衛星画像による海底被覆物マップを用いた 漁場環境評価手法の検討

梶原 瑠美子¹・大橋 正臣²・三上 信雄²・
南部 亮元³・桑原 久実⁴

¹ (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

E-mail: kajihara-r@ceri.go.jp

² 正会員 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

³ (国研) 水産研究・教育機構 水産工学研究所 (〒314-0408 茨城県神栖市波崎 7620-7)

⁴ (国研) 水産研究・教育機構 本部 (〒220-6115 横浜市西区みなとみらい 2-3-3 クイーンズタワーB15 階)

近年の漁獲量減少に対して効率的な漁場再生を行うためには、水産有用種の生息地としての環境適地評価を行った上での漁場特性に応じた対策が重要である。そのためには、基礎情報として海底被覆物の空間配置を広域に把握する必要がある。広域海底被覆物マッピングに最近では衛星画像が活用されているが、光透過度が低く複雑な地形を有する岩礁海藻域では、水柱影響の除去や教師設定などが課題となる。本研究は、漁場再生を念頭に、衛星画像を用いた海底被覆物マッピング手法とともに、得られた海底被覆物マップを用いて漁場特性を統計的に解析する手法を検討することにより、漁場環境の評価手法について検討した。その結果、赤色バンドやDI指標を用いた衛星画像からの海底被覆物マップや統計解析による漁場環境評価手法の有用性が示唆された。

Key Words : satellite imagery, DI, seafloor habitat map, fishery ground, environment evaluation

1. はじめに

近年の水産有用種の漁獲量減少に対して、様々な手法で漁場機能の再生が試みられている。特に藻場は重要な漁場機能を有するため、磯焼けと呼ばれる大規模な藻場の消失に対して、全国各地で対策が取り組まれている。磯焼け対策など漁場再生を的確に行うためには、広域な漁場の中から水産有用種の生息地としての環境適地評価を行い、それに応じた対策の実施が効率的である。そのため良好な漁場において、生息環境に重要な海底基質(岩盤、転石、砂など)や海藻などの海底被覆物がどのように空間配置されているかを広域に把握し、漁場環境としての基礎特性を検討することが重要である。

最近では、空間解像度が高い人工衛星画像が入手しやすくなり、広域の海底被覆物の分布把握に衛星画像が用いられている。特に透明度の高いサンゴ礁域では活発に海底被覆物マッピングが行われ、ハンドブックなども刊行されている¹⁾。衛星画像を海底被覆物マッピングに用いる場合、「水柱での光の減衰」と「海底反射情報の分類」を適切に取り扱う必要があると考えられる。「水柱での光の減衰」について、光は水深とともに指数関数的に減衰するため、衛星画像データからこの光減衰の影響を取り

除く水柱放射量補正を行い、海底からの反射情報を得る必要がある。衛星画像のピクセル毎に水深情報を取得できれば理論上補正可能であるが、地形変化に富むサンゴ礁域で正確な水深情報の取得は困難である。このためLyzena (1981)²⁾は、2つのバンドによる消散係数比を用いることで水深情報を必要としない水柱放射量補正手法を提唱しており、サンゴ礁域では有用性が確認されている。しかし、上記放射量補正手法は水中懸濁物による光の散乱等を考慮しておらず、透明度の低い岩礁海藻域での適用性は確認されていない。一方、「海底反射情報の分類」については、現地の海底被覆物情報を教師とした教師付分類を行うことが多い。しかし、衛星画像の各ピクセルに合わせた現地の海底被覆物情報を得るのは難しく、どのような現地観測手法が適しており、さらにどのようなクラスに分類できるかを事前に検討する必要がある。

そこで本研究では、まず衛星画像から海底被覆物の分布状況を把握する手法として、上記の水柱放射量補正手法の岩礁海藻域での適用性を検証するとともに、海底被覆物の分類項目や現地観測手法について検討した。次に、漁場環境を評価する手法として、海底被覆物マップと漁場の位置情報を用いて優良な漁場環境条件を統計的に解析する手法について検討した。これにより、衛星画像に

