

修士論文

3D サイドスキャンソーナーを用いた  
藻場の識別マッピングに関する研究

平成 26 年 2 月

指導教官： 浅田 昭 教授

東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻

47126660 小作 潤一郎

# 目次

1章	研究背景	3
1.1	研究背景	3
1.2	研究背景	5
1.3	研究目的	6
2章	3D サイドスキャンソナー GeoSwath Plus	7
2.1	サイドスキャンソナーの計測原理	7
2.2	インターフェロメトリ測深の原理	8
2.3	GeoSwath の特徴	10
3章	海底地形調査	12
3.1	調査海域	12
3.2	調査機器	14
3.2.1	3D サイドスキャンソナー	14
3.2.2	RTK-GPS	14
3.2.3	慣性ジャイロモーションセンサー	14
3.2.4	水中音速計	14
3.2.5	収録ソフトウェア	14
3.3	機材配置	15
3.4	調査方法	18
4章	実験結果	19
4.1	取得データ	19
4.2	ノイズ処理	21
4.3	動揺補正	25
4.4	グリッド作成	28
4.5	測深図	29
4.6	音響画像	31
4.7	潜水カメラ調査結果	34
4.8	実験結果のまとめと分布の予想	36
5章	解析	38
5.1	確率密度関数を用いた画像解析	38
5.2	空間周波数領域での画像解析	42
5.2.1	周波数解析	42
5.2.2	空間スペクトルによる識別	47

5.2.3	バンドパスフィルタを用いた識別.....	49
5.3	デシジョンツリー法による分類手法の統合.....	52
5.3.1	デシジョンツリー法による分類.....	52
5.3.2	分類結果の精度評価 .....	56
6 章	結論 .....	59
6.1	考察 .....	59
6.2	今後の課題 .....	60
参考文献	.....	61
謝辞	.....	62

# 1章 研究背景

## 1.1 研究背景

日本は周囲を海に囲まれた海洋立国であり、その海には様々な資源が存在し我々の生活を支えている。中でも漁業資源は日本人の生活を昔から支え、日本人が最も長い間利用してきた海洋資源の一つであり我々の生活の一部として根付いている。それゆえ、漁業資源は「存在して当然」という認識をともしれば持ちがちであるが、その資源状況は常に変動するものであり、最近ではうなぎの価格高騰が話題になるなど当たりまえのものが当たり前でなくなって初めて我々の関心事となる、というような性質を持ちがちである。そのため研究者たちはその変動状況と要因を調べるために多くの研究を行い、資源の維持に務めてきた。その結果、漁業資源、広くは海洋生物資源の適正管理は水産庁が尽力する重要な施策の一つとなっている。

藻場 (Fig. 1)は海洋生物資源の中でも非常に重要な役割を担っている。一次生産者として食物連鎖を根底から支えると同時に、他の水生生物の産卵・生育場所になる、水質浄化機能やCO<sub>2</sub>固定、底質の安定化など、海洋生物資源を根底から支える存在なのである。しかし、近年では磯焼けと呼ばれる藻場の消失現象が日本各地で報告され、その原因究明が急務とされている。磯焼けの原因は水温変動など自然環境の変動によるものと、工事により沿岸部に土砂が流入することで海中の光量が低下するといった人間活動が原因となるものが考えられており、それぞれの原因に合わせた対策が行われている[1]。こういった藻場資源の変動を捉え、原因を明らかにして対策をとる、という流れが現在の藻場管理である。この藻場管理の全ての段階で重要となるのが藻場資源量・資源分布のモニタリングである [2]。つまり藻場資源の変動と対策の効果を明らかにするためには藻場が「どこに」「どれだけ」存在するのかを調べ、その情報を積み重ね続けていく必要がある。

藻場資源のモニタリングは人的な調査、例えばダイバーが潜水し目視で藻場資源の構成、資源量を調べる手法が基礎となる。この手法では藻場の構成、資源量を観察・採集を通じて細かく分析することが可能である一方、点的な情報しか入手できず藻場の資源分布を広範囲で調べるためには大変な労力と時間を要する。そのため藻場資源のモニタリングでは人的調査で正確な情報を得ることに加え、海底の広範囲を効率的に調査することで資源量を推定する技術への要望が高まっている。こうした要望に応えるために、藻場の分布調査手法としてリモートセンシングが行われてきた。



**Fig. 1** 静岡県の藻場

## 1.2 研究背景

藻場のリモートセンシングは主に二つの手法が取られている。

1つは光学的手法で、衛星画像を用いて藻場を調査する手法が挙げられる。また衛星画像を用いた手法では非常に広範囲のマッピングが可能であるが、その一方で雲や海水濁度など外乱要因が多いことと、面的な調査になってしまうことがあげられる [3]。

もう1つは音響的手法である。これは音響計測器を船舶に艀装、あるいは曳航体に取り付けて海上を航行することで音響計測器を移動させながら音響計測を行う手法である。音響的手法による藻場調査は、用いるソナーの種類によって様々な側面から藻場調査が可能となる。須藤らはシングルビームソナーを用いてアマモ、カジメの音響反射特性について調査しており[4]、また虻川らは淡水での調査ではあるがマルチビームソナーを用いて沈水植物のマッピングに成功している[5]。また Xu et.al 2013 では、こちらも淡水域の調査だが水中音響カメラ DIDSON (Sound Metrics 社) から得られた沈水植物の音響画像の空間スペクトルから3種の沈水植物の分類に成功している[6]。こうした音響的リモートセンシングでは目的にあわせて様々なデータが得られること、三次元的な藻場情報を得ることが出来るということ、濁度の影響を受けずに調査が可能であることなどの利点があげられる。一方、広範囲を調査するためには低周波の送信音源を使う必要があるため分解能が下がってしまい、分解能を上げるために高周波の送信音源を用いた場合には計測可能範囲が狭まってしまうというトレードオフが存在する。

### 1.3 研究目的

前述の通り、藻場の音響的リモートセンシングでは様々なソナーを用いた研究が報告されているが、比較的新しい技術である 3D サイドスキャンソナーを用いた藻場研究については未だ例がない。この 3D サイドスキャンソナーは高周波音源を用いた干渉測位によって、高い分解能の海底音響画像と深度情報を広域にわたって取得することができる。この 3D サイドスキャンソナーを用いた藻場のリモートセンシング手法が確立できれば、比較的効率よく広域の海底地形が調査可能となり、藻場のリモートセンシング技術を一步前進させることができることになるだろう。そこで本研究では 3D サイドスキャンソナーを用いた藻場の調査手法を提案する。具体的には

- ・ 測深図、音響画像の同時取得
- ・ 藻場の識別マッピング

の 2 点を可能とする解析手法について検討していく。

## 2章 3D サイドスキャンソナー GeoSwath Plus

### 2.1 サイドスキャンソナーの計測原理

3D サイドスキャンソナーを説明する前に、まず通常のサイドスキャンソナーについて説明する。

サイドスキャンソナーは広域にわたる海底地形画像の取得が可能であるため、事故により墜落した飛行機、難破船や文化遺産の位置の特定などに利用されている。

サイドスキャンソナーは、送受波器アレイをトーフイッシュ(曳航体)に搭載したもので、水中を一定方向に一定水深で曳航させ、進行方向に直交する断面、クロストラック方向の鉛直断面に扇形のビームを送出し調査を行う。曳航中はサイドスキャンソナーから一定間隔で音響パルスが発信され、水底の凹凸・物体から反射する反射波・散乱波を受信し、受信信号の時間遅れから距離を計算するとともに信号の強度を記録する (Fig. 2)。1回のビームは1本の線として記録機に表示され、線の明暗が時間に対応した反射信号の強度を示している。このプロセスを繰り返し、音響画像(ソノグラム)を形成する。水底の突起物にパルスがあたるとその部分のパルスは後方に到達せず音波の影が出来る。またサイドスキャンソナー直下では送信パルスが真上から当たるため音波の影が出来にくくウォーターコラムといわれる空白部分が出る。

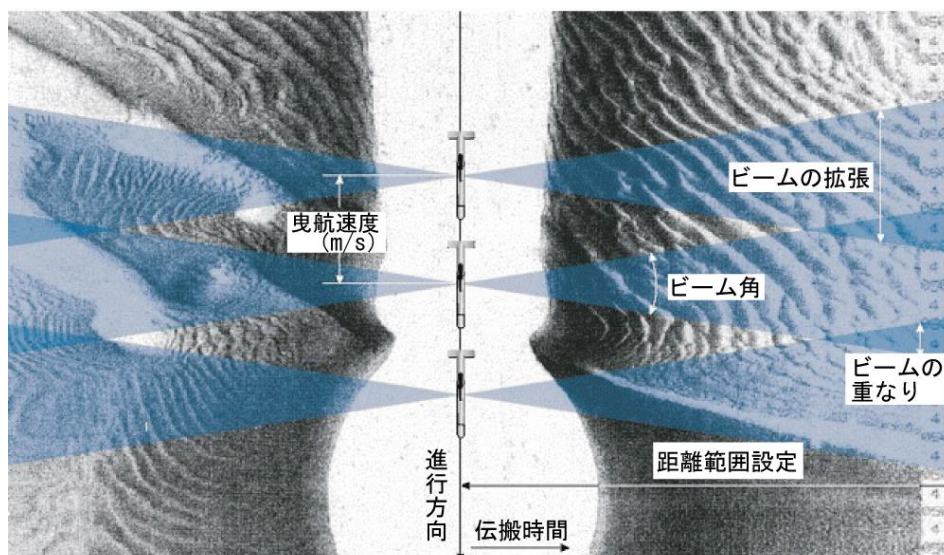


Fig. 2 サイドスキャンソナーの画像作成 [7]



## 2.2 インターフェロメトリ測深の原理

ここではインターフェロメトリ測深がどのような原理で行われるのか、システムの幾何的な特性について説明する。

まずインターフェロメトリソナーシステムとして、送波器と、それとは別に設置された複数の（ここでは簡単のためA, Bの2つとする）のハイドロホンから構成される。Fig. 3はインターフェロメトリ測位システムの概略図である。Fig. 3の灰色の三角形がインターフェロメトリソナーの送受波器である。受波器下部に配置された送波器Tから時刻 $t=0$ にピングを打ち、海底の反射点P( $L_p, h$ )で反射した場合を考える。 $L_p$ は水平距離、つまりグラントレンジで、 $h$ は深度である。海底面で反射したエコーは球面拡散を行いながら懐中を伝搬し時刻 $t$ で受波素子Aにて受信される、そして同じ波が位相差 $\Delta\theta$ で受波素子Bにて受信される。この位相差 $\Delta\theta$ を計測することで、受波到来角 $\theta_r$ が幾何的に計算される。これにはハイドロホン間隔 $l$ が反射点Pとハイドロホンの距離、つまりスラントレンジ $r_A$ に比べ十分小さいものとする、このときハイドロホン素子Bと反射点Pまでのスラントレンジ $r_B$ は次のように近似されることによる。

$$r_B \approx r_A + \Delta R \quad (1)$$

ただし経路差 $\Delta R$ は、受波素子Aからベクトル $\mathbf{PA}$ におろした垂線の足から受波素子Bまでの距離である。このとき経路差 $\Delta R$ は音速 $c$  m/s、送信周波数 $f$  Hzを用いて

$$\Delta R = \frac{c}{2\pi f} \Delta\theta \quad (2)$$

と表される。そして到来角 $\theta_r$ は送受波機の傾き $\alpha$ と送受波器のロール角 $\theta_{roll}$

$$\theta_r = \frac{\pi}{2} - (\alpha - \theta_{roll}) - \tan^{-1} \left( \frac{\Delta R}{\sqrt{l^2 - \Delta R^2}} \right) \quad (3)$$

と表せる。

また音速 $c$ と往復伝搬時間 $t$ より受波器Aと反射点Pの距離 $r_s$ が求められ、それは

$$r_s = \frac{ct}{2} \quad (4)$$

となる。これより反射点Pの座標( $L_p, h$ )は以下の通りとなる。

$$(L_p, h) = (r_s \sin\theta_r, r_s \cos\theta_r) \quad (5)$$

これがインターフェロメトリソナーの測位方式である。

この測位を1回の送波、すなわち1ピングで得られた全ての音響反射に対して行いスワス断面内に配置していくことで、測深が可能となる。

一般にサイドスキャンソナーでは音響画像を書く際に海底面を一様に平坦であると仮定し、時間の経過のみで受波信号の反射位置を決定する。つまり時系列に得られたデータをそのままの順序でピング断面に並べることで画像化を行う。そのため時間分解能、つまり距離分解能が高くクロストラック方向に対して高密度な音響データを取得することが可能で

ある。一方、信号を時系列に処理するというサイドスキャンソナーの原理上、送受波器直下の計測においては、直下からの複数の反射波がほぼ同時刻に受波機で収録されるために信号を分解することが難しく、送受波器直下はデータ密度が下がってしまうという欠点も持ち合わせている。この欠点を克服するため、通常は測線間隔を計測レンジより短くすることで、ある測線直下を別の測線から計測する手法が取られている。

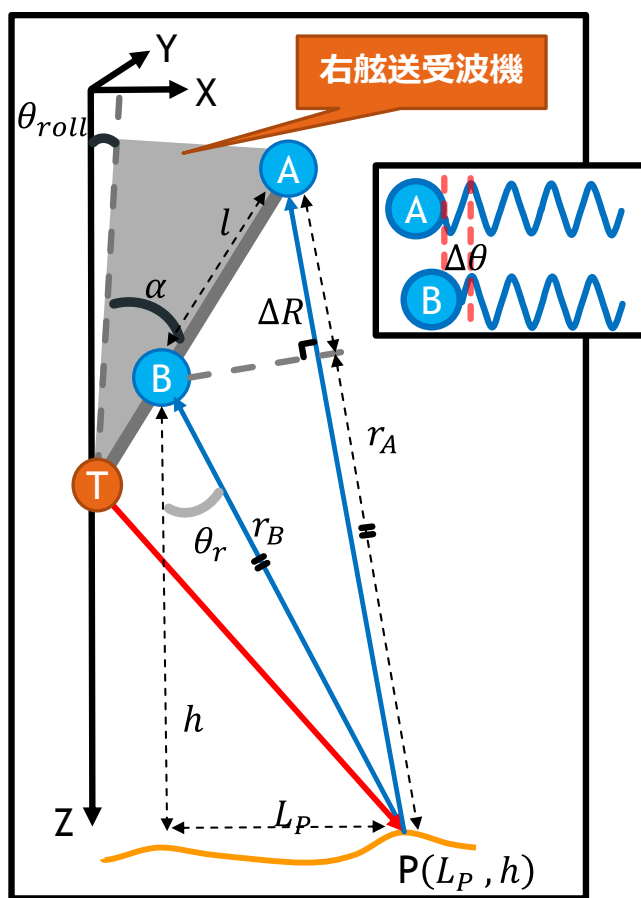


Fig. インターフェロメトリ測深

Fig. 3 インターフェロメトリ測深概略

## 2.3 GeoSwath の特徴

GeoSwath Plus Compact (KongsBerg 社.) (以下 GeoSwath と記述) は上記のインターフェロメトリ計測技術を用いたサイドスキャンソナーである (Fig. 4)。送信周波数により 3 つのタイプが存在するが、今回の実験では同製品系列の中でも最も送信周波数が高く、高分解能で海底地形計測が可能な GeoSwath Plus Compact 500 を用いた。

GeoSwath は送受波機をトーフイッシュに取り付けて測深を行うのではなく、船体に艀装して運用するため、厳密にはスワス測深器に分類される。つまりマルチビームソナーと同じカテゴリに含まれる。そのため測線と直交するスワスのデータを取得するという特徴はマルチビームソナーと同じであるが (Fig. 5)、前節での説明の通りサイドスキャンソナーと同様の送信ジオメトリであることと、到来角と反射強度を時系列で収録していることの 2 点がマルチビームソナーと大きく異なる点である。サイドスキャンソナーと同様の送信ジオメトリにより高い距離分解能を持つ点はサイドスキャンソナーの利点である。GeoSwath の性能を Table 1 にまとめた。角度分解能を考慮すると、フットプリントがアロングトラック方向に 10cm 程度、クロストラック方向に 1 cm 程度となるため、海藻・海草の葉・葉体の微細な形状を捉えることまでは難しいが、両者の生え方の差や群落の特徴などより大きな空間スケールでの違いを捉えるには十分だと考えられる。

GeoSwath とマルチビームソナーの性能差については次の点が知られている。

- ・送受波器の直下ではデータ密度、測深値の標準偏差でマルチビームソナーに遅れを取る。
- ・送受波機からの直距離が大きくなるに従い、測深値の標準偏差、データ密度ともにマルチビームソナーを凌駕する。

この性能差を理解しながら GeoSwath での音響調査を行わなければならない。また GeoSwath の利点として

- ・送受は奇が電気回路を持たず、小型で頑丈であるため小型のボートへの取り付けが容易であること。
- ・船舶へ艀装することで、曳航体による運用に比べ動揺や、曳航体の位置補正の煩雑さが軽減されること
- ・測深情報を伴った音響画像の取得が可能であること。

が挙げられ、本研究の目的である効率的な藻場の識別分布調査やその時系列的な変動を観測する上で効力を発揮することが予想される。



Fig. 4 GeoSwath Plus Compact (図中下部の黒い送受波器)、POS/MV 慣性ジャイロ (銀色の円筒)、miniSVS (送受波器右上)

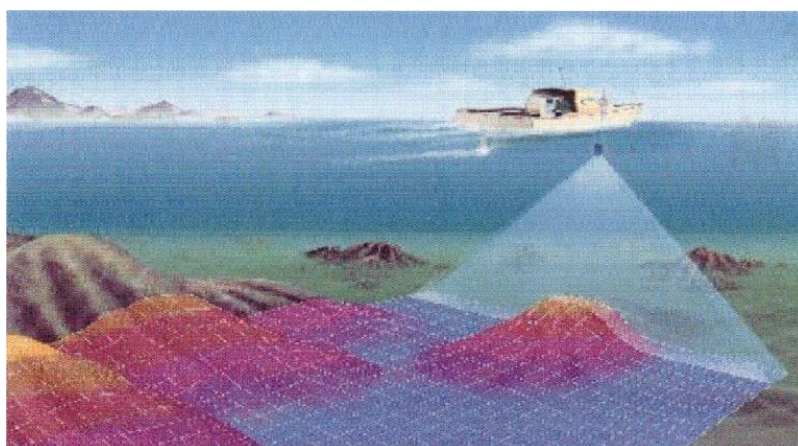


Fig. 5 スワス測深の概略[9]

Table 1 GeoSwath スペック表

Frequency	500 kHz
max Water Depth Below Transducers	50 m
max Swath Width	190 m
max Coverage	up to 12 x depths
Depth Resolution	1.5 mm
Two Way Beam Width (Horizontal)	0.5°
max Swath Update Rate	30 /sec
Transducer Dimensions	255x110x60 mm
Transducer Weight	1.5 kg(in air)

## 3章 海底地形調査

### 3.1 調査海域

本研究では静岡県下田市東部に位置する外浦海岸を対象とした(Fig. 6)。外浦海岸は須崎半島の付け根の東岸(北緯34°40'30、東経 138°58'21)に位置する、相模灘に面した入江である。(Fig. 7)

この外浦海岸を含む、静岡県白浜海岸から田牛海岸にかけては環境省指定の「日本の重要湿地500」に選定されている。理由としては周辺海域で磯焼けが報告されてもこの海域は影響を受けず豊富なカジメ場が保たれている点や、アオウミガメ採食海域である可能性が高い点が挙げられており、重要湿地500の中でも要注目地域として記載されるなど、生態学的重要性が非常に高い。

海岸地形の特徴としては、白浜層群の砂岩などが侵食運搬されて形成されたなだらかで海底地形であるという点と、静岡県の漁場造成計画によって、海岸からおおよそ200m離れた海底の2ha程の区画に人工岩礁が存在することが挙げられる。また植生としては深度3mから9m程度の砂浜にはアマモ場が、深度5mから13m程度の岩場にはアラモ・カジメ場があることも報告されている [8]。



