

# 博士論文

## ナローマルチビームソナーを用いた 藻場の定量的三次元マッピング法の開発

東京大学大学院 農学生命科学研究科 水圏生物学専攻

濱名 正泰

## 目次

第1章 緒言 .....	1
第1.1節 藻場 .....	1
第1.2節 藻場のマッピング・モニタリング手法.....	2
第1.3節 藻場調査に利用される音響機器.....	3
第1.4節 音響リモートセンシングの問題点.....	4
第1.5節 研究の目的 .....	6
第2章 測深データによる藻場の判別と3次元構造のマッピング .....	8
第2.1節 緒言 .....	8
第2.2節 ガラモ場判別とその3次元構造の可視化.....	9
2.2.1. 測量用機器構成、水路測量用ソフトウェアおよびそれらの艀装.....	9
2.2.2. 調査藻場.....	10
2.2.3. データ解析 .....	10
2.2.4. 結果.....	11
2.2.5. 考察.....	12
第2.3節 アマモ場のリアルタイムマッピング手法の開発.....	13
2.3.1. はじめに.....	13
2.3.2. 材料と方法.....	14
2.3.3. データ解析 .....	15
2.3.4. 結果.....	16
2.3.5. 考察.....	18

第3章 藻場の種類判別.....	36
第3.1節 緒言 .....	36
第3.2節 材料および方法 .....	37
3.2.1. 調査海域.....	37
3.2.2. 調査方法.....	37
3.2.3. データ解析.....	38
第3.3節 結果 .....	41
3.3.1. 海底地形.....	41
3.3.2. 海底の後方散乱強度.....	41
3.3.3. グラントゥルースデータ .....	42
3.3.4. 海底地形図の95%CL・海底の後方散乱強度とグラントゥルースデータ .....	42
3.3.5. ハビタットマッピング .....	43
第3.4節 考察 .....	44
第4章 現存量推定法開発の試み.....	58
第4.1節 緒言 .....	58
第4.2節 材料および方法 .....	59
4.2.1. NMBSによる後方散乱強度計測.....	59
4.2.2. Sonic2024の特性評価試験.....	60
4.2.3. マコンブとアマモの反射強度測定実験.....	62
4.2.4. WCIデータの解析方法.....	63
第4.3節 結果 .....	65
4.3.1. 特性評価試験.....	65
4.3.2. マコンブとアマモの後方散乱強度測定実験.....	65
第4.4節 考察 .....	66

第5章 総合考察 .....	79
謝辞 .....	82
引用文献 .....	84

## 第1章 緒言

### 第1.1節 藻場

藻場は、沿岸の浅海底に分布する大型海藻・海草の群落の総称である。群落を優占して構成する海藻や海草の種類によって、コンブ類がつくるコンブ場、アラメ、クロメ、カジメ類がつくるアラメ・カジメ場、ホンダワラ類がつくるガラモ場、アマモ類などの海草類がつくるアマモ場などに区分されている(環境庁 1994)。

藻場は、大型海藻・海草が行う光合成による海水中からの二酸化炭素の吸収、海水中への酸素の放出、海水中からの窒素やリンといった栄養塩の吸収による水質浄化機能、海洋生物の産卵場、生育場、隠れ場、索餌場など生息場としての役割、波浪の抑制や堆積物を安定化させる環境を形成する働きを持っている(e.g. Smith 1981, 東 1981, Komatsu *et al.* 1982, Jackson 1983, 小松ら 1985, DeMartini and Roberts 1990, 小松 1992)。サヨリ、トビウオ類、アオリイカなど水産資源の産卵場、メバルなどの稚魚の生育場など再生産に必須の生息場として、アワビ類、サザエ、ウニ類などの生息場として、さらにコンブ類のように藻体自体が水産物であるコンブ場など、藻場は漁業上不可欠な場である(布施 1981, 菊池・浮 1981, 中川 1953)。このように、藻場は沿岸生態系においても、水産資源上においても重要な役割を担っている。

近年、世界的に藻場が衰退していることが報告され、その多くは沿岸開発などの人間活動が原因と言われている(Short & Wyllie-Echeverria 1996)。日本でも、高度経済成長期を通じて藻場は著しく減少し、1994年の環境庁の調査では、1978年から1991年の13年間で日本沿岸の藻場の総面積は207,615haから201,212haと、6,403ha減少したことが明らかとなっている(環境庁 1994)。瀬戸内海のアマモ場では1965年から1971年の6年間で11,175haから5,574haとほぼ半減したことが報告されている(南西海区水産研究所

1974)。

藻場の重要性と衰退が認識され、自治体、市民団体などによって、1980年代から藻場の保護や造成の取り組みが世界でも(van Katwijk *et al.* 2015)、日本全国の各地でも行われている(環境省 2004, 水産庁 2007)。しかし、藻場の保全や再生には、藻場の現状と、その変化を把握し、減少している場合にはその原因を取り除く必要がある。そのためには、藻場の種類や分布の状況を、定期的に、正確に把握(マッピング)することが必要である(Komatsu *et al.* 2003a)。

## 第 1.2 節 藻場のマッピング・モニタリング手法

藻場のマッピング・モニタリング手法は、大きく 2 つのグループに分けられる。1 つは船上からの目視や潜水による直接的な手法であり、もう 1 つはリモートセンシング技術による間接的な手法である(Komatsu *et al.* 2003a)。さらに間接的な手法は、光学と音響の 2 つに分けられる(Komatsu *et al.* 2003a)。

直接的な手法、特に潜水による観測は、藻場調査ではよく用いられる方法である(Zieman *et al.* 1989)。しかし、直接的な手法による分布推定にはいくつかの問題がある。船上や海岸からの目視は、透明度の悪い海域や水深の深い海域では有効ではなく、潜水調査は、水中作業であるため、多大な労力と時間が必要であり、得られるデータも局所的なものであるため、広範囲の藻場を把握することは極めて困難である(小松ら 2005)。

一方、リモートセンシング技術は広範囲の藻場の分布推定に非常に有効なツールである。リモートセンシング技術による藻場のマッピング及びモニタリングには、衛星画像や航空写真、小型のハイパースペクトルセンサーを用いた光学的手法による報告が多い(Silva *et al.* 2008, Phinn *et al.* 2008, Hashimi *et al.* 2014, Sagawa *et al.* 2010)。しかし、光学的手法は透明度の高い浅海域に高密度で分布する大規模な藻場や潮間帯の藻場の検出に

は有効であるが、濁りが大きい海域や水深の深い海底に分布する藻場では、光が減衰するため、密度の低い藻場では、藻場からの反射スペクトルが周囲のスペクトルで薄まるミクセル効果のため、検出が難しい。さらに、衛星画像による藻場のマッピングでは、空間分解能が粗い場合は、ミクセル効果のため、密度の薄い藻場や小さいパッチ状の藻場の検出は非常に困難である(Komatsu *et al.* 2003a)。また、光学的手法で得られる藻場の分布は平面的分布であり、潮下帯にある藻場の複雑な三次元分布を把握することはできない。

音響リモートセンシングは、超音波を送信して水中にある物体や海底からの反射信号を受信し、それらの位置や深度を計測できる(Urick 1979)。音響リモートセンシングによる藻場調査では、光学リモートセンシングと比較して一度の調査でカバーできる範囲は狭いが、超音波は濁りや水深の影響を受けにくいいため、濁りの高い海域や水深の深い海底に分布する藻場を調査できる利点がある(Komatsu *et al.* 2003a)。特に、ビーム幅が1度以下と非常に細い超音波ビームを一度に多数送信して、詳細な海底地形データを連続して収集できるナローマルチビームソナー(NMBS: Narrow Multi Beam Sonar)は、浅海域のハビタットマッピングのツールとして最も期待される音響機器の1つといえる(Purnum 2007)。

### 第 1.3 節 藻場調査に利用される音響機器

藻場マッピングツールとしてこれまでに用いられてきた音響機器としては、シングルビームエコーサウンダー(SBES: Single Beam EchoSounder)、サイドスキャンソナー(SSS: Side Scan Sonar)及びナローマルチビームソナー(NMBS)がある(図 1-1)。

SBES(e.g. 橋本・西村 1953, Hatakeyama and Maniwa 1978, Komatsu and Tatsukawa 1998, Sabol *et al.* 2002)は、音響機器の中でも取り扱いが簡単であり、多くの漁船やプレジャー

ボートに必ず装備されているとあってよいほど広く普及している。しかし、SBES で得られるデータはトランスデューサー直下の鉛直方向の情報に限られており、藻場分布の把握には、クリギングなどの空間統計学的手法による空間補間を行う必要がある(南ら 2012)。

SSS(e.g. Newton and Stefanon 1975, Pasqualini *et al.* 1998)は、SSS のトランスデューサーを内蔵した曳航体を曳航するか船にトランスデューサーを固定して用いる。扇形の超音波ビームを船の進行方向に対し、曳航体または船の両舷斜め下に送信し、海底の凹凸によって跳ね返ってきた超音波の強さを計測することで海底面の超音波反射強度によるイメージを取得する。船の進行方向に直角なレンジ方向に広い刈り幅で、海底面上の詳細な音響イメージが得られるため、藻場の水平分布を効率的に把握できるが、藻場の鉛直的な分布情報を十分得られるわけではない。

NMBS(Komatsu *et al.* 2003b, Komatsu *et al.* 2004)では、NMBS を搭載した船の進行方向に直角なレンジ方向で 100~150 度と広い扇状の超音波ビームを海底面に向かって発信し、ビーム幅数度の細かい受波ビームを 100~240 本形成し、海底面からの反射波を受信するため(Mayer 2006)、藻場の水平方向だけでなく鉛直方向の分布情報も得られる。Komatsu *et al.* (2003b)は NMBS を使用し、大槌沿岸の藻場の 3 次元マップを世界で始めて作成し、藻場のマッピングにおける NMBS の有効性を示した。

#### 第 1.4 節 音響リモートセンシングの問題点

NMBS は広範囲に及ぶ鉛直及び水平方向の藻場情報の取得に最も有効な音響機器である(Komatsu *et al.* 2003a)が、克服すべき課題が残っている。1 つ目は、藻場をマッピングする場合の後処理に必要な解析時間である。NMBS の 100~240 本の各ビームから収録される膨大な量のデータから大型海藻・海草の情報を抽出するため、後処理に時間が



かかっていた。2つ目は、NMBSによる藻場の種類判別である。日本では主にコンブ場、アラメ・カジメ場、ガラモ場、アマモ場に区分される藻場が分布している(環境庁 1994)。しかし、NMBSにより取得したデータから、藻場の種類を判別する手法は確立されておらず、種類判別は水中カメラや潜水による直接観測に頼ってきた。3つ目は、NMBSによる藻場の生物量推定である。これまで、藻場の現存量推定は正方形の枠を設置し、その内側の藻体を採取するコドラート法により行われてきた(木村 1976)。藻場の分布全体の現存量を正確に推定するためには、対象の総面積の1.2%を採集する必要があると言われている(鳥居ら 1972)。潜水作業による採集では、藻場全体の1.2%を採集することは不可能に近く、また、藻場の重要性の観点から、採集調査は最小限にとどめることが重要であると考えられる。

Komatsu *et al.* (2003b)は、岩手県大槌湾のタチアマモ藻場において、NMBSによる調査を行い、タチアマモのキャノピーの信号をノイズとして除去し、アマモが生えていない砂地だけの海底とタチアマモを除去していない海底との差からタチアマモだけの分布と体積を求めた。さらに、タチアマモの坪刈データから、平均的な花株の高さと乾燥重量を求め、単位体積当たりの花株の乾燥重量を得た。これにNMBSにより得られたタチアマモ場の体積を乗じることで、調査海域のタチアマモ花株のバイオマスを計算した。また、タチアマモの栄養株は海底に比較的均一に生育している。そこで、NMBSで得られた海底から1cmの高さのタチアマモ場の情報をもとに、分布面積を求め、タチアマモ栄養株の単位面積当たりの現存量を乗じて、調査海域の栄養株の生物量を得た。

また、Komastu *et al.* (2007)は、ホンダワラ類が春の繁茂期を過ぎると基部直上あるいは基部ごと波や流れで引き剥がされ、流れ藻や打ち上げ藻になり、夏季には草丈の小さな藻だけになる性質を利用して、春季と夏季にホンダワラ類の繁茂するガラモ場でNMBSによる調査を行い、春季と夏季のホンダワラ類のキャノピーの差からホンダワラ類の体積を求めた。春季に坪刈調査を行い、平均の草丈を計算し、乾燥重量から単位体

積当たりのホンダワラ類の密度を得た。この密度と体積を乗じて、調査海域におけるガラモ場の生物量を得た。

これらの結果は、すべて、NMBS で収録される測深点のデータを使ったものであった。近年、測深点以外の散乱強度データが取得できるように NMBS は進化してきた。しかし、このような情報を用いて音響リモートセンシングにより現存量推定を行う場合、調査対象の音響散乱に関する情報が必要であるが、大型海藻・海草の音響散乱に関する知見は少なく、未だ実現されていない。

### 第 1.5 節 研究の目的

以上の事を踏まえ、本研究では、上記の藻場マッピングに関する音響リモートセンシングの課題に取り組み、NMBS を活用した藻場の定量的な 3 次元マッピング法の開発のため、データ処理の時間の少なくする効率的な藻場マッピング手法及び藻場の種類判別手法の開発を試みる。さらに、NMBS で得られる音響データを活用した藻場の生物量推定法について検討することにした。

本論文は、次の 5 章で構成される。本章である第 1 章では、本研究の背景及び目的について記述した。第 2 章では、NMBS の最も基本的な収録データである海底地形の測深データに着目し、ホンダワラ類およびタチアマモの藻場の簡易なマッピング手法の開発を行った。第 3 章では、2 種以上の藻場がモザイク状に分布する海域において NMBS を用いた音響調査を実施し、藻場の種類判別手法の開発を試みた。第 4 章では、藻場の現存量推定について検討するため、大型海藻・海草の音響散乱特性に関する実験を実施し、その結果から NMBS により得られる各種反射強度データなどを用いる現存量推定法について検討した。最後に、第 5 章において、本研究で得られた成果を総括し、NMBS を用いた藻場の定量的なマッピング手法の今後の展開について議論する。

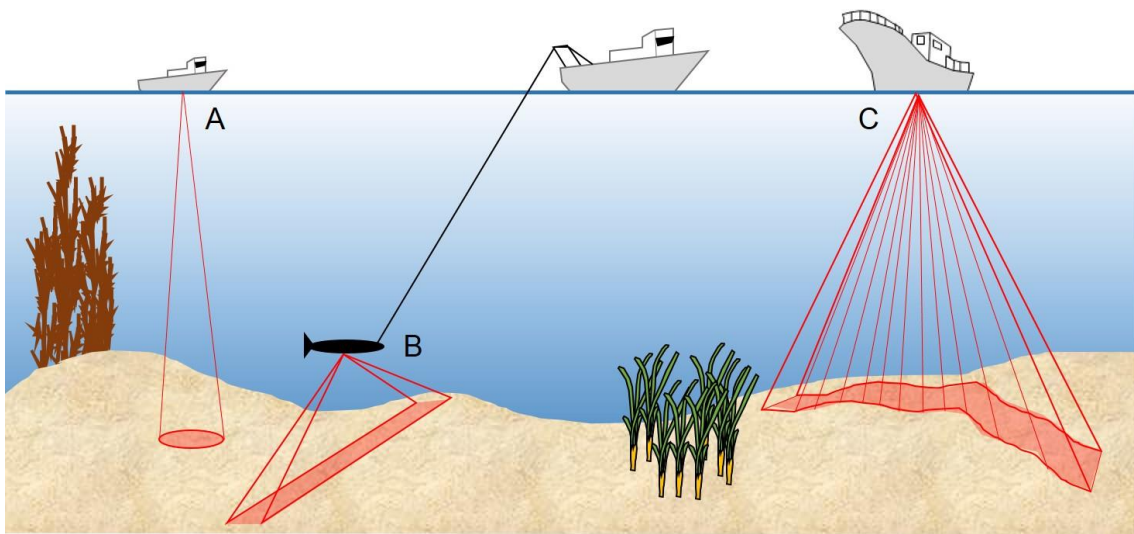


図 1-1. 藻場調査で用いられる音響機器。

A: シングルビームエコーサウンダー(SBES)

B: サイドスキャンソナー(SSS)

C: マルチビームソナー(MBS)

## 第2章 測深データによる藻場の判別と3次元構造のマッピング

### 第2.1節 緒言

Komatsu *et al.* (2003b)は、大槌湾のタチアマモ (*Zostera caulescens* Miki) の藻場を対象に、NMBS で測深点として収録されるタチアマモのエコーを利用して藻場のマッピングを行った。Di Maida *et al.* (2011)は、地中海の *Posidonia oceanica* を対象に、NMBS で得られる藻場と砂場での海底地形データの特徴の違いを利用して、決定木(デシジョンツリー)による分類を行った。これらの研究は NMBS で収録される測深データを活用した藻場のマッピングに関する研究である。しかし、これらの方法による藻場マッピングはデータを後処理したものであり、結果を得るまでに時間がかかるという問題がある。

近年の音響機器の発展は目覚ましく、NMBS のビーム幅は従来のものよりも細くなり、その空間分解能は向上傾向にあることから、水中構造物の高精度な検出、視覚化が期待されている(Mayer 2006)。NMBS のデータを取得する水路測量用のソフトウェアも、コンピュータの処理能力の向上発展とともに、リアルタイムでの NMBS の測深データの処理が可能になってきた(Lurton 2002)。

したがって、NMBS による測深データと水路測量用ソフトを用いたリアルタイムでの藻場の判別、さらに従来の方法では難しかった藻場の複雑な3次元構造の視覚化を可能にするものと考えられる。本章では、NMBS で収録される測深データを活用したガラモ場判別とその3次元構造の視覚化、さらに効率的なアマモ場のリアルタイムマッピング手法の開発を試みた。

## 第 2.2 節 ガラモ場判別とその 3 次元構造の可視化

ホンダワラ科の海藻は、付着器、茎、主枝、葉、気胞などに分化した非常に複雑な形態をしている(吉田 1998)。ホンダワラ類は、海底から気胞の浮力により直立した藻体が林立する藻場を構成している。このような特徴は、高空間分解能な超音波ビームで捉えることで判別し、マッピング、可視化できる可能性がある。そこで、ガラモ場の判別とその三次元構造の可視化に取り組むことにした。

### 2.2.1. 測量用機器構成、水路測量用ソフトウェアおよびそれらの艀装

本研究では、浅海域用 NMBS (Sonic2024, R2SONIC Inc.)を使用した。Sonic2024 の最大の特徴は使用する超音波の周波数を 200-400kHz まで 10kHz 刻みで制御用ソフトにより選択できることである(R2SONIC Inc. 2014)。また、進行方向のビーム幅 1°、レンジ方向のビーム幅 0.5°(400kHz)と非常に細い超音波ビームを 256 本形成し、詳細な海底地形図を作成することができる。Sonic2024 システムの仕様を表 2-1 に示す。フィールド調査は、図 2-1 に示すように、小型漁船(0.5 t)に Sonic2024 を艀装して実施した。

Sonic2024 は、256 本の超音波ビームを進行方向に対して垂直方向の面に扇型に送信するため、ビームの方向、船体に固定したトランスデューサーの動揺の影響の補正が必要となる。また、超音波ビームの位置を正確に知るためには、トランスデューサーの位置(緯度経度)を正確に知る必要がある。そこで、Sonic2024 と慣性航法システムの“POS/MV”(Applanix Corp.)を小型漁船に艀装した(図 2-1)。POS/MV は、GPS と慣性センサーの組み合わせにより、高精度な測位、方位及び動揺(ロール・ピッチ・ヨー)の計測を行うシステムである。POS/MV の測位精度はディファレンシャル GPS モードで 0.5~2m である(Applanix Corp. 2015)。

Sonic2024 の測深データと POS/MV の測位、方位及び動揺のデータは測量用ソフトウェアの Hypack 2013 (Hypack Inc.)により収録した。

### 2.2.2. 調査藻場

北海道では、ガラモ場は水産重要種のハタハタ(*Arctoscopus japonicus*)の産卵場としての機能を持つことから、産卵場整備のためのガラモ場造成事業が実施されている(名畑, 酒井 1998)。北海道神恵内村地先(図 2-2)には、多年性の大型海藻である褐藻綱ヒバマタ目ホンダワラ科に属するウガノモク(*Stephanocystis hakodatensis* (Yendo) Draisma, Ballesteros, F. Rousseau & T. Thibaut) の形成するガラモ場が広がっている。。

調査は 2013 年 6 月 11 日に実施した。調査時の Sonic2024 の設定値を表 2-2 に示す。図 2-3 に調査時の航跡を示す。また、図 2-3 に示す 7 点において、潜水調査による水中写真の撮影を行った。潜水調査地点の位置は、ダイバーのための目印のアンカーをつけたブイを投入した時に POS/MV で計測した。

### 2.2.3. データ解析

水路測量用ソフトウェアで NMBS により取得される測深データを収録した。これらのデータをもとに、海底からの 2 次反射による測深点データを削除し(図 2-4)、 $0.5 \times 0.5\text{m}$  のグリッドの海底地形図を作成した。また、ウガノモクが繁茂していた点での潜水調査に合わせて、NMBS によるデータを取得し、比較を行った。潜水により得られた水中カメラ映像と NMBS で得られた測深点データの反射エコーとの比較から、ウガノモクを示す測深点(以下、ウガノモクエコー)を識別し、抽出した。水路測量用ソフトウェアで、ウガノモクエコーをノイズとして除き、NMBS の測深データをもとに三次元海底地形図

を作成した。作成した三次元海底地形図上に、抽出したウガノモクエコーをプロットした。この手順により作成したガラモ場の3次元マップの精度評価は、潜水調査により撮影されたウガノモクの繁茂状況と比較することにより行った。

#### 2.2.4. 結果

水中カメラによりガラモ場が確認された Stn. 6 における NMBS により取得された測深点データは、潜水により得られた水中写真に写るウガノモクの個体を鉛直に海底から2-3mの高さで立ち上がった連続した測深点として表現された(図 2-5)。0.5×0.5 m のグリッドサイズの NMBS による測深値の平均値で作成した海底地形図では、ウガノモクが分布する海域では、複数の細かいピークが存在するギザギザした特徴を示し、ウガノモクの繁茂していない海域では、藻場で見られた複数のピークは見られなかった(図 2-6)。

ウガノモクのエコーは海底から立ち上がる形で鉛直方向に並んだ測深点として NMBS により収録された(図 2-5)が、NMBS により収録される測深点には、ウガノモクのエコー以外にもガラモ場周辺に分布する魚群や泡切れなどから反射された超音波ビームを測深点として記録している。しかし、このようなウガノモク以外のエコーによる測深点は、海底から連続して立ち上がった形ではなく、海底から切り離された点となっていた(図 2-7)。したがって、海底から連続して立ち上がった測深点をウガノモクのエコーとして、海底から切り離された測深点をそれ以外のエコーとして、容易に分離することができた。この特徴を利用して神恵内地先のガラモ場調査で NMBS により収録された全 37,714,863 個の測深データから、ウガノモクのエコーによる測深データを手動で抽出した。ウガノモクのエコーとして抽出された測深点は 656,269 個であった。また、海底から立ち上がったウガノモクエコーの一塊をウガノモク 1 本として計数した神恵

内地先におけるウガノモクの総本数は 2,491 本であった。ウガノモクが閉めた面積は 2,023m<sup>2</sup> であり、ウガノモクの平均密度は 1.2 本/m<sup>2</sup>、最高密度は 5 本/m<sup>2</sup>、最低密度は 1 本/m<sup>2</sup> であった。

これらのウガノモクを調査藻場海域の海底地形図上にマッピングしたところ、ウガノモクは調査藻場海域南東部の 3m 以深に多く繁茂していた(図 2-8)。以降、この海底地形図上にウガノモクを描いた地図をガラモ場の 3 次元マップとよぶことにする。ガラモ場の内部においてウガノモクの繁茂していないギャップが存在していた(図 2-8)。

作成したガラモ場の 3 次元マップの精度について検討するため、潜水調査により撮影された水中写真と、潜水調査地点周辺のガラモ場 3 次元マップの定性的な比較を行った。その結果、潜水調査により撮影されたガラモ場の繁茂状況は、NMBS により得られたガラモ場の 3 次元マッピング結果とよく一致した(図 2-9)。

#### 2.2.5. 考察

北海道古宇郡神恵内村地先のガラモ場では、海底から立ち上がった連続した測深点をウガノモクのエコーとして抽出することで、ウガノモクの藻体を 1 本 1 本分離して抽出することができた。ここで、ウガノモクのエコーとそれ以外のエコーの分離は、図 2-7 に示すように、海底から立ち上がった測深点をウガノモクのエコーとして、海底から切り離された測深点をそれ以外のエコーとして、手動により行った。今後、データ処理の効率化を目指すため、ウガノモクのエコーの自動抽出アルゴリズムの構築が重要となると考えられる。

抽出したウガノモクのエコーを海底地形図上にプロットすることにより作成したガラモ場の 3 次元マップと潜水調査で撮影された水中写真は、非常によく一致し、ガラモ場の 3 次元マップがウガノモクの繁茂状況をよく再現していることが確認できた(図



2-9)。これまで、藻場のマッピングについては、藻場の面積や高さ情報(キャノピー)に注目した研究が多く(e.g. 南ら 2012)、藻場が作り出す 3 次元的な構造を可視化する研究は Komastu *et al.* (2003b)を除いて極めて少なかった。これは、従来の NMBS ではビーム幅が 1°以上と広く、十分な解像度ではなかったことが原因と考えられる。本研究で使った NMBS は 400kHz で 1×0.5°とビーム幅が狭く、パルス幅も 35μsec で距離分解能を 2.6cm と非常に短く設定できるため、ウガノモクの藻体を 1 本毎に分離することができた。

