

令和 6 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

海洋状況把握 (MDA) 等に適用可能な 革新的画像処理技術の研究

令和 7 年 5 月

川崎重工業株式会社

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、川崎重工業株式会社が令和４年度から令和６年度にかけて実施した「海洋状況把握(MDA)等に適用可能な革新的画像処理技術の研究」の成果を取りまとめたものです。

0. 研究背景

頻繁に出没する海洋上の脅威や海難事故等の現場を早期発見するため、MDA (Maritime Domain Awareness) 等の能力強化が求められている。これまではSAR(合成開口レーダ)や、昼間の光学観測しか手段が無く、タイムリーに海洋状況を把握する新たな手段の確保が望まれる状況にある。

本研究が目指す「夜間の光学観測による船舶の検出」が可能となれば、この課題を解決する手段となる可能性がある（図0-1、図0-2参照）。

頻繁に出没する海洋上の脅威や、海難事故等の現場を早期発見し、MDA等の能力強化に資する

平成30年5月15日の「総合海洋政策本部決定」より抜粋

「我が国における海洋状況把握の能力強化に向けた今後の取り組み方針」の決定へ

MDA能力強化の3つのアプローチ

1. 情報収集体制 ～海洋を見る「目」の強化～
2. 情報の集約・共有体制 ～情報をつなぐ「神経」の強化～
3. 国際連携・国際協力 ～国際的な「ネットワーク」の強化～

「目」と「神経」と「ネットワーク」の強化によって「海洋の可視化」を一層向上

これまで活用できなかった夜間の光学画像から対象を抽出することで、観測する衛星の機数増加を抑制しつつ、観測頻度を向上させ、「海洋を見る「目」の強化」へ貢献する

図0-1 MDAの能力強化の必要性

本提案では、これまで活用されていない夜間の画像を取得・解析することにより、SAR(合成開口レーダ)の撮影頻度の低さや、夜間の光学情報の欠落を補うことができる

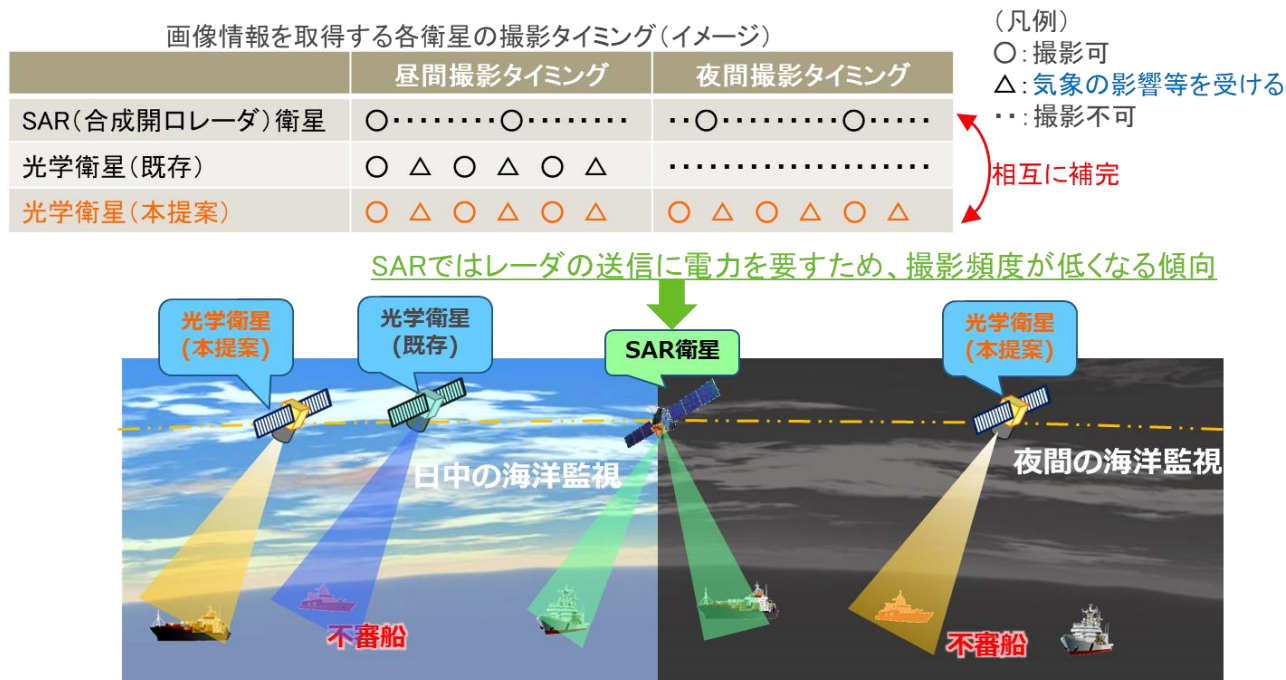


図0-2 夜間に光学観測することによりSARや昼間の光学観測を補完するイメージ

1. 委託業務の目的

本研究では、夜間に人工衛星から撮像された光学カメラの画像の中から、人の目では判別できない程度の明るさの海上船舶を、地上装置での画像処理により自動的に検出可能なアルゴリズムの構築を目指す。

地球に接近する小型天体などの非常に暗く小さい物体を、天体望遠鏡の画像中から検出できる宇宙航空研究開発機構（以下JAXA という）が特許を持つ画像処理技術をベースラインとし、海上物体検出が確実に実施できる様に、新たな画像処理技術を生成・開発する（3.2項（1）参照）。

この画像処理アルゴリズムは、これまで天体望遠鏡にて取得された天体の画像中から、デブリやメテオロイドの検出に活用されてきた。

本研究では、夜間に撮影された暗い海洋の画像に、このアルゴリズムを発展的に適用し、船舶の検出を目指す。3か年を通じた研究の進め方を図1-1に示す。

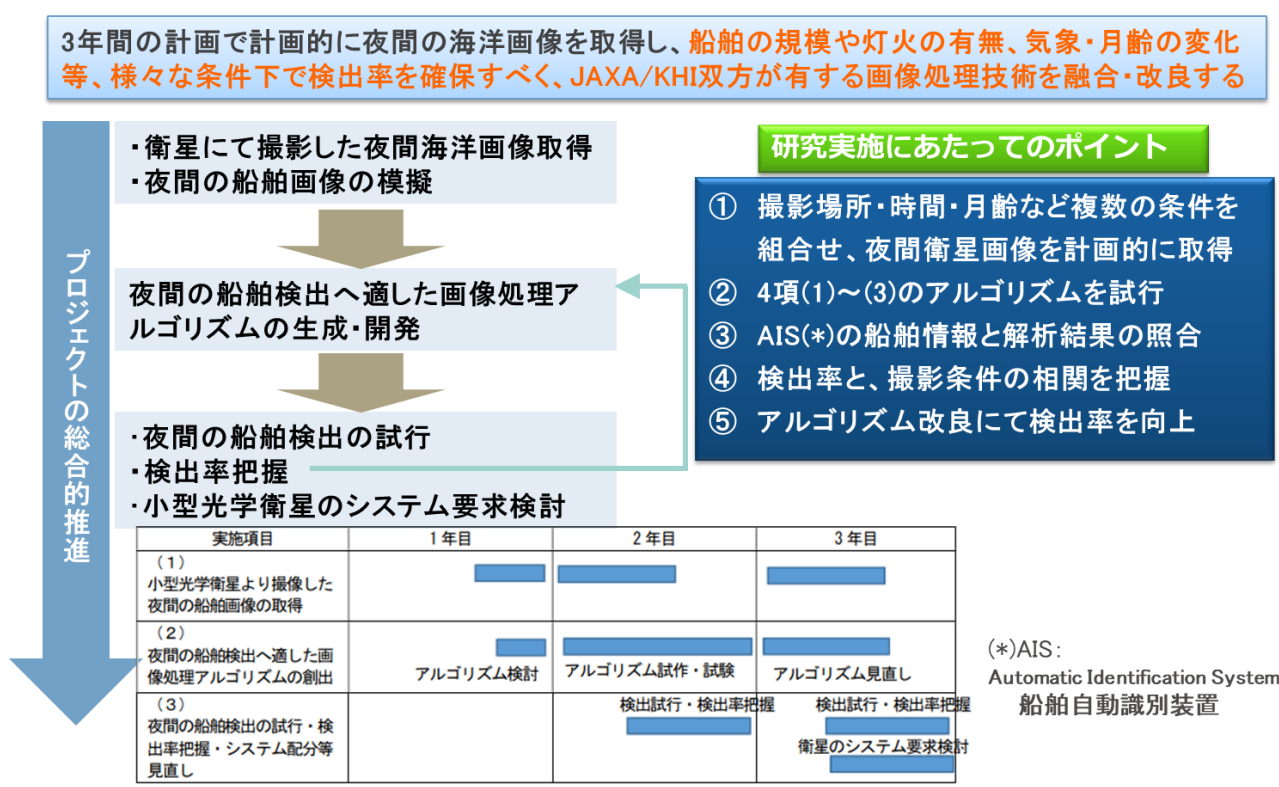


図1-1 3年間の研究の進め方

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

研究開始時に設定した研究目標の達成度を、表2-1に示す。詳細は3章に記述する。

表2-1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

	研究目標	マイルストンの達成状況を評価する定量指標および数値目標	数値目標達成状況
(1) 小型光学衛星より撮像した夜間の船舶画像の取得・模擬	夜間の撮影自体を実施している光学衛星は極めて限定されるため、その衛星を特定し、海洋の画像を計画的に取得する。AISなどの他の情報から船舶が写っていると想定される夜間の海域を対象とする。 また検出率の限界を見極めるため、明るさや全長が異なる船舶を模擬した複数の像をコンピュータグラフィックスで生成し、購入した衛星画像中に埋め込み、これらの像を検出することで、検出率を把握できるようにする。	条件指定により自動的に模擬画像を生成し、海洋画像中に埋め込む作業のプログラム化完了	衛星画像の取得を100%達成した 模擬画像を生成し、衛星画像に埋め込むプロセスを自動化し、目標を100%達成した。
(2) 夜間の船舶検出へ適した画像処理アルゴリズムの生成・開発	不審船など、安全保障上発見に努めるべき対象船舶は、艦橋の照明を消すなど、発見されにくくする行動をとることが想定される。このような船舶を検出するため、分担研究機関であるJAXが特許を有する「地球に接近する非常に暗い天体を天体望遠鏡の画像から発見することができる画像処理技術」をベースラインとしつつ改良を試み、取得画像及びKHI作成の模擬画像を解析する。	低輝度な小型船舶の抽出が可能となる	低輝度な小型船舶の抽出が可能となり、目標を100%達成した
(3) 夜間の船舶検出の試行・検出率把握・システム要求検討	(2)で実施した画像処理の結果を整理し、目標とする80%の検出率が達成できたか確認する。 目標が達成できていない場合は(2)の画像処理アルゴリズムの見直しを行い、目標に近づけるべく再度評価を行う。 また画像を取得可能となる小型衛星の光学系への要求を整理し、小型衛星システムの主要な仕様を設定する。	夜間に撮影した海域に存在する船舶数をAISデータにより把握し、改良した画像処理アルゴリズムにより、画像中から80%以上の船舶を検出できる。 また衛星システムの仕様設定を完了させる。	画像処理アルゴリズムの改良により、満月では100%の検出率、満月の1/2の輝度では63%、1/4の輝度では50%が検出できることを確認し、目標の80%には届かなかったものの、暗い月光下での検出も可能であることが確認できた。 衛星システムの仕様設定を完了し、目標を100%達成した。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

3. 1 小型光学衛星より撮像した夜間の船舶画像の取得・模擬

(1) 撮影手段の選定

夜間の撮影自体を実施している光学衛星は極めて限定されるため、その衛星を特定するため、令和4年度に複数の光学衛星を候補として検討した。令和5～6年度も調査結果に変更は無く、結果を表3.1-1に示す。夜間撮影に適した高感度の撮像素子（Planeセンサ）を搭載し、画像処理に適した連続撮影が可能な点から、キャノン電子の衛星（CE-SAT-ⅡB）を選定した。

また、令和5年度にはISSのカメラについても画像（動画）を取得し、解析を試みた。

表3.1-1 光学衛星の候補調査

問合せ先	衛星データプロバイダー			衛星運用者		
	PASCO	日本スペースイメージング	リモートセンシング技術センター (RESTEC)	アクセルスペース	ISSカメラ @高度415km	BlackSky
Q 1) 夜間撮影の可能性	ASNARO-1で撮影可能	注文に対応できる衛星が無い (アーカイブもない)	キャノン電子の衛星は撮影可能 (正式配信は今後)	夜間撮影は困難 (実施しない)	撮影可 (実績あり)	日本スペースイメージングに問合せしたが、回答無し
Q 2) 指定エリアの定期的な撮影	他のユーザ予約と競合しなければ撮影可 (夜間は競合無し)	—	未発表	昼間は他のユーザ予約と競合しなければ撮影可	他のユーザと協業しなければ撮影可	—
Q 3) 撮影頻度	回帰日数 : 43日 再観察日数 : 5日	—	現在 : 1回/16日程度 今後 : 未発表	現在 : 1～2回/2週 最終 : 1回/1.4日	利用期間終了で撮影不可	—
Q 4) 同一周回で同一地点の複数枚撮影可否	問合せ中	—	撮影可能	不可	動画として撮影し、静止画を切り出す形に対応	—
Q 5) 地上分解能(GSD)	(パンクロ)0.5m (マルチスペクトル) 2.0m	—	(望遠Ⅰ) 5.1m (望遠Ⅱ) 5.0m	—	SONYカメラ : 29m(*3)	—
Q 6) 画像購入価格	新規撮影(最少単位) 84万円/100km2	—	新規撮影(最少単位) 35万円/35km2	—	約23万円/夜間の動画 1セット	—
Q 7) その他	顧客要求で、夜間撮影実績あり	夜間の画像は全く経験なし	CE-SAT-ⅡBは夜間撮影に適した素子を搭載	30×30kmが撮影の最小単位	—	—

(*1) <https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-7SM2/spec.html>

(*2) https://faq.canon.jp/app/answers/detail/a_id/73374/session/L2F2LzEvdGltZS8xNjIwMzU1MjA1L2dlbi8xNjIwMzU1MjA1L3NpZC9mVTA3UF9WcU83amFFenhia3RDM3JGejRQT3BkSzhlX0VtQnRHd19WSndsQ1YwX3VlbnJYdktQTUVqZ2xpVWxjTkFnejdiUXdndyU3RWdGalY3a3hFQ2dqY1NONGRLYkxPbkhQVjJlUllaVUVnZHBvczBMZ1ZPMHA2ZyUyMSUyMQ%3D%3D

(*3) https://antaresdigicame.org/photo_gallery/camera/camera114.html

(2) 撮影海域の選定

海保や安保上の関心海域、交通の要衝となる海域を複数選定し絞り込みを実施した。選定結果を、表3.1-2に示す。以下の海域を選定した。

令和4年度・・・スエズ湾

令和5年度・・・東京湾

令和6年度・・・ジブラルタル湾

表3.1-2 撮影海域選定結果

海保や安保上の関心海域、交通の要衝となる海域を複数選定し、以下の点から絞り込みを実施 ・ AISデータ、海上保安庁データに基づく船舶数 ・ 衛星による撮影可否 ・ 晴天率データに基づいた撮影の確実性						
R04年度は、撮影の確実性から、船舶が多く、撮影も可能で、晴天率が高い点から、スエズ湾を選定 R05年度は、陸地から船舶の観察が可能で、衛星画像との比較が可能な東京湾を選定 R06年度は、夜間に移動する船舶数が多い地域(晴天率高)として、ジブラルタル湾を選定						
カテゴリ	海保関心海域	海峡付近			運河出入口	
候補海域	尖閣諸島周辺 (石垣島)	ジブラルタル湾 (地中海)	マラッカ海峡 (シンガポール)	東京湾	スエズ運河	パナマ運河
船舶数(*1)	海域面積に比べ 極少数 (海保HP情報より)	多数	多数	多数	多数	多数
撮影可否	可	可	可	可	可	可
晴天率(*2)	1月52%程度 2月51%程度	1月62%程度 2月62%程度	23%程度	1月72%程度 2月65%程度	81%程度	57%程度
↑ 令和6年度 ↑ 令和5年度 ↑ 令和4年度						
(*1) MarineTraffic社のHPによるリアルタイムモニタより (*2) https://ja.weatherspark.com/						

(3) 撮影結果

① スエズ湾の撮影

撮影した海域を図3.1-1に示す。

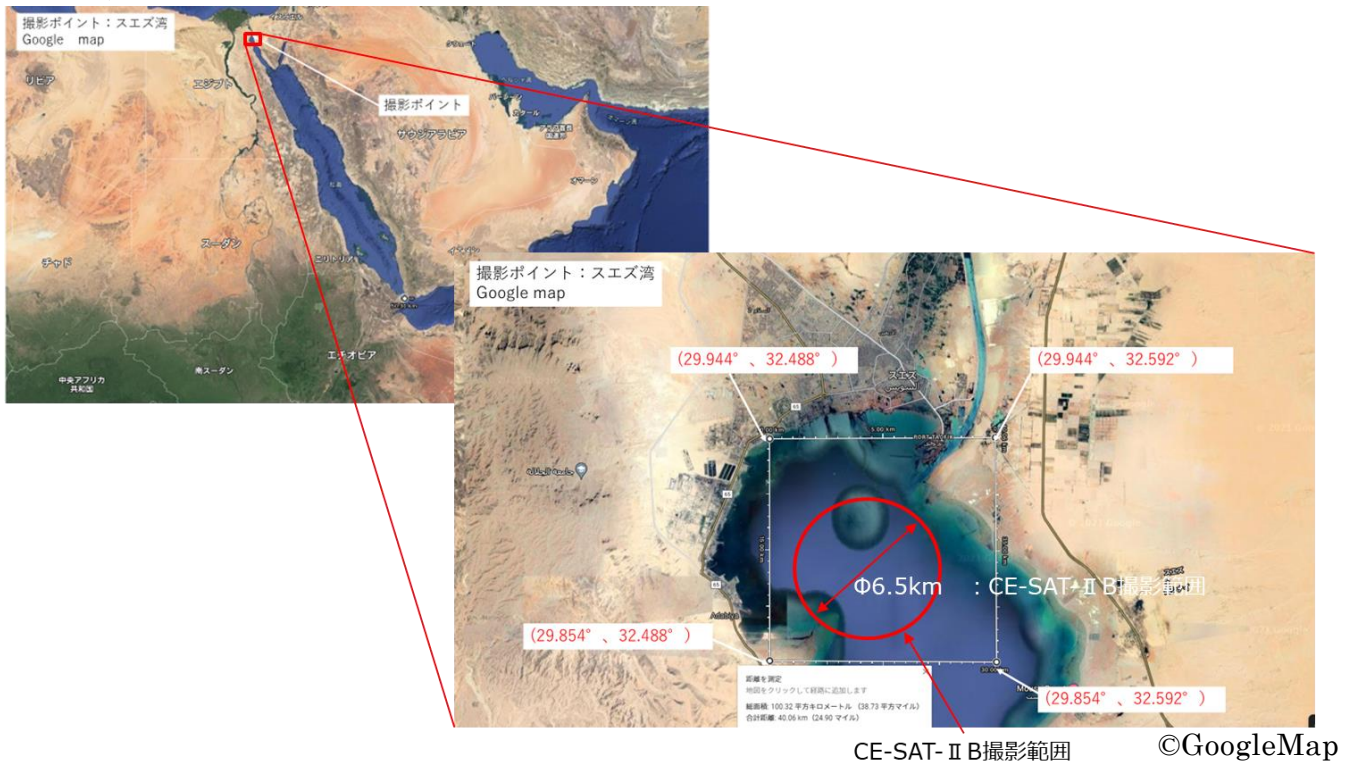


図3.1-1 撮影した海域（スエズ湾）

一般の船舶は夜間の航行のため灯火をとめているが、発見すべき船舶の中には非常に暗い状態の灯火で運行しているものもあると想定し、照明として月光のみが頼りとなる環境下での検知可能性を確認することを検討した。今回の撮影では、満月に近い月齢下での撮影と、月光としての照度が小さくなる半月に近い状態で、同一地域を撮影するためのプランを検討し、表3.1-3に示す撮影機会の中で2023/3/1（半月に近い、月齢8.8）、2023/3/6（満月に近い、月齢：13.8）の2回、CE-SAT-II Bが指定した海域を夜間に通過することが確認できたため、この機会に撮影を行うこととした。各撮影ケースでは、同一の海域を衛星の望遠鏡が指向しながら5秒間隔で連続10回撮影した（各撮影での露光時間は一定で、数100msec）。10枚撮影したのは、ベースラインとしたJAXAの画像処理アルゴリズムでは、撮影された複数枚の画像の重ね合わせの技法により、暗い移動物体を検出することを特徴とするためである。

