

衛星Terra/ASTERデータを使った 吉名干潟における藻場モニタリング

EELGRASS BED MONITORING USING SATELLITE TERRA/ASTER DATA IN YOSHINA TIDAL FLAT

ルイ ソチエ¹・作野裕司²
LUY Sochea and Yuji SAKUNO

¹学生会員 広島大学 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 博(工) 広島大学助教 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

This paper aims to present a new approach for mapping the eelgrass bed using the satellite data acquired from Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER). Yoshina Area was chosen as the study site due to its well-known habitat of eelgrass in Hiroshima prefecture. In order to evaluate vegetated areas, the Normalized Difference Vegetation Indices (NDVI) of several points was calculated, and then applied the relative atmospheric correction. The spectral reflectance of fresh and dead leaves along with different species of eelgrass was also confirmed. Finally the bottom index between 2 bands was calculated and the distribution maps were derived. NDVI alone is unable to extract eelgrass. For the extinction coefficient ratio, a good correlation between each band is found (0.86-0.98) and its values varied from 0.65-0.96 for band 1 and 2. The study also provides conclusive evidence that the eelgrass mapping is accurately confirmed with the field research, though differs with the season.

Key Words: Eelgrass, NDVI, Bottom Index, extinction coefficient, ASTER

1. はじめに

近年, 都市化や海洋開発に伴う藻場の縮小が問題となっている。藻場の現状調査は, 通常ダイバーによる現地調査と航空写真の目視判読により行われている。しかし, 広域の藻場分布の実態はダイバーや航空写真による調査のみでは難しく, 衛星リモートセンシング (RS) による分布把握が期待されている。実際, 最近では衛星画像を使った藻場分布推定の研究が多く試みられている^{1), 2), 3)}。

しかし, 藻場の衛星RS研究には依然多くの問題がある。中でも衛星の画像処理の際に水深の影響を考慮していない場合が多い (水深が深くなると同じ藻の種類でも誤分類されやすい) という問題点がある。このような問題点を克服するため, サンゴ礁の底質マッピングにおいて, 後述する水深の影響を除去する底質補正アルゴリズム^{4), 5)}が開発されている。しかし, この底質補正アルゴリズムをサンゴ礁地帯以外 (例えば今回対象とする藻場地帯) で適用した例はない。

一方, 藻場の衛星解析においては, 古くから Landsat/TMデータの利用が試みられているが, 水深の補正は行われていない。また, 近年では高解像度化が進み, IKONOSやQuickBirdといった超高解像度 (モノクロで1m, カラーで数m程度の解像度) 衛星

等も使われるようになってきた。しかし, これらの衛星データの価格は1シーンが最低でも7~10万円程度であり, 高度な解析技術も必要である。したがって, 安価な航空写真 (1万円以下) での目視判読と比較して, 衛星データが実際の藻場マップ作成業務などで使われることは非常に少なく, 研究の域を超えないのが現状である。

以上のような背景から, Landsatデータよりも解像度が優れ (解像度15m), 比較的データ価格が安い (1シーン1万円程度) ASTERデータを使って, 水深の影響を考慮したアルゴリズムと知られている底質指標 (BI; Bottom Index) を使った藻場マッピングの可能性を検討することを目的とした。

2. 方法およびデータ

(1) 観測地域について

本研究は, 天然の藻場が広域に存在する広島県竹原市の南西部の瀬戸内海に位置する吉名干潟周辺をテストサイトとした (図-1)。この地域の藻場は, ヒジキに代表されるガラモ場 (*Sargassum* bed), アマモに代表されるアマモ場 (*Zostera* bed), アオサに代表されるアオサ場 (*Ulva* bed) などが存在する (図-2)。

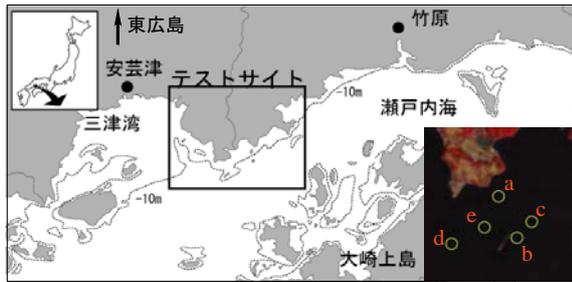


図-1 研究地域



図-2 現地（吉名干潟）の藻場の様子

表-1 ASTERセンサの諸元

バンド	Band1 : 520-600nm Band2 : 630-690nm Band3 : 760-860nm
解像度	15m (直下)
観測幅	60km
量子化	8ビット