Fig. 6 外浦海岸

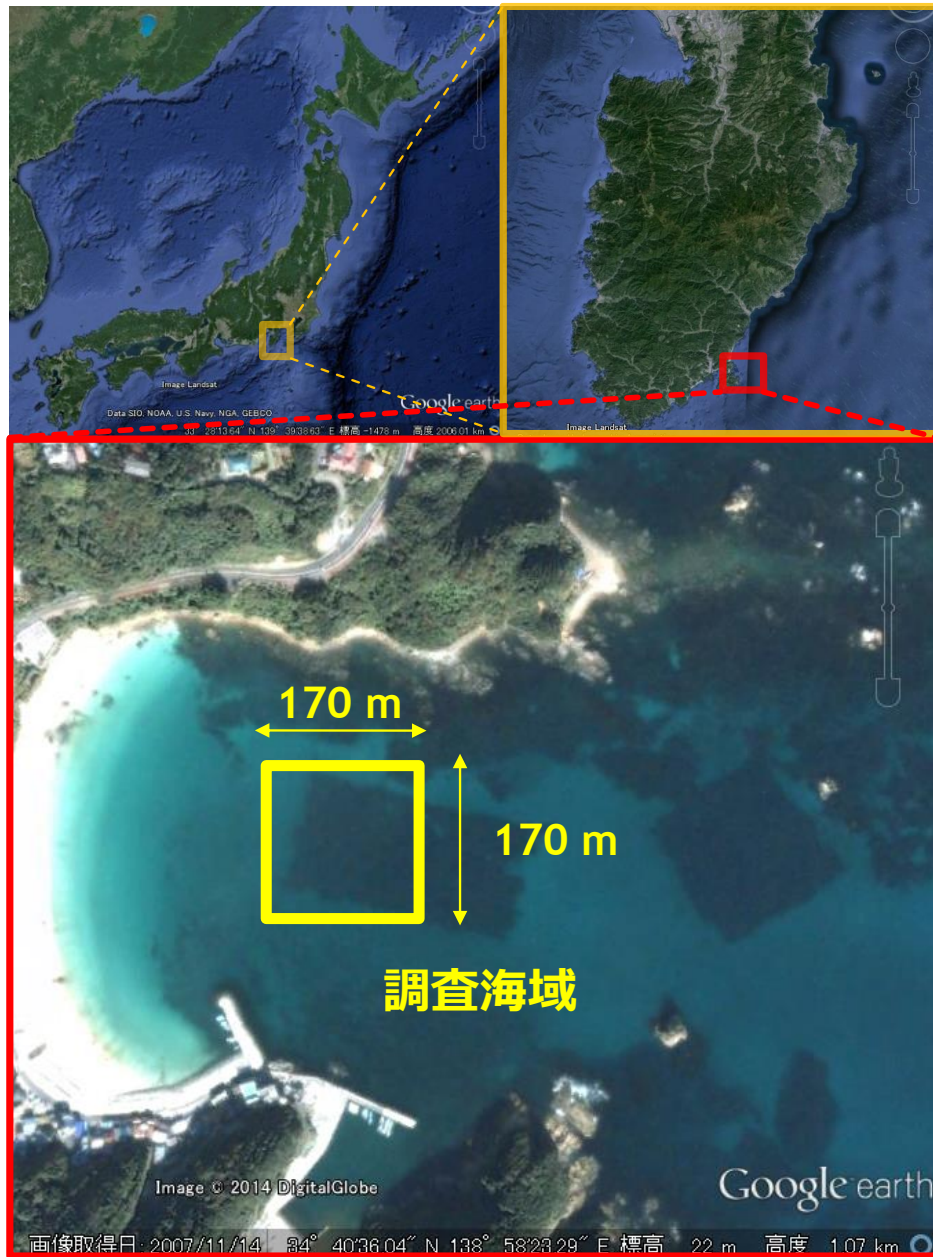


Fig. 7 外浦海岸調査海域



## 3.2 調査機器

### 3.2.13D サイドスキャンソナー

本研究で使用した 3D サイドスキャンソナーは GeoSwath を用いた(Fig. 4)。送信周波数は 500kHz、ピング間隔は 17 Hz で、サイドスキャンソナーの特徴として片舷ずつピングを打つため、片舷あたりの収録間隔は 8.5 Hz となる。またスワ幅は片舷 20 m に設定した。

### 3.2.2RTK – GPS

RTK-GPS(Real Time Kinematic Global Positioning System)とは、既知点において補正値を受信側に送信することにより測位精度を向上させるシステムである(Fig. 8, Fig. 9)。RTK-GPS はコード情報(既知点における測位誤差)だけではなく、GPS 衛星と受信機までの距離を時間差と電波の相違により補正しており、電波の相違による補正により高精度測位が可能となっている。

### 3.2.3慣性ジャイロモーションセンサー

本調査で使用した慣性 GPS ジャイロモーションセンサーは、RTK-GPS と光ファイバージャイロ・モーションセンサーを組み合わせた POS/MV 慣性 GPS ジャイロ(Applanix 社)である(Fig. 4)。RTK-GPS と慣性ジャイロの組み合わせにより高精度測位、姿勢(ロール、ピッチ、ヒープ)・方位データの取得できる。ロールは進行方向に直角な揺れ(横揺れ)、ピッチは進行方向の揺れ(縦揺れ)、ヒープは鉛直方向の揺れ(上下の揺れ)を表す。また、高精度なヒープ計測を可能にするため後処理によりヒープ、測位、姿勢計測精度の向上を図っている。計測誤差に関しては、RTK-GPS モードにおいて位置測位誤差は 0.02 - 0.10m、ロール・ピッチは 0.010°、ヒープは 5cm 又は 5%未満での計測が可能である。

### 3.2.4水中音速計

本調査では水中音速計として miniSVS (Valeport 社)を用いた(Fig. 4)。miniSVS は装置内の距離が一定な区画に海水を取り込み、その区画における音波の往復伝搬時間を用いて精密な水中音速を求めている。GeoSwath は船体への取り付けキットに miniSVS を取り付け部分があるため、そこに miniSVS をとりつけ表層水温を計測した。分解能 0.001 m/s である

### 3.2.5収録ソフトウェア

スワ幅測深のデータ収録用ソフトウェアとしては HYPACK (HYPACK 社)を用いた。これは Windows OS 上で作動する統合測量型の水路測量ソフトウェアであり、測量計画、操船ナビゲーション、リアルタイムな地形表示、データの収録など実現する。この HYPACK を用いて GeoSwath、POS/MV、miniSVS のデータを収録し、それらに PC 時刻基準のタイムスタンプを割り振った後に、GeoSwath のデータ収録形式である .rdf ファイルとしてデータを出力させた。



**Fig. 8 RTK – GPS アンテナ**



**Fig. 9 RTK- GPS 地上局**

### 3.3 機材配置

GeoSwath および各計測機器の接続は Fig. 10 のように構成した。GeoSwath、慣性ジャイ



ロ、miniSVS が水中に降ろされ、GeoSwath 直上に RTK- GPS の船上局を設置した。

調査船としては伊豆丸 (Fig. 11) を利用した。GeoSwath 及び各収録機器は船の左舷側に艀装し (Fig. 13)、PC は船内に配置した (Fig. 12)。また各計測機器の精度と収録間隔を Table2 に示した。

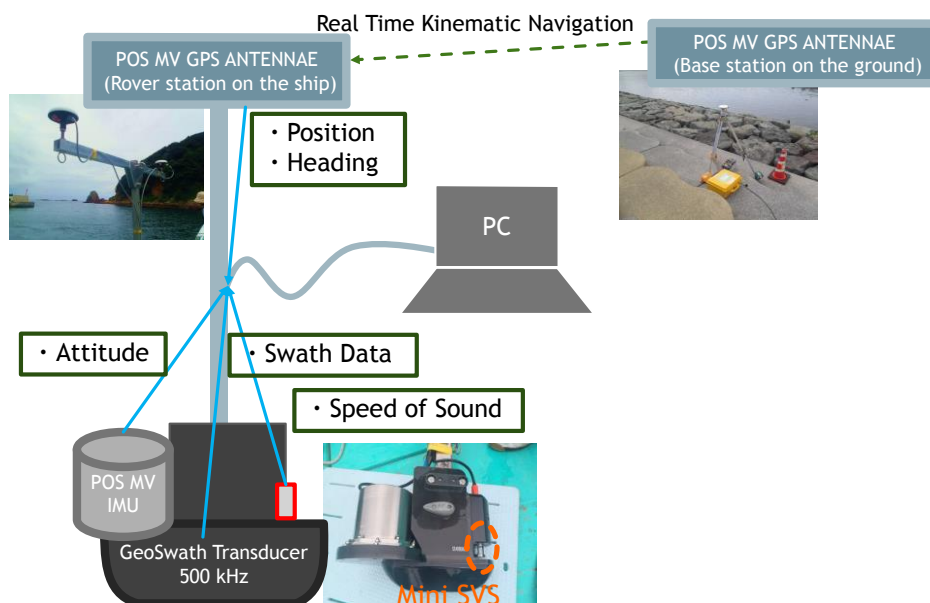


Fig. 10 収録機器の配置



Fig. 11 調査船伊豆丸



Fig. 12 収録 PC



Fig. 13 GeoSwath 等艙装の様子

Table 2 各計測機器の精度と収録間隔

	Precision	Sampling rate
Roll, Pitch (POS MV)	0.02 [°]	50 Hz
Heave (POS MV)	0.05 [m]	50 Hz
Heading (POS MV)	0.015 [°]	10 Hz
X, Y (POS MV)	0.02 [m]	10 Hz
Speed of Sound (Mini SVS)	0.01 [m/s]	4 Hz

### 3.4 調査方法

調査海域には外浦海岸に面する入江の中央北西部(北緯 $34^{\circ}40'32$ 、東経  $138^{\circ}58'28$ )をから東、南にそれぞれ 170m 四方の正方形の区画を選定した(Fig. 14)。この区画は前述の人工岩礁と砂地の両方を含む区域で、GeoSwath がこうした異なる海底地形、海藻・海草という二つの異なる植物をどのように捉えるのか検討するためである。この区画の中に西北西、東南東を向いた合計 7つの測線を設定した。今回の実験では GeoSwath のスワ幅を片舷 20m としたため、測線間隔がおおよそ 20m 以内に収まるように測線の間隔を設定した。

調査は 2013 年 7 月 1 日に、設定したラインの音響データ収録を行った。調査方法は、選定したライン上を、GeoSwath を用いて海底、海草・海藻の水深・位置データの測定を行うために走査した。同時に POS/MV を用いて船の位置情報、船の挙動(ロール・ピッチ・ヒープ・ヘディング)を、miniSVS を用いて表層水温を記録した。

また GeoSwath を用いた調査とは別に、音響画像解析に用いる教示データとして潜水カメラ調査による海草・海藻の光学画像撮影を行った。これは音響調査の 1 か月後の 2013 年 8 月 1 日に、静岡県水産技術研究所に協力していただいた。潜水カメラ調査にあたり、GeoSwath の地形図を参考に植生が高そうな地点を砂地、岩場からそれぞれ選定した。そして合計 8 地点について静岡県のダイバーに調査を依頼し、それぞれの地点の光学画像を取得した。

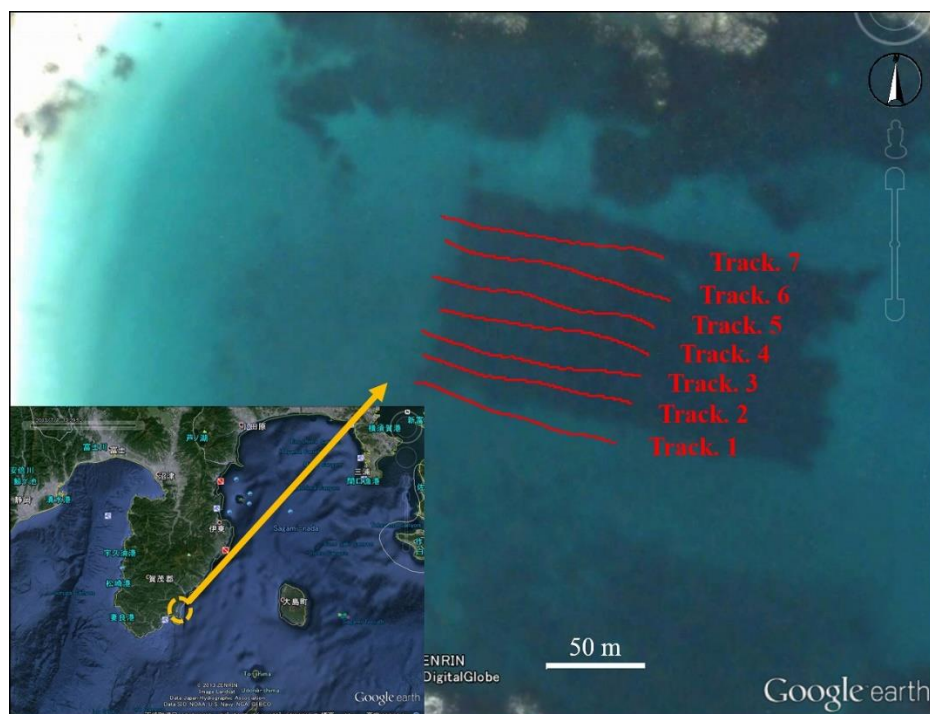


Fig. 14 調査海域と調査測線 (赤線)

## 4章 実験結果

### 4.1 取得データ

7月1日の音響調査で得られた GeoSwath のデータから音響画像および、測深図を作成した。以下その手法について具体的に説明していく。二つの画像の作成についての処理フローを Fig. 15 に示した。

GeoSwath のデータは1測線ごとに.rdf というバイナリ形式で得られ Fig. 16 のような構造をしている。まず.rdf 形式のバイナリファイルから収録されているデータを読み出すプログラムを作成し、1測線中に含まれる全てのピングについてのデータを得た。

そしてここから得られた

- ・ 1ピング中で得られた音響反射の往復伝搬時間／受波面を基準とした到来角／反射強度
- ・ 船体座標系でのロール角／ピッチ角／ヒープ量
- ・ 日本平面直角座標系 8 系を基準とする平面座標における GPS アンテナの位置
- ・ 絶対座標系での船の方位
- ・ 表層音速

と、調査の準備段階で得られた

- ・ 送受波器、GPS アンテナ、動揺センサの船体座標系における位置関係
- ・ 潮汐データ

を用いて各反射点について

- ・ 直角座標系における位置
- ・ 平均低潮面からの深度
- ・ 反射強度

の3種類のデータを得ることを目指す。なお潮位データは気象庁のホームページを参照した[10]。

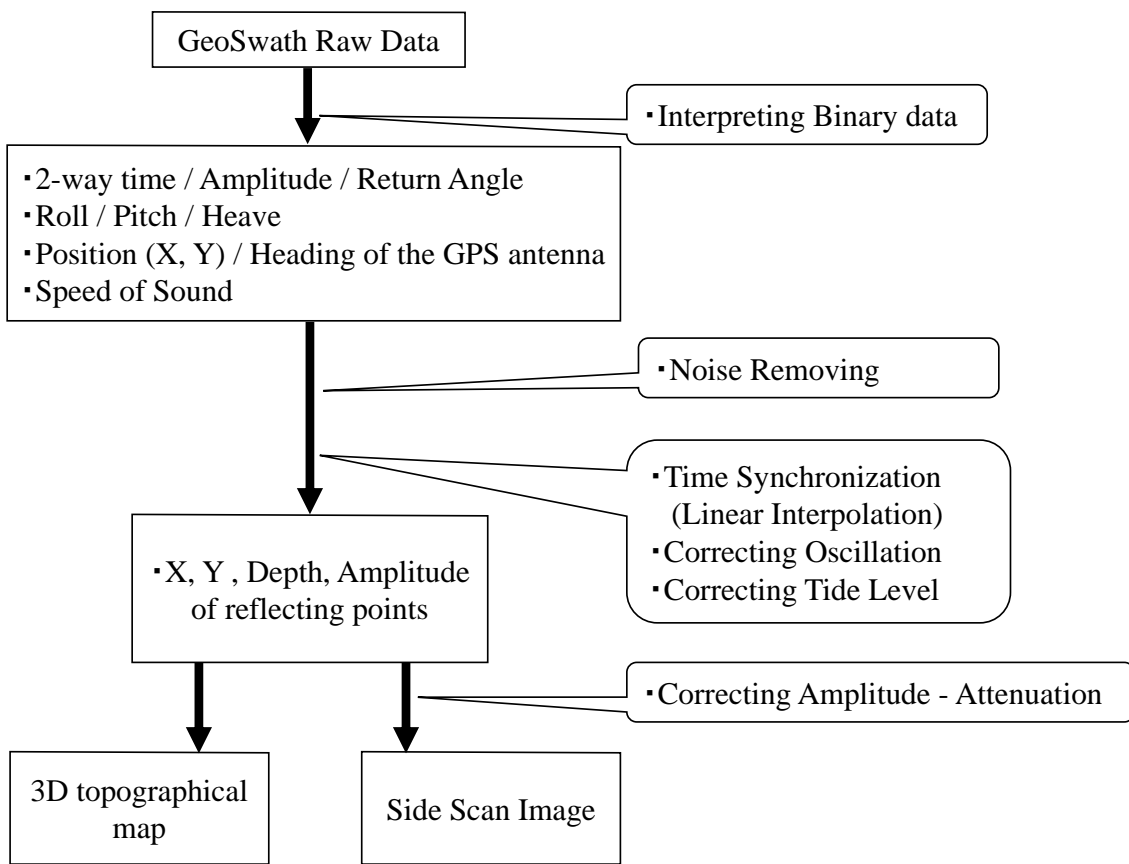


Fig. 15 音響データの処理フロー

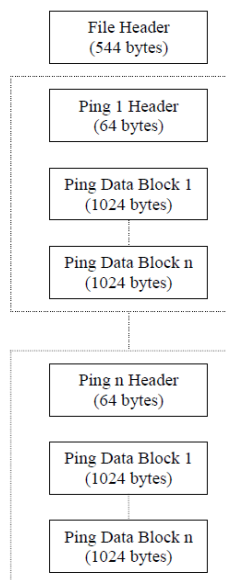


Fig. 16 .rdf ファイル構造

## 4.2 ノイズ処理

GeoSwath の音響反射データから 8 系座標系で考えた 3 次元点群の作成にあたり、まずピング断面ごとにノイズ除去処理を行った。GeoSwath の音響反射はノイズが多く市販のソーナー処理ソフトを用いて人間がノイズ処理を行うなどの手法が取られてきた。本研究ではソーナー処理ソフトを調達せず、自らプログラムを作成してノイズ除去を行ったため、その手法について記す。

まず、GeoSwath は 1 ピングごとに右舷側、左舷側の片側ずつ音響データを収録し、音響反射データ中の  $n$  番目の音響反射( $t_n, \theta_n, A_n$ )は次の通りの構成となっている。

