

音響計測手法と水中カメラ画像を用いた大型海藻の群落判別モデルの開発

園木詩織*

北海道立総合研究機構釧路水産試験場

Development of a random forest-based classification model for large seaweed communities using the fishery acoustic method and underwater camera imaging

SHIORI SONOKI*

Kushiro Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, 2-6 Hama-cho, Kushiro, Hokkaido 085-0024, Japan.

Hokkaido is a major kelp-producing region in Japan; However, in recent years, a decreasing trend in the number of fishermen and a reduction in production due to climate change has been observed. To assess the status of kelp species, obtaining both spatial and quantitative information is essential. Acoustic measurements provide information on distribution areas, but fall short in distinguishing the types of communities. In this study, we developed a random forest-based classification model for five large seaweed/seagrass species using acoustic measurements and underwater camera observations. The discrimination model for valuable and non-valuable kelp achieved high accuracy, whereas the models for Sargassum and eelgrass demonstrated moderate the accuracy, enabling accurate classification of the four communities based on fishing data.

キーワード：アマモ, 可視化, 計量魚群探知機, コンブ, 定量化, 分布推定, ホンダワラ, ランダムフォレスト法

北海道においてコンブ類は主要な漁業対象種である。特に、北海道東部太平洋沿岸（釧路～根室）におけるコンブ類の漁獲は全道の漁獲量の6割を占めるコンブ類の主要な生産地である（北海道水産林務部）。本海域には、出汁昆布として有用なミツイシコンブ（*Saccharina angustata*）、やガツガラコンブ（*S. coriacea*）、オニコンブ（*S. japonica* var. *diabolica*）のほか、昆布巻きや佃煮などの加工用として利用されるナガコンブ（*S. longissima*）などの有用コンブ類が分布している（川嶋, 1993）。北海道漁獲生産高報告によると本海域で漁獲される有用コンブ類は、羅臼地区を除くと9割以上が天然コンブで、養殖は一部の静穏域を除いてほとんど行われていない。近年、本海域におけるコンブ類の漁獲量は減少傾向にある。減少の要因として、漁業者数の減少などの漁獲努力量の変動や、気候変動に伴う水温上昇などによるコンブ類の資源量の変動（Sudo *et al.*, 2019）が挙げられている。コンブ類の漁期前には各漁協によって資源状態の調査が実施されているが、目視による良し悪しの判断や、調査定点で採取されたサンプルの葉

長、湿重量などの製品としての状態の把握に留まっており、漁場全体のコンブ類の分布面積の現状把握は行われていないため、いずれも変動の実態は不明である。

コンブ類の資源量の維持増大および管理のために、本海域では天然コンブ漁場を有する各漁協によって雑海藻駆除（名畑, 1995; 寺井, 2014）による漁場の維持や漁獲管理が行われている。雑海藻駆除により、漁業的価値のほとんどない非有用コンブ類（アイヌワカメ（*Alaria praelonga*）、スジメ（*Costaria costata*）、アナメ（*Agarum clathratum*）など）やホンダワラ類（*Sargassum* sp.）、スガモ（*Phyllospadix iwatensis*）等の同所的に分布する大型海藻、および着生基質となる岩の表面上に分布する石灰藻類を除去することで有用コンブ類の繁茂が増加することが知られているが、駆除作業前後に潜水による目視調査で繁茂実態が記録されている場合があるものの目視情報であるため部分的な現状把握に留まっている。また、駆除後の有用コンブ類の面積の増加量などの定量的な効果も明らかになっていない。今後、漁場の維持および管理を高度化していくために

は、本海域に分布する多様な大型海藻の種ごとの分布状況を面的および定量的に把握することが重要である。

コンブ類を含む大型海藻群落の分布状態の現状把握を行う手法には、潜水や目視、漁業関係者への聞き取りなどが行われてきた。近年ではドローンによる空撮画像を用いた面積推定がある（例えば山田ら、2017；本山ら、2023）。ドローンによる空撮画像は、浅い水深帯や、透明度が高い海域の海藻群落を把握するために適した手法である。しかし、本海域は濁度が高いため透明度が低いほか、コンブ類の分布深度が10 mを超えるため、海面からは大型海藻の視認が難しく、ドローンによる空撮は適していない。そこで、本研究では音響計測手法に着目した。音響計測手法とは、水中に超音波を発射し、海水以外の物体に当たって反射して戻ってきた音を受けとることで、物体までの距離や物体の性質を把握する手法である。水深の測定や、魚群探知機を用いた魚類の分布量推定など

の目的で広く用いられているが、透明度に依存せず、深い場所を計測することができることから、近年、海藻類の分布推定手法（例えばKomatsu *et al.*, 2002；南ら、2012；Sonoki *et al.*, 2016）として利用されている。音響計測手法により海藻群落を把握するには、音響データから海藻の有無および海藻群落を構成する種を判別する必要がある。Shao *et al.* (2021) は、同一地点における音響データと目視データを用いたランダムフォレスト法により海藻の有無を判別する手法を示したが、海藻種を判別する手法はいまだに確立されていない。そこで本研究では、計量魚群探知機（以後、計量魚探機と略す）による音響計測手法を用いて大型海藻群落の音響データを取得し、同所の中カメラ映像による目視データと併せて、ランダムフォレスト法による機械学習を用いて海藻群落を構成する海藻種の判別モデルを構築することを目的とした。

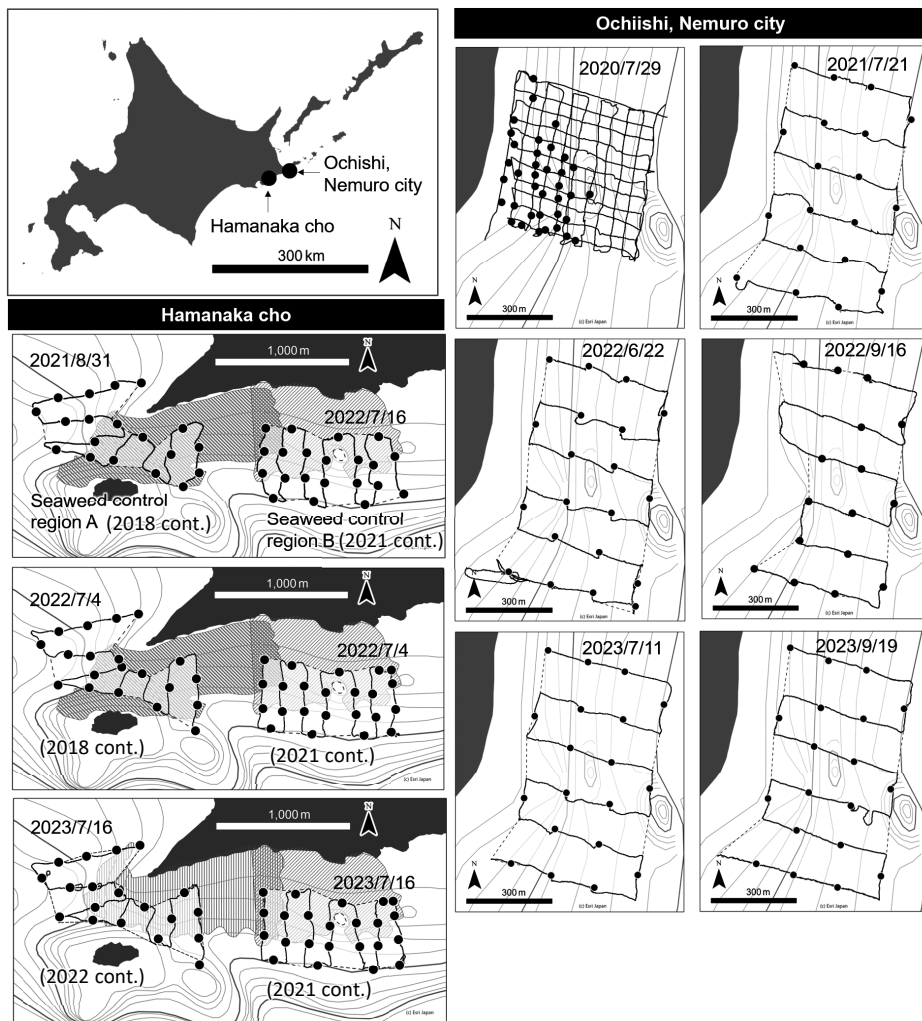


Fig. 1 Survey map. The area enclosed by the dotted line represents the survey area, the solid black line indicates the continuous acoustic data acquisition line, and the black circles denote the underwater camera observation points. The shaded region depicts the area where weed control has been conducted.