表-2 ASTERデータの取得日と当日の気象・海象状況

取得日	気温 (°C)	風速 (m/s)	風向	潮位 (cm)
2000/5/12	16.7	3	西南西	150
2002/9/23	23.2	2	北	340
2003/3/2	11.6	3	南南西	345

(a) 2000/5/12 (b) 2002/9/23 (c) 2003/3/2

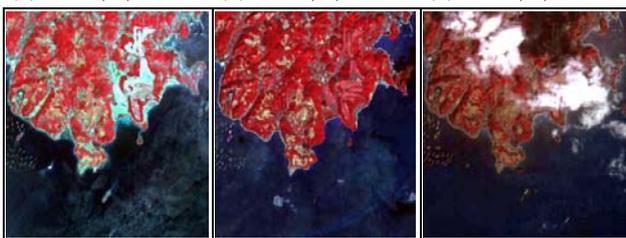


図-3 ASTERデータの自然合成カラー画像

研究地域におけるこれらの藻の生育水深はおよそ図-1に示す10m以浅の水域であり、透明度は約3-6m (4-8月の平均値) である⁶⁾。また同地域における干満差は最大で4m程度ある。

(2) 衛星データ

今回用いた衛星データは、衛星Terraに搭載されたASTER (Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection radiometer) データである。衛星Terraは高度705kmでほぼ円形の極軌道で運用される周期16日の太陽同期軌道であり、軌道パラメータは地方時を

除いてLandsatと同様である。赤道通過時の地方時は10時30分である。ASTERセンサは可視から熱赤外までを14スペクトルバンドでカバーするマルチスペクトルセンサである。今回はこのうち、表-1で示されるような可視近赤外放射計(VNIR)のレベル1bデータを用いた。表-2に使用したASTERデータの取得日と当日の気象・海象状況を、図-3に自然合成カラー(RGB)画像を表す。

(3) 相対大気補正

対象ASTERデータはそれぞれ異なる大気状態で取得されているため、全時期におけるNDVIの評価が難しい。そこで、大気の影響を除去するため、大気補正を行う必要がある。本研究では簡易的な大気補正として比較的よく用いられる相対大気補正法⁷⁾を使用した。ここでいう相対大気補正法とは時間的に反射特性が変化せず、かつ高い反射率から水域のように低い反射率をもつ数点の地上被覆物を基準物体として、データ間の相対的な関係を求める方法である。今回もこの方法にしたがって、最も太陽高度の高い日のデータを基準とし、相対大気補正を行った。なお、基準物体は、吉名干潟に近い学校のグラウンドおよび暗い海水域（水深が十分深いきれいな水域）とした。

(4) 植生指数

水深補正アルゴリズムを適用する前に、陸上植物の活性度状態を調べるために非常に有効な手段である植生指数⁸⁾が藻場の判別にも利用できないか検討する。最も有名な植生指数である正規化植生指数、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)は植物の葉に含まれるクロロフィル色素の吸収バンドである赤バンドと葉の反射率が非常に高い近赤外バンドの差をとることによって指標化される。ASTERデータのNDVIは次のような式で表される。

$$NDVI = \frac{ASTER\ Band3 - ASTER\ Band2}{ASTER\ Band3 + ASTER\ Band2} \quad (1)$$

式(1)の解は-1~1の値をとり、この値が高いほど植物の活性度が高く、低いほど活性度が低いと判断される。

実際、筆者らが吉名干潟の藻場に生育するアマモ等の藻の分光反射率を測定した結果⁹⁾、図-4のように植物活性度の高い生葉は赤バンド (600-700nm付近) で強い吸収があり低い反射率となり、近赤外バンド (700-900nm付近) で高い反射率となった。また、図-5のように藻の種類によって分光反射率特性に若干の違いがあるが、ASTERのような広い波長幅 (100nm程度の幅) を持つセンサの観測では藻の種類による違いはほとんどないと考えられる。一方、植物活性度の低い枯葉は赤バンドで反射率が上がり、近赤外バンドでは反対に反射率が下がる。したがって、式(1)にASTER画像を適用することにより、藻場と藻場以外 (あるいは枯れた藻) の底質を判別す