よる海底被覆物マップを用いた漁場環境評価手法の有用性を明らかにすることを目的とした。

2. 衛星画像による海底被覆物の分布把握

(1) 解析材料とマッピング方法

a) 衛星画像

解析用画像は、衛星「だいち (ALOS)」のマルチスペクトルセンサ、高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2) の幾何補正済み画像 (1B2R, 図-1) であり、解析対象である鹿児島県阿久根市沿岸域の範囲 (南北約 23 km, 東西約 8 km) を 2008 年 4 月 14 日に撮影したものである。この衛星画像は、空間解像度 10 m, 観測幅 70 km であり、可視・近赤外域の 4 バンド (バンド 1; 0.42–0.50 μm , 2; 0.52–0.60 μm , 3; 0.61–0.69 μm , 4; 0.76–0.89 μm) の DN 値が 0–255 の範囲で画像ピクセルごとに示されている。

b) 2 つの観測手法による現地調査データ

分類クラスおよび現地観測手法の検討や画像分類結果の精度評価のために、2010 年 6 月 3, 4 日に行われた阿久根市藻場定期モニタリング³⁾の調査結果を参照した。このモニタリングでは、ライン観測とスポット観測を行っている。ライン観測では、汀線付近から沖向きに 200 m の測線を設置し、水深 1 m または 2 m ごとに方形枠 (1 m×1 m) 内の基質 (砂, 礫, 岩など) および海藻被度を潜水調査しており、4 本で計 27 地点である。またスポット観測では、1989 年の藻場分布⁴⁾を参考に選定された計 23 地点において、主要位置の緯度経度を記録した後、周辺 10 m 程度の範囲内での基質および海藻被度範囲を潜水調査している。ライン観測は磯焼け対策ガイドライン⁵⁾でも紹介されており、両観測手法は磯焼け地域でのモニタリング手法として広く用いられている。

c) 画像解析方法

一連の画像解析手順を図-2 に示す。衛星画像から海底情報を得るために、Lyzenga (1981)²⁾が提唱した水柱放射量補正手法により水深の影響を除き、海底被覆物指標 DI (Depth-invariant Index) を式 (1) により算出した。ここで L は放射輝度, L_s は大気および海面からの散乱光の放射輝度, k は消散係数比, 添字 i, j はバンドを示す。

$$DI_{ij} = \ln (L_i - L_{s_i}) - k_{ij} (\ln (L_j - L_{s_j})) \quad (1)$$

① 画像ピクセルの DN 値に各バンド固有の係数を乗じ、放射輝度 (L_i) に変換する。② 水深が十分に深く画像内の最も暗いピクセル値 (L_{s_i}) を大気ノイズ成分として差し引く暗画素法により大気補正を行う。③ 海底被覆物が同じで水深が異なるピクセルにおける $\ln (L_i - L_{s_i})$ の 2 バンドの関係から消散係数比 (k_{ij}) を算出する。④ 以上の値を式 (1) に代入し DI_{ij} を算出する。本研究ではバンド 1-3 を用いて, DI 画像 (DI_{12} , DI_{13} , DI_{23}) を算出した。

図-1 解析に用いた衛星画像

図-2 画像解析手順

解析対象は水深 10 m 以浅の海域であるため、陸域や水深 10 m 以深は、近赤外バンド 4 と海底地形デジタルデータ (M7024, 日本水路協会) を用いてマスク処理した。この解析対象域に対して、各 DI の組み合わせで ISO

クラスタ教師なし分類を行った。海底被覆物の分類クラスの項目や数に関しては、現地調査結果の基質や海藻被度でのDI値の差異を確認した後、今回はDI値の低い分類クラスから海藻、岩、砂の3つに割り振った。衛星画像の処理および分類には、ArcGIS (Ver.10.3, ESRI 社) を用いた。

d) 精度評価方法

各地点の現地調査結果を、海藻被度50%以下では、「砂」、礫や岩場を「岩」、50%より高い海藻被度を「海藻」として画像分類の精度評価に用いた。各分類画像での現地調査地点の分類結果について、観測手法別および全観測地点毎に誤差行列を作成し、各全体の精度(観測地点のうち正確に分類された地点の割合)を確認した。また、全体の精度から偶然の一致を取り除いた分類精度の一般的な指標として用いられるタウ係数⁹⁾を算出し、分類画像間を比較した。

(2) 結果と考察

a) 消散係数比 k_i の算出

消散係数比を算出するために、衛星画像上で明らかに砂地が深海域まで続く脇本海水浴場付近(図-1 白線内)にランダムに200地点を設定し、各地点のDN値を用いた。図-3にデジタル海図での水深とDNから変換された放射輝度、2バンド間の自然対数放射輝度の関係を示す。水深にともなうL値の減衰傾向から、解析対象の10 mまでは海底に光が届いていることが確認された。2バンド間の自然対数放射輝度の回帰直線の相関係数(r)は0.91以上と高く、その傾きである消散係数比、 k_{12} は0.710、 k_{13} は0.520、 k_{23} は0.711を用いて、DI値へ変換した。