Table 1 Survey results including date, water temperature, salinity, surface area, line length, number of observed points, and years of past control efforts

Survey region	Date	Water surface temperature (°C)	Salinity (PSU)	Survey area (ha)	Acoustic survey line (km)	Number of visual observation	Past seaweed control periods
Coastal region of Ochiishi in Nemuro city	2020/7/29	13.3	32.5	25.0	14.6	45	
	2021/7/21	9.2	32.8	34.2	4.5	19	
	2022/6/22	9.2	32.8	34.2	5.7	19	Not control (Natural area)
	2022/9/16	17.0	32.8	29.2	3.4	16	
	2023/7/11	10.2	32.6	35.9	4.5	19	
2023/9/19	12.8	32.7	35.2	4.7	19		
Seaweed control region A of Hamanaka cho	2021/8/31	13.4	33.4	26.8	5.2	19	2018
	2022/7/4	10.4	32.4	24.1	5.2	20	2021
	2023/7/19	14.0	32.6	25.3	6.1	19	
Seaweed control region B of Hamanaka cho	2021/7/16	10.5	32.5	28.7	4.6	23	2020
	2022/7/4	10.5	32.3	27.2	4.6	23	
	2023/7/19	14.0	32.6	27.8	6.4	21	

試料及び方法

水中カメラによる目視調査と計量魚群探知機による音響調査 調査は北海道東部太平洋沿岸に位置する浜中町沿岸の雑海藻駆除が実施されている海域2区と根室市落石沿岸の雑海藻非駆除海域（天然海域）1区において、有用コンブ類の伸長期～漁期である6～9月に水深2.5～10 mの海域を選定し実施した（Fig.1, Table 1）。雑海藻駆除海域2区では、バックホーやチェーンによる駆除が4年に1回のサイクルで実施されており、種苗は天然依存である。音響計測機器には、小型で持ち運びが容易で舷側への取り付けが可能な小型計量魚群探知機KSE-310（Table 2, ソニック社製）を用いた。調査定線の間隔は、園木（2021）で行われている分布マップの推定精度検証を調査定線の間隔別に検証した結果や、調査に要する時間、調査地点までの移動距離などを考慮し、分布マップの推定精度が75～80%と見込まれる約200 mに設定した。また、大型海藻群落の分布は水深依存であり、等深線に

水平な定線では過大評価になってしまうおそれがあるため、等深線に垂直な調査定線を主に設定し、等深線に水平な定線を交えて蛇腹状に折り返しながら航行することとした。この調査定線を2～5ノットで航走しながら5回/秒の間隔で音波を発信し、連続的な音響情報を取得した。連続的な音響情報は、種判別モデルの構築後に調査海域全体の種判別を行うための元データとして用いた。航走中、任意の地点で停船し、アクションカメラGoPro HERO8 Black（GoPro社製）にロープと錘を付けた垂下式水中カメラを下ろし、錘の着底後に50 cm引き上げ、30秒以上の動画を取得した。この映像の内容をその地点における大型海藻の有無とし、種判別の情報に用いた。撮影できた大型海藻のうち、北海道こんぶ製品の要綱（一般社団法人 北海道水産物検査協会, <http://www.h-skk.or.jp/index.php?%E8%B3%87%E6%96%99%E5%AE%A4>, 2024年1月閲覧）中の『原料となるこんぶの範疇』に記されているナガコンブ、ガツガラコンブ、チヂミコンブ、トロロコンブを有用コンブ類と定義した。これ以外のコンブ目褐藻であるスジメやアナメ、アイヌワカメ等は非有用コンブ類とした。コンブ類以外の大型海藻は、コンブと同様に岩を基質として生育するネプトモクやウガノモクなどのホンダワラ類、岩礁帯に分布するスガモ、砂地に分布するアマモ（*Zostera* sp.）に分類した。

音響情報の解析にはEchoview (ver.11.0, Echoview社)を用いた。大型海藻が分布している範囲のエコーグラムをFig.2に示す。音響情報から大型海藻の情報のみを抽出する場合、音響反射の上端と下端を設定する必要がある。図で大型海藻が強い反射を示す一方で、海水の反射は弱く、見た目にも境界面が明確になっている。この境界面を含む反射強度をエコーグラムの解像度1セルごとに抽出し

Table 2 Specifications of small quantitative echo sounder KSE-310

KSE-310 with a T203 transducer	
Frequency	120 kHz
Pulse length	0.3 ms
Beam width	5.0 degree
Resolution	3.2 cm
Ping rate	5 s ⁻¹
Beam type	Split beam

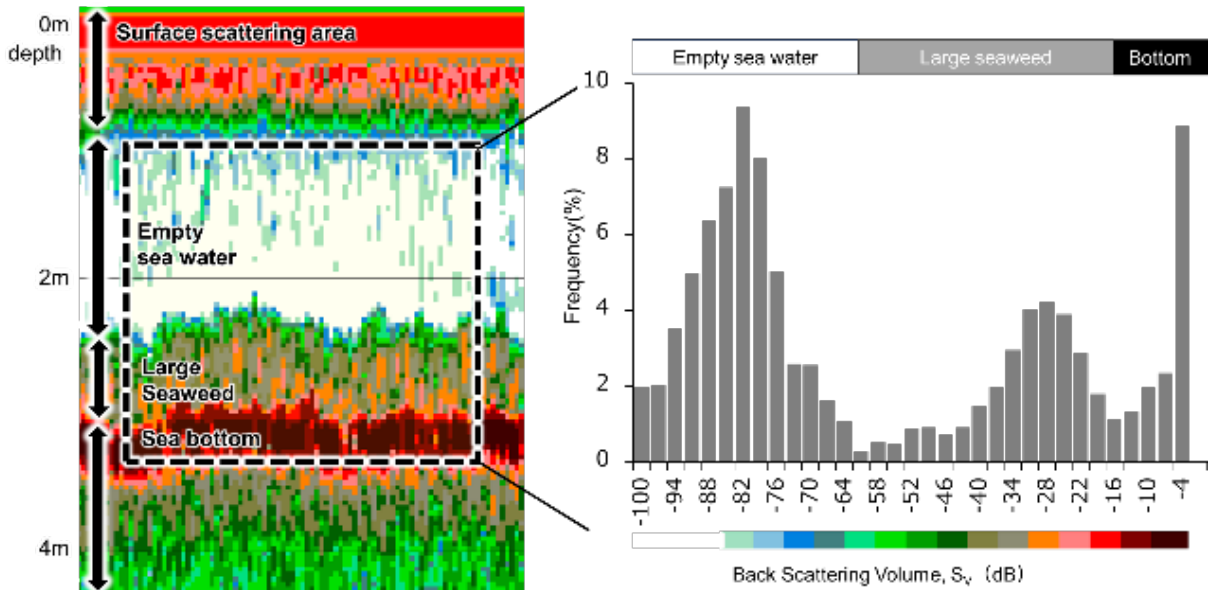


Fig.2 Example of an echogram of acoustic data within the distribution area of large seaweed communities, along with a histogram of the reflection intensity per cell within the region enclosed by the dashed line. The histogram has three peaks, representing seawater, large seaweeds, and the seabed from left to right.

