

高解像度衛星画像, 音響機器を用いた藻場分布推定法に関する研究

中山 哲 嚴*・時 吉 学**・佐伯 信 哉***・黒萩 慎 吾****

藻場は我が国沿岸で減少している。藻場を保全することは沿岸環境保全にとって重要である。保全の指針や対策を検討するためには藻場の分布を把握することが必要である。本論は、これまで潜水による調査が主体であった藻場モニタリングの問題点を改善することを目的として、音響計測および高解像度衛星画像を用いた定量的な藻場分布推定の手法検討を行った。いずれの方法も有用であることを示した。アラメ・カジメ、ホンダワラ類、アマモの群落がある千葉県勝浦市興津地崎を調査フィールドとした。

1. はじめに

藻場は水産生物の再生産・棲息の場として極めて重要であるが、近年、藻場が減少している。藻場を保全・改善し、沿岸域の生物生産性や浄化能力を維持・増進することが重要な課題である。さらに地球温暖化による水温上昇が藻場を取り巻く環境を長期的には大きく変化させると考えられる。このような課題を検討するためには、十分に明らかにされているとはいえない藻場生態系と物理環境の関係を明らかにするだけでなく、藻場の面積、種類構成が実際にどのように変化しているのかを定期的にモニタリングすることが極めて重要である。海藻の分布調査は、主として潜水による調査が主体である。このため、膨大な時間と費用がかかるだけでなく、このような調査手法により、局所的な藻場の分布状況を把握することができるが、広域的な藻場分布を把握することは極めて困難である。近年、航空写真、音響機器(須藤ら, 1997)を利用した藻場分布推定が行われ始めたが、これらの技術は汎用化されておらず、広く利用されているとは言い難い。本研究は、主に多年性大型海藻であるアラメ・カジメ等の分布を定量的かつ短時間に把握する簡便な手法を開発することを目的として、高解像度の衛星画像、音響機器、水中ビデオカメラ等を用いた分布推定手法について検討したものである。

2. 調査方法

海藻群落が安定的に形成されている調査箇所として、千葉県勝浦市興津地先を調査対象とした。なお、このフィールドは、著者らが3年間、海藻分布について調査を実施してきた場所である(中山ら, 2001)。この海域では、岩礁域には、大型多年生海藻であるアラメ・カジメ、ホンダワラ類が分布し、底質が砂である静穏海域にはアマモが分布している。現地の調査項目は以下のようである。それぞれの調査実施時期は表-1に示す。

* 正会員 工修 (独法) 水産総合研究センター水産工学研究所
** 正会員 復建調査設計(株) 環境技術部 環境技術課
*** 正会員 (株) 荒谷建設コンサルタント 技術企画室
**** 水産庁 資源管理部 遠洋課

表-1 現地調査実施状況

藻場調査	・ 2002 年 9 月 26, 27 日 マンタ法による藻場境界把握 ・ 2002 年 11 月 27~30 日 (ホンダワラ, アラメ, カジメ, アマモ 毎に 11ヵ所選定し, 枠調査) ・ 2003 年 1 月 28~31 日 上記と同様の調査
水深測量	・ 2002 年 12 月 18, 19 日
水中ビデオカメラによる撮影	・ 2003 年 2 月 3, 4 日
画像取得	・ 2002 年 7 月 20 日, 12 月 15 日 ・ 2003 年 1 月 15 日, 3 月 5 日
* 光調査 2002 年 7 月 21, 22 日, 2003 年 2 月 28 日	
* 2002 年 9 月 20 日の CASI 2 データ	

(1) 潜水による藻場分布調査

まず、海藻種類毎に概略の分布把握のための調査を行った。シュノーケリングやスキューバによる潜水観察を行い、海藻種類別の境界を把握した。観察しているダイバーを船で追跡し、定期的に DGPS により位置を記録した。これにより、海藻種類毎の概略分布図を作成した。