ウガノモクの藻体を 1 本毎に分離することができたため、調査海域におけるウガノモクの密度(本/m<sup>2</sup>)についても推定することができた。推定されたウガノモクの平均密度は 1.2 本/m<sup>2</sup>であった。本研究では、ウガノモクの乾燥重量などの計測を行っていないため、現存量(kg/m<sup>2</sup>)を推定することはできなかった。しかし、コドラートによる坪狩りを NMBS の調査と同時に実施し、調査海域のウガノモクの乾燥重量を計測し、NMBS の密度推定の結果を組み合わせることで現存量推定も可能となると考えられる。

## 第 2.3 節 アマモ場のリアルタイムマッピング手法の開発

### 2.3.1. はじめに

タチアマモ(*Zostera caulescense* Miki)は、草丈が 4m から 7m にも達し、世界最大の海草と言われている(相生ら 1996)。本種は、朝鮮半島及び本州太平洋岸の三浦半島あたりから陸奥湾まで分布しており(Miki 1933, den Harog 1970, 大森 1993)、環境省のレッドデータブックに絶滅危惧種Ⅱ類(絶滅の危険が増大している種)に指定されている(環境庁 2000)。本種を含む海草種により形成されるアマモ場は、沿岸浅海域の低潮線から水深数メートルまでの静穏な内湾砂泥域にしか生育できないため、埋立、開拓の影響を直接

受けやすいと言われており(環境庁 1983)、環境省(2004)の「藻場の復元に関する配慮事項」の検討対象とされている。

このような背景から、アマモ場のマッピングに関しては、フィールド調査終了後直ぐ、またはリアルタイムでのマッピング手法の開発が実現されれば、その保全・保護の活動において非常に有用な技術となる。そこで、NMBS を用いたアマモ場のリアルタイム判別手法の開発を行うことにした。

### 2.3.2. 材料と方法

調査は 2014 年 7 月 17 日に宮城県本吉郡志津川町戸倉の波伝谷地先のタチアマモ場において実施した(図 2-10)。調査海域では、周囲から切り離された約 350×250 m の範囲で砂地上にタチアマモが生育しており、調査藻場の東北角および北側には岩礁が分布していた。

定線は、波伝谷地先の藻場全体をくまなく調査できるように、定線間のデータがおおよそ 70%程度重なる 15m 間隔で平行に L1~16 までの 16 本を東西方向に設置した(図 2-11)。Sonic2024 と POS/MV からなる NMBS を小型漁船に艀装し、データ収録には測量用ソフトウェアの QINSy(Quality Integrated Navigation System, QPS Co.)を用いた。NMBS について、表 2-3 に示した設定パラメータでデータを取得した。

定線 L6 上に設置した Stn. 1 から Stn. 10 までの 10 定点で、潜水による写真撮影および船上から吊り下げた水中テレビカメラ撮影により海底のアマモ繁茂状況の映像をグランドトゥルスデータとして取得した(図 2-11)。また、図 2-11 の赤線で示す航跡上で、水中カメラを曳航して海底の底質およびアマモ分布のデータを取得した。定点と曳航式水中カメラによる航跡上での位置情報は、POS/MV の GPS により得た。潜水調査の定点の位置は、アンカー付きブイを投下した場所を POS/MV の GPS により測位した。

### 2.3.3 データ解析

定点におけるタチアマモの密度を、各点での水中カメラ画像及び潜水により得た海底の水中写真(海底画像データ)をもとに評価した。撮影された画像が、真上からではなく斜めからであったため、定量的な評価ではなく、相対的な評価により行き、高密度タチアマモ、低密度タチアマモ、タチアマモなしの3つのカテゴリに分類した。画像からの相対的な密度の評価では、Short *et al.* (2002)の藻場の被度評価のためのフォトガイドの写真を参考データとして利用した。

NMBS の測深データには海底の2次反射による測深点が含まれているので、まず、これらの除去を行い(図 2-4)、0.5×0.5m のグリッドサイズで海底地形図を作成し、各グリッドの測深幅と 95%信頼区間(以下、95%CL: 95% Confidence Level)を計算した。その後、測深幅と 95%CL をグリッド中心の緯度経度の値とともに、ArcGIS(ESRI Corp)に取り込んだ。

ここで、グリッドの測深幅はグリッド内の測深点の最浅値と最深値の差と定義した。95%CL は NMBS で作成される海底地形図のデータの品質評価の指標として利用される(Almar 2013a and b)。国際水路機関(IHO: International Hydrographic Organization)は、信頼区間(Confidence Level)を、真値が計測値からある特定の不確かさの範囲内にある確率と定義している。データ分布が正規分布と仮定できる場合、1次元(e.g. 水深)における95%CL は標準偏差の1.96倍と定義される(IHO 2008)。

定点での海底画像に基づいた相対的なタチアマモの3段階の密度のカテゴリと NMBS で作成した海底地形図の各グリッドとの関係を調べるため、ArcGIS のバッファ一解析により、定点から 1m 半径内に含まれる測深幅と 95%CL を抽出し、水中映像から得られたタチアマモの密度のカテゴリと比較した。上記の解析結果をもとに、各グリッドにおける測深幅と 95%CL により、高密度タチアマモ、低密度タチアマモ、タチ

アマモなしの3つのカテゴリーに分類した。

グリッドにおける測深幅と95%CLによる分類精度の評価は誤差行列により評価した。誤差行列は行に分類されたクラスのデータ数、列にグランドトゥルースで得られる参照データの各クラスのデータ数を表にまとめたものである(Congalton 1991)。対角線上の成分は分類結果と参照データの分類クラスが一致するデータ数で、正しく分類されたデータ数である。ユーザー精度(user accuracy)は各分類クラスについて正しく分類されたデータの割合、プロデューサー精度(producer accuracy)は各分類クラスについて参照データが分類結果と一致した割合、全体の精度は(overall accuracy)はすべての分類クラスについて正しく分類されたデータの割合である。

ここで、曳航式水中ビデオカメラにより得られた映像から、ランダムに30地点の画像を抜き出し、定点の海底画像と同様に、3つのカテゴリーに分類した結果を誤差行列の参照データとした。分類した30地点の結果と、作成したグリッドにおける測深幅と95%CLによる分類結果を比較するために、30地点の位置から1m半径内にあるグリッドのカテゴリーをArcGISのバッファ解析により抽出し、カテゴリーごとにグリッド数を求めた。1m半径内で最もグリッド数の多かったカテゴリーを、その地点での分類結果の代表として、誤差行列により分類精度を評価した。

#### 2.3.4. 結果

##### 2.3.4.1. 定点におけるタチアマモ密度

水中カメラ及び潜水調査による水中写真では、Stn. 1-8において、タチアマモが比較的高い密度で確認された。Stn. 9, 10では、タチアマモは非常に少なかった。そこで、Stns. 2-5を高密度タチアマモ、Stns. 1, 6, 8を低密度タチアマモ、Stns. 7, 9, 10をタチ

アマモなしに分類した(図 2-12, 表 2-4)。

#### 2.3.4.2 各カテゴリーにおける 95% CL と測深幅

ArcGIS のバッファ解析により抽出された 95% CL と測深幅を用いて、各定点観測点毎に平均値を計算した。その結果、95% CL は、高密度タチアマモに分類された Stns. 2～5 では、1.23～1.81、低密度タチアマモに分類された Stns. 1、6、8 では、0.45～0.79、タチアマモなしに分類された Stns. 7、9、10 では 0.03～0.30 であった。同様に、測深幅を用いると、Stns. 2～5 の高密度タチアマモ、Stns. 1、6、8 の低密度タチアマモ、Stns. 7、9、10 のタチアマモなしのカテゴリーは、それぞれ、1.61～2.61、0.73～1.34、0.05～0.40 であった(図 2-13)。相対的な密度を判定した 3つのカテゴリーと 95%CL、測深幅との間に正の相関が示された(図 2-13, 表 2-4)。そこで、各カテゴリーにおける 95% CL 及び測深幅の平均値間の中央値をカテゴリー間の閾値とした(図 2-13)。

#### 2.3.4.3. タチアマモ場のマッピング

得られた閾値を用いて、調査藻場海域におけるタチアマモ場を 3つのカテゴリーでマッピングしたところ(図 2-14)、95% CL によって判別されたタチアマモ場の面積は 16828.25m<sup>2</sup>、測深幅により判別されたタチアマモ場の面積は 16514.75m<sup>2</sup>であった。95% CL と測深幅により判別されたタチアマモ場面積の差は 313.5m<sup>2</sup>であった。

曳航式水中カメラにより撮影された 30 地点の海底画像から判定した結果を真の値として、95% CL および測深幅をもとに分類した全体精度は、それぞれ、0.80、0.83 であり、測深幅のほうがわずかに高かった(表 2-5)。

### 2.3.5. 考察

宮城県志津川湾波伝谷地先のタチアマモ場では、NMBS の測深により得た調査藻場海域の各グリッドにおける 95%CL(2×標準偏差)または測深幅により、高密度タチアマモ、低密度タチアマモ、タチアマモなしの3つのカテゴリーにすることができた(図 2-14)。

分類結果の全体精度は 95%CL で 0.80、測深幅で 0.83 であったが、低密度タチアマモについては、95%CL と測深幅ともに低く、ユーザー精度、プロデューサー精度ともに 0.50 であった(表 2-5)。これは、調査海域の濁りが強く、曳航式水中カメラで撮影された画像では低密度タチアマモと分類されるデータが少なかったためである。そこで、高密度タチアマモと低密度タチアマモをまとめてタチアマモ場として分類精度を再評価した(表 2-6)。この結果、95%CL と測深幅の全体精度は、それぞれ、0.87、0.90 となった。また、タチアマモ場のユーザー精度とプロデューサー精度は、それぞれ、95%CL で 0.69、1.00 であり、測深幅で 0.85、0.92 であった。タチアマモなしのユーザー精度とプロデューサー精度は、それぞれ、95%CL で 1.00、0.81 であり、測深幅で 0.94、0.89 であった(表 2-6)。

本研究と同様に、NMBS の測深データにより *Posidonia oceanica* が濃密に繁茂している藻場と砂場の判別を行った Di Maida *et al.* (2011)の結果では、藻場の分類精度はユーザー精度で 1.00、プロデューサー精度で 0.98、砂場の分類精度はユーザー精度で 0.98、プロデューサー精度で 1.00 と報告している。しかし、Di Maida *et al.* (2011)の研究では、彼ら自身が指摘しているように、均一で非常に濃密な藻場と砂場の判別結果であり、藻場の密度変化の影響については更なる研究が必要である。本研究で対象としたタチアマモ場は、藻場内部にタチアマモの繁茂していない空間(ギャップ)が存在していた(図 2-14)。このような複雑な構造をもつタチアマモ場を対象とし、全体精度で、95%CL で 0.87、測深幅で 0.90 と、Di Maida *et al.* (2011)の結果と遜色ない分類精度を得ることができた。

水路測量用のソフトウェア(e.g. Hypack, QINSy)は、NMBS で得られる測深データをデータ収録と同時(リアルタイム)に処理し、海底地形図を作成できるだけでなく、95%CL(または標準偏差)、測深幅を海底地形作成と同時に計算できる。さらに、水路測量ソフトウェアでは、リアルタイムで作成される海底地形図を95%CL(または標準偏差)や測深幅で、任意の間隔で色付けできるため、ここで開発した95%CL、測深幅による藻場のマッピング手法はリアルタイムでの藻場のマッピングを可能にするものと考えられる。

NMBS で得られる測深データによる藻場のマッピング手法について検討した。比較的平坦な砂地に繁茂するアマモ場を対象としていたため、アマモがNMBS で作成される海底地形の粗さ(Roughness)に影響を及ぼすことを利用し、95%CL と測深幅を用いて、アマモ場をマッピングすることができた。しかし、起伏の激しい岩場などに繁茂する藻場についてはさらなる検討が必要と考えられる。このような底質に繁茂するコンブやスガモについては、次の章で取り扱う。

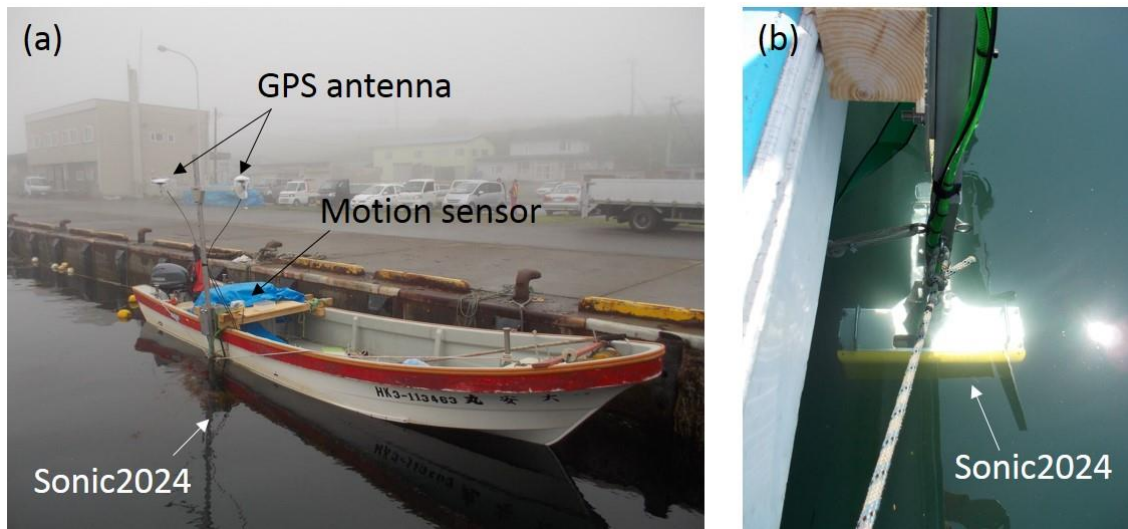


図 2-1. NMBS(Sonic2024, R2SONIC Inc.)の漁船への艀装。(a)漁船に取り付けた POS/MV システムの GPS と動揺センサーおよび NMBS と(b)舷側に取り付けた NMBS トランスデューサー。

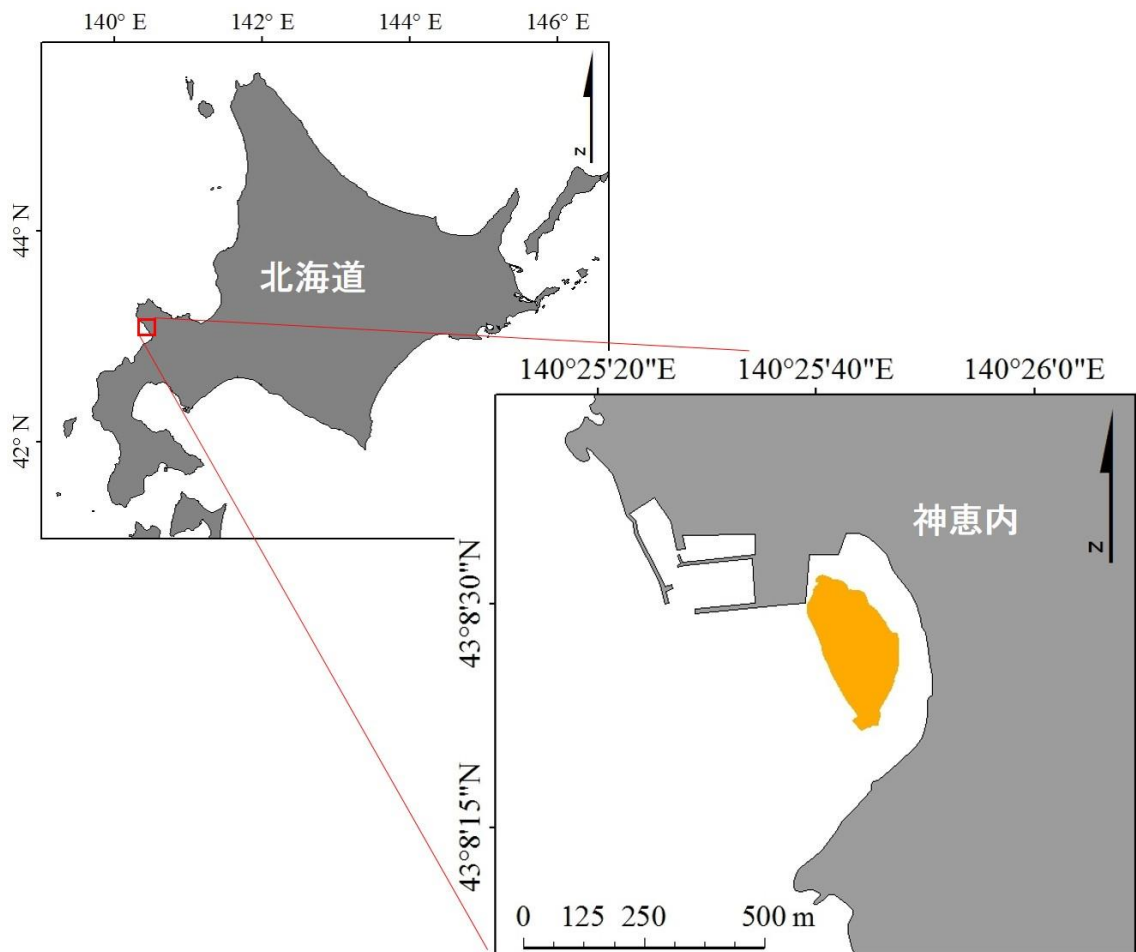


図 2-2. 北海道古宇郡神恵内村の場所 (左上図) と神恵内村地先の調査藻場海域(右下図オレンジ色部分)。



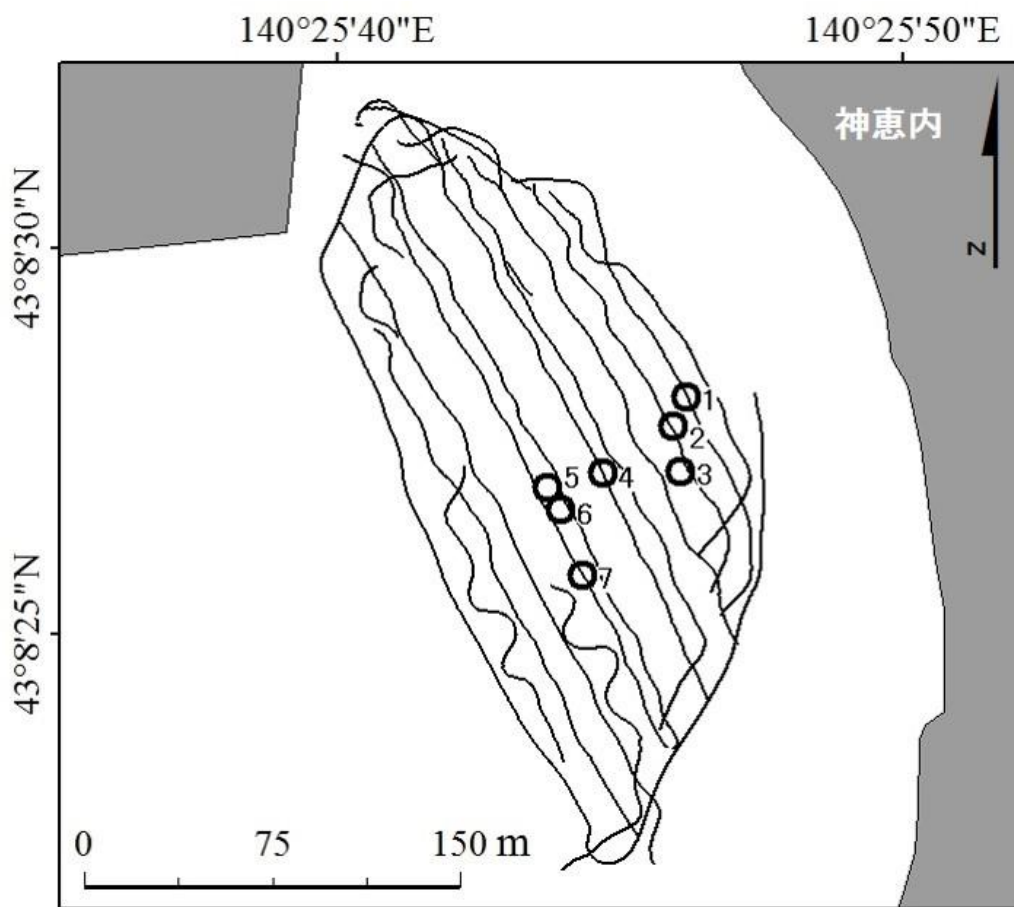


図 2-3. 神恵内村地先調査藻場海域における NMBS により調査した定線（実線）と潜水調査定点(丸印)を示した図。図中の数字は潜水調査定点の番号。

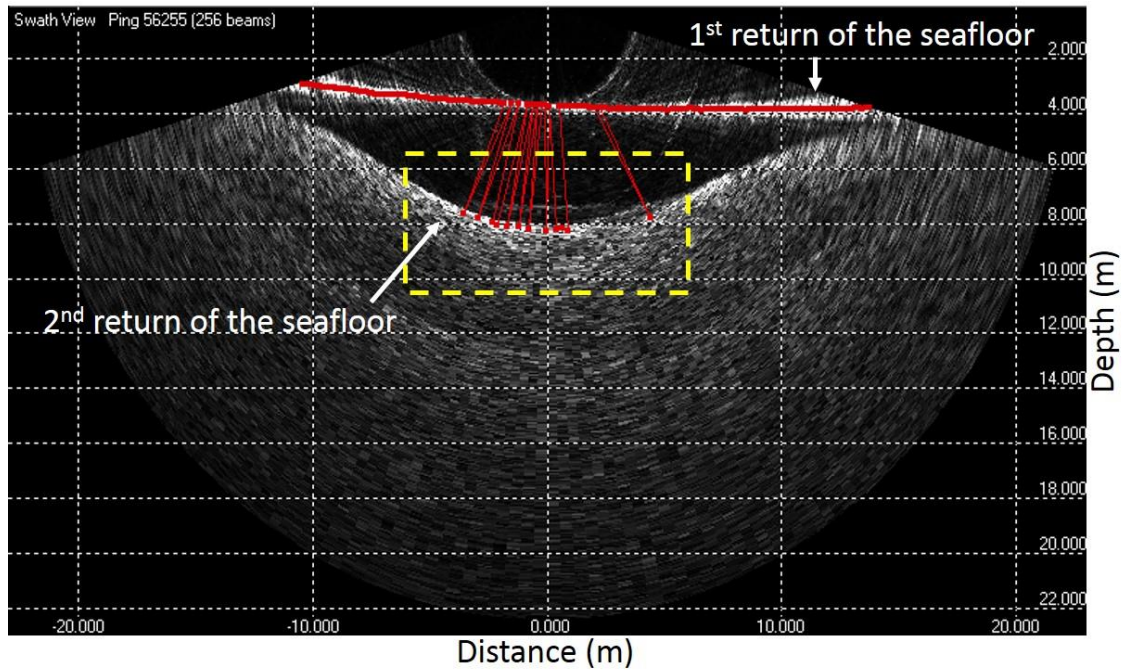


図 2-4. NMBS で収録された水柱音響画像(Water Column Acoustic Image)。図中の赤線は NMBS で収録された測深点を示している。黄色破線で囲った範囲は、海底からの 2 次反射の影響により、実際の海底よりも深く検出された測深点を示している。

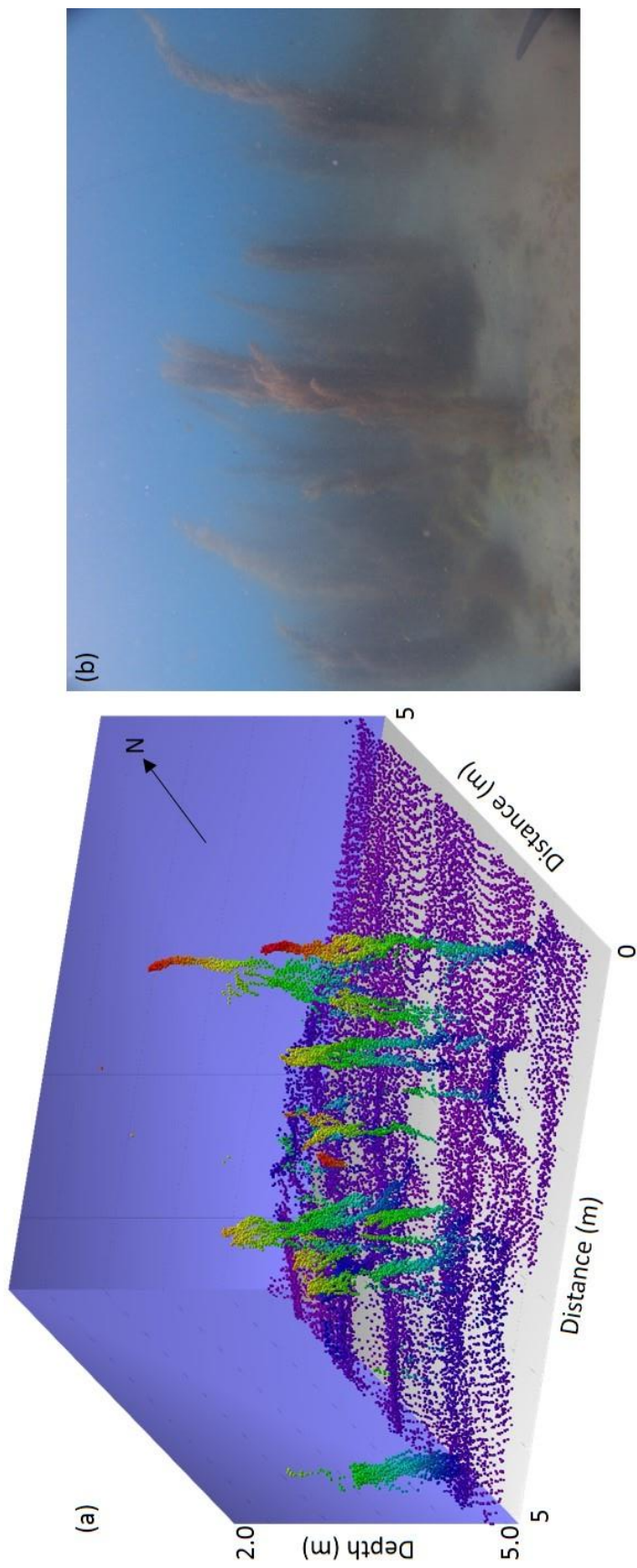


図 2-5. 神惠内村地先ガラモ場のウガノモクが確認された Stm. 6 での水中写真(b)および周辺における NMBS で収録された海底地形の 3次元プロット(a).