図-3 砂地における (A) 水深と放射輝度、
(B) 2 バンド間の自然対数放射輝度の関係

b) 海底被覆物指標 DI と現地調査データの関係

脇本海水浴場付近の放射輝度および DI 値の白黒画像を図-4に示す。Lに比べ、DIでは水深の影響が取り除かれ、海底の違いが明確になることが確認された。

現地調査地点における、海底基質、海藻被度および観測手法による各 DI 値での違いを図-5に示す。基質は最も被度の高いものとし、海藻被度は、全海藻の合計被度、スポット観測では被度範囲の平均値を用いた。現地調査では砂の地点が少なかったため、 k_{ij} 算出用に画像上で選出した海水浴場付近の砂地の値も示している。

礫と岩の違いは、観測手法によらずどの DI においても明確でなかった。砂は、 DI_{13} および DI_{23} において、礫や

図-4 各バンドの放射輝度および DI 画像

図-5 各観測手法での海藻被度と DI の関係

岩に比べ高い傾向が見られた。海藻被度とDIの関係は、ライン観測では、DI値は海藻被度による明確な違いが見られなかったが、スポット観測ではDI₁₃およびDI₂₃で海藻被度による違いが確認された。DI₁₃では、海藻被度50%以下の平均値(±標準偏差, n=地点数)が0.82(±0.22, n=13)であったのに対し、50%より高い被度での平均値は0.46(±0.33, n=10)と低い値を示した(t検定, p<0.05)。またDI₂₃でも同様に、DI値が1.85と高い1地点を除いても、海藻被度50%以下の平均値(1.00±0.22, n=12)は、50%より高い被度の平均値(0.73±0.17, n=10)に比べ高い値であった(t検定, p<0.05)。

c) 分類精度の比較

水柱放射量補正前後のLおよびDI画像からの分類結果である海底被覆物マップを図-6に示す。Lでは水深に依存して分類される傾向が確認された。DI間では、DI₁₂は砂、DI₂₃は海藻に分類された範囲が多く、2つのDIの組み合わせでは、DI₁₂&DI₁₃は岩に分類される範囲が多い傾向が見られた。次に、各海底被覆物マップでの観測手法別および全観測地点での分類精度を表-1に示す。観測手法での精度の違いを比較すると、スポット観測はライン観測よりも高い精度であった。スポット観測の分類画像毎の精度は、DI間では、DI₁₃とDI₂₃はDI₁₂に比べ分類精度が高く、海藻や岩の分類精度が上がっていた。DIの組み合わせでは、DI₁₂&DI₂₃の分類精度が最も高く、全体の精度は0.82、タウ係数は0.70と高い値であった。

d) 衛星画像による海底被覆物分布把握手法の検討

岩礁海藻域における衛星画像による海藻、岩、砂の分布把握手法として、バンド3を用いる必要性が明らかになるとともに、DIの有用性が確認された。

これまでの現地分光反射測定において、バンド3の波長帯で3者の反射率が異なることが報告されている⁷⁾。バンド3は水柱での減衰が大きい、スポット観測地点の水深は、海藻被度50%以下とそれより高い被度で、有意な違いはなかった(t検定, p>0.05)。このため水深10m以浅ではDI値に変換することによって、水深の影響が抑えられ、海底被覆物の反射特性の違いから、バンド3を用いることで砂、岩、海藻に区別できると考えられる。一方、バンド1や2は、バンド3より深い水深まで届くため、サンゴ礁域ではDI₁₂を用いることが多い。DI₂₃とともにDI₁₂を組み合わせることで、各々の特徴が明確になり、精度が向上したと考えられる。

天候や衛星の撮影周期などにより衛星画像撮影と現地調査の日時を一致させることは容易ではなく、本検討では2年2ヶ月の時差がある。対象域は近年磯焼け対策が実施されており、また主な海藻はホンダワラ類であるため繁茂期を考慮すると、衛星画像よりも現地調査時は海藻が増加している可能性がある。しかし、スポット観測結果では海藻被度によるDI値に差異が確認できたため、

