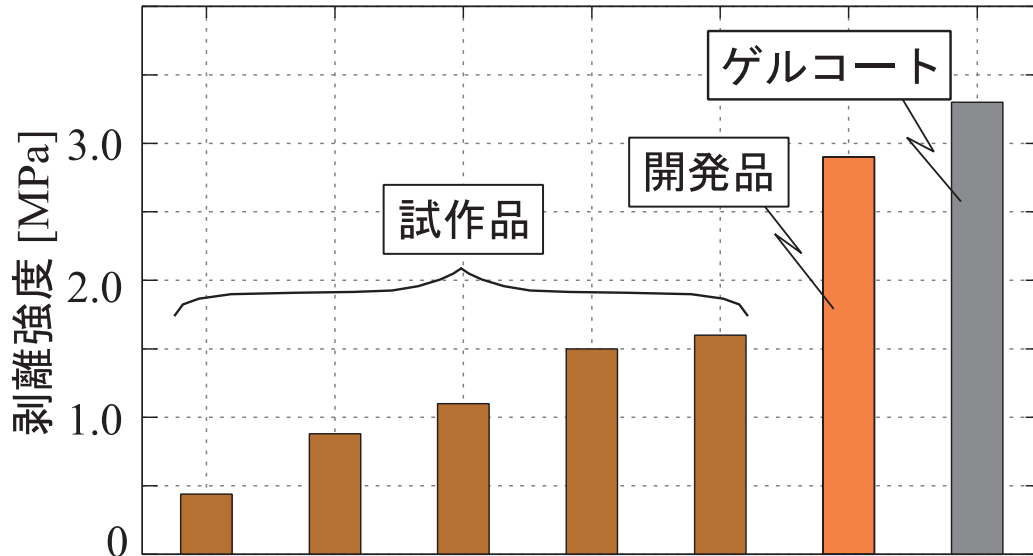


図3 剥離強度の評価結果

4. レーダー反射断面積の数値解析

開発したペーストを小型船舶の上部構造に塗布した場合のレーダー反射率の向上を定量的に評価するため、レーダー反射断面積（Radar Cross-Section: RCS）の数値解析を実施した。RCSは物体がレーダーから受けた電波を反射させる能力の指標であり、その値が大きいほどレーダーに探知されやすくなる。数値解析は電波伝搬解析ソフトウェア（Remcom製、XGtd）を使用した。XGtdは、幾何光学的数値計算法により大型構造物のRCS解析を効率的に行うことができる。

図4に解析対象のモデルを示す。モデルは小型船舶の上部構造（操舵室等）を模擬しており、後方が開放された箱型形状である。モデルの寸法は図4(a)に示す通りであり、後述の実海域試験で使用した上部構造模型と等しい値とした。上部構造は板厚5 mmのGFRPを想定し、その上に約60 μmの厚さで開発ペーストを塗布した状況をシミュレートした。また、解析する電磁波の周波数は、船舶用レーダーで一般的に用いられる程度の値(9.41 GHz)とした。上部構造の正面（小型船の船首方向）を角度の基点（0度）とし、10度刻みに180度まで計19種の方角についてRCSを算出した（図4(b)）。

RCS解析に用いたパラメータを表3に示す。GFRP板の体積抵抗率および比誘電率は文献値¹²⁾を、カーボンペーストの体積抵抗率は実測値を、カーボンペーストの比誘電率はデータがないため、空気と同等の値（1.0）と設定した。