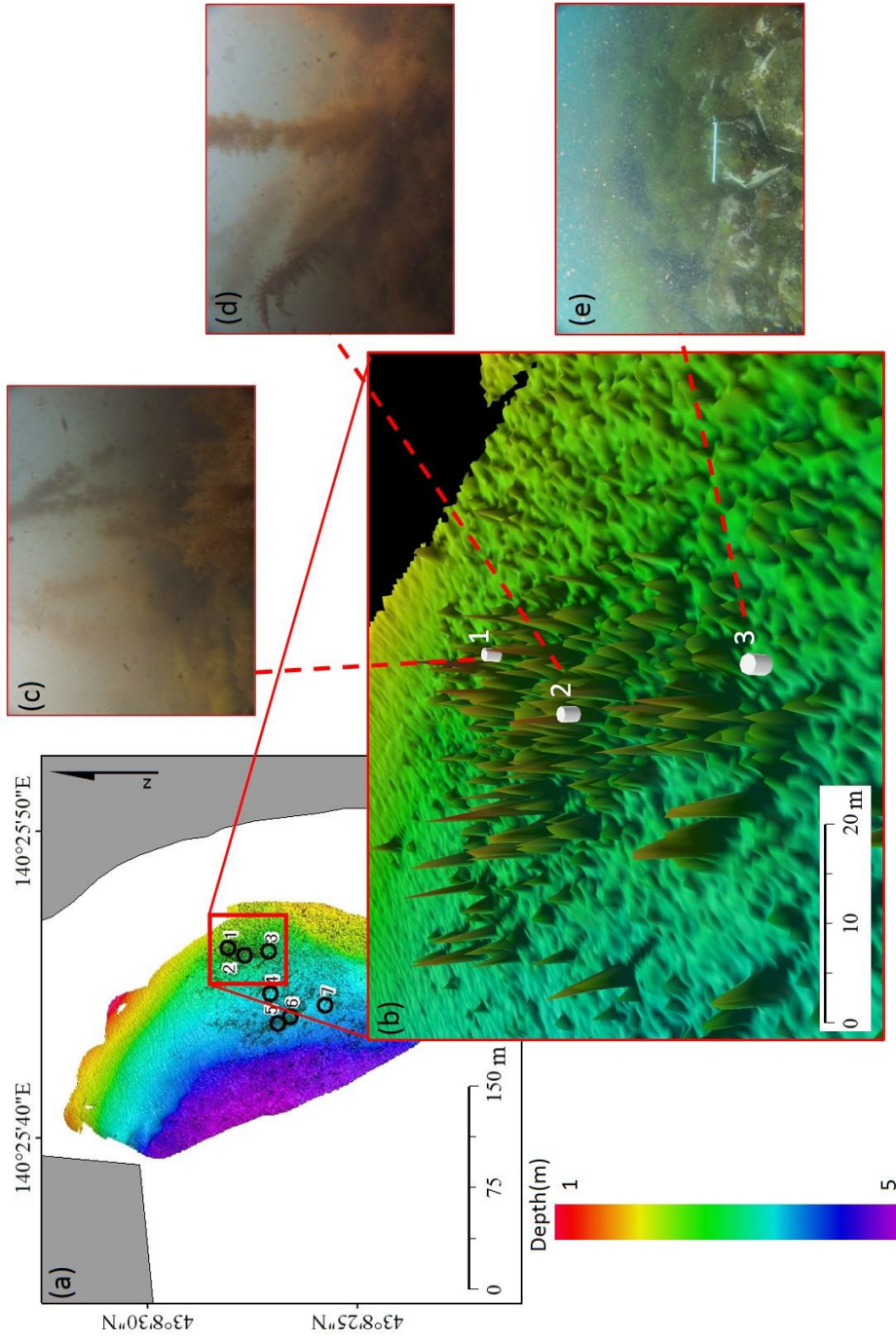


図 2-6. 北海道古宇郡神恵内村地先ガコモ場における水中カメラで撮影した写真(c,d,e)と NMBS により得られたグリッドサイズ 0.5×0.5m の海底地形図(a)上におけるそれらの位置。実線の赤枠部の 3 次元海底地形図(b)中の円筒形は潜水調査地点を、円筒形と赤の破線で結ばれた(c), (d), (e)は、それぞれ、Stns. 1-3 で撮影した海底の水中写真を、左下のカラーバーは左の図の海底地形の底深と対応する。

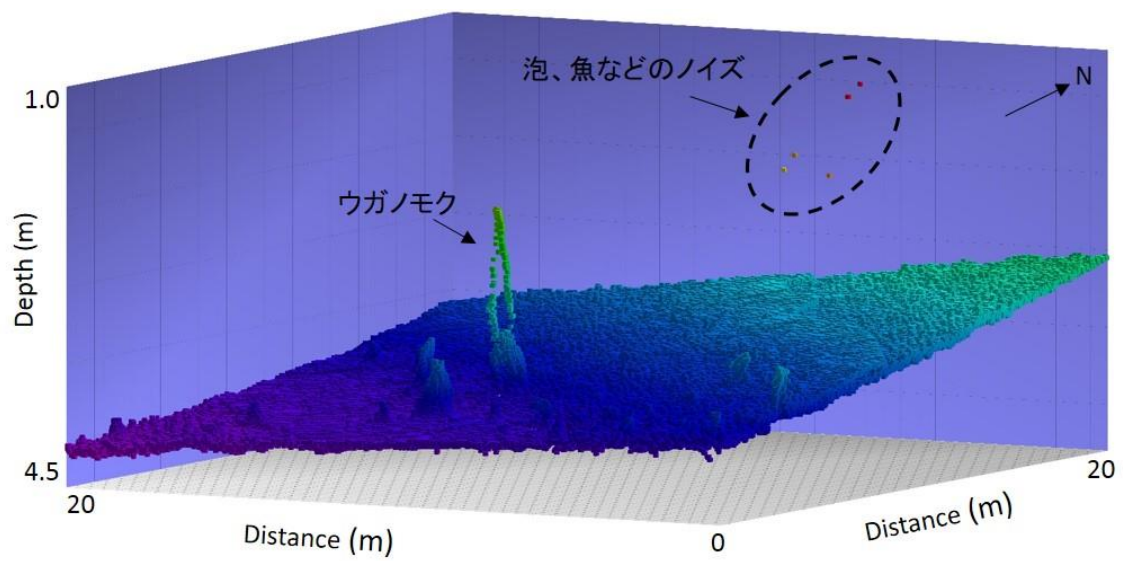


図 2-7. NMBS で得られたウガノモクとウガノモク以外の魚や泡切れなど(ノイズ)を含む測深点の 3 次元プロット

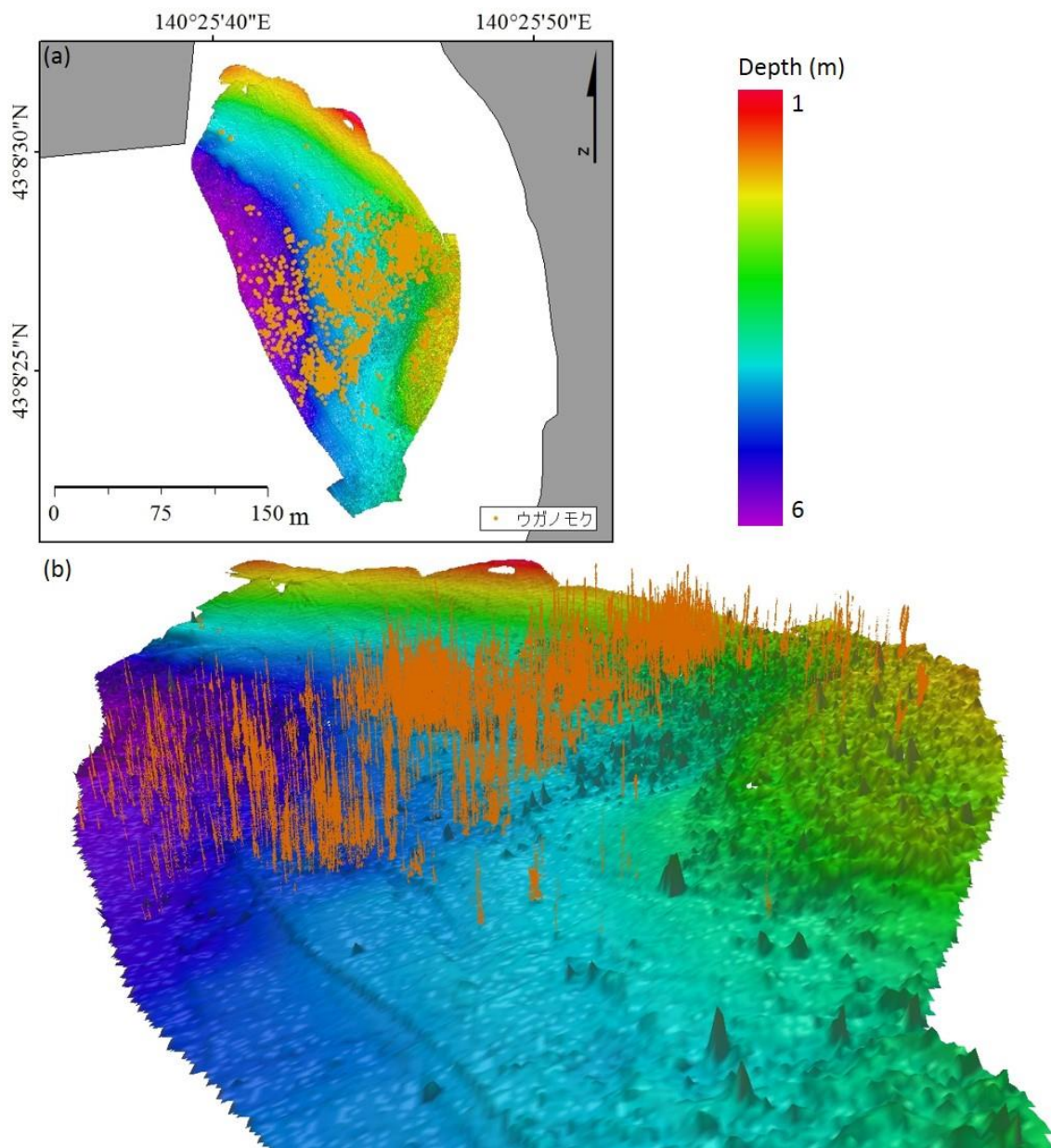


図 2-8. 北海道古宇郡神恵内村地先ガラモ場の水平分布(a)と 3 次元マップ(b)。上図右のカラーバーは底深に対応し、上図中の茶色で塗りつぶしたパッチおよび下図の茶色の縦棒はウガノモクを示す。

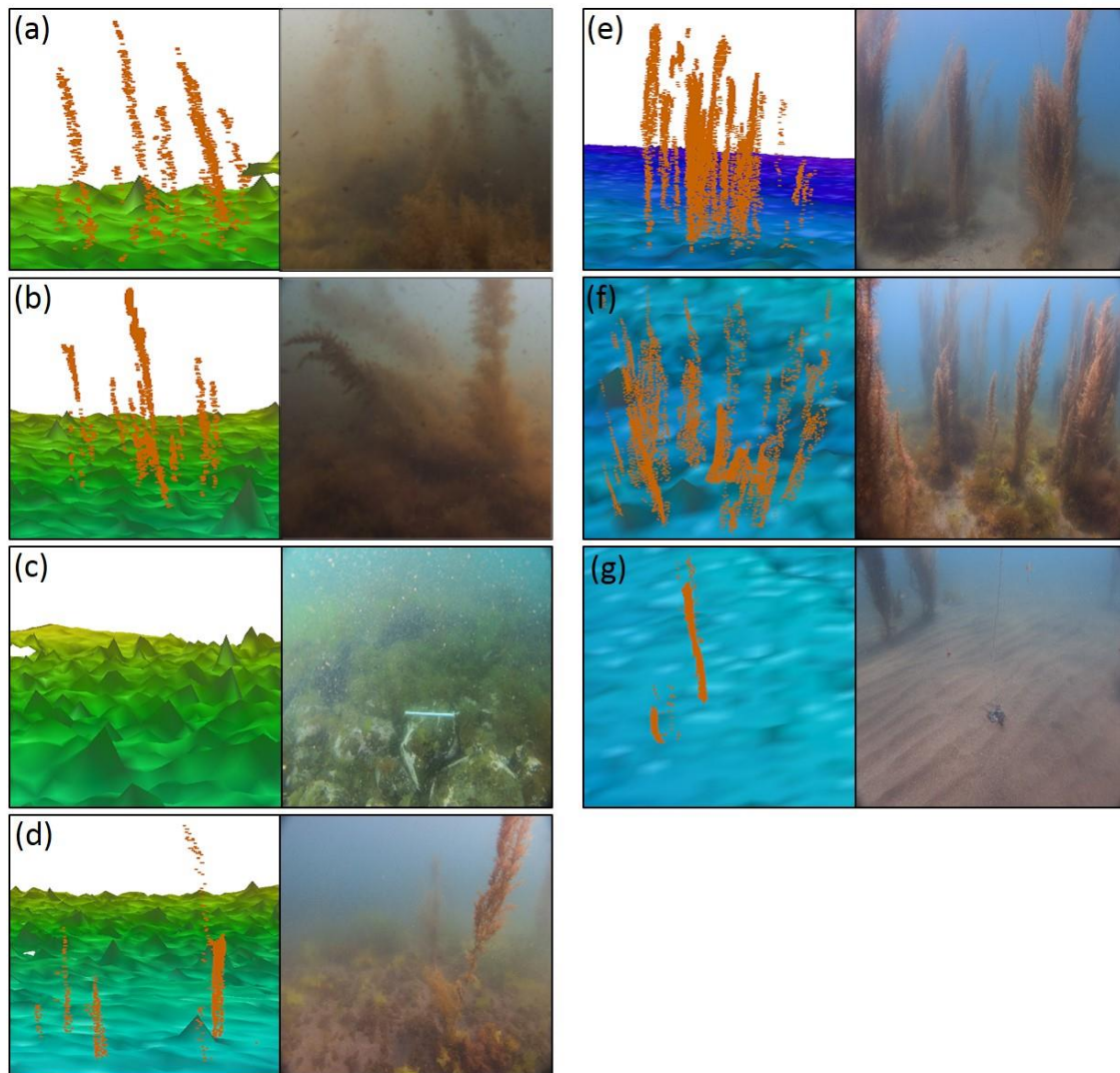


図 2-9. 潜水調査定点 Stn.1 (a), Stn.2 (b), Stn.3 (c), Stn.4 (d), Stn.5 (e), Stn.6 (f), Stn.7 (g)における NMBS により得られたウガノモク藻場の 3 次元マッピング結果と水中写真の比較。

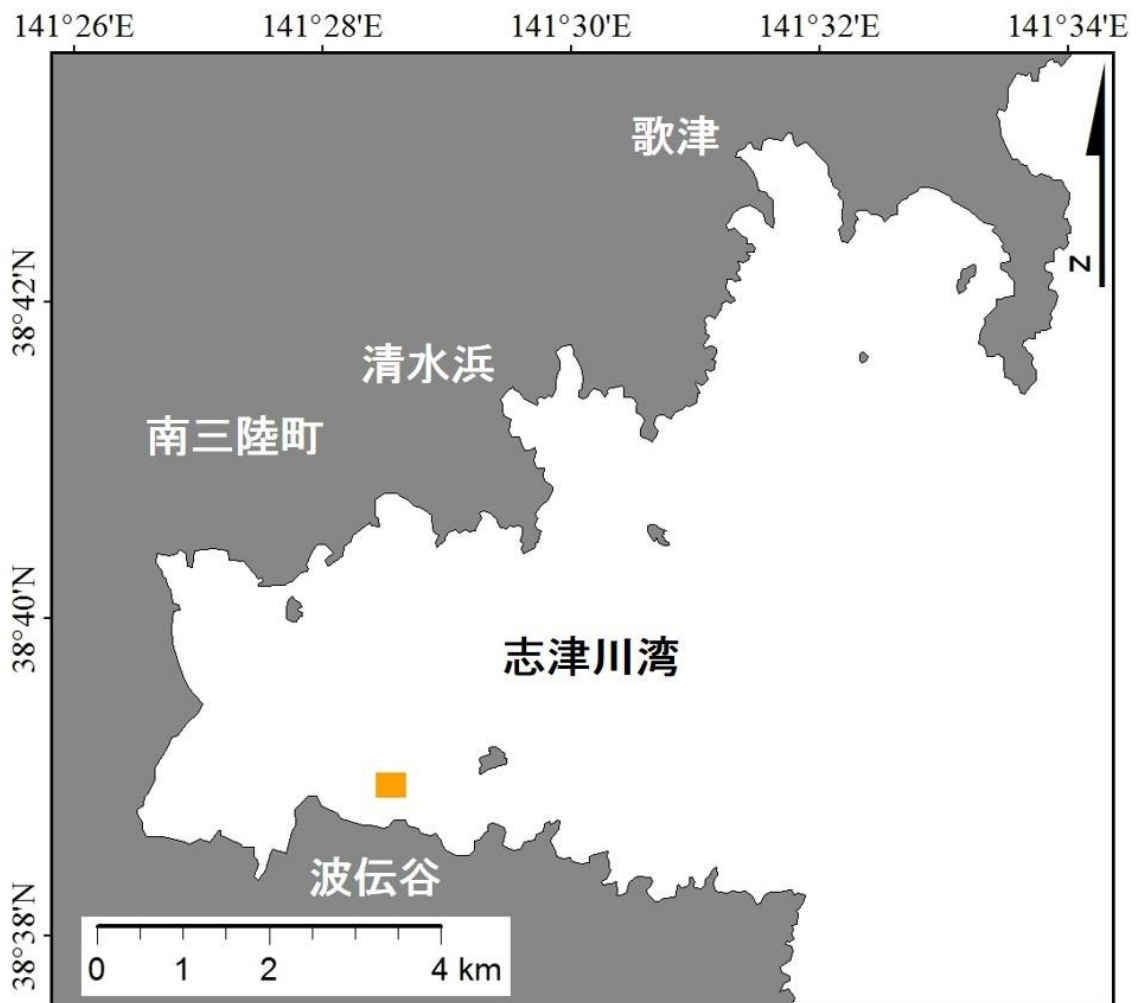


図 2-10. 宮城県志津川湾の波伝谷地先の調査藻場海域(オレンジ色部分)



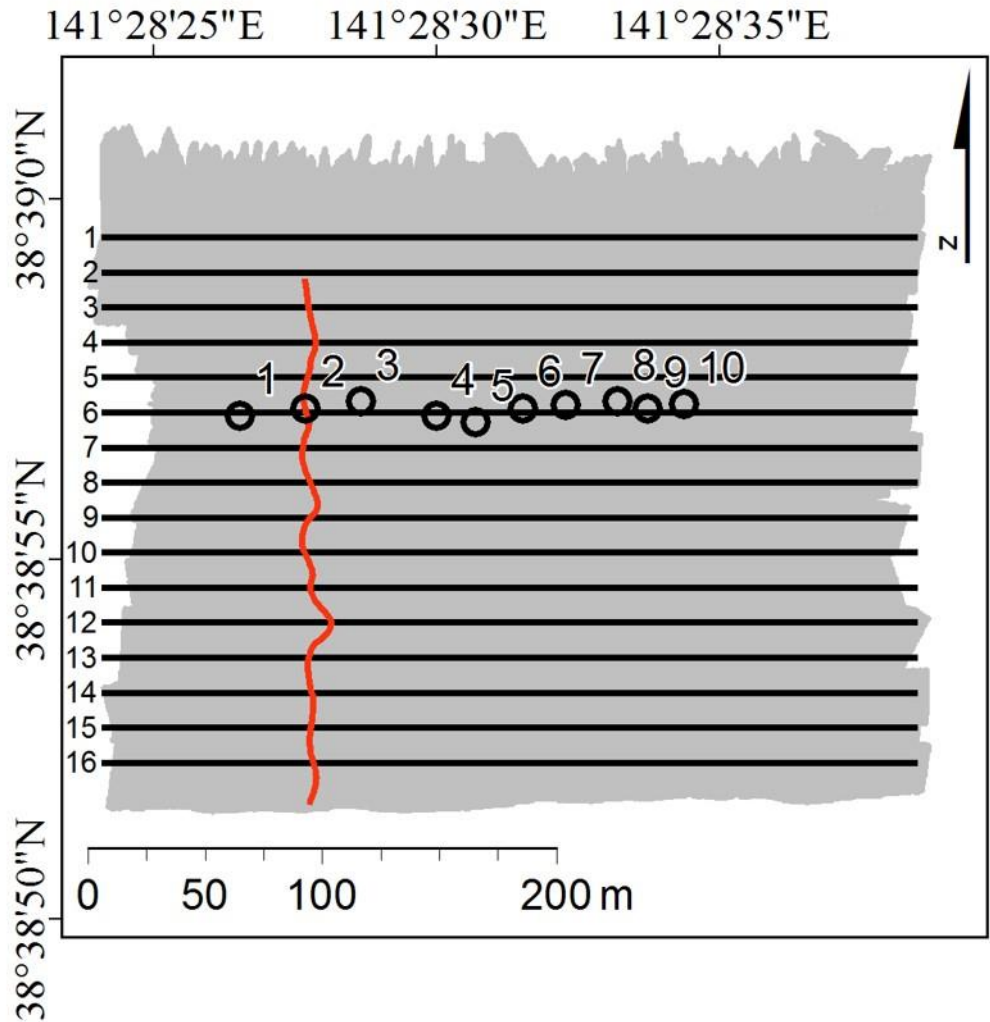
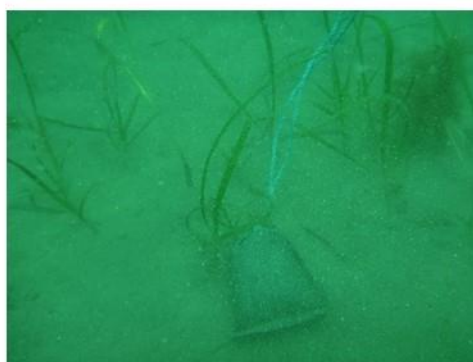


図 2-11. 波伝谷地先のタチアマモ場パッチを NMBS で測深する定線 L1 から L16(黒線)、潜水および船から吊り下げた水中ビデオカメラで海底の映像を取得した定点 Stns. 1-10(丸印)、曳航式水中カメラによる調査定線(赤線)。

A) 高密度タチアマモ



B) 低密度タチアマモ



C) タチアマモなし



図 2-12. 定点 Stn. 4 (A)、Stn. 8 (B)、Stn. 9 (C)における水中ビデオカメラによる海底の画像(左)と潜水調査(右)により撮影された海底の水中画像。Stn. 4、Stn. 8、Stn. 9 はそれぞれ、高密度タチアマモ、低密度タチアマモ、タチアマモなしのカテゴリー。

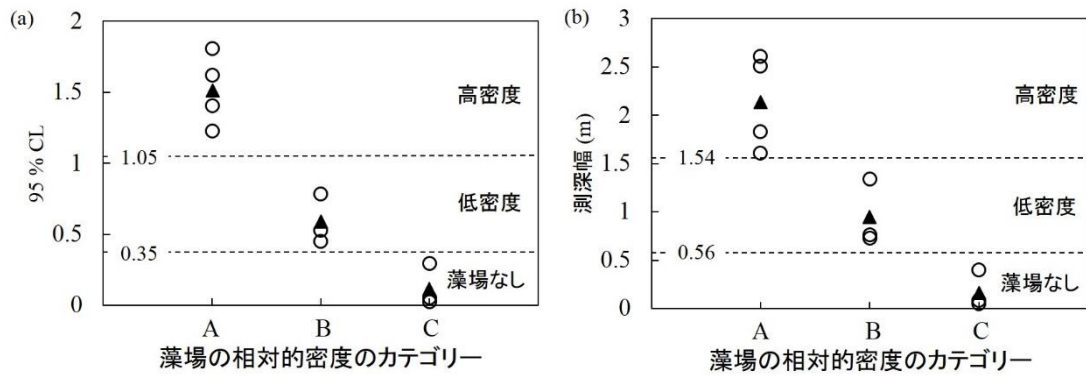


図 2-13. タチアマモ密度の分類カテゴリーと 95%CL(a)及び測深幅(b)との関係。白丸は定点観測地点での平均値、黒三角は各カテゴリーの平均値、グラフ中の破線はカテゴリー間の閾値を示す。