・  $t_n$  :  $n$  番目の反射点と送受波器との往復伝搬時間。実際には波数  $n$  が収録されているため送信周波数  $f/m$  を用いて

$$t_n = \frac{n}{f} [\text{sec}] \quad (6)$$

と表される。

・  $\theta_n$  : 音響反射の到来角。送受波器受波面の垂直線となす角  $\theta'$  となる。実際には  $\sin\theta'$  が収録されているため鉛直下向きを基準とした到来角に直すために、

$$\theta_n = \frac{\pi}{6} - \sin^{-1}(\sin\theta') [\text{rad}] \quad (7)$$

とする。なお GeoSwath の受波面の傾きは船体座標系の鉛直軸から  $30^\circ$  である。

・  $A_n$  : 音響反射の反射強度が収録される。GeoSwath の音響反射は単位が与えられていないため、無次元の値とした。

このとき音速を  $v$  とすると、船体座標系において送受波機を原点とし、クロストラック方向右舷向きを  $X$  正方向、深度方向下向きを  $Z$  正方向とする  $XZ$  断面において、右舷側の受波における  $n$  番目の反射点の座標( $X_{\text{starboard}_n}, Z_{\text{starboard}_n}$ )次の通りに表される。

$$X_{\text{starboard}_n} = v \cdot \frac{t_n}{2} \cdot \sin(\theta_n) \quad (8)$$

$$Z_{\text{starboard}_n} = v \cdot \frac{t_n}{2} \cdot \cos(\theta_n)$$

なお左舷側の座標( $X_{\text{port}_n}, Z_{\text{port}_n}$ )は  $X$  の符号が逆になった

$$X_{\text{port}_n} = -v \cdot \frac{t_n}{2} \cdot \sin(\theta_n) \quad (9)$$

$$Z_{\text{port}_n} = v \cdot \frac{t_n}{2} \cdot \cos(\theta_n)$$

と表される。

作成したソフトウェアを用いて、1 ピング中の全ての反射を、送受波機を原点とするピン

グ断面に配置したものが Fig. 17 に示した。横軸正方向が X 軸で、縦軸は Z 軸であり、単位は[m]である。表示される反射点群の色は $A_n$ 値によって、図中の枠内の通りに決定した。なお $A_n$ の区切り方は Fig. 17 の凡例内に示した。これは実験中に得られた全ての音響反射についての反射強度ヒストグラムから(Fig. 18)判断した。この図は測線 7 の中間近辺のピング断面だが、図から見て取れる通り GeoSwath 送受波器からの深度 5m 付近に凸凹した海底面が存在することが予想される。しかし、この深度 5m 付近の海底面を考えると、それ以外にも多くの反射が存在し、これらがノイズとして考えられる。ノイズについては、送受波器直下の、深度と等距離を半径とする同心円上と、送受波器直下の半径の 4 倍の距離を半径とする同心円上という、二つの同心円上にノイズが多く見られる。これらのノイズはマルチビーム測深器での海底地形調査で見られるトンネル効果[11]、と酷似している。また送受波器から遠くなるにつれて深度方向にデータがばらついていくが、これもマルチビーム測深器で見られるスマイルカーブと似たノイズが生じている。こうした二つのノイズが重なり、そのノイズの反射強度も様々であるため、深度や反射強度だけを用いたノイズ除去を行うことは出来ない。そのため、深度と反射強度でそれぞれ閾値を設定したフィルターを複数用意し、その閾値を厳しくしていきながらフィルター処理を行うことでノイズ除去を試みた。

1 つ目のフィルターは X 軸方向の一定の区間について $A_n$ の値で閾値を決め、その閾値以上の反射点の平均深度 $\pm$ 標準偏差を計算し、深度がその範囲外となる反射点を除去した。この処理を「一定の区間」の幅を 5 m として、5m ずつフィルター区間を移動させながら処理を行うことでノイズを大まかに除去した。除去結果を Fig. 19 に示す。このフィルターで除去された点は、採用された反射点より小さく表示した。このフィルターの結果、想定される海底面が判別しやすくなった。

2 つ目のフィルターは、前のフィルターで採用された全ての反射点について、クロストラック方向 2m ごとに平均深度 $\pm$ 標準偏差を求め、このフィルター範囲を 0.5m ずつ移動させながら範囲外となる反射点を除去した。ノイズ除去の結果、海底面として残った反射点のプロットを Fig. 20 に示す。この図から分かる通り、二つのフィルターを用いてノイズを限りなく除去した海底面のプロットに成功した。なお今回深度方向の閾値を平均深度 $\pm$ 標準偏差としたのは、比較的事業が容易で効果が高かったためである。平均深度の代わりに最小 2 乗法を用いて求めた近似直線との深度の差分を用いて閾値を設定する手法も試みたが、目視でノイズと判断可能な点を多く残す結果となったため今回の手法を用いた。

この手法については改良の余地は多く残るものの、実装の難易度に対する効果を考えると、比較的効率の良いノイズ除去手法だと言えるだろう。

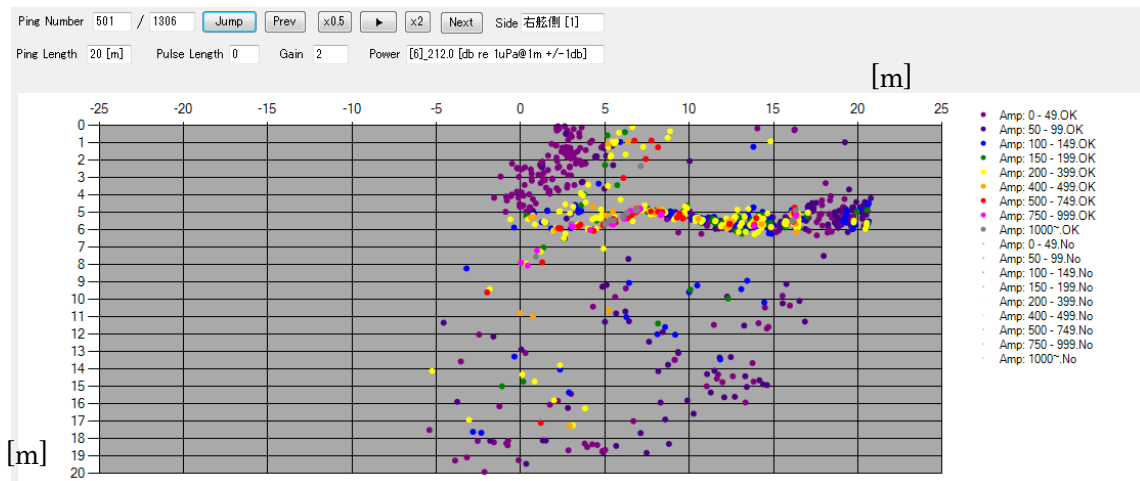


Fig. 17 1 スワスにおける全データをスワス断面に配置

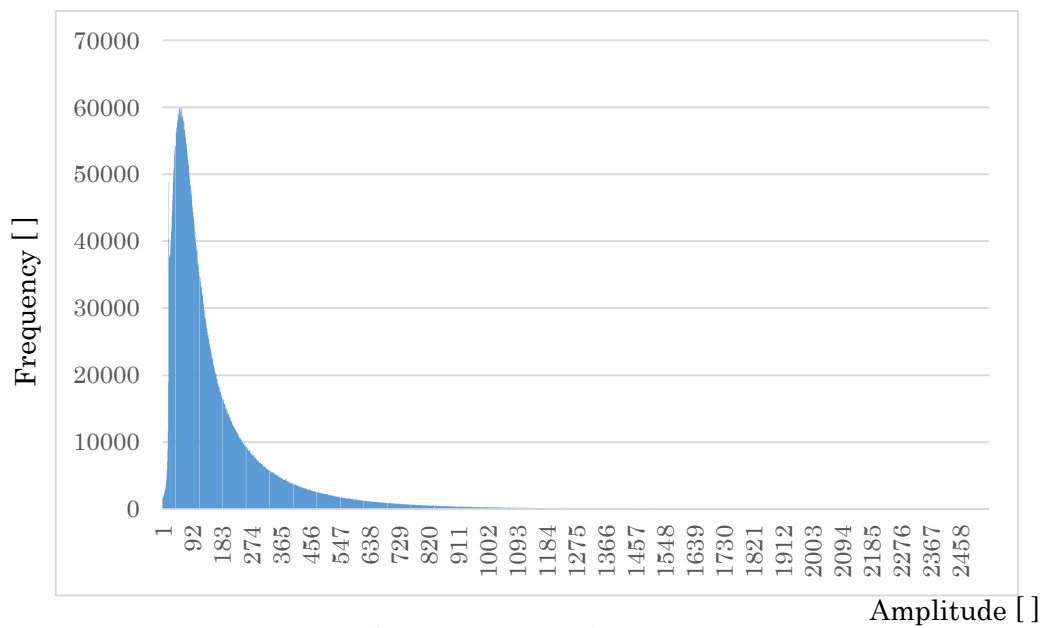


Fig. 18 全測線から得られた反射強度のヒストグラム



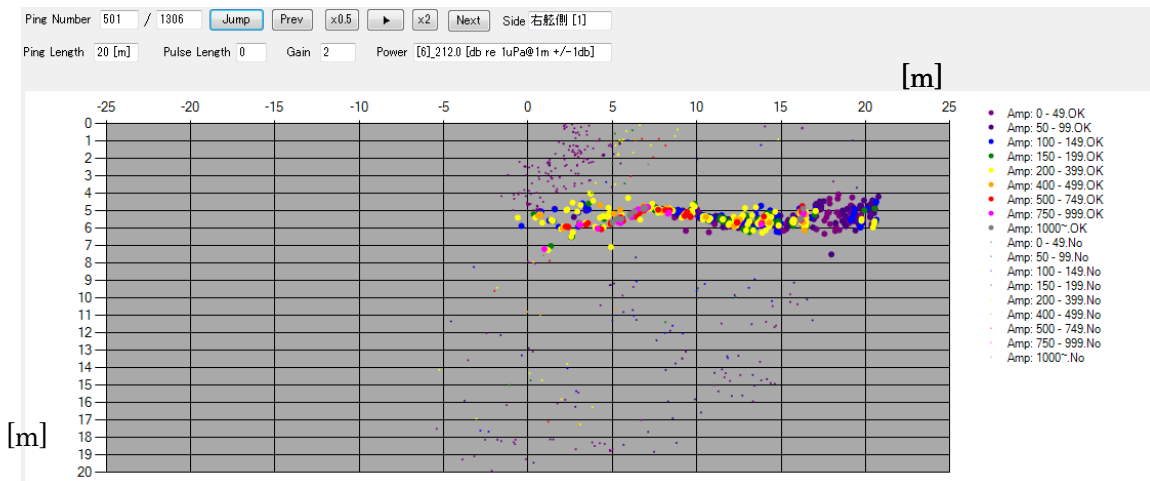


Fig. 19 1つ目のフィルターの適応結果

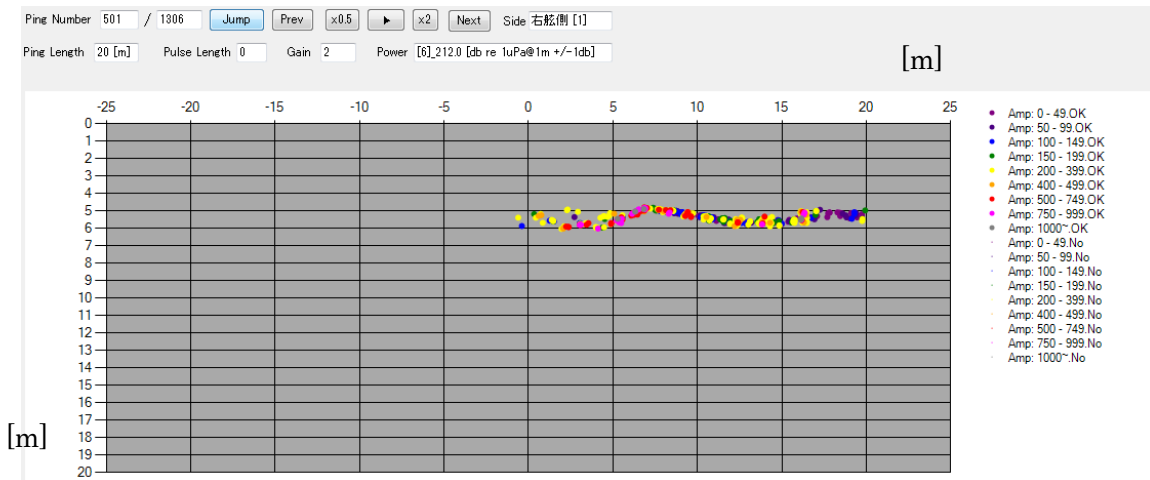


Fig. 20 二つのフィルターの適応結果

### 4.3 動揺補正

次にノイズ除去後に残った音響反射に対して動揺補正を行い、直角座標系での位置と反射強度の組である( $X, Y, Z, A$ )を求めていく。

まず得られたデータを次の通りに整理した。

- ・ 第 1 ピングから第  $N$  ピングまでのピング時刻

$$T_1, T_2, \dots, T_N \quad (10)$$

- ・ 第  $N$  ピングにおける、1 番目から  $n$  番目の音響反射の受波時刻

$$t_{N1}, t_{N2}, \dots, t_{Nn} \quad (11)$$

で得られた音響反射データ

$$(t_{Nn}, \theta_{Nn}, A_{Nn}) \quad (12)$$

- ・ 観測開始時刻 $T_m$ 、収録間隔 $\Delta t_m$ の動揺計測器から得られる船のロール角(Fig. 21)、ピッチ角、ヒープ(Fig. 22)

$$\begin{aligned} & \theta_{roll}(T_m), \theta_{roll}(T_m + \Delta t_m), \theta_{roll}(T_m + 2\Delta t_m), \dots \\ & \theta_{pitch}(T_m), \theta_{pitch}(T_m + \Delta t_m), \theta_{pitch}(T_m + 2\Delta t_m), \dots \\ & Heve(T_m), Heve(T_m + \Delta t_m), Heve(T_m + 2\Delta t_m), \dots \end{aligned} \quad (13)$$

- ・ 観測開始時刻 $T_h$ 、収録間隔 $\Delta t_h$ のジャイロコンパスから得られる船のヘディング角

$$\theta_{head}(T_h), \theta_{head}(T_h + \Delta t_h), \theta_{head}(T_h + 2\Delta t_h), \dots \quad (14)$$

- ・ 観測開始時刻 $T_g$ 、収録間隔 $\Delta t_g$ の GPS から得られる GPS アンテナの日本平面直角座標系での座標

$$\begin{aligned} \mathbf{OG}_{xy}(T_g) &= \begin{bmatrix} X_g(T_g) \\ Y_g(T_g) \end{bmatrix}, \mathbf{OG}_{xy}(T_g + \Delta t_g) = \begin{bmatrix} X_g(T_g + \Delta t_g) \\ Y_g(T_g + \Delta t_g) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{OG}_{xy}(T_g + 2\Delta t_g) &= \begin{bmatrix} X_g(T_g + 2\Delta t_g) \\ Y_g(T_g + 2\Delta t_g) \end{bmatrix} \dots \end{aligned} \quad (15)$$

- ・ 観測開始時刻 $T_s$ 、収録間隔 $\Delta t_s$ の表層水温計から得られる送受波器と同水深の水温

$$S(T_s), S(T_s + \Delta t_s), S(T_s + 2\Delta t_s), \dots \quad (16)$$

そして、船体座標系における GPS から送受波器までの位置ベクトル  $\mathbf{gs}$  と、動揺計測器から送受波機までの位置ベクトル  $\mathbf{ms}$ 、喫水 DFT は次のとおりである。

$$\mathbf{gs} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.930 \\ 2.690 \end{bmatrix}, \mathbf{ms} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.162 \\ -0.241 \end{bmatrix}, \text{DFT} = -0.41 \quad (17)$$

$\mathbf{gs}$  と  $\mathbf{ms}$  の単位は[m]である。船体座標系については Fig. 21 を参照されたい。

それぞれのデータは収録機器とサンプリングレートが異なるため、まず各データ時刻同期を行った。時刻は PC 時刻のタイムスタンプを基準とし、同期方法は線形補間を用いた。

線形補間を用いた理由としては、Table 2 に示した各収録機器の収録間隔が十分短く、航跡は直線に近く、かつ実験日は風と波の影響が大きくなり、収録間隔より短い時間スケールでの外乱要因の少ない実験だったためである。こうして

$$\theta_{\text{roll}}, \theta_{\text{pitch}}, \text{Heave}, \theta_{\text{head}}, \mathbf{OG}_{xy}, S \quad (18)$$

についてピング時刻と往復伝搬時間を合わせた系列

$$T_1, T_1 + t_{11}, T_1 + t_{12}, \dots, T_1 + t_{1n}, T_2, T_2 + t_{21}, \dots, T_N + t_{Nn} \quad (19)$$

におけるデータが得られた。

この時系列の収録データを用いたとき、船体座標系から地上座標系に座標変換を行うには、Y'軸、X'軸、Z'軸の順に回転行列を適応すれば良い。すなわちロール角 $\omega$ ピッチ角 $\varphi$ ヨーイング角 $\theta$ としたとき

$$A(\theta, \varphi, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (20)$$

なる回転行列を乗ずれば、船体座標系を地上座標系へと変換可能である。なおヨーイング角 $\theta_{\text{yaw}}$ とヘディング角 $\theta_{\text{head}}$ の関係は、次のとおりである。

$$\theta_{\text{yaw}} = \frac{\pi}{2} - \theta_{\text{head}} \quad (21)$$

以上のデータに対して、巻らが提案したビーム毎の動揺補正を行った[11]。このとき、直角座標系における送受波器の位置は

$$\begin{aligned} \mathbf{OS}_{XY}(T_N) &= \mathbf{OG}_{XY}(T_N) + A(\theta_{\text{yaw}}(T_N), \theta_{\text{pitch}}(T_N), \theta_{\text{roll}}(T_N)) \cdot \mathbf{gs}|_{XY} \\ \mathbf{OS}_Z(T_N) &= \frac{\text{Heave}(T_N) + \text{Heave}(T_N + t_{Nn})}{2} \\ &\quad + (A(\theta_{\text{yaw}}(T_N), \theta_{\text{pitch}}(T_N), \theta_{\text{roll}}(T_N)) \cdot \mathbf{ms} - \mathbf{ms})|_Z - DFT \end{aligned} \quad (22)$$

となる。このとき、ヒープ量の補正を送波時と受波時の平均としていることに注意されたい。また船体座標系における、GeoSwath 送受波面に対して直交するベクトル、すなわち青い矢印で示されたビームベクトル (Fig. 23)は次の通りである。単位は[m]である。

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

この時、送受波器から反射点までの地上座標系での位置ベクトル $\mathbf{SB}_{Nn}$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{SB}_{Nn} &= A(\theta_{\text{yaw}}(T_N), \theta_{\text{roll}}(T_N) + \theta_{\text{roll}}(T_{Nn}), \theta_{\text{yaw}}(T_N)) \mathbf{i} \\ &\quad \cdot \frac{nS(T_{Nn})}{f} \end{aligned} \quad (24)$$

となる。以上より全てのビームについて地上座標系の位置ベクトル

$$\mathbf{OB}_{Nn} = \mathbf{OS}(T_N) + \mathbf{SB}_{Nn} \quad (25)$$

を計算することが出来た。

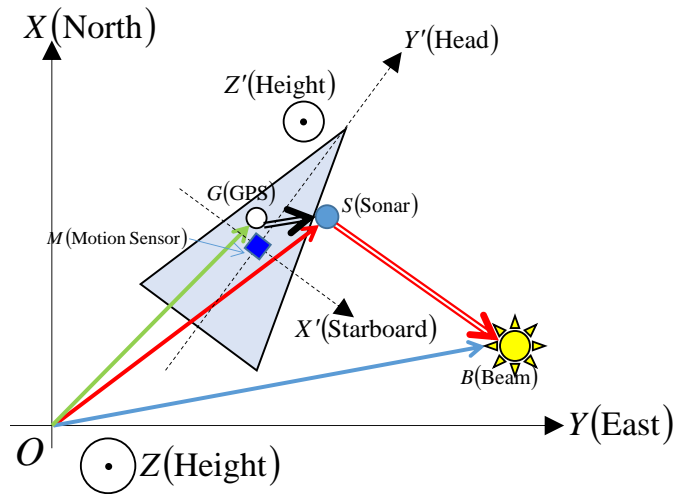


Fig. 21 地上座標系と船体座標系

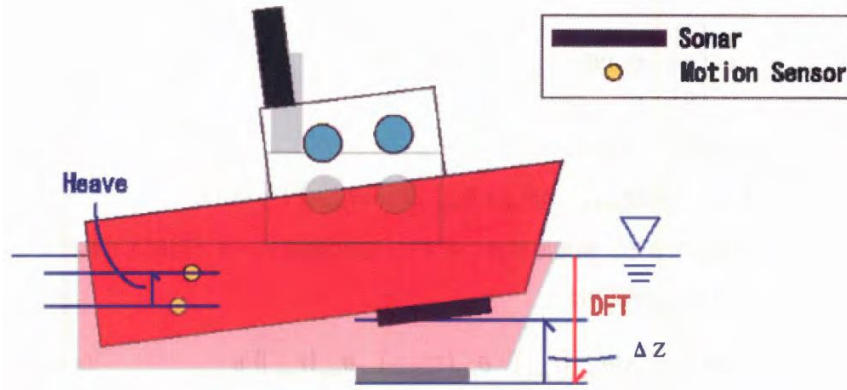


Fig. 22 船体の上下方向の動揺の関係

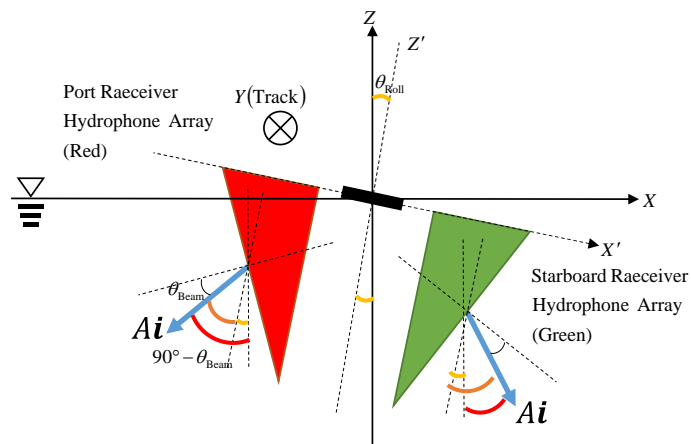


Fig. 23 船体の Y' 軸周りの動揺とビーム角の変化

#### 4.4 グリッド作成

前節までに、GeoSwath のデータから全てのビームについて直角座標系の位置座標と反射強度を合わせた三次元の音響反射データ(X, Y, Z, A)を得ることが出来た。これを三次元測深図と音響画像として描画していく。

