

# 音響計測手法を用いた中海大根島周辺における オゴノリ類群落の分布と季節変化

南 憲吏<sup>1</sup>・倉田健悟<sup>2</sup>・安永志織<sup>2</sup>・金 相曄<sup>1</sup>

## Acoustic measurements reveal the distribution and seasonal variability of *Gracilaria* beds around Daikon Island, Nakaumi, Shimane, Japan

Kenji Minami<sup>1</sup>, Kengo Kurata<sup>2</sup>, Shiori Yasunaga<sup>2</sup>, Sangyeob Kim<sup>1</sup>

**Abstract:** Sustainable management of *Gracilaria* beds has attracted significant attention on Daikon Island, Nakaumi, Shimane, Japan, because of their economic and ecological importance. The objectives of this study were to estimate the distribution and seasonal variation of *Gracilaria* beds around Daikon Island (2.58 km<sup>2</sup>). Data on the presence or absence and height of *Gracilaria* beds were collected via acoustic measurements using an echosounder. The distribution was estimated based on the acoustic data using a geostatistical method. Surveys were conducted every three months from September 2018 to June 2020, resulting in eight total surveys. *Gracilaria* bed distribution and seasonal variations were very similar in both survey years for each survey month, i.e., the trend from September 2018 to June 2019 matched that of September 2019 to June 2020. The *Gracilaria* bed exhibited greatest height and wide distribution in September. Their distribution decreased rapidly in December and continued to decrease further, exhibiting the lowest height and distribution in March. While the height of the *Gracilaria* beds remained unchanged from March to June, in June its distribution expanded significantly. These changes were consistent with water temperatures that are suitable for growth. The mechanism of changes in the distribution and growth of *Gracilaria* beds will be examined in the future by comparing patterns of distribution with environmental factors such as water temperature and water flow.

**Key words:** Acoustic measurement, Distribution, Echosounder, *Gracilaria* bed, Seasonal variation

<sup>1</sup> 島根大学エスチュアリー研究センター・Estuary Research Center, Shimane University, 1060 Nishikawatsucho, Matsue 690-8504, Japan.

<sup>2</sup> 島根大学生物資源科学部・Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane 690-8504, Japan.

## はじめに

島根県の東部に位置する大根島は、西日本最大の汽水湖である中海に浮かぶ島である。その周辺にはオゴノリ *Gracilaria vermiculophylla*, ツルシラモ *G. chorda*, シラモ *G. bursa-pastoris* (以降、オゴノリ類とする) の紅藻類が分布し (吉田, 1998; 山本・寺田, 2004), それらが密集して群落形成される (以降、オゴノリ類群落とする)。オゴノリ類群落のように海藻が密集して形成される海藻群落は、小型魚類や藻食性動物の餌場や産卵の場として機能し、沿岸域における生物資源の基礎生産の場や一次生産者として沿岸生態系の中で重要な役割を果たしている (Mann, 1973; 寺脇, 1996; Ramus et al., 2017)。また、オゴノリ類は、日本各地の沿岸域で広く採集され、寒天の原料や刺身のつまとして利用されている (山本・寺田, 2004)。このように、沿岸域における生態的役割や経済的な価値などから、中海においてオゴノリ類の持続的利用が求められており、その資源管理が重要視されている。しかし、オゴノリ類は再生力が強く、ちぎれて海底から離れたあとも枯死せずに漂流し (山本・寺田, 2004), 流れや波などにより海底に寄せ集まることなどから分布域の把握が難しい。そのため、持続的な利用における重要な基礎情報であるオゴノリ類の分布や群落の高さ、また季節的な変化の特徴は大根島周辺では明らかにされていない。

近年、海藻群落の分布を推定する方法の一つとして音響手法が注目されており、魚群探知機などの音響計測機器を用いた海藻群落の分布推定がいくつか報告されている (Minami et al., 2010a; Minami et al., 2014; Shao et al., 2017)。音響手法は、水中へ超音波を発射し、物体からの跳ね返ってくる反射波を受信することにより水中にある物体の存在や深度などを連続して計測することができる (Simmonds and MacLennan, 2005)。船舶を移動させながら一秒間に一回以上の頻度で水中生物の存在の有無などに関する音響情報を取得することができるため (Simmonds and MacLennan, 2005), 空間的な広がりのある海藻群落の分布推定において有効な計測手法のひとつである (南ほか, 2012)。加えて、魚群探知機を用いた計測は、鉛直方向に数センチ毎の高分解能で連続して音響反射強度を測定することができる。そのため、海藻群落の高さに関する鉛直的情報を高分解能に収集することができるという利点がある (南ほか, 2011)。

そこで、本研究では大根島周辺におけるオゴノリ

類の分布特性の把握を目的として、魚群探知機を用いたオゴノリ類群落を対象とした音響計測を実施した。音響計測では、音響情報からオゴノリ類群落を抽出し、群落の位置情報と高さから分布を推定した。また、分布を3ヵ月ごとに推定し、その季節変化を明らかにした。