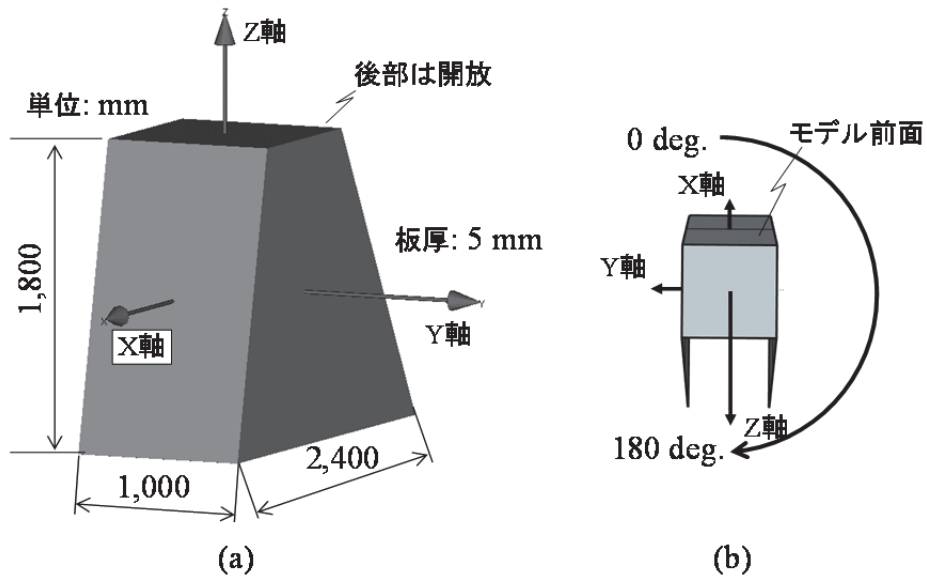


図4 RCS解析に用いた上部構造モデル. (a) 各部の寸法, (b) 角度（レーダー波入射方向）の定義

表3 RCS解析に用いたパラメータ

	GFRP 板	カーボンペースト
厚さ [mm]	5.0	5.8×10^{-2}
体積抵抗率 [Ωm]	10^{10}	0.0116
比誘電率 [-]	4.2	1.0

ペーストを施工する箇所の影響を検討するため、図5に示す通りに、(a)上部構造の外壁面全面にペーストを塗布した場合、(b)外壁天井面にのみ塗布した場合、(c)ペーストを塗布しない場合等について計算を実施した。また、波浪による小型船の船体動揺の影響を考慮するため、大型船から小型船への見下し角度もパラメータとした。

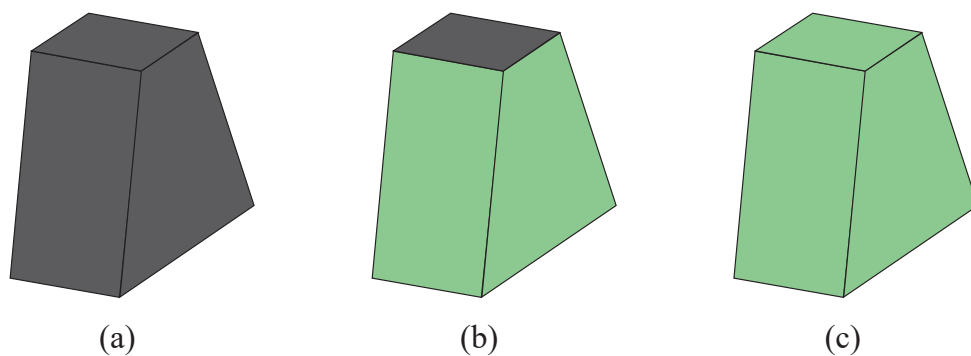


図5 上部構造モデルのペースト塗布パターン. (a) 全面塗布, (b) 天井面のみ塗布, (c) 塗布なし

図6に解析結果の一例を示す。見下し角度15度で各方向（角度）について算出したRCSをプロットした。図中の■がペーストを上部構造の全面に塗布した場合（図5(a)）、●が天井面だけに塗布した場合（図5(b)）、▲がペーストを塗装しない場合（図5(c)）の結果である。ペーストの塗布により、小型船の斜め前方向（角度40度～70度の範囲）および斜め後ろ方向（角度140度）のRCSが増大することが確認できた。また、ペースト施工箇所については、全面塗布と天井面だけに塗布した場合を比較してほぼ同程度のRCS値であったことから、天井面への塗布がRCS向上に関して最も効果的であることが判った。一般に、漁船等の小型船は大型船のレーダーからは見下ろす位置にあり見下した際の投影面積への寄与が大きくなる天井面への塗布が効果的であると考えられる。

なお、一部で塗布なしや天井のみ塗布の方が全面塗布よりも大きな RCS 値となっている箇所がある。これはレーダー波の入射方向によっては反射率が低下する角度（Brewster 角：材質により異なる）があり、一部の入射角度ではこの影響により RCS 値が逆転したものとする。