(2) 詳細な潜水調査

前述の調査結果から、海藻の種類、被度、諸元(海藻重量、寸法、その構成割合等)を詳細に調査するべき点を抽出し、調査を行った。抽出の基準は①海藻種類別に優占度の高い箇所、②混生している箇所、③波浪環境が急変する人工構造物周辺(ここでは人工リーフ)、④大型海藻がほとんど生育していない岩礁とした。合計 11 点を抽出した。調査点においては、4 m×4 m 内で目視観察により、底質、海藻種類、被度を計測した。さらにこの枠内で代表的な点と考えられる点で 1 m×1 m (アマモの場合には 50 cm 枠) の刈り取りによる調査を実施した。1 点の調査領域が 4 m×4 m と従来の海藻分布調査よりかなり大きい。これは、IKONOS のマルチスペクトルデータの分解能が 4 m であることを考慮したものである。

(3) 音響機器による計測

海底及び水中反射強度を計量魚探 (Biosonic 社製, DT 4000, 発信周波数 200 KH, パルス発信間隔 0.2 秒, パルス幅 0.2 ms) により計測し、水深図、底質分布図(岩

盤、砂の区分)、海藻からの反射強度分布図を作成した。

(4) 水中ビデオ撮影

移動する漁船からつり下げた水中ビデオカメラ(クロダ・オプトニクス社製、T-WATER-7000 DX-H)により、海藻分布状況を撮影した。併せて、DGPSにより正確な探査経路を記録した。画像及びDGPSによる位置情報により、探査経路直下における海藻の種類、密度、被度を推定した。

(5) IKONOS 画像の取得

IKONOS 衛星により、同海域の夏、冬に画像を取得した。また、(株)中日本航空からCASI2で計測したデータをいただいた。

3. 音響機器による藻場分布の推定

(1) 海藻分布

先に述べた潜水調査によって得られた海藻種類別の分布を図-1に示す。ほとんどの岩礁域では、アラメ・カジメが分布している。アラメとカジメは5m程度の水深を境界にして、浅い方がアラメ、深い方がカジメの優占度が高い。アラメ・カジメ類は、葉面積等が季節的に若干変化するものの、個体の変動は比較的小さい。波浪が弱い浅場ではホンダワラ類が狭い範囲で優占している。ホンダワラは秋期から春期にかけて、大きく成長するが、成熟した後個体は小さくなる。従って、季節変動は大きい。底質が砂で、構造物等により遮蔽されている領域ではアマモがパッチ状に分布している。アマモも初夏までに大きく成長し、その後、小さくなるので、季節変化が大きい。このことから、特にホンダワラ類、アマモ等の季節による変化が、音響・光特性に与える影響を把握する必要がある。今回の調査は冬季を中心としたものになってしまったので、今後調査する予定である。

海藻の繁茂状況の例を写真-1(2003年1月)に示す。この写真から、海藻の形態がよくわかる。写真中の枠は一つが1m×1mである。アラメ・カジメは太い茎があり、茎の先に広い葉体がある。ホンダワラ(オオバモク)は茎が細く、葉は小さいが、葉の数は多い。さらに写真では詳細がわからないが、気泡を持っている。アマモは冬の時期には30cm程度の葉長となっているが、夏期には1m以上になる。また、岩盤には無節サンゴモ等の小型海藻が付着しており、岩盤自体が灰色であるだけでなく、無節サンゴモにより、全体に灰白色となっている。

枠調査の結果は詳述しないが、全体的な傾向をここで述べる。平成14年11月末、平成15年1月と期間が短く、それぞれの調査結果に大きな差はなかった。各調査点は図-1に示している。調査点中ST8ではホンダワラ類(ホオバモク)が優占していた。ここは転石帯であるとともに波浪が弱い地点である。また、人工リーフ裏側の