## 方法

### 音響調査

オゴノリ類は2年間で生活史を完結し (山本・寺田, 2004), 中海のオゴノリ類は6月と7月によく成長する (Kunii and Minamoto, 2000)。このことから、調査開始は成長期後となる9月とし、2018年9月から2020年6月にかけて約3ヵ月ごと (9月, 12月, 3月, 6月) に2年間で計8回の調査を実施した (表1)。本研究では、2018年9月から2019年6月の調査を一年目、2019年9月から2020年6月の調査を二年目とした。調査対象としたエリアは、大根島および江島東側と南側において調査船が航行可能な水深1.5 mからオゴノリ類が生育する水深10 m以浅の2.58 km<sup>2</sup>とした (図1)。調査船は、島根大学エスチュアリー研究センターが所有する船舶 (総トン数5t未満) を用いた。計測線は、浅瀬での調査の安全性を確保するため、沿岸線に並行になるように設定し、瀬や漁具などがあつた際は回避した (図1)。音響機器は、体積後方散乱強度 (SV (dB) の記録が可能な周波数200 kHzの魚群探知機 (FCV628, 古野電機社製) を用いた (表2, 西山, 2017)。江島南岸において海底のSVが調査毎で大きく異なることを確認することで、SVの準定量的な使用を可能とした。加えて、調査船が移動する際に船首で発生する気泡の影響をできるだけ軽減するために、魚群探知機の送受波器は水面下約50 cmに設置した。このような調査設定のもと音響情報は、大根島周辺を船速約4 knotsで調査船を航行させ、鉛直方向1.7 cmの解像度でSVを1秒毎に収録した (図2)。収録された音響データは、船上に設置したGPS (GP-170, 古野電機社製) による位置情報と同期させて記録媒体に保存した。また、海底付近において音響反応がみられた箇所においては、水中カメラによる目視確認を実施しオゴノリ類群落かどうかの確認を行った。加えて、オゴノリ類群落の形成が確認された大根島北西部においてCTD (CastAwayCTD, SofTek社製) により海底直上 (水深2.5 m付近) の水温を計測した (表1, 図1)。

表 1 音響計測日と水温測定時間

Table 1 Survey dates of acoustic measurement and times of water temperature measurement.

	Date of acoustic measurement	Time of water temperature measurement
First survey year	25 & 27 September 2018	11:53 in 25 September 2018
	17 & 20 December 2018	10:52 in 20 December 2018
	5 & 6 March 2019	8:35 in 6 March 2019
	3 & 4 June 2019	8:55 in 3 June 2019
Second survey year	2 & 3 September 2019	10:31 in 3 September 2019
	9 & 10 December 2019	8:44 in 10 December 2019
	2 & 3 March 2020	8:33 in 3 March 2020
	1 & 2 June 2020	8:35 in 1 June 2020

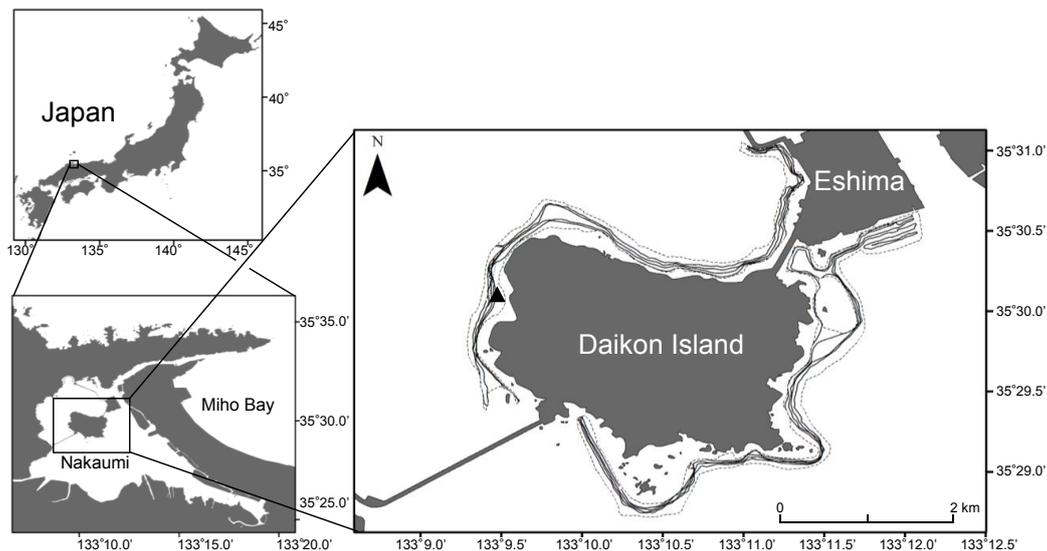


図 1 調査エリア。破線は調査領域を示す。実線は、一例として 2019 年 6 月の調査における計測線を示す。三角印は水温計測を行った地点を示す。

Fig. 1 The study area. Dashed lines indicate the margins of the study area. Solid lines indicate the acoustic measurement transects in June 2019. The filled triangle indicates the site for water temperature measurements.

### 音響データ処理

オゴノリ類群落が形成されている場所は (図 3), SV が  $-94.6$  dB 以下で音響反射が殆どない海水の層, 音響反射の弱いオゴノリ類群落の層,  $-36.7$  dB 以上で音響反射の非常に強い海底の層, これら三つの層で主に形成される (図 3)。海底で生育するオゴノリ類の藻体は, SV が非常に弱い海水の層と強い海底の層に挟まれていることになる。本研究では, 水中カメラによる

目視観察によりオゴノリ類の繁茂が確認された地点において, オゴノリ類からの SV が最大値  $-54.1$  dB, 最小値  $-84.3$  dB であったことから, 海底直上において  $-54.1$  dB から  $-84.3$  dB の SV の領域をオゴノリ類群落からの反射とし, その群落の高さを抽出した。ただし, 海底付近の音響計測では, 海底の形状やその SV が強いことから計測値にばらつきが生じる探知不能範囲がある (Mitson, 1991)。本研究では, 海底付近の SV

表2 音響計測に用いた魚群探知機 FCV628 の計測設定

Table 2 Fundamental parameter settings for FCV628 during the acoustic measurements.

Parameter	
Transducer type	520-5PSD
Frequency (kHz)	200
Beam type	Single
Transmitted pulse length (ms)	0.1
Ping rate (s)	1
Vertical resolution (cm)	1.7
Recording range (m)	10.0

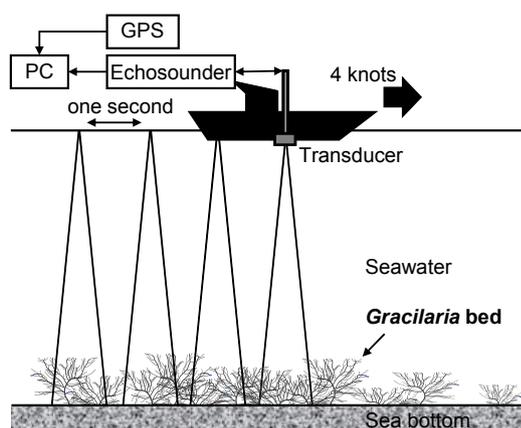


図2 魚群探知機を用いた音響計測の概要図。

Fig. 2 Schematic overview of acoustic measurements using an echosounder.