ヒストグラムを作成すると、二峰形を示す。この二峰間のくびれに当たる部分の反射強度を大型海藻と海水の境界とし、大型海藻の音響反射強度の上端の閾値とした。閾値の設定のために、2020～2022年に得られた音響情報から、海底が平坦かつ大型海藻が分布していた範囲からランダムに56地点選定し、音波の送受信100回分の音響反応を抽出して水深0.1 mごとにヒストグラムを作成した。閾値の平均値は-55.8 dBであったため、本研究ではこの値を音響反射の上端として採用した。

大型海藻は海底直上から海面方向に分布するため、鉛直方向における分布の下端は海底となる。海底は、海中の構造物の中でも強い反射を示すため、反射強度が最大となる地点を海底と定義し、大型海藻の音響反応の下端とした。この上端と下端で挟まれた範囲に大型海藻が分布すると仮定して解析を行った。

本手法で用いる計量魚探機などの音響計測機器は超音波を円錐状に発射する。発射されるパルス角によっては、海底の反射を含んでしまう探知不能な領域（デッドゾーン）が発生する（Ona and Mitson, 1996）。デッドゾーンは以下の数式で計算される。

$$h = d \left(1 - \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) + c\tau/2$$

h は海底からの探知不能領域の高さ、 d は水深（m）、 θ はビーム角（°）、 c は音速（m/s）、 τ はパルス幅である。本研究で用いる機器のデッドゾーンは0.34 mだったため、NASCなどの音響反射のデータを抽出する際は、解析の下端をデッドゾーンに設定し、海底の反射を含まない

0.34 mよりも上部にある音響反射を用いて解析を行った。本海域に分布する主要な漁業種であるナガコンブでは、年による葉長の変動（Hasegawa *et al.*, 2019）や月による葉長の変動（合田ら, 2022）が確認されるなど生物量や葉体の季節変動が激しく、取得した音響データにもその変動が見られると考えられる。この変動を捉えるため、教師データとテストデータを含む12回分の調査データで得られた音響データのうち、音響反応の厚さについて調査ごとに有意差があるかどうかをSteel-dwass検定を用いて検証した。

機械学習による判別モデル構築 大型海藻の種判別モデル構築のために、機械学習のうちランダムフォレスト法（Breiman, 2001）を用いた。ランダムフォレストは複数の決定木を生成し、それらの多数決によって予測を行う手法である。説明変数の特徴を使用して応答変数を分類するため、元のデータセットから復元抽出を行うことで標本を生成するブートストラップ法を採用し、高い予測性能と各説明変数の重要度の明確な評価が可能となる。これにより過学習が軽減される特長があり、本研究で用いることとした。本研究では、ブートストラップ法にて500個の決定木を構築した。

機械学習には、2020～2022年に取得した184地点の目視情報と音響情報を教師データとして用いた。解析ソフトウェアにはフリーソフトのR（バージョン4.2.3）を、ランダムフォレストを行うために、パッケージrandomForestを用いた。応答変数には、目視調査で撮影された水中映像で確認できた大型海藻の種ごとの有無を用いた。そ

れぞれを応答変数とし、大型海藻群落の種類（有用コンブ類、非有用コンブ類、ホンダワラ類、アマモ、スガモ）併せて5種類の判別モデルを構築した。

説明変数として、水中カメラでの目視情報の取得のための停船中に得られた音響情報のうち、平均水深（m）、海藻群落の平均厚さ（m）、最大 S_v （dB）、NASC（Nautical Area Scattering Coefficient, m^2/nmi^2 ）、平均NASCの変動係数の5変数を用いた。全ての説明変数は、停船中の各データが正規分布に従っていたことや、大型海藻の海中での挙動によっては外れ値が発生する可能性を考慮し、停船中の超音波の送受波1回分のデータを平均した数値を使用することとした。 S_v は対数であるため、リニアに変換したものを平均して解析に用いた。上記5つの説明変数の採択理由は下記の通りである。水深については、海藻種別の分布水深の差異、海藻群落の平均厚さについては、種別の群落の立体構造の特徴、最大 S_v については、藻体・気泡等の配置の特徴、NASC値については、単位面積あたりの反射強度、平均NASC値については、海藻種別の平均NASC値の鉛直分布の特徴を、それぞれ説明するために採択した。

各モデルにおける各説明変数の影響力の大きさを把握するために、決定木の分岐に対する影響力の指標である平均減少ジニ係数（Mean Decrease Gini）を算出し、影響力を定量・可視化した。また、ブートストラップ法を採用したランダムフォレストでは、復元抽出によってモデルに用いるデータが選択されるため、モデルに用いられない教師データが生じる。このモデルに用いられなかった教師データをモデルの精度検証に用いることでモデルのエラー率を求めた。

群落判別モデルの精度検証 構築された各種の判別モデルの精度を検証するためのテストデータには、モデルの教師データに使用していない2023年の調査で得られた78地点の目視情報と音響情報を用いた。教師データと同じ前処理を行って説明変数を整理したのち、モデルを用いて種判別を行った。テストデータのうち、一部のデータで S_v 、NASCおよび変動係数が欠損値となった。このようなデータの欠損は、海藻群落の閾値に設定したラインがデッドゾーンよりも下に設定されてしまったことによるものであり、通常、構造物の存在しない海底で発生する。このため、データの欠損があった部分はゼロに置き換えて解析を行った。モデルによる種判別結果と、実際の目視情報による種判別結果を混合行列で比較し、モデルの正否判断と目視の正否が一致したサンプルの割合である正確度（Accuracy, %）、モデルが正と判断したサンプルのうち、目視でも正だったサンプルの割合を示す適合率（Precision, %）、目視で正だったサンプルのうち、モ

デルが正と判断したサンプルの割合を示す再現率（Recall, %）、適合率と再現率から評価されるモデル全体の評価値であり、0から1の間の数値で評価されるF1スコアを求めた。推定した種判別結果を用いて、空間統計学的手法であるクリギング（高阪, 1999）による分布推定を行い、種別の分布範囲および面積を可視・定量化した。

結果

水中カメラによる目視データと計量魚群探知機による音響データ 2020～2022年に184地点の水中カメラで確認された群落とその出現数をTable 3に示す。184地点のうち、136地点で大型海藻の繁茂が見られ、48地点では見られなかった。有用コンブ類の繁茂が確認されたのは108地点で、そのうち有用コンブ類のみで構成された群落は36地点で、それ以外の72地点では非有用コンブ類、ホンダワラ類、スガモと混生した群落が形成されていた。非有用コンブ類が確認された84地点のうち、非有用コンブのみによる群落は9地点で、75地点で有用コンブ類、ホンダワラ類、スガモと混生した群落が形成されていた。ホンダワラ類は42地点で確認されたが、ホンダワラ類のみによる群落は1地点も確認できず、すべてが有用・非有用コンブ類やスガモとの混生群落を形成していた。スガモは8地点で確認されたが単独での群落は見られず、有用・非有用コンブ類やホンダワラ類と混生群落を形成していた。アマモは9地点で確認されたが、すべてがアマモのみによる群落で他の大型海藻は確認できなかった。水中カメラ映像から切り抜いた撮影画像と、同じ場所において計量魚探機で計測された音響情報のエコーグラムをFig. 3に示す。コンブ類の分布水深と比較すると、より浅い場所にアマモやスガモが、深い場所にホンダワラ類が分布していた。また、大型海藻の音響反応の厚さ（m）と反射強度（ S_v ）は、コンブ類と比較するとホンダワラ類とアマモがより厚く、強い反射となっているなど、分布する海藻種によってエコーグラムでの大型海藻の見え方が異なっていた。Fig. 4に各大型海藻の反応があった地点と、いずれの海藻も分布していなかった地点の音響データの平均値を示す。大型海藻の分布地点の水深の平均は3～6 mで、大型海藻がない地点と比較すると水深が浅かった。音響反応の厚さはアマモで最も厚く2 m近くなり、他の大型海藻では0.7～1.0 mであった。最大SVの平均値はホンダワラ類とスガモで最も強くなった。NASCはアマモとホンダワラ類で大きくなり、大型海藻のない地点では小さくなった。平均NASCの変動係数は大型海藻のない地点で大きくなり、海藻が分布していた地点では小さくなっていた。また、大型海藻群落が分布していた範囲の