表3.1-3 スエズ湾の撮影候補日と撮影結果及び採用日の選定日時

No.	エジプト・スエズ湾		
	日時	最大仰角	備考
1	30 Jan 2023 19:05:	撮影せず	
2	4 Feb 2023 19:07:	88	満月は 5 Feb
3	9 Feb 2023 19:09:	85	
4	14 Feb 2023 19:11:	70	半月(下弦) は Feb 14
5	19 Feb 2023 19:13:	76	
6	24 Feb 2023 19:14:	73	
7	1 Mar 2023 19:14:	71	半月(上弦) は Feb 27
8	6 Mar 2023 19:14:	70	満月は 7 Mar
9	7 Mar 2023 18:56:	60	満月は 7 Mar

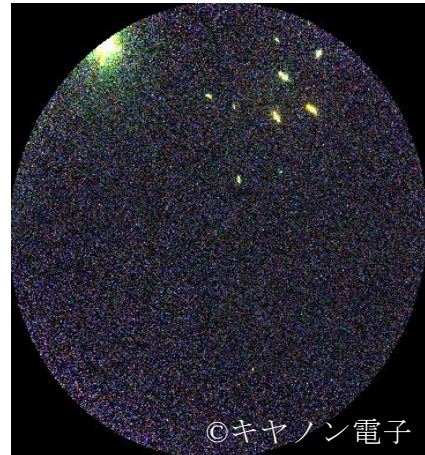
撮影

撮影

両日に撮影された画像（オリジナルと、明度を向上させたものの2種）を、図3.1-2、及び図3.1-3に示す。画像の左上側に見える明るい領域は、スエズ湾部の陸域であり、所定の海域を精度よく撮影するためのレファレンスとして、画角内に陸地が写り込むように撮影したものである。



オリジナル画像



明度アップした画像

図3.1-2 2023/3/1に撮影したスエズ湾の画像



オリジナル画像



明度アップした画像

図3.1-3 2023/3/6に撮影したスエズ湾の画像

② 東京湾の撮影

撮影した海域を、図3.1-4に示す。

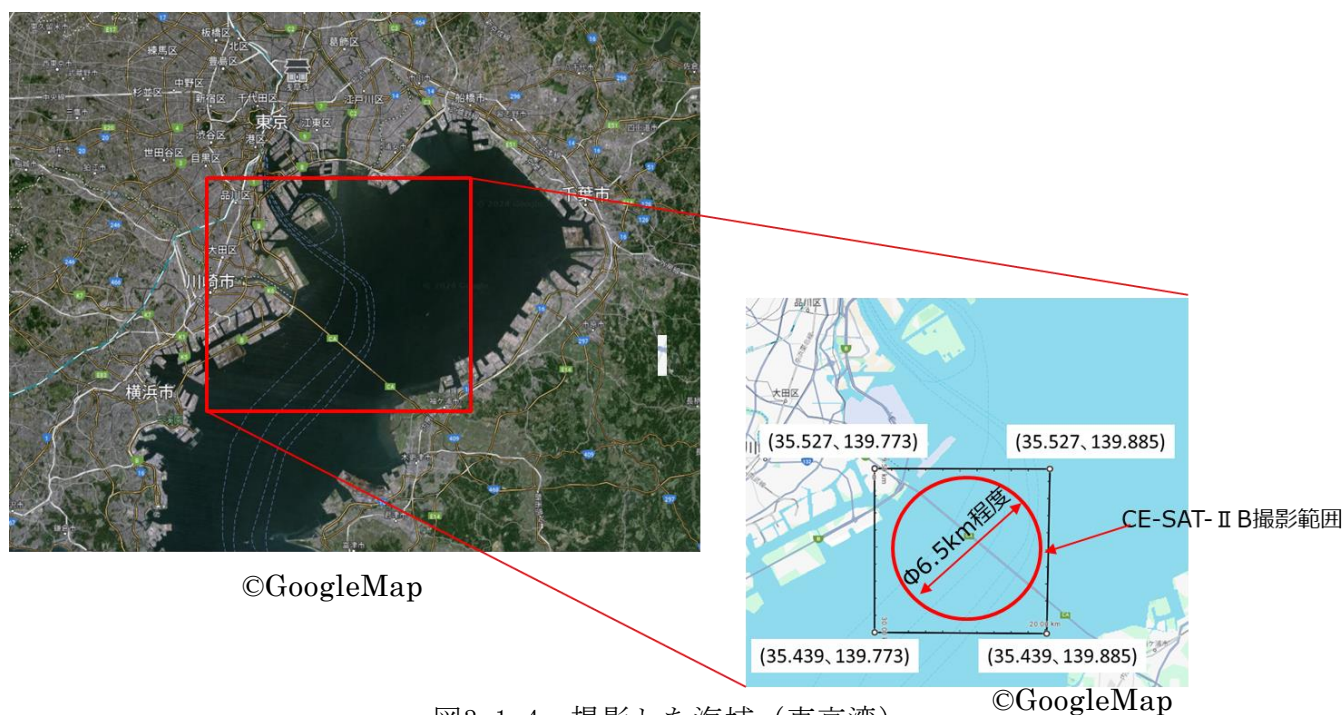


図3.1-4 撮影した海域（東京湾）

令和4年度に引き続き、満月に近い月齢下での撮影と、半月に近い状態で、同一地域を撮影するためのプランを検討した。撮影候補日を図3.1-5に示す。

撮影日時としては、灯火を消した船舶の検出可能性を確認するため、月明かりの照度条件を2パターンで撮影にトライする。1回の撮影あたり、連続して10枚の撮影を行う。

月齢が満月付近の条件(12/22 12/26、12/30)	} 悪天候、雲量過多、衛星不調などを除き、早めに撮影した回の画像を採用
月齢が半月付近条件 (1/18、2/13、2/21)	

(撮影結果)

① 満月時

12/22・・・晴天、撮影成功、オフナディア角：19度

12/26・・・晴天、撮影成功、オフナディア角：10度、陸域からの船舶撮影も実施

12/30・・・曇天で撮影できず

12/22、12/26ともに良好な画像であったが、12/26の画像の方がオフナディア角が小さく、画像の歪みが小さい。また、陸域からの観測結果とも照合できるため、12/26の画像を採用した。

② 半月時

1/18・・・曇天で撮影できず

2/13・・・晴天、撮影成功、オフナディア角：19度

2/21・・・曇天で撮影できず

候補日の中で撮影出来たのは2/13のみであり、この日に撮影された画像を採用した。

図3.1-5 撮影候補日と撮影結果及び採用日の選定

令和5年度の撮影でも衛星の望遠鏡が指向しながら5秒間隔で連続10回撮影したが、1枚目から9枚目までは露光時間は一定とし、露光時間の変化による影響も評価するため、10枚目のみ露光時

間を2倍とした。

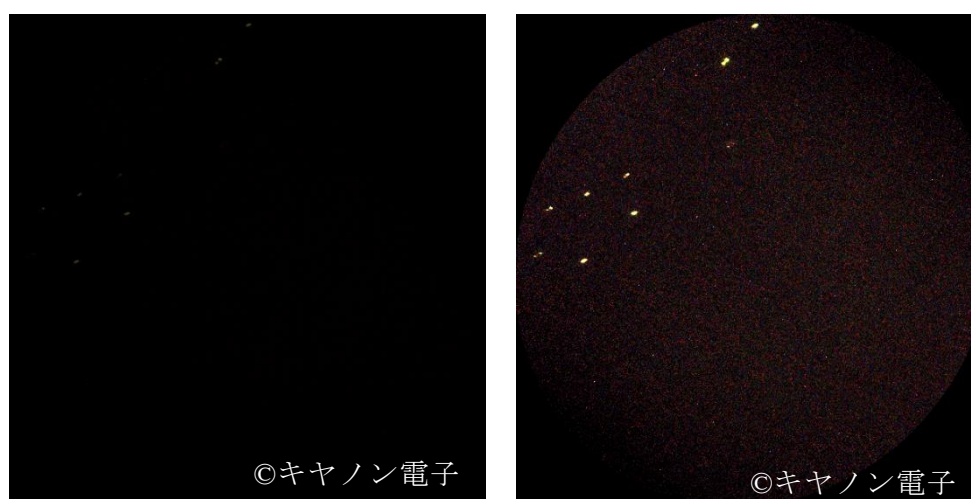
満月の2023/12/26、及び半月の2024/2/13に撮影された画像（オリジナルと、明度を向上させたものの2種）を、図3.1-6、および図3.1-7に示す。



オリジナル画像

明度アップした画像

図3.1-6 2023/12/26に撮影した東京湾の画像



オリジナル画像

明度アップした画像

図3.1-7 2024/2/13に撮影した東京湾の画像

明度化する処理を行うと、東京湾の港付近に停泊する船舶が図の左上の方に確認できる。

③ ジブラルタル湾の撮影

撮影した海域を、図3.1-8に示す。

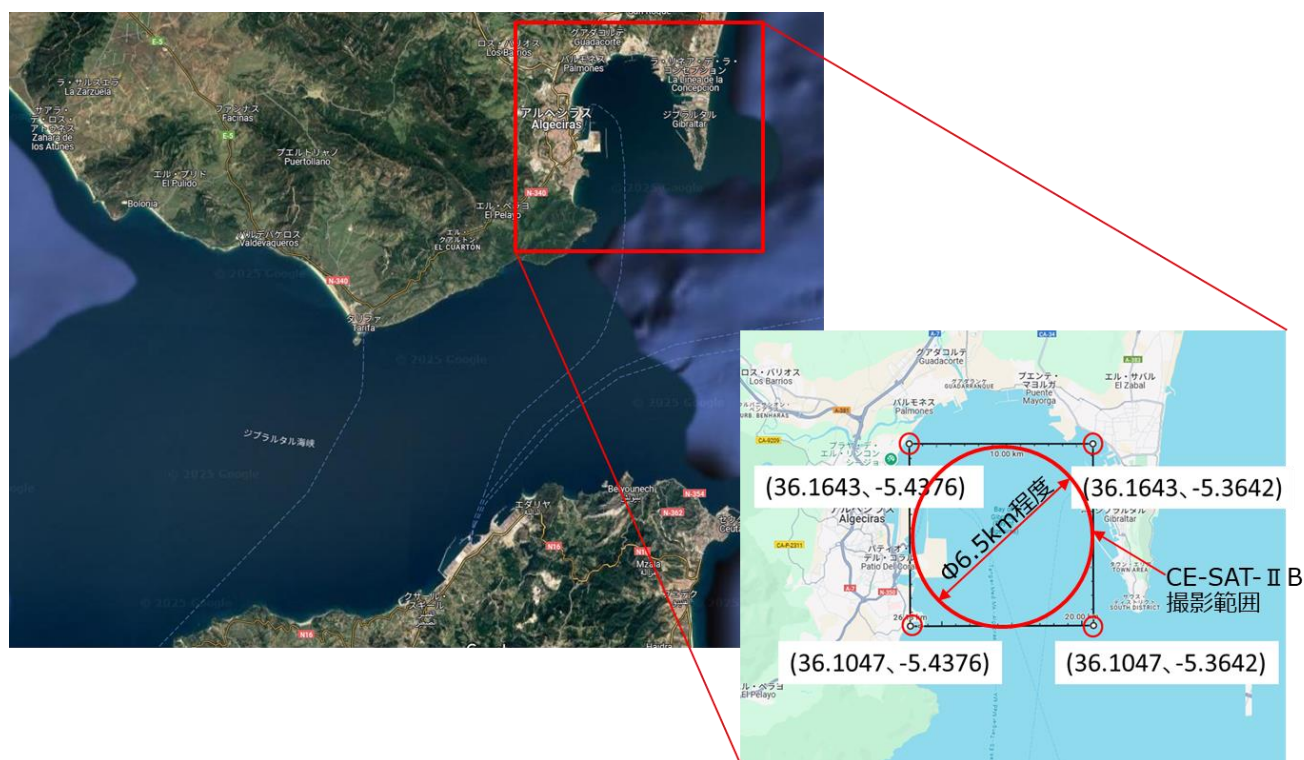


図 3.1-8 撮影した海域（ジブラルタル湾）

令和4年度、令和5年度と同様に、満月に近い月齢下での撮影と、半月に近い状態で、同一地域を撮影するためのプランを検討した。撮影候補日を表3.1-4に示す。

表 3.1-4 ジブラルタル湾の撮影を行った日時

撮影場所	撮影候補日時(UT)	オフナディア角(deg)	月齢	
ジブラルタル海峡	10 Dec 2024 21:39	6	8.9 (半月)	撮影
	15 Dec 2024 21:32	9	13.9 (満月)	
	8 Jan 2025 21:36	6	8.2 (半月)	
	15 Jan 2025 21:43	9	15.2 (満月)	撮影

令和6度の撮影でも衛星の望遠鏡が指向しながら5秒間隔で連続10回撮影したが、1枚目から9枚目までは露光時間は一定とし、露光時間の変化による影響も評価するため、10枚目のみ露光時間を2倍とした。

半月の2024/12/10、および満月の2025/1/15に撮影された画像（オリジナルと、明度を向上させたものの2種）を、図3.1-9、および図3.1-10に示す。



オリジナル画像



明度アップした画像

図3.1-9 2024/12/10に撮影したジブラルタル湾の画像



オリジナル画像



明度アップした画像

図3.1-10 2025/1/15に撮影したジブラルタル湾の画像

明度化する処理を行うと、ジブラルタル湾内に停泊する船舶が図の左上の方に確認できる。

3. 2 夜間の船舶検出へ適した画像処理アルゴリズムの生成・開発

(1) 船舶の検出に活用する画像処理アルゴリズム

地球に接近する小型天体などの非常に暗く小さい物体を、天体望遠鏡の画像中から検出できる宇宙航空研究開発機構（以下JAXA という）が特許を持つ画像処理技術をベースラインとし、海上物体検出が確実に実施できる様に、新たな画像処理技術を生成・開発する（図3.2-1、図3.2-2参照）。

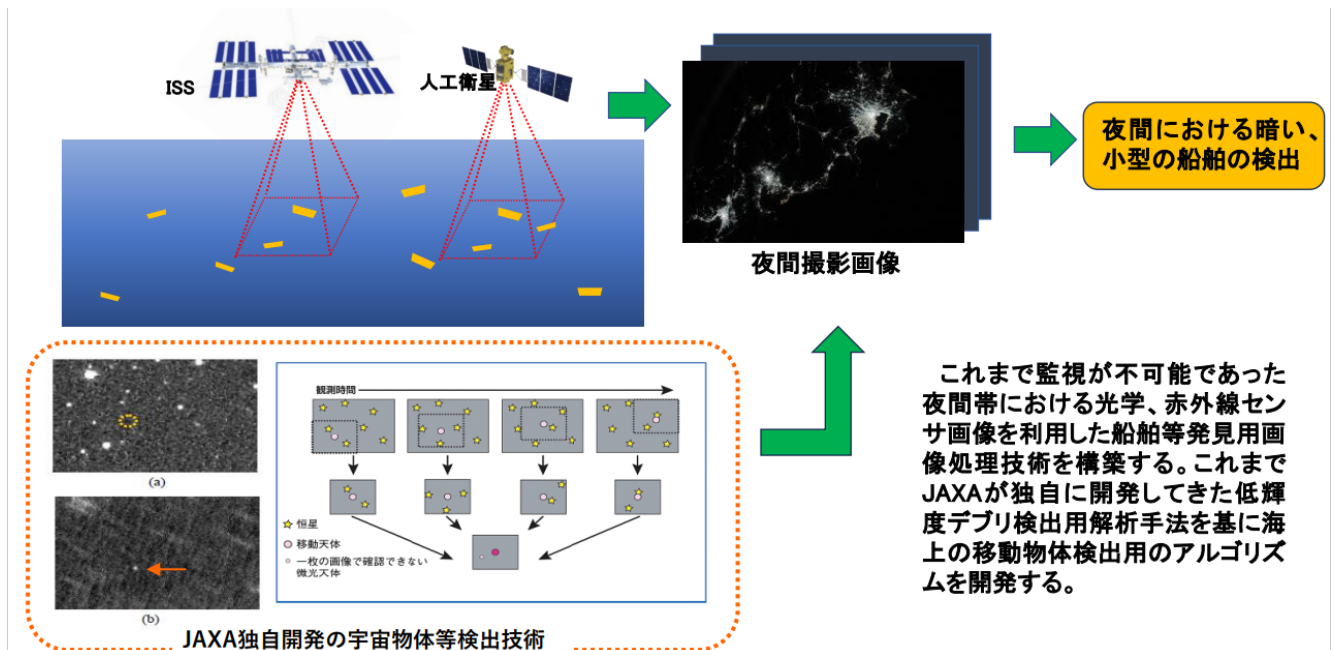


図3.2-1 ベースラインとする画像処理アルゴリズム

JAXA開発の移動物体検出アルゴリズム

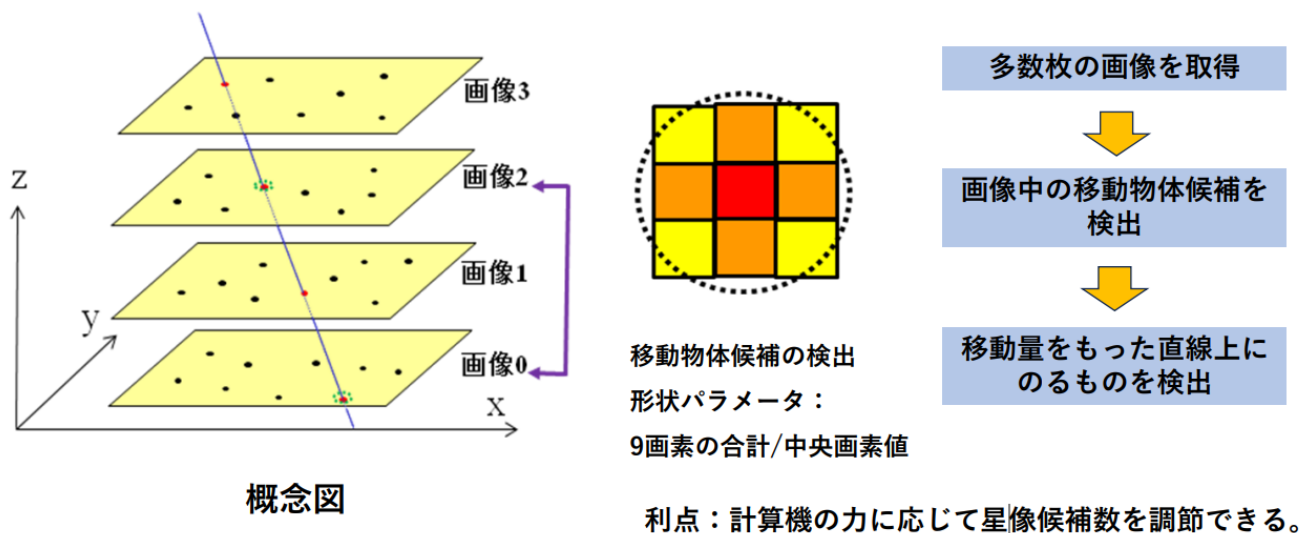
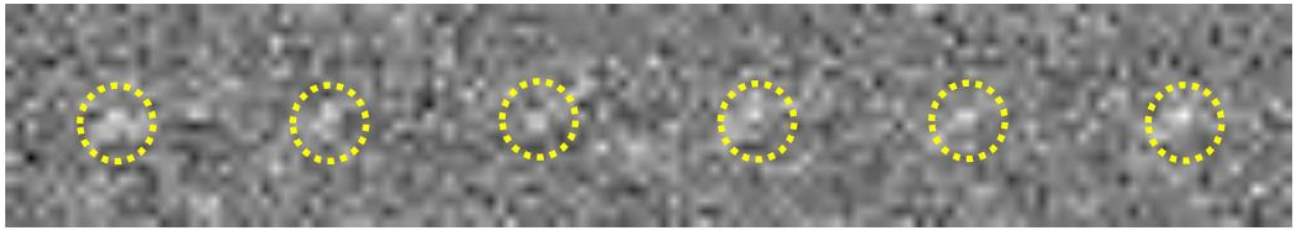