図-6 放射輝度および各DIでの海底被覆物マップ

表-1 各海底被覆物マップでの分類精度

	海底被覆物マップ							
	L ₁ & L ₂ & L ₃	DI ₁₂	DI ₁₃	DI ₂₃	DI ₁₂ & DI ₁₃	DI ₁₂ & DI ₂₃	DI ₁₃ & DI ₂₃	DI ₁₂ & DI ₁₃ & DI ₂₃
ライン	0.52	0.22	0.26	0.59	0.38	0.37	0.26	0.30
スポット 度(タウ)	0.52 (0.35)	0.39 (0.24)	0.70 (0.53)	0.52 (0.35)	0.70 (0.53)	0.82 (0.70)	0.70 (0.53)	0.58 (0.40)
全地点	0.52	0.30	0.46	0.56	0.53	0.58	0.46	0.42

海藻分布の傾向は同様であったと考えられる。このことから、本検討による海底被覆物マップは現地の基質や海藻分布を概ね表現できたと考えられる。

加えて、衛星画像の空間解像度が10mであるため、1m方形枠内の海藻被度を調査するライン観測よりも、広域的な場の評価を行うスポット観測は、画像解析の精度評価や教師に適していると考えられる。

3. 漁場環境の評価

(1) 解析材料と評価方法

a) 解析データ

漁場環境の評価においては、阿久根市沿岸域でのムラサキウニ漁場について解析を行った。まず、現状のウニ

漁場の分布情報を取得するために、阿久根市役所水産課で聞き取り調査を行った。聞き取りでは、図1の解析対象域の衛星画像上に50 mメッシュを作成した画像に漁場の有無について記入してもらい、GIS上に記録した。漁場に関する環境要因は、水深、勾配、そして海藻や岩などの海底被覆物とした。水深および勾配は海底地形デジタルデータを用い、海底被覆物のデータは、作成した海底被覆物マップ図-6のうち分類精度が最も高かったDI₁₂&DI₂₃を用いた。

b) 漁場評価のための空間スケール

漁場と環境要因との関係を解析するには、どのような空間スケールでの解析が適切か検討する必要がある。本研究では、図-7に示す6つの空間スケールを仮定した。①では連続した漁場を1区域とし、スケールが一定ではないため漁場評価に用いることはできないが参考に利用した。②から⑥では解析対象域に一辺が50 m, 100 m, 200 m, 500 m, 1 kmの正方形メッシュを作成し、1メッシュを1区域とした。区域の中心点が聞き取りでの漁場内部に含まれた場合、その区域を漁場とした。1区域ごとに水深と勾配の平均、砂、岩および海藻の被度割合を求めた。

c) 解析方法

空間スケールごとに、ウニ漁場の有無を応答変数、環境要因を説明変数として、応答変数は二項分布に従うと仮定した一般化線形モデルを用いて、ウニ漁場と環境要因との関係性の予測モデルを作成した。砂と岩は、有意に負の相関があり(p<0.01)、多重共線性を排除するために、砂を変数から除外した。予測モデルは、4つの環境要因の全ての組み合わせの中から、AIC(赤池情報量規準)を基準に最も当てはまりの良いモデルを選択した。

(2) 結果と考察

a) ウニ漁場と環境要因の関係

各空間スケールにおける漁場有無での環境要因ごとの出現頻度を図-8に示す。上部に漁場でない区域、下部に漁場である区域での、区域内の平均水深と勾配、各海底被覆物被度における区域出現割合を示す。空間スケール②-④では、ウニ漁場の有無で環境要因の頻度分布に違いがみられた。ウニ漁場は、漁場でない場所に比べ水深が浅くやや勾配があり、海藻が生えている岩場である傾向が確認された。⑤⑥では、区域の中心点が聞き取りで

図-7 漁場評価用の空間スケール

の漁場の内部に含まれる場合のみ漁場区域と設定したため、図-9(A)で示すように漁場となる区域数が少なく、またサイズが大きく1区域に漁場以外の特徴が内包するた

図-8 各空間スケールにおける漁場有無での環境要因の出現頻度 (n=区域数)

図-9 各空間スケールでの漁場分布イメージ
(A) 漁場有無, (B) ウニ漁場予測モデルでの漁場確率

表-2 パラメーターの推定値

スケール	切片	岩	海藻	水深	勾配
②50m	0.190	1.352	4.473	-0.614	0.084
③100m	0.245		5.591	-0.707	0.545
④200m	0.208		7.091	-0.767	0.558
⑤500m	-373.9			-116.7	449.9
⑥1km	-111.0		557.1		