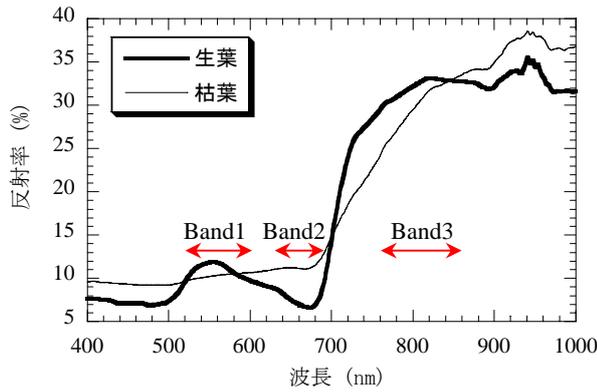


図-4 アマモの生葉と枯れ葉の分光反射率特性

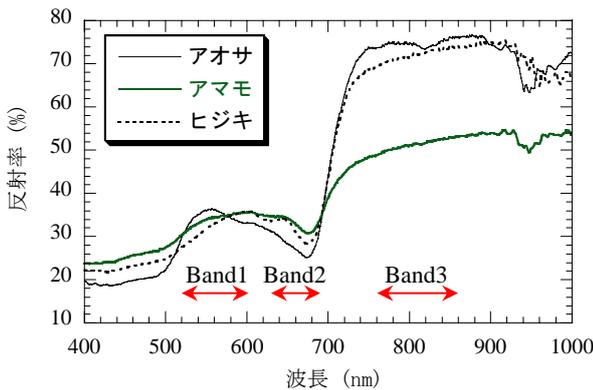


図-5 吉名干潟に生息する藻の分光反射率

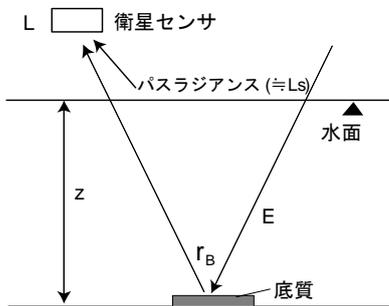


図-6 水中光学過程

ることができる可能性があると考えられる。

実際のNDVIによる藻場判別の可能性を確かめた地帯はASTERデータを画像処理し、現地調査で藻場であることが判明している場所(図-1のa, b, cの3点)および比較のため、藻場が存在しない水域(図-1のd, eの2点)である。

(5) 底質指標による藻場分布推定方法

本研究では、「水深の影響を考慮した藻場のマッピング」のため、Lyzena¹⁰⁾の「比演算アルゴリズム」を基にした、「底質指標(Bottom Index; BI)アルゴリズム」を使用した。ただし、ここでいう「底質」とは、地質学で使われる「水底を構成する岩および堆積物(bottom material)」とする狭義の意味ではなく、「藻類、砂地、岩等を構成する海底被覆物(bottom cover)」の意味である。

以下に底質アルゴリズムの概要を説明する。Lyzenaは、衛星に搭載されたセンサが浅海域において波長 λ で検出する放射輝度(L_λ)を次式で表した。

$$L_\lambda = L_{s\lambda} + E_\lambda r_{B\lambda} \exp(-k_\lambda f z) \quad (2)$$

ここで $L_{s\lambda}$ は水深の深い地点で観測した放射輝度、 E_λ は定数(地上に到達する太陽の放射照度、大気と水面の透過率を含む)、 $r_{B\lambda}$ は底質による分光反射率、 k_λ は水の消散係数、 f は光路長(無次元値)、 z は水深である。図-6に任意の底質が存在する水域における水中の光学過程を示す。画像から底質を判別するために最も有効な方法は式(2)から $r_{B\lambda}$ を求めることである。しかし、水深や水質(消散係数に反映される)が不明な底質環境に対して、式(2)の $r_{B\lambda}$ を解くことは非常に難しい。そこで、「底質が同じならば、異なる2バンドの底質反射率比は一定になる」というLyzenaの理論を応用して、画像を比演算することにより水深の影響を除去する水深補正アルゴリズム^{4), 5)}が導かれる。これらの過程を式で表すと、以下のようなになる。すなわち、異なる2バンド i, j により衛星が観測する放射輝度は、式(2)からそれぞれ以下の式で表される。

$$L_i = L_{si} + E_i r_{Bi} \exp(-k_i f z) \quad (3)$$

$$L_j = L_{sj} + E_j r_{Bj} \exp(-k_j f z) \quad (4)$$

式(3)と式(4)を整理すると、以下のように水深 z を除去した式となる。

$$LN \left[\frac{r_{Bi} E_i}{(r_{Bj} E_j)^{k_{ij}}} \right] = LN \left[\frac{(L_i - L_{si})}{(L_j - L_{sj})^{k_{ij}}} \right] \quad (5)$$