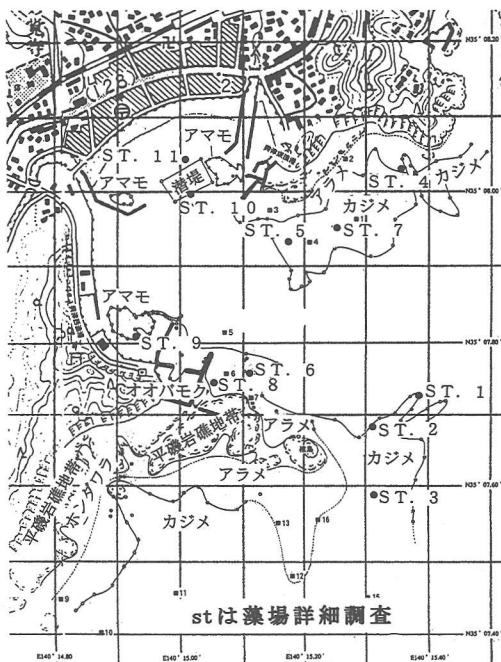


図-1 海藻種類別の分布図

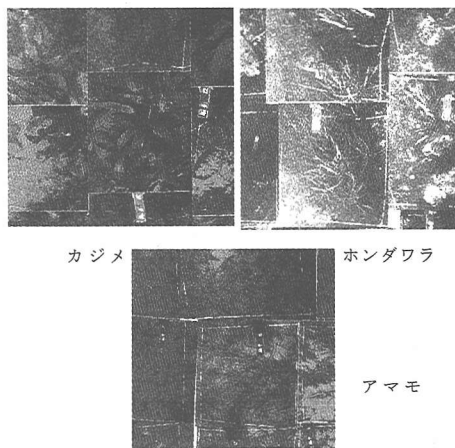


写真-1 各種海藻類

ST11もホンダワラ類が優占していた。人工リーフ背後であり、波浪が弱いところである。逆にST3は水深が4.2mと浅いが、アラメ・カジメの幼体がみられる以外には、フサカニノテ・無節サンゴモが優占していた。この地点には波浪が集中しており、大型の海藻の生育は困難と考えられる。それ以外の岩礁では、アラメ・カジメの被度が50%以上であった。

(2) 計量魚探による計測

前述した枠調査の結果および水中ビデオカメラによっ

て推定した海藻密度(本/㎡)と計量魚探による計測データの比較を試みた。中山ら(2001)は、簡易魚探により、海藻分布を推定できることを報告しているが、藻場で重要な情報である海藻密度については使用した魚探では困難であった。今回、水中の反射強度をある程度正確に解析できる測器を用い、海底上の水中反射強度の空間積分を行った。なお、魚探の位置はDGPSによって同時に記録されている。積分区間は2秒とした(平均的な船速で計算すると空間スケールは約6 m)。探查経路を図-2に示す。この図からわかるように海藻が繁茂していない砂面の領域では荒く、海藻が分布している岩盤の領域を細かく探查した。魚探の出力例を図-3に示す。図中の矢印に示す部分が海藻の反射である。図中右端に鉛直方向の反射強度の分布が示されている。反射強度の分布形状から海底面を推定し、底面上25 cmから、水面下0.8 mまでの反射強度を探查経路に沿って積分することにより、単位面積あたりの海藻による反射量(SV)を求め、これを平面補間した。この反射量分布と潜水調査、水中カメラによって推定したアラメ・カジメの成体密度(本/㎡)の関係を図-4に示す。この図から、かなりばらつきがあるが、反射量(db)と海藻密度は、ほぼ線形の関係にあると考えられる。式(1)が、最小自乗法により求めた関係式である。

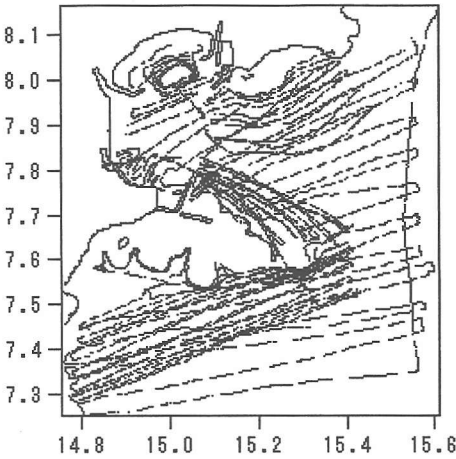
$$\text{Kelp} = 0.1796 \cdot \text{SV} + 10.180 \quad \cdots \cdots (1)$$