め、特徴が不明瞭になったと考えられる。

b) 優良な漁場環境を統計的に解析する手法の検討

AIC 基準により選ばれた各スケールでの最適モデルの各パラメーターの推定値を表-2に、最適モデルでの漁場確率の分布を図-9(B)に示す。空間スケール②-④でのウニ漁場予測モデルは、海藻、勾配が正、水深が負の環境要因として抽出された。一般的にウニ漁場は浅瀬の岩礁藻場で行われていることから、妥当な結果であると考えられる。また、②-④の予測モデルでの漁場確率の空間分布は、聞き取りでの漁場有無情報を良く反映していた。様々な空間スケールで解析することで、漁場環境評価に適した空間スケールが明らかになることが確認された。

50-200 m の正方形区域データから作成した漁場予測モデルでは、水深だけでなく、衛星画像からの海底被覆物分布情報のウニ漁場への影響が見られ、統計解析の結果の妥当性も確認できたため、衛星画像を用いた漁場環境評価手法である本手法の有用性が示唆された。

また、漁場確率が高い区域は、優良な漁場と考えられ、確率が低い区域は漁場再生が必要と評価できる。優良な漁場環境を本手法により把握し、それを模倣するような海底被覆物(岩、砂、海藻など)の空間配置を提示することにより、効率的な漁場の造成や再生が期待される。

4. まとめと今後の課題

岩礁海藻域においても DI 指標による海底被覆物の把握が可能であり、海藻被度によるが、砂、岩、海藻に赤バンドを用いることで分類可能であることが示唆された。また、空間解像度 10m 程度の衛星画像では、スポット観測のような調査手法により得られたデータが教師や分類

精度の確認に適していると考えられた。

加えて、衛星画像解析による海底被覆物マップを用いて漁場環境を統計的に解析することにより、漁場環境を評価できる可能性が示された。今後、他の環境要因の追加や他の現場での適用により、本手法はより現場環境に即した漁場環境評価手法につながると考えられる。

謝辞: 現地藻場データや漁場情報に関して、鹿児島県阿久根市水産林務課の大石直樹氏に多大なるご協力を頂いた。ここに深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) Mumby, P. and Edwards, A.: Water Column Correction Techniques, *REMOTE SENSING Handbook for Tropical Coastal Management*, pp.121-128, UNESCO Publishing, 2000.
- 2) Lyzenga, D. R.: Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.2, No.1, pp.71-82, 1981.
- 3) 阿久根市: 環境・生態系保全活動定期モニタリング報告書, 2010.
- 4) 環境庁生物多様性センター: 第4回自然環境保全基礎調査海域生物環境調査報告書, <http://www.biodic.go.jp/reports/4-12/t000.html>, 1994.
- 5) 水産庁: 改訂磯焼け対策ガイドライン, pp.57-60, 2015.
- 6) Ma, Z. and Redmond, D. R.: Tau coefficient for accuracy assessment of classification of remote sensing data, *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, Vol.61, pp.435-439, 1995.
- 7) 長谷川均: 分光反射測定によるサンゴ礁環境調査への応用, 国土館大学文学部人文学会紀要, Vol.26, pp.63-82, 1995.

(2016.2.4 受付)

A METHOD FOR EVALUATION OF FISHERY GROUND ENVIRONMENT USING SEAFLOOR HABITAT MAPS BASED ON SATELLITE IMAGERY

Rumiko KAJIHARA, Masami OHASHI, Nobuo MIKAMI,
Ryogen NAMBU and Hisami KUWAHARA

Various measures are taken to improve the recent decline of fish catch. For effective improvement, it is necessary to evaluate the fishery ground environment and choose strategies tailored to the characteristic of fishery ground. Wide spatial distribution of seafloor habitat (i. e. seafloor covers such as rock, sand and seaweed) provides important basic information to assess habitats of commercially high-valued fishes. Satellite imagery has been utilized in recent years for mapping of wide-area seafloor habitat. However, it is difficult to remove the water column attenuation effect and set the classification classes in rocky seaweed bed area. The purpose of this study is to provide a new method for evaluation of fishery ground environment by examining the methods of seafloor habitat mapping based on satellite imagery and statistical analysis of fishery ground environment characteristic using the resulting map. These results suggested the availability of the evaluation method of fishery ground environment using the seafloor habitat map with red band and DI (Depth - invariant Index) based on satellite imagery and the statistical analysis for recovery of fishery ground.