Table 3 Underwater camera survey results from 2020 to 2022, including occurrences and frequencies of large seaweed communities

Seaweed	Discrimination (A)		(B)	(C)	(D)	(E)
	of seaweed community	Fishery valuable kelp	Fishery non-valuable kelp	Sargassum sp.	<i>P. iwatensis</i>	<i>Zostera</i> sp.
Present		108	84	42	8	9
Individual distribution		36	9	0	0	9
Co-occurring distribution		72	75	42	8	0
Coexistence with	A	36	39	4	1	0
	AB	-	-	21	0	0
	ABC	-	-	-	5	0
	ABCD	-	-	-	-	0
	ABCE	-	-	-	0	-
	ABD	-	-	5	-	0
	ABDE	-	-	0	-	-
	ABE	-	-	0	0	-
	AC	-	21	-	2	0
	ACD	-	5	-	-	0
	ACDE	-	0	-	-	-
	ACE	-	0	-	0	-
	AD	-	0	2	-	0
	ADE	-	0	0	-	-
	AE	-	0	0	0	-
	B	39	-	10	0	0
	BC	21	-	-	0	0
	BCD	5	-	-	-	0
	BCDE	0	-	-	-	-
	BCE	0	-	-	0	-
	BD	0	-	0	-	0
	BDE	0	-	0	-	-
	BE	0	-	0	0	-
	C	4	10	-	0	0
	CD	2	0	-	-	0
	CDE	0	0	-	-	-
	CE	0	0	-	0	-
	D	1	0	0	-	0
	DE	0	0	0	-	-
	E	0	0	0	0	-
Absent		76	100	142	176	175

音響データのうち、音響反応の厚さについて、調査ごとに総当たりで有意差の有無を確認するためにSteel-Dwass検定を行ったところ、66通りの組み合わせのうち55通りの組み合わせで有意差があった ($p < 0.05$)。有意差が無かった組み合わせについても季節や調査月、海域が同じかどうかなどの法則性は見られなかった。このため、本海域に分布する大型海藻の音響反応は年による変動も大きいとし、様々な生育状況の大型海藻に対して適用可能なモデルにするため、海藻種ごとに一つのモデルとして作成した。

ランダムフォレスト法による群落判別モデル 2020～2022年の目視データと音響データを用いて、ランダムフォレスト法を行って構築された5種類の群落判別

モデルについて、決定木に対する各説明変数の影響力の指標である平均減少ジニ係数を示す (Fig.5)。有用コンブ類の判別モデルでは、海藻群落の厚さと水深の影響力が他の説明変数と比べて大きかった。非有用コンブ類の判別では、海藻群落の厚さの影響力が最も大きく、他の説明変数の影響は横並びであった。ホンダワラ類の判別モデルは海藻群落の厚さとNASCの影響力が最も大きかった。スガモの判別モデルでは、海藻群落の厚さが最も影響が大きかったが、他の説明変数との差は1.0以内と軽微だった。アマモの判別モデルでは水深の影響力が他の説明変数と比較して高くなっていった。モデル内部のデータへの適合度を示すエラー率をTable 4に示す。は、有用コンブ類で14.7%、非有用コンブ類で25.0%、ホンダワ

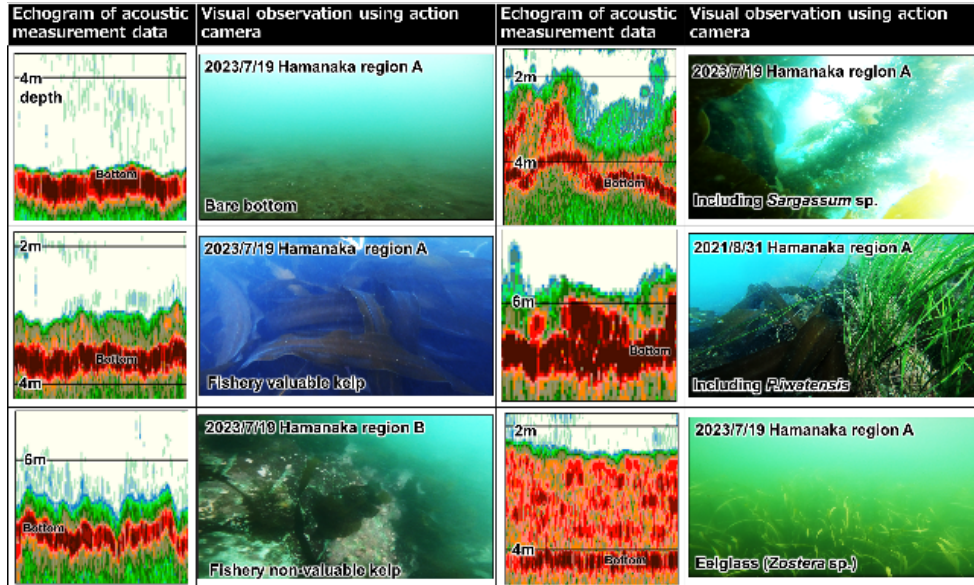


Fig.3 Comparison of underwater camera images capturing the seafloor vicinity and echograms derived from acoustic data collected at the same locations.