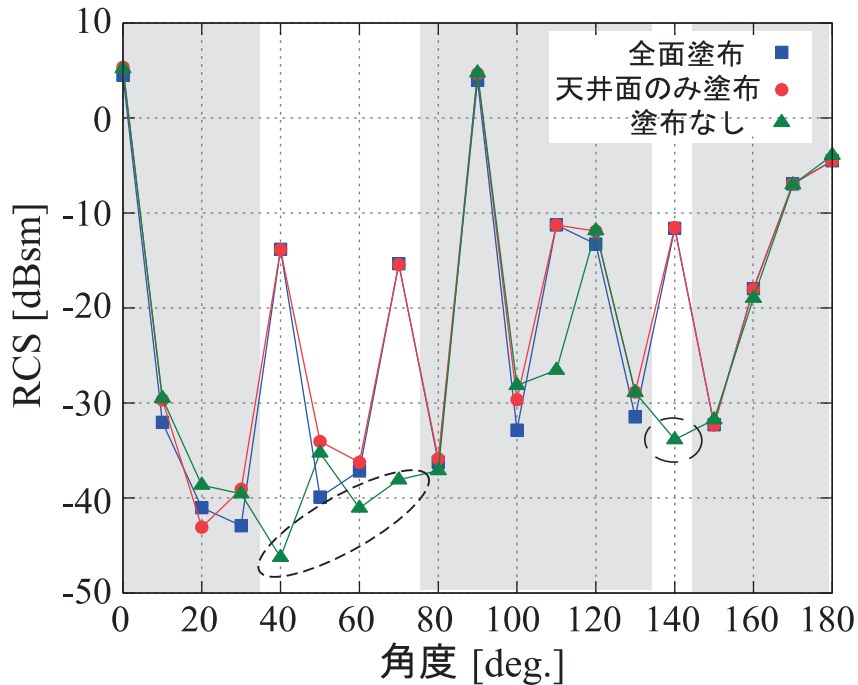


図6 RCS解析の結果

5. 実海域でのレーダー反射率向上効果の検証

開発したペーストのレーダー反射率向上効果を評価するため、実海域での実証試験を行った。試験では、独立行政法人国立高等専門学校機構 弓削商船高等専門学校の所有する実習船「弓削丸」ならびに「あゆ」を実験船として用いた。「弓削丸」は船用レーダーを搭載した大型船、「あゆ」は小型船である。停泊中の「弓削丸」のレーダーで「あゆ」の航行を観測し、船間距離とレーダー映像上での見え方（視認しやすさ）を評価した。「あゆ」に上部構造模型を搭載した。模型は塩化ビニル樹脂製角パイプの骨組みに GFRP 板を張って構成する。模型の寸法は前述の RCS 数値解析で用いたモデルと同様の値をもつ。輸送や小型船への搭載の手間を考え、容易に分解・組立が可能な構造とした。「弓削丸」および「あゆ」の諸元を表4に示す。また、「弓削丸」に搭載されたレーダーの外観を図7に示す。

表4 「弓削丸」、「あゆ」の諸元

	「弓削丸」	「あゆ」
全長 [m]	40.00	7.35
幅 [m]	8.00	2.57
深さ [m]	3.30	0.81
総トン数 [t]	240	1.5



図7 「弓削丸」搭載レーダーの外観

試験は、「あゆ」に開発ペーストを塗布した上部構造模型（GFRP 製）を搭載した条件Ⅰと上部構造模型を搭載しない、「あゆ」単体での条件Ⅱについて実施した。条件Ⅰで搭載した上部構造模型は、外壁面の上半分および天井面に開発ペーストを塗布した。図8に「あゆ」に模型を搭載した状態を示す。図8(a)は「あゆ」上での塩ビ角パイプ骨組みの組立の様子である。図8(b)は骨組みに GFRP 板を張り、上部構造模型の組立が完了した状態である（黒い部分がペースト塗布箇所である）。

船間距離の測定のため、「弓削丸」「あゆ」それぞれにハンディ GPS（Garmin 製、eTrex30）を配置した。GPS で記録した両船の緯度・経度の時系列データを用い、測地線航海法（Lambert-Andoyer の公式¹³⁾）に従って各時刻における船間距離を算出した。試験中、「弓削丸」は停泊し、「あゆ」は試験条件（上部構造模型搭載の有無）を変えて「弓削丸」からの離脱（および接近）を繰り返した。レーダー上での視認しやすさの評価対象として、今回は「あゆ」が離脱する際の挙動を観測した。「弓削丸」から見た「あゆ」の離脱の方向はおおよそ一定の方角としたため、「あゆ」へのレーダー波の入射方向（被照射角度：図6の「角度」に相当）もおおよそ一定（図6の180度近辺）と考える。なお、「弓削丸」からの距離が離れるほど、弓削丸レーダーから「あゆ」への見下し角度は小さくなる。

