長崎県檜山町地先におけるウニの密度管理による小型海藻藻場の造成

門田 立,^{1*} 清本節夫,¹ 増田佳子,¹ 宮野哲平,² 吉村 拓¹

(2021年5月20日受付, 2021年11月30日受理, 2022年1月28日J-STAGE 早期公開)

¹(国研)水産研究・教育機構 水産技術研究所長崎庁舎, ²(株)國富 長崎営業所Restoration of a small-sized macroalgal bed through the removal of sea urchins in Kashiyama,
Nagasaki PrefectureTATSURU KADOTA,^{1*} SETUO KIYOMOTO,¹ YOSHIKO MASUDA,¹
TEPPEI MIYANO² AND TAKU YOSHIMURA¹¹Nagasaki Field Station, Fisheries Technology Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency,
Taira-machi, Nagasaki 851-2213, ²Nagasaki Sales Office, Kunitomi Co., Ltd. Asahi-machi, Nagasaki 852-
8003, Japan

In this study, a small-sized macroalgal bed was restored through the removal of sea urchins at a barren site in Kashiyama, Nagasaki Prefecture. Sea urchin densities decreased from 13.9 to 0.7 individuals/m² from June to November 2015, and remained low afterward. By the following spring, small-sized macroalgae such as Gelidiales spp. and *Chondrophycus undulatus* increased while large-sized macroalgae did not. The coverage of the small-sized macroalgae was three times that of the control area, in which the densities of sea urchins exceeded 12.2 individuals/m² throughout the experimental period. Tank experiments showed that many of the small-sized macroalgae examined (*Dictyopteris undulata*, *D. prolifera*, *Gelidium elegans*, and *Dichotomaria falcata*) were less vulnerable to feeding by *Siganus fuscescens* and *Kyphosus bigibbus* than large-sized macroalgae (*Sargassum alternato-pinnatum*). Our results indicate that small-sized macroalgal beds can be more easily restored than large-sized macroalgal beds simply through the removal of sea urchins, even under high browsing pressure from herbivorous fish. In small-sized macroalgal beds, the gonad index of *Heliocidaris crassispina* was higher than that of animals in the barren areas. Therefore, the restoration of small-sized macroalgal beds would likely be advantageous to sea urchin fisheries.

キーワード：磯焼け, 九州西岸, 小型海藻藻場, 小形海藻藻場, 植食性魚類, ムラサキウニ

南日本沿岸では, 大型海藻が一年中茂る四季藻場が衰退し, 春から初夏だけ茂る春藻場や直立海藻がほとんどない磯焼けに変わる海域が増加している。¹⁻³⁾ このような藻場衰退の原因として, 海水温上昇等の環境変化による植食動物の摂餌量と海藻の生産量とのバランスの乱れが指摘されている。⁴⁾ このため, 植食動物の除去や母藻の設置等による磯焼け対策が南日本各地で盛んに実施されている。これまでに, ウニ等の底生動物の除去により大型海藻藻場が回復した地先が多くある一方で, 同様の対策だけでは藻場が回復しない地先も多く存在する。⁵⁻⁸⁾

このような場合に藻場が回復しない原因として植食性魚類の食害の影響が指摘されているが,^{5,6)} 効果的に除去することが難しいのが現状である。

近年, 大型海藻の消失が進む九州では, 藻場回復において小型海藻の果たす役割や機能に注目するとともに, それらを藻場造成や地先の生産力回復に積極的に利用しようとする動きが見られる。^{9,10)} 小型海藻とは, コンブ類, アラメ・カジメ類, ホンダワラ類等の大型褐藻以外の海藻を指し, 褐藻, 緑藻, 紅藻の多くの種が属している。¹¹⁾ このうち, アミジグサ類やテングサ類などサンゴ