図3.2-2 移動物体検出アルゴリズムの概念

図3.2-1、図3.2-2に示した画像処理アルゴリズムは、これまで天体望遠鏡にて取得された天体の画像中から、デブリやメテオロイドの検出に活用されてきた。図3.2-3には、静止軌道を天体望遠鏡にて撮像した画像から、カタログ化されていない未登録デブリを検出した例である。



JAXA開発移動物体検出アルゴリズムを利用した検出例。6枚の静止軌道領域を撮影した連続画像において候補付近の画像を並べた様子。17等（30cmサイズ）の未カタログ静止デブリ。

図3.2-3 移動物体検出アルゴリズムによって発見された小型デブリ

(2) 衛星撮像画像の解析結果

① R04撮影画像の画像処理結果

2 回撮影した海洋画像と AIS データ(*)を用いて解析を実施した。

(*)AIS (Automatic Identification System, 船舶自動識別装置) は国際 VHF を利用した、船舶の動静を自動で識別する装置であり、以下の様な船舶への搭載が義務付けられているが、他船舶との衝突防止や、気象情報・公開情報の配信も行われるため、搭載義務がない小型の船舶にも搭載されている場合がある。

- ・ 国際航海に従事する 300 総トン以上の全ての船舶
- ・ 国際航海に従事する全ての旅客船
- ・ 国際航海に従事しない 500 総トン以上の全ての船舶

KHI が今回購入した AIS データは、米国 SpireGlobal 社が収集しているものであり、沿岸部に設置された受信機で受信した AIS データ、船舶に設置された受信器で受信した AIS データ、並びに自社が運営する 3U サイズのキューブサットのコンステレーションにより宇宙から収集した AIS データの、計 3 種の情報収集手段により得られた AIS データを統合して販売している。

キャノン電子の衛星による 2 回撮影した海洋画像と AIS データを用いて実施した解析結果のサマ리를、表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 R04 海洋画像から移動中の船舶を抽出する解析結果

ケース	取得方法	画像取得日時	月 齢	対象海洋	解析結果
# 1	キャノン電子衛星	2023/3/1 19:13:40～ 19:14:35	8.8 半月	スエズ湾	図 3.2-4 に示す AIS のデータ(*)では移動中の船舶が 2 隻あったが、存在を抽出できなかった
# 2		2023/3/6 19:13:40～ 19:14:35 UTC	13.8 満月	同 上	図 3.2-7 に示す。 AIS データによれば移動中の船舶は 2 隻存在したが、画像解析により 1 隻を検出できた (もう 1 隻は灯火が明るく画像から目視可能。)

(解析ケース # 1)

購入したAISデータを、CE-SAT-ⅡBで撮影された画像に重畳して表示させた結果を、図3. 2-4に示す。船舶が発出する信号は、数秒から数分間隔であり、撮影された日時に最も近い時刻に当該海域から発出されたAISデータのみを中抜き丸印でプロットしている。

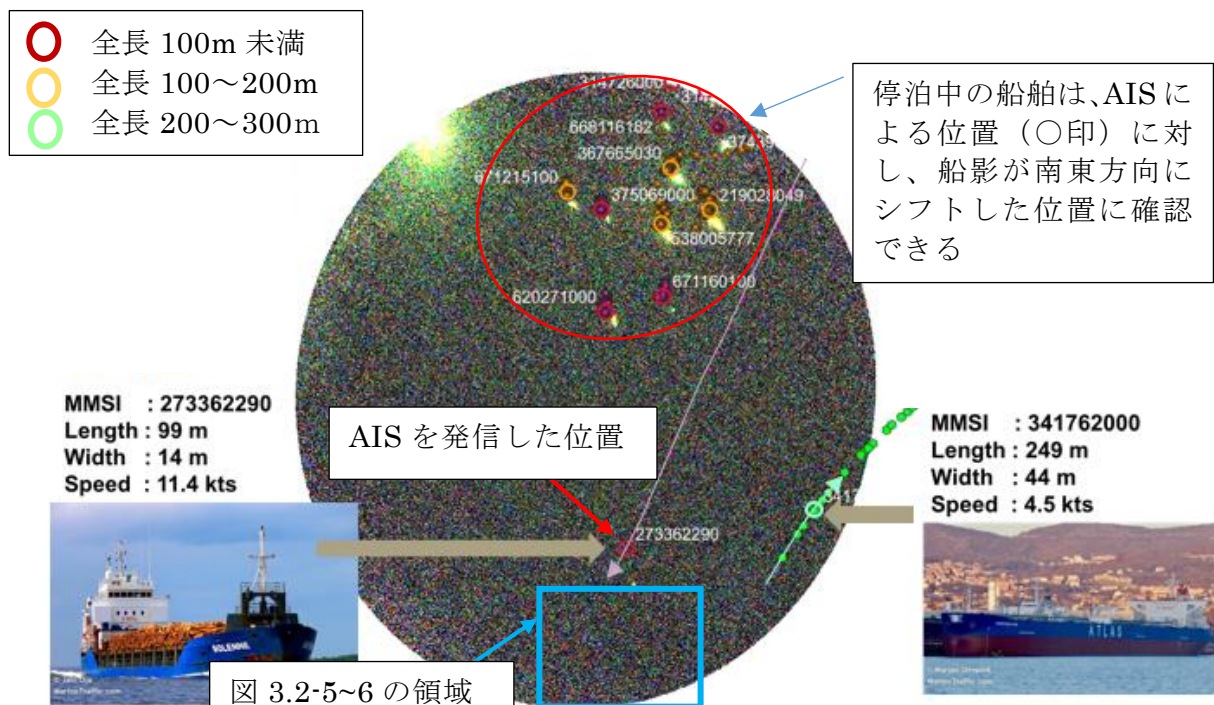


図3. 2-4 AISデータと撮影画像の重畳結果(2023/3/1撮影)

画像上部の全長100m未満の船舶や、100～200mの船舶は、撮影時点で明るい灯火をとめており、画像処理を行うまでもなく画像とAISデータとの対応が明確である（画像上の船舶位置と、AISが受信するGPS信号を基に発出する緯度・経度情報と間に一定方向のずれが生じているが、画像上の緯度経度の情報が、わずかにオフセットしているものと推定された）。

一方、AIS情報によれば移動している船舶が図の下部に2隻存在し、全長99mの船舶が、北東から南西の方向に向かって11.4ktsで進んでおり（船舶識別番号：MMSI273362290）、また全長249mの船舶が、北東方向へ進んでいる（船舶識別番号：MMSI341762000）が、撮影された画像上からは明確に視認できない。よって、画像処理によりこの2隻の船舶の抽出を確実にを行うことを中心に、画像処理による船舶の抽出を試みた。

図3. 2-5には、AISデータから図3. 2-4の左下の船舶が存在すると想定される領域についてベースライン画像処理アルゴリズムにて画像上の輝点を抽出した結果を示しているが、水色のマーカ近傍に見えると想定された輝点の動きは検知できなかった。図3. 2-6には、撮影された画像の当該エリアを拡大したものを示すが、船舶と思われる輝点は認識できなかった。

図3. 2-4の右側の船舶についても同様な手法で抽出を試みたが、検出できていない。AISデータで船舶が存在するとされた位置を画像上で確認すると、撮影する衛星の位置の変化により、撮影領域が時々刻々北方向に移動しており、10枚連続撮影した画像の内、船舶が存在する可能性があるエリアを撮影できたのは、左下の船舶で3枚、右上の船舶では2枚しかなく、ベースラインアルゴリズムによる画像を重ね合わせの効果を得るのに十分

な枚数(10枚程度)に達していなかったことが、船舶の抽出を困難にしたものと推定した。

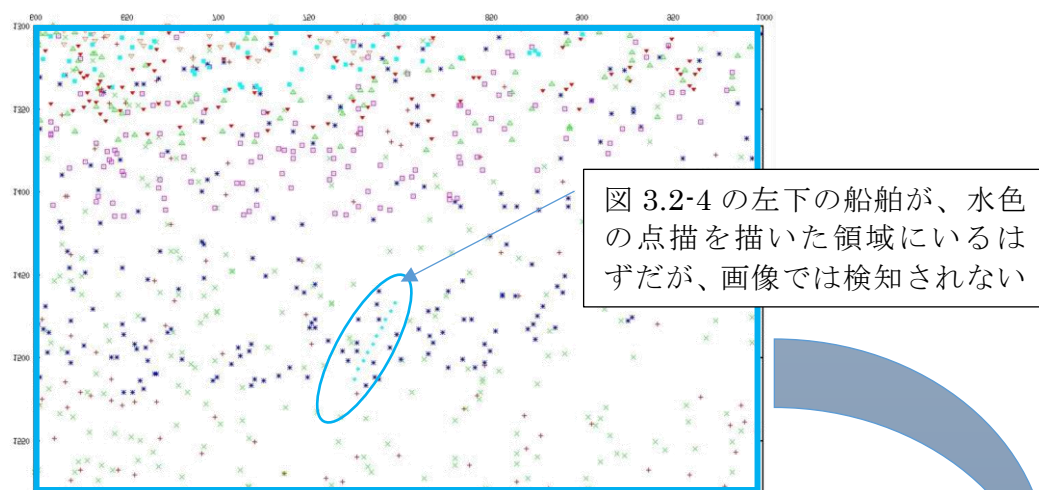


図3. 2-5 AISデータで特定した海域における抽出試行結果(2023/3/1撮影)

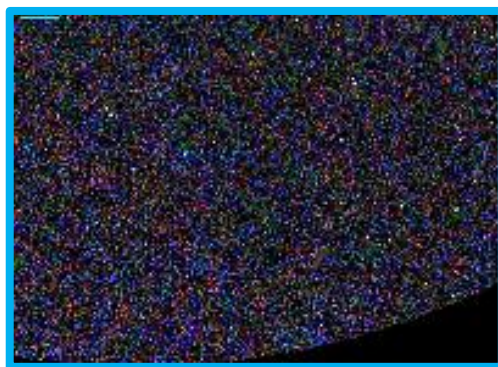


図3. 2-6 撮影された画像の同一領域拡大

(解析ケース # 2)

同様な試みを3月6日に撮影された画像についても実施した。図3. 2-7に、撮影された画像とAISデータを重畳した結果を示す。

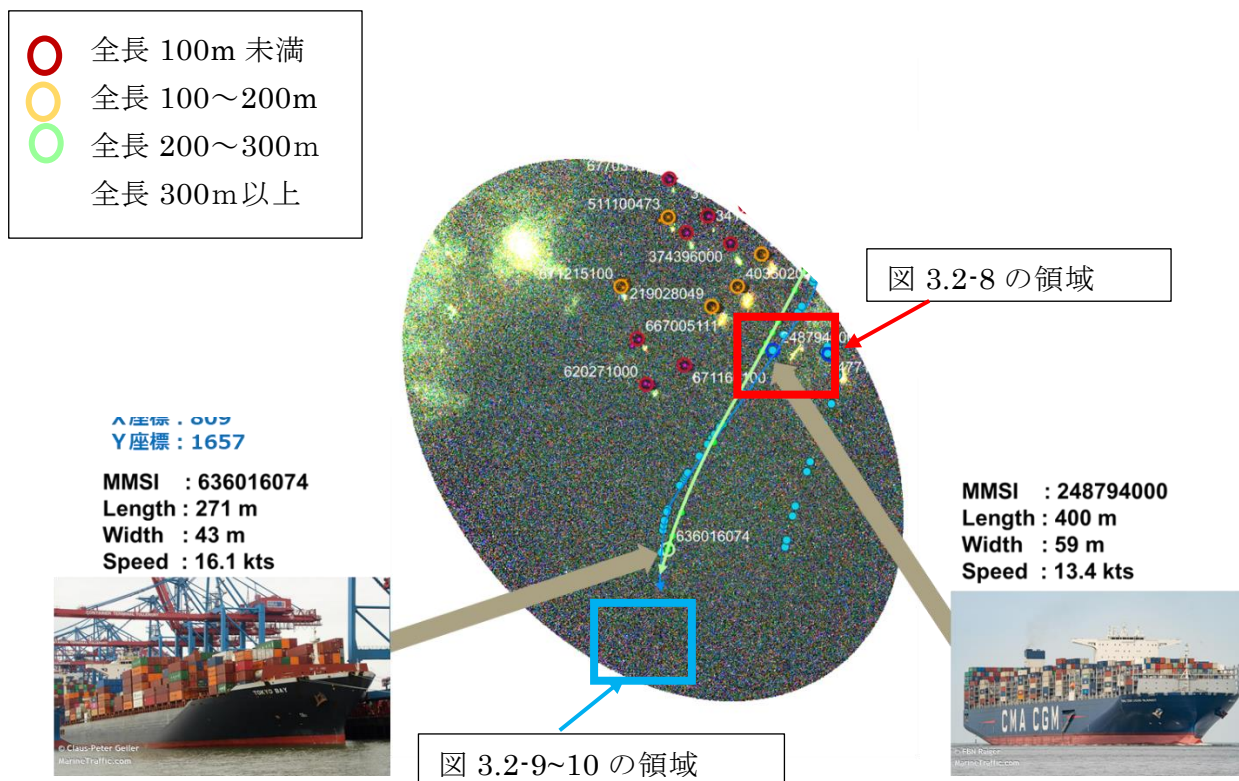


図3. 2-7 AISデータと撮影画像の重畳結果(2023/3/6撮影)

右上の青丸印の船舶は、図3. 2-8に拡大して示した輝点が、全長400mのコンテナ船と一致している。

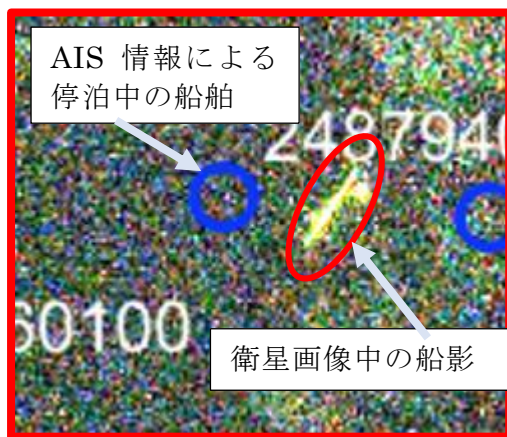


図3. 2-8 AISデータによる船舶と一致する輝点

一方、図3. 2-7の左下の船舶は、AISデータによれば、全長271mの船舶が南下しているところであるが、衛星画像からは明確に識別できない。

図3. 2-9には、AISデータから図3. 2-7の左下の船舶が存在すると想定される領域についてベースライン画像処理アルゴリズムにて抽出した結果を示している。

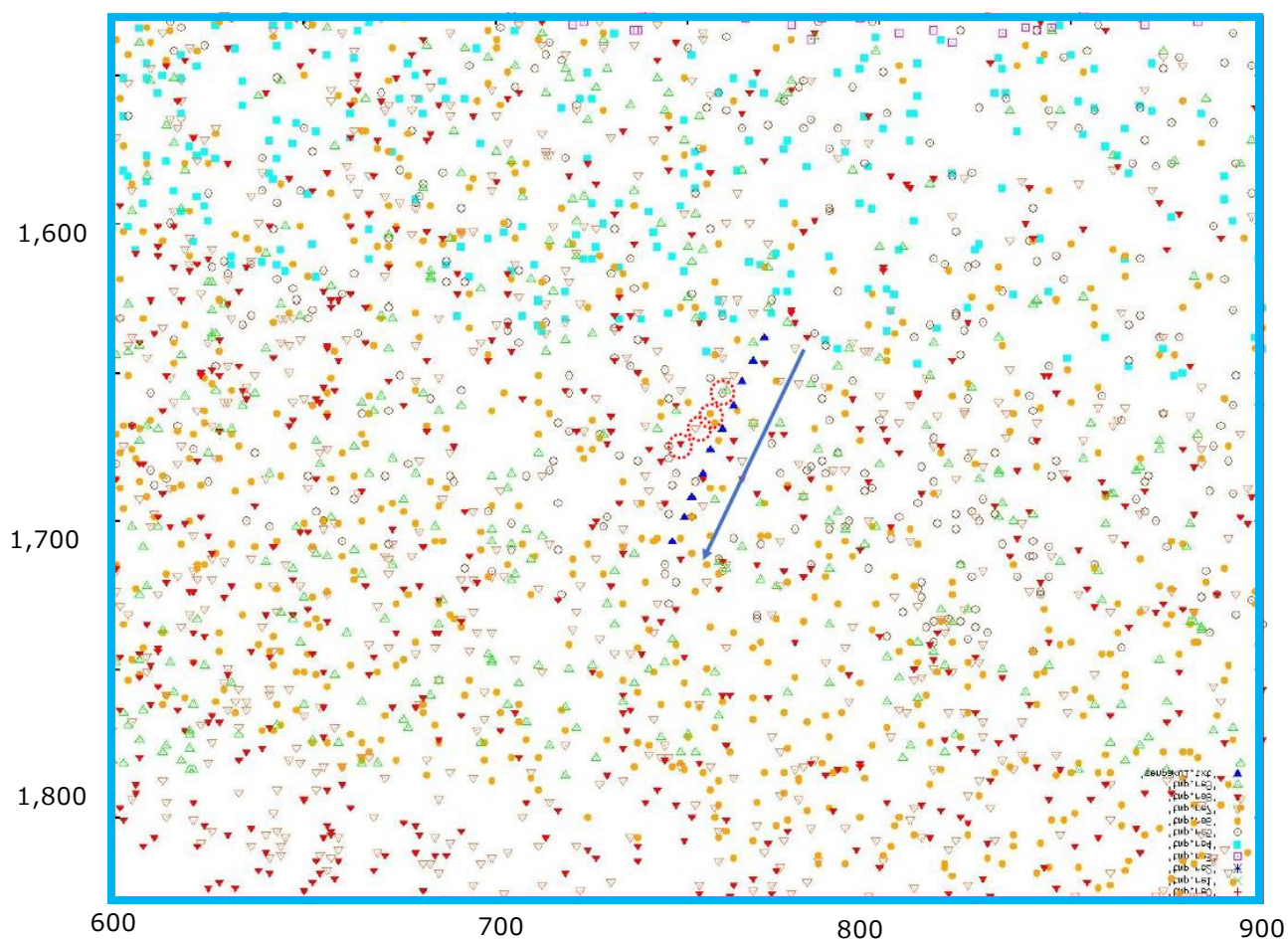


図3.2-9 AISデータで特定した海域における抽出試行結果(2023/3/6撮影画像)