音響反射データ点群を音響画像に変換するにあたり、音響反射のフットプリント、つまり照射面積を計算した。GeoSwath はクロストラック方向のビーム幅が0.02 [°]、アロングトラック方向のビーム幅が0.9 [°]となっている。この時クロストラック方向のフットプリント幅  $f_c$  とアロングトラック方向のビーム幅  $f_a$  は送受波機と反射面のスラントレンジ  $r$  を用いて次のように表される。

$$f_c = r \times 0.02 \times \frac{\pi}{180} \tag{26}$$
$$f_a = r \times 0.9 \times \frac{\pi}{180}$$

照射面はスラントレンジに比例するため、照射面のサイズが最も大きくなるピングは調査領域で最も水深が深い海域においてである。今回の調査海域の最大深度は 8m を超えなかったため、水深 8 m でのフットプリント

$$\begin{aligned} & \text{(アロングトラック方向, クロストラック方向)} \\ & = (0.003, 0.126) [m] \end{aligned} \tag{27}$$

より大きくなることはない。

グリッド間隔について検討すると、調査時の船速が約 3.3 knot だったため、GeoSwath の送波間隔が 17 Hz のとき、アロングトラック方向のスワス断面間隔は約 0.1 m となる。つまりアロングトラック方向について最も分解能を保てるグリッドサイズが 0.1 m 四方となる。このグリッドサイズを採用するに当たり、クロストラック方向の解像度が減少してしまっている。

グリッドサイズを定めるにあたってクロストラック方向の解像度が下がったこと、および二つの測線で同じ地点の音響反射を得たことが原因となり、1 グリッドに複数の音響反射が入ってしまった際には、1 グリッド中の複数の音響反射データの中で最も反射強度が高い点をそのグリッドの反射強度と定めた。こうして三次元の音響反射データから、3次元のグリッドデータを得た。

## 4.5 測深図

測深図の描画について、三次元点群(X, Y, Z)を描画するソフトウェアを作成した。このソフトウェアを用いて描画した三次元測深図が Fig. 24 である。これは直角座標における座標 (-146786.9, 43495.3)を画像の左上の座標とする縦 170m 横 170m の領域についてグリッドを描画したものである。画像の上方向が北向きで右方向が東向きである。1 グリッドが 0.1m サイズなので、画像のサイズとしては縦 1700pixel 横 1700pixel となる。深度 y は最浅部で 2.088m、最深部で 7.700m であった。

測深図の上部および右側にかけては凹凸があり、この凹凸が人工岩礁だと考えられる。また測深図左側および測深図下部起伏が少なく、この部分が砂地だと考えられる。これらのこうした測深図の特徴は調査海域の特徴と一致しており、GeoSwath のインターフェロメトリ測深により海底地形を捉えることができたと言える。一方測深図の上部、及び下部にそれぞれ音響データの少ない部分が黒い筋となって現れている。これらは測線 1 の直下と測線 7 の直下であるが、測線 1 と 2 の間隔がスワ幅よりも大きくなってしまったため、データ密度が低くなってしまっている。しかし測線 2 から測線 6 の直下に対応する部分は、測線直下にオーバーラップするよう、他の直線から音響反射が得られるように測線をとったために、こうしたデータ密度の低下を防ぐことが出来た。今回の調査海域を調査するのに所要した時間は 10 分前後であることを考えると、水深が 10m 以浅の浅海域において GeoSwath により効率のよい地底計測が可能であることが確かめられた。

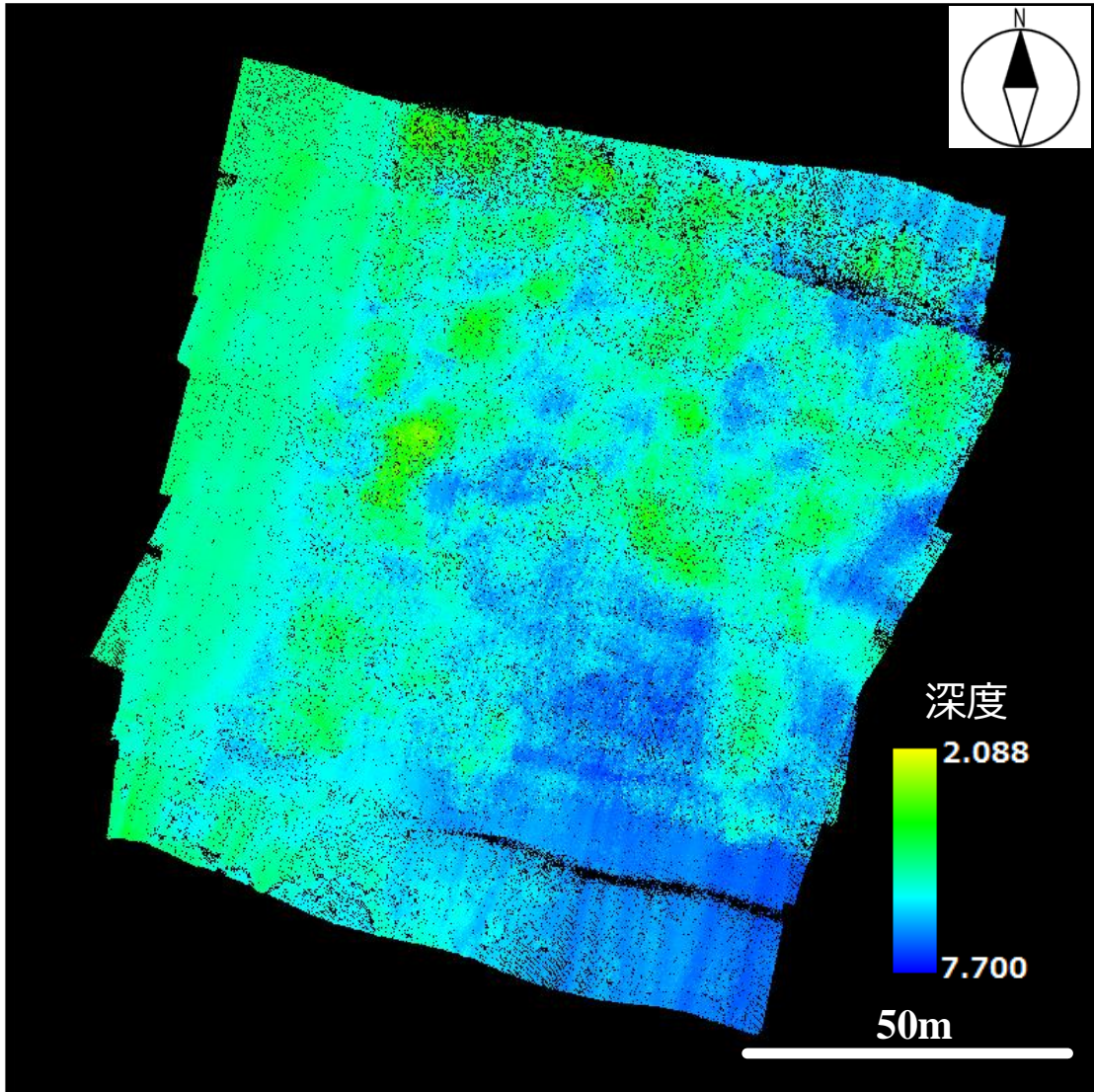


Fig. 24 海底測深図

## 4.6 音響画像

次に GeoSwath で得られた(X, Y, A)を二次元的に描画し音響画像を作成した。反射強度を画像の輝度値に変換するに当たり、まず反射強度の規格化を行った。Fig. 18 の全測線のヒストグラムについて、全反射点の 99.5%を含むのが反射強度が 1058 以下のときなので、まず反射強度を 1058 で正規化した。これを 255 階調の画像の輝度値へと変換して二次元平面に描画したものが Fig. 25 である。描画領域、画像サイズに関しては先程の測深図と同様である。これは反射強度の分布の特性をなるべく保つように輝度値を設定したため、全体的に暗くなってしまっており、この画像から底質の解釈は難しい。そこで音響画像の放射量補正を行った。GeoSwath では、送信波の海底面への入射補角が送受波器直下から最大計測レンジまで大きく変化する。この角度変化に対する反射強度の補正を行った [12]。具体的には位置測線につき 30 ピング中の音響反射についての角度 $\theta$ -反射強度 A プロットを作成し、最小 2 乗法によりプロットの一次の項を除いた近似二次曲線

$$A = a\theta^2 + c \quad (28)$$

を作成した。a, c は二次の項と定数項の定数項であり一次の項は除いた。この補正曲線を 30 ピングごとに計算し、反射強度を補正した。この補正を全ての測線について行い再度描画した音響画像が Fig. 26 である。これも測深図と同じ領域について、同じく 1 画素が 10cm グリッドに対応するよう描画した。Fig. 25 の音響画像に比べ輝度の変化が明瞭になり、海底地形を視覚的に捉えやすくなった。

Fig. 26 の音響画像測の特徴については次のことが分かった。まず深図より人工岩礁と判断された場所には高輝度画素がまだらに配置し、また黒い影の部分も多かった。測深図より人工岩礁を囲むように存在することが分かった砂地のうち、左側の部分については輝度の画素が並び、輝度の変化も少ないが、部分的に高輝度画素の集まりも見られた。画像の左上の部分には高輝度反射点群が点在していた。もう一方の砂地、すなわち画像の下側の部分には高輝度の画素が密集し、周囲の低輝度画素の領域とは異なる構造をした物体が高い反射を返していることが見て取れた。画像の右下の部分も測深図では砂地と判断されているが、高輝度画素が斑に配置をされており、この部分にも周囲の低輝度画素の領域とは異なる物体の存在が考えられた。以上のことを踏まえると音響画像からは 4 つの異なる地形が挙げられた。

- ・ 高輝度画素と輝度値 0 となる画像の影がまだらに入り混じる部分
- ・ 低輝度画素が平均的に集まっている部分
- ・ 高輝度画素が密集している部分
- ・ 低輝度画素のなかに高輝度画素点群が点在している部分

測深図だけでは平坦な部分と起伏に富んだ部分という二つの特徴しか得ることが出来なかったが、音響画像からは上記の 4 つの特徴が推測された。



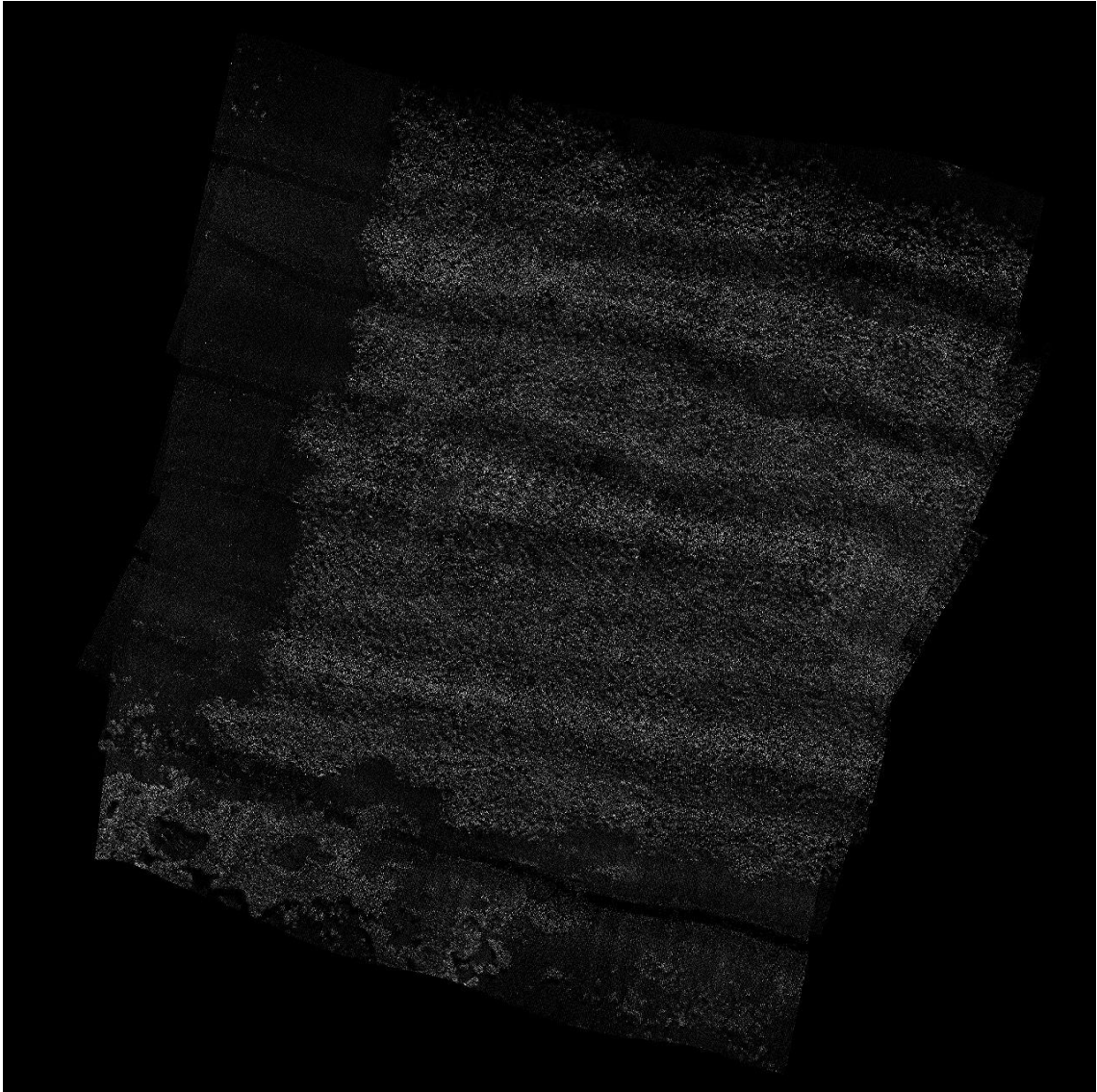


Fig. 25 放射量補正前の音響画像

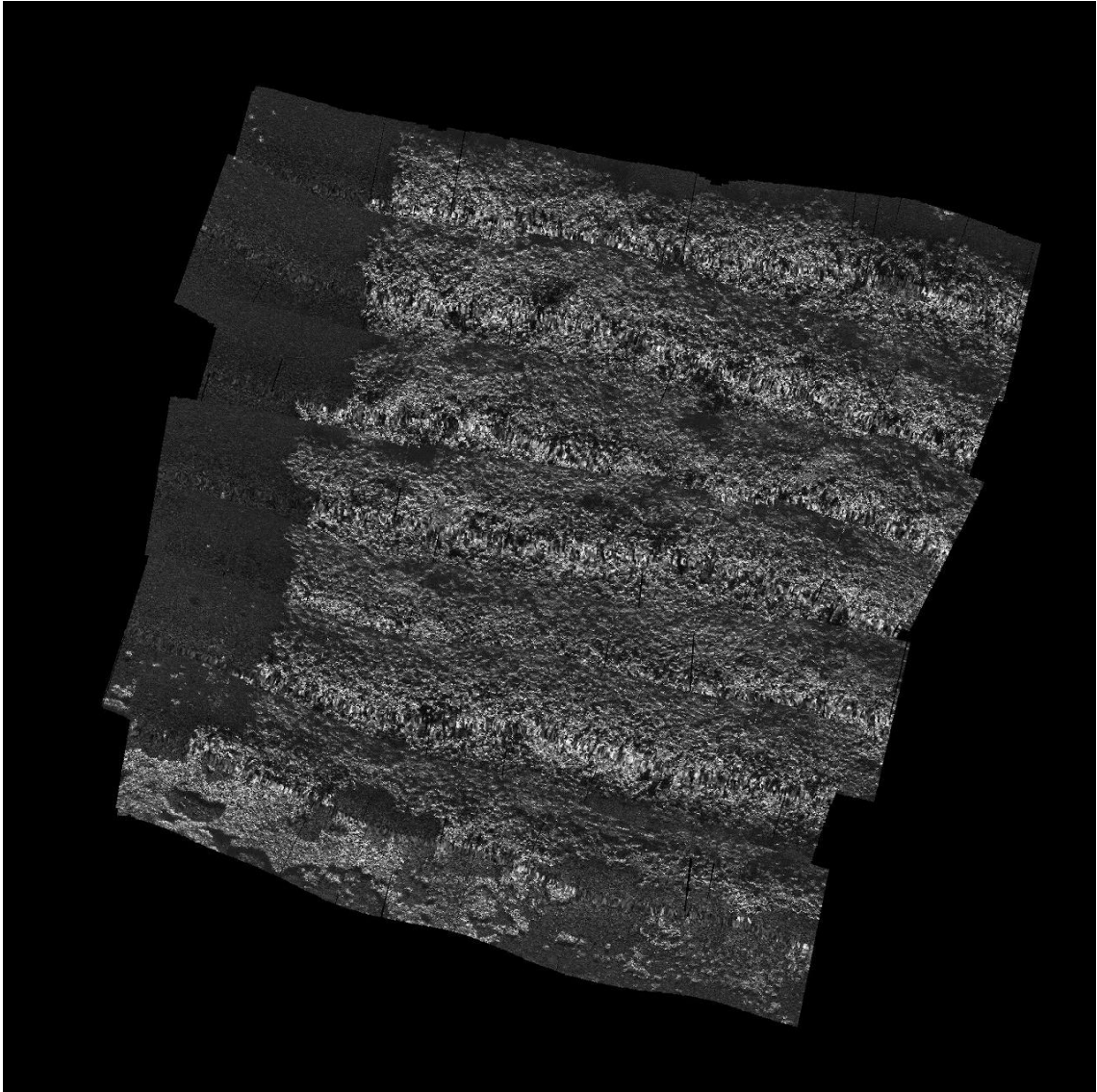


Fig. 26 放射量補正後の音響画像

#### 4.7 潜水カメラ調査結果

2013年8月1日に行われた潜水カメラ調査の結果をまとめたものが Table3 である。座標は直角座標系の値で、X が北向き、Y が東向きである。表の四列目にはダイバーのコメントを記載した。

また海藻の光学画像とダイビングポイント、7月1日の音響調査を行った測線を一つの地図上にまとめたものが Fig. 27 である。

光学画像とダイバーのコメントよりダイビングポイントの植生はアマモ(*Zostera* sp.)とカジメ(*Ecklonia* sp.)であり、ダイビングポイントごとに

- ・カジメ優占：point. 2, point. 4, point. 5, point. 6, point.7
- ・アマモが存在：point. 1, point. 3, point. 8

という二種類に分けられた。さらに

- ・カジメの植生は高く、岩が露出している地底はほぼ見られなかった
- ・アマモは背丈が 1m 未満で、群落内での背丈のばらつきは少なかった

ということも分かった。

Table 3 ダイビングポイントの座標と直下の海藻・海草

Diving Points	X [m]	Y [m]	comments
point. 1	-148056.9	43527.8	Short <i>Zostera</i> sp.
point. 2	-147686.9	43545.3	<i>Ecklonia</i> sp. colony.
point. 3	-146986.9	43915.3	Sparse <i>Zostera</i> sp.
point. 4	-147056.9	44195.3	<i>Ecklonia</i> sp. colony.
point. 5	-146821.9	43639.3	<i>Ecklonia</i> sp. colony.
point. 6	-147216.9	43625.3	Exposed sand among <i>Ecklonia</i> sp.
point. 7	-148006.9	44445.3	<i>Ecklonia</i> sp. colony.
point. 8	-148266.9	44495.3	Short <i>Zostera</i> sp.