モ類以外の小型直立海藻が磯焼け対策の対象となる場合が多い。これら小型海藻の中には、水産上有用種の生育場所や餌料として機能する種が知られている。¹⁰⁾ 例えば、テングサ類はイセエビ *Panulirus japonicus* の稚エビの生息場所として、また、アワビ・トコブシ類やサザエ *Turbo sazae* の餌資源として重要な役割を果たしている。^{10,12)} 小型海藻の機能や増殖法について解明がさらに進み、小型海藻を藻場造成対象種に加えることができれば、より柔軟かつ現実的な磯焼け対策の構築に資する可能性がある。¹⁰⁾

長崎県壱山町地先¹⁰⁾や五島市久賀島地先¹³⁾では、ウニ除去を中心とした磯焼け対策により小型海藻藻場を造成した事例が報告されている。これらの藻場造成地やその周辺では漁業対象種であるムラサキウニ *Heliocidaris crassispina* の身入りが回復し、ウニ漁場が拡大したことも報告されている。^{10,13)} しかし、磯焼け対策前後のウニ密度や小型海藻の詳細な変化については十分に明らかとなっておらず、磯根資源に対する効果についても定性的な評価に留まっている。また、小型海藻藻場造成の有利性として、小型海藻は大型海藻に比べ植食性魚類の被害の影響を受けにくいと想定されている。^{9,10)} 植食性魚類の多くでは摂餌選択性が知られており、¹⁴⁾ 本邦ではアイゴ *Siganus fuscus* の選択性が確認されている。^{15,16)} アイゴでは、小型海藻のウミウチワ *Padina arborescens* 及びイシゲ *Ishige okamurae* への選択性は大型海藻のヒジキ *Sargassum fusiforme* と比べ低いことが報告されている。¹⁵⁾ しかし、他の小型海藻と大型海藻を比較した研究や他の植食性魚類を対象とした研究は見当たらず、さらなる検証が必要である。そこで、本研究では、ウニの密度管理による小型海藻の増殖を再検証するとともに、植食性魚類による被害の受けやすさを小型海藻と大型海

藻で比較するための水槽実験を実施した。さらに、造成された小型海藻藻場と直立海藻が少ない磯焼け域に生息するムラサキウニの身入りの比較により、小型海藻のムラサキウニの餌料としての効果について検討した。

材料と方法

ウニの個体数管理による小型海藻藻場の造成 調査地は長崎県長崎市壱山町地先の水深（最大大潮低潮面からの水深）2 m 前後（32°49'N, 129°43'E）の岩礁帯である（Fig. 1）。この岩礁帯で長崎市新三重漁業協同組合の漁業者が2015年6月から9月にかけて磯焼け対策としてウニ除去を実施した。本研究では、この磯焼け対策区域内に15 m × 15 mの実験区を設置し、実験区内及びその周辺のウニの除去を2015年6月9日から10日、7月30日から31日及び11月5日に計5回行った。ウニの除去はSCUBA潜水で金属製のウニ鉤とたも網を用いて行い、除去したウニは新三重漁協の主要なウニ漁場へ放流した。なお、本実験区を含む対策域において、大型海藻藻場の造成の可能性を探るため、漁業者がイソモク *Sargassum hemiphyllum*, キレバモク *S. alternatopinnatum*, コナフキモク *S. glaucescens* 等の春藻場を構成するホンダワラ類の母藻を2015年7月2日に設置した。

ウニの密度のモニタリングは2015年5月から2016年5月までおよそ3か月ごとに実施するとともに、ウニの除去に合わせてその前後にも実施した。ウニの密度の推定は、実験区内に10 mのラインを1本もしくは2本設置し、折れ尺を使って両側各1 mの範囲に出現したウニを種別に計数した。ただし、ガンガゼ *Diadema setosum* とアラサキガンガゼ *D. clarki* については個体数も少なく、調査当時は水中での判別が困難であったこと

Fig. 1 Maps of study site.