10枚撮影した画像を重ね合わせ検出したところ、連続する4枚の画像上で、赤い破線の丸印で囲われた輝点が等速運動により移動しており、想定される速度ベクトルの方向に沿って南下していることが検出された。

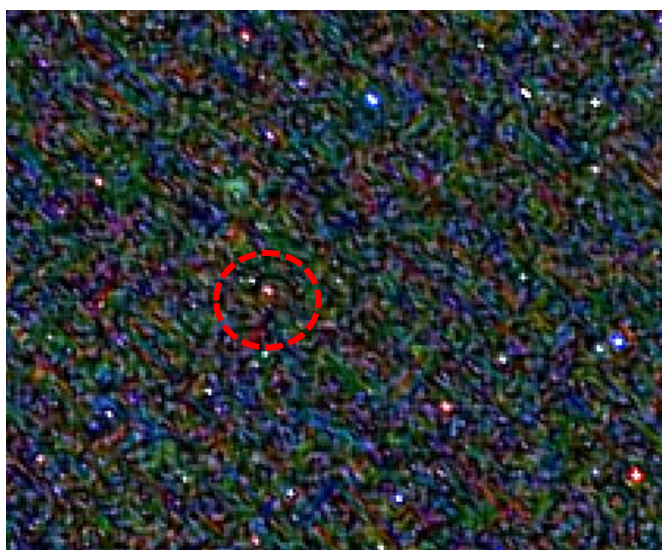


図3.2-10 検出された船舶に該当する輝点

水色のマーカ近傍に見えると想定された輝点を、図3.2-10に示す。図3.2-8に示す船舶と同様な大型コンテナ船であるが、輝点が小さく船影として認識するのは困難であり、画像処理による効果により、識別できたものと言える。

② R05撮影画像の画像処理結果

キャノン電子の衛星による 2 回撮影した海洋画像と AIS データを用いて実施した解析結果のサマ리를、表 3.2-2 に示す。

表 3.2-2 R05 海洋画像から移動中の船舶を抽出する解析結果

ケース	取得方法	画像取得日時	月 齢	対象海洋	解析結果
# 3	キャノン電子 衛星	2023/12/26 11:52:52 (UTC)	13 満月	東京湾	図 3.2-11～15 に示す。 解析により抽出した移動船舶が 2 隻あったが、AIS のデータとの 突合では、1 隻のみ抽出され た。AIS を発信していない船舶 は、画像上も非常に暗く小さい ため、小型船舶と思われる。
# 4	キャノン電子 衛星	2024/2/13 11:53:44 (UTC)	3 上弦	同 上	図 2.3-16～19 に示す。 解析により移動物体が一つ発 見されたが、AIS データによれ ば該当する船舶は無く、速度か ら小型の航空機と推定された。

(解析ケース # 3)

2023/12/26に撮影した東京湾の画像を処理したところ、移動していると思われる船舶2隻を検出した(図3.2-11～図3.2-13)。右下の船舶は灯火を点灯していると考えられ明るく見えるが、中央の船舶は灯火の強度も弱いと思われ、照度を上げる処理だけでは目視出来ない。

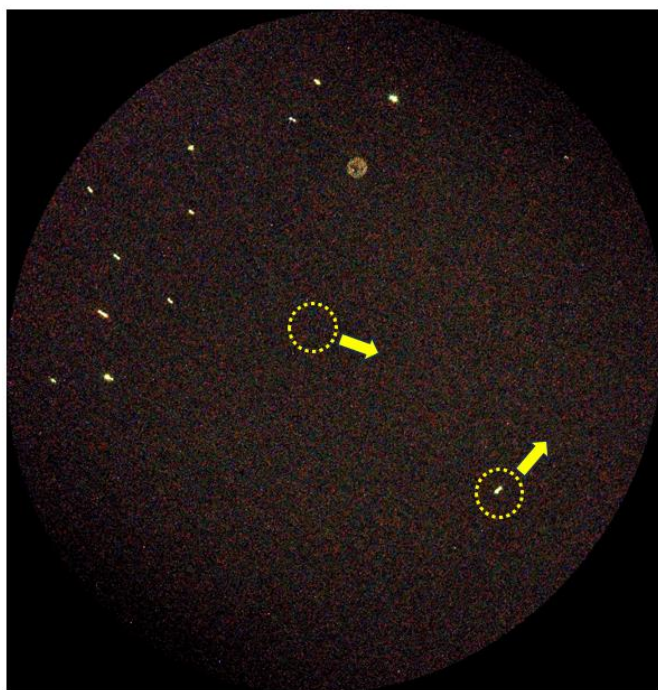


図3.2-11 画像解析により抽出された移動船舶(2隻)

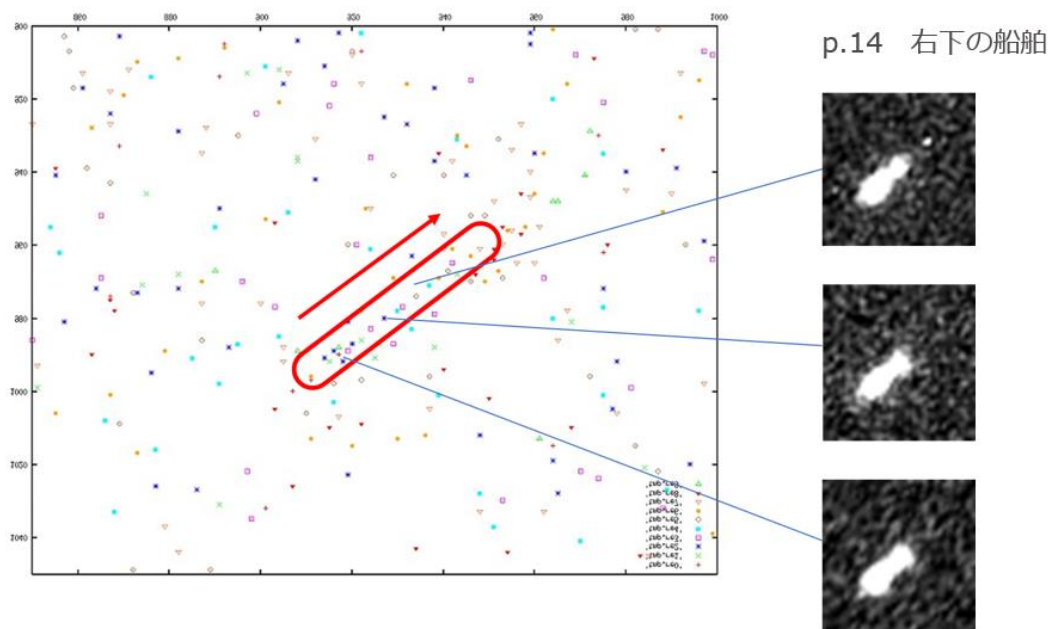


図3.2-12 画像解析の方法と検出した右下の船舶の画像(1)

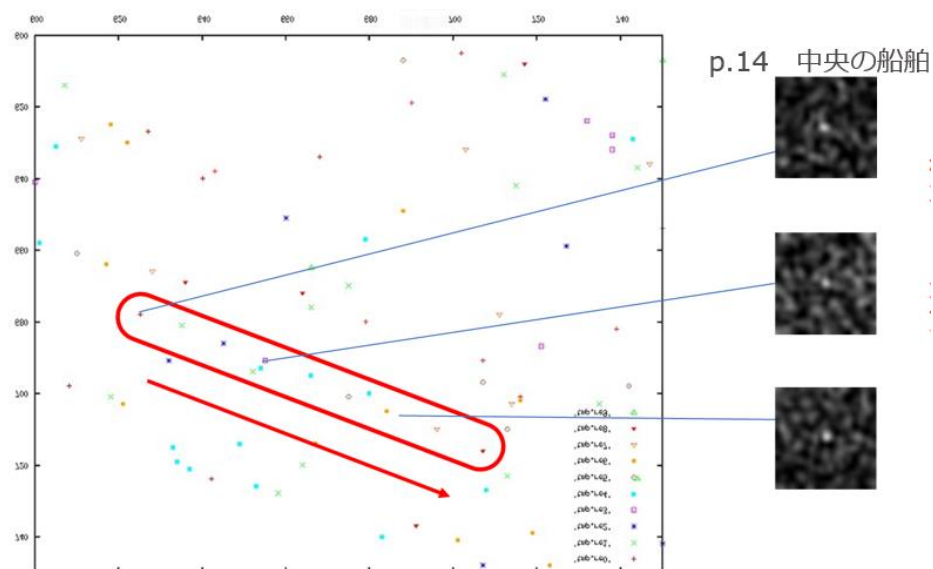


図3.2-13 検出した中央の船舶の画像（2）

図3.2-13では、画像上の海域のノイズ（輝度が高い点）が偶然に直線状に生じている可能性を排除するため、元の10枚の連続画像の順番をシャッフルして画像処理を行ったところ検出されな
いたため、ノイズではないと判断した。

購入したAISデータを、CE-SAT-ⅡBで撮影された画像に重畳して表示させた結果を、図3.2-14に
示す。船舶が発出する信号は、数秒から数分間隔であり、撮影された日時に最も近い時刻に当該
海域から発出されたAISデータのみを中抜き丸印でプロットしている。

**撮影時刻の前後±10分間に取得されたAISデータの内、最も撮影時刻に近い時刻に発出
された情報をもとに、○印をつけた**

以下の通り、撮影時刻に撮影海域に存在した船舶の数は、合計11隻である。

- (X：船舶の全長)
- 撮影時刻付近_300 ≤ x : 0隻
 - 撮影時刻付近_200 ≤ x < 300 : 0隻
 - 撮影時刻付近_100 ≤ x < 200 : 0隻
 - 撮影時刻付近_x < 100 : 11隻

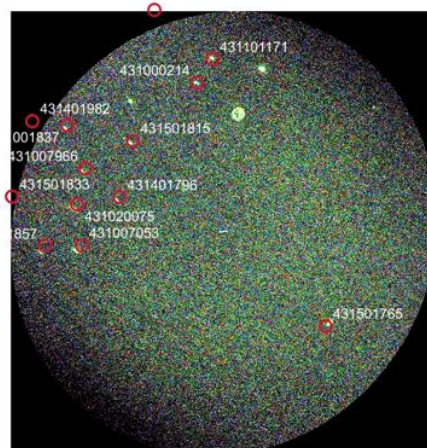


図3.2-14 画像撮影時に取得したAISデータ

(解像度が粗く、夜間で詳細が確認できないため、
撮影時刻と撮影方向からの推定)

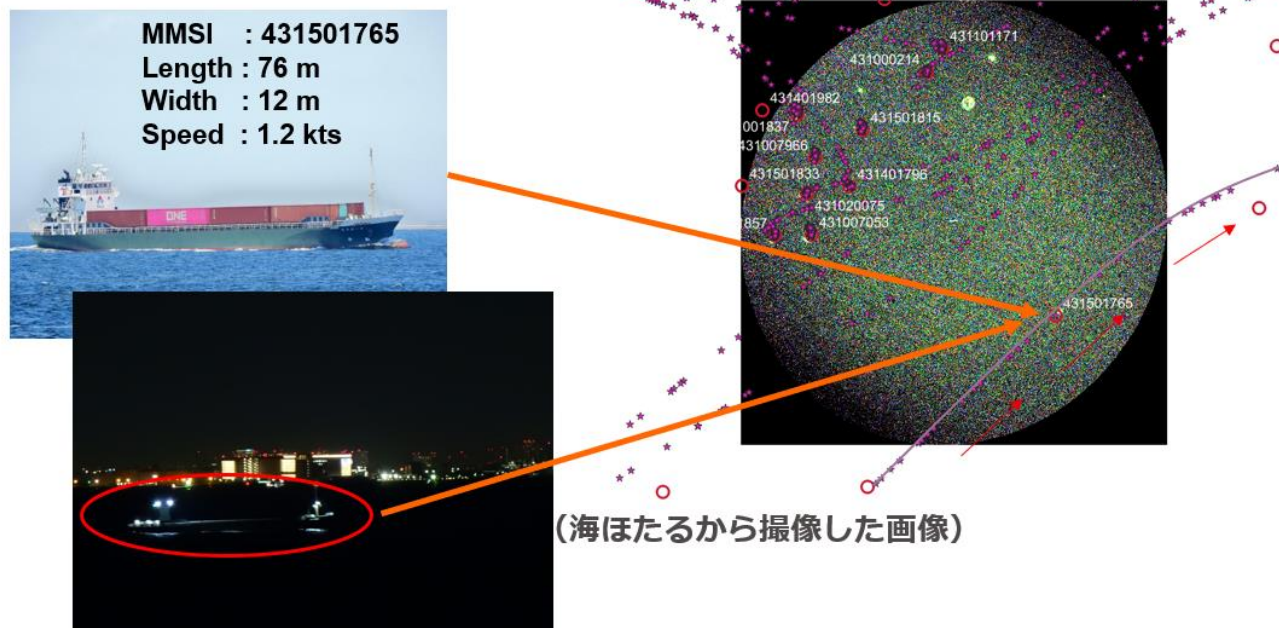


図3.2-15 検出した船舶とAISデータの突合結果

画像上部の全長100m未満の船舶は撮影時点で明るい灯火をとっており、画像処理を行うまでもなく画像とAISデータとの対応が明確である。

一方、AIS情報によれば移動している船舶が図の下部に1隻存在し、全長76mの船舶が、南から北東の方向に向かって1.2ktsで進んでいる(船舶識別番号:MMSI:431501765)。図3.2-11に示す画像処理の結果と、この船舶のデータを突合したところ、緯度経度、進行方向が一致したため、画像処理により正しく抽出できたものと判断した。(また東京湾アクアラインの海ほたるから撮影した船舶の画像とも一致した)

しかし、画像処理で撮像エリアの中央付近に検出された船舶(図3.2-11)の、AISデータは取得できていない。AISの搭載義務がない小型船舶であったものと推定される。

(解析ケース # 4)

同様な画像処理を2024/2/13に撮影された画像についても実施した。図3.2-16に、撮影された画像を解析し、移動物体を抽出した結果を図3.2-17に示す。小さい船舶で灯火の強度も弱いと思われ、明度を上げる処理だけでは検出できない。

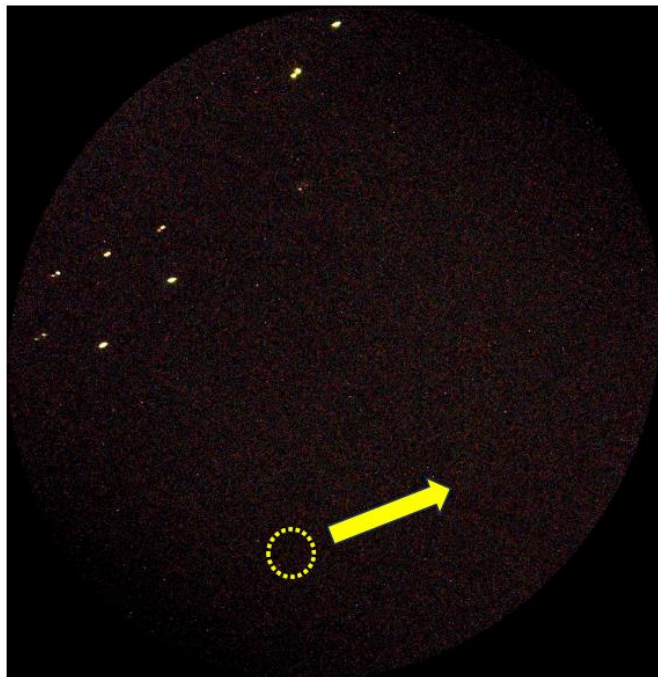


図3.2-16 画像解析により抽出された移動物体

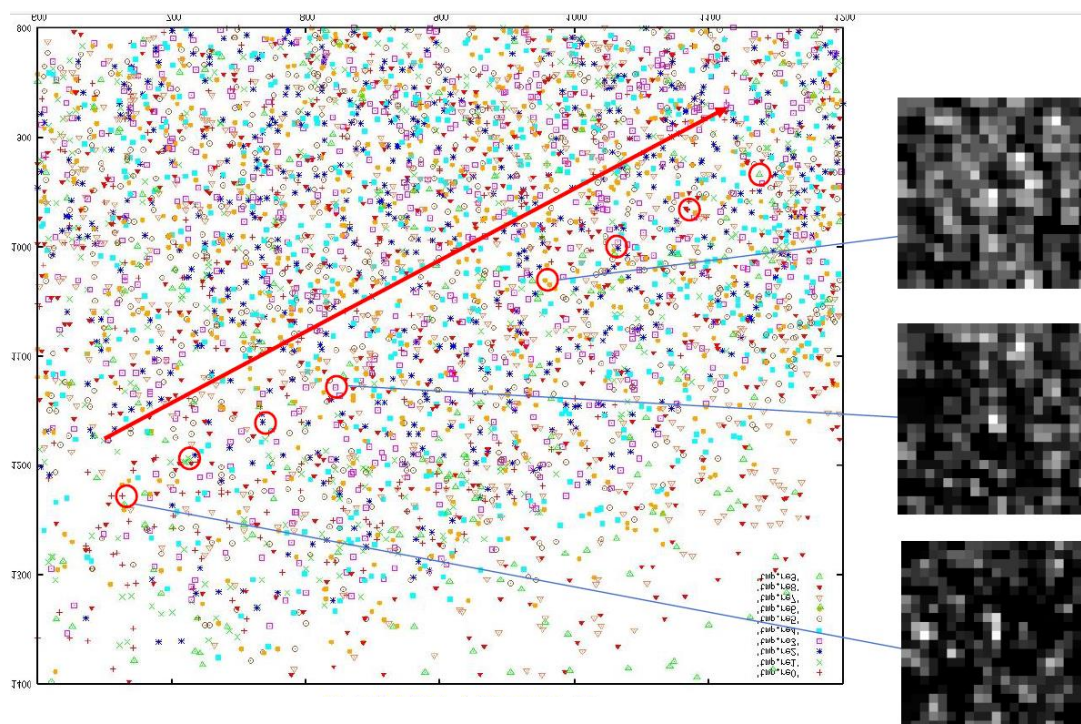


図 3.2-17 検出した移動物体画像

最初に、AISデータとの重畳を実施した。結果を図3.2-18に示すが、停泊している船舶のAIS情報しかなく、移動する船舶は確認できなかった。

以下の通り、撮影時刻に撮影海域に存在した船舶の数は、合計8隻である。

(X：船舶の全長)