また、レーダー上での視認しやすさを評価するため、レーダー画像の解析を行った。解析の流れを図9に示す。まず「弓削丸」のレーダー映像から静止画を切り出し、各時刻の画像から「あゆ」の画像を抽出する。つぎに、画像をグレースケールに変換した上、「あゆ」のレーダー像を構成するピクセルの輝度値の総和を算出し、その値を「レーダー画面上での視認しやすさ」の指標として採用した。この指標の値は、レーダー上で大きく（レーダー像を構成するピクセル数が多い）、明るい（輝度値が大きい）ほど大きな値をとる。レーダー像を構成するピクセル数（レーダー映像上での見え方）は、レーダーのレンジやゲインの値に強く依存する。本試験ではレーダー上での見え方の条件を一定とするため、レーダーレンジの値を4.0マイル（NM）に、ゲインの値を70に固定した。



図8 (a)「あゆ」上での模型の組立, (b)「あゆ」に設置された上部構造模型

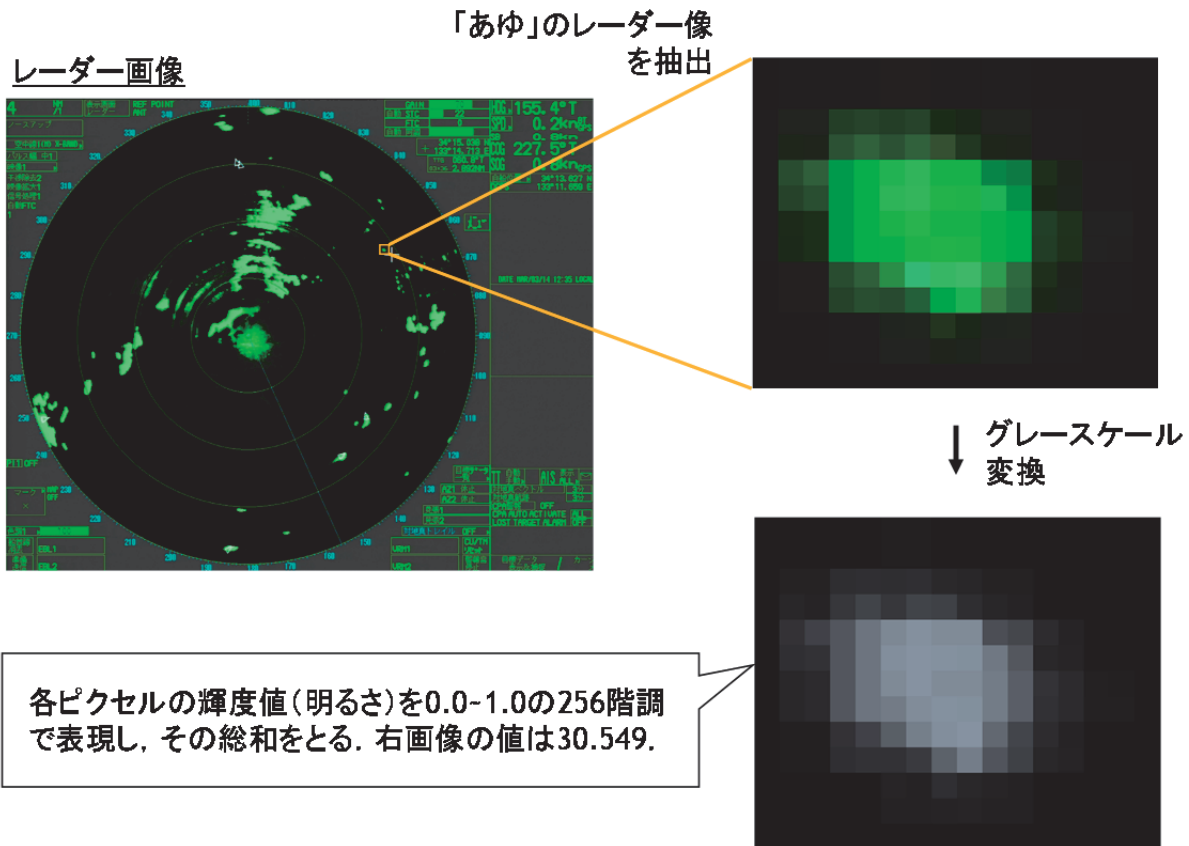


図9 レーダー画像解析の流れ

図10に船間距離と「視認しやすさ」の計測結果を示す。開発ペーストを塗布した上部構造模型を小型船に搭載することにより、レーダー上で視認できる距離が延び、かつ「視認しやすさ」も向上していることが判る。開発ペーストによる小型船のレーダー反射率向上効果を実海域でも確認することができた。