から探知不能範囲を確認し、海底直上 10 cm 未満の高さで抽出されたオゴノリ類群落は探知不能範囲に含まれていた。このことから、解析では 10 cm 未満の反応についてはオゴノリ類群落としては取り扱わなかった。従って、本研究では、高さ 10 cm 以上のオゴノリ類群落を分布推定の対象とした。また、大根島周辺にはオゴノリ類の他にウミトラノオが主たる海藻類として分布するとされている(島村・中村, 1998)。ウミトラノオなどのホンダワラ科褐藻は、音を強く反射する気泡を有することから SV が非常に強いとされており(Minami et al., 2010b)、海底の SV に近い強度で音を反射する。一方で、オゴノリ類のように気泡を有しな

い海藻は、ホンダワラ科褐藻よりも SV が非常に低くなる。例えば、気泡を有しないマコンブ *Saccharina japonica* と気泡を有するノコギリモク *Sargassum macrocarpum* では、単位重量当たりの音響反射強度が数 10 倍以上になる(南ほか, 2015; Shao et al., 2019)。本研究では、海底と同程度の強い反射はオゴノリ類群落とみなさないことで、オゴノリ類以外のホンダワラ科の海藻を解析から除外した。また、水中カメラによる目視観察においてアオサ属など緑藻類の群落を確認された音響情報についても解析から除外した。なお、これら音響データの解析には Echoview ver. 9.0 (Echoview Software 社製) を用いた。

### 分布推定

点の情報から面の情報を推定する方法の一つである空間統計学的手法を用いることで(Wackernagel, 1995)、魚群探知機により得られる音響情報から空間的な分布を推定することができる(Simmonds and MacLennan, 2005)。本研究では、空間統計学的手法のなかでも分布の推定で一般的に用いられるクリギングを用いて音響情報からオゴノリ類群落の分布を推定した(Wackernagel, 1995; 間瀬・武田, 2001)。空間統計学的手法を用いた解析は、ArcGIS ver. 10.6.1 (ESRI 社製) で行った。ただし、オゴノリ類群落の形成とそれを構成する藻体の生長は同じ機構ではないので、オゴノリ類群落の有無(形成)と高さ(生長)の分布傾向は同じ側面とはみなすことはできない。従って本研究では、有無と高さのクリギングによる空間予測は別々に行った。オゴノリ類群落の有無に関する情報も推定に必要なので、推定では高さ 0 cm を含む音響計測により得られた藻体の高さ情報を用いて推定した。オゴノリ類群落の有無の推定は有るか無いか(1か0か)の判別なので、本研究では1か0かを確率から判定する確率クリギングを用いて有無に関する分布を推定した(Johnston et al., 2001)。なお、本研究では音響データ処理において高さが 10 cm 以上のものを分布推定の対象とするオゴノリ類群落としていることから、有無の判定でも高さ 10 cm を基準とした。一方、オゴノリ類群落の高さに関する分布では、10 cm 以上のオゴノリ類群落の高さ情報を用いて推定した。推定には、通常クリギングを用いた(Johnston et al., 2001)。オゴノリ類群落の分布は、ArcGIS ver. 10.6.1 (ESRI 社製) により、これら有無と高さ両方の分布推定の結果を重ね合わせることで可視化した。

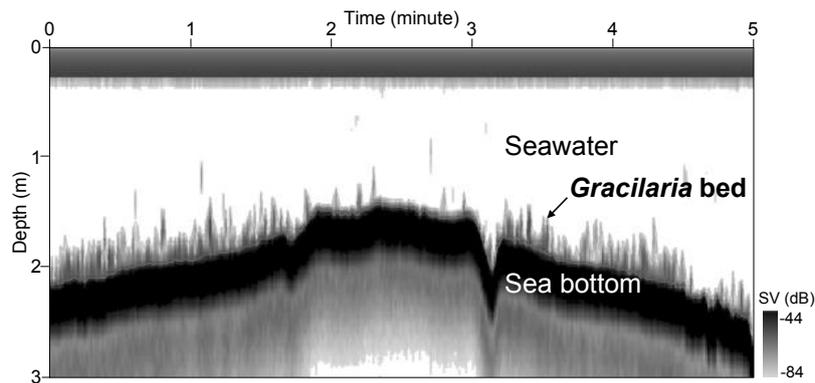


図3 魚群探知機により得られるオゴノリ類群落の音響情報の一例。カラーバーは体積後方散乱強度 (SV) を示す。

Fig. 3 Echogram of *Gracilaria* bed obtained using an echosounder. The color bar indicates the volume backscattering strength (SV).

## 結果

調査一年目と二年目のオゴノリ群落分布の各調査月に渡る経年変化はほぼ同じであった。図4に推定された分布結果を示す。9月は、調査一年目および二年目ともに広範囲でオゴノリ類群落が形成されていた(図4a, 図4e)。推定された調査一年目と二年目の分布面積は、それぞれ0.25 km<sup>2</sup>, 0.34 km<sup>2</sup>であった。オゴノリ類群落の分布は、江島南岸に大きな群落が見られ、江島東岸でも確認された。加えて大根島北西部沿岸にも大きな群落が確認された。それ以外にもオゴノリ類群落は調査エリアに散在して分布していた。また、この時期のオゴノリ類群落の高さは他の調査時期よりも高さのある群落が多く、平均で20 cm以上あり(2018年9月20.5 cm ± 3.1 S.D., 2019年9月23.3 cm ± 4.1 S.D.)、高いものでは43 cm以上の群落も形成されていた(図5a, 図5e)。調査一年目と二年目の水温は、それぞれ25.0 °C, 27.6 °Cであった。