から、ガンガゼ類としてまとめた。また、2015年9月以降のモニタリングでは、折れ尺を目安にムラサキウニの殻径を目視により推定し、大型個体と小型個体を分けて計数した。長崎県橋湾沿岸では加入からおおよそ1年で殻径が30 mm程度に成長することから、¹⁷⁾ このサイズを大型個体と小型個体に分ける基準とした。

海藻のモニタリングは2015年5月から2016年5月までおおよそ3か月ごとに実施した。海藻のモニタリングでは、50 cm×50 cmのコドラートを人身大の岩の上(5か所)に設置し、種別の被度を目視により5%刻みで記録した。ただし、5%以下の海藻は、1%、3%及び5%の3区分で記録した。なお、種までの同定が困難な海藻が多かったことから、解析では大型海藻、小型海藻、有節サンゴモ、芝生状海藻、無節サンゴモ及び海藻以外(サンゴ等)の6項目にまとめた(電子付録 Appendix 1)。大型海藻とは、コンブ類、アラメ・カジメ類、ホンダワラ類を指すが、¹¹⁾ 本調査地ではホンダワラ類のみが出現した。小型海藻とは、本来、大型海藻以外のすべての海藻を指すが、¹¹⁾ ここでは芝生状海藻、有節サンゴモ及び無節サンゴモを除いた藻場造成の対象となり得る小型海藻とした。芝生状海藻とは直立した葉状部が1 cm以下の芝生状の海藻とし、主に紅藻のイギス属 *Ceramium* spp. やヒメモサヅキ *Jania adhaerens* 等が絡み合うマット状を呈していた。有節サンゴモとは藻長1 cm以上の有節サンゴモとした。ヒメモサヅキ等の藻長1 cm以下の有節サンゴモは本来有節サンゴモに含めるべきであるが、イギス類等と混在し、目視による個別の被度の判定が困難であることから、芝生状海藻として分類した。また、ウニ除去を実施していない対照区を設置し、同様の手法で3か月ごとにウニの密度と海藻の被度をモニタリングした。対照区の水深は約2 mで、実験区とは約600 m離れている。実験区と対照区の間の水深約2 mの地点で、水温ロガー(TidbitTv2, Onset Computer Corporation, Bourne, MA, USA)により30分間隔で記録した調査期間中の海水温の平均値(2015年5月から2016年5月)は20.3°C、最高水温は29.4°C(2015年8月15日15時)、最低水温は12.6°C(2016年2月26日9時、9時30分)であった。月間平均値は14.3°C(2016年2月)から26.8°C(2015年8月)の範囲で(Fig. 2)、2013–2017年の平均水温と比べ、2015年6–11月の水温はやや低く、2015年12月から2016年5月はやや高い傾向が見られた。

植食性魚類に対する大型海藻と小型海藻の食害の受けやすさの比較 大型海藻と小型海藻の食害の受けやすさを比較するため、水産研究・教育機構水産技術研究所長崎庁舎で水槽実験を実施した。日本沿岸ではアイゴ、ブダイ *Calotomus japonicus*、イスズミ類が大型海藻の食害を引き起こしていると考えられている。^{4,18,19)} これら

Fig. 2 Changes in monthly average seawater temperature in Kashiyama, Nagasaki Prefecture. Bold line shows average seawater temperature from February 2013 to December 2017. Dashed and thin lines show monthly average seawater temperature from June 2014 to May 2015 and from June 2015 to May 2016, respectively.

に加え、ニザダイ *Prionurus scalprum* などの他の植食性魚類もその関与が疑われている。このうち、本実験では、2015年6月に長崎市みなと漁協よりアイゴ6個体とノトイスズミ *Kyphosus bigibbus* 3個体を、2016年6月に新三重漁協よりニザダイ6個体を入手し、実験に用いた。全長及び体重(平均値±標準偏差)は、アイゴが280.7±14.4 mm及び287.0±57.2 g、ノトイスズミが430.3±45.8 mm及び1700.7±645.7 g、ニザダイが282.5±30.5 mm及び379.5±132.9 gであった。収容した水槽は海水かけ流しの屋外水槽(FRP製)で、その大きさはアイゴとニザダイが600 L(70 cm×150 cm×60 cm)、ノトイスズミが1500 L(94 cm×234 cm×70 cm)であった。本実験の対象は、大型海藻としてキレバモク、小型海藻としてウミウチワ、シワヤハズ *Dictyopteris undulata*、ヘラヤハズ *Dictyopteris prolifera* (以上、褐藻)、マクサ *Gelidium elegans*、ヒラガラガラ *Dichotomaria falcata* (以上、紅藻)及びモツレミル *Codium intricatum* (緑藻)とした。これらの海藻は調査地周辺の春藻場で比較的多く見られる海藻である。各海藻は2015年7月及び2016年6月に長崎市田熊地先で採集し、実験開始までの間、屋外水槽に収容した。