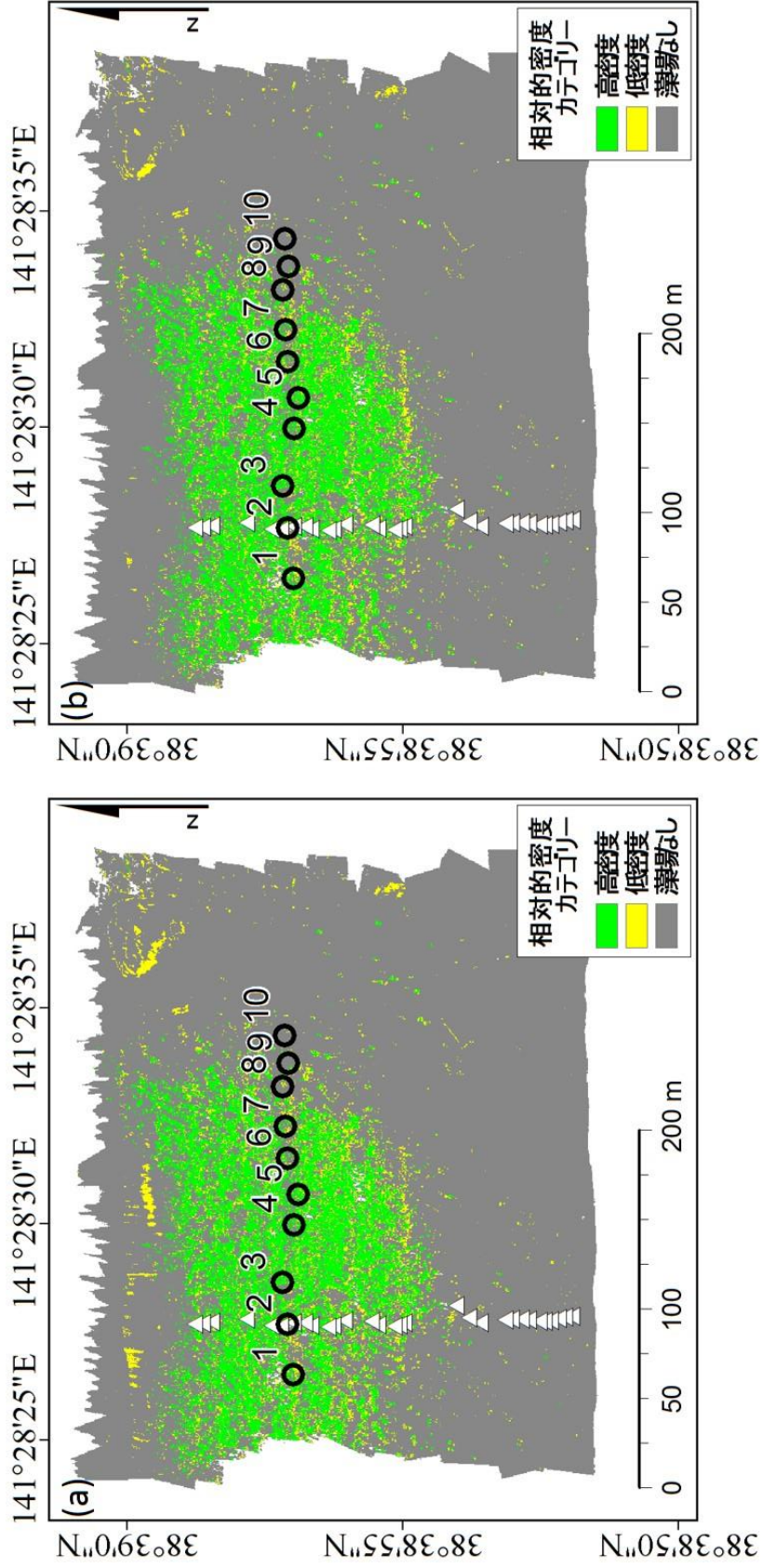


図 2-14. 95%CL(a)と測深幅(b)により分類した、志津川湾波伝谷地先調査藻場海域の高密度タチアママモ(緑色)、低密度タチアママモ(黄色)、タチアママモなし(灰色)のカテゴリーのマッピング結果。図中の丸印は潜水調査の定点を、白三角は船から曳航した水中テレビカメラの航跡に沿った海底の水中画像からランダムに選んだ分類精度を評価するために使用した 30 地点を示す。

表 2-1. ナローマルチビームソナーSonic2024 の仕様

周波数 (kHz)	200 ~ 400 (10kHz 刻み)
ビーム幅(直行方向×進行方向)	0.5×1 °(@400kHz), 1×2° (@200kHz)
ビーム数	256
スワス幅 (°)	10 ~ 160
最大測深レンジ (m)	500
パルス幅 (μsec)	15 ~ 1000

表 2-2. 北海道古宇郡神恵内地先藻場海域調査における Sonic2024 の設定

周波数 (kHz)	400
出力 (dB)	209
ゲイン (dB)	10
パルス幅 (μsec)	35
スワス幅 (°)	140

表 2-3. 宮城県志津川湾波伝谷地先藻場調査における Sonic2024 の設定

周波数 (kHz)	380
出力 (dB)	209
ゲイン (dB)	14
パルス幅 (μsec)	75
スワス幅 (°)	150

表 2-4. 宮城県志津川湾波伝谷地先藻場調査における高密度タチアマモ(A)、低密度タチアマモ(B)、タチアマモなし(C)の3つのカテゴリーに分類した定点、それらのカテゴリーの定点の1m半径内に含まれるグリッドの95%CLと測深幅それぞれの平均値と標準偏差、底深。

水中画像データ		測深データ				
カテゴリー	Stns.	95 % CL		測深幅 (m)		平均底深 (m)
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	
A	2, 3, 4, 5	1.51	0.22	2.14	0.43	5.74
B	1, 6, 8	0.59	0.14	0.95	0.28	5.77
C	7, 9, 10	0.11	0.12	0.16	0.16	6.02

表 2-5. 宮城県志津川湾波伝谷地先藻場調査における船から曳航した水中テレビカメラの航跡に沿った海底の水中画像からランダムに選んだ分類精度を評価するために使用した30地点の画像をもとにした分類結果(参照データ)に対する、95%CLによる分類結果(a)と測深幅による分類結果(b)の誤差行列。

(a)		参照データ			ユーザー精度
95% CL		高密度	低密度	タチアマモなし	
分類結果	高密度	6	1	0	0.86
	低密度	1	1	0	0.50
	タチアマモなし	4	0	17	0.81
プロデューサー精度		0.55	0.50	1.00	全体精度 0.80

(b)		参照データ			ユーザー精度
測深幅		高密度	低密度	タチアマモなし	
分類結果	高密度	8	1	1	0.80
	低密度	1	1	0	0.50
	タチアマモなし	2	0	16	0.89
プロデューサー精度		0.73	0.50	0.94	全体精度 0.83

表 2-6. 高密度タチアマモと低密度タチアマモをまとめ、タチアマモ場とした場合の 95%CL による分類結果(a)と測深幅による分類結果(b)の誤差行列。

(a) 95% CL		参照データ		ユーザー精度
		タチアマモ場	タチアマモなし	
分類結果	タチアマモ場	9	0	1.00
	タチアマモなし	4	17	0.81
プロデューサー精度		0.69	1.00	全体精度 0.87

(b) 測深幅		参照データ		ユーザー精度
		タチアマモ場	タチアマモなし	
分類結果	タチアマモ場	11	1	0.92
	タチアマモなし	2	16	0.89
プロデューサー精度		0.85	0.94	全体精度 0.90

## 第3章 藻場の種類判別

### 第3.1節 緒言

前章では、NMBSにより収録される測深データのみを利用した藻場の3次元マッピング及びリアルタイムでの藻場判別を可能とする簡易なマッピング手法について検討し、NMBSで作成される海底地形図の各グリッドの95%CL(2×標準偏差)または測深幅を利用することで、平坦な海底に繁茂するホンダワラ類や海草がつくる藻場のマッピングが可能であることを明らかにした。しかし、岩礁域などの起伏の激しい海域に繁茂する藻場については、前章では扱わなかった。そこで、本章では、岩礁域に繁茂する藻場を対象とした藻場判別手法について検討する。さらに、複数の藻場がモザイク状に分布する海域を対象とし、藻場の種類判別に関する手法の開発を試みる。

藻場の種類判別については、Tecchiato *et al.* (2015)が海草と大型藻類の藻場を対象に、NMBSで得られる海底面からの反射強度(海底の後方散乱強度)による分離識別について検討している。その結果によれば、海草と大型藻類がつくる藻場からの海底の後方散乱強度の特徴は似ており、海底の後方散乱強度情報による分離識別は非常に困難であると報告している。そこで、本研究では、NMBSで収録される海底の後方散乱強度の情報に、前章で明らかとなった藻場判別に有効な海底地形図の各グリッドの95%CLを組み合わせることにより、藻場の種類判別を試みた。



## 第 3.2 節 材料および方法

### 3.2.1. 調査海域

調査海域として、地元の協力が得られたことから、日本でも有数の銘柄コンブ産地である北海道幌泉郡えりも町笛舞地先のコンブ場藻場を選んだ(図 3-1)。ここは北海道の日高地域に区分され、コンブ目コンブ科のミツイシコンブ (*Laminaria angustata* (Kjellman)) で構成されるコンブ場が分布している(伊藤 1964)。本種は北海道の天然コンブの中で 2 番目に生産量が高く、非常に重要な漁業資源であり、漁場造成の取り組みが行われている。

コンブ漁場造成の取り組みの 1 つとして、コンブの着生を妨げるスガモ(*Phyllospadix iwatensis*)などの雑海藻が繁茂している漁場において、大型重機(図 3-2)による雑海藻類の駆除が漁協により行われている。また、コンブ漁の漁獲日数や操業時間の管理による資源管理も行っている(北海道水産業改良普及職員協議会 2006)。このような海域において、漁獲対象となっているコンブ場とその他のスガモ場を分離識別する手法の開発は、上記のような漁業者や漁協主体で行われている資源管理に有効に活用できることが期待される。

### 3.2.2. 調査方法

調査は 2014 年 6 月 19~25 日に実施した。Sonic2024 と POS/MV により構成される NMBS システムを、図 2-1 と同様にコンブ漁で使用される船外機船(約 1 ton)に艀装した。調査時の NMBS の設定を表 3-1 に示す。調査定線は、調査海域を隙間なく覆うように、海岸線に平行に 10m の間隔で 42 本設定し、NMBS システムによる測深データ及び

海底の後方散乱強度の計測を実施した(図 3-3)。NMBS による測深に関するデータと POS/MV による位置、動揺、方位のデータは水路測量用ソフトウェア QINSy により収録した。また、超音波の吸収減衰係数の推定に必要な、水深、水温、塩分の鉛直分布を、メモリー式水温・塩分・深度計(COMPACT-CTD Lite, JFE Advantech Co.)により 5 地点で観測した(図 3-3)。

グランドトゥルースデータの取得は、287 地点で行った(図 3-3)。底質を知るために、水中カメラ(GoPro HERO 3, GoPro Inc.)を船上から降ろし、海底面の状況を撮影した。水中カメラの撮影と同時に、POS/MV の測位データを QINSy により収録し、グランドトゥルースデータを取得した地点の位置情報を得た。

NMBS では、測深データのほか、海底の後方散乱強度を Snippets と呼ばれる方法で収録した。Snippets は、256 本の各ビームで検出される測深点を中心とした一定範囲の後方散乱強度をビーム毎に収録する方法である(図 3-4)。

### 3.2.3. データ解析

#### 3.2.3.1. 測深データ解析

NMBS で収録された測深データについては第 2 章での解析と同様に、海底からの 2 次反射に起因するノイズ、泡切れによるノイズの除去を行い、グリッドサイズを  $0.5 \times 0.5\text{m}$  に設定し、海底地形図を作成した。作成した海底地形図の各グリッドにおける平均水深、95% CL をグリッドの中心位置のデータとして、位置情報とともに GIS ソフトに読み込んだ。

### 3.2.3.2. Snippets データ解析

Snippets により収録された海底の後方散乱強度データは、3次元可視化・データ解析ソフトウェア Fledermaus(QPS Co.)に組み込まれている反射強度データ処理用ツール(FM Geocoder ToolBox)により解析した。Geocoder はニューハンプシャー大学の Luciano Fonseca により 2005 年に開発されたサイドスキャンソナー(SSS)及び NMBS で収録される反射強度データ解析用のアルゴリズムである(Fonseca and Calder 2005)。現在では、Fledermaus, Hypack, HIPS and SHIPS (Caris Inc.)などの NMBS データ処理ソフトに組み込まれ、世界的に認知された反射強度データ処理の標準解析ソフトである。

反射強度データ処理用ソフトにより、海底の後方散乱強度の入射グレーディング角の影響補正(AVG: Angle Valid Gain)と吸収減衰係数の補正を行い、海底の後方散乱強度のモザイクを行った。ここで、モザイクのグリッドサイズは、海底地形図と同じ 0.5×0.5m とした。入射グレーディング角の影響補正では、設定したピング数分の海底の後方散乱強度の平均値と入射グレーディング角をプロットし、最小二乗法により補正曲線を求め、海底の後方散乱強度を補正する。ここで、海底の後方散乱強度の平均値を計算するピング数は、一般的設定値である 30 ピングとした(QPS Co. 2015)。吸収減衰係数は、現場観測で得られた調査海域全体の平均水温と平均塩分から、François and Garrison(1982)の式により求めた。

反射強度データ処理用ソフトにより作成された海底の後方散乱強度のモザイクは、海底地形図と同様に、グリッドの位置情報とともに海底の後方散乱強度を取り出し、GIS ソフトに読み込んだ。その後、GIS ソフト上で、海底地形図のデータと海底の後方散乱強度のデータを統合した。

### 3.2.3.3. グラントゥルースデータ

287 点で得られた水中カメラ映像をもとに、各点における底質を、コンブ類、スガモ、岩・砂利の 3 つのクラスに分類した。水中映像を取得した 287 点では、できるだけその場を代表する底質を撮影するようにした。しかし、取得した映像には、複数の底質が写っている場合があり、その場合には、卓越する底質を、その点のクラスとした。

287 点の内、クラス毎に 30 地点(計 90 地点)をランダムに抽出し、各クラスを分類する基準を調べるための教師データとした。ランダム抽出した計 90 地点の水中カメラによる分類結果と同地点における 95% CL 及び海底の後方散乱強度を比較することで、各クラスの分類基準について検討した。ここでは、グラントゥルースデータを取得した地点の中心から半径 1m の範囲内に含まれるグリッドの 95% CL と海底の後方散乱強度を抽出し、それぞれの平均値を、その地点の代表値とした。

残りの 197 地点のグラントゥルースデータは、決定木により作成したハビタットマップの分類精度を評価するための参照データとして利用した。

### 3.2.3.4. 決定木によるハビタットマップの作成

3.2.3.3 により得られたクラス毎の 95% CL 及び海底の後方散乱強度の情報を用いて、決定木によるコンブ類、スガモ、岩・砂利の分類を行った。ここで、ハビタットマップの分類精度については、1 グリッド内に複数のクラスが分布するミクセル(例えば、グリッド内にスガモと岩・砂利の 2 つのクラスやスガモとコンブ類の 2 つのクラスなど)である場合、分類精度は低下する(須崎・柴田 2001)。そこで、本研究では、決定木により作成したハビタットマップに対し、周辺のグリッドの情報を利用する空間フィルターによりミクセルの分類精度への影響を少なくすることを試みた。対象グリッドを中心に、

3×3 のグリッド、つまり、9 グリッドの分類クラスを集計し、最も多く出現したクラスを対象グリッドのクラスとして割り当てた(図 3-5)。分類精度については、197 地点の参照データを用いて、誤差行列により評価した。

### 第 3.3 節 結果

#### 3.3.1. 海底地形

調査海域は、起伏の激しい岩礁域であり、岸から沖に向かって枝分かれする岩礁の間隙が走っているため、複雑な海底地形をなしていた(図 3-6 (a))。岸側では、底深 1 m から 4 m 程まで急に落ち込む岩礁の間隙が数多くあり、沖側では、底深 8 m 以深では西北西から東南東に向かう帯状の平坦な間隙と南西隅に比較的平坦な海底が広がっていた(図 3-6 (a))。

95% CL の分布は海底地形図(図 3-6 (a))で起伏の激しい岩礁域で高い値(0.5 以上)を示した。しかし、沿岸側の岩礁域では、95% CL の低い海域(0.3 以下)と高い海域(0.5 以上)の両方が分布した(図 3-6(b))。また、底深 8 m 以深の西北西から東南東に向かう帯状の平坦な間隙と南西隅に比較的平坦な海底では、95% CL の値は 0.3 以下と低かった。

#### 3.3.2. 海底の後方散乱強度

反射強度データ処理用ソフトにより作成した海底の後方散乱強度のモザイク図では、沿岸部の岩礁域において海底の後方散乱強度が-30dB 以下の低い海域が多かった(図 3-7)。特に、図 3-6 (b)の 95% CL で 0.3 以下と低かった場所では、海底の後方散乱強度も-33dB 以下と低い値であった。底深 8m 以深の西北西から東南東に向かう帯状の平坦な

間隙と南西隅に比較的平坦な海底では、高い海底の後方散乱強度(-26dB 以上)を示した(図 3-7)。

### 3.3.3. グラントゥルースデータ

287 地点の内、90 地点をコンブ類、91 地点をスガモ、106 地点を岩・砂利と分類できた。コンブ類は、調査海域の沿岸側に集中し、スガモは沿岸側から沖側まで広く分布していた。また、コンブ類とスガモは岩場の頂上付近に分布している傾向があった(図 3-8)。

### 3.3.4. 海底地形図の 95% CL・海底の後方散乱強度とグラントゥルースデータ

90 地点の教師データと海底地形図の 95% CL および海底の後方散乱強度を比較したところ、各クラスの海底地形図の 95% CL の平均値は、コンブ類が 0.28、スガモが 0.51、岩・砂利が 0.42、海底の後方散乱強度の平均値は、コンブ類が-31.0dB、スガモが-29.9dB、岩・砂利が-27.4dB であった(図 3-9)。海底の後方散乱強度は、コンブ類またはスガモが繁茂している藻場と岩・砂利との間に明瞭な差がみられ、コンブ類とスガモが-28.5dB 以下であるのに対し、岩・砂利は-28.5dB 以上であった(図 3-9(a))。この結果から、コンブ類及びスガモと岩・砂利の分類は、海底の後方散乱強度のみで十分可能であると考えられた。一方、海底地形図の 95% CL については、各クラス間にはっきりとした差は見られなかった。特に、岩・砂利については標準偏差も大きく、コンブ類、スガモと重なっていた(図 3-9(b))。しかし、コンブ類とスガモに注目すると標準偏差では一部重なっている範囲があったが、平均値ではスガモがコンブ類のおよそ 2 倍の値を示していた。そこで、コンブ類とスガモの海底地形図の 95% CL のヒストグラムを作成したところ、

コンブ類では 30 地点の内の 77%を示す 23 地点が 0.34 以下であり、スガモでは 23 地点が 0.34 以上であった(図 3-10)。この結果から、精度は高くないが、コンブ類とスガモは 95% CL により分類が可能と考えられた。

### 3.3.5. ハビタットマッピング

3.3.4.の結果をもとに作成した決定木(図 3-11)により各クラスのカテゴリ分けを行った。カテゴリ分けの精度は誤差行列により評価した。ここで、誤差行列で得られる全体精度(overall accuracy)は、対角線上の成分しか考慮していないため、カテゴリ分けの精度を高目に評価する傾向がある。この問題を除去するために、Ma and Redmond (1995)は、誤差行列の対角線上以外の成分も考慮してカテゴリ分け精度を評価するタウ係数(Tau coefficient)を提案した。そこで、ユーザー精度(user accuracy)、プロデューサー精度(producer accuracy)、全体精度の他に、タウ係数を用いてカテゴリ分け精度を評価した。タウ係数  $\tau$  の計算式は、

$$\tau = \frac{P_o - P_r}{1 - P_r} \quad (3.1)$$

ここで、 $P_r$ は、

$$P_r = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^M n_{i+} \cdot x_i \quad (3.2)$$

である。式(3.1)および式(3.2)における  $P_o$ 、 $N$ 、 $M$  は全体の精度、参照(分類)したグリッドの総数、分類クラスの数で、 $n_{i+}$ は  $i$  行のデータの総和、 $x_i$  は  $i$  行の対角線上のデータ数である。

決定木の分類のみによる分類結果(図 3-12(a))とその分類結果に対して 3×3 の空間フィルターを適用した結果(図 3-12 (b))の分類精度を誤差行列により調べた。全体精度は空間フィルターによりミクセルの効果を低減させたハビタットの分類結果のほうが高かった(表 3-2)。タウ係数を用いて Z 検定を行ったところ、両者の分類精度には有意な差( $P < 0.05$ )があった。各クラスについて比較すると、ユーザー精度、プロデューサー精度共に、コンブ類、スガモ、岩・砂利のすべてのクラスで、周辺グリッドの情報により再分類した結果のほうが高かった。また、タウ係数も各クラスの分類精度で、最も低かったのはスガモで、ユーザー精度は 70%、プロデューサー精度は 72%であった(表 3-2 (b))。一方、コンブ類と岩・砂利については 80%以上のユーザーおよびプロデューサー精度があった。

コンブ類、スガモ、岩・砂利と分類されたグリッドは、それぞれ、160600、372233、442476 で、推定された面積は、コンブ類が 40150m<sup>2</sup>、スガモが 93058.3m<sup>2</sup>、岩・砂利が 110619m<sup>2</sup>であった。また、各クラスの水平分布は、コンブ類が沿岸側に多く分布し、スガモは沿岸側から沖側まで広く分布していた。この傾向は、水中カメラによる観測で推察されたコンブ類とスガモの分布傾向と一致した。

### 第 3.4 節 考察

これまで、藻場の種類について NMBS により得られるデータから分類した研究は少なく、単一種の藻場を対象とした研究が多かった(e.g. Komatsu *et al.* 2003, De Falco *et al.* 2010, Di Maida *et al.* 2011)。北海道のコンブ場を対象とした音響手法によるマッピングに関しては、知床半島のコンブ場を対象に南ら(2010)が行っている。南ら(2010)ではシングルビームエコーサウンダーにより藻場のマッピングを行っているが、シングルビームエコーに現れる藻場の反応がコンブ場であるかについては水中カメラ及び目視観察



による結果から判断しており、音響データを数値的に処理する判別は行っていない。

Tecchiato *et al.* (2015)は、NMBS で得られる海底の後方散乱強度の情報により大型藻類と海草の判別の可能性について調べた。しかし、大型藻類と海草が作り出す藻場からの反射強度の特徴は、非常に似ているため、海底の後方散乱強度情報による両者の識別は極めて難しいと報告している。一方で、大型藻類と海草をまとめて藻場と判別した結果は、全体精度で 78% の分類精度が得られたと報告している。そこで、スガモとコンブ類をまとめたクラス、岩・砂利のクラスの 2 つのクラスに分類した場合について全体精度を求めると、87.8% と Tecchiato *et al.* (2015) が藻場とまとめて分類した結果よりも高くなった。一般に、分類精度が 80% 以上であれば、実用上問題なく使用できる高い精度であるといえる。

NMBS システムで得られる海底の後方散乱強度と海底地形図の 95% CL の情報を利用することで、岩礁域に繁茂するコンブ類とスガモを分離できることを明らかにできた。分類精度も、全体精度で 80%、コンブ類で 80% と、高い分類精度でのマッピングができた。

分類精度が最も低かったのはスガモで、ユーザー精度は 72%、プロデューサー精度は 70% であった。スガモの海底の後方散乱強度はコンブ類と岩・砂利の間に位置し、スガモの海底地形図の 95% CL の平均値は岩・砂利との差はわずかであったことから、ミクセルの影響が他のクラスに比べ強かったことが原因だと考えられる。したがって、ミクセルの効果を低減し、グリッドを代表するクラスに分類するための空間フィルターが有効である。

以上の結果から、本調査海域のようにモザイク上に複数種の藻場が分布している海域における NMBS システムを用いた藻場の種類判別には、決定木による分類と、周辺グリッドの情報を用いる空間フィルターとを組み合わせる方法は、非常に有効である。