次に、12月になると、オゴノリ類群落の分布は急激に減少した(図4b, 図4f)。12月に推定された調査一年目と二年目の分布面積は、それぞれ0.09 km<sup>2</sup>, 0.07 km<sup>2</sup>であった。9月の分布面積から6割以上が減少しており、その減少した面積は調査一年目で0.16 km<sup>2</sup>, 調査二年目で0.27 km<sup>2</sup>であった。大きな群落が形成されていた江島周辺のオゴノリ類群落は見られなくなり、大根島北西部沿岸に分布していたものは依然として分布していた。また、形成されていたオゴノリ類群落の高さは、調査一

年目で平均21.3 cm ± 5.0 S.D., 調査二年目で平均15.7 cm ± 2.2 S.D.であった(図5b, 図5f)。調査一年目には6月から12月にかけての高さの減少は見られなかったが、調査二年目には7.6 cm低くなっていた。調査一年目と二年目の水温は、それぞれ10.3 °C, 10.4 °Cであった。

その後、3月になっても群落は殆ど形成されておらず、分布面積はさらに減少していた(図4c, 図4g)。その分布面積は、調査一年目が12月から0.02 km<sup>2</sup>減少し0.07 km<sup>2</sup>, 調査二年目が0.04 km<sup>2</sup>減少し0.03 km<sup>2</sup>であった。群落が形成されていた場所は、大根島北西部沿岸であった。群落の高さは、一年を通して最も低くなっており、調査一年目で平均17.0 cm ± 3.2 S.D., 調査二年目で平均14.8 cm ± 2.2 S.D.であった(図5c, 図5g)。このときの調査一年目と二年目の水温は、それぞれ10.3 °C, 9.2 °Cであった。

このように9月以降は群落の衰退がみられたが、翌年の6月になるとオゴノリ群落の分布は大きく拡大した(図4d, 図4h)。6月のオゴノリ類群落は、調査エリア全体に散在して形成されていた。その分布面積は、調査一年目で0.36 km<sup>2</sup>, 調査二年目では0.37 km<sup>2</sup>であった。3月から6月にかけて、それぞれ0.29 km<sup>2</sup>, 0.34 km<sup>2</sup>の分布域の拡大となっており、調査一年目は3月の5倍、調査二年目では12倍であった。しかし、群落の高さは、大きく変化はしておらず、調査一年目で平均17.6 cm ± 2.6 S.D., 調査二年目で平均17.8 cm ± 2.4 S.D.と、3月からわずかに増加している程度であった(図5d,

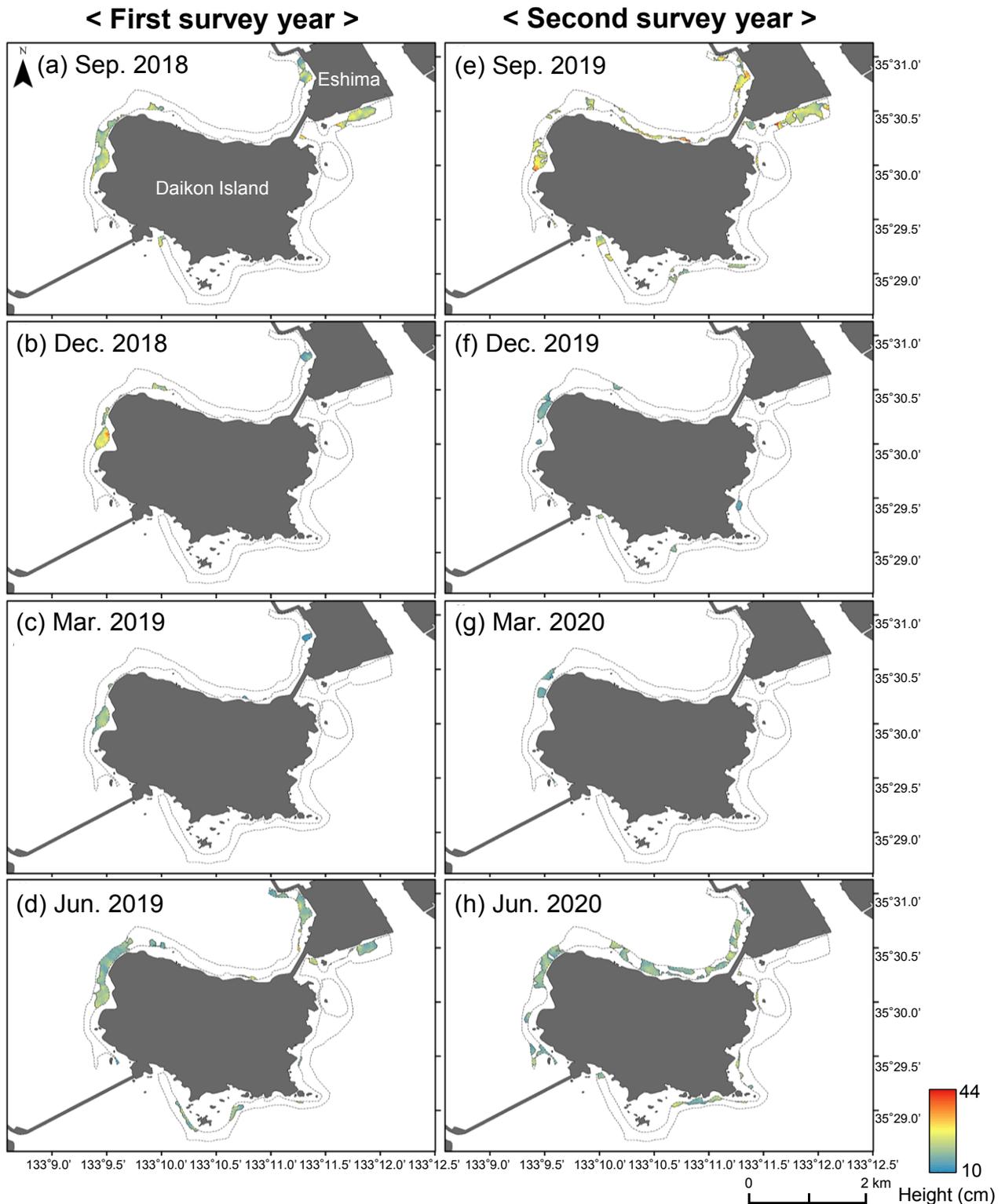


図4 オゴノリ類群落の分布 (a) 2018年9月, (b) 2018年12月, (c) 2019年3月, (d) 2019年6月, (e) 2019年9月, (f) 2019年12月, (g) 2020年3月, (h) 2020年6月. カラーバーはオゴノリ類群落の高さ, 破線は調査エリアを示す.