アイゴとノトイスズミを用いた実験は2015年7月12日から7月22日にかけて、ニザダイを用いた実験は2016年7月3日から7月11日にかけて実施した。実験期間中の水温はアイゴが23.5±0.4°C(22.2–24.1°C)、ノトイスズミが23.6±0.5°C(22.3–24.2°C)、ニザダイが24.7±0.5°C(23.7–25.7°C)であった。各海藻をサラダスピナーで水分を切り、計量した後、ワイヤーネット

(30 cm×60 cm) にケーブルタイで海藻が直立するように固定した。また、各海藻が互いに重ならないようにするとともに、各海藻のワイヤーネット上の設置位置は隣り合う種が変わるように実験ごとに変更した。与えた各海藻の量は、全長の大きなノトイスイズミには 20 g 前後に、全長が小さなアイゴとニザダイには 10 g 前後になるように可能な限り調整した (電子付録 Appendix 2)。与えた海藻の総量はノトイスイズミでは体重の $2.7 \pm 0.1\%$ ($n=5$)、アイゴでは $4.4 \pm 0.1\%$ ($n=6$)、ニザダイでは $3.1 \pm 0.03\%$ ($n=6$) となった。日間摂餌量はニザダイでは報告例が見当たらないが、ノトイスイズミでは 5.7%、アイゴでは 4.3% であることが報告されている。^{15,20} 本実験と先行研究の実験では与えた海藻の種類や飼育環境に違いがあるが、本実験での海藻総量は一日で食べ切る量と想定した。この海藻を取り付けたワイヤーネットを植食性魚類が入っている水槽に入れた。1, 6, 12 及び 24 時間後にワイヤーネットを水槽から取り出し、水分を切った各海藻の重量を計量した後、再びケーブルタイでワイヤーネットに固定し、水槽に戻した。各植食性魚類に対して、海藻を交換して実験を 5-6 回実施した。各実験は 8 時から 8 時 40 分の間に開始した。食害の影響

度の指標としては、各海藻の残存率を計算した。

海藻の残存率 (%)

$$= \frac{(\text{実験経過後の各時間の重量})}{(\text{実験開始時の重量})} \times 100$$

この残存率が高いと植食性魚類の食害を受けにくく、低いと受けやすいことを意味する。海藻種による残存率の差の有無を明らかにするため Friedman test を行った。実験開始 6 時間後には残存率が 0% 近くになる種類が現れ、最も好む海藻を食べ尽くしたと考えられたため、6 時間後のデータを用いて解析した。

小型海藻藻場内外のムラサキウニの身入りの比較 本調査は、2015 年 3 月から 2016 年 7 月にかけて檜山町地先で行った。調査区は 2013 年に浅場 (水深 2 m 前後) と深場 (水深 7 m 前後) に造成された小型海藻藻場 (small-sized macroalgal bed, SMB) とそれぞれに隣接する海藻が比較的少ない磯焼け域 (Barren area, B) に設定した (電子付録 Appendix 3)。なお、浅場の磯焼け域は小型海藻藻場の造成試験の対照区とほぼ同じ地点である。上述の方法で 2016 年 5 月と 2015 年 9 月に海藻の被度とウニの密度を計測したところ、各地点の植生とウニ密度は Tables 1, 2 の通りであった。5 月において

Table 1 Benthic community composition and sea urchin density in sampling site to examine gonad index of *Heliocidaris crassispina* in May 2016