- 撮影時刻付近 $300 \leq x$: 0隻
- 撮影時刻付近 $200 \leq x < 300$: 0隻
- 撮影時刻付近 $100 \leq x < 200$: 1隻
- 撮影時刻付近 $x < 100$: 7隻

撮影時刻に撮影海域に存在した船舶の内、動いている船は0隻であった。

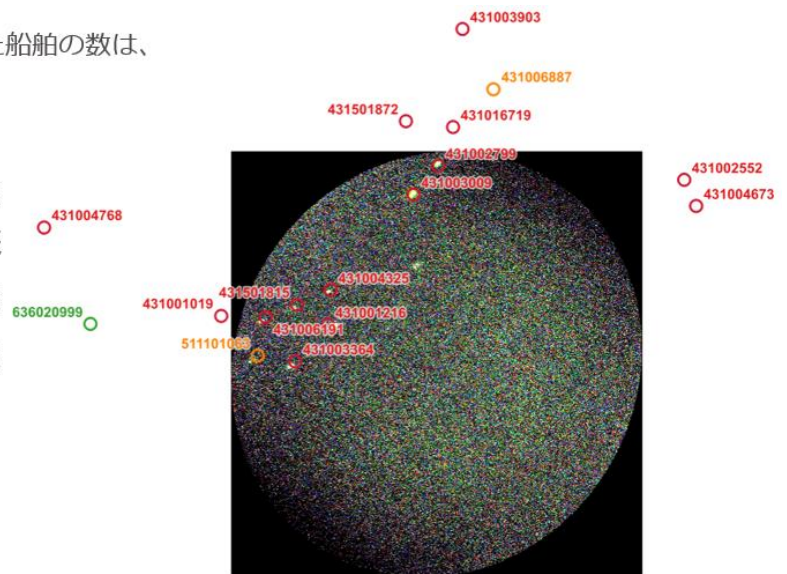


図3.2-18 AISデータとの重畳結果

ここで図3.2-17より、対象物体の移動速度を算出した。地上での1画素あたりの分解能は5.1mであり、50秒間での撮影の初めから終了までに552画素移動している。よって、移動速度は、約200km/hとなり船舶でないものと推定された。

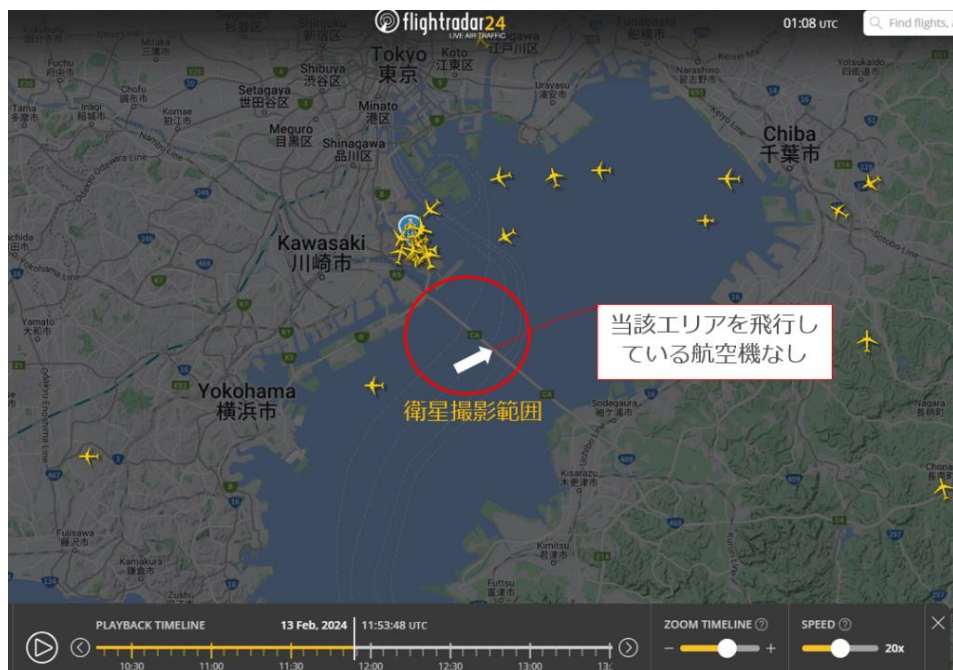


図3.2-19 FlightRaderの当該時刻データ

小型プロペラ機またはヘリコプタと想定されたため、ADS-B信号との突合も行った。結果を図3.2-19に示す。該当するエリアを、撮影時刻に移動している航空機のADS-Bデータは取得されていない。しかし航空機のADS-B搭載は、小型の機体では義務付けられておらず、信号を出していない航空機だった可能性が高いと推定した。

③ R06撮影画像の画像処理結果

キャノン電子の衛星により 2 回撮影した海洋画像と AIS データを用いて実施した解析結果のサマ리를、表 3.2-3 に示す。

表3.2-3 R06海洋画像から移動中の船舶を抽出する解析結果

ケース	取得方法	画像取得日時	月 齢	対象海洋	解析結果
# 5	キャノン電子衛星	2024/12/10 21:39:21 (UTC)	8.9 半月	ジブラルタル湾	図 3.2-20～22 に示す解析により抽出した移動船舶が 3 隻あったが、AIS のデータとの突合では、1 隻のみ抽出された。AIS を発信していない船舶は、画像上も非常に暗く小さいため、小型船舶と思われる。
# 6	キャノン電子衛星	2025/1/15 21:43.29 (UTC)	15.2 満月	同 上	図 3.2-23～24 に示す。 解析により移動物体が一つ発見されたが、AIS データによれば該当する船舶は無く、速度から小型の航空機と推定された。

(解析ケース # 5)

解析の結果、船舶と思われる移動物体3つを検出した。検出した船舶と思われる物体のおおよその位置及び移動方向を図3. 2-20に示す。

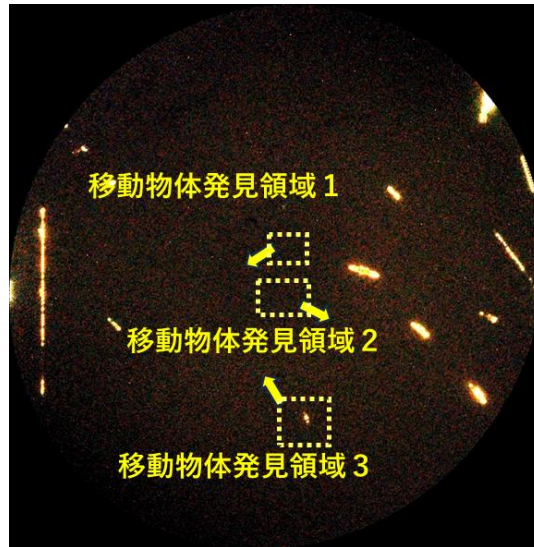


図 3. 2-20 ジブラルタル湾の画像から検出された船舶
(日時：2024/12/10 21:39:21UTC)

移動物体発見領域 1，および2について、検出された移動する船舶の軌跡と、輝点の拡大画像を図3. 2-21に示す。船舶と推定されるものの、AISのデータは発しておらず、AIS搭載義務がない小型船であると推定される。

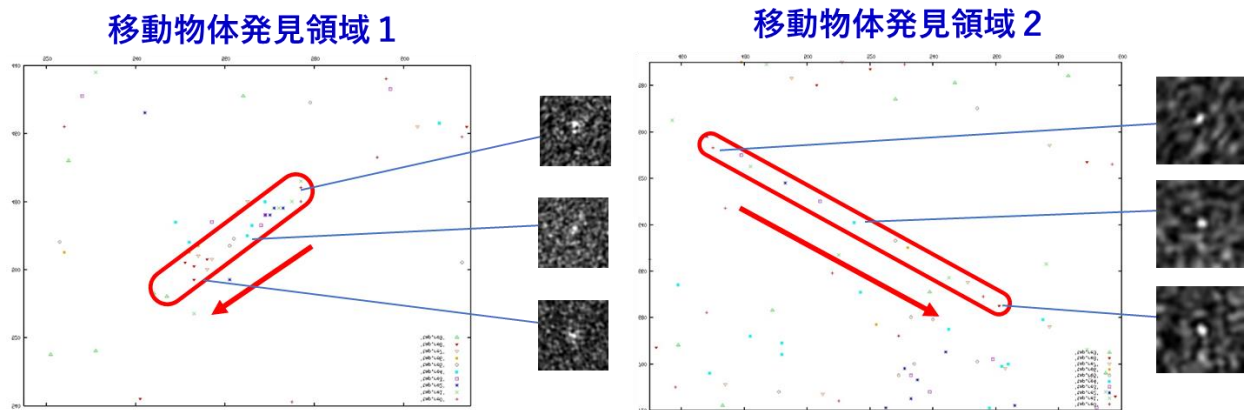


図 3. 2-21 移動物体発見領域 1, 2 の船舶移動軌跡

移動物体発見領域3で検出された船舶はAISデータと一致した。図3. 2-22に示す全長183mの貨物船と判明した。

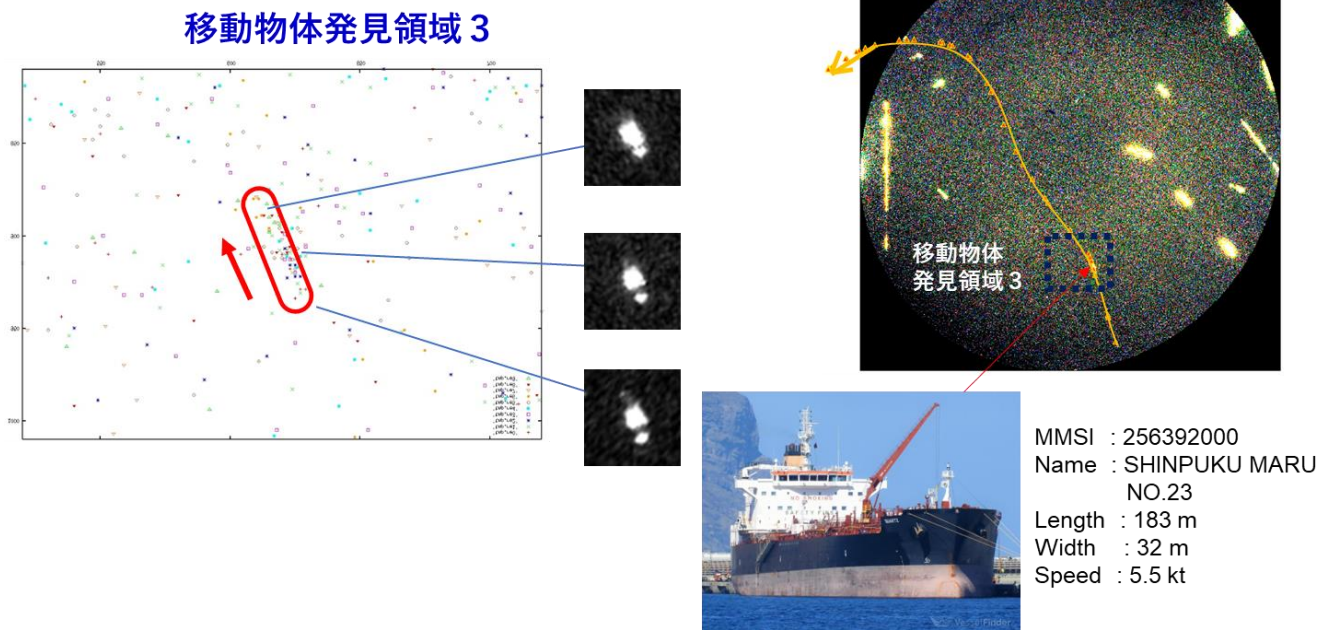


図3. 2-22 移動物体発見領域3の船舶

(解析ケース#6)

解析の結果、船舶と思われる移動物体3つを検出した。検出した船舶と思われる物体のおおよその位置及び移動方向を図3. 2-23に示す。

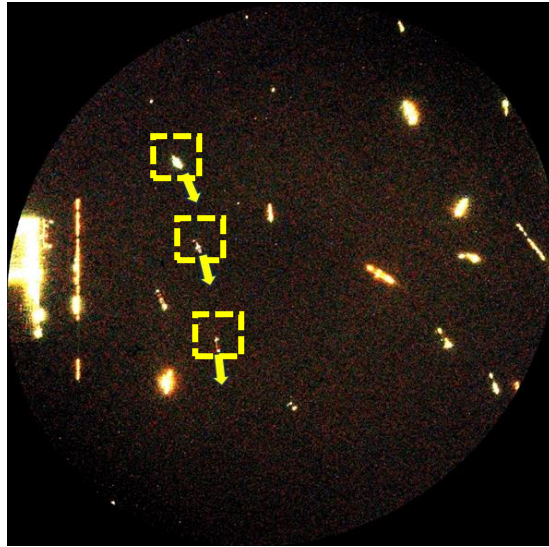


図 3. 2-23 ブラルタル湾の画像から検出された船舶
(日時：2025/1/15 21:43:29UTC)

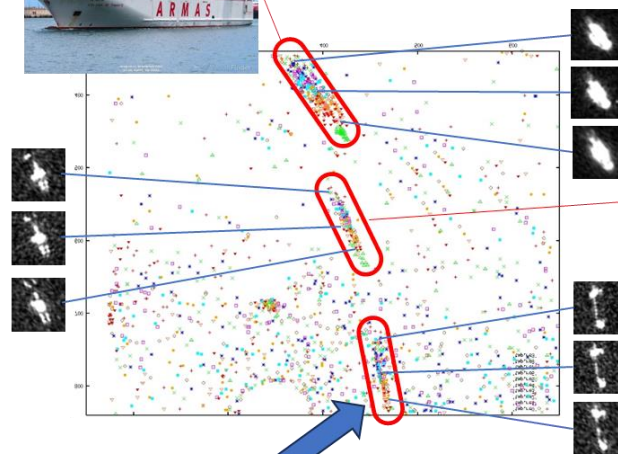
画像処理により3隻の船舶が検出できた。結果を図3. 2-24に示す。うち2隻はAISデータから船舶の全長・全幅が判明し、全長～総トン数の相関から300総トン以上の排水量と推定され、目標とする規模の船舶を画像処理により検出できることが判明した。

最下端の1隻はAISデータを発出していないが、撮影された船影から上の2隻と同規模の船体であると推定される。

MMSI : 224093000
Name : VOLCAN DE TAMASITE
Length : 141 m
Width : 24 m
Speed : 13.9 kt
Cog : 135.1 [Deg]
Heading : 135 [Deg]



MMSI : 353468000
Name : KAUNAS
Length : 190 m
Width : 28 m
Speed : 9.0 kt
COG : 158 [Deg]
Heading : 160 [Deg]



この船舶のAISデータは取得できず

図3. 2-24 移動物体検出結果

R04～R06に衛星から夜間に撮影した複数の海域の画像を、ベースラインとした画像処理アルゴリズムで処理し、AISデータとの突合も行った結果を、表3. 2-4に整理した。この結果より、夜の海洋画像中から、移動する船舶の検出が可能であることが示された。ただし、撮影した画像の枚数が少なく、撮影された船舶の数も少なかったため、検出率の定量的な評価が十分にはできなかった。

表 3. 2-4 R04～R06 に撮影された衛星画像の船舶検出結果

年度	撮影場所	日時	天候	月 齢	検出結果	300総トンの 船舶検出率
R04	スエズ湾	2023/03/01 19:13 UTC	晴	半月	AISのデータでは移動中の船舶が2隻あったが、存在を抽出できなかった	－ (いずれも小型船舶)
		2023/03/06 19:13 UTC	晴	満月	AISデータでは移動中の船舶が2隻存在したが、画像解析により1隻を検出できた	－ (いずれも小型船舶)
R05	東京湾	2023/12/26 11:52 UTC	晴	満月	解析により抽出した移動船舶が2隻あったが、1隻はAISのデータとの突合で照合できた。AISを発信していない船舶は、画像上も非常に暗く小さいため、小型船舶と思われる。	－ (いずれも小型船舶)
		2024/02/13 11:52 UTC	晴	半月	解析により移動物体が一つ発見されたが、AISデータによれば該当する船舶は無く、速度から小型の航空機と推定された。	移動している該当船舶無し
R06	ジブラルタル湾	2024/12/10 21:39 UTC	晴	満月	2体の移動船舶を検出した。	－ (いずれも小型船舶)
		2025/01/15 21:43 UTC	晴	半月	3体の移動船舶を検出した。 2隻の小型船舶を検出した。	3隻中3隻 (2隻は小型船舶)
衛星画像からの船舶検出結果						3隻中3隻＝100%

よって（３）項に示す方法でCGによる船舶のモデル化を行い、３．３節で検出率の定量的な評価を行った（結果は表3. 3-4を参照）。

(3) CGによる船舶の模擬

① 船舶のCG作成の試行

R04～R06に衛星から撮影した画像中には一定数の移動する船舶が存在し、解析に用いた画像処理アルゴリズムにより検出可能であることが明確になったが、検出率の定量的な評価を行うには、船舶の明るさ、全長、運動パターン等を組み合わせた条件の画像を用いて検出可否を確認する必要があるが、それぞれの画像を衛星からの撮影にのみによって取得するには、撮影時の天候や衛星が目標地点上空に回帰するための時間等も考慮すると、長期間にわたって撮影を続ける必要があり、時間とコストがかかり過ぎ現実的ではない。

よって船舶の寸度や月光の反射輝度、移動速度などを変化させつつ、検出率を把握する目的で、CGにより海洋上の船舶を模擬する取り組みも実施した。図3. 2-25に模擬画像の作成フローを示す。

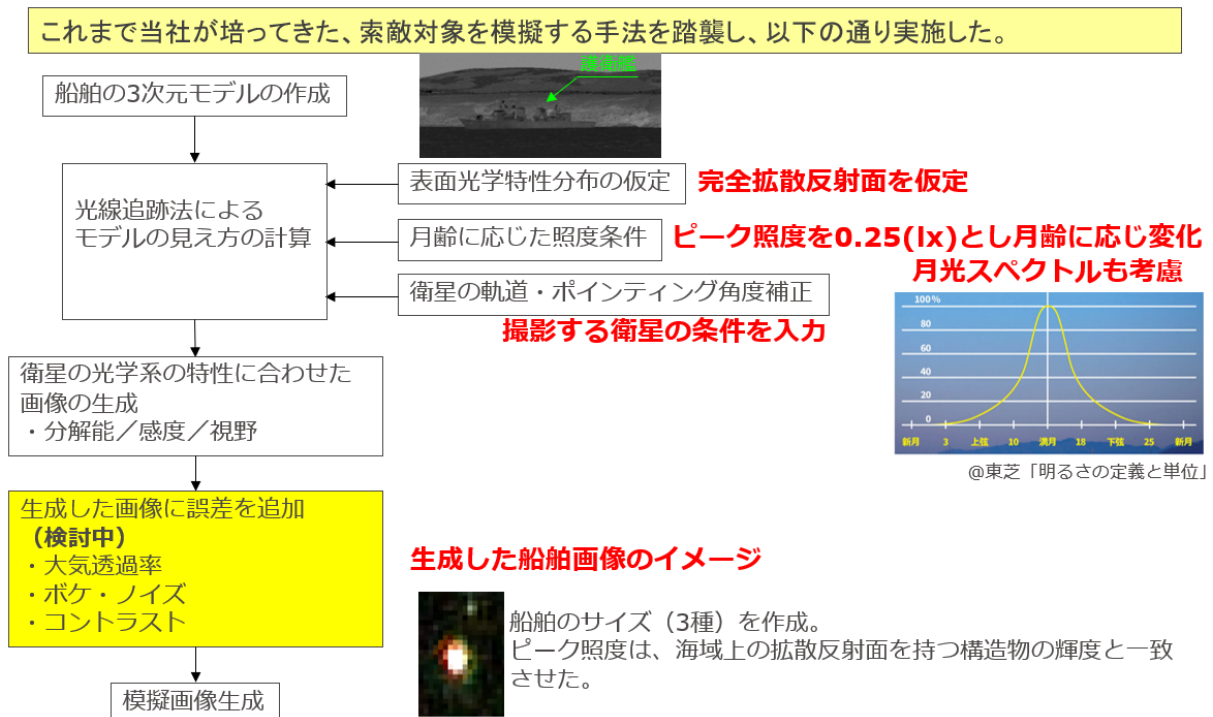


図3. 2-25 模擬画像生成フロー

CGを作成する対象の船舶としては、以下の通りである。

- ・ 空母（へり空母：いせ）・・・197 × 33m
- ・ 戦闘艦（護衛艦：すずなみ）・・・151 × 17.4m
- ・ 工作船（海上保安庁の展示船）・・・29.7 × 4.7m