ただし、 k_{ij} は2つの異なるバンドの消散係数 k_i と k_j の比、つまり消散係数比を表す。ここで、左辺の変動の多くは「2バンド間における海底反射率の比」に支配されており、底質の情報を持つ。よって、これを底質指標(Bottom Index)とし、 BI_{ij} とする。これより、底質指標 BI_{ij} は以下の式で求められる。

$$BI_{ij} = LN \left[\frac{(L_i - L_{si})}{(L_j - L_{sj})^{k_{ij}}} \right] \quad (6)$$

また、式(6)は、衛星のセンサが観測したデジタル値DNに置き換えて、しばしば以下の式^{4), 5)}が使われる。

$$BI_{ij} = LN \left[\frac{(DN_i - DN_{si})}{(DN_j - DN_{sj})^{k_{ij}}} \right] \\ = LN(DN_i - DN_{si}) - k_{ij} LN(DN_j - DN_{sj}) \quad (7)$$

式(7)より、異なる2バンドの衛星データの関係から消散係数比がバンド比（異なるバンドの輝度値の対数をプロットした時の傾き）として求まり、理論的には画像のみから水深の影響を除去した底質（今回は藻場）の判別が可能（反射率比が異なる底質の場合）となる。

実際の推定手順としては環境省自然環境保全基礎調査第5回調査（平成9～13年度）藻場マップ¹¹⁾に基づいて、底質の状態がほぼ同じであると仮定される藻の地帯周辺の水域20ヶ所のDN（式(7)の DN_i あるいは DN_j に相当）、水深が十分に深いと考えられる水域1ヶ所のDN（式(7)の DN_{si} あるいは DN_{sj} に相当）を目視抽出した。ただし、各箇所のDN値は3×3画素の平均値とする。その後、 DN_{si} および DN_{sj} 除去後のDN値の自然対数をプロットし、その回帰直線の傾きが消散係数比である。

3. 結果および考察

(1) NDVIによる藻場マッピングの可能性

NDVIによる藻場マッピングの可能性を評価する前に、ASTERデータの相対大気補正の結果を示す。図-7は2002/9/23のバンド2データを基準とし、2000/5/12データのバンド2のDNを求める際に利用した基準点のDNの関係の例である。また、相対大気補正のすべての結果を表-3に示す。これらの結果から3日間のデータは互いに強い線形の相関があり相関係数はほぼ1となった。したがって、以降はこれらの式を用いてNDVIを求める。

図-8、図-9はそれぞれ大気補正前後の各時期、図-1中a～e各地点のNDVIを示す。前述したようにa、b、cは藻地帯で、d、eは藻が存在しない水域である。大気補正後の図-9のNDVIの関係から、5月や3月の結果からは、藻場とそうではない地域で値の変化が見られるが、両者を識別する関係を見つけるには至らなかった。これは潮位による水深の違いや、藻の季節変化等が影響していると考えられる。したがって、NDVIのみによる藻場マッピングは非常に難しいと考えられた。

(2) 底質指標による藻場マッピングの可能性

表-4に3時期のASTER画像から算出した消散係数比（式(7)の k_{ij} ）と相関係数を示す。また図-10はBand1とBand2を使って k_{ij} を求める場合の両バンドの関係を表した図の例を示す。この図の傾きが k_{ij} となる。表-4中 k_{12} 、 k_{23} はそれぞれASTER Band1-2、Band2-3間の消散係数比を表す。これより k_{12} は k_{23} と比較して、全体的に相関係数が高い（ $R=0.94$ 以上）ことがわかった。また k_{12} は0.65-0.96程度の値を示している。この値の評価は同様の研究例がないため難しいが、センサの種類や水質が異なる例であえて比べてみると、松永ら⁵⁾がLandsat/TMデータを使ってサンゴ礁地帯において推定した値（TM Band2とTM Band3）である0.3-0.5よりもやや高めであるが、