	Coverage (%)								Sea urchin density (ind./m ²)		
	Large-sized macroalgae	Small-sized macroalgae			Articulated coralline algae	Turf algae	Crustose coralline algae	Other	<i>Heliocidaris crassispina</i> *		
		Phaeophyceae	Rhodophyta	Chlorophyta					Large ind.	Small ind.	Other
Shallow											
Small-sized macroalgal bed (SMB)	1.5	1.5	35.5	0.0	23.6	16.2	21.7	0.0	2.3	7.6	1.0
Barren area (B)	0.4	1.3	8.6	0.0	0.2	59.0	30.5	0.0	17.2	1.8	0.1
Deep											
Small-sized macroalgal bed (SMB)	0.0	42.9	19.6	0.0	8.7	11.5	15.4	1.9	2.2	1.7	0.2
Barren area (B)	0.0	10.6	8.2	14.0	11.2	44.7	9.3	2.0	4.0	0.9	1.7

* Body size: Large ind., ≥ 3 cm in test diameter; small ind., < 3 cm in test diameter.

Table 2 Benthic community composition and sea urchin density in sampling site to examine gonad index of *Heliocidaris crassispina* in September 2015

	Coverage (%)								Sea urchin density (ind./m ²)		
	Large-sized macroalgae	Small-sized macroalgae			Articulated coralline algae	Turf algae	Crustose coralline algae	Other	<i>Heliocidaris crassispina</i> *		
		Phaeophyceae	Rhodophyta	Chlorophyta					Large ind.	Small ind.	Other
Shallow											
Small-sized macroalgal bed (SMB)	0.6	0.6	0.6	0.0	1.2	96.5	0.4	0.2	5.9	2.1	0.4
Barren area (B)	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	86.5	10.9	2.0	12.5	1.7	0.2
Deep											
Small-sized macroalgal bed (SMB)	0.0	60.3	2.3	0.0	0.6	24.2	5.0	7.7	1.1	1.1	0.4
Barren area (B)	0.0	2.5	0.4	0.0	5.5	87.0	1.5	3.1	5.5	0.6	0.6

* Body size: Large ind., ≥ 3 cm in test diameter; small ind., < 3 cm in test diameter.

は、浅場ではテングサ類やコブソソ *Chondrophycus undulatus* などの紅藻の割合が高く、深場ではシワヤハズやシマオウギ *Zonaria diesingiana* などの褐藻の割合が高かった。一方、9月では、紅藻及び緑藻が減少するため、深場でのみ小型海藻藻場が維持された。ウニの密度においては、5月及び9月ともに、深場と浅場の小型海藻藻場では、ムラサキウニの大型個体が磯焼け域と比べ少ない傾向があった。これら4地点のムラサキウニの身入りの違いを明らかにするため、2015年3月、2016年2月、5月及び7月に各調査地点（およそ15m×15m）から殻径が比較的大きい個体を15個体程度採集した。実験室に持ち帰り、殻径、体重及び生殖腺重量を測定した後、生殖腺指数（GI）を算出した。生殖腺指数の算出には以下の式を用いた。

$$GI = \frac{\text{生殖腺重量}}{\text{体重}} \times 100$$

なお、先行研究ではムラサキウニは殻径40mm以上の個体が成体と考えられていることから、²¹⁾ 採集した個体のうち殻径40mm以上の個体のみ（各月9–15個体）をGIの算出に使用した。月ごとに浅場と深場の小型海藻藻場と磯焼け域の比較をKruskal-Wallis testで行い、有意差が見られた場合はSteel-Dwass testによる多重比較を行った。

結 果

ウニの個体数管理による小型海藻藻場の造成 実験区では、ウニの除去前にあたる2015年5月のウニの密度は13.9個体/m²で、全てムラサキウニであった（Fig. 3）。6月の除去により、ウニの密度は一時的に5.0個体/m²まで減少したが、すぐに再び増加した。その後、ウニの除去を繰り返すことにより、2015年11月にはウニの密度が0.7個体/m²にまで低下した。それ以降、殻径3cm以下のムラサキウニやバフンウニ *Hemicentrotus pulcherrimus* 等のウニがやや増加したものの、大型個体の密度は0.4–1.4個体/m²で低い状態を維持した。対照区では、2015年5月のウニの密度は12.2個体/m²で、全てムラサキウニであった。その後のウニの密度は14.3–19.0個体/m²で高い状態を維持した。