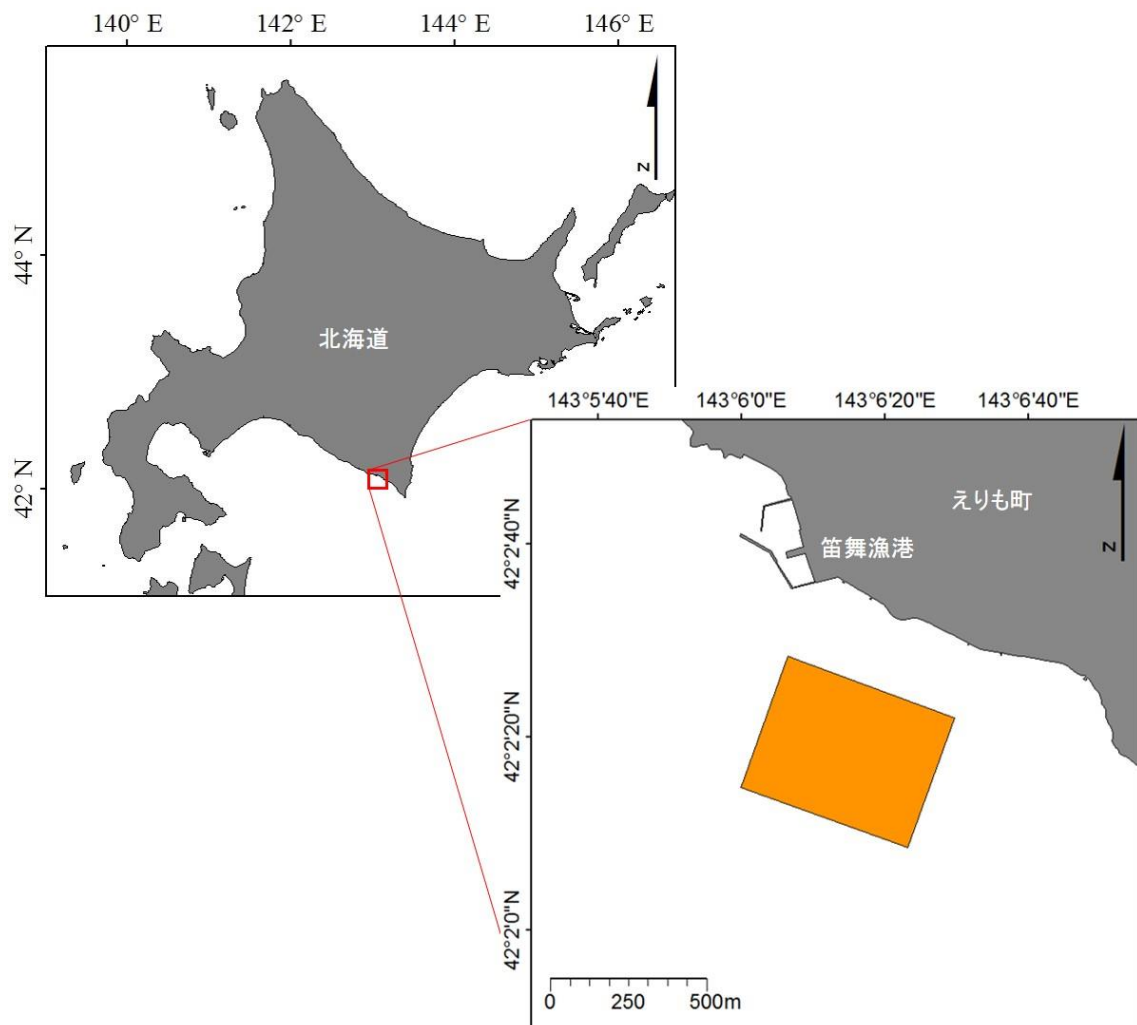


図 3-1. 北海道幌泉郡えりも町笛舞地先の調査海域（オレンジ色）を示した地図。



図 3-2. コンブ漁場造成のため雑海藻類の除去に使用されている大型重機

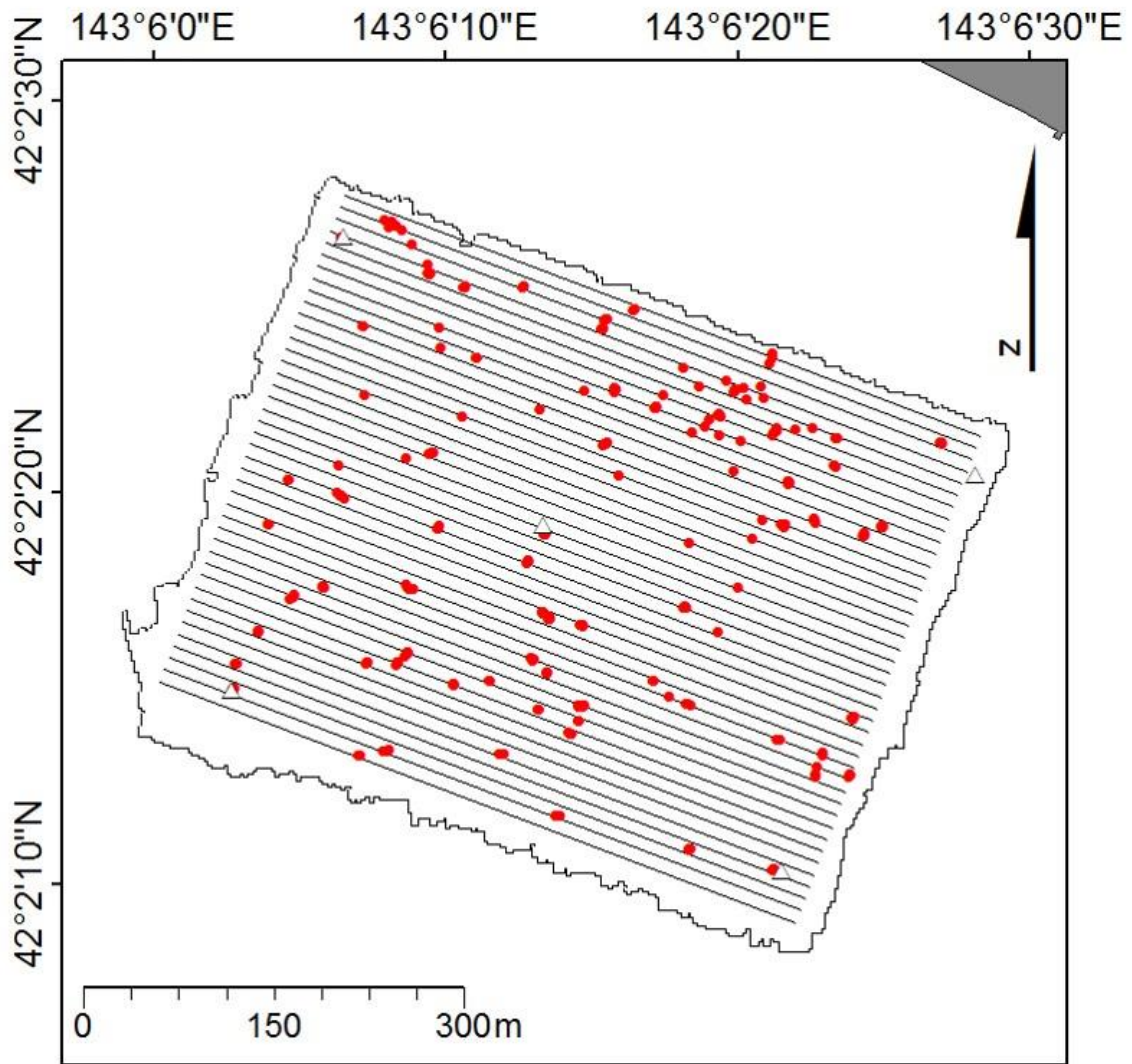


図 3-3. 調査定線(黒直線)、水中カメラによるグランドトゥルースデータ取得地点(赤丸)、CTD 観測地点(白三角)、NMBS のデータ取得範囲(黒曲線)を示した図

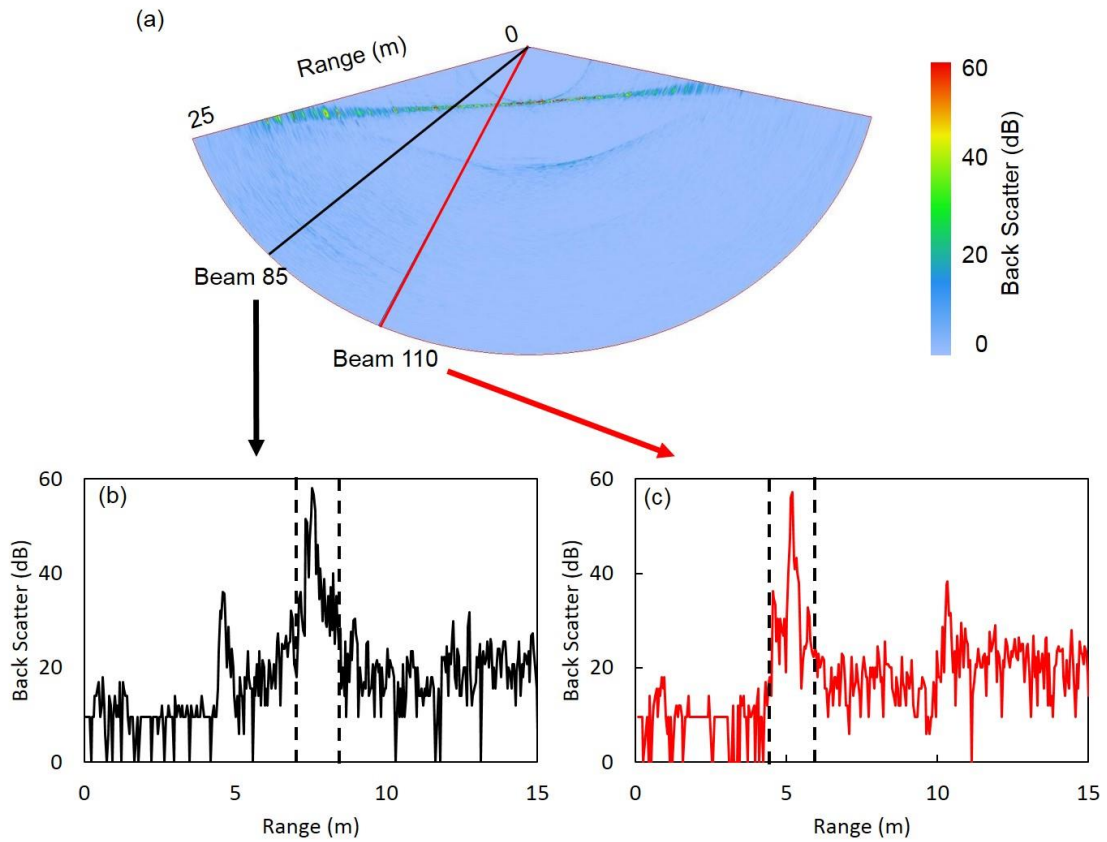


図 3-4. NMBS の Sonic 2024 における、レンジ方向に送信された 1 ピングのファンビームの反射を分割して受信する 256 本のビームの後方散乱のピーク値を中心とした一定範囲の後方散乱強度の平均値をそのビームの後方散乱強度とする Snippets の概念図。ファンビームにより得られる水柱音響イメージ(a)、ビーム番号 85(b)とビーム番号 111(c)の後方散乱強度データ。(b),(c)内の破線で囲った部分は、Snippets データとして収録される後方散乱強度データの範囲を示す。

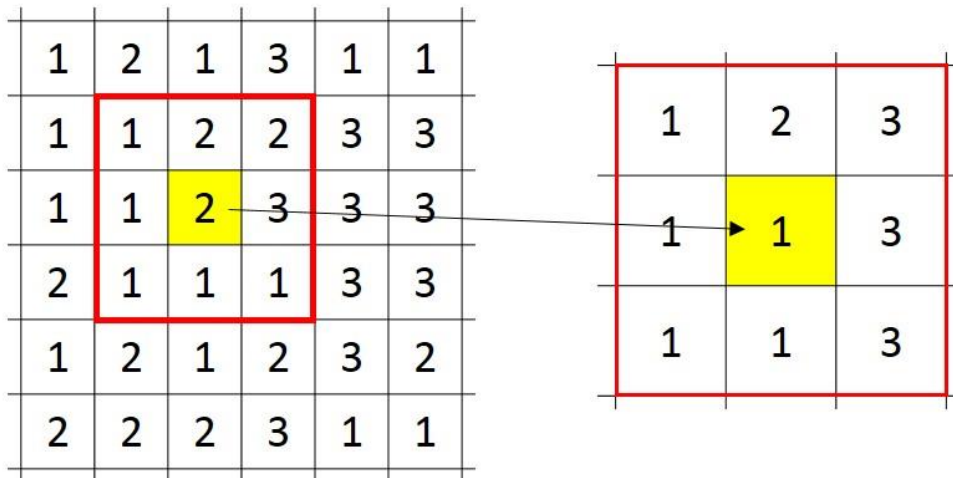


図 3-5. ミクセルの影響を少なくするために3×3グリッドの多数決により中心グリッドの底質を割り当てた。元の分類結果(左図)と多数決に寄る底質の分類結果の割当(右図)。

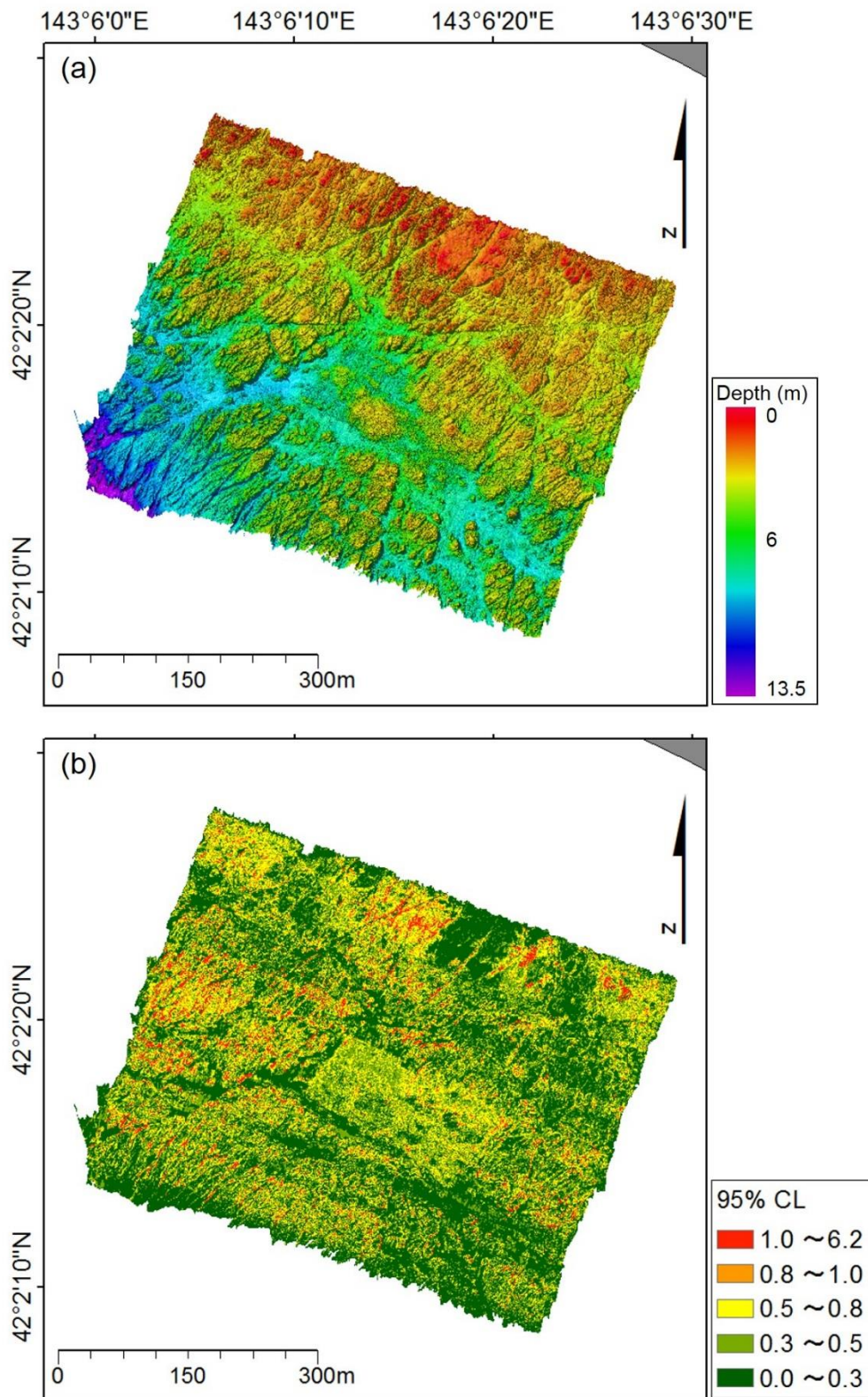


図 3-6. NMBS システムを用いた測量により作成した海底地形図(a)と 95% CL の水平分布図(b)

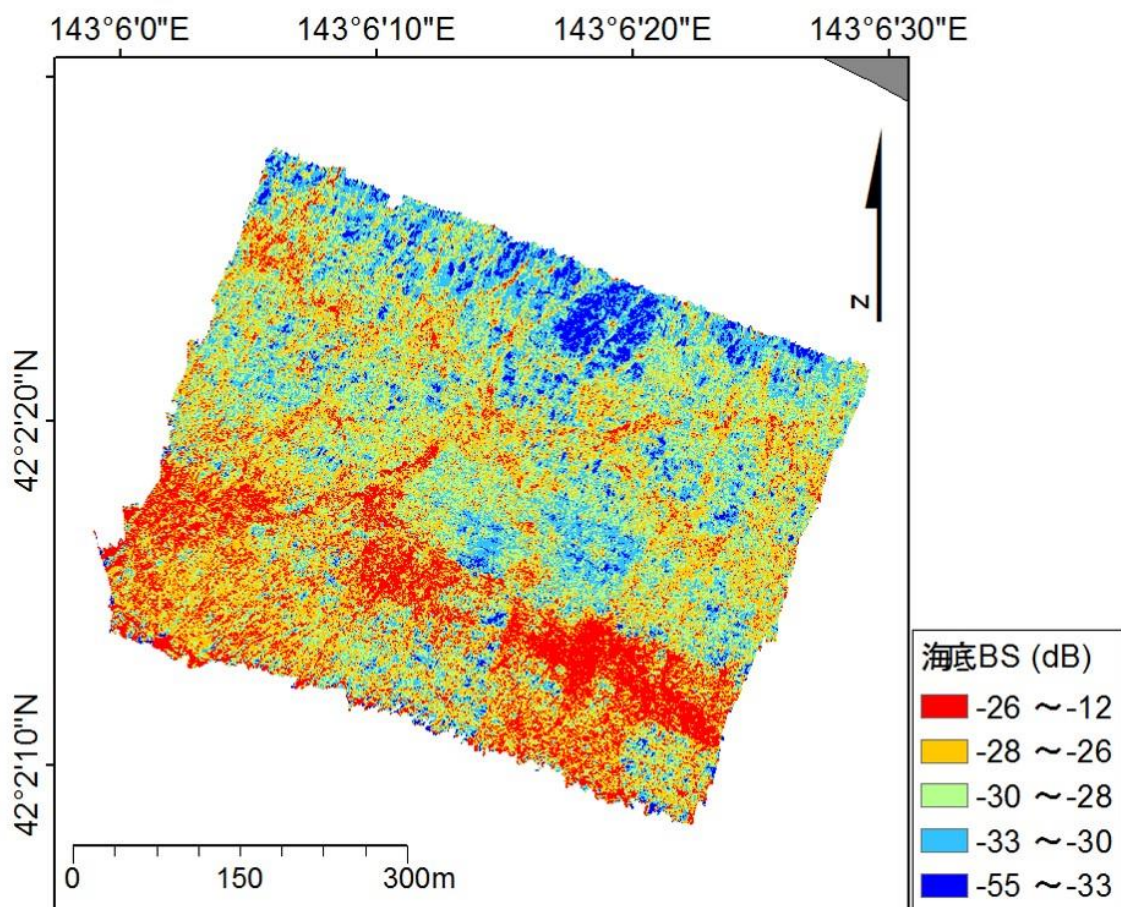


図 3-7. FMGT により作成した海底の後方散乱強度のモザイク図  
 右のカラースケールは 5 段階に色分けした海底の後方散乱強度(海底 BS)である。



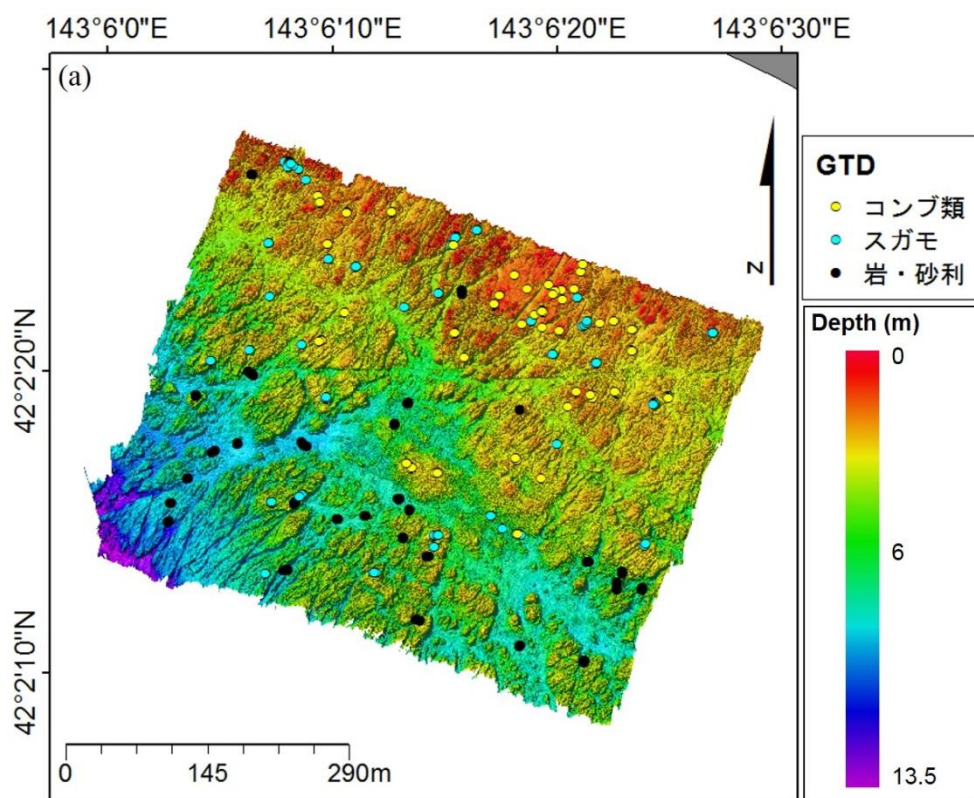


図 3-8. 287 点のグランドトゥルース(GTD)で取得したコンブ類(黄色の点)、スガモ (水色の点)、岩・砂利 (黒色の点) の各地点を海底地形図に示した図(a)と吊り下げた水中カメラで撮影したコンブ(b)、スガモ(c)、岩・砂利(d)の底質の映像の例。

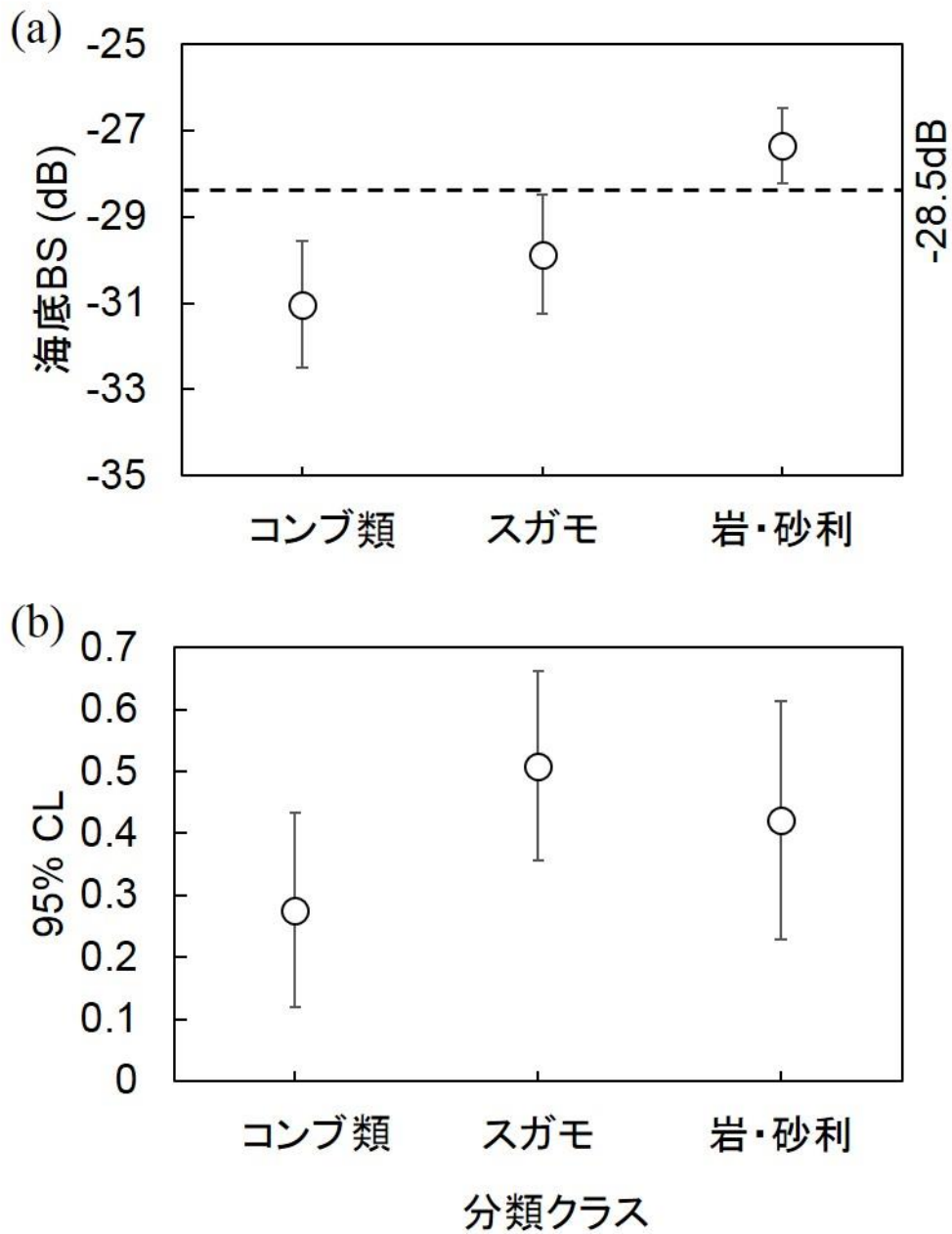


図 3-9. 各クラスの(a)海底からの後方散乱強度の平均値(平均海底 BS)と(b)平均 95% CL  
 図中の縦棒は、標準偏差を示している。海底の後方散乱強度のグラフ中の破線は、  
 コンブ類及びスガモと岩・砂利を分類する閾値(-28.5dB)を示している。

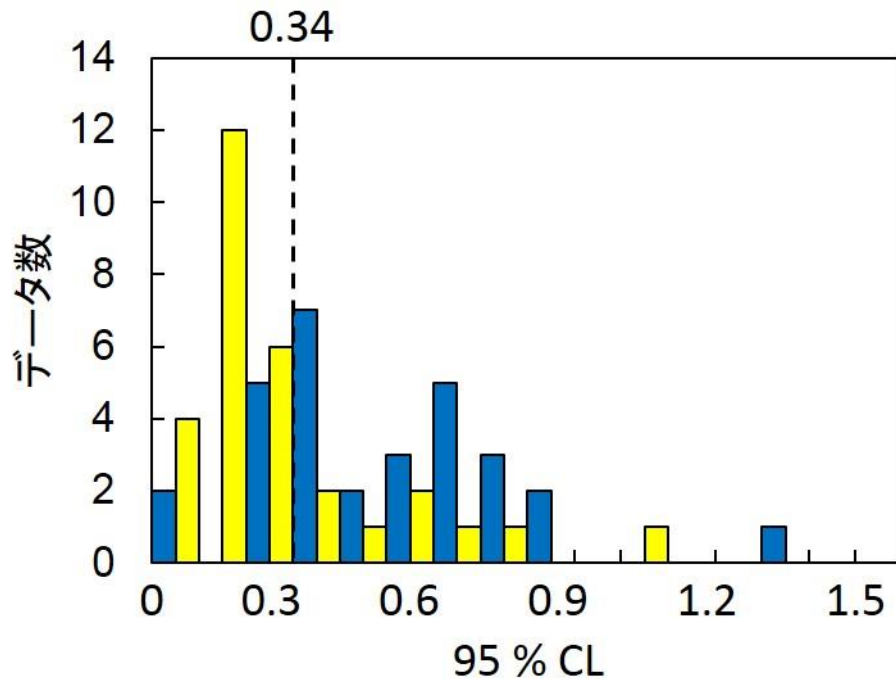


図 3-10. コンブ類（黄色）とスガモ（青色）の 95% CL のヒストグラム。図中の破線はコンブ類とスガモを分類する 95% CL の閾値(0.34)を示す。