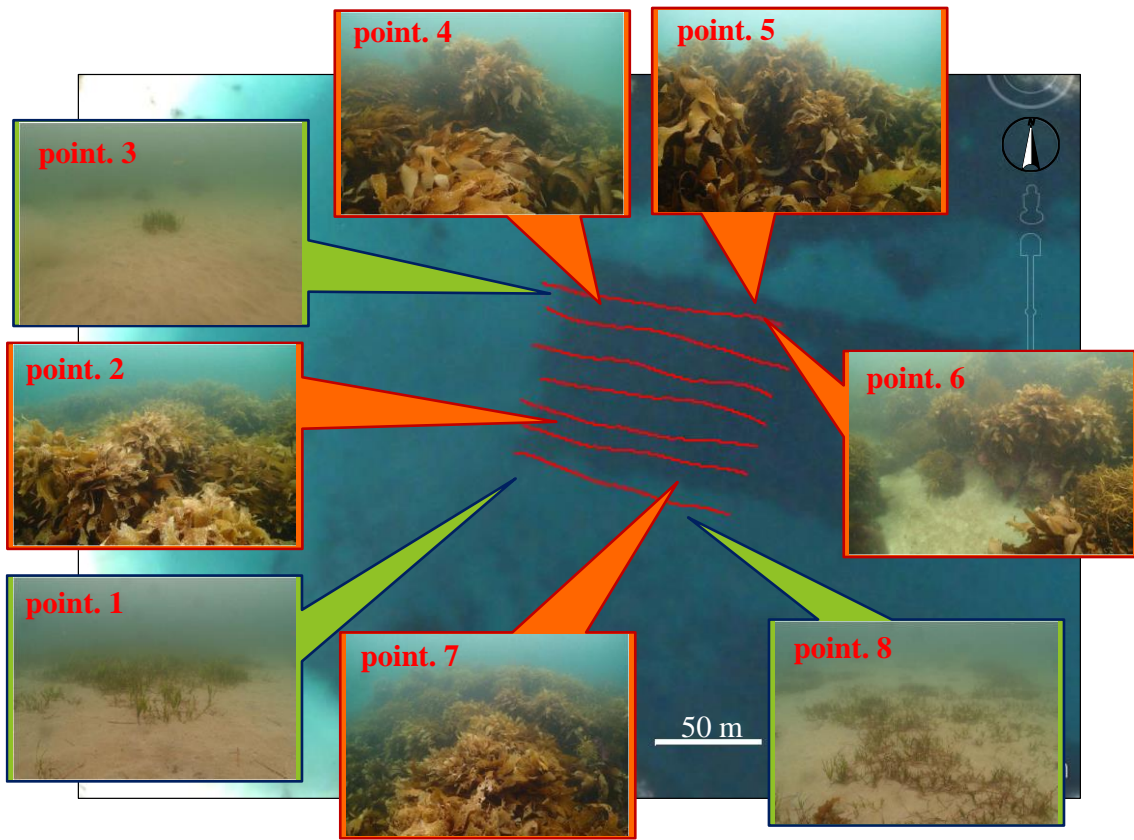


Fig. 27 潜水カメラ調査の撮影結果とダイビングポイント

#### 4.8 実験結果のまとめと分布の予想

潜水カメラ調査の結果から、調査海域の底質はアマモ、カジメ、砂地の3種類に大別された。またアマモは砂地に、カジメは岩上に生息することが知られている[13][14]。

この潜水調査の結果から GeoSwath の音響画像の4つの特徴を解釈すると、

- ・測深図で海底の起伏が大きいと判断され、音響画像では高輝度画素と輝度値 0 となる画像の影がまだらに入り混じっていた部分はカジメ群落であった
- ・測深図で海底の起伏が小さいと判断され、音響画像では低輝度画素が平均的に集まっていた部分は砂地であった
- ・測深図で海底の起伏が小さいと判断され、音響画像では高輝度画素が密集していた部分はアマモ群落であった
- ・測深図で海底の起伏が小さいと判断され、音響画像では低輝度画素のなかに高輝度画素点群が点在していた部分は砂地に疎らに生えるアマモであった

となった。つまり、調査海域では中央から北、東にかけて岩礁上にカジメ群落が広がり、南部と北西部にはアマモ群落が見られ、西部には砂地が広がっていることが分かった(Fig. 28)。

この分布の予想を基に、画像解析的な手法を用いて3つの底質、つまり

- ・砂地
- ・砂上のアマモ
- ・岩上のカジメ

の分布を定量的に調べる必要がある。

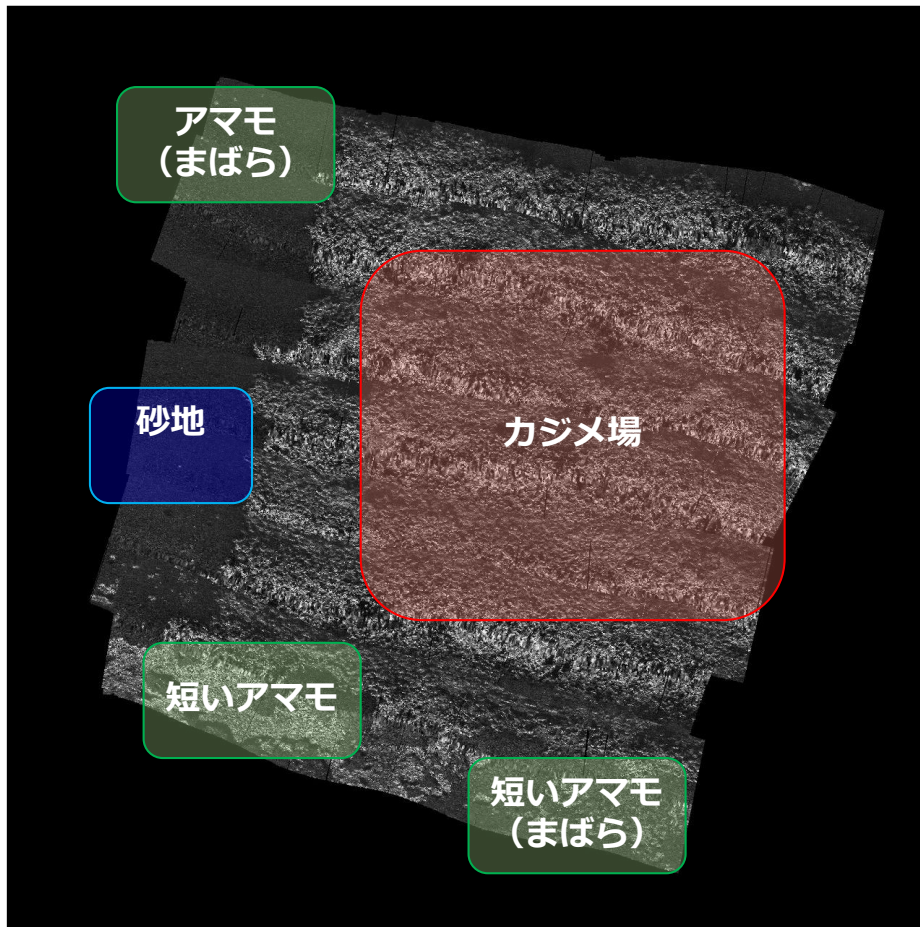


Fig. 28 調査海域の海底底質の分布の予想

## 5章 解析

### 5.1 確率密度関数を用いた画像解析

GeoSwath により取得された音響画像の解析にあたり、始めに確率密度関数の形状パラメータを用いた解析により反射点の底質分類を試みた。この解析では、海中におけるソナー信号の確率分布がレイリー分布に乗るということから[15]、式(28)のレイリー分布の形状パラメータである標準偏差  $\sigma$  を比較した。

通常アクティブソナーの送波信号は、多様な要因により反射、散乱の後に受波機へ到来するため、その分布については様々なモデルが考えられるが、本研究ではその要因については深く立ち入らず、まずはガウス分布に従うと仮定して解析を始めた。レイリー分布については次の式で表される。

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (\sigma: \text{Mode}) \quad (29)$$

ここで、 $x$  は受信される信号の振幅、 $\sigma$  は受波信号のばらつきを示す標準偏差である。

解析方法について具体的な手法を述べる。まず4章で作成した音響画像について、縦 64pixel 横 64pixel の正方領域（以下対象領域）(Fig. 29)について、輝度値のヒストグラムを作成し、ヒストグラムの最頻値を求めた。アマモ、カジメ、地面のヒストグラムをそれぞれ Fig. 30, Fig. 31, Fig. 32 に示す。

次に輝度のヒストグラムの標準偏差  $\sigma$  を算出し、これを用いて閾値を設定し、閾値と比較した。最後に閾値との比較結果に基づいて正方領域の中心の縦 16pixel 横 16pixel の正方領域（以下判定領域）の底質を決定した。この一連の流れを、対象領域を 16pixel ずつ移動させながら行っていくことで、音響画像を 1 メッシュが 16pixel (=1.6m) 四方となるようメッシュ分割が行われた段彩図が作成された。閾値は上記の解析手法にもとづき得られた輝度東経分布から 3 つ設定し、音響画像の色裁断を行った。

なお音響画像は 170m 四方であり、上下左右の端 0.2m を除いた 169.6m 四方の領域についてメッシュ分割を行うことで、1700pixel 四方の音響画像を 106 メッシュ四方の領域として評価した。

段彩を行った音響画像が Fig. 33 である。輝度ヒストグラムの標準偏差  $\sigma$  が高くなるに従ってメッシュの色が黒→青→緑→赤と変えて表示したが、これは対象領域内の植生に対応している。すなわち、対象領域内の輝度分布が高ければ対象領域内には高い反射強度を引き起こす底質が占める割合が高い。今回の調査海域においては事後の潜水調査により反射強度が高いエリアの底質は植物か岩石が分かった。さらに、同じ時期に行われたカジメの繁茂状

況の潜水調査において得られた結果から、露出した岩石は多くないこともわかっているため、対象領域内で高い反射強度分布をつくる要因は植物となった。つまりメッシュの色は周囲の植生の度合いに対応していると考えられた。

実際、4章の潜水調査の結果、調査海域南部のアマモ場や調査海域中央のカジメ場が、段彩図の赤い部分と対応しており、また調査領域北西の、砂地に点在するアマモについても青いメッシュで周囲の砂と区別できており、音響画像の輝度分布をレイリー分布の形状パラメータ $\sigma$ を用いて解析することが、調査海域の植生調査に対して有効性を持つという可能性が得られた。

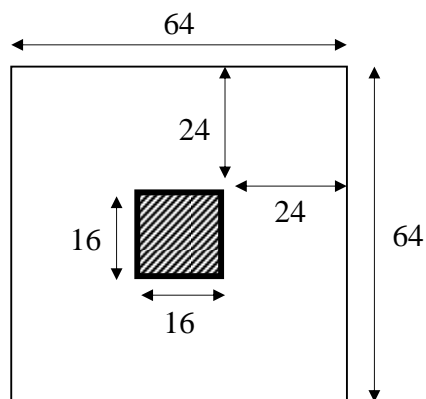


Fig. 29 対象領域（外側）と判定領域（内側）

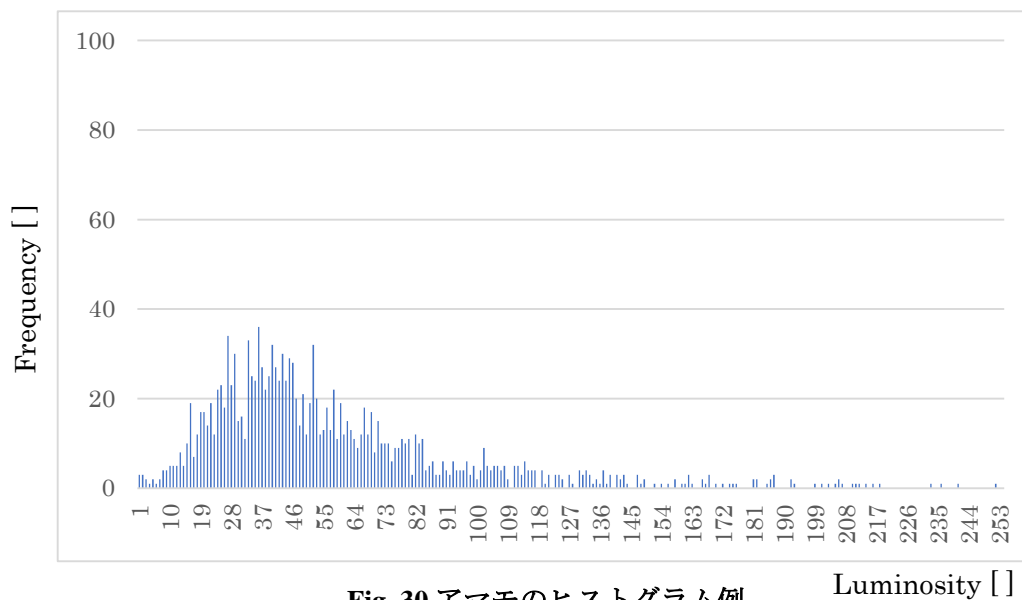
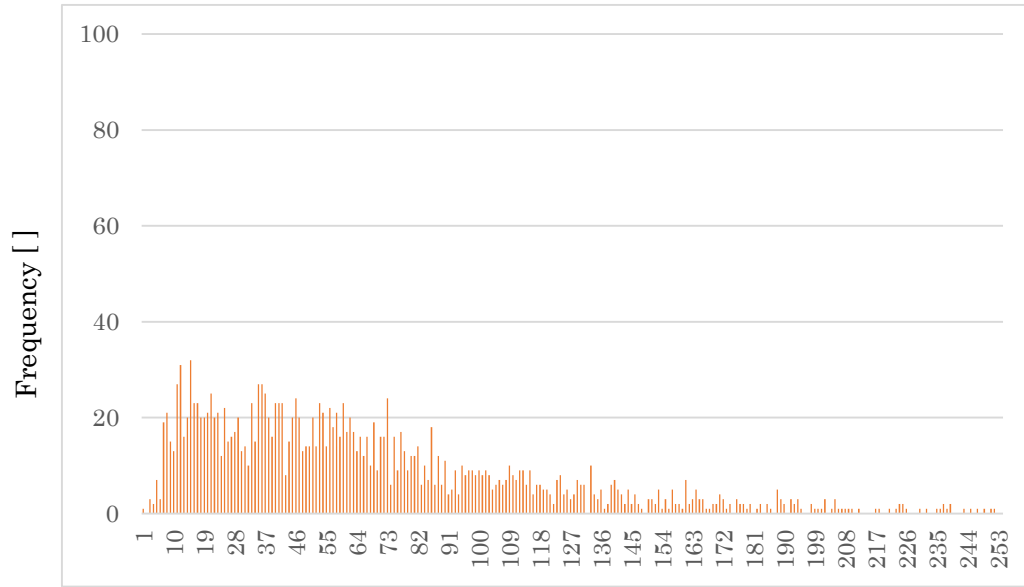


Fig. 30 アマモのヒストグラム例

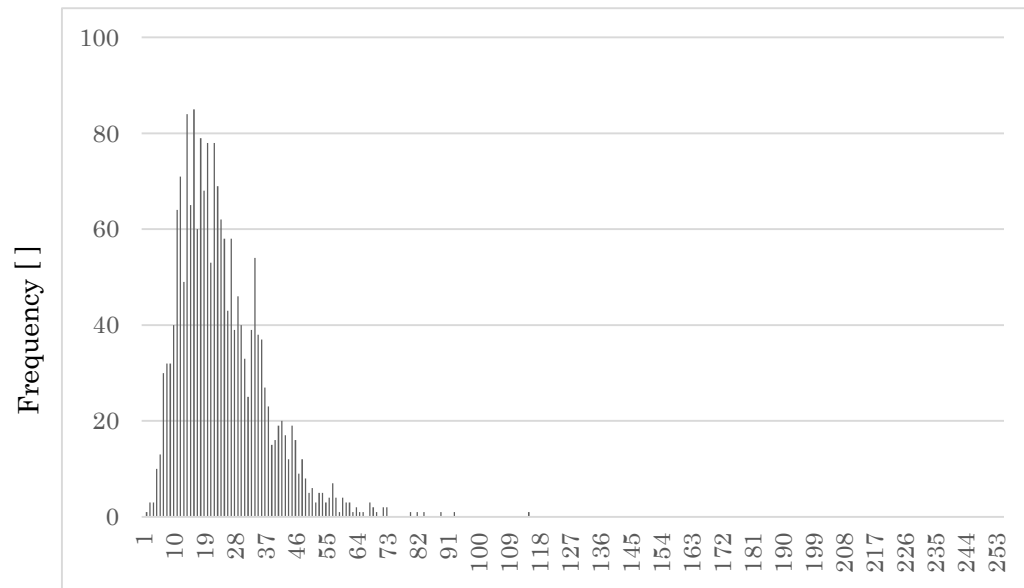
Luminosity [ ]





**Fig. 31** カジメのヒストグラム例

Luminosity [ ]



**Fig. 32** 砂地のヒストグラム例

Luminosity [ ]

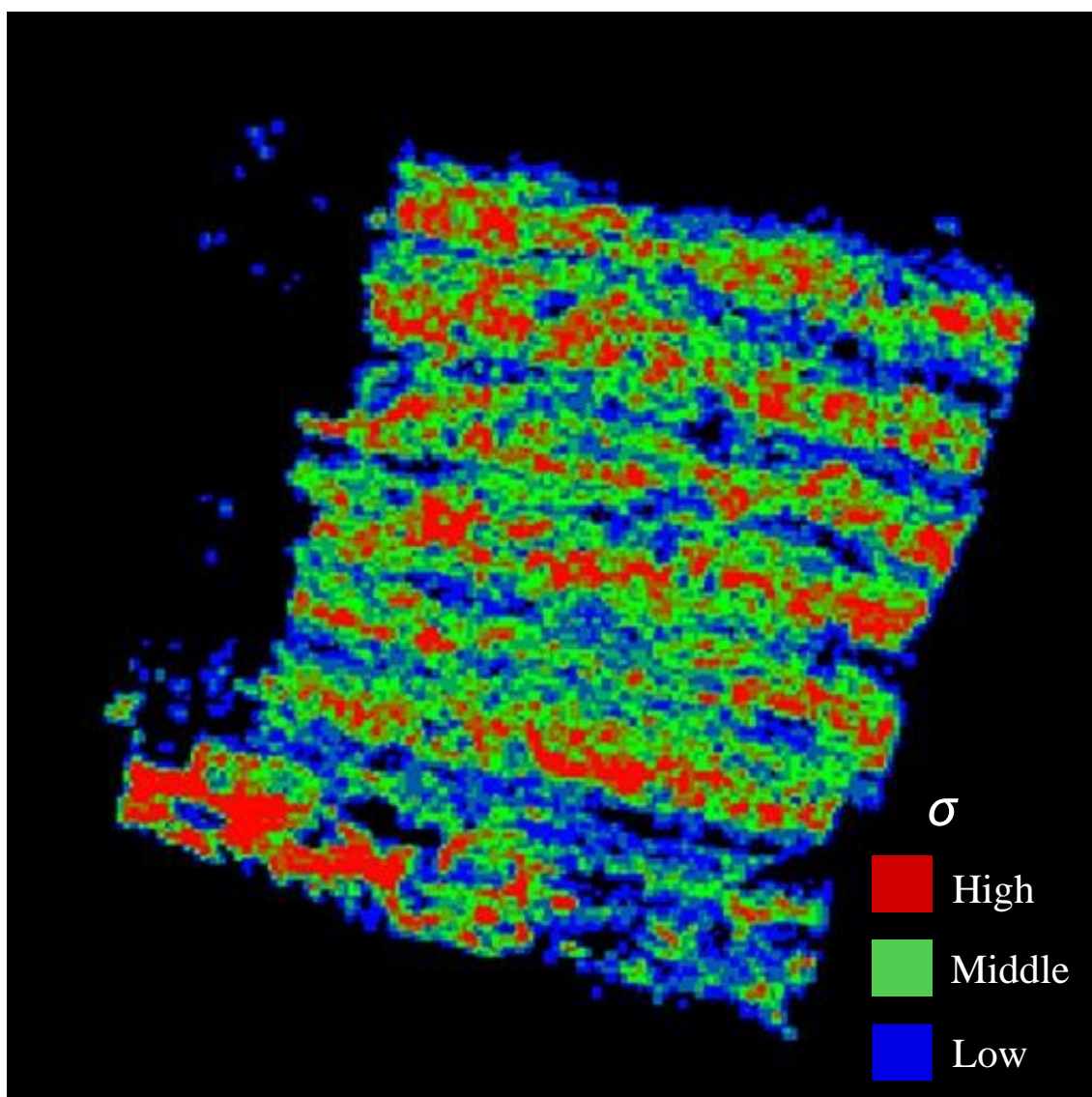


Fig. 33 確率密度関数によって段彩を行った音響画像

## 5.2 空間周波数領域での画像解析

### 5.2.1 周波数解析

次に音響画像について、空間周波数領域での解析を行った。具体的な解析手法を述べるにあたり、まず画像の周波数解析について述べておく。

濃淡画像にフーリエ変換を適応するに当たって、画像を信号として表現する。長さ  $L$  を周期とする 1 次元画像（縦長ないし横長の画像）は正弦波信号を用いて

$$f(x) = 0.5 + A \sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \quad (30)$$