実験区の花藻は、ウニ除去前は無節サンゴモが優占し（被度86.5%）、テングサ類やアミジグサ類等の小型海藻の被度はわずか1.0%であった（Fig. 4a、電子付録Appendix 4a）。しかし、ウニ除去後の9月には、無節サンゴモの被度が0.4%にまで減少した。一方、小型海藻の被度は12月に6.5%、2月に15.7%と徐々に増加した。2016年5月にはテングサ類とコブソソ等が繁茂し（電子付録Appendix 4b）、小型海藻の被度は31%に達した。有節サンゴの被度は12月に17.0%に達したが、その後、減少し、5月に2.6%となった。また、大

Fig. 3 Changes in sea urchin density in the experimental (triangles) and control areas (circles). Solid and dotted lines show all urchins (including large *Heliocidaris crassispina*) and large *H. crassispina* (test diameter ≥ 40 mm), respectively.

Fig. 4 Changes in benthic community composition in the experimental (a) and control areas (b).

型海藻は漁業者がキレバモクやコナフキモク等の春藻場を構成するホンダワラ類の母藻を設置したものの、5月の大型海藻の被度は1.5%にすぎず、コナフキモク等のホンダワラ類がわずかに確認されるのみであった。対照区でも2015年5月は無節サンゴモが64.2%と優占し、小型海藻の被度は3.6%、大型海藻は1.9%であった（Figs 4b、電子付録Appendix 4c）。2016年5月にテングサ類やコブソソが確認できたが、小型海藻の被度は9.9%にすぎず、実験区の3分の1程度であった（電子付録Appendix 4d）。また、有節サンゴの被度も1.7%が最大で（12月）、大きく増加することはなかった。

大型海藻と小型海藻の植食性魚類の被害の受けやすさの比較 ノトイズミを用いた実験では、キレバモクが

Fig. 5 Changes in decrease rate of algal species under browsing pressure from *Kyphosus bigibbus* (a), *Siganus fuscescens* (b), and *Prionurus scalprum* (c). Solid, dashed, and dashed-and-dotted lines indicate Phaeophyceae, Rhodophyta, and Chlorophyta, respectively. Species name abbreviations: *Sargassum alternato-pinnatum* (Sa), *Padina arborescens* (Pa), *Dictyopteris undulata* (Du), *Dictyopteris prolifera* (Dp), *Gelidium elegans* (Ge), *Dichotomaria falcata* (Df), *Codium intricatum* (Ci).

最も早く減少し、次いで、ウミウチワが減少した (Fig. 5a)。実験開始6時間後の残存率はキレバモクで1.2%, ウミウチワで12.7%に達した。実験終了時(24時間後)までに、シワヤハズ及びヘラヤハズでは残存率が83.9%及び87.5%とわずかに減少したものの、その他の小型海藻(マクサ, ヒラガラガラ, モツレミル)は減少しなかった。実験6時間後の残存率は海藻種による有意な差が認められた (Fig. 6a; Friedman test, $p < 0.01$)。

アイゴを用いた実験では、キレバモク, モツレミル及びウミウチワが早く減少した (Fig. 5b)。実験6時間後の残存率はキレバモクで4.3%, モツレミルで0%, ウミウチワで14.4%に達した。次いで、実験12時間後まで、ヘラヤハズ(残存率21.8%), シワヤハズ(残存率22.5%), マクサ(残存率52.5%)の順に徐々に減少し

Fig. 6 Decrease rates of algal species in 6 hours after exposure to browsing pressure from *Kyphosus bigibbus* (a), *Siganus fuscescens* (b), and *Prionurus scalprum* (c). The central line represents the median, the edges of the box represent the 25th and 75th percentiles, and the whiskers represent the outermost values within the range of 1.5 times the respective quartiles. Species name abbreviations: *Sargassum alternato-pinnatum* (Sa), *Padina arborescens* (Pa), *Dictyopteris undulata* (Du), *Dictyopteris prolifera* (Dp), *Gelidium elegans* (Ge), *Dichotomaria falcata* (Df), *Codium intricatum* (Ci).