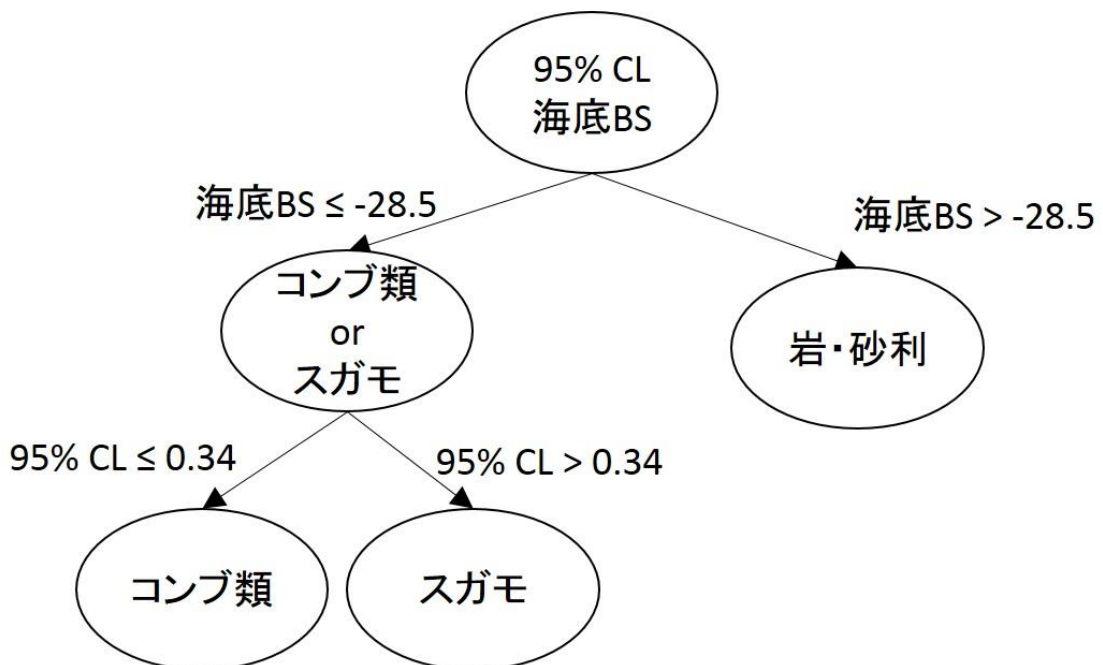


図 3-11. コンブ類、スガモ、岩・砂利にグリッドを分類する決定木

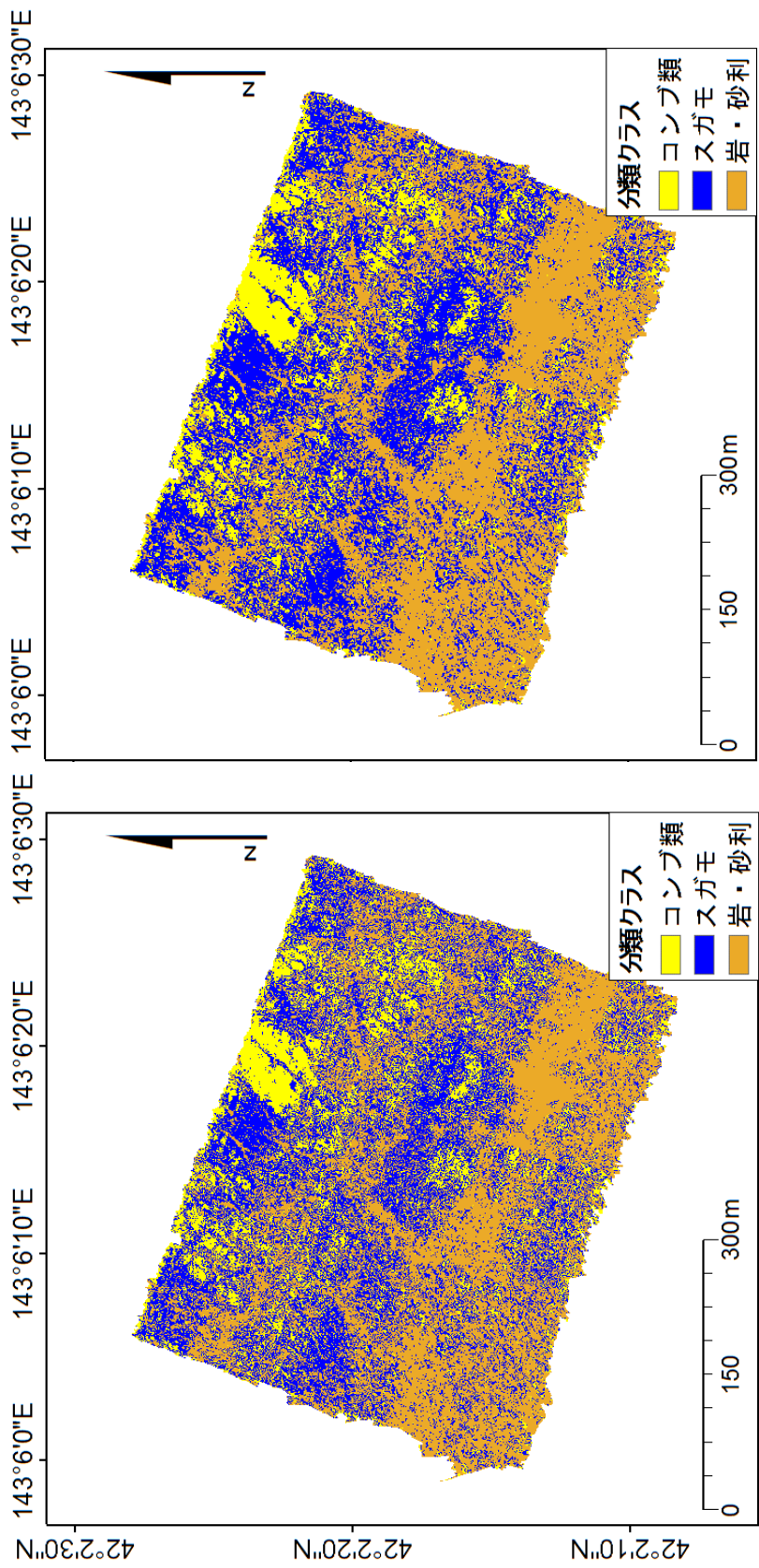


図 3-12. 作成した決定木の判別基準によるハビタットマップ(a)と 3×3 の空間フィルタによりミクセルの影響を低減したハビタットマップ (b)

表 3-1. 調査時の NMBS(Sonic2024)の設定値

周波数 (kHz)	300
出力 (dB)	209
ゲイン (dB)	10
パルス幅 (μsec)	75
スワス幅 (°)	150

表 3-2. 底質の決定木の分類のみによる分類精度(a)と決定木の分類結果に 3x3 の空間フィルターを適用した分類精度(b)

(a) 決定木の分類		参照データ			ユーザー精度(%)
		コンブ類	スガモ	岩・砂利	
分類結果	コンブ類	40	12	1	75
	スガモ	17	33	12	53
	岩・砂利	3	16	63	77
プロデューサー精度(%)		67	54	83	全体精度(%) 69
タウ係数					0.59

(b) 決定木の分類		参照データ			ユーザー精度(%)
		コンブ類	スガモ	岩・砂利	
分類結果	コンブ類	48	7	1	86
	スガモ	9	44	10	70
	岩・砂利	3	10	65	83
プロデューサー精度(%)		80	72	86	全体精度(%) 80
タウ係数					0.72

## 第4章 現存量推定法開発の試み

### 第4.1節 緒言

藻場内部での音波の伝搬に関する理解を深めることは、音響リモートセンシングによる藻場のマッピング性能の向上、さらには密度や現存量などの藻場の繁茂状況の把握にとって重要である(Wilson and Dunton 2009)。

Wilson and Dunton (2006)は、シングルビームのソナーを用いた水槽実験により、*Thalassia testudinum*、*Syringodium filiforme*、*Halodule wrightii*、3種の海草の音響散乱特性を、0.5~2.5kHzの周波数帯で調べ、海草の組織の散乱特性は海水に近く、海草の音響散乱は葉や茎内部の気泡によるものであると報告した。また、Wilson *et al.* (2010)は、正確な海草の音響伝播に関するモデルを構築するためには、気泡だけでなく、海草の組織構造についての理解の必要性を指摘している。Minami *et al.* (2010)は、ホンダワラ類の持つ気胞という器官の後方散乱強度に関して、超音波散乱の理論モデルによる計算結果と水槽実験による計測値を比較し、気胞の音響特性について報告している。これらの研究は、藻場を構成する大型海藻・海草の1個体の音響散乱特性に関する報告であり、藻場という群落を対象としたものではない。藻場からの後方散乱強度に関する知見は、岩、砂、泥などと比較すると極めて少なく、砂や泥に比べ高い後方散乱強度を示すことが報告されている程度である(Lyons and Abrahams 1999, Parnum 2007)。

本章では、知見の少ない藻場からの後方散乱強度に関する知見を得るため、マコンブ(*Saccharina japonica*)とアマモ(*Zostera marina*)を対象とした実験を行った。そして、NMBSにより得られる基礎的な音響的知見をもとに、大型海藻・海草の種判別及び現存量推定法の可能性について検討した。

## 第 4.2 節 材料および方法

マコンブとアマモを対象とした大型海藻・海草の NMBS による後方散乱強度測定実験を、静岡県沼岡市の株式会社沖シーテック所有の海上の計測バージ“SEATEC II”にて実施した(図 4-1)。

### 4.2.1. NMBS による後方散乱強度計測

NMBS から送波された超音波は、海底面で散乱し、一部が NMBS の送受波面に戻ってくる。この送受波面に戻ってくる超音波の散乱強度を後方散乱強度と呼ぶ。NMBS は扇状の広い超音波の送波ビームを送波するため、海底面からの後方散乱強度は、(1)超音波の入射グレーディング角と(2)散乱体の特徴に依存する。さらに、NMBS で計測される後方散乱強度は、NMBS の指向性利得などのソナーシステムの各パラメーターの影響を受ける。ここで、NMBS が受波する超音波のエネルギー(SE: シグナルエクセス)は、ソナー方程式に基づいて、デシベル表記で次の式(4-1)で表すことができる。

$$SE(f, \theta) = SL(f) - 2TL(f, R) + (S_{bn}(\theta) + A_b(R, \tau, \theta_b)) - NL(f) + AG(f) + PG(f, \tau) + C(f) \quad (4-1)$$

ここで、 $S_{bn}(\theta) + A_b(R, \tau, \theta_b)$  は後方散乱項(dB)、すなわち散乱体から得られる超音波のエネルギー強度であり、 $S_{bn}(\theta)$  と  $A_b(R, \tau, \theta_b)$  は、それぞれ、単位面積( $1\text{m}^2$ )当たりの後方散乱強度、散乱断面積( $\text{m}^2$ )のデシベル表記である。 $SL$  は送波レベル(dB)、 $TL$  はソナーの送受波面から海底までの片道伝搬減衰(dB)、 $NL$  は雑音レベル(dB)、 $AG$  は指向性利得(dB)、 $PG$  は受信機の信号処理利得(dB)、 $C$  は補正定数項(dB)、 $f$  は周波数(kHz)、 $\theta$  は入射グレー

ング角( $^{\circ}$ ),  $\theta_b$ はビーム幅( $^{\circ}$ ),  $\tau$ はパルス幅(sec),  $R$ はターゲットまでの距離(m)である。

式(4-1)を後方散乱項の  $S_{bn}(\theta)$  についてまとめると、

$$S_{bn}(\theta) = SE(f, \theta) + 2TL(f, R) + NL(f) - A_b(R, \tau, \theta_b) - (SL(f) + AG(f) + PG(f, \tau)) + C(f) \quad (4-2)$$

となる。ここで、式(4-2)のうち、 $TL(f, R)$ は水温、塩分などの環境データから計算可能であり、 $NL(f)$ は計測することで既知とできる。さらに、 $A_b(R, \tau, \theta_b)$ は散乱断面積であり、ビーム幅とパルス幅、送受波面から散乱体までの距離により計算可能であり、 $SE(f, \theta)$ はNMBSにより得られる計測値である。 $PG(f, \tau)$ については、一般形式として次式により表される(Lurton 2002)。

$$PG(f, \tau) = 5 \log_{10}(Bw \times \tau) \quad (4-3)$$

ここで、 $Bw$ は帯域幅である。

残りの  $SL(f)$ 、 $AG(f)$ 、 $C(f)$ についてはNMBSの設定値及び特性値である。したがって、本研究で使用するNMBSであるSonic2024の特性評価試験を行い、 $SL(f)$ 、 $AG(f)$ 、 $C(f)$ のパラメーターを既知とすることができれば、Sonic2024で計測される $SE(f)$ から式(4-2)を用いることで、散乱体の単位面積当たりの後方散乱強度  $S_b(\theta)$ を得ることができる。

#### 4.2.2. Sonic2024の特性評価試験

特性評価試験は、試験前に較正されたハイドロフォン(TC4035: Reson Inc.)と標準球を用いて実施した。標準球には、計量魚探などの水中音響機器の較正に一般的に使用され



るタングステンカーバイド球(直径 36 mm)を使用した(古澤ら 1995)。

図 4-2 に較正実験の模式図を示す。計測バージの開口部から、Sonic2024 の送受波器を水深 6m に吊り下げ、送受波面から音軸上の 6m 離れた位置にハイドロフォンまたは標準球を設置した。実験中のノイズレベルについては、ハイドロフォンを用いて随時計測を行った。Sonic2024 の周波数は 200、300、380kHz の 3 周波数を選択した。試験項目は次の 3 つである。

- 1) 実効的な送波レベル( $SL(f)$ )の計測: Sonic2024 の送波レベルを制御ソフトにより 200, 209, 215 dB の 3 段階に設定し、実際に出力されている実効的な送波レベルの測定を行った。ここで、実効的な送波レベルは防衛庁規格 Y4301 の次式により求めた。

$$SL(f) = 20 \log_{10}(|V_r/2|) - Md + 20 \log_{10}(R) \quad (4-4)$$

ここで、 $R$ は送受波面とハイドロフォンの器間距離(6m)、 $V_r$ は受信点での波形振幅、 $Md$ はハイドロフォンの受信電圧感度である。

- 2) 指向性利得  $AG(f)$ の評価: Sonic2024 の送受波器を回転装置により 180 度回転させ、標準球の  $SE(f)$ を 256 本の音響ビームにより計測した。計測した各ビームの標準球の  $SE(f)$ の不均一性について評価することで  $AG(f)$ を評価した。
- 3) 補正定数項  $C(f)$ の評価: 標準球のターゲットストレングス(以降 TS)を用いて求めた。使用したタングステンカーバイド球の TS は-40.0dB である。Sonic2024 で計測される標準球からの  $SE(f)$ は、式(4-1)の後方散乱項が TS に置き換わり次式で表される。

$$SE(f, \theta) = SL(f) - 2TL(f, R) + TS - NL(f) + AG(f) + PG(f, \tau) + C(f) \quad (4-5)$$

ここで、試験項目 1 および 2 により、 $C(f)$ 以外の項は既知であるため、式(4-6)より  $C(f)$ を求めることができる。

$$C(f) = SE(f, \theta) - SL(f) + 2TL(f, R) - TS + NL(f) - AG(f) - PG(f, \tau) \quad (4-6)$$

#### 4.2.3. マコンブとアマモの反射強度測定実験

上記の Sonic2024 の特性評価試験の結果をもとに、マコンブ、アマモの定量的な後方散乱強度を計測した。図 4-3 に示すように、マコンブまたはアマモを植付けた土台(図 4-4)を、バージ開口部の両端から水深 3.5m に吊り下げた。土台が水平に設置されているかについては、水準器を用いた潜水作業により確認した。

マコンブとアマモの植え付け密度は 3 段階(高密度、低密度、土台のみ)に設定した。マコンブの植え付けは、土台としたパレット上にマコンブの根をインシュロックタイで固定することで行い、高密度には 6 株、低密度は 3 株とした(図 4-5)。さらに、マコンブが土台からはみ出さないように、ロープにより固定した。アマモの植え付けは 10cm メッシュの 0.6×1m 鉄製の枠に、布を敷き詰め、その上に 2cm メッシュ及び 3cm メッシュの網を取り付け、高密度では 4cm 間隔、低密度では 6cm 間隔で、根をインシュロックで固定し、アマモを植付けた。鉄製の金属枠の後方散乱を抑えるため、アマモを植え付けた金属枠を土台に設置後、金属枠が表面に出ないように布の上に砂をかぶせた(図 4-6)。

Sonic2024 の送受波器は水深 1.2m に設置し、送受波器の位置を移動させることで、入射グレーティング角を 90°から 21°まで変化させながら後方散乱強度の計測を行った(図 4-3)。実験時の Sonic2024 のピングレートなどの設定値は表 4-1 の通りである。Sonic2024 で計測されるウォーターカラムイメージ(WCI)は、Open ソースのパケットキャプチャソ

ソフトウェアである Wireshark (<https://www.wireshark.org/download.html>, 取得日 2015 年 4 月 15 日)により収録した。WCI データは、各入射グレーディング毎に 1 分間計測した。実験終了後、マコンブとアマモの乾重量を実験室にて計測し、単位面積当たりの乾重量 ( $\text{kg/m}^2$ )を求めた。

#### 4.2.4. WCI データの解析方法

マコンブとアマモの後方散乱強度は、Wireshark により収録した WCI データから次の手順により解析した。まず、評価対象となるビームについて、試料(マコンブまたはアマモ)と土台の反応の範囲から  $SE(f)$  のピーク値を検出する。その後、超音波ビームのサイドローブの影響やノイズを除去するため、ピーク値から 24dB を差し引いた  $SE(f)$  値を閾値として、試料と土台の反応から  $SE(f)$  を抽出した(図 4-7)。ここで、 $SE(f)$  のピーク値からの下げ幅である 24dB は、Sonic2024 の特性評価の結果から評価した Sonic2024 の超音波ビームのメインローブとサイドローブの結果から得た。抽出した  $SE(f)$  の積分値を式(4-2)に代入した。そして、積分範囲の中間位置での散乱断面積  $A_b(R, \tau, \theta_b)$  を式(4-6)により求め、式(4-2)に代入し、単位面積当たりの後方散乱強度  $S_{bn}(\theta)$  を求めた。

$$A_b(R, \tau, \theta_b) = 10 \log_{10} \left( \frac{C\tau}{2} \Phi R \right) \quad (4-6)$$

ここで、 $C\tau$  はパルス幅、 $\Phi$  はビーム幅であり、次式により求められる。

$$10 \log_{10} \Phi = 10 \log_{10} \frac{\lambda}{2\pi l} \quad (4-7)$$

ここで、 $\lambda$ は波長、 $l$ は送波器の実効アレイ長である。Sonic2024の実効アレイ長は0.375mである。

上記の手順でピング毎に  $S_{bn}(\theta)$ を求め、1分間の計測で得られた平均  $S_b(\theta)$ と入射グレンジング角との関係について調べた。

ここで、式(4-2)で得られる  $S_{bn}(\theta)$ は、土台も含めた後方散乱強度データであるため、密度との関係を調べるために、次式により土台のみの後方散乱強度を差し引き、マコンブとアマモのみの後方散乱強度を求めた。

$$S_{bt}(\theta) = 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{S_{bn}}{10}} - 10^{\frac{S_{b0}}{10}} \right) \quad (4-8)$$

ここで、 $S_{bt}(\theta)$ は、マコンブまたはアマモのみの後方散乱強度、 $S_{bn}(\theta)$ は式(4-2)より得られた土台も含めた後方散乱強度、 $S_{b0}(\theta)$ は土台のみの後方散乱強度である。

式(4-8)で得られた  $S_{bt}(\theta)$ とマコンブ、アマモの密度(単位面積当たりの乾重量(kg/m<sup>2</sup>))の間には、次式の関係があると考えられる。

$$S_{bt}(\theta) = TS(\theta) + 10 \log_{10}(W) \quad (4-9)$$

ここで、 $TS(\theta)$ はマコンブ、アマモの単位重量(1kg)あたりの後方散乱強度、 $W$ は単位面積当たりの乾重量(kg/m<sup>2</sup>)である。

## 第 4.3 節 結果

### 4.3.1. 特性評価試験

計測した実効的な送波レベルは、200、300、380kHz の 3 周波数で、制御ソフトの設定値よりおよそ 5 から 6dB ほど高いことが明らかとなった(図 4-8)。また、送波レベルの設定値と計測値については正の相関があった。この結果から、マコンブとアマモの後方散乱強度計測では、式(4-2)の送波レベル  $SL(f)$  について、制御ソフトの設定値に対して 200kHz で 6.5dB、300kHz で 5.6dB、380kHz で 4.8dB のオフセット値を加えることで正確な値にすることができる。今回の実験では、正確な送波レベルに補正して実験を行った。

標準球の  $SE(f)$  のビーム角に対する相対的な変化  $AG(f)$  を、マコンブとアマモの後方散乱強度を評価するビームのビーム角での  $AG(f)$  を指向性利得とし、マコンブとアマモの後方散乱強度を求めた (図 4-9)。

式(4-5)により評価した補正定数項  $C(f)$  は、200kHz で 55.3dB、300kHz で 58.7dB、380kHz で 64.9dB であった。

### 4.3.2. マコンブとアマモの後方散乱強度測定実験

上記の特性評価試験の結果を基に、式(4-2)より、土台も含めたマコンブとアマモの単位面積当たりの後方散乱強度  $S_{bn}(\theta)$  を求めた(図 4-10)。この結果、マコンブの  $S_{bn}(\theta)$  は、入射グレーディング角が 90° から 70° の範囲で、土台のみの値と差があり、さらに、マコンブの密度が高いほど、 $S_{bn}(\theta)$  も高くなる傾向がみられた。入射グレーディング角が 70° よりも低い領域では、マコンブと土台のみの  $S_{bn}(\theta)$  に大きな差は見られなかった(図 4-10)。

アマモの  $S_{bn}(\theta)$  は、入射グレージング角が  $50^\circ$  から  $30^\circ$  の範囲で土台のみの値と差があった(図 4-10)。しかし、マコンブとは異なり、密度との関係性は見られず、 $380\text{kHz}$  では、入射グレージング角  $40^\circ$  で低密度の方が高密度より高い  $S_b(\theta)$  を示していた。

マコンブとアマモの  $S_{bn}(\theta)$  と土台に取り付けた密度との関係についてより詳しく調べるため、土台のみの  $S_{bo}(\theta)$  と差があった入射グレージング角範囲の  $S_{bn}(\theta)$  の平均値と、計測により得られた単位面積当たりの乾重量(マコンブ: 高密度  $2.91\text{kg/m}^2$ 、低密度  $0.98\text{kg/m}^2$ ; アマモ: 高密度  $3.62\text{kg/m}^2$ 、低密度  $2.06\text{kg/m}^2$ )を比較した(図 4-11)。入射グレージング角範囲  $90^\circ$  から  $70^\circ$  のマコンブの平均  $S_{bn}(\theta)$  は、全ての周波数で、高密度の方が高かった。高密度と低密度の差は、 $200$ 、 $300$ 、 $380\text{kHz}$  のそれぞれで、 $1.4$ 、 $4.1$ 、 $3.4\text{dB}$  であり、 $300\text{kHz}$  で最も大きかった。アマモについては、入射グレージング角  $50^\circ$  から  $30^\circ$  では、 $200$ 、 $300\text{kHz}$  では高密度、低密度による差はほとんどなく、 $0.5\text{dB}$  以下であった。一方で、 $380\text{kHz}$  では高密度より低密度の方が高く、その差は  $5.9\text{dB}$  であった。

以上の結果より、土台も含めたマコンブとアマモの平均  $S_{bn}(\theta)$  は、マコンブについては密度との間に関係性が見られたが、アマモについては見られなかった。そこで、マコンブの平均  $S_{bn}(\theta)$  から、入射グレージング角範囲  $90^\circ \sim 70^\circ$  の土台のみの平均  $S_{bo}(\theta)$  を差し引いた値を式(4-8)より求め、式(4-9)からマコンブの単位重量あたりの後方散乱強度  $TS(\theta)$  を低密度、高密度、それぞれで求めた。高密度から求められた  $200$ 、 $300$ 、 $380\text{kHz}$  の  $TS(\theta)$  は、それぞれ、 $-19.9$ 、 $-26.8$ 、 $-20.8\text{dB}$  であった。低密度から求められた  $200$ 、 $300$ 、 $380\text{kHz}$  の  $TS(\theta)$  は、 $-16.9$ 、 $-27.3$ 、 $-20.2\text{dB}$  であった。

#### 第 4.4 節 考察

これまで、大型海藻・海草が作り出す藻場という群落からの後方散乱強度については、フィールド調査で得られた知見のみであった(e.g. Parnum 2007)。特に、藻場の後方散乱

強度について、入射グレージング角と密度の関係について調べた研究は少ない。

Lyons and Abraham (1999)は 80kHz のシングルビームエコーサウンダーを用いて、*Posidonia oceanica* (L.)の藻場の後方散乱強度の計測を入射グレージング角 80°から 10°の範囲で行った。その結果、藻場の後方散乱強度は砂や泥より強いという報告をしている。この知見は、その他のいくつかの研究(e.g. Parnum 2007, De Falco *et al.* 2010, Tecchiato *et al.* 2015)でも報告されている。しかし、上記の研究では密度との関係については調べていなかった。

本研究では、マコンブとアマモを土台に植え付け、人工的に繁茂状況を再現した状態で後方散乱強度と入射グレージング角及び密度との関係について調べた。その結果、後方散乱強度と入射グレージング角の関係を利用することで、マコンブとアマモを判別できる可能性が示唆された。マコンブは入射グレージング角が高い範囲(90°~70°)で、アマモでは入射グレージング角が低い範囲(50°~30°)で土台のみの後方散乱強度との間に差があった。これは、マコンブについては、藻体が寝ており、表面も滑らかであるため、超音波の散乱は鏡面反射が主であり、低入射グレージング角では、送受波器方向への後方散乱はほとんど発生していなかったためと考えられる。一方で、アマモについては、草体が立ち上がっていることから、高入射グレージング角の範囲よりも低入射グレージング角の範囲において、アマモからの体積散乱成分が大きくなっているためだと考えられる。