オーダー的には一致しているといえる。

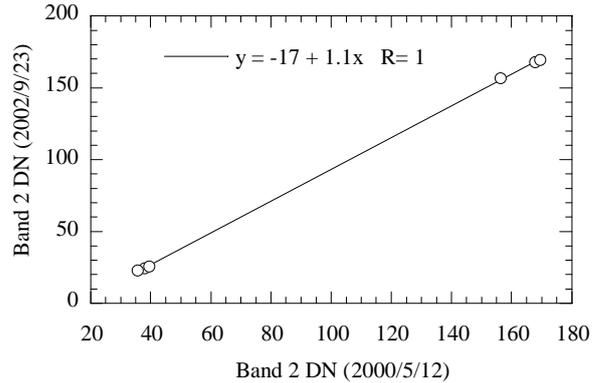


図-7 相対大気補正の関係の例

表-3 相対大気補正の変換式および相関係数

取得日	バンド	補正式	R ²
2000/5/12	2	1.11×DN - 17.43	1.00
	3	1.11×DN - 12.96	1.00
2003/3/02	2	1.67×DN - 18.19	0.99
	3	0.80×DN - 4.73	1.00

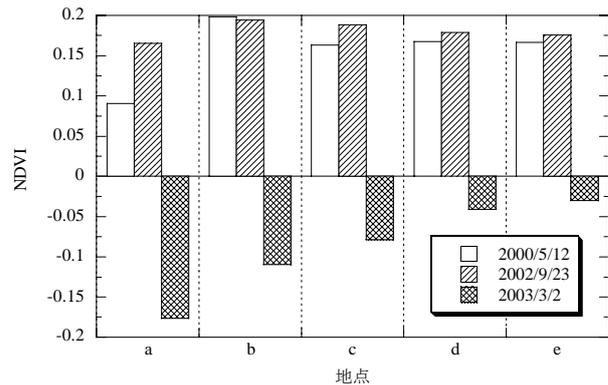


図-8 相対大気補正前のNDVI

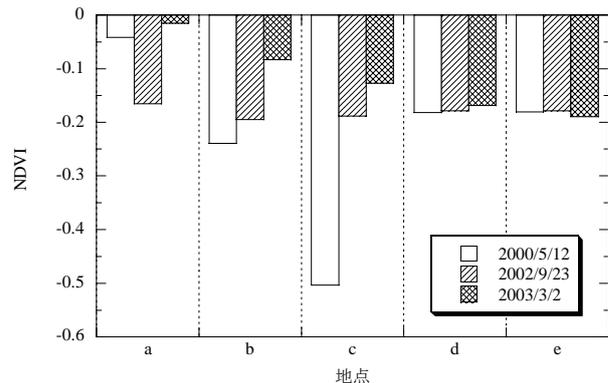


図-9 相対大気補正後のNDVI

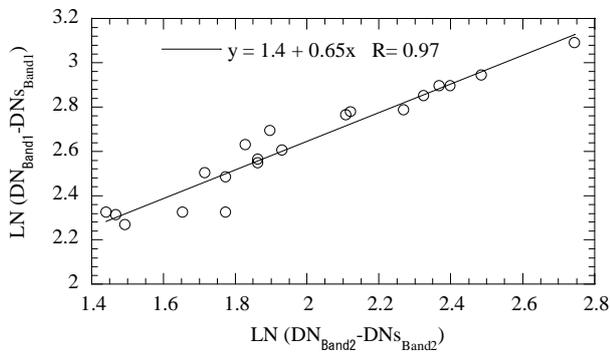
表-4 消散係数比と相関係数

取得日	k_{12}	R	k_{23}	R
2000/5/12	0.65	0.97	1.39	0.86
2002/9/23	0.80	0.98	1.78	0.90
2003/3/2	0.96	0.94	0.89	0.86