なお、図の5.25 km付近では上部構造を搭載しない場合の方が視認しやすさが大きな値となっている。これは、試験時に発生した波の影響と考える。上部構造を搭載した時よりも上部構造を搭載していない時の方が試験海域の波高が高く、「弓削丸」から離脱する「あゆ」の船体運動（ピッチング等）が激しかった。このため、「あゆ」へのレーダー波の入射条件も変動し、RCSが高くなるレーダーの入射方向・角度となる確率が増加したことにより、一部（5.25 km 付近）で上部構造搭載条件よりもレーダー上での視認しやすさが大きくなったと考える。小型船舶用のレーダー反射器の取り付けにおいても、マスト等に固定するよりも紐などで吊るしてある程度の動揺が可能にしておいた方が良くとされており¹⁴⁾、同様の原因により「あゆ」の船体運動が激しい方がレーダー反射の面からは有利な条件になったと考える。

また、上部構造を搭載した条件において、5.25 – 5.5 km の範囲で距離が離れるほど視認しやすさが向上しているが、これも同様に試験時の海象条件（波立ち）に起因すると考えている。「あゆ」が「弓削丸」から離脱する方向は沖合に向かう方向であり、「弓削丸」からの距離が離れるほど波高も大きくなっていった。このため、5.25 – 5.5 km の範囲では波立ちにより距離が離れるほど「あゆ」へのレーダー波入射方向・角度の変動が大きくなり（「弓削丸」から離れるほどレーダー波の入射条件の変動が増大し）、レーダー上での視認しやすさが距離に比例して増大したと考える。5.5 km 以上では、「弓削丸」と「あゆ」間の距離が長くなったことによるレーダー波の減衰により、視認しやすさが低下していったと考える。

上記の通り、上部構造を搭載した条件と上部構造を搭載しない条件では海象条件が異なり、レーダー反射の観点からは搭載しない条件の方が有利な状況での試験となった。それにも関わらず、ほとんどの距離において上部構造搭載条件の方がレーダー上での視認しやすさが上回る結果となり、開発ペーストによる視認しやすさの向上効果が確認できた。