と表現される。ただし画像の最大輝度値を 1 とし  $|A| < 0.5$  とする。 $\mu = \frac{1}{L}$  を空間周波数と呼び、単位長さあたりの正弦波の個数を表している。画像全体の幅を  $L_0$  とし、この  $L_0$  を基準にした空間周波数を、基本周波数  $\mu_0 = 1/L_0$  として定義し、任意の空間周波数を  $\mu = k\mu_0$  と表現

する。次数  $k$  は幅  $L_0$  に含まれる正弦波の波数と対応している。画像の幅  $L_0$  内に  $M$  個の画素が間隔  $d$  で並んでいるとき、 $L_0 = Md$  より、離散化された正弦信号は

$$f(m) = 0.5 + A \sin\left(k \frac{2\pi}{M}m\right) \quad (31)$$

と表現される。これを 2 次元デジタル画像に拡張すると、作成した音響画像は輝度を 256 階調で表現していることを考慮して、

$$f[m, n] = 128 + 127 \sin\left(k \frac{2\pi}{M}m + l \frac{2\pi}{L}n\right) \quad (32)$$

と表現される。これが 2 次元デジタル画像の正弦信号である。 $f[m, n]$  は横  $M$  画素、縦  $N$  画素の画像における左上から横  $m - 1$  番目、縦  $n - 1$  番目の画素の輝度値で、 $k$  は横方向空間周波数、 $l$  は縦方向周波数に相当する。こうして、画像を波として表現することが可能となる。

この 2 次元画像信号をについて離散フーリエ変換を行うことは下記の式で表される。

$$F[k, l] = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} f[m, n] W_1^{km} W_2^{ln} \quad (33)$$

ただし、 $W$  は位相回転因子で

$$W_1 = e^{-j\frac{2\pi}{M}}, W_2 = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (34)$$

である。なお  $j$  は虚数単位である。

同様に 2 次元の離散フーリエ逆変換は

$$f[m, n] = \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} F[k, l] W_1^{-km} W_2^{-ln} \quad (35)$$

と与えられる。これらは Fig. 34 の様に、まず画像の各行を 1 次元の横長の画像とみなして離散フーリエ変換を適応し、次に各列に対して離散フーリエ変換を行っている。実際には計

算時間の高速化のために、離散フーリエ変換ではなく二次元の高速フーリエ変換を用いているため、 $2^n$ 画素に画像のサイズが制限されることになり、得られる周波数成分の数は $2^{n-1} - 1$ となる。Table4に今回実験で用いた画素間隔0.1mの64画素画像、32画素画像に対する高速フーリエ変換の結果得られる周波数成分と波長をまとめた。これは画像を周波数領域に変換してそのスペクトルを得た際に、画像中にどの波長の波がどの程度含まれているか、つまり画素間距離の頻度を考える指標となり、アマモやカジメのように群落を形成する植物を音響画像としてとらえた際に、短い波長成分が多ければ密集した群落であると考えられ、また長い波長成分が多ければ疎らな群落であり、そして各波長成分が小さければ画像中に強い反射を引き起こす物体が無い、とそれぞれ判断することができた。こうした、周波数成分の強さを表す値としてパワースペクトル  $P(k, l)$  が存在し、次のように定義される。

$$P(k, l) = |F(k, l)|^2 \quad (36)$$

さて、濃淡画像に対して高速フーリエ変換を適応する例を Fig. 35 と Fig. 36 に示した。Fig.35 左側はダイビングポイント 5 の直下に相当する 64 画素四方の音響画像を切り出したものである。水中カメラの画像からはこの地点にはカジメが繁茂していることが判明しているが、音響画像では輝度の高い反射が疎らに存在しており、この疎らな点群がカジメ群落の音響画像的な特徴だと考えられる。この音響画像を、高速フーリエ変換を用いて周波数領域に変換し、そのパワースペクトルと輝度を対応させて画像に変換したものが右側である。これは低周波成分が画像の中心に来るよう並び替えたものである。また周波数成分の差を視覚的に捉えやすくするために、パワースペクトルの常用対数をとった後に 256 階調で規格化している。パワースペクトルの画像から見て取れるように、カジメが繁茂している地点の画像は中心付近、つまり輝度の間隔が離れた成分を多く含んでおり、中心から遠くに存在する輝度の間隔が短い成分はあまり多く含まないことがわかる。

同様にダイビングポイント 1 直下の音響画像（左側）と、そのパワースペクトル画像（右側）を Fig. 36 に示す。水中カメラの画像からはこの地点にはアマモ群落が存在することがわかっているが、音響画像では高輝度画素が密に存在しており、これがアマモの音響画像的な特徴だと考えられる。またこの画像のパワースペクトルは低周波成分から高周波成分まで万遍なく存在するが、特に高周波成分が強くなっており、この音響画像には輝度の間隔が短い成分が特に多いことが分かった。

こうした周波数成分の違いを定量的に表すためにパワースペクトルを極座標形式で表現すると、

$$P(r, \theta) = |F[k, l]|^2 \quad (37)$$

となる。 $r$  はスペクトル画像における中心から各画素までの距離で角度に依存しない空間周波数であり、 $\theta$  は  $k$  軸からの角度[rad]である。これを  $\theta$  について総和をとった

$$P(r) = \sum_{\theta=0}^{2\pi} P(r, \theta) \quad (38)$$

は縦横の方向を持たない空間周波数成分のスペクトルと定義できる。これは Fig. 37 において  $r_2 = r_1 + \Delta r$  としたときのドーナツ型の領域内のパワースペクトルの総和である。Fig. 35, Fig. 36 のようにパワースペクトルを二次元的に表示させるのではなく、こうして一次元に変換することで比較が容易になる。この  $P(r)$  は画像内にどの程度離れた画素が多く含まれているかの指標、つまり画像のキメの指標となっている。 $r$  についても Table 4 から実空間上の距離と対応させることができる。なおダイビングポイント 1 とダイビングポイント 5 の音響画像の  $P(r)$  を Fig. 38 に示した。カジメの方がアマモに比べ低周波成分、つまり長波長の輝度変化が多く含まれることが分かる。

最後に、画像のバンドパスフィルタについて説明する。画像処理におけるバンドパスフィルタは特定の周波数成分から画像を再構成することになるが、Fig. 37 のドーナツ型の領域内の周波数成分、つまり

$$r_1 \leq k \leq r_2, r_1 \leq l \leq r_2 \quad (39)$$

を満たす  $F[k, l]$  だけに高速フーリエ逆変換を適応して画像を再構成する手法である。Fig. 39 がアマモ場の音響画像（中央）に対してバンドパスフィルタを適応したもので、左側が式 (38) において  $r_1 = 0, r_2 = 12$  を満たす低周波成分のみから再構成した音響画像であり、右側式 (38) 式において  $r_1 = 12, r_2 = \infty$  を満たす高周波成分のみから再構成した音響画像である。低周波画像は元の音響画像に比べ全体がぼやけるおり、逆に高周波画像は元の画像のぼやけた部分がなくなり、周囲に比べて輝度の高い画素、つまり輝度の変化が大きい部分が抽出されていることが見て取れる。この画像のバンドパスフィルタを用いることで、音響画像が海底底質の性質を反映することができているという前提に基づき、音響画像の解析を通じて海底底質を判別することが可能となる。

音響画像でとらえたアマモ、カジメの差を Fig. 35, Fig. 36 で示したがこれらはアマモ、カジメの植生の空間分布的な差によるものだと考えられる。アマモは砂地に生息し、その群落の背丈は群落内で大きく変化しないためアマモ群落の天蓋部もまた比較的なだらかとなる。その結果群落の天蓋部から満遍なく反射波が返り、Fig. 36 のように高輝度画素が密に分布していると考えられる。一方カジメは潜水カメラ調査の結果からも見て取れる通り、砂地に比べて起伏に富んだ岩場に繁殖している。そのため音響反射が返らないソーナーの影が出来やすく、Fig. 35 のような高輝度画素が疎らに存在した音響画像が生成されるのだと考えられる。こうした両者の植生の差が画像中の高輝度画素の分布、つまり画像の肌理の細かさに影響をあたえる可能性を考えれば、フーリエ変換により両者を識別できるのではないかと考えられる。

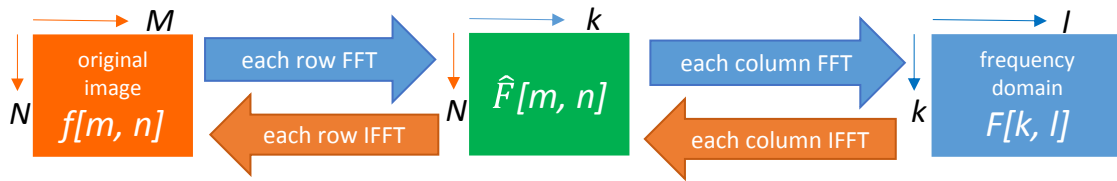


Fig. 34 画像に対する二次元フーリエ変換の概略図

Table 4 各空間周波数に対応する実空間上の距離

frequency [ ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
wevelength [m]	3.200	2.133	1.600	1.280	1.067	0.914	0.800	0.711	0.640	0.582	0.533	0.492	0.457	0.427	0.400	0.376
half wavelength [m]	1.600	1.067	0.800	0.640	0.533	0.457	0.400	0.356	0.320	0.291	0.267	0.246	0.229	0.213	0.200	0.188
frequency [ ]	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
wevelength [m]	0.356	0.337	0.320	0.305	0.291	0.278	0.267	0.256	0.246	0.237	0.229	0.221	0.213	0.206	0.200	
half wavelength [m]	0.178	0.168	0.160	0.152	0.145	0.139	0.133	0.128	0.123	0.119	0.114	0.110	0.107	0.103	0.100	
frequency [ ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
wevelength [m]	1.600	1.067	0.800	0.640	0.533	0.457	0.400	0.356	0.320	0.291	0.267	0.246	0.229	0.213	0.200	
half wavelength [m]	0.800	0.533	0.400	0.320	0.267	0.229	0.200	0.178	0.160	0.145	0.133	0.123	0.114	0.107	0.100	

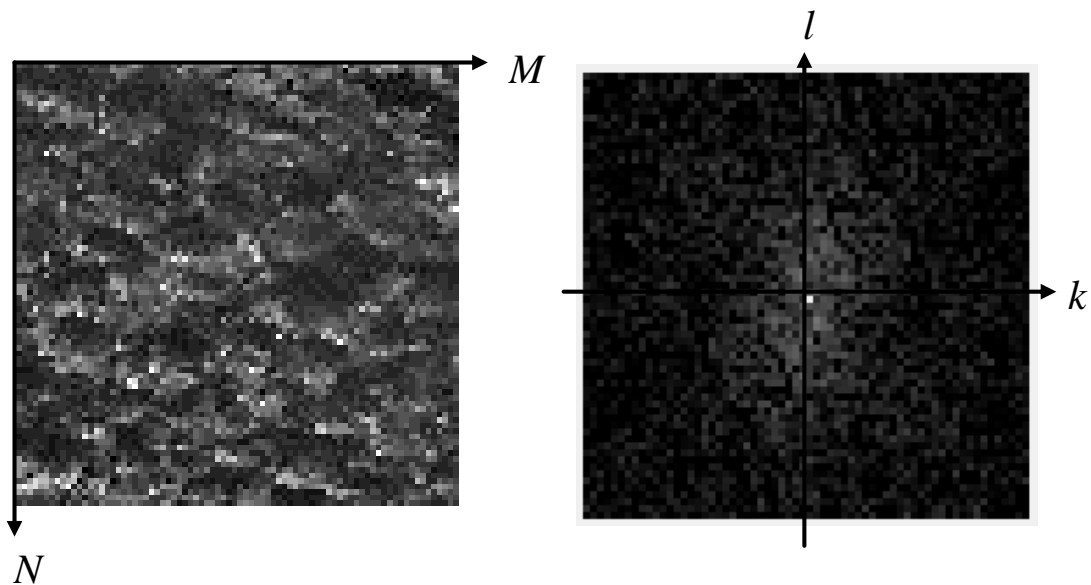


Fig. 35 カジメの音響画像 (左) とパワースペクトル (右)

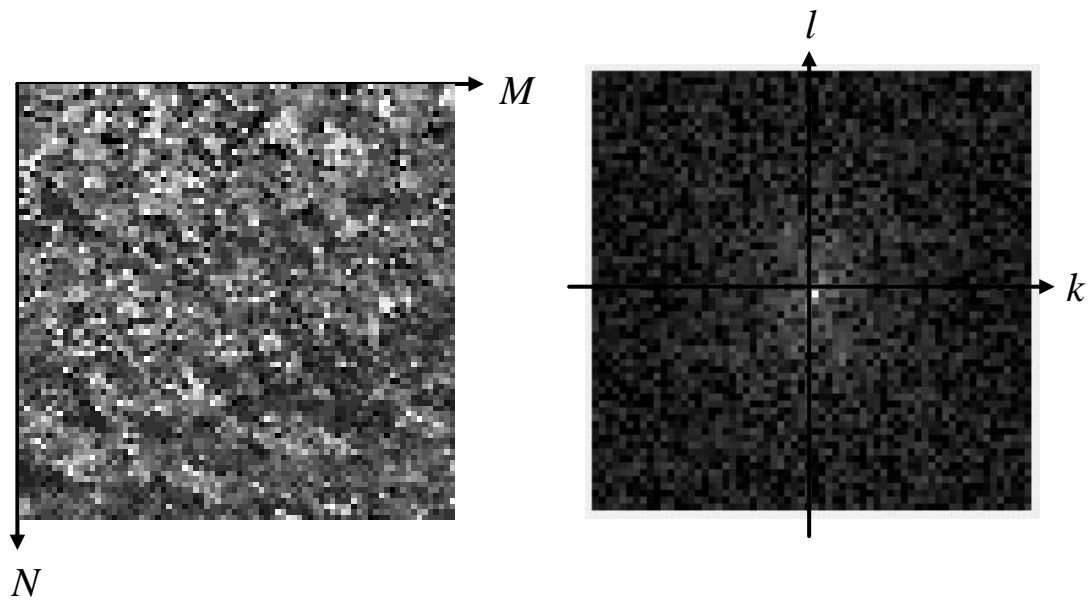


Fig. 36 アマモの音響画像 (左) とパワースペクトル (右)

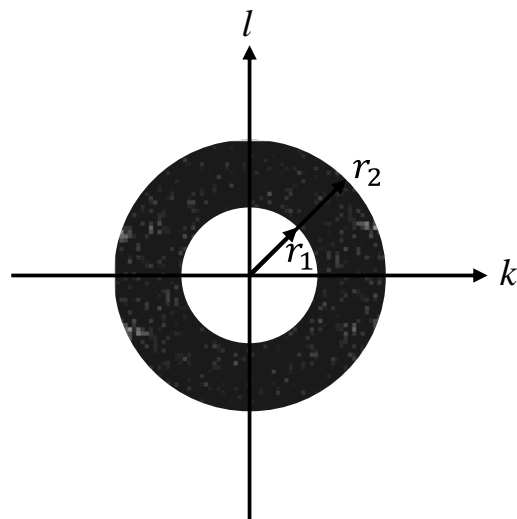


Fig. 37 パワースペクトルにおいて式(38)を満たす領域

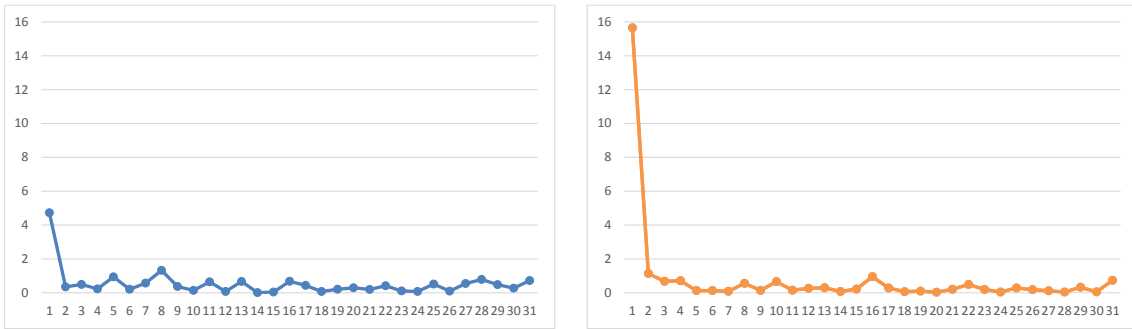


Fig. 38 アマモのパワースペクトル  $P(r)$  (左) とカジメのパワースペクトル  $P(r)$  (右)

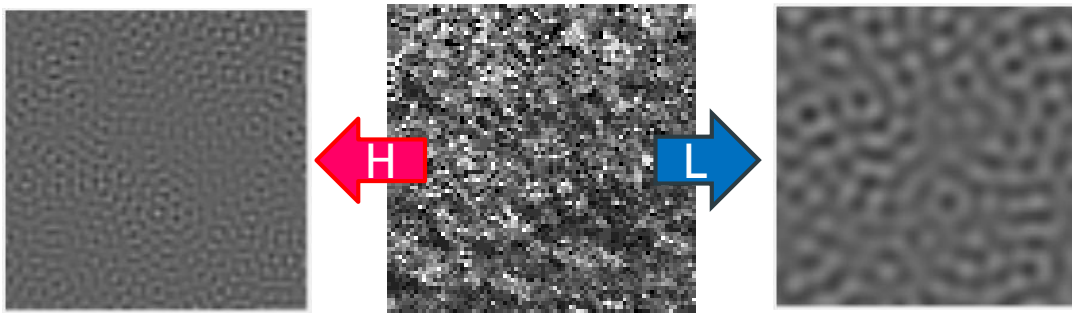


Fig. 39 ダイビングポイント6直下の音響画像に対するバンドパスフィルタの適応例。右は低周波成分だけを、左は高周波成分だけを抽出して再構成した音響画像である。

### 5.2.2空間スペクトルによる識別

前章の確率密度関数を用いた画像解析と同様に対象領域を縦 64pixel 横 64pixel、判定領域を対象領域の中心縦 16pixel 横 16pixel と定め、判定領域を1メッシュとした 196メッシュ四方の領域について、対象領域を移動させて音響画像をメッシュ分割していくことで解析を行った。

まず対象領域に対して二次元フーリエ変換を行い空間周波数領域へと変換した。次に空間周波数成分から各周波数成分のパワースペクトルを求め、画像の中心に低周波領域が来るよう並び替えを行った。その後は等距離成分の総和を求めた。つまり、空間周波数を極座標形式で表現したとき、式(37)のように等距離領域内のパワースペクトルを求めた。こうしてもとめたパワースペクトルについて閾値を設定し、この閾値に基づき段彩図を作成し、判定領域内の底質を決定について検討した

Fig. 40 が作成された段彩図である。低周波成分の強さで閾値を設定し、周波数成分の弱い部分から強くなるに従い青→緑→赤と変化させた。測深図より起伏が少なく砂場であると判断された部分には赤いメッシュが少なく、岩場だと考えられる部分には赤いメッシュが多くなっている。岩場において周波数成分を高める要因は植物であり、かつ岩場にはカジ