Kelp; アラメ・カジメの成体密度(本/㎡)

(1)式を用いて、反射量から海藻密度分布を推定したのが図-5である。今回の観測では、ホンダワラ類は気泡を有しているために海藻の反射量が強すぎて、海底を判別することができず、反射量を求めることができなかった。ホンダワラの場合は、周波数の低い音波の利用などにより、海底を正確に把握する必要がある。魚探の探查領域内の多くの点で実際の実測海藻密度と反射量の比較はできなかったが、潜水調査の観察結果から、アラメ・カジメの成体密度は最大で約5本/㎡程度であることがわかった。推定された密度も最大で5本/㎡であった。このことから、アラメ・カジメの分布およびその密度については、本手法により、比較的広域に計測できることがわかった。なお、魚探による計測は、この程度の領域で、1.5日で終了した。

4. 高解像度衛星画像による海藻分布推定

IKONOSによる撮影は、表-1にあるように全部で4回行った。しかしながら、夏期の撮影で風波による水面の擾乱により、ごく浅い領域以外は水面下の状況を把握できなかった。また、梅雨明け時期でもあり、濁りの影響が大きかったことも原因としてあげられる。平成14年12月17日、平成15年1月15日、3月15日とともによ



東経140度分
図-2 魚探探查経路

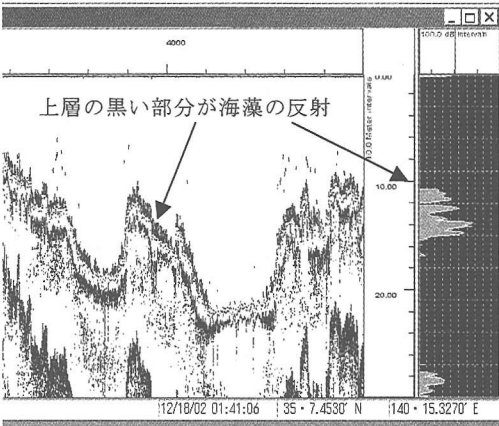
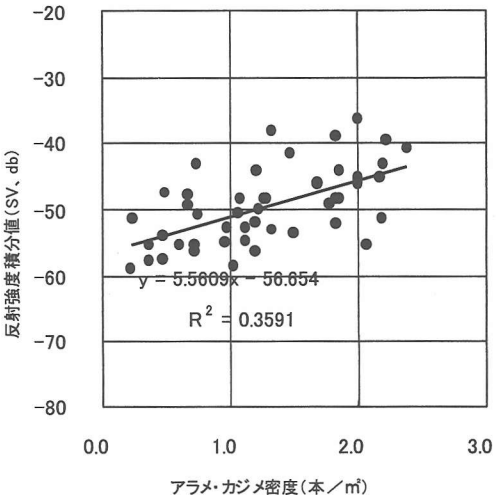
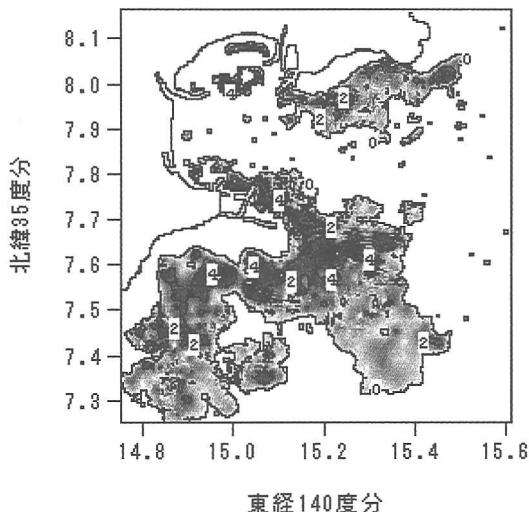