なお、工作船については、海上保安庁の展示館を訪問し、掲示されている以下のパネルの情報（図3. 2-26）からCGモデルの作成を行った。

作成したCGを衛星から撮影された画像に埋め込んだ結果を、図3. 2-27に示す。ここでは各船舶が灯火を持たず、月光下で反射した輝度となる様に設定した。手順としては、衛星から撮影された東京湾上の構造物（灯火が無い、東京湾アクアライン上にある風の塔）の平均輝度と同じになるように、埋め込んだCGの船舶の輝度を設定した。

衛星画像のオリジナルの状態では、風の塔も視認できず、埋め込んだCGの船舶も視認できないが、明度化処理を施すと、風の塔と同じ様に、船舶が浮かび上がる。

CG化に当たり、衛星から撮影された画像の地上解像度（GSD）は5.1mであり、全幅が5mに満たない工作船は、船影が認識しにくい。



図3. 2-26 工作船舶体の概要（海上保安庁展示館に掲示）

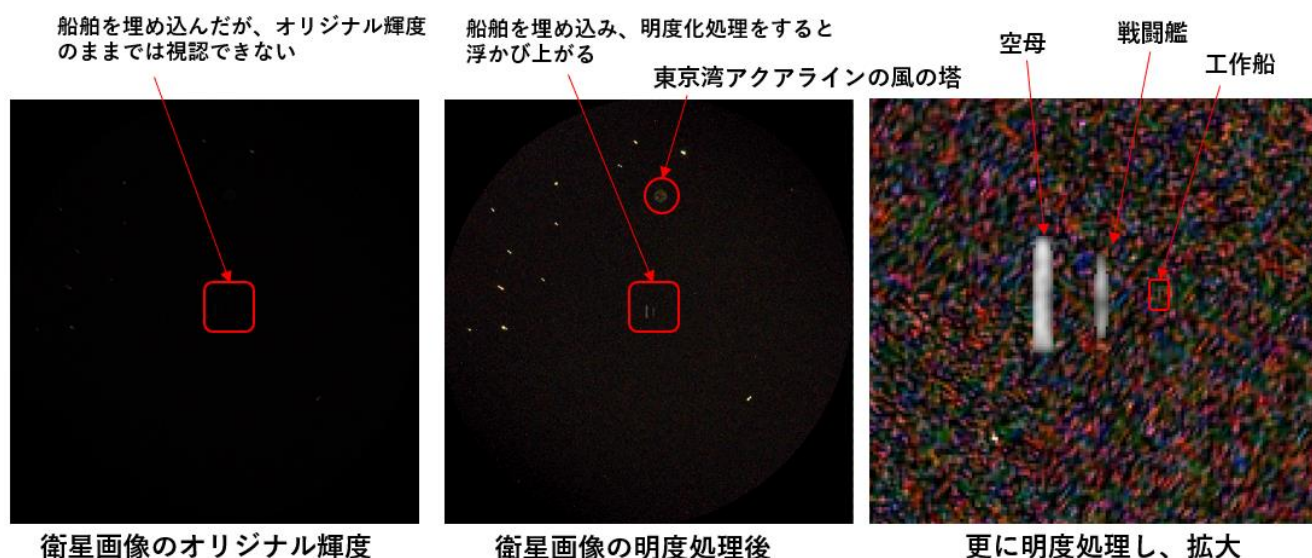


図3. 2-27 衛星画像への船舶CGの埋め込み結果

R05に撮影されたケース#3の衛星画像に、ここで作成したCGを埋め込んだ画像を解析し、検出の可能性を探った。

図3. 2-28に埋め込んだ船舶の移動パターンを示す。初期位置は画像の中心付近とした。

埋め込んだ船舶は、以下の2種とした（空母は大きいため、検出が容易になる可能性があるため割愛した）

- ・ 戦闘艦（護衛艦：すずなみ）・・・151 × 17.4m
- ・ 工作船（海上保安庁の展示船）・・・29.7 × 4.7m

CGを埋め込んだ画像を、図3. 2-29に示す。この状態ではCGの検出はできない。

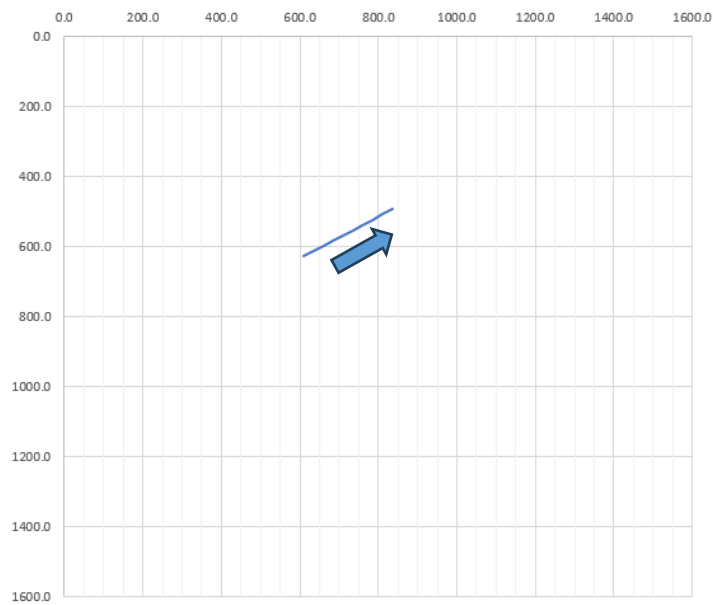


図3. 2-28 CGで作成した船舶の移動パターン

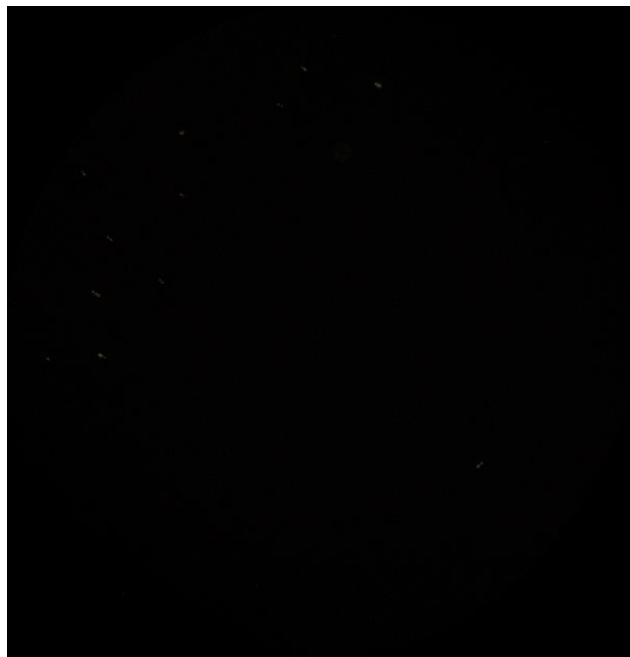
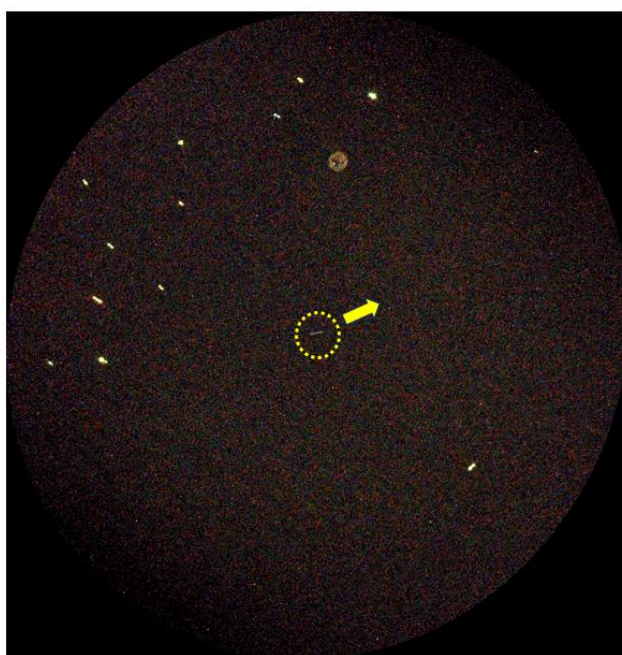


図3. 2-29 CGを埋め込んだ画像

解析結果を図3. 2-30に示す。また検出した船舶の拡大像を図3. 2-31に示す。ここでは戦闘艦を検出できたものの、工作船は輝点の画素が少なく、検出が困難であった。



検出した船舶と思われる物体のおおよその位置と移動方向

Canon衛星撮影画像。東京湾。撮影日時：2024/12/26 11:52:52.495UTC

図3. 2-30 解析によるCG船舶の検出結果

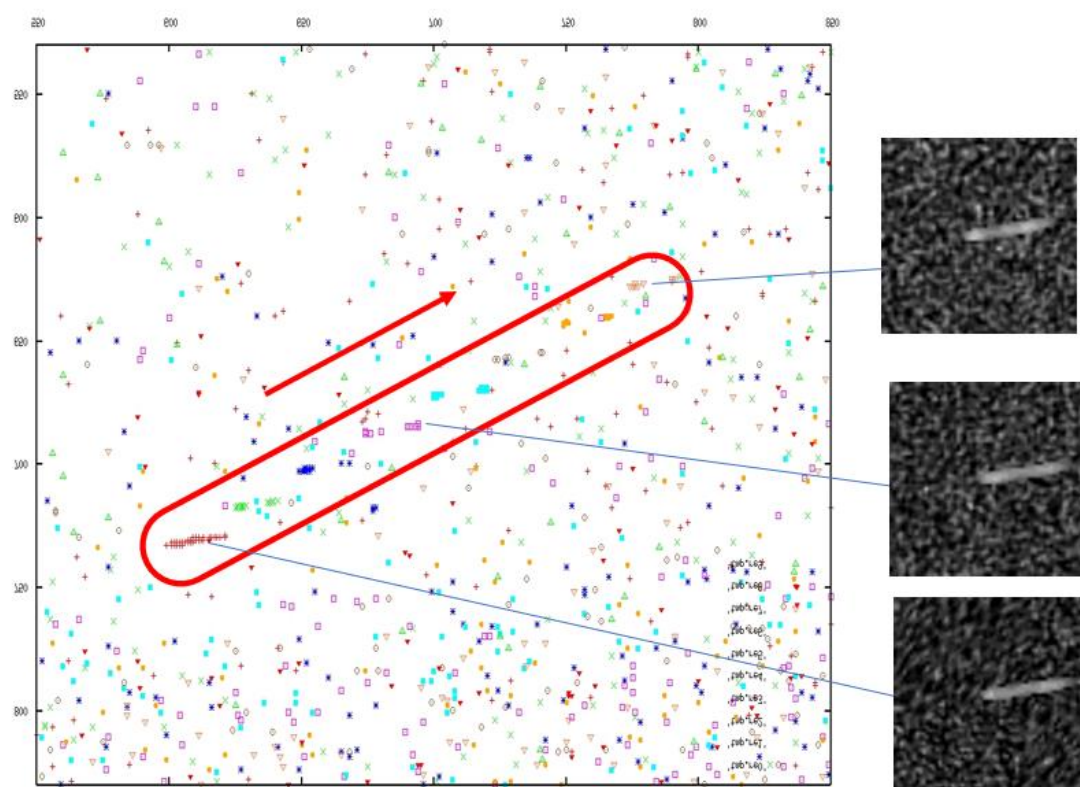


図3. 2-31 CG船舶の検出結果

② 検出率評価用のCGモデルの作成

上記①の試行においてCG化する手法を確立し、画像処理の検出可否に活用できることが明確になったため、検出率を評価するためのCGを作成した。CG可に当たってのパラメータは以下の通りであり（計30種）、衛星画像への埋め込み例を図3. 2-32に示す。

- ・船舶明るさを、標準(*)、1/2輝度、1/4輝度 の3種類設定
- ・船舶の運動は、等速直線運動、等速直線運動に揺らぎを付与 の2種類設定
- ・船舶の大きさは、中型船舶のフルスケール、80%、60%、40%、20% の5種類設定（図3. 2-33参照）

(*)標準の明るさは、拡散反射面に近いと想定される東京アクアラインの風の塔を、満月時に撮影した際の平均反射輝度を用いた。船舶上に灯火が全くない状況で、船体からの月光の反射のみを検出する条件となり、灯火を消して行動している船舶に相当する。

衛星画像への船舶CG画像埋め込み結果

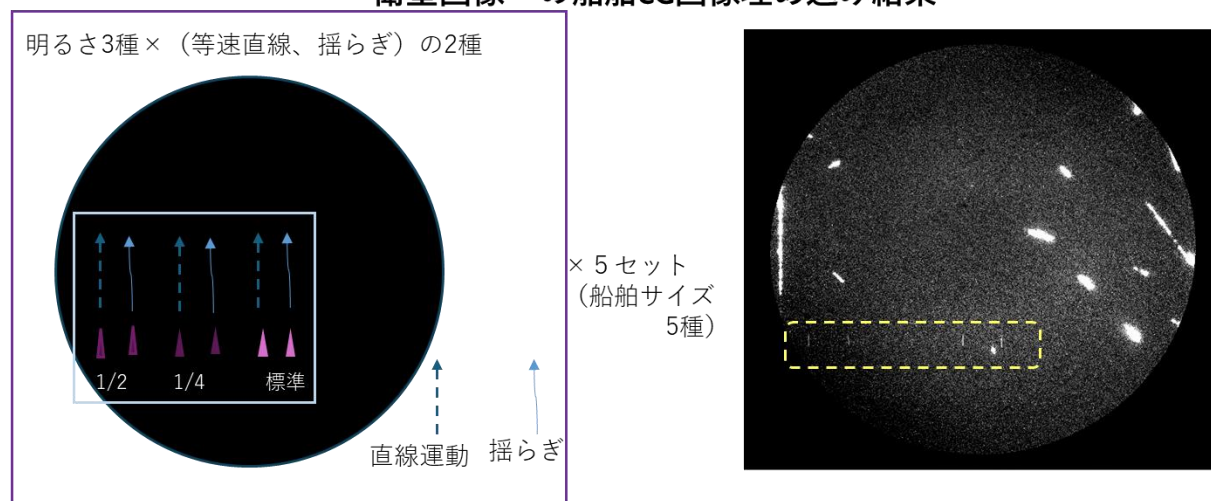


図3. 2-32 検出率把握用のCG作成（例）

CGによる船舶のモデル化を実施する際に、基準となる船舶を、実際にデータが公開されている船舶（戦闘艦：以下）とし、スケールを縮小することで、総トン数が異なる小型船舶のモデルを作成した。

各モデルのスケール比毎の総トン数を、図3. 2-33に示す。

今回作成したモデルで総トン数が300以上（達成目標の条件）となるのは、スケール比40%以上のCGとなる。

モデルとした船舶
全長 : 151m
全幅 : 17.4m
排水量 : 4,650ton

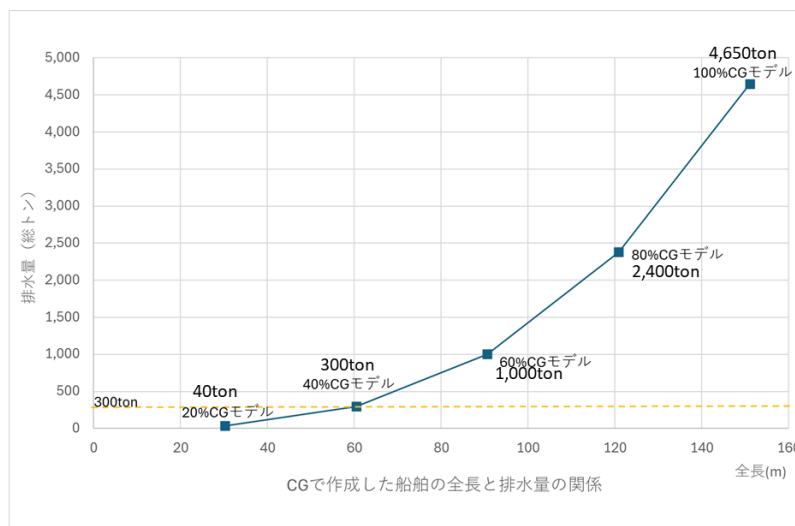


図3. 2-33 船舶のサイズと総トン数の関係

3. 3夜間の船舶検出の試行・検出率把握・システム要求検討

① R05までに活用した画像処理アルゴリズムによる検出試行

開発した画像処理アルゴリズムによる検出率の把握を定量的に実施した。解析ケースは、図3. 2-32に示した計30ケースである。

解析した結果を、図3. 3-1に示す。R05の画像解析に用いたアルゴリズムにて検出できたのは、標準の輝度（最も明るい状態）で、100%スケールの船舶のみであった（航行のパターンはいずれの場合も検出できた）

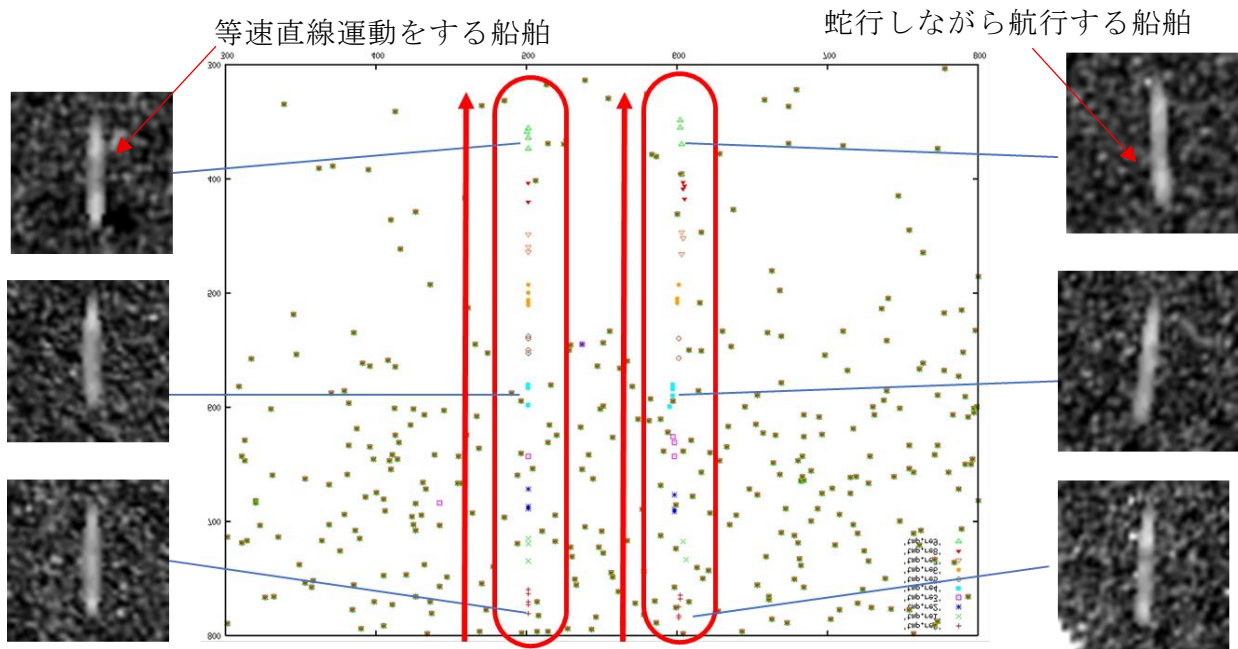


図3. 3-1 CG船舶の検出結果

検出可否の原因を特定するためCG船舶の画像上の輝度を確認したところ、図3. 3-2に示す通り検出の対象と判断する閾値を上回るのは図3. 3-1の船舶のみであった。