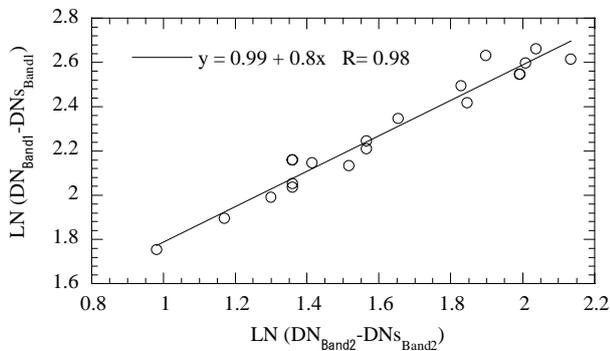
以上の結果から、藻場マッピングには各時期の k_{ij} を用いることとする。

図-11は、ASTERデータから導かれた3時期の底質指標図および現地調査（平成8年と平成9年の10月～3月の調査結果）に基づく藻場マップである。これより概ね、(d)の藻場とASTERデータから導かれた底質指標図の緑部がよく一致していることがわかる。ただし、その分布は季節により、分布が変化している。実際、藻の繁茂する春から夏⁶⁾にかけて緑の分布域が広がっている傾向があり、現場の状態とよく一致していると考えられる。また、(d)の図の赤丸の地帯は、図には記されていないがアマモの分布域としてよく知られている¹²⁾。ASTERデータに底質指標を適用した例では、時期による藻場の分布域の拡大・縮小がうまく表現できる可能性が示唆された。

(a) 2000/5/12



(b) 2002/9/23



(c) 2003/3/2

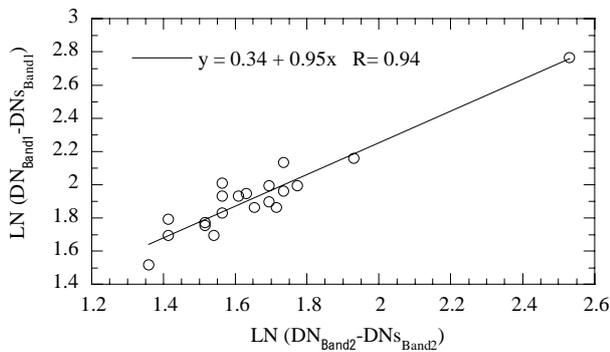
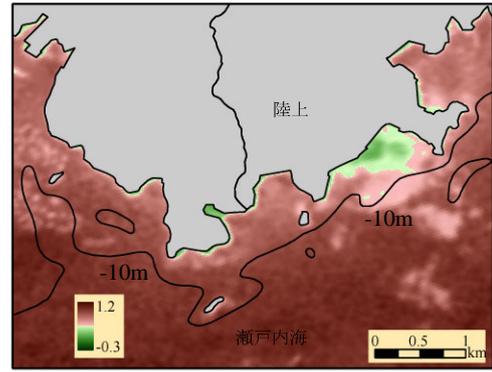
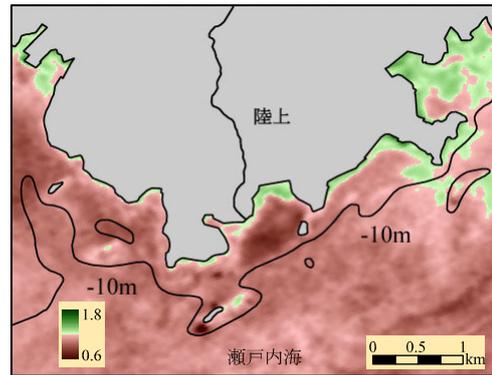


図-10 各時期のバンド1-2の

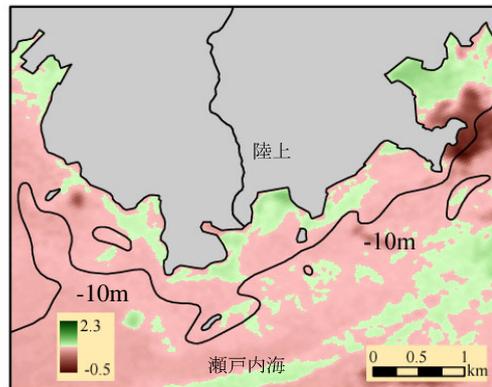
(a) BIマップ(2003/3/2)



(b) BIマップ(2000/5/12)



(c) BIマップ(2002/9/23)