図-3 魚探出力例

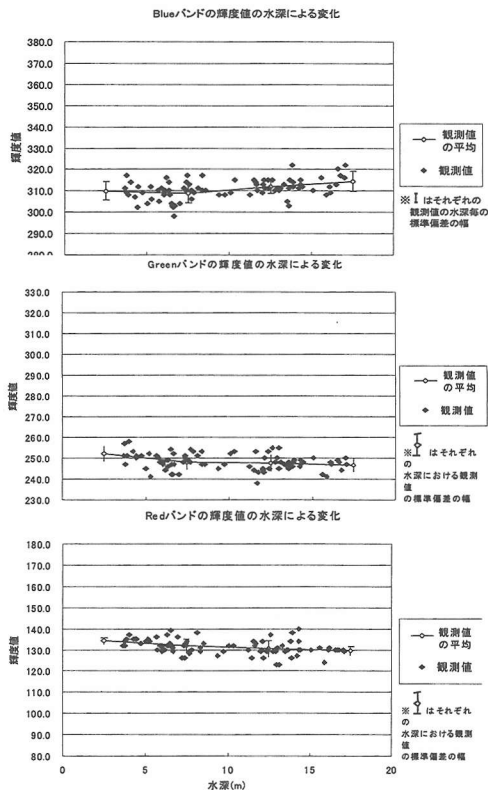


アラメ・カジメ密度(本/㎡)
図-4 海藻密度と水中反射量SVの関係

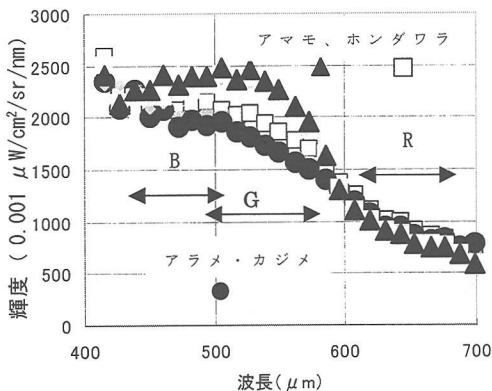


図一五 魚探によって推定された藻場

快晴であった。水中分光照度計の計測は、撮影時に行う予定であったが、天候次第で変わること、用船ができなかったなどで、同時の計測ができなかった。3月5日のマルチスペクトルデータ（解像度4m）、CASI 2 データ（解像度3m）を用いて解析を行った。まず、海藻分布調査結果から海藻分布がわかっているの、代表点を抽出し、海藻種類別の IKONOS 画像各バンドのデジタル値を比較してみた。図一六にその例を示す。この図から、海藻上での各バンド輝度の水深による変化は若干みられるものの、顕著な変化はみられない。図にはないがこれに対し砂では、デジタル値は水深が増加すると減衰している。これは、興津の砂は白く、反射率が高いが、水深が深くなると減衰するのに対して、藻場では海藻による散乱、吸収が十分に大きいと考えられる。CASI 2 のデータからも同様のことがいえる。図一七に海藻種類の海面でのスペクトルを示す。図には IKONOS のバンドを示している（青； $0.45\sim 0.52\mu\text{m}$ 、緑； $0.52\sim 0.60\mu\text{m}$ 、赤； $632\sim 698\mu\text{m}$ ）。図には示していないが、先に述べたように砂の場合には水深依存が大きい。藻場と岩盤の相違は明確である。藻場の方が全体的に暗い。特に青、緑のバンドでははっきりと現れている。海藻種類の違いは、青のバンド、緑のバンドで、アマモがアラメ・カジメおよびホンダワラ類より、かなり明るい。ホンダワラ類とアラメとの違いは小さいが、若干ホンダワラ類が全体的に明るく、緑のバンド付近に相違が認められる。以上の点およびできるだけ取得画像間の相違を排除することを考慮し、各バンド間演算を試みた。その結果、水深の深い地点で海藻が繁茂していない領域の各バンドのデジタル値で基準化した上で、各バンド基準値の和に対する青、緑の和の比が藻場判別に適していると考えられた。今回