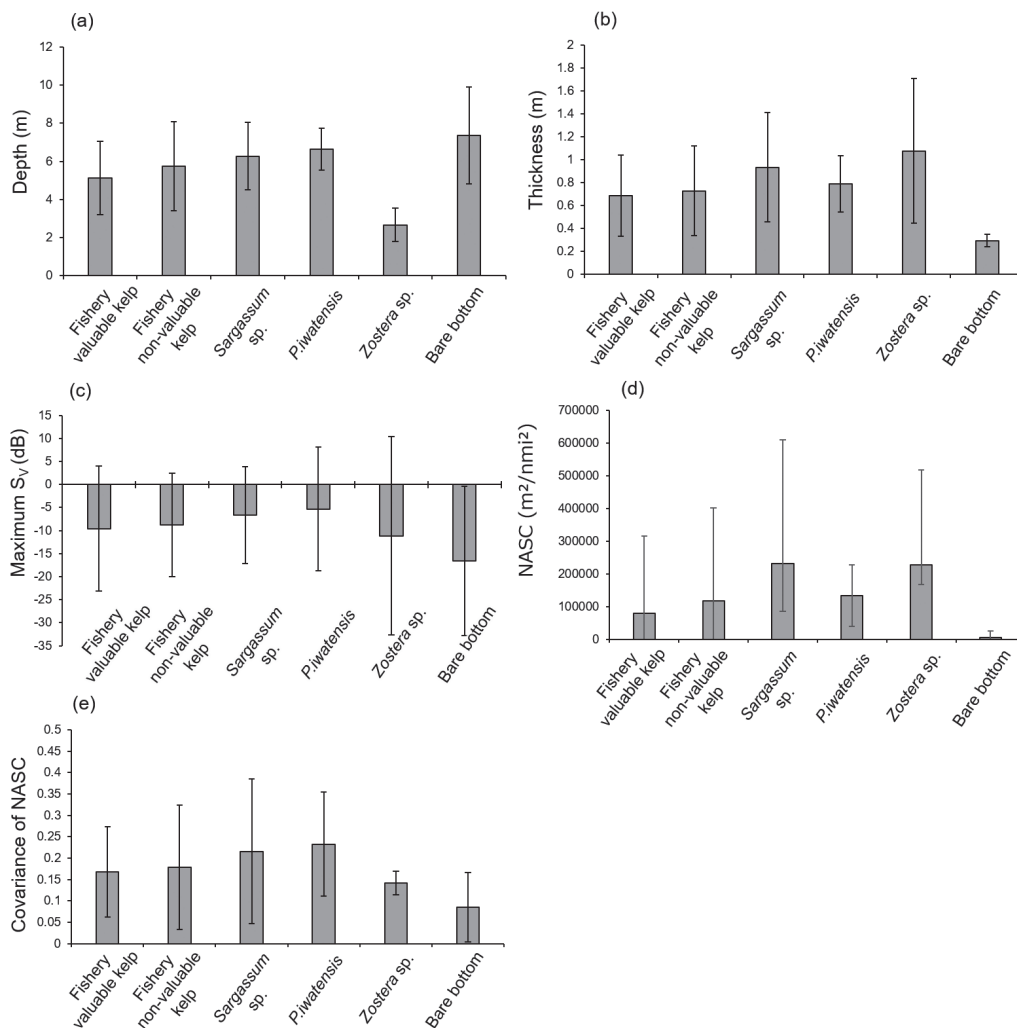


Fig.4 Acoustic data by distribution status of large seaweeds at each location. (a) to (e) are, in order, depth, thickness directly above the seabed, maximum SV, NASC, covariation of NASC.

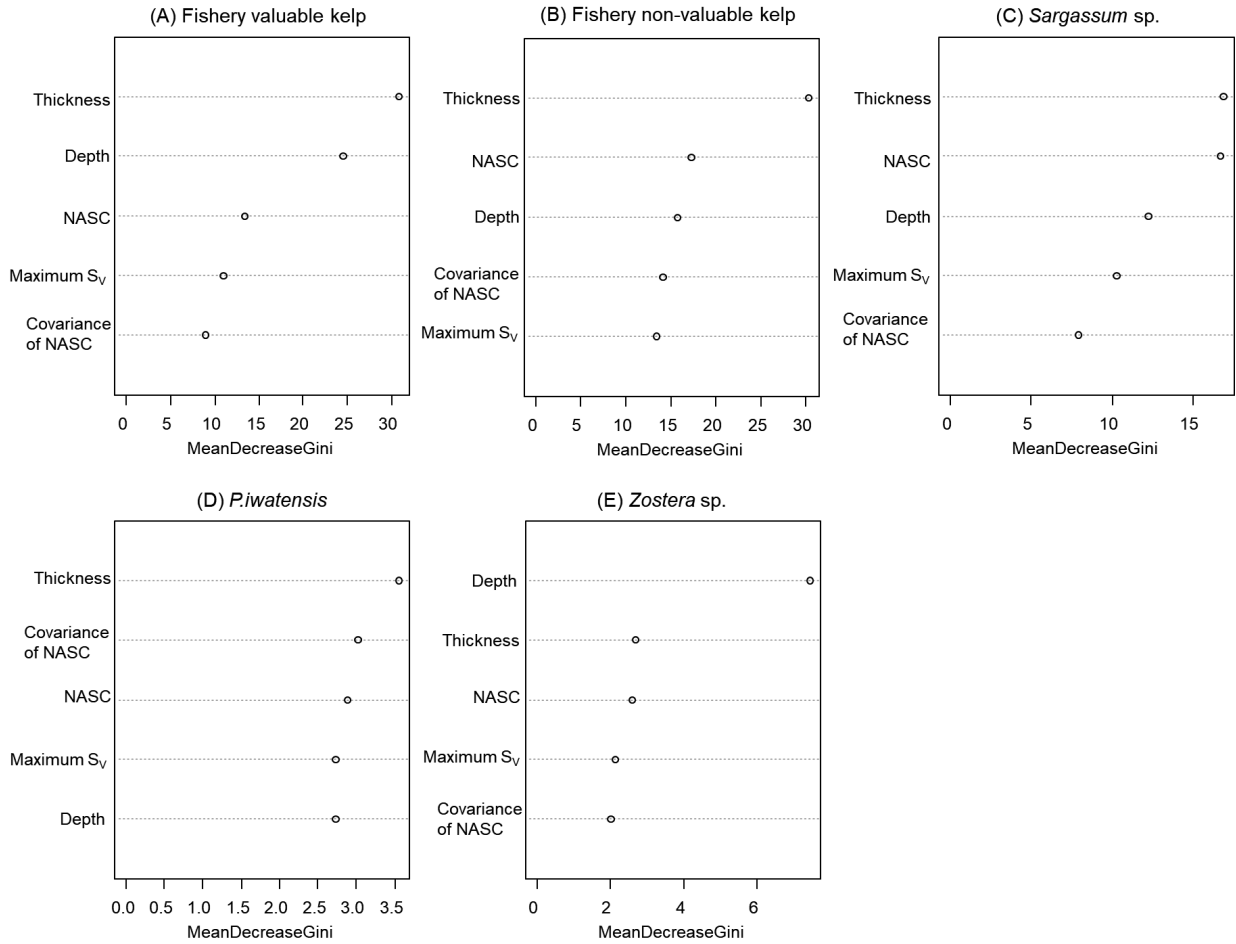


Fig. 5 Average decrease in Gini coefficient, an indicator of the impact of each explanatory variable on decision trees for each community classification model.

Table 4 Error rates from internal data of discriminative model analysis obtained using the random forest method

Classification model	Out of Bag estimate of error rate (%)
Fishery valuable kelp	14.7
Fishery non-valuable kelp	25.0
<i>Sargassum</i> sp.	14.1
<i>P. iwatensis</i>	4.4
<i>Zostera</i> sp.	2.7

ラ類で14.1%, スガモで4.4%, アマモで2.7%だった。

外部データを用いた判別モデルの精度検証 モデルの外部データである2023年の調査データ (n=78) の目視データをTable 5に示す。78地点中55地点に大型海藻群落を確認できた。2023年の調査データの音響データを説明変数として各判別モデルに挿入し得られた結果と、各モデルの精度検証を行って得られた正確度, 適合率, 再現率, F1スコアをTable 6に示す。有用種コンブ判別モデルの正確度は80.8%, 適合率が78.3%, 再現率が87.8%となり, F1

Table 5 Occurrences of large seaweed communities from the 2023 underwater camera survey
A, B, C, D, and E represent the valuable fishery kelp, non-valuable fishery kelp, *Sargassum* sp., *P. iwatensis*, *Zostera* sp., respectively.

Discrimination of seaweed community		Composition
Present	55	
	A	14
	AB	15
	ABC	7
	ABCD	1
	ABD	2
	AC	6
	ACD	1
	B	1
	BC	6
	E	2
Absent	23	

スコアは0.83と最も高い精度となった。次いで精度が高かったのは非有用種コンブの判別モデルで, 正確度が

Table 6 Validation results using the discriminant model and external data, including accuracy, precision, recall, and F1 scores

	Correct classification		Misclassification		Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 score
	Present	Absent	Present	Absent				
Fishery valuable kelp	36	27	10	5	80.77	78.26	87.80	0.83
Fishery non-valuable kelp	26	32	7	13	74.36	78.79	66.67	0.72
<i>Sargassum</i> sp.	12	42	7	12	73.97	63.16	50.00	0.56
<i>P. iwatensis</i>	0	74	4	0	94.87	0.00	-	-
<i>Zostera</i> sp.	1	76	1	0	98.72	50.00	100.00	0.67

Table 7 List of correctly identified misclassifications in discriminant model when using external data