**Fig. 4** Map of *Gracilaria* bed distribution in (a) Sep. 2018, (b) Dec. 2018, (c) Mar. 2019, (d) Jun. 2019, (e) Sep. 2019, (f) Dec. 2019, (g) Mar. 2020, and (h) Jun. 2020. The color bar indicates the height of the *Gracilaria* bed. Dashed lines indicate the study area.

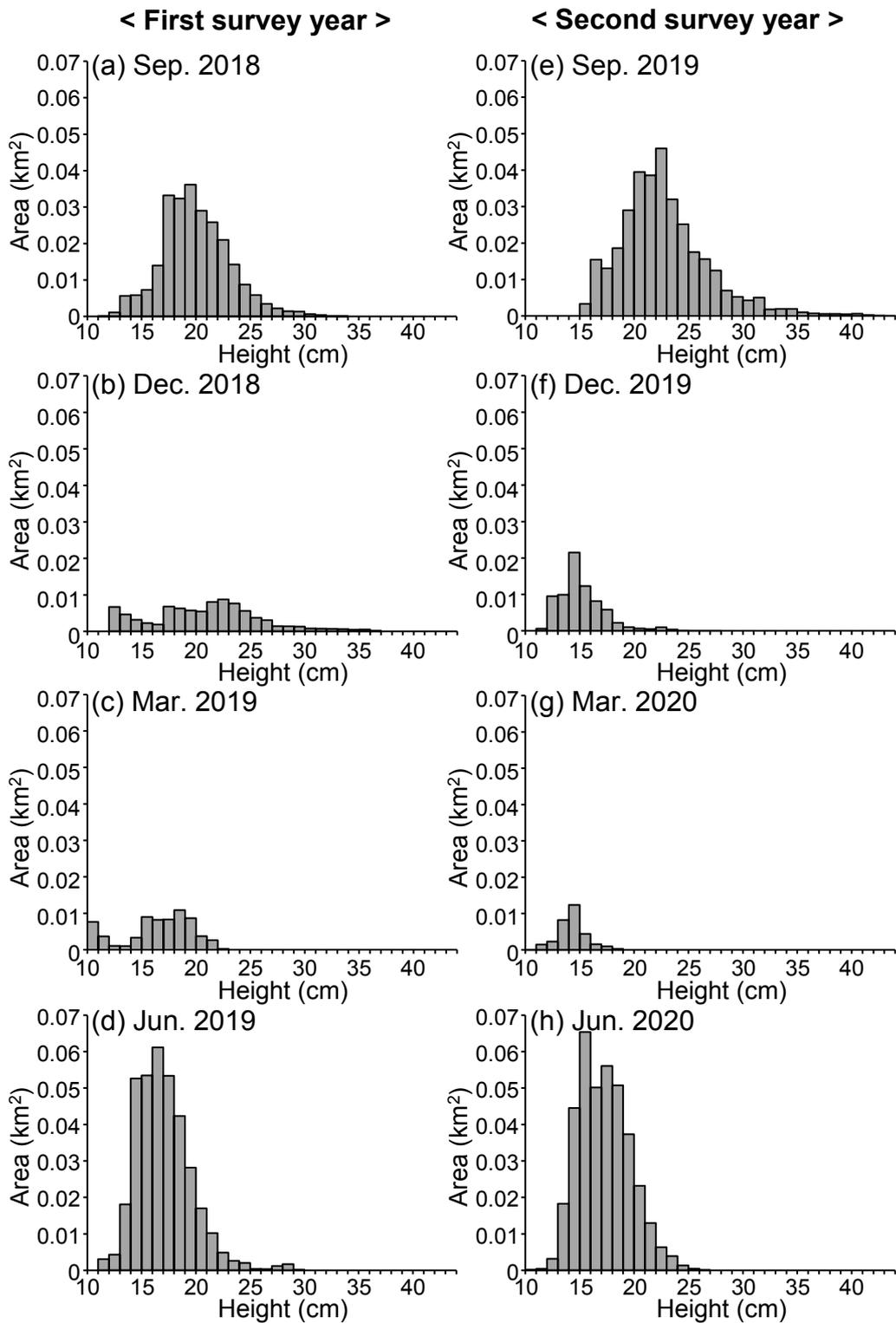


図5 オゴノリ類群落の高さ毎の分布面積 (a) 2018年9月, (b) 2018年12月, (c) 2019年3月, (d) 2019年6月, (e) 2019年9月, (f) 2019年12月, (g) 2020年3月, (h) 2020年6月.

Fig. 5 Frequency distributions of the estimated height of the *Gracilaria* bed in (a) Sep. 2018, (b) Dec. 2018, (c) Mar. 2019, (d) Jun. 2019, (e) Sep. 2019, (f) Dec. 2019, (g) Mar. 2020, and (h) Jun. 2020.