図一六 アラメ・カジメ場での水深による輝度値の変化



図一七 CASI 2 での海藻上での海面の輝度

の場合では、この比が $0.635\sim 0.665$ の範囲にあれば藻場であると判断された。図一八にその結果を示す。図一五の計量魚探による推定結果と比較すると分布形状はよくあっていると考えられる。さらに今回のように透明度が良好な場合には水深 20 m 程度まで、藻場判定が可能であることがわかった。しかしながら、今回は分光照度計結果の反映や大気補正（たとえば灘岡ら、1993）などを行っていない。従って、この比も当然ながら大気の状態



図-8 IKONOS 画像から求めた藻場

並びに海水の濁質の影響等を受けると考えられる。今後、これらの解析を行うとともに理論的な検討を行い、汎用的な手法を検討する必要がある。

5. 結 語

以上、まとめると以下になる。

(1) 計量魚探によるアラメ・カジメの密度分布推定法を示した。ホンダワラ、アマモの分布推定は今回できなかった。その際には、両者ともに成長期では反射が大きくなり、海底判別を確実にするために周波数の異なる魚探による計測が有効であると考えられる。

(2) IKONOS 画像を用いて、藻場判定を試みた。その結果、計量魚探によって推定した藻場分布とほぼあっていた。しかし、汎用的な手法開発には、大気補正、水中での海藻による反射、散乱のモデル化等の検討が不可

欠である。

(3) IKONOS は空間分解能が高いが、バンド数が少ない。しかし、データは 11 ビットであり、ダイナミックレンジが大きいため、陸に比べて海はかなり暗くても輝度の違いがでる。このため、海底にある藻場推定には適していると考えられる。

謝辞：本研究は、農林水産省水産庁の事業である「衛星画像解析による藻場等の分布把握のための技術開発調査事業」で行ったものである。現地調査を快く承諾して頂くとともに調査に積極的に協力して頂いた勝浦漁業協同組合興津支所の皆様に感謝致します。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・國田知基・鈴木健太郎・石橋邦彦・泉正寿・松永弘 (2000): 衛星リモートセンシングによる水中消散係数の変動を考慮した沿岸域の水深の推定, 海岸工学論文集, 第 47 巻 pp. 1351-1355
- 島谷学・中瀬浩太・中山哲蔵・太田雅隆・月館真理雄・星野高士・内山雄介・灘岡和夫 (2001): 人工リーフ設置による外力場の変化とアマモ分布条件との関係について, 海岸工学論文集, 第 48 巻 pp. 1156-1160
- 須藤静夫・平 久悦・横山隆二・河口真一郎 (1997): 超音波測定装置を用いたアマモ, アラメ・カジメ群落の定量に関する基礎解析, 海洋生物環境研究所報告, No. 97101, 社団法人海洋生物環境研究所中央研究所, 9 p.
- 須藤静夫・平 久悦・横山隆二・河口真一郎 (1997): 藻場計測用超音波測定装置, 海洋生物環境研究所報告, No. 97301, 社団法人海洋生物環境研究所中央研究所, 11 p.
- 須藤静夫・平 久悦・横山隆二・河口真一郎 (1997): ホンダワラ類の音響反射特性, 海洋生物環境研究所報告, NO. 97302, 社団法人海洋生物環境研究所中央研究所, 6 p.
- 中山哲蔵・榎本一徳・灘岡和夫・内山雄介・中瀬浩太・島谷 学・星野高士・月館 真理雄 (2001): 興津湾における広域海藻分布と水理環境に関する現地調査, 第 48 巻, pp. 1161-1165
- 灘岡和夫・田村英寿 (1993): 沖縄赤土流出問題に関する汎用衛星モニタリングシステム構築の試み, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 1106-1110.
- 灘岡和夫・仁瓶泰雄・横山智子・大見謝達夫・下池和之 (1997): 海底分光照度特性解析に基づくサンゴ礁海域衛星モニタリングの一般化の試み, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1291-1295