密度との関係では、マコンブについて入射グレージング角 90°から 70°の範囲の平均後方散乱強度を用いることで密度推定できる可能性が示された。一方で、アマモの後方散乱強度については密度との関係が見られなかった。

ここで、アマモについて、土台のみの後方散乱強度と差のあった入射グレージング角 50°から 30°の範囲の平均後方散乱強度に密度との関係が見られなかったことについて考察する。図 4-12 は、入射グレージング角 60°でのアマモの後方散乱強度計測時の WCI

画像である。図 4-12 では、アマモの下に存在するはずの土台からの超音波の反射をほとんど確認できない。つまり、今回、実験したアマモの密度(高密度  $3.62 \text{ kg/m}^2$  低密度  $2.06 \text{ kg/m}^2$ )では、低入射グレージング角範囲において、Sonic2024 の送受波器から発信された超音波ビームは土台まで達しておらず、アマモ草体や茎内部の気泡、光合成により発生した葉表面に付着している気泡により超音波の全反射が発生していると考えられる。特に、 $380\text{kHz}$  では、低密度の方が高密度よりも高い後方散乱強度を示しており、これは、低密度において、 $380\text{kHz}$  周辺で共振現象を発生させるような大きさの気泡が存在していた可能性を示している。しかし、本実験では、対象として用いたアマモの茎内部の気泡や光合成により発生する葉表面の気泡については調べていないため、今後検討する必要がある。また、高密度および低密度として設定したアマモの分布密度は、一般的なアマモの密度よりもかなり高い可能性がある。現実には、このような高密度のアマモ場は少ないと思われるため、さらに低い密度での実験を行う必要があるだろう。

一方で、マコンブについては、求められた後方散乱強度はすべての周波数で高密度の方が低密度よりも高かった。式(4-9)により推定されたマコンブの単位重量あたりの後方散乱強度  $TS(\theta)$  は、 $200\text{kHz}$  では高密度と低密度の間に約  $3\text{dB}$  の差があったが、 $300\text{kHz}$  と  $380\text{kHz}$  では高密度と低密度との間に大きな差は無かった( $0.6\text{dB}$  以下)。 $200\text{kHz}$  で他の周波数と異なる結果が得られた原因としては、土台を含むマコンブからの後方散乱強度の高密度と低密度の差が約  $1.4\text{dB}$  しかなかったことから、低密度の方に、 $200\text{kHz}$  において共振の影響を及ぼす気泡がマコンブの葉の表面や茎内部に存在していた可能性が考えられる。

しかし、 $300$ 、 $380\text{kHz}$  については式(4-8)により得られたマコンブのみの単位面積当たりの後方散乱強度( $\text{dB}$ )と計測により得られたマコンブの単位面積当たりの乾重量( $\text{kg/m}^2$ )の間に関係性があった。さらに、式(4-9)により推定されたマコンブの単位重量当たりの後方散乱強度は高密度と低密度のそれぞれで求めた結果、両者ともほぼ同じ値を



示した。この結果より、300kHz と 380kHz で得られる  $SE(f)$  から式(4-2)と(4-8)によりマコンブの単位面積当たりの後方散乱強度  $S_{bt}(\theta)$  を求め、式(4-9)により得られる単位重量当たりの後方散乱強度  $TS(\theta)$  を  $S_{bt}(\theta)$  から差し引くことで、マコンブの単位面積当たりの乾重量、すなわち現存量( $\text{kg}/\text{m}^2$ )を求めることができる。

現場調査においては、次の手順によりマコンブの現存量( $\text{kg}/\text{m}^2$ )及び海域全体のマコンブの総重量( $\text{kg}$ )を推定できると考えられる。

1. まず、調査海域におけるマコンブの分布域を判別する。
2. 次に、マコンブと判別された領域における NMBS で収録される WCI データから入射グレーディング角  $90^\circ \sim 70^\circ$  でのマコンブの単位面積当たりの平均後方散乱強度  $S_{bt}(\theta)$  を式(4-2)と(4-8)により求める。ここで、マコンブは岩場に繁茂するため、式(4-8)では岩場のみの単位面積当たりの平均後方散乱強度  $S_{bt}(\theta)$  が必要となるが、調査海域で岩場と判別された領域の入射グレーディング角  $90^\circ \sim 70^\circ$  範囲の平均  $S_{bt}(\theta)$  を求めることで得ることができる。
3. 坪狩りにより得られたマコンブの単位面積当たりの重量( $\text{kg}/\text{m}^2$ )を使い、式(4-9)により現場海域でのマコンブの単位重量当たりの後方散乱強度である  $TS(\theta)$  を求める。
4. 手順 2. で得られたマコンブの平均  $S_{bt}(\theta)$  と手順 3. で得られたマコンブの  $TS(\theta)$  により次式により現存量( $\text{kg}/\text{m}^2$ )を推定する。

$$10 \log B_0 = Ave\_S_{bt}(\theta) - TS(\theta) \quad (4-10)$$

ここで、 $B_0$  は現存量( $\text{kg}/\text{m}^2$ )、 $Ave\_S_{bt}(\theta)$  は手順 1 でマコンブと判別された領域全体で得られた入射グレーディング角範囲  $90^\circ \sim 70^\circ$  の平均  $S_{bt}(\theta)$  である。

さらに調査海域全体のマコンブの総重量( $\text{kg}$ )は次式により得られる。

$$B_T = B_0 \times A \quad (4-11)$$

ここで、 $B_T$ は総重量(kg)、 $A$ は手順 1.で得られたマコンブの総面積(m<sup>2</sup>)である。  
手順 1.でのマコンブの分布域の推定では、第 3 章で開発した手法をマコンブに応用することで可能と考えられる。また、本実験で得られたマコンブの後方散乱強度と入射グレンジング角との関係も利用することでより精度の高い分類が可能となると考えられる。



図 4-1. NMBS を用いた Sonic2024 およびコンブとアマモの音響特性計測に使用した株式会社 OKI シーテック所有の海上の計測バージ (URL: <http://www.seatec.jp/>)

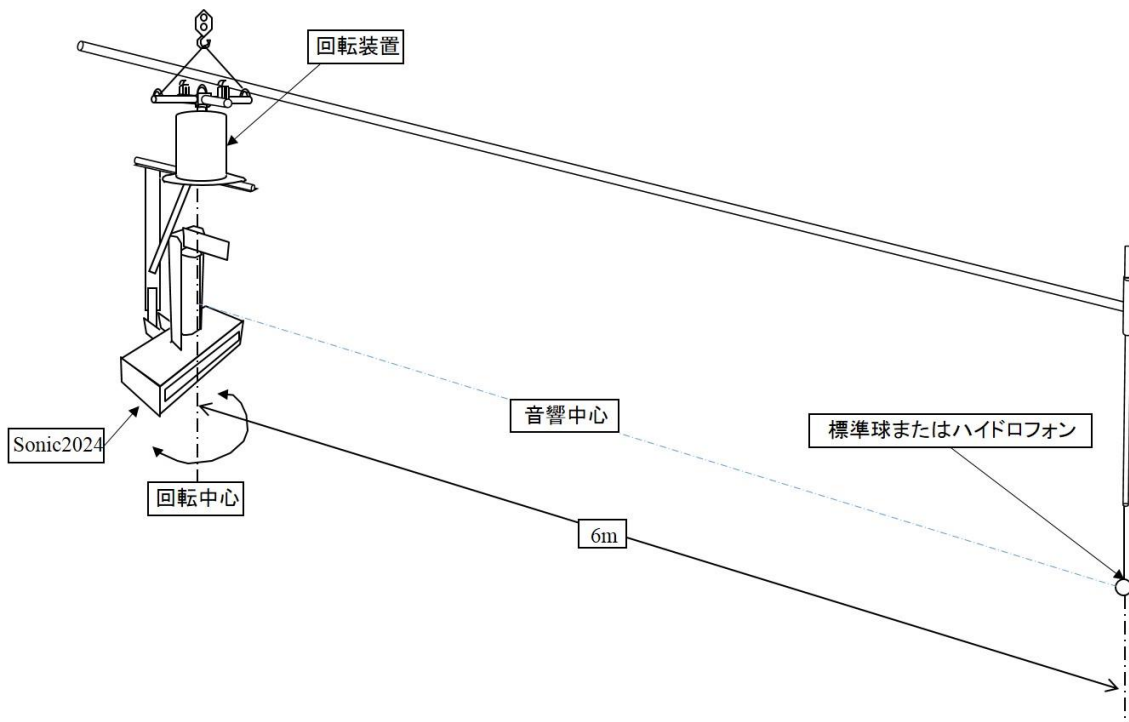


図 4-2. NMBS(Sonic2024)の特性評価試験の模式図。送波器の表面が回転装置の中心とし、標準球とハイドロフォンは Sonic2024 の音響中心の軸上になるよう設置。

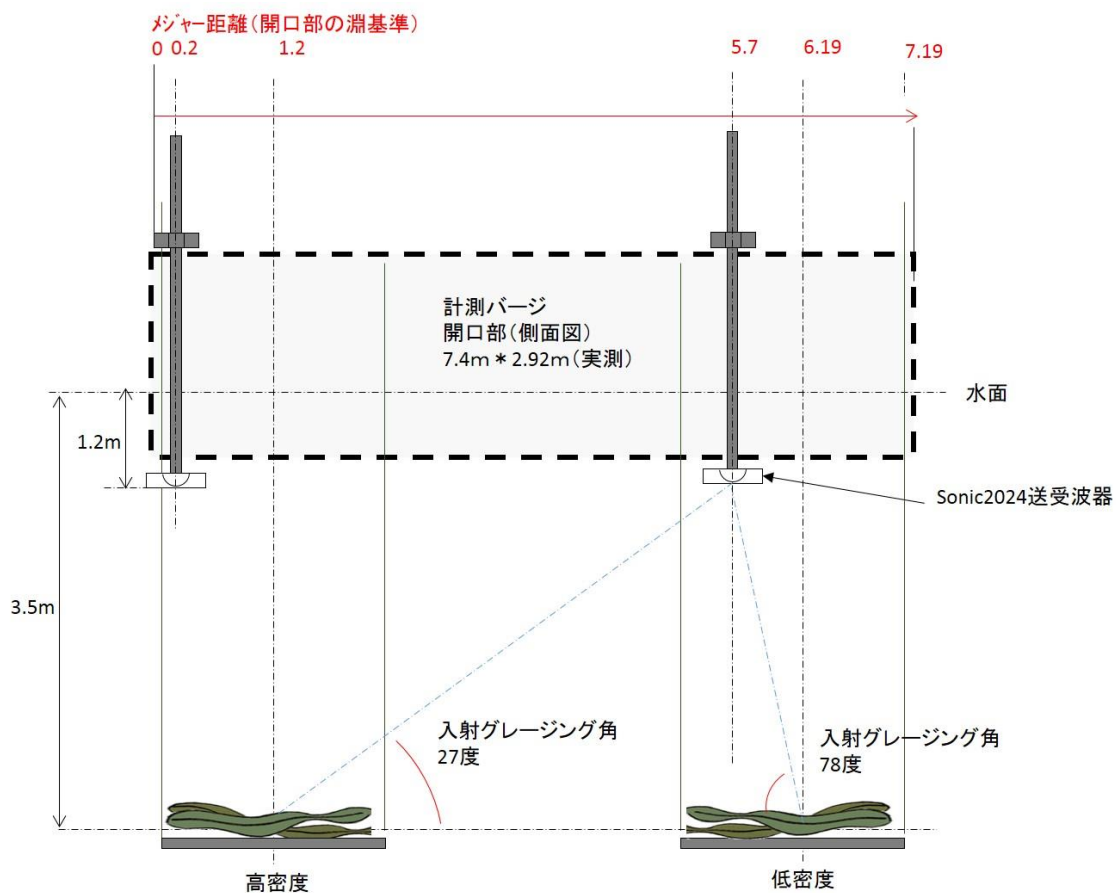


図 4-3. マコンブの後方散乱強度測定実験の模式図。マコンブを取り付けた土台を高密度、低密度の 2 段階の密度に分け、計測バージ開口部の両端にロープで固定し、送受波器を計測バージ開口部の端から移動させることで、超音波の土台への入射グレージング角を変化させた。

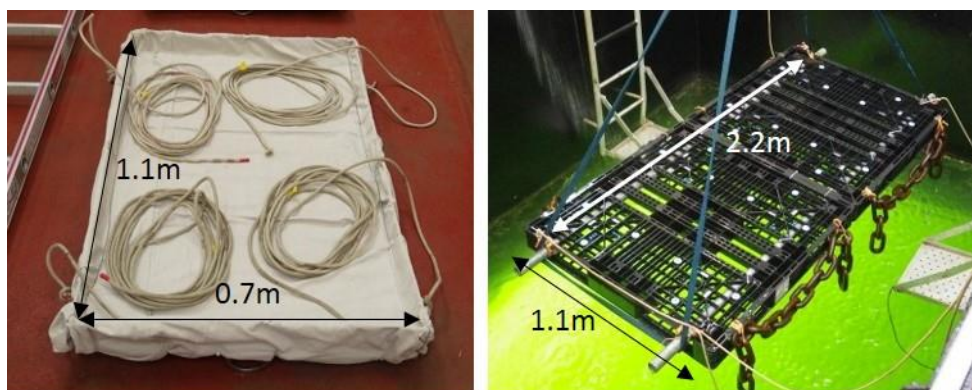


図 4-4. アマモ (左図) とマコンブ (右図) の植え付けに使用した土台右写真



図 4-5. マコンブの土台への植え付け(低密度: 3 株)。黄色の点線で囲った部分は 1 株分のマコンブ、赤枠で囲った部分はマコンブの根の部分でインシュロックタイで土台に固定した。

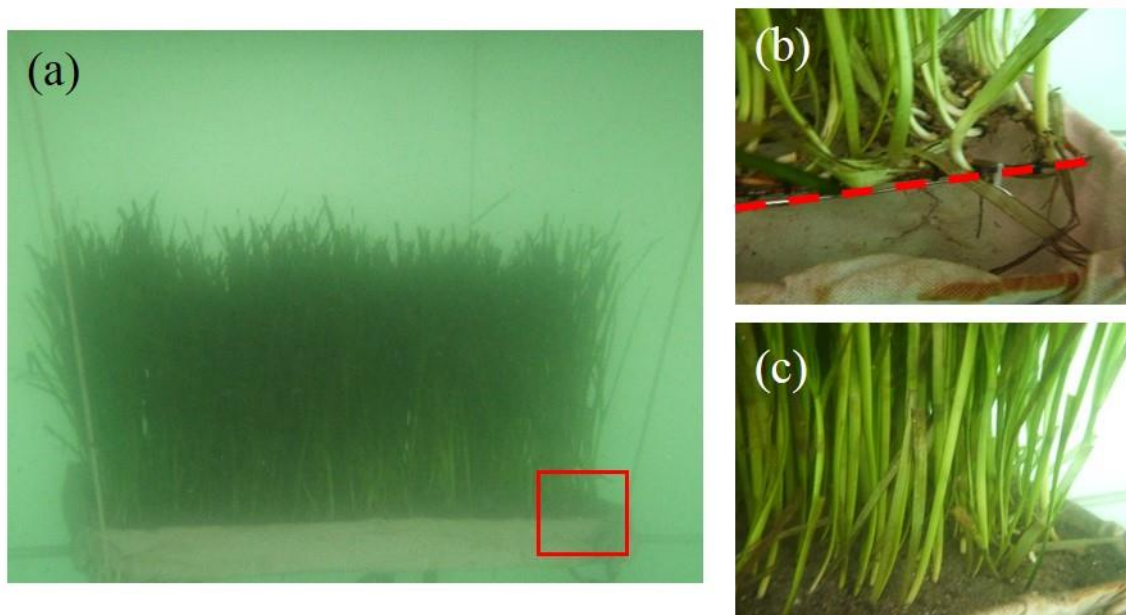


図 4-6. 土台に植付けた高密度アマモの全体写真(a)、砂をかぶせる前の(a)の赤枠で囲った部分の拡大写真(b)、砂をかぶせた後の(a)の赤枠で囲った部分の拡大写真(c)。(b)の写真中の赤点線はアマモを取り付けた 10cm メッシュの鉄棒。

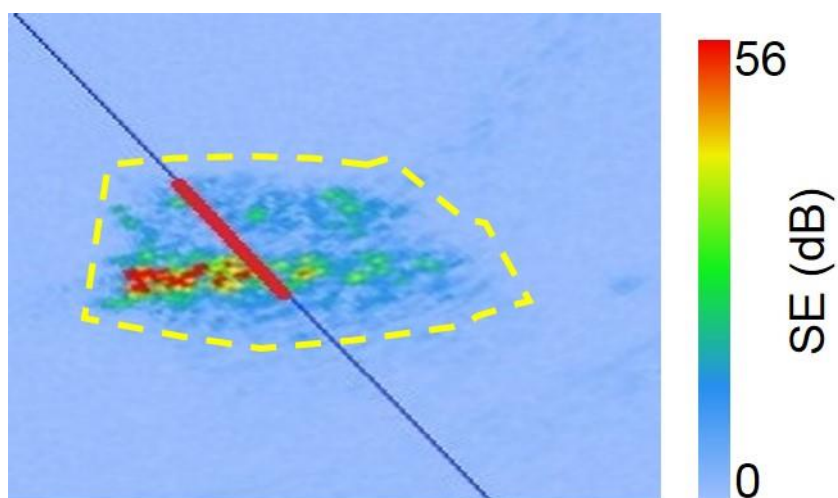


図 4-7. 低密度アマモの後方散乱強度計測時の Sonic2024 で収録された WCI データの一例。

黄色の破線で囲った部分はアマモと土台からの反応を、図中の黒線は評価対象となるビームを、赤線で示している範囲は後方散乱強度を計算した  $SE(A)$  の積分範囲を示す。

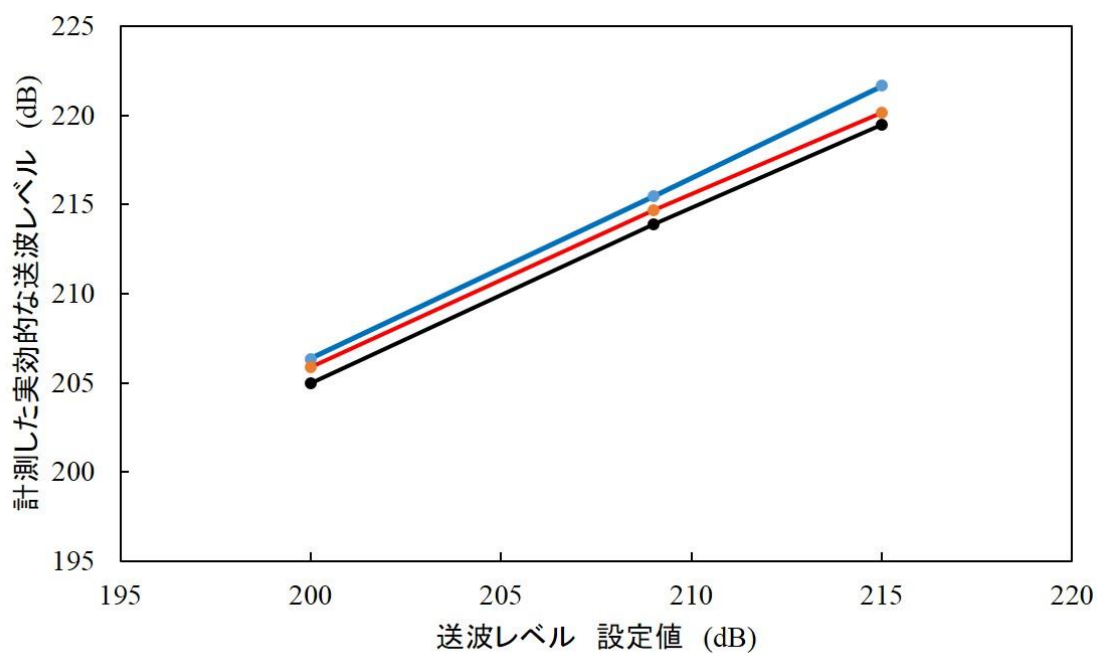


図 4-8. Sonic2024 の送波レベルの制御ソフトでの設定値とハイドロフォンにより計測した実効的な送波レベルの関係。青、赤、黒の線は、それぞれ、200、300、380kHzの結果を示す。

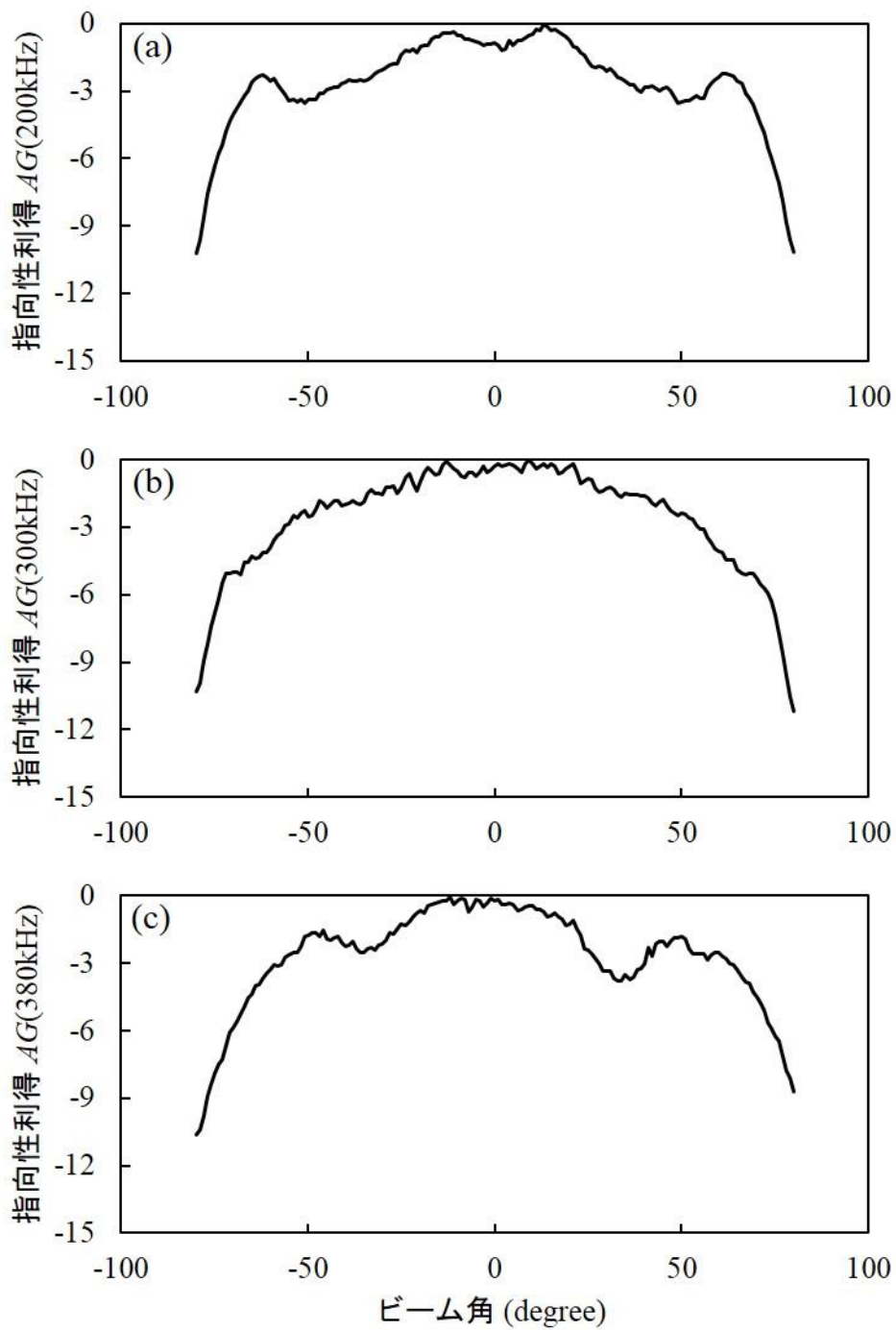


図 4-9. Sonic2024 の 200kHz,(a)、 300kHz,(b)、 380kHz(c)の周波数により 256 本のビームで計測された標準球の  $SE(\theta)$ のビーム角に依存する指向性利得( $AG(\theta)$ )の変化。

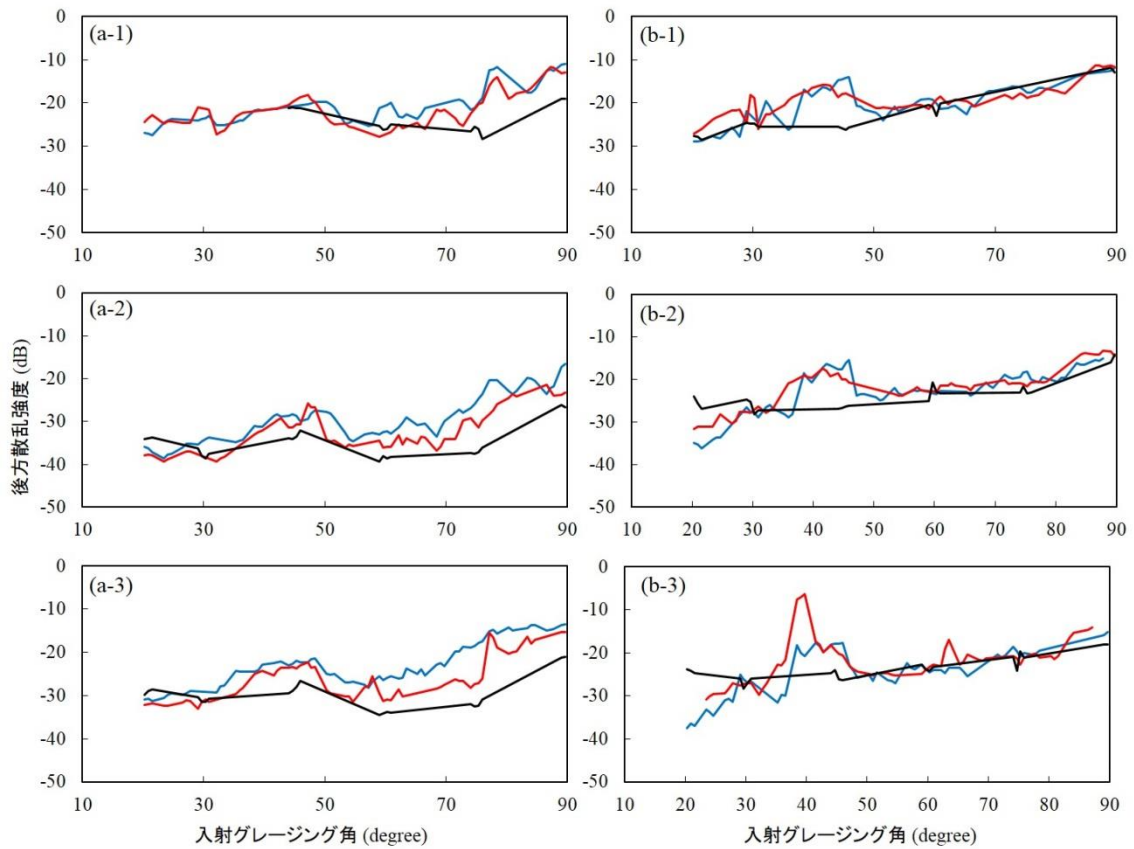


図 4-10. マコンブ(a-1 から 3)とアマモ(b-1 から 3)の単位面積当たりの後方散乱強度  $S_{bm}(\theta)$  と入射グレイジング角との関係で、(a-1)と(b-1)は 200kHz、(a-2)と(b-2)は 300kHz、(a-3)と(b-3)は 380kHz の結果でを示す。青、赤、黒の線は、それぞれ、高密度、低密度、土台のみの後方散乱強度。