Actual class of seaweed distribution	Classification result of model									
	(A) Fishery valuable kelp model		(B) Fishery non-valuable kelp model		(C) <i>Sargassum</i> sp. model		(D) <i>P. iwatensis</i> model		(E) <i>Zostera</i> sp. model	
	Present	Absent	Present	Absent	Present	Absent	Present	Absent	Present	Absent
TRUE	36	27	32	26	12	42	0	74	1	76
FALSE	5	9	13	7	12	7	0	4	0	1
Composition of FALSE classified										
A	-	-	7	-	1	-	-	-	-	-
AB	-	1	-	4	6	-	-	-	-	-
ABC	-	6	-	1	-	2	-	-	-	1
ABD	-	-	-	1	1	-	-	2	-	-
ABCD	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-
AC	-	1	2	-	-	2	-	-	-	-
ACD	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-
B	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-
BC	3	-	-	-	-	3	-	-	-	-
E	2	-	1	-	1	-	-	-	-	-
Bare bottom	-	-	2	-	2	-	-	-	-	-

74.4%, 適合率が78.8%, 再現率が66.7%となり, F1スコアは0.72だった。ホンダワラ類の判別モデルは, 正確度が74.0%と高くなった一方で, 適合率が63.2%, 再現率が50.0%と低くなったことから, F1スコアは0.56だった。スガモの判別モデルは, 正確度は94.9%だったが, 分布があった場所を正しく判別できなかったため, F1スコアの計算に至らなかった。アマモの判別モデルは正確度が98.7%と高かったが, 適合率が50.0%, 再現率が100%で, F1スコアは0.67だった。

群落判別モデルの誤判別地点の特徴 各判別モデルにおいて, どのような群落でモデルの誤判別が発生していたかTable 7に示す。有用コンブ類の判別モデルで誤判別した14地点のうち, 非有用コンブ類を「有用コンブ類がある」と誤判別した地点は3地点だった。反対に, 非有用コンブ類の判別モデルで誤判別した20地点のうち, 有用コ

ンブ類を「非有用コンブ類がある」と誤判別した地点は10地点だった。また, 実際には分布しているにもかかわらず, 「有用/非有用コンブ類がない」と誤判別した地点はそれぞれ9地点/7地点で, ほとんどの誤判別が相互によるものだった。ホンダワラ類およびアマモの判別モデルにおいても相互に誤判別が発生していた。

群落判別モデルを用いた調査海域における群落推定マップ F1スコアまで算出できた4つの種判別モデルに2021~2023年に取得した調査海域における連続的な音響データを適用し, 得られた種判別結果に対して空間統計学的手法の一種であるクリギングを用いて調査海域において50%以上の確率で該当種が分布すると仮定した種判別マップ (Fig. 6) を作成し, 種ごとの分布面積を推定した (Table 8)。根室市落石沿岸の天然海域においては有用コンブ類, 非有用コンブ類, ホンダワラを含む雑海藻群落

の3種類の分布が推定された。浜中町沿岸の雑海藻駆除区では、有用コンブ類、非有用コンブ類、ホンダワラを含む雑海藻群落、アマモの4種類の分布が推定された。群落

別の推定分布マップと実際の目視データを比較したところ、78地点中62地点（79.5%）が一致していた。

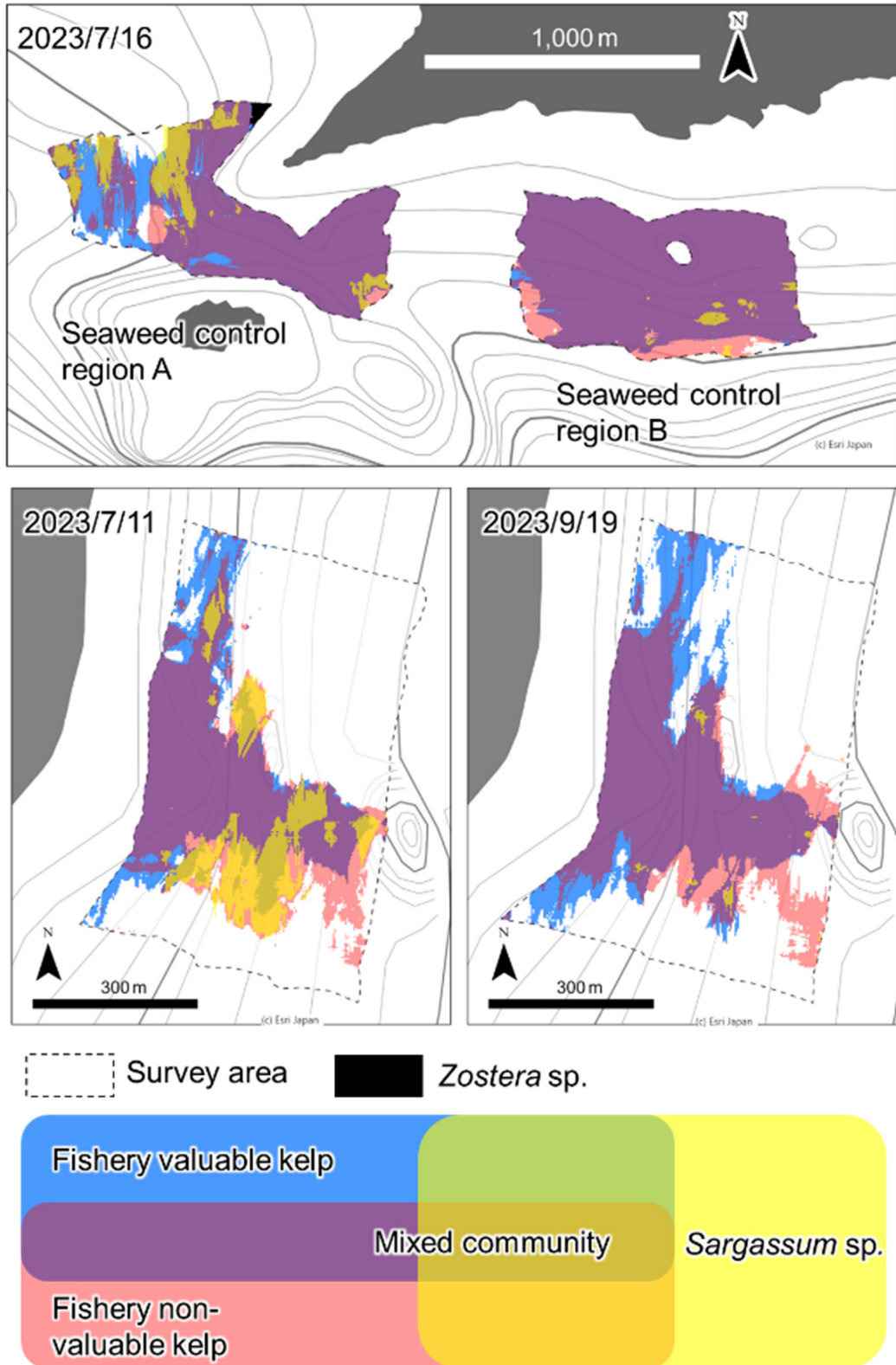


Fig.6 Species classification map estimated using Kriging based on the results obtained from the model. It assumes that the species in question is distributed with a probability of 50% or higher in the surveyed area.