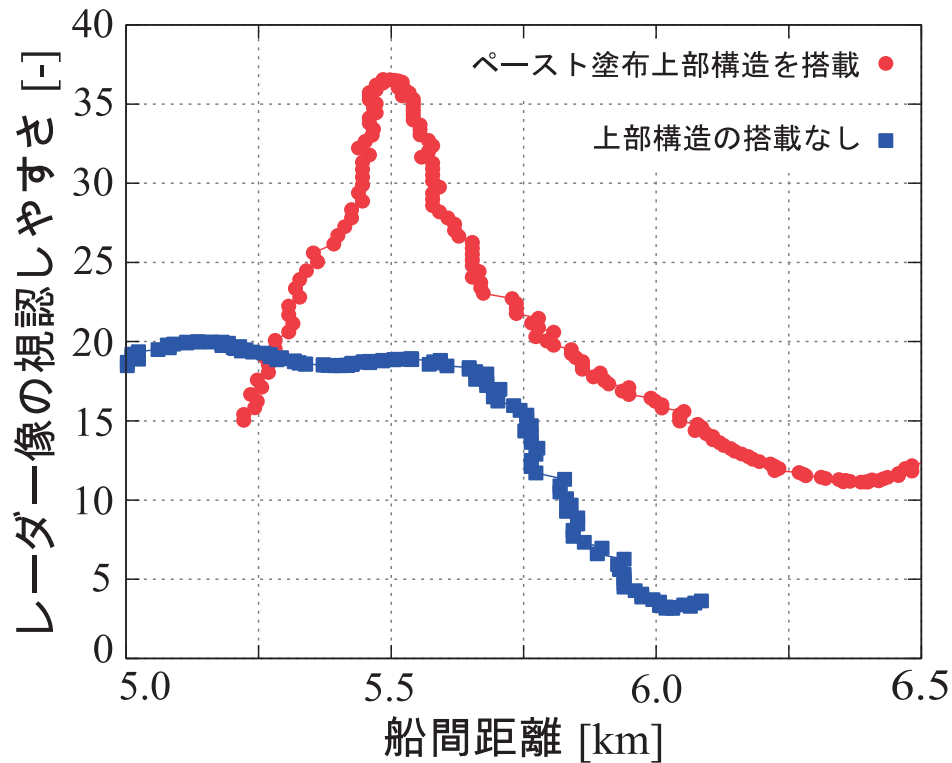


図10 開発ペーストによる「レーダー上での視認しやすさ」の改善結果

6. まとめ

小型船のレーダー反射率向上を目的として、高導電性ペーストを塗布する手法を提案した。結論を以下にまとめる。

- FRP 船のレーダー反射性を向上させる導電性カーボンペーストを開発した。開発したペーストは、高い導電性ととともに十分な剥離強度と良好な作業性を有する。
- 開発ペーストを船体上部構造に塗布した場合のレーダー反射断面積（RCS）を数値電磁界解析により算出した。ペースト塗布により FRP 製上部構造のレーダー反射性能が向上することが確認された。また、上部構造の天井面への施工が効果的であることが判った。
- 実海域での実証試験を行った。レーダー映像の画像解析により「レーダー上での視認しやすさ」を定量的に評価し、開発ペーストのレーダー反射率向上効果を確認した。

謝 辞

本研究は日立化成株式会社ならびに独立行政法人国立高等専門学校機構 弓削商船高等専門学校との共同研究により実施した。関係各位に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 海上保安庁「海難の現状と対策について（平成 27 年版）」, p.11, 平成 28 年 3 月,
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h28/k20160316/k160316-2.pdf>
(参照日 2016 年 6 月 29 日).
- 2) 海上保安庁「AIS 情報が入手できたことによる緊急回避の事例」,
<http://www6.kaiho.mlit.go.jp/bisan/succor/ais/index.htm>
(参照日 2016 年 6 月 29 日).
- 3) 海上保安庁「海上保安レポート 2007 : AIS 情報に基づくカンボジア籍貨物船 S 号衝突回避事例」,
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2007/honpen/p086.html>
(参照日 2016 年 6 月 29 日).
- 4) 総務省「電波利用ホームページ : AIS の導入効果」,
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/satellit/ais/>
(参照日 2016 年 6 月 29 日).
- 5) 角田 領, 大和 裕幸, 安藤 英幸 : 操船シミュレータとシミュレーションを利用した衝突リスクの評価に関する研究 : 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 5E 号 (2007), pp.83-84.
- 6) 1974 年の海上における人命の安全のための国際条約 附属書 第 V 章 (平成 14 年 7 月 1 日 発効).
- 7) 船舶設備規定 第 146 条.
- 8) 総務省「海上における船舶のための共通通信システムの在り方及び普及促進に関する検討会 ワーキンググループ (第 1 回)」, 資料海共 WG1-2 “大型船と小型船の衝突海難について”,
http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/kaijo_senpaku/pdf/080513_2_si2.pdf
(参照日 2016 年 6 月 29 日).
- 9) 日本海事協会「SOLAS V 章 2000 年改正の概要」,
https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/seminar/old/solas-v_txt_2001.pdf
(参照日 2016 年 6 月 29 日).
- 10) 日本財団「SOLAS 条約 2000 年改正に係る国内関係法令の適用について」,
<https://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2002/00098/contents/001.htm>
(参照日 2016 年 6 月 29 日).
- 11) 井手 麻奈美, 林 尚吾: FRP 製小型漁船のレーダ断面積について, Navigation: 日本航海学会誌, 第 171 号 (2009), pp.54-59.
- 12) 山本 克美, 殿谷 保雄, 重松 宏志 : 廃プラスチックを利用した電気材料の開発, 東京都立産業技術研究所報告, 第 6 号 (2003),
https://www.iri-tokyo.jp/joho/kohoshi/houkoku/h15/documents/6r14f_2.pdf
(参照日 2016 年 6 月 29 日).
- 13) Walter Davis Lambert: The distance between two widely separated points on the surface of the earth, Journal of Washington Academy of Sciences, Vol.32 (1942), pp.125-130.
- 14) 四日市海上保安部「小型船舶用航海用レーダー反射器の効果的な取り付け方」,
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/04kanku/yokkaichi/e-0/e-6/toritukekata.pdf>
(参照日 2016 年 6 月 29 日).