1/2輝度、1/4輝度の船舶は、右下図の通り解析時の検出の閾値より暗いため、R05のアルゴリズムでは検出できなかった。

解析を行う領域を細分化し、検出閾値を下げることで、解析時間は長くなるものの、検出率が顕著に向上することを確認した（次頁）。

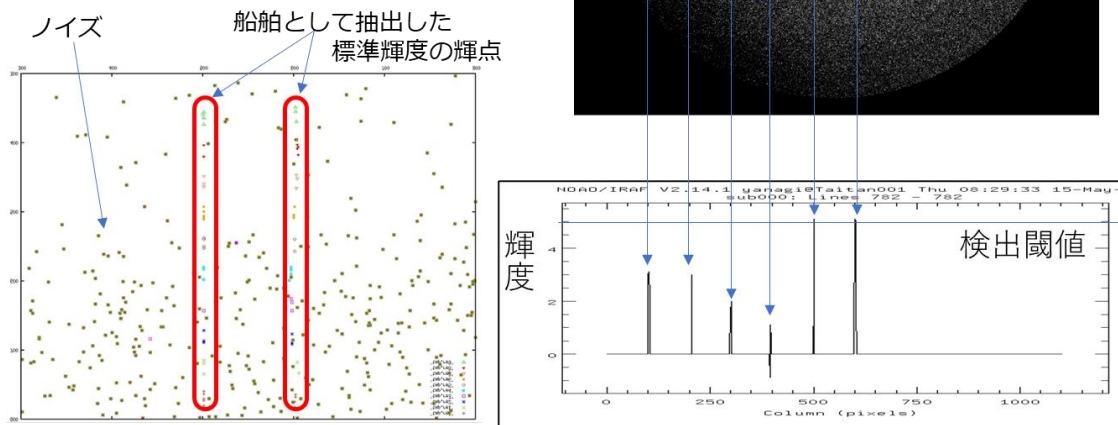


図3. 3-2 CG船舶の輝度と検出閾値の関係

② 検出する輝度の閾値設定

1枚の衛星画像（1,400×14,00＝約200万画素）中の最大輝点数＝画素数であるが、複数の画像間で船舶として移動している輝点位置の相関を算出する際に、同時に扱える輝点数を1画像あたり1,200点ほどに制限している。これは本契約で導入した計算機にて、1回の解析を1～2分の時間で終え、撮影後に大きな時間遅れを発生することなく解析結果を提供するために設定したものである。

暗い画像から輝点を抽出し、明るい順に上位1,200点を抽出すると閾値の輝度が5AU程度となり、これより暗い船舶は検出の対象外となっていた。1回の処理毎に扱える輝点数を1,200点以下に抑え、かつ暗い船舶を抽出するために、1,400×1,400画素の全体（約200万画素）ではなく、画像を部分的に切り出して、例えば200×200画素＝4万画素、100×100画素＝1万画素に分割し、その中の輝点を1,200個取り出すと、暗い輝点も対象とすることが可能となる。解析する画素数と閾値にできる輝度の関係を表3.3-1に整理した。

表3.3-1 解析する画素数と閾値にできる輝度の関係

解析画像領域の大きさ (画素)	検出閾値 (ADU)	解析回数 (回)	トータル解析時間 (分)
1400×1400	5.00	1	2.2
200×200	3.08	139	305.8
100×100	1.52	573	1,260.6

100×100画素の領域ごとに解析を行うことで、検出できる閾値を大幅に下げることができるようになる。但し領域を細かく分割して解析する際にかかるトータルの解析時間は分割された領域の数の倍数より大きくなっている。これは、分割された領域をまたがって移動する輝点もあるため、検出された輝点の分布・移動方向に応じて、分割した領域そのものを移動させながら対象を検出する必要が生じるためである。

表3.3-1によれば、最も小さい100×100画素で解析する場合は20時間程度の時間が必要になり、航空機や車両等に比較して移動速度が遅い船舶とはいっても、20時間後に解析結果を入手しても役に立たないものと推定される。ただし計算機の処理能力、特に並列処理に特化した演算チップの今後の能力拡大や、そのチップに応じたアルゴリズムの改良などにより、十分に将来の性能向上が見込めるところであり、今回はさらなる計算時間低減にまでは言及しない。

概ね設定した輝度通りで、閾値より高く、検出成功

下にset1（フルスケール）～set3（60％スケール）のCG船舶の明るさと解析画像領域3ケースにおける検出閾値を示す。

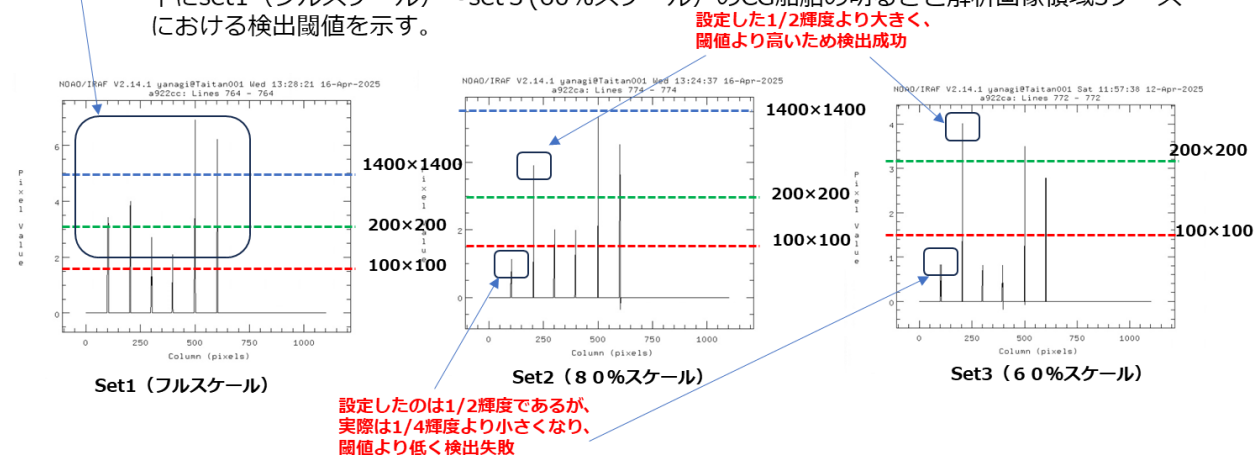


図3.3-3 解析する領域の大きさと閾値・船舶の輝度の関係

図3.3-3には解析する領域の大きさの閾値と船舶の輝度の関係を示している。解析する領域が小さくなるにしたがって閾値が低くなるのは当然であるが、船舶のスケールが100%から60%に縮小するに従って船舶の輝度が小さくなり、これも検出しにくくなっている要因となっていた。

画像を拡大したところ、左側の輝度が低下している船舶の周囲はノイズによる輝点が少なく、右側の輝度が上昇した船舶の周囲には、ノイズによる輝点が多かった（図3.3-4、図3.3-5参照）。

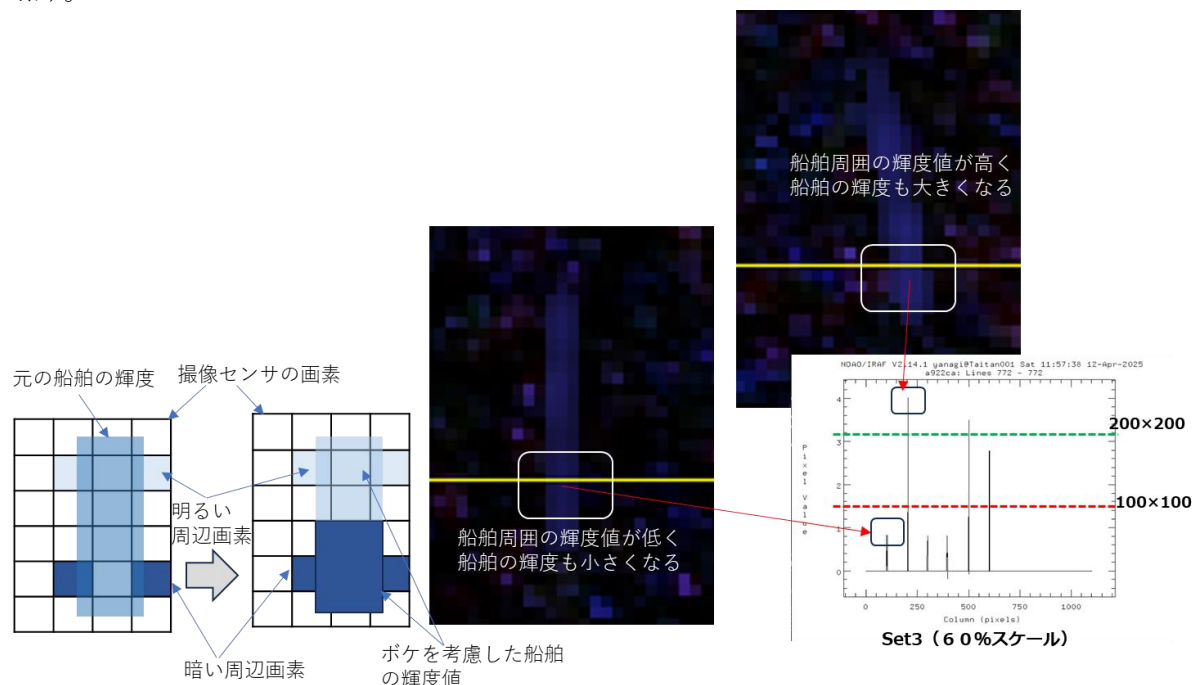


図3.3-4 船舶の大きさと輝度値の関係

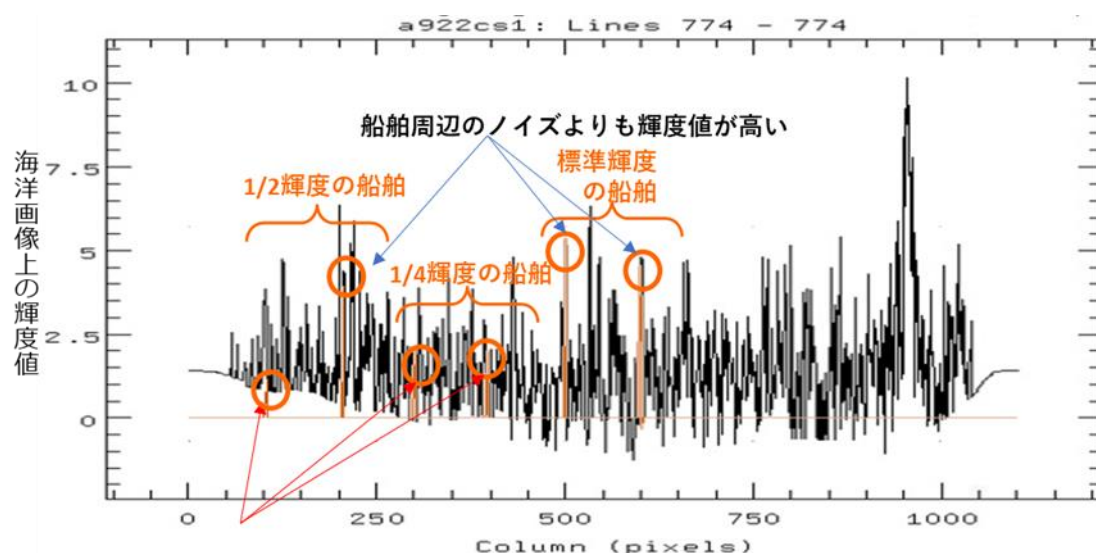


図3.3-5 周辺ノイズが船舶の大きさによって輝度値へ与える影響

これは船舶のCG化において光学系のボケの影響を取り込むため、船舶の辺縁部分は、船舶自体の輝度値と、船舶周囲の輝度値の面積比で平均化しているため、明るいノイズが多いところ（右側）は船舶の輝度値が上昇し、一方周囲にノイズがない環境では、暗い海洋の輝度値と船舶の輝度値が平均化され、より暗い輝度値としてモデル化されるためと推定している。ボケを考慮したモデル化によって生じたCGの周辺環境が船舶の輝度に与える影響は、実際の衛星からの撮像時の条件を再現していることが原因であり、現実には生じうる事象であり、このままのCG画像を解析し検出率を把握することが妥当である。

③ 検出率の把握

図3. 2-32で作成した30種の船舶のCGについて、図3. 3-1に示した1,400×1,400画素の領域で解析した結果に加え、200×200画素、100×100画素に分割した場合の検出結果を、表3. 3-2に示す。100×100画素にした際の検出率は著しく向上した。

表3. 3-2 解析する画素数に応じた各種船舶CGの検出結果

船舶のサイズ	解析する単位領域	1	2	3	4	5	6
		1/2輝度		1/4輝度		標準輝度	
		直線運動	揺らぎあり	直線運動	揺らぎあり	直線運動	揺らぎあり
100%	1400×1400	×	×	×	×	○	○
	200×200	○	○	×	×	○	○
	100×100	○	○	○	○	○	○
80%	1400×1400	×	×	×	×	×	×
	200×200	×	○	×	×	○	○
	100×100	×	○	○	○	○	○
60%	1400×1400	×	×	×	×	×	×
	200×200	×	○	×	×	○	×
	100×100	×	○	×	×	○	○
40%	1400×1400	×	×	×	×	×	×
	200×200	×	×	×	×	×	×
	100×100	×	×	×	○	○	○
20%	1400×1400	×	×	×	×	×	×
	200×200	×	×	×	×	×	×
	100×100	×	○	○	×	○	×

船舶の輝度を標準とした場合の検出率は表3. 3-3の通りであり、対象は8隻ではあるが、検出率は100%である。

表 3. 3-3 満月の条件で、甲板が拡散反射面であると仮定した CG の検出率

船舶の寸度 (15.3項参照)	船舶の明るさ	船舶の運動	検出結果	300総トンの船舶検出率 (15.3項参照)
100%(中型船) (151×17.4m) (4,650ton)	標準 (満月時) *1	等速直線／揺らぎ	検出成功	2隻中2隻
80%(2,400ton)	同上	同上	検出成功	2隻中2隻
60%(1,000ton)	同上	同上	検出成功	2隻中2隻
40%(300ton)	同上	同上	検出成功	2隻中2隻
20%(40ton)参考	同上	同上	検出できず(*2)	2隻中1隻(小型船舶)
船舶のCG画像の検出結果				8隻中8隻=100%

(*1)標準の明るさは、東京アクアラインの風の塔の表面を拡散発射面と仮定し、満月時に撮影した際の平均反射輝度を用いた。船舶上に灯火が全くない状況で、船体からの月光の反射のみを検出する条件となり、灯火を消して行動している船舶に相当する。

(*2)船舶のサイズが小さくなると、船体の反射光を受光する画素数が少なくなり、モデル化した光学系の特性や大気の影響等のモデルにより、船舶辺縁部の画素の輝度が落ちるため、船舶の抽出がより困難になる。

船舶の輝度を標準の1/2、1/4とした場合の検出率の低下は表3. 3-4通りであり、満月では100%の検出率のところ、1/2の輝度では63%、1/4の輝度では50%が検出できることを確認し、目標の80%には届かなかったものの、暗い月光下での検出も可能であることが確認できた。

表3. 3-4 船舶の輝度が標準から1/4まで低下した際の検出率の変化

船舶の寸度	船舶の明るさ	船舶の運動	検出結果	300総トンの船舶検出率（15.3項参照）
100%～40% (4,650～300ton)	標準(満月時) *1	等速直線／揺らぎ	検出成功	8隻中8隻 = 100%
	1／2	同上	検出成功	8隻中5隻 = 63%
	1／4	同上	検出成功	8隻中4隻 = 50%

(*2)

(*1) 表3. 3-3の注記参照

(*2) 海洋の撮影を行う場合、船舶の画像と同時に海洋表面の暗部ノイズを多数検出し、その数が一定量を上回ると抽出処理に膨大な時間がかかるため、アルゴリズムを改良し、一度に検出する領域を最小化し、多数の位置で解析することにより、暗部ノイズと同レベルの輝度の船舶も、抽出できるようになった。

今回の様なCGを用いて検出率を定量的に議論するには、以下の様にCGを埋め込み、ランダムな海面のノイズに影響を受ける環境下で多数のケースを設けて解析する必要がある。

- ・ 船舶のCGごとに、同一画像中の埋め込み位置を様々に変化させ、画像中の周辺ノイズによる影響を平均化する。
- ・ 船舶のCGを埋め込む元の衛星画像を複数用意し（R06も衛星から20枚の画像を撮影している）、各画像にCGを埋め込むことで、画像間のノイズの影響を平均化する

このような方法で複数の画像の複数の位置にCGを埋め込むことで、周辺ノイズの影響を平均化して、検出率を議論できる様にすることが望ましいが、今回は実施できなかったため今後の課題としたい。

④ 海洋画像を取得する衛星システムの検討

今回取得できた衛星画像を自らの衛星にてタイムリーに撮影することで、観測頻度を確保し、より適切なタイミングで顧客に提供できる様にしたい。ここでは夜間の海洋画像を取得可能となる小型衛星の光学系への要求を整理し、小型衛星システムの主要な仕様を、表 3.3-5 の通り整理した。

表 3.3-5 小型衛星光学系および衛星システムの主要な仕様設定

要求項目		仕様設定
画像撮影系 (別紙参照)	光学系	夜間の撮影が可能となる様、衛星サイズの範囲で口径を最大化し、焦点距離は衛星高度に合わせた設計とする。 (例)口径：200mm、焦点距離：500mm、反射型（カセグレン式） 軌道周回に伴う熱歪により焦点距離が変化して生じるボケが生じてても、サブピクセル効果により船舶の位置検出に影響を与えない様設計する
	撮像素子	夜間の画像取得のため、画素サイズが大きい高感度撮像素子を採用 → Teledyn Imaging製：Capella ^{LN} 等を候補とする
	データストレージ	軌道周回中に撮影したデータを一時的に保存するのに必要十分な容量のデータを保管する。
姿勢制御系 (別紙参照)	姿勢決定精度	±3秒角 程度
	姿勢安定度	0.5秒角/秒 程度
通信系とダウンリンク (別紙参照)	通信周波数	衛星→地球局：リモセンデータのダウンリンク用Xバンドが候補 衛星→静止衛星：Inmatsatによる衛星通信用Lバンドが候補
	地球局または通信衛星	極地方の地球局または、通信衛星を活用する
	レイテンシー	静止通信衛星経由でデータをダウンリンクすることを検討要
	データ圧縮	撮影された画像ごとに、輝点の位置情報(1,200点)のみを取り出し、部分的なRawデータと共にダウンリンクする
構体系	熱歪の低減	ピッチ系PFRPの採用により見かけ上の線膨張係数≒0に設計する
熱制御系	光学系等の温度安定性	鏡筒部外部にはMLI装着、鏡筒温度を計測しヒータによる保温を行う