図 5h). 3月から6月にかけては、群落の高さは変化しないものの、分布は大きく広がるという結果であった。このときの調査一年目と二年目の水温は、それぞれ 22.7 °C, 21.7 °C であった。

さらに、調査一年目の 2019 年 6 月から調査二年目の 2019 年 9 月の変化は、次のようになった (図 4d, 図 4e)。オゴノリ類群落の多くは、江島南岸、西岸および大根島北西部沿岸に分布しており、6 月と 9 月ともに分布域の大きな変化はみられず、分布面積も大きな変化はみられなかった (2019 年 6 月: 0.36 km<sup>2</sup>, 2019 年 9 月: 0.34 km<sup>2</sup>)。一方、分布面積とは異なり、群落の高さは 6 月 (平均 17.6 cm ± 2.6 S.D.) から 9 月 (平均 23.3 cm ± 4.1 S.D.) にかけて 5.7 cm の増加がみられた (図 5d, 図 5e)。

## 考 察

大根島周辺のオゴノリ群落は、9 月に高さのある大きな群落形成され、12 月になると分布域が急激に減少した。分布域の減少は 12 月以降も続き、3 月に分布面積および高さともに最も低くなった。その後、6 月になると群落の高さは変化しないものの分布域が大きく広がり、6 月から 9 月では分布域の拡大はみられないものの群落が高くなるという結果を示した。

オゴノリ類は初春から晩春にかけて成長するとされている (山本・寺田, 2004)。また、オゴノリ類の成長に適した水温は 20 °C から 25 °C との報告がある (馬場, 2015)。これらの水温にあてはめると、調査 1 年目と 2 年目ともにオゴノリ類が生育していた海底の水温は、6 月が適水温となっており、9 月になると適水温の境界付近、その後の 12 月と翌年の 3 月は適水温ではなかった。本研究では、オゴノリ類の分布変化は 3 月から 6 月の春季の分布変化が最も大きく、調査一年目が約 5 倍、調査二年目が約 12 倍であった。これらのことから、春季に適水温になるとオゴノリ類が急激に成長し、分布面積が大きく拡大したと考えられる。加えて、本研究では海底から 10 cm 未満のものは探知不能範囲として対象とするオゴノリ類群落から除外しているため、低いオゴノリ類群落は分布推定範囲から外れている。12 月から 3 月にかけての冬季では高さが低いいため推定から外れていた群落が春季に成長することで、探知範囲である 10 cm 以上に含まれるようになり、分布域の拡大という結果に繋がっていると考えられる。こうした、高さの低い群落が春季に分布に

加わることにより、全体的に高さの低い群落が 6 月は分布していたといえる。これに伴って 3 月から 6 月にかけての群落の高さは、変化しないという結果となったと考えられる。さらに、9 月まで適水温であったところから 6 月以降の夏季も継続して成長を続け、高さのある群落が分布するという結果につながったといえる。これは、地中海のオゴノリ類は、6 月と 7 月によく成長するとして過去の知見とも一致している (Kunii and Minamoto, 2000)。

こうした春季から夏季にかけてオゴノリ類群落の成長がみられる一方で、秋季には、急激な分布域の減少がみられた。大きく成長したオゴノリ類の藻体の一部は、海底の基質から離れ、海が時化した際に海岸に打ち上げられるとされている (山本・寺田, 2004)。大根島周辺の住民への聞き取りでも秋以降に時化した際は海岸にオゴノリ類が大量に打ち上げられることがあるとの証言がある。本研究においても 12 月の調査時において海岸に打ち上げられているオゴノリ類が確認されている。9 月から 12 月にかけての秋季は、海底から離れたオゴノリ類が流失し、その一部は時化により海岸に打ち上げられたと考えられる。その結果、オゴノリ類群落の分布がなくなるもしくは本研究では計測できない高さ 10 cm 以下の群落となり、9 月から 12 月にかけての秋季にオゴノリ類群落の分布が大きく衰退したといえる。この衰退が冬季も続き、3 月は分布面積および高さ共に最も低くなったと考えられる。

このような季節的な分布変化がみられた一方で、大根島北西部沿岸のように他でみられた分布変化とは少し異なったオゴノリ類群落もみられた。大根島北西部沿岸のオゴノリ類群落は、調査 1 年目と 2 年目ともに一年を通して分布が確認された。大根島周辺で最もオゴノリ類群落の分布が少なくなった 3 月においても分布していた。オゴノリ類の生活史は 2 年あり、再生力が強く、ちぎれて海底から離れたとしても枯死せずに流れや波などで漂流するとされている (山本・寺田, 2004)。松江気象台における 2009 年から 2020 年までの風向に関する統計データでは (気象庁, 2020)、秋季 (9 月～11 月) は東よりの風が全体の 6 割近くを占める。北西部沿岸の東側は大根島で遮蔽されているため、東からの吹送流の影響をうけにくいと考えられる。従って、北西部沿岸では流失による分布変化の影響をうけにくかったのかもしれない。風の他にも、分布域を変化させる要因としては、潮流、波、海底の傾斜や陸への打ち上げられやすい地形など様々な環境

要因がある。今後、オゴノリ類群落の分布をモニタリングし、そうした環境要因とオゴノリ類群落の分布変化との関係を調べることにより、大根島周辺におけるオゴノリ類群落の分布変化の原因と特徴をより詳細に明らかにすることができるだろう。そして、そうした知見は、オゴノリ類群落の空間的特徴を考慮した適切なオゴノリ類の持続的利用に向けた取り組みに貢献することができると期待できる。