Table 8 Estimated distribution area based on model classification

Distribution area(ha)	Coastal region of Ochiishi in Nemuro city		Seaweed control region of Hamanaka cho	
	Jul.	Sep.	Region A	Region B
Survey area	35.0	35.2	25.3	27.5
All kelp	16.2	16.9	23.7	27.3
Fishery valuable kelp	12.6	14.5	23.0	25.1
Fishery non-valuable kelp	14.4	13.5	20.3	27.1
Seaweed bed including <i>Sargassum</i> sp.	4.2	0.2	3.7	0.5
Eelgrass bed (<i>Zostera</i> sp.)	0.0	0.0	0.2	0.0
Bare seabed	18.8	18.4	1.0	0.3

考 察

水中カメラによる目視データと計量魚群探知機による音響データ 水中カメラで撮影した184地点におけるすべての映像で視認性が良好であり、映像のみで種判別が可能であった。調査海域において優先して分布している大型海藻は有用コンブ類、次いで非有用コンブ類であった。184地点のうち、調査海域において有用コンブ類か非有用コンブ類のいずれかが確認されたのは127地点に及んだ。調査海域一帯でコンブ漁業が行われており、その実態を十分に反映できていたと考えられる。また、ホンダワラ類を含む雑海藻群落は42地点であり、そのほとんどが天然海域か駆除範囲外での分布だった。定期的な雑海藻駆除によってホンダワラ類の防除が実現していることが示唆される。また、ホンダワラ類は単体での繁茂は確認できず、他のコンブ類（有用・非有用・両方）とともに分布していた。スガモは8地点で見られたが、いずれも他の大型海藻群落と混在しており、単独での分布は確認できなかった。スガモの分布域は潮間帯下部から潮下帯の岩の上（田中・中村，2004）であり、設定した調査範囲よりも浅い場所に分布していた可能性が考えられる。現地での聞き取りでも、スガモは調査範囲よりも浅く、船舶が入りにくい場所に多くみられるとのことだった。以上の情報からスガモは、音響計測手法での観測が困難な場所に主に分布していたと推測される。アマモについて、分布が見られた全地点でアマモ単体による群落が形成されていた。他の大型海藻は岩や岩盤、その周辺の堆積砂などを着底基質とする一方、アマモは砂地に地下茎を張り生育する（川端ら，1993）。このため、アマモ群落に本研究で対象とした他の大型海藻の分布が見られなかったのは底質の違いによるものと考えられる。

計量魚探機による音響データは、停船および方向転換に船外機のプロペラによって発生した泡が映り込んだこ

とによる欠損が一部で見られたが、いずれも数秒の短時間のものであり、データの取得および解析には問題はなかった。大型海藻の厚さ、分布水深、SV、NASCとNASCの変動係数は、それぞれ水中カメラで判別した種ごとに特徴が異なっていた。また、コンブ類は葉に気泡を持たず海底に這うように重なっているため厚さが小さいことや、アマモやホンダワラ類では葉内の空気間隙や気泡などによって高く立ち上がっているなど水中カメラで観測した特徴と音響データの見た目が一致しており、音響データでもそれぞれの分布に適した場所や葉体の海中での形態を反映していたと考えられる。海底の底質について、後方散乱強度を用いることで音響データから底質の判別が可能であるが（例えばWong and Chesterman,1968; 畑中・和田，2009）、海底直上に大型海藻が過密に生育している本海域では海底のみによる反射のみを抽出することが困難であったため説明変数には採用しなかった。また、大型海藻の生育に影響する要素として海底の傾斜角や傾斜の向きなどが考えられるが、船舶の振動の影響や大型の転石帯が広い範囲で見られたことにより海底の傾斜を推定することが困難であったことから、こちらも採用しなかった。上記した2つの変数を用いる際には、1 pingでの観測ではなく、数m範囲の水平データとするなど、使用データの解像度を下げることで可能になると考えられる。今後、さらなる精度向上を図る上で検討すべき課題である。

群落判別モデルの精度評価 本研究で作成した5種類の大型海藻判別モデルについて、有用コンブ類と非有用コンブ類のモデルは高い精度で判別が可能だった。一方で、ホンダワラ類とアマモのモデルは判別可能だが使用の際には注意が必要なモデルと考えられる。スガモのモデルについては、データ不足のため判別が困難だった。以下に、各モデルの特徴、誤判別データの考察、および精度向上に向けた課題を示す。

1.有用コンブ類判別モデル 有用コンブ類の判別モデルはエラー率が14.7%と低く、外部データでの正確度は80.8%で、F1スコアは0.83と非常に高かった。モデルは内部データと外部データの両方に適しており、高精度な判別モデルが構築されたと考えられる。ただし、全体の2割が誤判別しており、そのうち5地点は、雑海藻群落の中で非有用コンブ類を内包するホンダワラ類群落やアマモの群落を含んでいた。ホンダワラ類とアマモの判別モデルでも相互に誤判別があったことから、モデルの精度向上のためには、教師データの追加が必要である。

2.非有用コンブ類判別モデル 非有用コンブ類の判別モデルはエラー率が25.0%で、外部データによる精度検証では正確度が74.4%、F1スコアが0.72となり、有用コンブ類のモデルよりに次いで高精度だった。モデル推定結果では、有用コンブ類と同様の誤判別（ホンダワラ類群落に内包されたコンブ類の誤認）が見られ、有用コンブ類のみで形成された群落で「非有用コンブがある」と誤判別された地点が7地点あった。本研究で非有用コンブ類とした3種のうち、スジメとアイヌワカメの2種は有用コンブ類と分布水深帯が重複し、再生産可能な成熟時期も重複している（釧路水産試験場, 1995）。本海域では、有用コンブ類と非有用コンブ類が同所的に分布していることが一般的であり、機械学習の結果、有用コンブ類のみの群落であっても「非有用コンブ類も分布しているだろう」という誤判別に繋がったと考えられる。非有用コンブ類のモデルも高精度ではあるが、教師データの蓄積により更なる精度向上が期待される。

3.ホンダワラ類判別モデル ホンダワラ類の判別モデルのエラー率は14.1%で、正確度は74.0%と高かったが、F1スコアは0.56と他のモデルより低かった。適合率と再現率はそれぞれ63.2%、50.0%であり、モデルの改善の余地がある。誤判別の特徴として、アマモとの相互誤認や優良なコンブ漁場との誤認があった。アマモの音響反応がホンダワラ類に誤認された理由は、教師データ内でアマモのサンプルが少なかったことが考えられる。優良なコンブ漁場での誤認について、海底を這うように分布するコンブ類が多くなり、多くの層を形成することが影響していたと考えられる。ホンダワラ類のモデルの精度向上のためにはコンブ類の繁茂状況の優良または不良に関する定量データの組み込みを検討する必要がある。再現率が低かった理由として、枯死脱落などにより低くなったホンダワラ類が判別できていない可能性がある。本海域のホンダワラ類の季節変動（釧路水産試験場, 1995）を考慮し、最も繁茂量が多い初夏のデータのみを用いてモデルを検討する必要がある。

4.スガモ判別モデル スガモの判別モデルの構築は成功

したものの、適合率が0%で再現率の算出ができなかったため、評価ができなかった。スガモは岩礁帯の砂地に分布しているが、調査海域では大規模な群落や単独の群落が見られなかったことから、データ不足が問題と考えられる。特に雑海藻駆除の実施海域では、駆除効果などからスガモの分布が少なかったと考えられ、天然海域でも調査範囲内でスガモが確認できなかった。スガモの音響情報が取得しにくかったため、モデルの構築が困難であったと考えられる。モデルの改善には、スガモのデータを増やす必要があり、音響データの取得が可能な水深帯でのスガモ群落の探索が求められる。

5.アマモ判別モデル アマモの判別モデルは低いエラー率（2.7%）と高い正確度（98.7%）を示したが、F1スコアは0.67にとどまった。これは先に述べたホンダワラ類との誤判別が影響している可能性がある。調査で得られたアマモ場のデータが教師データでは9地点、外部データでは2地点のみであり、データ数の不足が精度低下に寄与している可能性も考えられる。精度向上のためには、サンプル数の増加だけでなく、アマモが分布する底質の情報を組み込むことで判別モデルの性能向上が期待できる。

群落判別モデルを用いた調査海域における群落推定マップ 種判別が未知の大型海藻の音響データに対して本研究で作成した判別モデルを用いることで、空間統計学的手法により大型海藻群落の構成種別の分布推定マップを作成することができた。種別の推定マップの正答率は約8割で、高精度での可視・定量化を実現できたと考えられる。有用コンブ類のみの分布マップは漁場管理の高度化や有用コンブ類の資源指標としての利用が期待される。得られた海藻群落のデータは漁獲努力に依存していないため、実際の分布に基づいたデータとして扱うことができる。経年的なデータ収集と解析を通して、有用コンブ群落の変動や環境要因との相関を理解する手助けとなるだろう。また、同時に取得したデータから雑海藻の分布の可視化を実現した。雑海藻の分布マップは、雑海藻駆除の前後の効果や漁場の荒廃度合いの定量的な把握に寄与し、維持管理にも役立つことが期待される。近年では、大型海藻群落が海洋におけるブルーカーボン（e.g., UNEP *et al.*, 2009）として着目されており、海藻の種類によって二酸化炭素貯留量の算出のための吸収係数が異なっていることが明らかになっている（国立研究開発法人 水産研究・教育機構, 2023）。群落判別モデルを通して種別の分布面積が明らかになれば、本海域の繁茂実態に即した二酸化炭素貯留量の算出に寄与できるだろう。