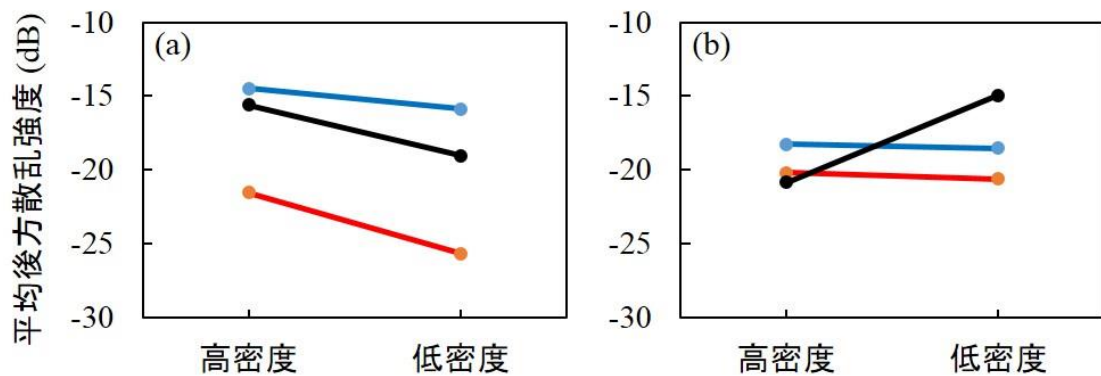


図 4-11. 土台のみの後方散乱強度と差のあった入射グレイジング角範囲である  $90^\circ$  から  $70^\circ$  マコンブ(a)と  $50^\circ$  から  $30^\circ$  のアマモ(b)の平均後方散乱強度の平均値と密度との関係  
青、赤、黒の線は、それぞれ、200、300、380kHz の結果を示す。



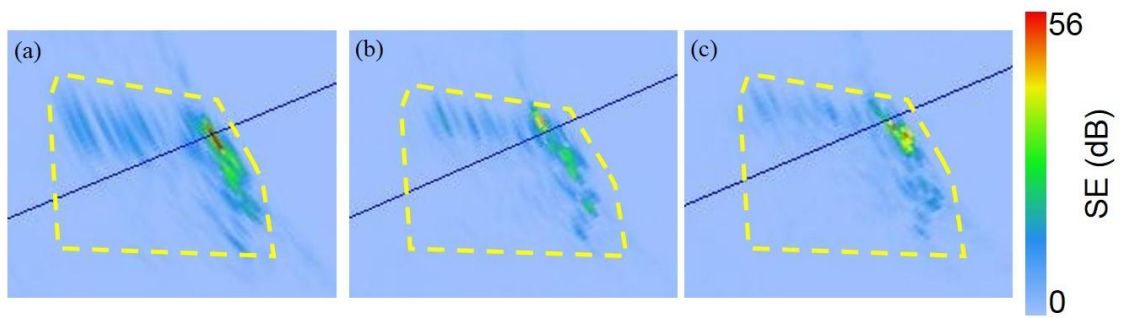


図 4-12. アマモ計測中の 200kHz (a)、300kHz (b)、380kHz (c)の WCI データの一例。黄色の破線で囲った範囲がアマモと土台の反応で、青線は入射グレーディング角  $60^\circ$  のビームを示している。

表 4-1. マコンブ(a)とアマモ(b)の後方散乱強度計測実験時の Sonic2024 の設定

(a)

周波数 (kHz)	200, 300, 380
出力 (dB)	209
ゲイン (dB)	5
パルス幅 (μsec)	50
スワス幅 (°)	160

(b)

周波数 (kHz)	200, 300, 380
出力 (dB)	200
ゲイン (dB)	5
パルス幅 (μsec)	50
スワス幅 (°)	160

## 第5章 総合考察

近年の水中音響機器の発展に伴い、本研究で使用した NMBS の性能は格段に向上した。さらにコンピューターの発展は、従来では処理できなかった大容量のデータ収録・処理を可能とし、NMBS で収録される測深データのリアルタイムでの処理や数百本の超音波ビームの後方散乱強度の収録も可能となってきた(Lurton 2002, Mayer 2006)。本研究では、最新の NMBS を利用し、音響リモートセンシングによる藻場の定量的なマッピング手法の開発に取り組んだ。

第1章で述べたとおり、藻場のマッピング・モニタリングにおける音響リモートセンシングの有効性については、これまでにいくつかの論文で報告されている(e.g. Komatsu *et al.* 2003a and b)。しかし、未だ多くの課題が残されており、発展途上である。そこで、本研究では、NMBS による藻場マッピング手法の課題に取り組み、NMBS で収録される測深データによる藻場の3次元マッピングおよび効率的な藻場マッピング手法の開発(第2章)、藻場の種類判別に関する手法の開発(第3章)、そして、大型海藻・海草の現存量推定法について検討した(第4章)。本章では、音響リモートセンシングによる藻場マッピングの今後の展開について検討する。

### 1. 藻場の3次元マッピング手法について

本研究では、NMBS で収録される測深点のうち、海底から立ち上がった一塊をウガノモク1本と判断し、ガラモ場の三次元マップの作成及びガラモ場の面積、密度(本/m<sup>2</sup>)の推定を行い、3次元マップの精度については、潜水により撮影された水中写真と3次元マップとの定性的な比較により行った。作成した3次元マップと水中写真は非常によく一致しており、ガラモ場の空間的な分布の視覚化に成功していたと考えられる。

ガラモ場は、小型魚類や草食性動物が餌場や産卵場として利用している(Murase *et al.*

2000)。また、ガラモ場の空間的な複雑性は、生息する魚類の種多様性とも関係があると報告されている(小路 2009)。本研究で開発した3次元マッピング手法は、藻場のマッピング・モニタリングのみならず、藻場の生態学的研究、例えば、魚類分布とガラモ場の空間的な複雑性の関係の調査にも役立てることができる可能性がある。

## 2. 効率的な藻場のマッピング手法の開発について

水路測量用ソフトウェア(e.g. Hypack, QINSy)は、現場調査での NMBS のデータ収録と同時にリアルタイムで測深データの処理が行われる。この特徴を利用し、リアルタイムでのマッピングを可能とする効率的な藻場マッピング手法の開発を行った。対象としたタチアマモは、草丈が4mから7mまでに達する世界最大の海草と呼ばれている種である(相生ら 1996)。したがって、草丈の短い海草藻場を対象とした場合の本手法の有効性については検討する必要がある。海草藻場の代表的な構成種はアマモ類であり(環境省 1994)、アマモ類は茎内部に気泡を持つことが知られている。そのため、草丈が短い場合でも、アマモ類の草体からの超音波の反射が測深点として収録されることが十分考えられる。

また、NMBS で作成される海底地形図の95%CL(2×標準偏差)と測深幅は、水中カメラで得られたタチアマモの密度と正の相関関係があることが示唆された。今後、坪狩りにより得られた藻場の密度と、海底地形図の95%CL(2×標準偏差)や測深幅との関係を詳しく調べることにより、平坦な砂地に繁茂するアマモ場において、測深データによる現存量推定が可能となるかもしれない。

## 3. 藻場の種類判別手法について

水産上重要な漁業資源であるコンブ類を対象に、藻場の種類判別手法の開発を行い、NMBS で得られる海底の後方散乱強度と海底地形図の95%CL(2×標準偏差)を利用することで、同じ岩礁域に繁茂するコンブ類とスガモを分離識別することができた。さらに、決定木による分類結果に、対象グリッドの周辺3×3グリッドの情報を利用した空間フィ

ルターを適用することで、ミクセルの影響を低減させることに成功し、分類精度も全体精度で 87.8%と高い分類精度を示した。

藻場の種類判別の対象として、水産上の重要性からコンブ類に着目し、コンブ類とスガモの分離識別を行った。北海道では、コンブ漁場造成のための漁業者や漁協主体の取り組みが行われている(北海道水産業改良普及職員協議会 2006)。本研究で開発した手法は、漁期前や漁期後のコンブ漁場の分布把握に活用できるため、コンブ類の資源管理に有効に活用できると考えられる。

#### 4. 大型海藻・海草の現存量推定法について

マコンブとアマモを対象とした実験により、マコンブについて、NMBS で得られる後方散乱強度により現存量推定に関する手順を確立することができた。ここで、検討した現存量推定の手順について、本研究では、現場調査に適用することはできなかった。

ここで、現場調査においては、波や風による背景雑音やマコンブの藻体自体が波により動くということが考えられ、これらが現存量推定の精度に影響を与えることが予想される。今後、現場調査により得られた NMBS データについて、本実験で確立した現存量推定の手順を適用し、その有効性について検討することが必要である。

以上、本研究では、これまで、音響リモートセンシングにおける藻場マッピングに関する課題に取り組み、藻場の保全に必須の情報(藻場の空間分布、種類判別、現存量)を提供できる手法を開発したものであり、水産資源上、保全生態学上、意義のあるものと考えられる。今後も、本章で指摘したような新たな課題、特に、現存量推定法の現場調査への適用について取り組み、より実用的な NMBS による藻場のマッピング・モニタリング手法の開発を行っていく予定である。

## 謝辞

本研究をまとめるにあたり、東京大学大学院農学生命科学研究科の小松輝久准教授には、本研究を始めるきっかけを与えてくださるとともに、博士課程の3年間に渡って指導教員として熱心かつ温かいご指導・ご鞭撻をいただきました。厚く御礼申し上げます。また、東京大学大学院農学生命科学研究科の山川卓准教授、東京大学大気海洋研究所の伊藤進一教授、東海大学海洋学部の千賀康弘教授及び水産大学校海洋生産管理学科の濱野明教授には本論文の審査を引き受けてくださいました。深く感謝申し上げます。

現地調査の際には、調査協力をしていただいた宮城県漁業協同組合志津川支所の方々、北海道えりも漁業協同組合近笛事業所の方々に、厚く御礼申し上げます。株式会社 OKI シーテックの武越哲郎氏はじめ社員の方々には、Sonic2024 の特性評価試験、マコンブとアマモの後方散乱強度測定実験において、大変有益なご助言をいただくと共に、実験のご協力していただきました。ここに厚く御礼申し上げます。株式会社東陽テクニカ海洋計測部の前田文孝博士、佐藤裕輔氏には、現地調査でのご協力をいただくと共に、研究を進める上でのご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。また、カナダのブリティッシュコロンビア大学の John Preston 教授、フランスのブレーズパスカル大学の David Hill 教授には、Sonic2024 の特性評価試験について有益なご助言をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。また、東京大学大気海洋研究所行動生態計測分野の佐々修司特任研究員、坂本信吾特任研究員及び学生の方々には現地調査、実験において、多大なご協力をいただくとともに、有益なご助言をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

本研究は国立研究開発法人 科学技術進行機構の JST-CREST プロジェクト「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」の「ハイパー・マルチ空海 3 次元藻場マッピングシステムの開発」の助成の下で遂行されました。ここに深謝い

たします。

また、東京大学大気海洋研究所の職員の方々、東京大学大学院農学生命科学研究科の職員の方々には、学生生活を送る上で多くのご支援をいただきました。御礼申し上げます。

また、本研究は、ここでは書ききれないほど多くの方々のご支援、ご協力の下で実施されました。本研究に関わった全ての方々に心より感謝申し上げます。

最後に、長い学生生活、研究生活を通して温かく見守り経済的、精神的なご支援をしていただいた両親に、最大限の感謝の意を表します。

## 引用文献

- 東 幹夫. 1981. 稚魚育成場としてのアマモ場の役割. 「藻場・海中林」(日本水産学会 編). 恒星社厚生閣, 東京. 9-23.
- 相生 啓子, 小松 輝久, 森田 孝一. 1996. 岩手県・船越湾で発見された巨大海草-タチアマモ-について. 水産海洋研究, 60. 1: 7-10.
- Almar H. 2013a. How to Total Propagated Uncertainty. from QPS, QINSy Knowledge Base English Web Page: <https://confluence.qps.nls-wQfAg> (21, Aug. 2015)
- Almar H. 2013b. Tips and Tricks. from QPS, QINSy Knowledge Base English Web Page: <https://confluence.qps.nlx3QwfAg> (16, Sep. 2015)
- Applanix Corp. 2015. POS/MV V5 Installation and Operation Guide. Document# PUBS-MAN-004291, Revision: 11, Date: 8-Dec-2015.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment* 37. 1: 35-46.
- De Falco, G., Tonielli, R., Di Martino, G., Innangi, S., Simeone, S., and Parnum, I. M. 2010. Relationships between multibeam backscatter, sediment grain size and *Posidonia oceanica* seagrass distribution. *Continental Shelf Research*, 30(18), 1941-1950.
- den Hartog C. 1970. The seagrass of the world. North Holland, Amsterdam, 275pp.
- DeMartini E. E., Roberts D. A. 1990. Effects of giant kelp (*Macrocystis*) on the density and abundance of fishes in a cobble-bottom kelp forest. *Bull. Mar. Sci.*, 46: 287-300.
- Di Maida, G., Tomasello, A., Luzzu, F., Scannavino, A., Pirrotta, M., Orestano, C., Calvo, S. 2011. Discriminating between *Posidonia oceanica* meadows and sand substratum using multibeam sonar. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 68(1), 12-19.
- Fonseca, L. and Calder, B. 2005. Geocoder: An Efficient Backscatter Map Constructor. *U. S. Hydrographic Conference*, San Diego, CA, USA.
- Francois, R. E. and Garrison, G. R. 1982. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 72. 6: 1879-1890.
- 布施 慎一郎. 1981. メバルとアマモ場・ガラモ場との関係. 「藻場・海中林」(日本水産学会 編). 恒星社厚生閣, 東京. 9-23.
- 北海道水産業改良普及職員協議会. 2006. 北海道の漁業図鑑 写真で見る沿岸漁業最前線. 札幌.
- Hashimi M., Yahya N. N., Ahmad S., Komatsu T., Misbari S., Reba M. N. 2014. Determination of seagrass biomass at Merambong Shoal in Straits of Johor using satellite remote sensing technique. *Malayan Nature Journal*. 66: 20-37.
- 橋本 富尋, 西村 寛. 1953. 魚群探知機による藻場及び人工投石の探知について. 水産増殖,



1 (1): 1-3

- Hatakeyama Y., Maniwa Y. 1978. ON the investigation of seaweed distribution by utilizing a fish finder. Tech. Rep. Fishing Boat. 73: 155-168.
- IHO (International Hydrographic Organization). 2008. IHO Standards for Hydrographic Surveys. pp. 17.
- 伊藤 久雄. 1964. 北海道漁業地域の地理的区分. 地理学評論, 37 (7), 377-386.
- Jackson G. K. 1983. Effect of kelp forest on coastal currents. Contin. Shelf Res., 2: (1) 75-80.
- 環境庁. 1983. 第2回自然環境保全基礎調査報告書(緑の国勢調査). 540pp.
- 環境庁. 1994. 第4回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書 (干潟・藻場・サンゴ礁調査) 第2巻 藻場. 環境庁自然保護局・(財)海中公園センター, 400pp.
- 環境庁. 2000. 改訂・日本の絶滅の恐れのある野生生物ーレッドデータブックー8 植物 I (維管束植物). (財)自然環境研究センター 660pp.
- 環境庁. 2004. 藻場の復元に関する配慮事項.
- 菊池 省吾, 浮 永久. 1981. アワビ・ウニ類とコンブ類藻場との関係. 「藻場・海中林」(日本水産学会 編). 恒星社厚生閣, 東京. 9-23.
- Komatsu T., Ariyama H., Nakahara H., Sakamoto W. 1982. Spatial distributions of water temperature in Sargassum forest. J. Oceanogr. Soc., 38: 63-72.
- 小松 輝久, 三上 温子, 佐川 龍之. 1985. ガラモ場の海洋環境. 月刊海洋, 37: (7) 532-536.
- 小松 輝久. 1992. 藻場内外での流れ構造. 「流れと生物とー水産海洋学特論ー」(川合英夫 編). 京都大学学術出版会, 京都. 216-240.
- Komatsu T., Tatsukawa K. 1998. Mapping of *Zostera marina* L. beds in Ajino Bay, Seto Inland Sea, Japan, by using echosounder and global positioning systems. J. Rech. Oceanogr. 23: 39-46.
- Komatsu T., Mikami A., Sultana S., Ishida K., Hiraishi T., Tatsukawa K. 2003a. Hydro-acoustic methods as a practical tool for cartography of seagrass beds. Otsuchi Mar. Sci., 28: 72-79.
- Komatsu, T., Igarashi, C., Tatsukawa, K., Matsuoka, Y., Harada, S., Sultana, S. 2003b. Use of multi-beam sonar to map seagrass beds in Otsuchi Bay, on the Sanriku Coast of Japan. Aquatic Living Resources. 16:223-230.
- Komatsu, T., Ben Mustapha, K., Shibata, K., Hantani, K., Ohmura, T., Sammari, C., Igarashi, C. and El Abed, A. 2004. Mapping *Posidonia meadows* on Messioua Bank off Zarzis, Tunisia, using multi-beam sonar and GIS. In GISpatial analyses in fisheries and aquatic sciences, pp. 83-100. Ed. by T. Nishida, P. J. Kaiola, and C. E. Hollingworth, Fishery-Aquatic GIS Research Group, Saitama.
- 小松 輝久, 三上 温子, 佐川 龍之, 田上 英明. 2005. 藻場分布ーその変化を知るためにー. 月刊海洋, 37: 575-579.
- Komatsu, T., Y. Matsuoka, K. Shibata, T. Ikemori and N. Ohkei. 2007. Mapping and quantifying a *Sargassum* forest off Osaka (Toyama Bay, the Sea of Japan) by using narrow multibeam sonar

- and GIS. In *GISpatial analyses in fisheries and aquatic sciences Volume 3*, edited by T. Nishida, P. J. Kaiola and A. E. Caton, Fishery-Aquatic GIS Research Group, Saitama, p. 97-114.
- Lurton, X. 2002. An introduction to underwater acoustics: principles and applications. Springer Science & Business Media. pp. 347.
- Lyons, A. P., Abraham, D. A. 1999. Statistical characterization of high-frequency shallow-water seafloor backscatter. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(3), 1307-1315.
- Ma, Z. and Redmond, R. L. 1995. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(4), 435-439.
- Mayer, L. A. 2006. Frontiers in seafloor mapping and visualization. *Marine Geophysical Researches*, 27(1), 7-17.
- Miki S. 1933. On seagrasses in Japan. (I) *Zostera* and *Phyllospadix*, with special reference to morphological and ecological characters, *Bot. Mag.*, 47, 842-862.
- 南 憲史, 安間 洋樹, 東条 斉興, 福井 信一, 伊藤 裕介, 野別 貴博, 宮下 和士. 2010. 音響計測及び空間統計学を用いた知床半島沿岸におけるコンブ林 *Laminaria spp.* の分布推定. *日本水産学会誌*, 76(5), 729-736.
- 南 憲史, 濱野 明, 東条 斉興, 中村 武史, 安間 洋樹, 宮下 和士. 2012. 音響手法を用いた来留見ノ瀬周辺におけるガラモ場の分布推定. *日本水産学会誌*, 78(2), 171-179.
- Minami K., Hamano A., Nakamura T. 2010. Shape and target strength of vesicles of two *Sargassum* species common to the coastal waters of Japan. *J. Marine. Acoust. Soc. Jpn.*, 37.3: 147-155.
- Murase N., Kito H., Mizukami Y., and Maegawa M. 2000. Productivity of a *Sargassum macrocarpum* (Fucales, Phaeophyta) population in Fukawa Bay, Sea of Japan. *Fish. Sci.*, 66, 270-277.
- 名畑 進一, 酒井 勇一. 1998. 北海道東部におけるウガノモクの初期形態形成と成長. *北水試研報*, 52, 1-8.
- 南西海区水産研究所. 1974. 瀬戸内海の藻場—昭和46年の現状. 1-39.
- 中川 一雄. 1953. 昆布—生産から消費まで—. 北海道水産新聞社, 北海道. 26-189.
- Newton, R.S., Stefanon, A. 1975. Application of side scan sonar in marine biology. *Marine Biology*. 31: 287-291.
- 大森 雄治. 1993. 日本固有のアマモ科植物の研究の歴史と現状. *水草研究会会報*, 51, 19-25.
- Parnum I. M. 2007. Benthic habitat mapping using multibeam sonar systems. PhD Thesis, Department of Imaging and Applied Physics, Curtin University of Technology, Perth, 213pp.
- Pasqualini V., Pergent-Martini C. Clabaut P., Pergent G. 1998. Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side scan sonar: application off the island of Corsica (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47: 359-367.
- Phinn S., Roelfsema C., Dekker A., Brando V., Anstee J. 2008. Mapping seagrass species, cover and biomass in shallow waters: an assessment of satellite multispectral and airborne hyperspectral

- imaging systems in Moreton Bay (Australia). *Remote Sensing of Environment*. 112: 3413-3425.
- R2SONIC Inc. 2014. Sonic 2024/2022 Broadband Multibeam Echosounders Operation Manual V 5.0.
- Sabol B., Melton R. E., Chamberlain R., Doering P., Haunert K. 2002. Evaluation of a digital echosounder system for detection of submersed aquatic vegetation. *Estuaries*. 25: 133-141.
- Sagawa T., Boisnere E., Komatus T., Mustapha K. B., Hattour A., Kosaka N., Miyazaki S. 2010 Using bottom surface reflectance to map coastal marine areas: a new application method for Lyzenga's model. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (12), 3051-3064.
- 小路 涼. 「藻場とさかなー魚類生産学入門ー」成山堂書店, 東京.
- Short F. T., Wyllie- Scheverria S. 1996. Natural and human-induced disturbance of seagrass. *Environ. Conserv.*, 23: 17-27.
- Short, F. T., McKenzie, L. J., Coles, R. G. and Vidler, K. P. 2002. Seagrassnet manual for scientific monitoring of seagrass habitat. Queensland Department of Primary Industry, Queensland Fisheries Service, Cairns. 56pp.
- Silva T. S., Costa M. P., Melack J. M., Novo E. M. 2008. Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 140. 2-3: 131-145.
- Smith S. V. 1981. Marine macrophytes as a global carbon sink. *Science*, 211: 838-840.
- 水産庁. 2007. 磯焼け対策ガイドライン.
- Tecchiato, S., Collins, L., Parnum, I., and Stevens, A. 2015. The influence of geomorphology and sedimentary processes on benthic habitat distribution and littoral sediment dynamics: Geraldton, Western Australia. *Marine Geology*. 359: 148-162.
- 鳥居 茂樹, 三本管 幸昭, 安部 英治, 船野 隆, 石川 政雄, 工藤 敬司, 佐々木 茂, 垣内 政宏, 金子 孝. 1972. コンブの現存量推定法および群落構造解析法に関する二、三の知見. *北水試報告*, 14: 31-44.
- Urick R. J. 1979. Principles of underwater sound 3rd edition. Peninsula Publishing. California. pp. 1-431.
- van Katwijk MM, Thorhaug A, Marbà N, Orth RJ, Duarte CM, Kendrick GA, Althuizen IHJ, Balestri E, Bernard G, Cambridge ML, Cunha A, Durance C, Giesen W, Han Q, Hosokawa S, Kiswara W, Komatsu T, Lardicci C, Lee KS, Meinesz A, Nakaoka M, O'Brien KR, Paling EI, Pickerell C, Ransijn AMA, Verduin JJ. 2015. Global analysis of seagrass restoration: the importance of large-scale planting. *Journal of Applied Ecology*, DOI: 10.1111/1365-2664.12562
- Wilson, P. S., Dunton, K. H. 2006. An experimental laboratory investigation of the low - frequency acoustics of seagrasses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(5), 3448-3448.
- Wilson, P. S., Dunton, K. H. 2009. Laboratory investigation of the acoustic response of seagrass tissue in the frequency band 0.5–2.5 kHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4),

1951-1959.

Wilson, C. J., Wilson, P. S., Greene, C. A., Dunton, K. H. 2010. Seagrass leaves in 3-D: Using computed tomography and low-frequency acoustics to investigate the material properties of seagrass tissue. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 395(1), 128-134.

吉田 忠生. 1998. 新日本海藻誌 日本産海藻類総覧. 内田老鶴圃, 東京. pp. 1247.

Zieman J. C., Fourqurean J. W., Iverson R. L. 1989. Distribution, abundance and productivity of seagrass and macroalgae in Florida bay. *Bull. Mar. Sci.*, 44: 292-311.