メが多く繁茂していることを考えると、周波数成分の低い部分とカジメ場が対応していると考えられる。調査海域南西のアマモ場にも赤いメッシュが存在することから、この分類手法でアマモとカジメを完全に区別することはできなかったが、底質においてカジメが優先する場所が音響画像のどこに相当しているのかということを示す定性的な分類手法として効果があると考えられる。

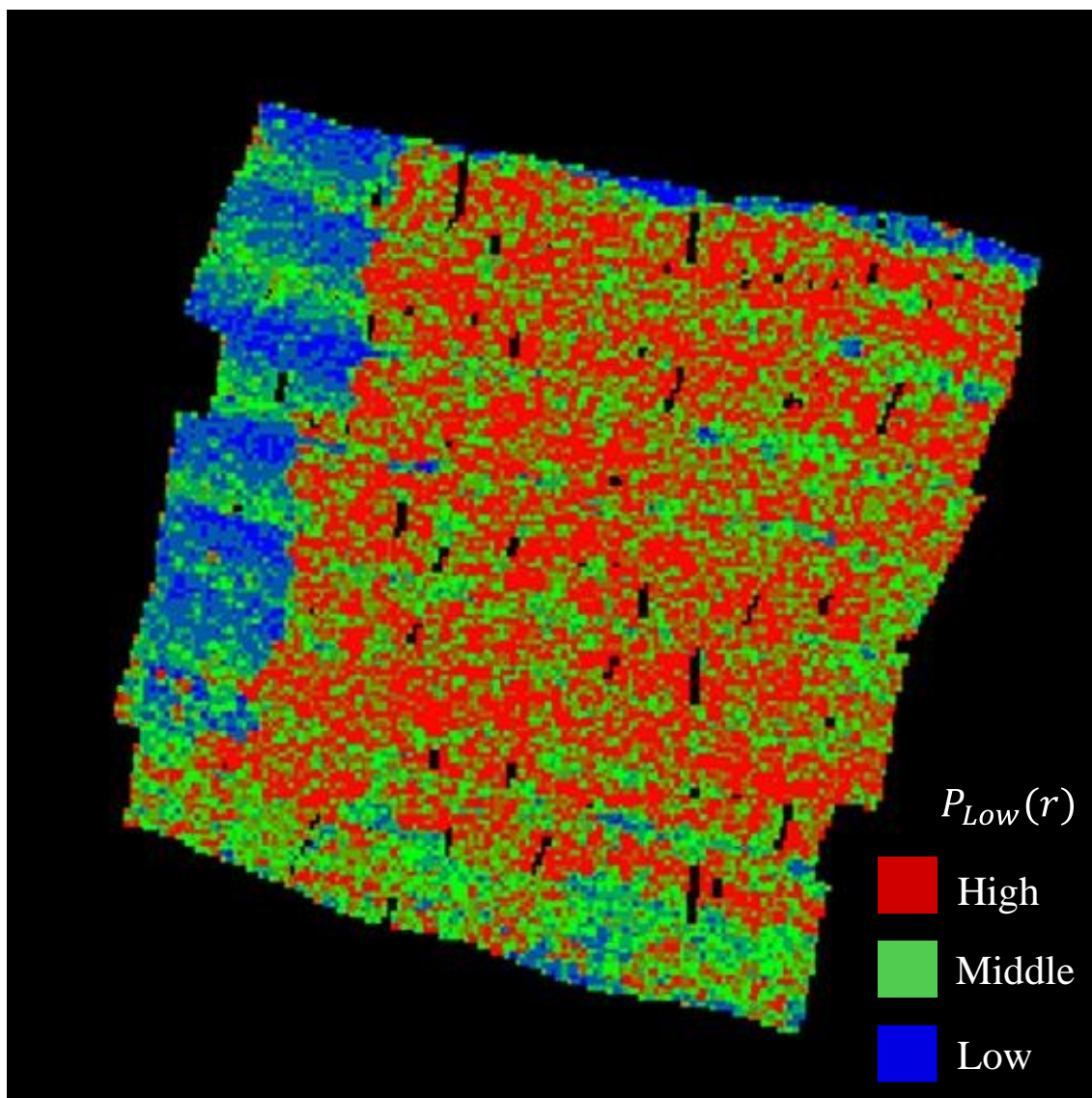


Fig. 40 周波数領域での識別図

### 5.2.3 バンドパスフィルタを用いた識別

さらに、空間周波数領域での解析により、画像中のアマモの識別マッピングを試みた。先ほどの空間周波数領域での解析とは異なり、今回は対象領域と判定領域を同サイズの32pixel四方として二次元フーリエ変換を用いて周波数領域に変換し、バンドパスフィルタを適応した。すなわち、特定の範囲内の空間周波数成分のみを保持して、範囲外の空間周波数を除去した。その後、残った空間周波数成分に高速フーリエ逆変換を用いて画像領域変換し、対象領域内の画像の輝度値の総和をとった。この総和の値に対して閾値を設定して段彩識別を行うことで、音響画像の解析を行った。

Fig. 41 と Fig. 42 はバンドパスフィルタを適応させたメッシュ画像である。白いグリッドラインは50m間隔で挿入されている。Fig. 41 は極座標系式の空間周波数成分 $F(r, \theta)$ について、 $4 \leq r \leq 6$ を満たす低周波成分、つまり半波長が0.23m~0.32mとなる周波数成分のみから再構成した画像である。Fig. 42 は $12 \leq r \leq 14$ を満たす高周波成分、つまり半波長が0.107m~0.123mとなる周波数成分のみから再構成した画像である。それぞれの画像について、メッシュが緑色ないし赤色の部分は、輝度の総和が高い部分だが、これはFig. 33と同様に植生の高い部分と対応していると考えられる。

これら二つの画像だけではアマモ、カジメの差を明らかにすることは出来ないが、両者の差分をとった画像、つまり高周波成分の輝度総和から低周波成分の輝度総和を減じた値について再度色裁断を行った結果がFig. 43である。である。音響画像の高周波領域を特に際立たせたものである。コンターラインは50mごとにひいた。

Fig. 43 から分かる通り、調査海域南部のアマモ場を捉えることができた。前節で用いたレイリー分布の形状パラメータによる解析以上に、明瞭にアマモ場を捉えることに成功した。その一方、調査海域西部の、アマモの植生が弱いと考えられる領域に対しても緑色のメッシュが分布している部分が見られること、測深図では岩場だと考えられ、潜水カメラ調査でもカジメ場が存在しているとされる調査領域北東部にも赤いメッシュが見られるため、手法の評価を進めていく必要がある。

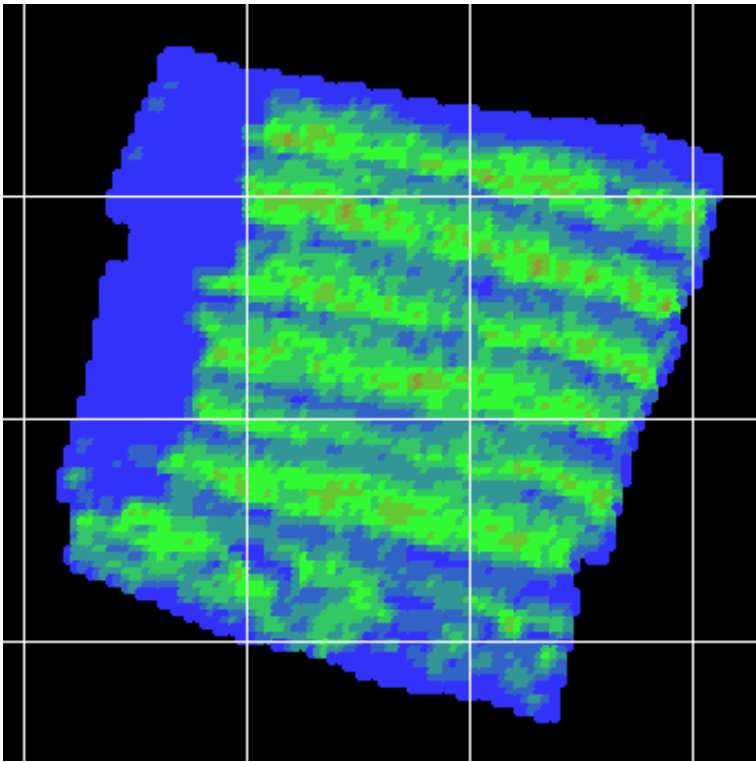


Fig. 41 バンドパスフィルタ（低域通過）を適応した音響画像

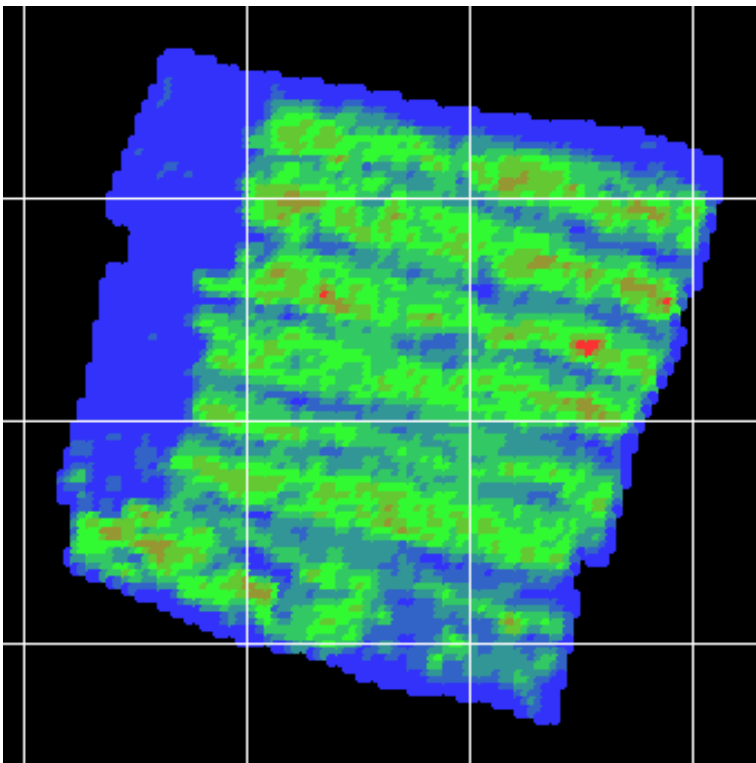


Fig. 42 バンドパスフィルタ（高域通過）を適応した音響画像

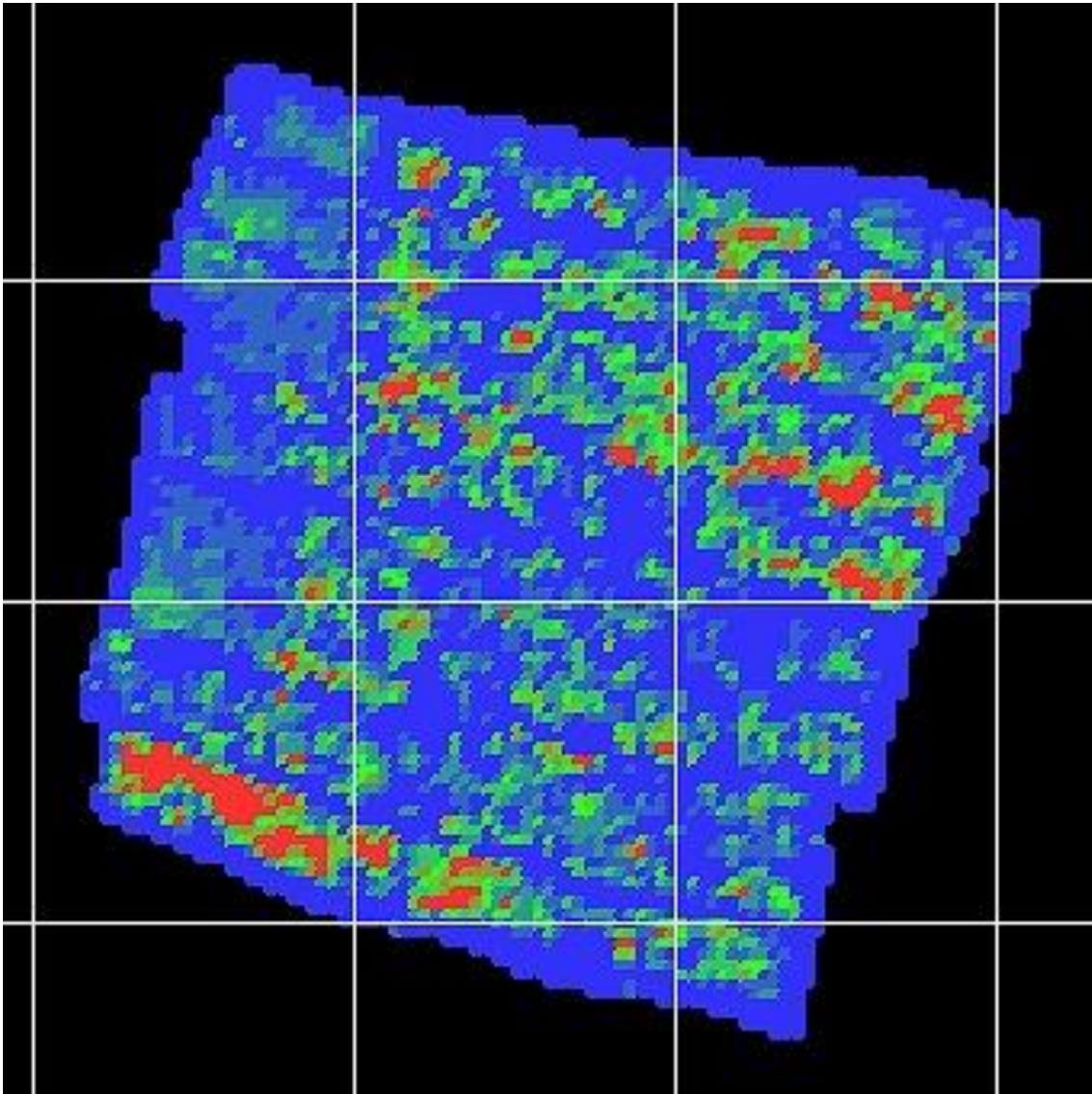


Fig. 43 高域通過フィルターを通った輝度の総和と、低域通過フィルターを通った輝度の総和の差にたいする段彩図。

## 5.3 デシジョンツリー法による分類手法の統合

### 5.3.1 デシジョンツリー法による分類

前節までに2つの画像解析手法を用いてアマモ場とカジメ場のマッピングを試みた。Fig. 33では輝度分布の統計量を用いて植生の高い部分のマッピングを行い、Fig. 40とFig. 43ではアマモ場とカジメ場それぞれのマッピングを試みた。しかしこれらの手法をそれぞれ単体で用いた場合、Fig. 28の分布に対して定量的な藻場の識別マッピングを行うことは難しかった。そこでこの節では測深図から推定される海底の底質と音響画像の解析結果を統合することで、藻場の三次元的な識別マッピングを定量的に行うことを目指す。具体的にはリモートセンシングで利用される土地被覆分類手法の一つであるデシジョンツリー法（決定木法）を用いて、海底底質の分類を行っていく[16]。

デシジョンツリー法の例として、今回用いたデシジョンツリーをFig. 44に載せる。これは複数の特徴量についてそれぞれ閾値を設けてその比較で分岐点を作成し、その分岐点を順番に・多層的に組み合わせて分類を行っていき、分岐のなくなる末端に到達すると分類が完了する仕組みになっている。この閾値比較だけで分類が進行していくという特性から、高速分類手法として有用性が高いが、使用するデシジョンツリーの出来、つまり閾値の値と分岐の順番によって処理結果が異なり、分類結果が一意に定まらないという欠点もある。今回は、処理速度と実装の容易さという観点でデシジョンツリー法を採用した。

さてFig. 44に載せたデシジョンツリーについて説明する。なお対象領域 (ROI)の大きさは64 pixel 四方、判定領域 (ROC)の大きさは16 pixel 四方と、5章の設定に準拠した。

第一分岐では輝度ヒストグラムの統計量、判定領域 (ROC)の輝度ヒストグラムの標準偏差について閾値を設定した。この分岐により海底底質に植生の有無を分別した。そして調査海域には露出した岩が見られなかったことより、植生がない部分は全て砂地として分類した。

第二分岐では判定領域 (ROC)の深度の標準偏差について閾値を設定した。この分岐により第一分岐で植生があると分類された領域が岩礁か砂地か判定した。今回の調査海域においては、岩礁の上にはカジメが繁茂していたということが光学画像より判明しているため、岩上の植物はカジメとして分類した。

第三分岐では対象領域 (ROI)の空間周波数領域に於ける低周波成分の割合について閾値を設定した。この分岐の時点で残っている底質は砂地のアマモと、第二分岐で岩礁と判断されなかった小さい岩の上に生えているカジメの二種類となる。そこで、低周波成分を比較することで、凹凸の小さな岩礁上のカジメも抽出するためにこの分岐を設定した。この分岐で低周波成分が小さい領域はアマモ、大きい領域はカジメとして分類し、この段階で全ての領域は何れかの底質に分類された。これらの分岐の閾値、及びそれらの組み合わせの順番については、今回は試行錯誤的決定法により音響画像と照合結果の対応を目視で比較しながら決定した。

このデシジョンツリーを用いて底質分類を行ったものがFig. 45である。この分類段彩図

では砂地を青、アマモを緑、カジメを赤でマッピングした。今回は詳細に底質分類を行うべく、対象領域を 8 pixel ずつ移動させながら判定を行った。これまでの画像解析では対象領域を 16 pixel ずつ移動させたため、判定領域がオーバーラップすることは無かったが、今回の対象領域の取り方では判定領域が 8 pixel の重複部分を持つことになる。つまり分類の最小単位は 8 pixel 四方の領域となり、8 pixel 四方の領域は合計 4 回の分類を経て段彩が行われたため、重複部分は赤、青、緑が混ざった段彩となった。このとき 4 回のうちのそれぞれの分類結果は、四分の一ずつ均等に混合していると定めた。例えば、3 回はアマモ、1 回は砂地と分類された 8 pixel 四方の領域については、アマモと地面の混合領域と考え、 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel} = 64 \text{ pixel}$ のうち 48 pixel はアマモ、16 pixel は地面とした。

また、音響画像との対応をとるため透過度 30%の音響画像を重ねて描画した(Fig. 46)。この分類結果は分布予想 (Fig. 28) に合致した結果となり、岩礁上はカジメが優占し、またダイビングポイント 1 のアマモ群落もマッピングされた。さらにダイビングポイント 3 と 8 の疎らなアマモも砂地と区別してマッピングすることに成功した。一方岩礁の上に点々とアマモ場と分類された緑色の領域が入り交じっている部分やダイビングポイント 1 付近のアマモ場内にカジメと分類された領域も存在した。音響調査と潜水調査の日時が異なることによる底質の時間的な変動を踏まえると、こうした領域の「本当の底質」を知ることは出来ないために誤った分類だと断ずることは出来ないが、「感覚的には誤りではないのか」と考えられる領域を含む分類結果となった。

こうした分類を誤分類とみなすならば、その原因としては次の原因が考えられる。

・アマモ群落中のカジメ：

ダイビングポイント 1 近辺ではアマモ場と砂地の境界にカジメと分類された領域が存在したが、これはアマモと砂地の境界で深度が急激に変化するため、深度の標準偏差が高まることで岩上の植物だと分類されたためである。