一方で、沿岸海域の海藻群落で用いられてきた音響手法を汽水域のオゴノリ類群落に適用することで幾つかの課題が新たに見えてきた。本研究で評価した水域は水深 1.5 m 以深を対象としたが、これは座礁など用いた調査船の航行の安全性を確保した水深である。本研究で用いた魚群探知機は、超音波を送受信する送受信器から約 32 cm 以上離れた個所の音響情報の計測が可能である。従って、音響計測機器としては水深約 32 cm から音響情報の取得が可能である。大根島周辺のオゴノリ類の生育水深が 2 m 付近であることを考慮すると（山本・寺田, 2004）、水深 1.5 m 未満の水域にもオゴノリ類群落が形成されていると考えられる。さらに、深部まで光環境が良好な外海と異なり、汽水域のように濁度の高い水域では、海藻や海草の分布水深は浅い水深帯に限られる（Duarte, 1991）。これらのことから、浅い水深帯の分布の把握は、全体の分布面積や季節変化の評価において重要な情報の一つといえる。濁度の高い汽水域での海藻群落を対象とした音響計測においては、浅い水深帯まで航行が可能な調査船の準備やドローンボートの開発などが今後の課題である。加えて、調査での計測線も浅い水域での安全性を確保するため、沿岸線に並行になるように設定した。しかし、リアルタイムで変化する風や波などの環境要因も考慮して現場で安全性を適宜判断しながらの計測となったため、計測線は体系的なものになっていない。特に浅い水深帯を対象にした調査ではこうした安全性確保の影響を大きく受けるため、計測線を体系的なものにするのは困難といえる。体系的な計測線は分布推定の精度を向上させることから（Wackernagel, 1995; 間瀬・武田, 2001）、浅い水深帯を対象とした音響計測においては、GPS 航行などによる体系的な計測線の確保が可能な計測システムの確立も課題である。また、水中カメラによる目視確認を実施することで、緑藻類の群落の音響情報は解析から除外されている。しかし、オゴノリ類群落に緑藻類などが混生していたものについては解析から除外さ

れていない。従って、本研究で音響情報から抽出されたオゴノリ類群落には、オゴノリ類のみで構成される群落と緑藻類などが混生した群落があることになる。そのため、本研究で得られたオゴノリ類群落の季節変化は、緑藻類などが混生することによって生じるオゴノリ類群落の高さや分布変化への影響について考慮されていない。緑藻類などが混生したオゴノリ類群落の判別方法やその音響情報の取り扱いについては、オゴノリ類群落の分布特性を把握するうえで今後の重要な課題といえる。

最後に、本研究では魚群探知機から得られるオゴノリ類群落からの SV は、群落の識別のみに使用している。しかし、SV は、対象生物の密度などの有益な情報に変換することができる。例えば、魚群からの SV を魚一頭あたりの音響反射強度で除することにより、その魚群の密度や魚の個体数の推定が可能である。そのため、音響計測機器を用いた魚類などの現存量推定に関する調査が数多く報告されている（Schabetsberger et al., 2000; Oshima, 2004; Kang et al., 2006; 安間ほか, 2010; Yan et al., 2020）。近年、魚類に限らず海藻群落の現存量推定において音響計測機器の適用も有効な手段の一つとして注目されている。広範囲の分布調査を数時間かつ少ない労力で調査可能なためである。本研究の調査でも、2.58 km<sup>2</sup> の調査エリアを音響機器の操作 1 名、船の操船者 1 名、瀬などの安全航行のための見張り 1 名の合計 3 名で、1 回の調査の計測時間は約 6 時間であった。一部の藻類では SV からの現存量推定を目的とした、藻類の単位重量あたりの音響反射強度が明らかにされつつある（Shao et al., 2019）。大根島周辺のオゴノリ類も同様に単位重量あたりの音響反射強度を用いることで、本研究で実施した音響計測機器による調査により得られるオゴノリ類群落の SV からその密度や現存量推定が可能であると考えられる。従って、オゴノリ類群落の音響反射強度に関する特性を明らかにし、密度に関する情報を解析に加えることにより大根島周辺のオゴノリ類群落全体の現存量と季節変化のモニタリングが可能になるといえる。さらに、現存量とその季節変化は、一次生産量の推定やそこから求められる生態系サービスの評価に繋げることができる（Murase et al., 2000; Sonoki et al., 2016）。そうなれば、大根島周辺のオゴノリ類群落のより深い理解と管理方法について議論することができるだろう。音響計測機器を用いた大根島周辺のオゴノリ類群落の分布推定は、空間的な分

布を可視化すると同時に、その群落全体の現存量推定、一次生産量の広域評価などといった今後の展開が期待される。

## ま と め

本研究では、大根島周辺のおゴノリ類群落の分布とその季節変化を評価するため、魚群探知機を用いた音響計測を実施し、おゴノリ類群落の分布推定を3ヵ月毎に2018年9月から2020年6月の二年間にわたり行った。その結果、大根島周辺のおゴノリ類群落は、9月に高さのある大きな群落が形成され、12月になると分布域が急激に減少することが明らかとなった。この分布域の減少は12月以降も続き、3月に分布面積および高さともに最も低くなった。その後、6月になると群落の高さは変化しないものの分布域が大きく広がり、6月から9月では分布域の拡大はみられないものの群落が高くなるという傾向を示した。これらの分布変化は、おゴノリ類の成長に適した水温の発生に対応していた。浅水域であることや緑藻類の混生に伴う計測技術的な課題があるものの、分布変化が育成環境や過去の知見とも一致していたことから、本研究での音響計測による評価は大根島周辺のおゴノリ類群落の分布傾向を適切に評価できていたと考える。今後、水温や流れなどの環境要因と分布変化を比較することによりおゴノリ類群落の季節変化のメカニズムの解明が期待できる。また、計測技術的な課題の克服が必要とされるとともに、おゴノリ類群落全体の現存量推定や一次生産量の広域評価などといった新たな展開も期待される。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、古野電機株式会社の西山義浩氏、笠井昭範氏には魚群探知機による音響情報の取得に係るご協力をいただいた。島根大学エスチュアリー研究センターの松本力也元技術補佐員ならびに松本輝彦技術補佐員には、大根島周辺のおゴノリ類の現状や調査実施に際して多大な助言と協力をいただいた。心から厚く御礼を申し上げる。本研究は、文部科学省卓越研究員事業ならびにJSPS 科研費JP 18K11726の助成を受けたものです。