(d) 現地調査に基づく藻場マップ

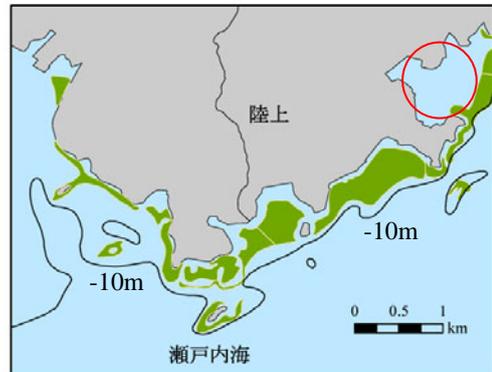


図-11 ASTERデータから導かれた3時期の底質指標図および現地調査に基づく藻場マップ¹¹⁾

4. まとめ

本研究は3時期のASTER衛星画像からNDVIで藻場の活性度および底質指標 (BI) を用いて藻場の分布図を作成し、その妥当性を検証した。結果としてはNDVIのみでは藻場を抽出することが困難であることがわかった。また、底質指標に基づいて作成した底質指標図は現地調査に基づく藻場分布と概ね一致した結果が得られた。今後はこのような藻場分布推定の精度を現地調査に基づいて、検証していきたい。

謝辞：本研究は、「平成18年度環境技術開発等推進費」の助成を受けて行われた。また本研究を遂行するにあたり、国立環境研究所の山野博哉博士、松永恒雄博士、広島県環境保健協会の杉本憲司氏には多くのご助言をいただいた。また、藻場の現地実験に関して関西気球の若松芳樹氏、(株)中国工業開発の岡田隆政氏、広島大学大学院工学研究科物質化学システム専攻グリーンプロセス工学講座の関係各位に大変お世話になった。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 楠山哲弘, 高木哲夫, 林誉命, 黄金崎清人, 神野宏樹, 鳴海日出人: 藻場 (リシリコンブ) のリモートセンシングによる分布域の推定—網走港周辺海域—, 海洋開発論文集, 23, pp.555-560, 2007.
- 2) 松田斉久, 吉田勝則, 丹波幸一, 山田文人, 吉田徹, 鳴海日出人: 衛星画像と音響測深機を利用したアマモ場分布域の把握—霧多布港周辺海域, 海洋開発論文集, 23, pp.561-566, 2007.
- 3) 宮野忠文, 佐野誠, 長谷川浩治, 馬場祥宏, 小黒剛成, 相田聡, 千葉良三: リモートセンシング画像による藻場分布把握技術の開発 (第2報), 広島県立西部工業技術センター研究報告, No.49, pp.12-15, 2006.
- 4) 神原洋, 茅根創, 松永恒雄, 加藤雅胤, 川上亨: ASTER データによるサンゴ礁分布図作成手法の開発, 日本リモートセンシング学会, 第25回学術講演会論文集, pp.217-218, 1998.
- 5) 松永恒雄, 梅干野晃, 水上陽誠: 石垣島サンゴ礁の多時期 LANDSAT TM データを用いた礁内水深補正アルゴリズムの検証, 日本リモートセンシング学会, 第27回学術講演会論文集, pp.323-324, 1999.
- 6) 玉置仁, 西嶋渉, 富永春江, 寺脇利信, 岩瀬晃盛, 岡田光正: 海水の透明度変化がアマモ場面積の消長に及ぼす影響—広島県沿岸域におけるケーススタディー, 水環境学会誌, 25 (3), pp.151-156, 2002.
- 7) 小熊広之, 山形与志樹: 湿原植生分類図作成に有効となる観測時期の選択, 写真測量とリモートセンシング, 36 (4), pp.5-16, 1997.
- 8) Huete, A., R.: A soil-adjusted vegetation index (SAVI), Remote Sensing of Environment, 25, 295-309, 1988.
- 9) 作野裕司, 田中力, ルイ ソチュー, 田中義和: 吉名干潟におけるアマモの分光測定実験, 日本リモートセンシング学会, 第41回学術講演会論文集, pp.161-162, 2006.
- 10) Lyzenga D. R.: Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, Applied Optics, 17(3), pp.379-383, 1978.
- 11) 環境省自然局生物多様性センター, 生物多様性情報システム, http://www.biodic.go.jp/kiso/gisddl/gisddl_f.html
- 12) 湯浅一郎, 高橋暁, 村上和男, 星加章: 芸予諸島海砂利採取周辺海域における藻場分布の変遷とその要因, 第2回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集, pp.77-82, 2003.

(2007. 9. 30受付)