⑤ ISS カメラによる撮影と解析結果（参考）

令和5年度には、異なる撮影手段による影響を評価するため、ISSカメラによる撮影も実施した。キャノン電子の衛星と同日に撮影する予定であったが、ISS側の都合により撮影日を変更することになり、2024/1/29 09:21:23-09:28:00 (UTC)での撮影を行った。

撮影された動画より抽出した東京湾の画像を図 3.3-6 に、カメラの白傷を除く処理を行った結果を、図 3.3-7 に示す。

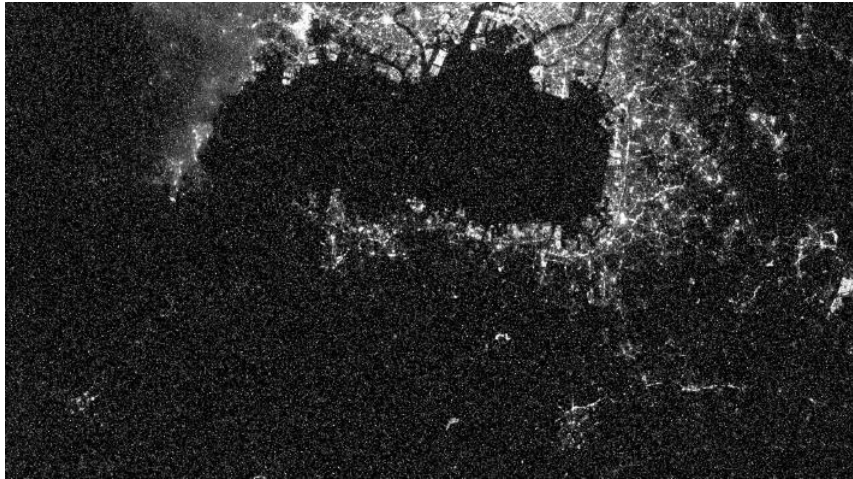


図 3.3-6 ISS から撮影された東京湾の動画よりキャプチャした画像

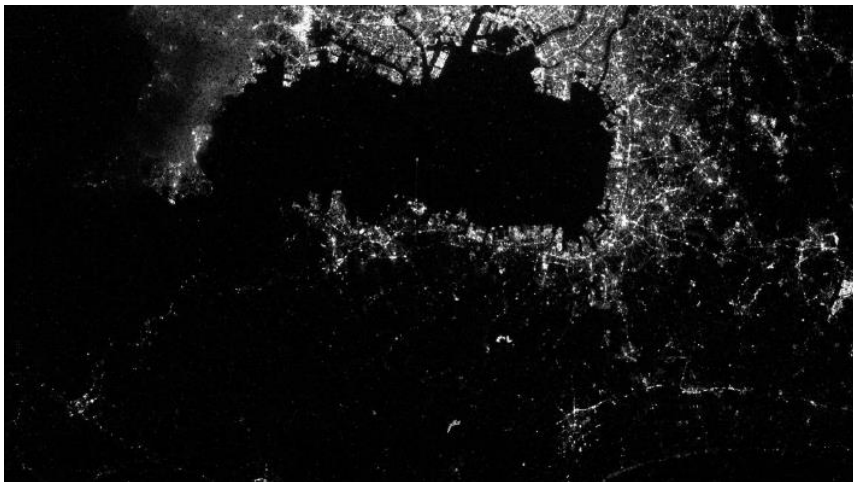


図 3.3-7 上記画像からカメラの白傷によるノイズを除去した画像

また ISS が東京湾上空を通過する際に、カメラの視点を東京湾中央付近に向けて指向する処置を行いつつ、連続して動画の撮影を行った。東京湾に対するカメラの向きが時々刻々変化するため、画角内の東京湾の画像には歪みが生じている（図 3.3-8 参照）。

ここでは、一つの画像を基準として選択し、その画像を基に東京湾の大きさ・形状が一致する様に変換を行った。結果を図 3.3-8 下図、及び図 3.3-9 に示す。時々刻々変化している東京湾の様子が、同一の視点から撮影された様に修正できた。

解析用の統一画像の基準点（すべての画像にある高輝度の4点）を決め、変形する画像の基準点を探し、それぞれ射影変換の変換行列を作り元画像を変形する。

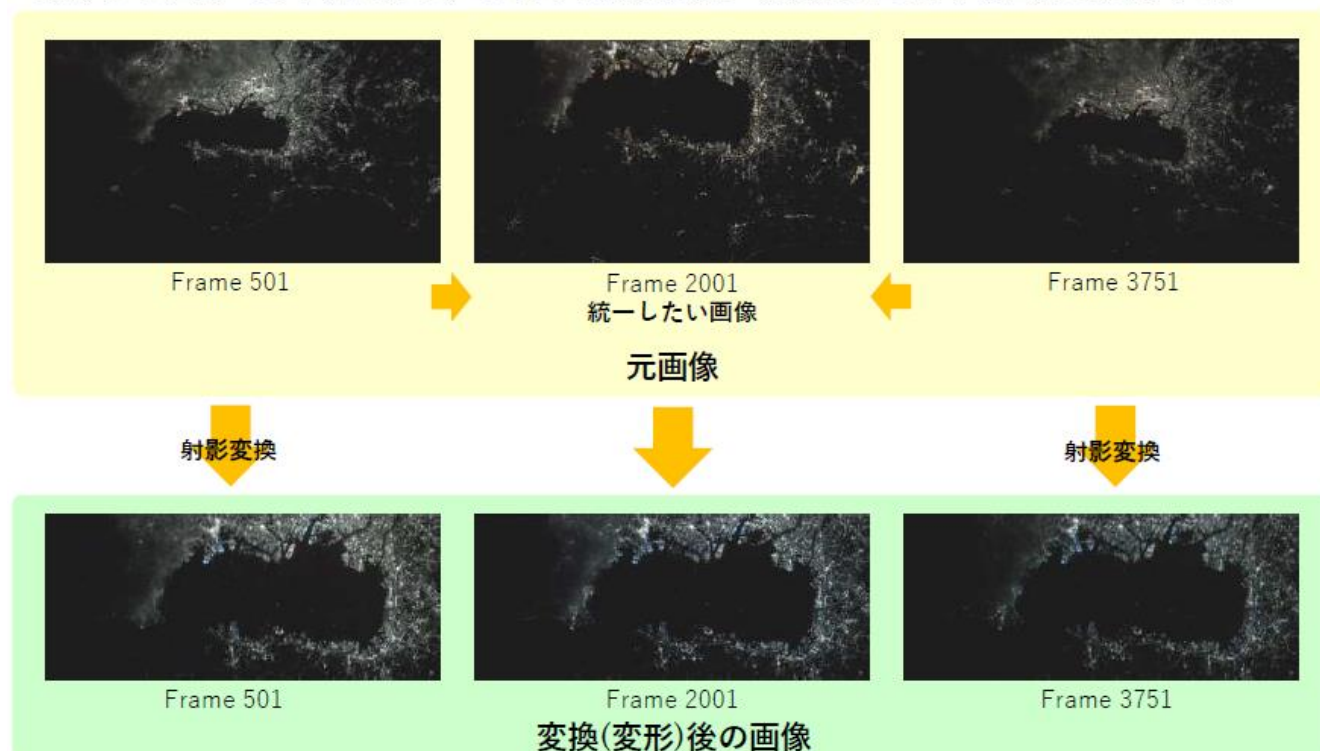


図 3.3-8 画像の変換によるオフナディア角の影響除去



図 3.3-9 ISS 撮影画像に対し射影変換を行った効果

変換を行った東京湾の画像から時間を等間隔に静止画として抜き出し、キャンノン電子の衛星で撮影した画像と同様に解析を実施した。解析の対象となる海洋部分のみを抜き出した工程を図 3.3-10 に示す。

ISSで撮影された動画90秒間のなかから等間隔になる10画像を抜き取り射影変換後に解析領域の切取を行い、Canon衛星撮影画像と同じ解析パイプラインで解析を実施したところ1つの移動物体を検出した。シャッフル解析では検出物体はなかった。

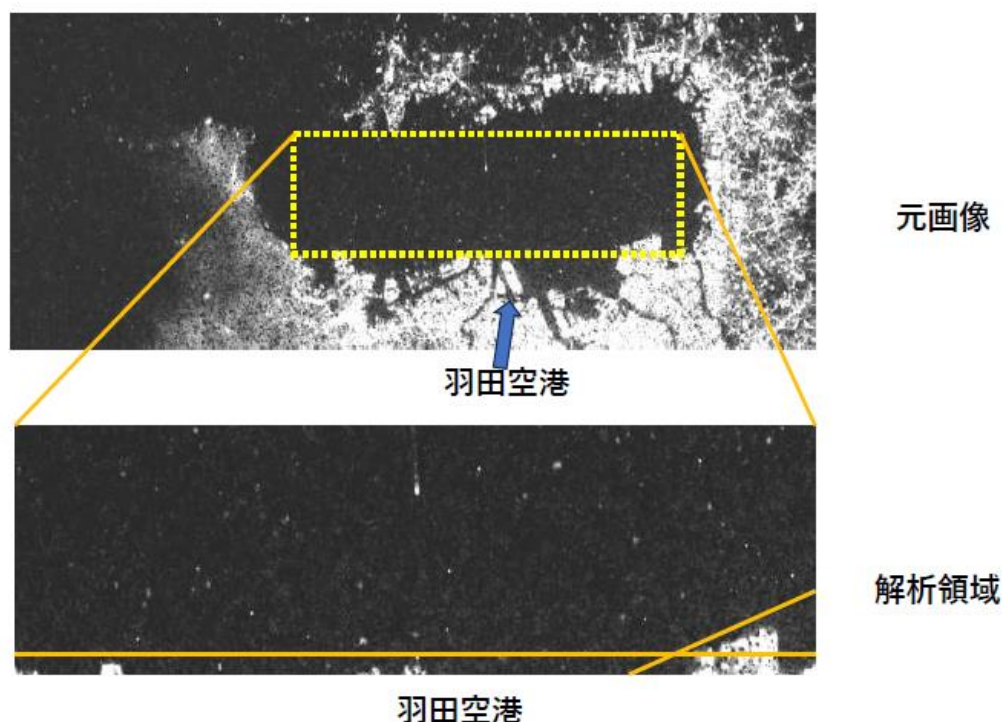


図 3.3-10 東京湾の画像から海洋部のみを抜き出す工程

図 3.3-10 の画像に対し、R05 年度の画像処理アルゴリズムにより船舶の検出を試行したところ、羽田空港の沖合に、図 3.3-11 の通り移動する物体が検出された。

各画像において明るい順に700個の候補物体を抽出

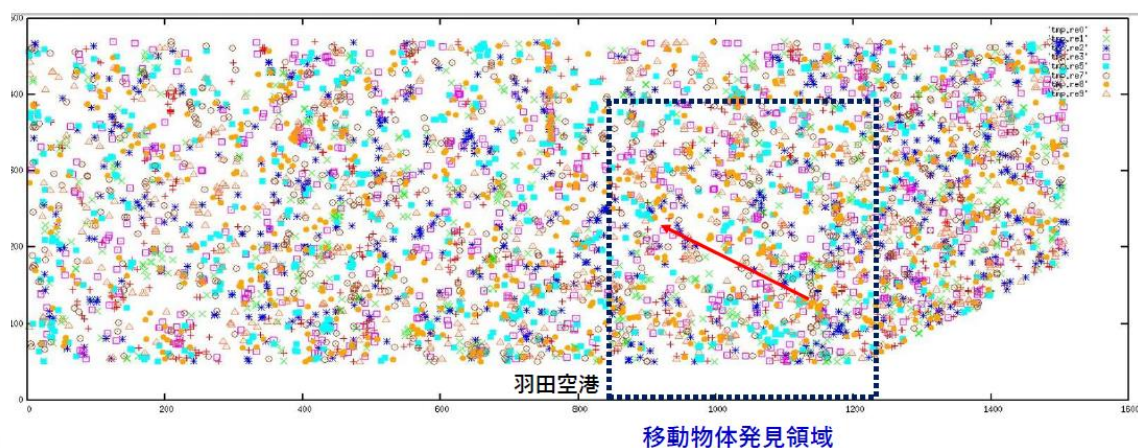


図 3.3-11 羽田空港沖合の移動物体検出領域

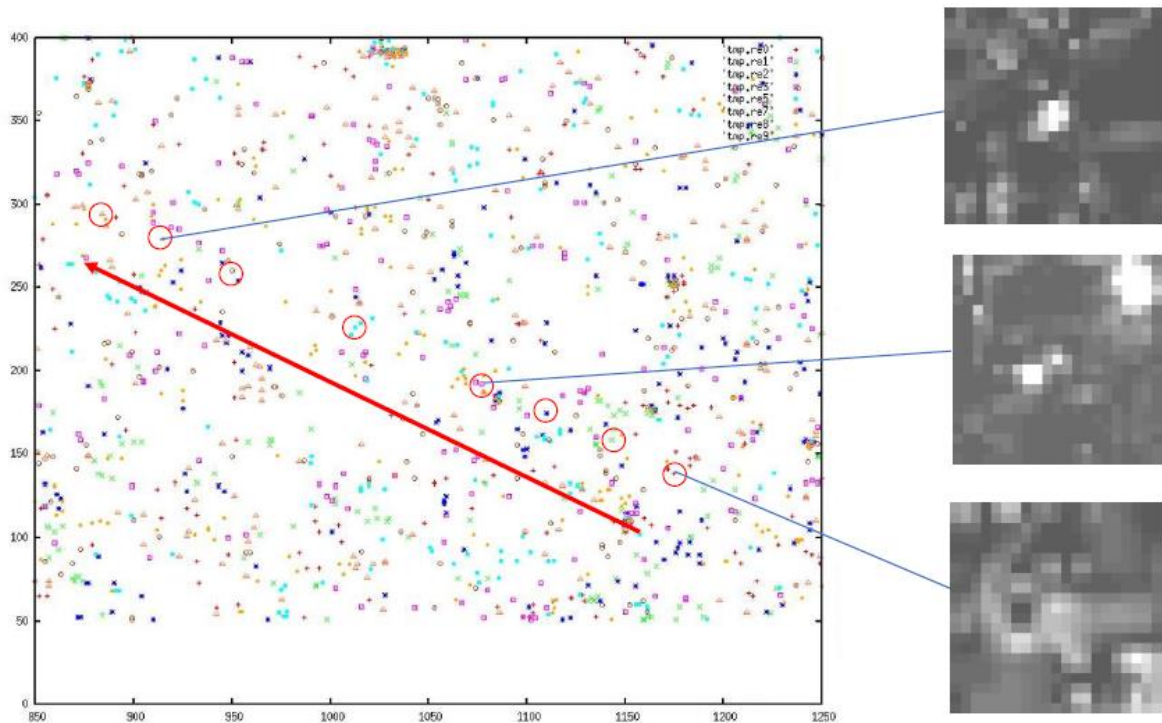


図 3.3-12 東京湾を移動する物体を検出

画像処理の結果、輝点の移動の様子と拡大した輝点を図 3.3-12 に示す。

ここで活用した 10 枚を撮影した時間は 90 秒間になり、またその時間で 330 画素相当の距離を移動しているが、1 画素あたりの解像度 (GSD) が 20m 程度となることを考慮すると、時速 400km 弱で移動しており、船舶でなく、航空機（固定翼機、回転翼機）と想定され、羽田空港を離発着した機体と考えられる。

今回検出された物体は船舶ではなかったが、このように宇宙から撮影された「動画」によっても暗い移動物体を検出できる可能性を示すことができた。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

衛星から海洋を撮影した画像を解析したところ、船舶ばかりでなく航空機についても検出できることが判明した。特にADS-Bを搭載している大型の機体ばかりでなく、小型のヘリコプタ等と思われる機体についても検出することができた。

今回の研究成果は、MDAばかりでなく、ADAにも役に立つ可能性がある。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

（研究成果の今後の発展や波及にあたり障害となるようなボトルネックや、その解決の見通しに関する知見）

- ・ 実際に検出するべき船舶の輝度の限界値を見極めることが必要。
- ・ その上で、抽出すべき限界輝度の船舶（特に小型船舶）を抽出するための、アルゴリズムの改良（小領域ごとの計算等）を、計算機能力とのバランスを取りつつ行うことが必要。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

人的ネットワークの構築という観点では、別紙3に記載したワークショップに参加できたことで、これまで意見交換などができていなかった防衛省各所の皆様と名刺交換・意見交換を行うことができたため、利用者側の視点でご意見を伺えたことが非常に有意義であった。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

プロジェクトの総合的推進に注力し、研究を再委託した国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構の研究者と連携し、課題・スケジュールを共有して計画通りの研究成果を達成できた。

要素課題に関する研究の進捗を管理し、プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運用していくため、研究期間を通じて代表研究機関と分担研究機関の研究者による定例会を10日に1回程度の頻度で開催し、連携・調整に務めた。

また、今後も研究内容に関する発表の規格がなされる場合は、積極的に報告し、広く防衛省関係者、会場保安庁関係者、並びに関連装備品事業者との意見交換を行うことで、顧客の要望に沿ったサービスとなる様に検討を進めることができた。

5. 2 経費の効率的執行

今回の研究費使途の大部分を占めた衛星画像の購入にあたり、複数の商社から見積もりを取得し、最も低価格の提示があった商社経由で購入を行った。

6. まとめ、今後の予定

研究の成果について以下の（１）の通り整理した。また研究中に判明した課題は（２）に記載し今後の取り組みについて（３）に記載した。

（１）研究の成果

- 光学衛星を用いた夜間の海洋画像を取得し、天文分野で使用されていたデブリ等を検出する画像処理アルゴリズムを活用し、暗い船舶の抽出を行った。
- 画像の目視確認では抽出できない、暗い船舶の移動を検出することに成功した。
- 光学系の特性などを反映したモデル化手法を用い、船舶のCGを複数種作成し、当該アルゴリズムによる検出の限界を明らかにし、達成目標である総トン数300トン以上の船舶について、満月では100%の検出率、満月の1/2の輝度では63%、1/4の輝度では50%が検出できることを確認し、目標の80%には届かなかったものの、暗い月光下での検出も可能であることが確認できた。

（２）課題

- 実際に検出すべき船舶の輝度の限界値を見極めることが必要。
- その上で、抽出すべき限界輝度の船舶（特に小型船舶）を抽出するための、アルゴリズムの改良（小領域ごとの計算等）を、計算機能力とのバランスを取りつつ行うことが必要。

（３）今後の取り組み

- 反射特性などを明確にした複数船舶の衛星での撮影により、リファレンスデータを取得し、定量的な検出輝度限界を明確にすることも検討する。
- 海洋撮影時のノイズ特性を分析し、衛星による撮影のパラメータチューニングと組み合わせた、輝度値のみに依存しないアルゴリズムの創出を検討する。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

（１）研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	1件
展示・講演	2件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

（２）知的財産権等の状況

該当なし。

（３）その他特記事項

該当なし。

以 上