## 引 用 文 献

- 馬場将輔 (2015) おゴノリ類6種の成長と生残に及ぼす温度、光量、塩分の影響。海洋生物環境研究所研究報告, 20: 41–56.
- Duart, C.M. (1991) Seagrass depth limits. *Aquatic Botany*, 40: 363–377.
- Jonston, K., Verhoef, J.M., Krivoruchiko, K. and Lucas, N. (2001) Using ArcGIS geostatistical analyst. ESRI, New York, 316p.
- Kang, M., Honda, S. and Oshima, T. (2006) Age characteristics of walleye pollock school echoes. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 1465–1476.
- 気象庁 (2020) 過去の気象データ, <https://www.jma.go.jp> (2020年8月時点)
- Kunii, H. and Minamoto, K. (2000) Temporal and spatial variation in the macrophyte distribution in coastal lagoon Lake Nakaumi and its neighboring waters. *Journal of Marine Systems*, 26: 223–231.
- Mann, K.H. (1973) Seaweeds: Their Productivity and strategy for growth. *Science*, 182: 975–981.
- 間瀬 茂・武田 純 (2001) 空間データモデリング—空間統計学の応用—。共立出版, 200p.
- Minami, K., Yasuma, H., Tojo, N., Fukui, S., Ito, Y., Nobetsu, T. and Miyashita, K. (2010a) Estimation of kelp forest, *Laminaria* spp., distributions in coastal waters of the Shiretoko Peninsula, Hokkaido, Japan, using echosounder and geostatistical analysis. *Fisheries Science*, 76: 729–736.
- Minami, K., Hamano, A., Nakamura, T., Takao, Y., Yasuma, H. and Miyashita, K. (2010b) Shape and target strength of vesicles of two *Sargassum* species common to the coastal waters of Japan. *The Journal of the Marine Acoustics Society of Japan*, 37: 147–155.
- 南 憲吏・安間洋樹・東条齊興・伊藤祐介・福井信一・野別貴博・宮下和士 (2011) 音響手法を用いたコンブ場の厚さ計測。数理水産科学誌, 9: 62–74.
- 南 憲吏・濱野 明・東条齊興・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: 171–179.
- Minami, K., Tojo, N., Yasuma, H., Ito, Y., Nobetsu, T., Fukui, S. and Miyashita, K. (2014) Quantitative mapping of kelp forests (*Laminaria* spp.) before and after harvest in coastal waters of the Shiretoko Peninsula, Hokkaido, Japan. *Fisheries Science*, 80:

- 405–413.
- 南 憲吏・安間洋樹・濱野 明・中村武史・村瀬 昇・東条斉興・宮下和士 (2015) 音響反射強度測定による来留見ノ瀬のホンダワラ科藻場の現存量推定と季節変化. 海洋音響学会誌, 42: 1–10.
- Mitson, R.B. (1991) Fisheries sonar. John Wiley and Sons Ltd, Oxford, 288p.
- Murase, N., Kito, H., Mizukami, Y. and Maegawa, M. (2000) Productivity of a *Sargassum macrocarpum* (Fucales, Phaeophyta) population in Fukawa Bay, Sea of Japan. Fisheries Science, 66: 270–277.
- 西山義浩 (2017) 水産資源の持続的利用と資源量推定—漁業用普通魚探への音響データ出力機能搭載とその情報利用提案—. 超音波テクノ, 29: 69–74.
- Oshima, S. (2004) Spatial distribution and biomass of pelagic fish in the East China Sea in summer, based on acoustic surveys from 1997 to 2001. Fisheries Science, 70: 389–400.
- Ramus, A.P., Silliman, B.R., Thomsen, M.S. and Long, Z.T. (2017) An invasive foundation species enhances multifunctionality in a coastal ecosystem. PNAS, 114: 8580–8585.
- Schabetsberger, R., Brodeur, R.D., Ciannelli, L., Napp, J.M. and Swartzman, G.L. (2000) Diel vertical migration and interaction of zooplankton and juvenile walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) at a frontal region near the Pribilof Islands, Bering Sea. ICES Journal of Marine Science, 57: 1283–1295.
- Shao, H., Minami, K., Shirakawa, H., Maeda, T., Ohmura, T., Fujikawa, Y., Yotsukura, N., Nakaoka, M. and Miyashita, K. (2017) Verification of echosounder measurements of thickness and spatial distribution of kelp forests. Journal of Marine Science and Technology, 25: 343–351.
- Shao, H., Minami, K., Shirakawa, H., Kawauchi, Y., Matsukura, R., Tomiyasu, M. and Miyashita, K. (2019) Target strength of a common kelp species, *Saccharina japonica*, measured using a quantitative echosounder in an indoor seawater tank. Fisheries Research, 214: 110–116.
- 島村京子・中村幹雄 (1998) 汽水湖中海における海藻・海草類の分布と現存量. 水産増殖, 46: 219–224.
- Simmonds, J. and MacLennan, D. (2005) Fisheries Acoustics (Theory and Practice). Blackwell, Oxford, 437p.
- Sonoki, S., Shao, H., Morita, Y., Minami, K., Shoji, J., Hori, M. and Miyashita, K. (2016) Using acoustic to determine Eelgrass bed distribution and to assess the seasonal variation of ecosystem service. PLoS One, 11(3):e0150890.
- 寺脇利信 (1996) 藻場. 大野正夫編「21世紀の海藻資源—生態機構と利用の可能性—」, pp. 1–30, 緑書房.
- Wackernagel, H. (1995) Multivariate geostatistics: An introduction with applications, Springer, Heidelberg, 387p.
- 山本弘敏・寺田竜太 (2004) オゴノリ類. 大野正夫編「有用海藻誌—海藻の資源開発と利用に向けて」, pp. 226–254, 内田老鶴圃.
- Yan, N., Mukai, T., Yamamoto, J. and Hasegawa, K. (2020) Acoustic discrimination between juvenile walleye pollock and pointhead flounder. Fisheries Research, 224:105434.
- 安間洋樹・大島達樹・本多 聡・宮下和士・青木一郎 (2010) 北海道東部太平洋域におけるトドハダカ *Diaphus theta* の音響生物量推定. 日本水産学会誌, 76: 362–369.
- 吉田忠生 (1998) 新日本海藻誌. 内田老鶴圃, 1252p.