・カジメ群落中のアマモ：

人工岩礁上に点在するアマモと分類された領域は、岩礁の中でも平坦で、かつ音響画像のパワースペクトルの低周波成分の割合が低い領域となったためである。

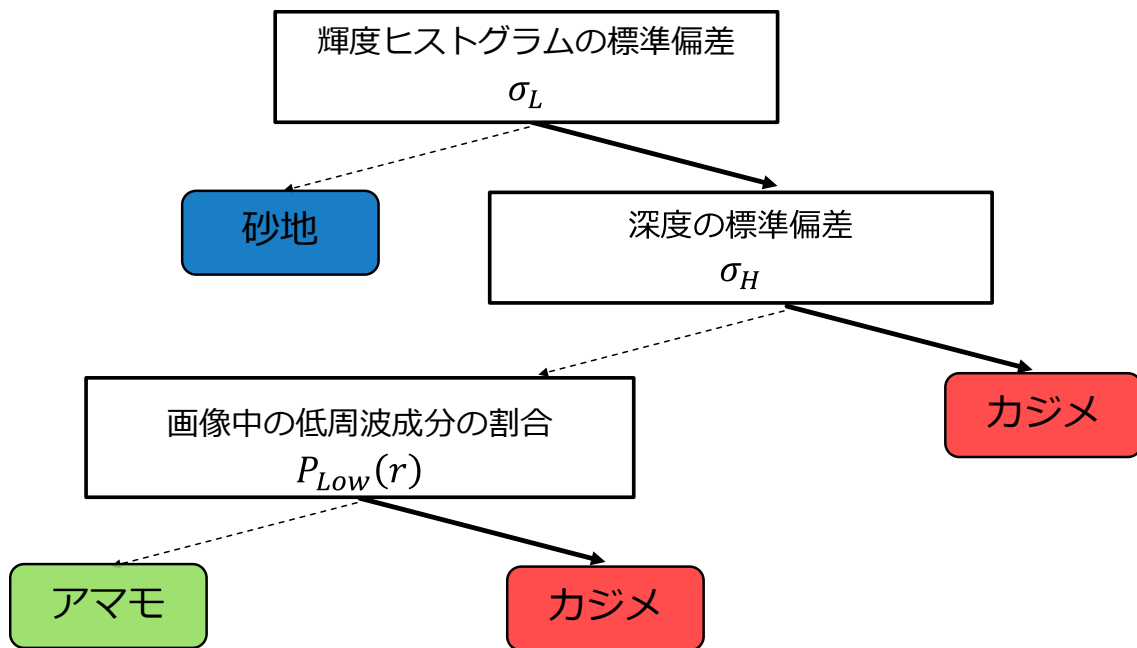


Fig. 44 分類に用いたデシジョンツリー



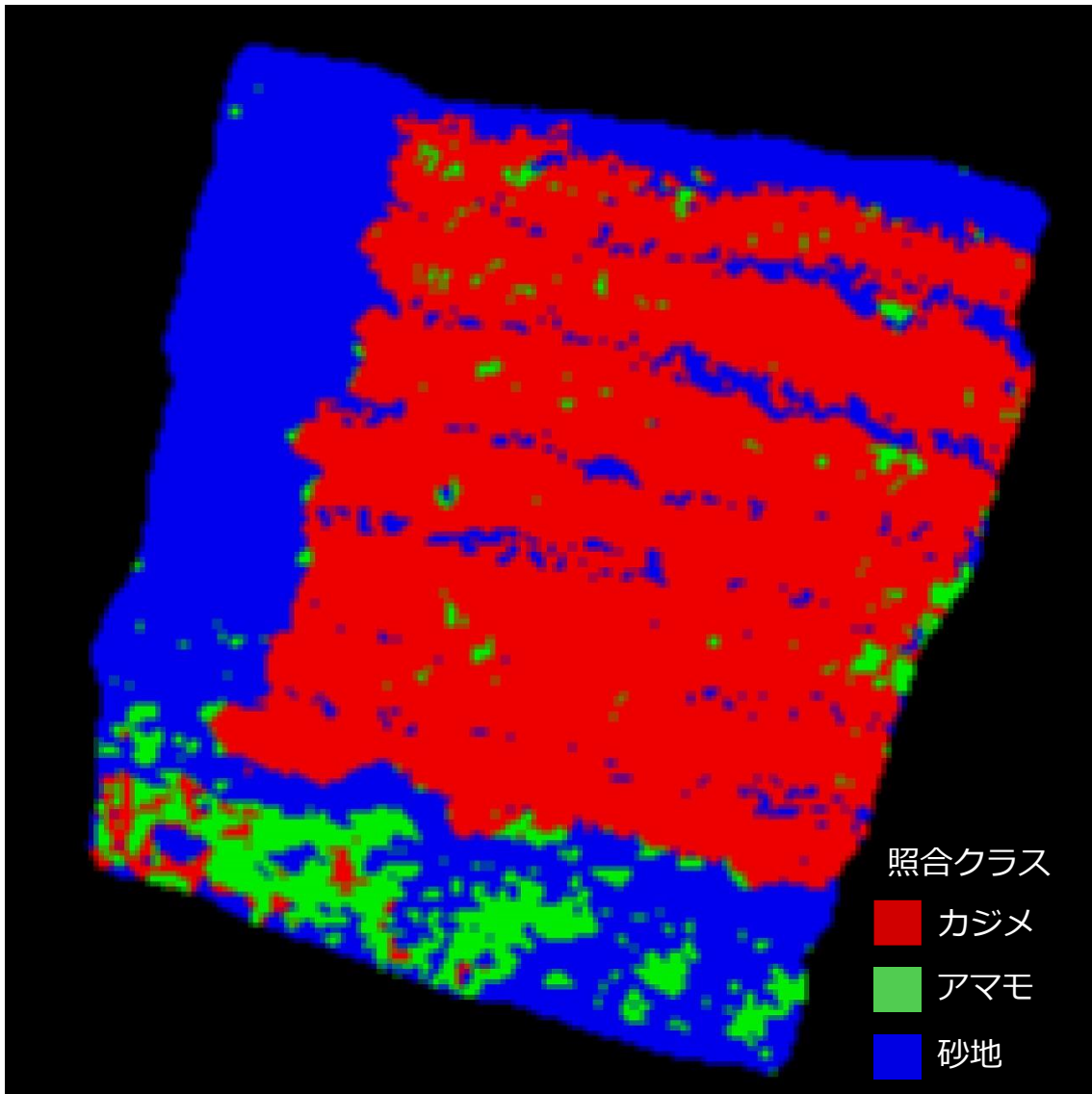


Fig. 45 デシジョンツリー法を用いた分類段彩図



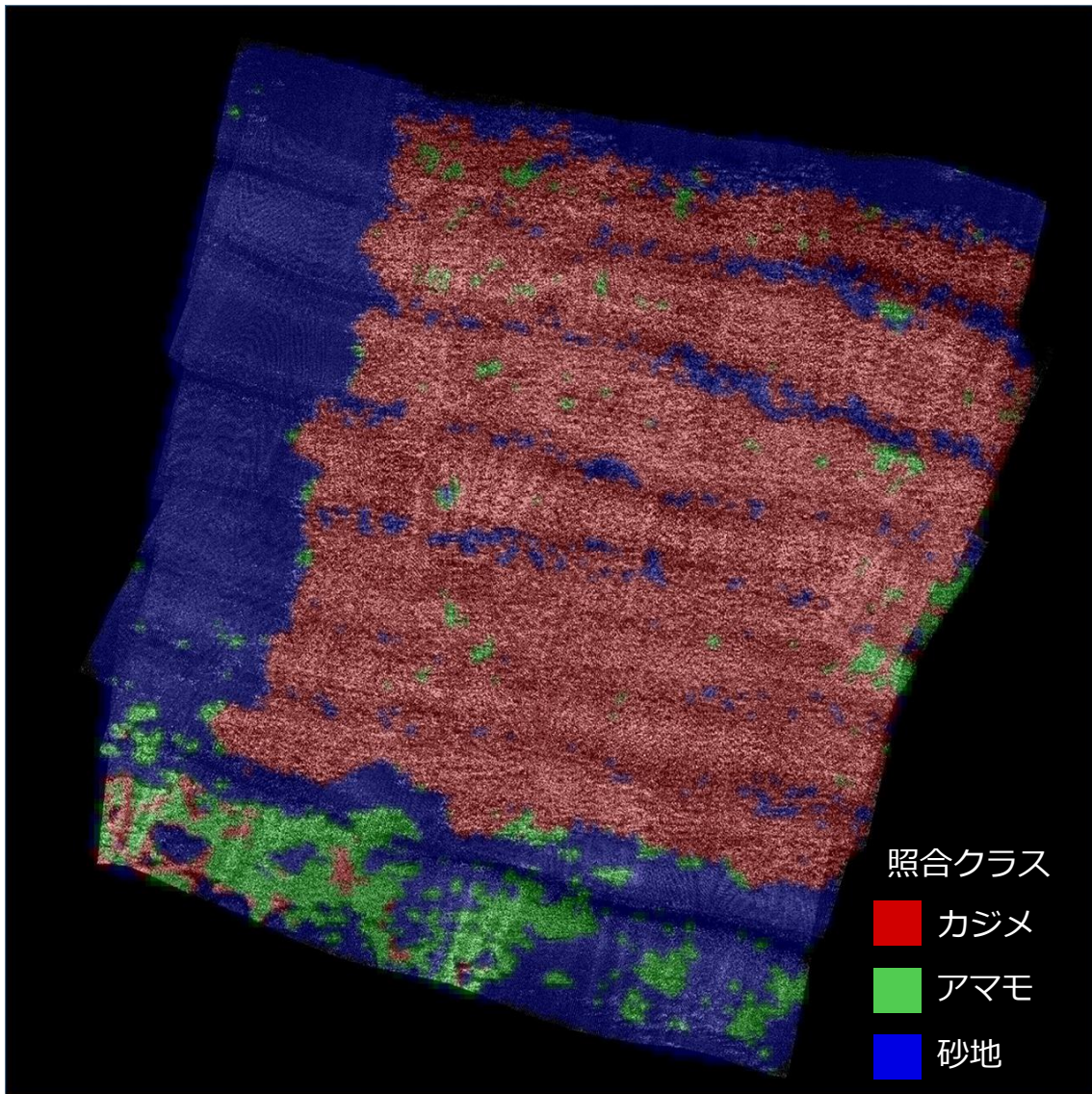


Fig. 46 デシジョンツリー法を用いた分類結果を重ねた音響画像

### 5.3.2 分類結果の精度評価

次に、分類結果について定量的に議論を行うために分類精度の検証を行った。ここでは分類精度表を作成して分類精度評価指標を定義し、計算することで、今回分類に用いたデシジョンツリーの精度について議論する。

分類の結果を議論する照合用クラスとしては教示データ、つまりダイビングポイント直下の植生情報を用いた。各ダイビングポイントの直下の 1.6 m 四方の領域の植生は均一であると仮定し、この教示データ領域がデシジョンツリー法でどのように分類されたか、という結果から精度表を作成した。なおダイビングポイント 3 と 6 は植物と砂地が入り交じっていたため、直下の領域の均一性が保証できないと考えて照合用クラスから除外した。また砂

地の照合用クラスとしては、ダイビングポイント3付近はアマモよりも砂地の割合が高かったことを考え、ダイビングポイント3から近く、かつ音響画像(Fig. 25)中で輝度値の低い、座標(-146803.9, 43534.9)直下の1.6 m四方を採用した。

作成した分類精度表が Table 5 である。この精度表について説明すると、縦の列には分類結果クラスが、横の行には照合クラスが並んでいる。各セルの単位は pixel である。照合クラスとは、各教示データ画素がどのクラスに分類されたかを表している。分類結果クラスは分類結果の中に正解となる教示データが何画素含まれていて、誤分類となる教示データが何画素含まれているのかということを表している。

この分類精度表から定義される分類精度評価指標の一つに総合精度がある。これは全教示データのうち、正しく分類された領域がどの程度あったかという指標であり、

$$\text{総合精度} = \frac{\text{対角要素の和}}{\text{教示データの和}} \times 100 \text{ [\%]} \quad (40)$$

で表される。今回の分類精度表においてアマモは教示データ 512 画素中 437 画素がアマモと分類され、カジメは教示データ 1024 画素中 928 画素がカジメと分類され、砂地は 256 画素中 256 画素が砂地として分類された。このとき総合精度は

$$\frac{437+928+256}{512+1024+256} \times 100 \cong 90.5 \text{ [\%]} \quad (41)$$

となった。佐川ら[3]は静岡県大浦湾の光学的リモートセンシングによる藻場調査において、90%を総合精度の評価基準としており、今回は基準を超えた「良い分類結果」として解釈した。一方分類結果としては「良い」と判断できるものの、今回の分類結果の1割程度は誤分類であるとも解釈され、その結果が前述の「感覚的に誤分類の可能性が高い領域」に対応していると考えられる。

また総合精度の解釈として注意しなければならないのは、この総合精度は今回用いたデジコンツリーによる分類の精度だという点である。各分岐での閾値を変化させた場合は総合精度も変化し、測定状況が変化した際にも精度は変化する。こうした限定的な議論の中で成り立つ分類精度評価指標ではあるものの、「誤分類をどこまで許容できるか」明確に定められればその誤分類基準を超えたか否かの議論が可能になる。そのためにはより明確な調査目標を設定し、評価を重ねていく必要がある。

**Table 5** デシジョンツリー法による分類結果の分類精度表。単位は[pixel]。灰色で塗りつぶした対角要素が正しく分類された画素数となる。

		分類結果クラス			
		アマモ	カジメ	砂地	合計
照合クラス	アマモ	437	0	0	437
	カジメ	23	928	0	951
	砂地	52	96	256	404
	合計	512	1024	256	1792

## 6章 結論

### 6.1 考察

本研究では3D サイドスキャンソナーGeoSwath を用いて海底地形計測を行い、そこで得られた海底音響反射データから音響画像の作成、解析を通じて藻場の識別マッピング手法を提案した。

まず、GeoSwath から得られた音響反射データについてフィルター処理、動揺補正を行い、ノイズを除去した海底地形の音響反射点群を 10cm グリッドという細かい間隔で得ることにできた。そして得られた音響反射点群を3次元、2次元にプロットし、特に二次元プロットについては放射量補正を行うことで三次元測深図と二次元音響画像を描画した(Fig. 25)。三次元測深図では外浦海岸の海底地形、特に砂地と人工岩礁が混在する様子を捉えることに成功した(Fig. 24)。また放射量補正後の音響画像からは砂地、砂地上の海草、岩石上の海藻を輝度値の分布という違いから捉えることに成功した(Fig. 26)。このことから、変化に富んだ海底地形を GeoSwath の音響データを用いて捉えることができたと言える。

また潜水カメラ調査で得られた光学画像から、実験海域には成長途中のアマモと、岩上に生えるカジメの様子を把握し音響画像解析のための教示データを得る事ができた(Table 3)。そして、得られた音響画像を解析して教示データと照らし合わせることで藻場の識別を行った。

音響画像の解析結果としては、確率密度関数を用いた画像解析からは調査海域中において海藻・海草の植生が高い地点を特定することに成功した(Fig. 33)。また空間周波数領域での画像解析からは、起伏が大きく画像の影が生じやすいカジメ場の分布が人工岩礁の分布とほぼ一致し、カジメ場を分別できることが分かった(Fig. 40)。バンドパスフィルタを用いて、画像中の特定の周波数成分の画素を取り出し再構成した音響画像からは、調査海域南部のアマモ場を識別できることが分かった(Fig. 43)。

そして潜水カメラ調査、音響測深図、そして二つの画像解析手法を組み合わせたデジモンツリーを用いた分類によりアマモ、カジメ、砂地を定量的に、かつ良い精度でマッピングすることに成功した(Fig. 46)。この結果をもって、本研究が目的とする GeoSwath を用いた藻場の識別マッピングを行う新手法の提案が達成されたと結論する。

## 6.2 今後の課題

本研究で提案した手法を用いることで、アマモ場、カジメ場という海草と海藻の分類手法を提案したが、改善の余地は存在する。

まず **GeoSwath** の性能自体もより詳しく評価する必要がある。本研究では放射量補正に最小二乗法を用いた到来角－振幅の近似曲線を用いたが、この放射量補正の適切性についても議論しなければならない。同じ反射元でも深度、入射角が変われば当然得られる反射強度が変化することが予想されるため放射量補正の前後での解析結果の変化についても考慮していかなければならない。**GeoSwath** についてのこうした基礎的なデータ収集を積み重ねて行くこと、そしてその都度教示データを入手して整合性を取っていくことは今後も続けていく必要がある。このように本研究で提案した手法を比較基準としながら今後も音響的藻場調査手法を進歩させていかなければならない。

## 参考文献

- [1]月刊海洋 Vol.41, No.11, 2009, 593 - 597 海洋出版株式会社
- [2]水産庁 磯焼け対策ガイドライン 平成 21 年 2 月発表
- [3]月刊海洋 Vol.41, No.11, 2009, 605 - 609 海洋出版株式会社
- [4]須藤 他、海洋生物環境研究所研究報告 (97101), 1-9, 1997-06
- [5] K. Abukawa, M. Yamamuro, Z. Kikvidze *et al.*, *Limnology*. 14(2013), Issue 1, 39 – 42.
- [6] C. Xu, K. Mizuno, A. Asada *et al.*, *J. Marine Acoust. Soc.* 40 (2013) 14 – 26.
- [7] J.P.Fish and H.A.Carr(著), 土屋利雄(訳)(2002):Sound Underwater Images 日本語版.(財)地球科学技術総合推進機構出版
- [8]静岡県 伊豆半島沿岸海岸保全基本計画 平成 15 年 7 月発表
- [9]株式会社大和エンジニア HP  
<http://www.daiwa-engineer.co.jp/tabid/89/language/ja-JP/Default.aspx>
- [10]気象庁 HP  
<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/index.php?sess=760b717ebcfc5e067c66c309c078e2b8>
- [11]巻俊宏、浅田昭 海洋音響学会、31(2004), No.1
- [12]海洋調査技術学会編 海洋調査フロンティア 海洋調査技術学会
- [13]新崎盛敏 日本水産学会誌 1 5 (1950), 10, 567 - 572
- [14]新崎盛敏 藻類 1 (1953), 2, 49–53
- [15]海洋音響学会編 海洋音響の基礎と応用 成山堂書店
- [16]日本リモートセンシング学会編 基礎からわかるリモートセンシング 理工図書

## 謝辞

まず、本研究を行うにあたり、修士課程に入ってから今までの2年間、常に親切でわかりやすいご指導をくださり、また常に学生のことを気にかけて下さいました東京大学生産技術研究所浅田昭教授に感謝を申し上げます。教授としてのお仕事や研究活動でお忙しい中、学生のためにお時間を作って叱咤激励して頂いたおかげで、本日まで修士の研究活動を続けることができました。大学院入試の場で私の得意不得意を見抜いて下さり、私の性分に合った藻場調査というテーマを与えてくださったからこそ、これまで研究に取り組むことができました。本当に有難うございました。

静岡県水産試験場の皆様には本研究の要となる教示データを提供して頂きました。誠にありがとうございました。

株式会社ウィンディネットワーク様にはGeoSwathを始め計測機器を使用させて頂きました。心よりお礼申し上げます。

また浅田研のスタッフの皆様にも大変お世話になりました。

望月将志助教授には研究活動でも、それ以外の研究室生活でも細かい気配りで学生をフォローして下さりました。またご自身の蔵書からその時々に必要な資料をお貸し下さり、研究を進める上で大変助かりました。

前田文孝特任助教には、同氏がなされていたASVの自動制御研究に帯同させて頂き、プログラミングや計測機器の取り回しなど数多くのことを勉強させていただきました。同氏には2年間を通して頼り切りになってはしまいました。さらに、私が研究に疲れた時には酒席で愚痴を聞いてくださいました。本当にお世話になりました。

水野勝紀特任助教は、私と同時期に浅田研に入りながらも持ち前のガッツで浅田教授と共に尋常ならざる勢いで研究を進めておられ、その姿には大変影響を受けました。また湯ノ湖での沈水植物調査に帯同させて頂き、貴重なフィールドワークの経験を積ませて頂きました。もう大学を離れる身ではありますが、また一緒にフィールドに出て教えを受けたいと思っております。

浅田研事務の山中香織さんは研究室生活を送る学生の悩みを汲みながら、時に厳しく、時に優しく、そして常に明るくアドバイスをくださいました。本当にありがとうございました。

浅田研の先輩である虻川和紀さんには、浅田研の一員として研究できるようにと、入学当初から数多くのご指導を頂きました。水野特任助教と共に修士の学生の兄貴分として、本当に細やかに面倒を見て下さったおかげでここまでたどり着くことができました。

また深見明久さんには、社会人とは何たるか、楽しい人生とは何たるか、学び続けるとは何たるかというお姿を見せて頂きました。御年60を超えながらも、私などよりよほど若々しく活躍され、若輩の私が軽口を叩いてもどこ吹く風といったその度量には、深い感動を覚

えました。

長曾大さんには、学業的なアドバイスから、プログラミングスキルまで多くの助言を頂きました。

同輩の鹿島徹君には、大学院の2年間の中で常に苦楽を共にしてきました。彼がいなければ今の私いません。

最後に、私の大学院生活を支えてくださった全ての皆様に御礼を申し上げます。ありがとうございました。