本研究では、音響計測手法を用いて5つの大型海藻群落の判別モデルを構築し、そのうち2つは、教師データが

184個と少ないのにも関わらず高精度だった。先行研究では単一種による分布推定が主流であった中、複数種にわたる繁茂実態に基づいた判別モデルの作成を行ったことは初めての試みであり、大きな進展である。本海域に分布する大型海藻の繁茂状況は、月によって異なるだけでなく、同じ月であっても年によって異なっていた。実際に、本海域では雑海藻駆除によって漁場を清掃する取り組みが実施されており、実施年によっては1年コンブの漁場（禁漁区）と2年コンブ以上の漁場（漁業区）が同じ沿岸域に同時に存在する。このような生物量の大きな変化があるデータであっても高精度で群落を判別可能なモデルを構築できた。大型海藻の生物量の特徴である激しい変動があっても時期や生育状況を選ばずにデータを扱える、海藻種の柔軟な推定が可能なモデルを構築できたと考えられる。

年数や生育状況の差異とは関係なく、種判別が行えることは、様々な繁茂実態の大型海藻群落への応用が期待できる。本研究でモデルを構築するために用いた教師データの取得期間は2～3年である。機械学習は教師データが多いほど推定精度が向上することから、今後も同様のデータの蓄積を進めていくことで、より高精度な判別モデルの構築や、時系列データを含めた分布推定モデル構築への進展が期待される。

本研究で調査対象とした濁度の高い海域では、空撮画像による海藻群落の構成種の判別が難しく、従来の手法では現状把握が難しい。音響計測手法がこれらの問題に対処し、大型海藻群落の現状を可視化・定量化するための手段として大きく寄与することが考えられる。

本手法は、音響計測機器を搭載した船舶で海域を航行し、航行中のデータから大型海藻群落の構成種の判別を行う。このため、船舶を所有し、航行できる漁業関係者であれば、音響データの取得には特別な技術は不要である。ただし、現在は研究用の小型計量魚群探知機を使用しており、解析には専門のソフトウェアや高度な専門知識を要することから、技術の普及には課題が残っている。本研究で作成したモデルは2020～2022年までの大型海藻の目視データと音響データを用いているが、判別精度の向上や、より現状に沿った判別を行うためには、今後も教師データを積み重ねていく必要がある。今後は判別モデルの更新にともなう精度向上とともに、より安価で解析が容易な使用機器の検討や調査マニュアルの策定など、漁業関係者にも利用しやすい仕組みを整える必要がある。

謝 辞

早く調査に協力して下さった落石漁業協同組合の皆

様、浜中漁業協同組合の皆様、根室地区水産技術普及指導所の皆様、釧路地区水産技術普及指導所の皆様に感謝の意を表します。また、研究を進めるにあたり有益なコメントを賜りました道総研釧路水産試験場の皆様に感謝の意を表します。

引用文献

- 北海道水産林務部. 昭和45年度～令和4年度北海道水産現勢, 札幌. 1971-2023.
- 川嶋昭二. 「改定普及版 日本産コンブ類図鑑」株式会社北日本海洋センター, 札幌. 1993.
- Sudo K, Watanabe K, Yotsukura N, nakaoka M. Predictions of kelp distribution shifts along the northern coast of Japan. *Mar. Ecol.* 2019 ; 35 : 47-60.
- 名畑進一. 北海道東部沿岸のコンブ類. 日本水産学会誌 1995 ; 61(1) : 101-102.
- 寺井稔. 雑海藻の駆除によるコンブ漁場の保全について. *水産工学* 2014 ; 51 : 55-58.
- 山田充哉, 渡辺一俊, 南部亮元, 干川裕, 福田裕毅, 秋野秀樹, 梶原瑠美子, 桑原久実, 本山賢司, 須藤賢哉, 森健二. 複数の種で構成された藻場における海藻被度分類画像を用いた海藻面積の推定法. *寒地土木研究所月報* 2023 ; 851.
- Komatsu T, Igarashi C, Tatsukawa K, Nakaoka M, Hiraishi T, & Taira A. Mapping of seagrass and seaweed methods beds using hydro-acoustic the with wave appropriate for detecting. *Fish. Sci.* 2002 ; 68(1) : 580-583.
- 南憲史, 浜野明, 東条斉興, 中村武史, 安間洋樹, 宮下和士. 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* 2012 ; 78(2) : 171-179.
- Sonoki S, Shao H, Morita Y, Minami K, Shoji J, Hori M, Miyashita K. Using acoustics to determine eelgrass bed distribution and assess the seasonal variation of ecosystem service. *PLOS ONE* 2016 ; 11(3), e0150890, doi:10.1371/journal.pone.0150890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150890>, (2024.2.21)
- Shao H, Kiyomoto S, Kawauchi Y, Kadota T, Nakagawa M, Yoshimura T, Yamada H, Acker T, Moore B. Classification of various algae canopy, algae turf, and barren seafloor types using a scientific echosounder and machine learning analysis. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 2021 ; 255, 107362, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107362>, (2024.2.21)
- 園木詩織. 音響計測手法を用いた省力的かつ定量的なコ

- ンブ群落の分布推定手法の検証. 令和2年度道総研釧路水産試験場事業報告書, 釧路. 2021 ; 1-3.
- Ona E & Mitson R.B. Acoustic sampring and signal processing near the seabed: the deadzone revisited. *ICES J. Mar. Sci.* 1996 ; 53(4) : 677-690.
- Breiman L. Random Forests. *Mach. Learn* 2001 ; 45 : 5-32.
- Hasegawa N, Onitsuka T, Ito S, Azumaya T. Growth variation in long blade kelp *Saccarina longissimi* in eastern Hokkaido, Japan. *Bull. Jap. Fish. Res. Edu. Agen.*, 2019 ; 49 : 65-72.
- 合田浩朗, 園木詩織, 高谷義幸. 北海道東部太平洋沿岸のコンブ目海藻4種ナガコンブ, ガッガラコンブ, スジメおよびアイヌワカメ遊走子の放出盛期. 北水試研報 2022 ; 102 : 1-11.
- 田中次郎, 中村庸夫. 「日本の海藻」株式会社 平凡社, 東京. 2004 ; 230-232.
- Wong H.K. & Chesterman W.D. Bottom Backscattering near Grazing Incidence in Shallow Water. *J. Acoust. Soc. Am* 1968 ; 44 : 1713-1718.
- 畑中勝守, 和田雅明. 離散Wavelet解析による海底地形判別アルゴリズムの開発. 日本航海学会論文集 2009 ; 121 : 177-183.
- 北海道立釧路水産試験場. 雑海藻駆除技術によるコンブ漁場の回復 釧路根室地方のコンブ漁業発展のために. 1995 ; 8-9.
- UNEP, GRID-Arendal, FAO, UNESCO. BLUE CARBON The role of healthy oceans in binding carbon. (<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7772>), 2009 ; 35-43. (2024.3.8)
- 国立研究開発法人 水産研究教育機構. 海草・海藻藻場のCO2貯留量算定ガイドブック (https://www.fra.go.jp/home/kenkyushokai/press/pr2023/files/1101bluecarbon_guidebook.pdf). 2023 ; 8-9. (2024.3.14)