た。ヒラガラガラは、実験終了時の残存率が94.0%で、大きく減少しなかった。実験6時間後の残存率は海藻種による有意な差が認められた (Fig. 6b; Friedman test, $p < 0.01$)。

ニザダイを用いた実験では、モツレミル, ヒラガラガラ及びマクサがキレバモクよりも早く減少する傾向が認められた (Fig. 5c)。実験6時間後の残存率はモツレミルが0%, ヒラガラガラが25.9%, マクサが47.2%に達したが、キレバモクでは77.8%であった。ウミウチ

Fig. 7 Comparison of averaged gonad indices of *Heliocidaris crassispina* collected from small-sized macroalgal beds and barren grounds in shallow and deep areas. Bars indicate standard deviations. SMB and B indicate small-sized macroalgal beds and barren areas, respectively. Dotted line indicates the criterion to start catching sea urchins in Kashiya. Different letters indicate statistical significance (Kruskal-Wallis test followed by Steel-Dwass test, $p < 0.05$).

ワ、シワヤハズ及びヘラヤハズ(全て褐藻)の残存率は、実験終了時でも 93.2, 89.9 及び 85.7% にすぎず、大きく減少しなかった。実験 6 時間後の残存率は海藻種による有意な差が認められた (Fig. 6c; Friedman test, $p < 0.01$)。

小型海藻藻場内外のムラサキウニの身入りの比較 ムラサキウニの GI は 4 回の調査のいずれにおいても、調査地点による有意差が認められた (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$)。本地先のムラサキウニの漁期の前にあたる 2 月では、浅場の小型海藻藻場のムラサキウニの GI が 4.4% と最も高かったが、本地先を管理する新三重漁業協同組合がウニ漁業の開始時期を決める基準としている 6% を超えることはなかった (Fig. 7)。しかし、漁期の前期にあたる 3 月になると、全ての地点で平均 GI は増加し、浅場と深場の小型海藻藻場で 6% を超えた。漁期中期となる 5 月では平均 GI はさらに増加し、浅場の小型海藻藻場では 8.9%、深場の小型海藻藻場では 7.4% となった。また、浅場の磯焼け域でも 6.3% となり、ウニ漁業の開始時期を決める基準を超えた。5 月の小型海藻藻場のウニの平均 GI は磯焼け域の 1.4–1.5 倍に達した。漁期の後期 (もしくは漁期後) にあたる 7 月では、全ての場所で平均 GI は大きく減少し、いずれの地点でも 6% を下回った。全調査期間を通じて、ムラサキウニの GI は深場よりも浅場の方が高く、同じ水深帯では磯焼け域よりも小型海藻藻場の方が高い傾向が見られた。

考 察

本調査では、ウニの除去を繰り返し、11 月までに、その密度を磯焼け時の約 20 分の 1 (0.7 個体/m²) に減らした。その後、ムラサキウニの小型個体は増加したものの、大型個体の密度は低い状態を維持した。そして、翌年の 5 月には、実験区の小型海藻の被度 (31%) は、ウニ除去を実施していない対照区に比べ、3 倍程度に増加した。一方、同海域では漁業者がホンダワラ類の母藻を 7 月に数十 kg 設置したが、ホンダワラ類の被度は低いままだった。この地先の海底にホンダワラ類を設置し、ビデオ撮影すると、ブダイやアイゴ、ノトイヌズミが海藻を食べる様子が頻繁に確認できる (門田, 未発表データ)。これらの結果は、先行研究で示唆されているように、^{9,10)} 大型海藻が植食性魚類の食害を受ける環境下でも、小型海藻藻場であれば、ウニの密度管理により回復する可能性があることを示唆する。また、ウニ密度が高い水準で維持された対照区では実験区と比べ小型海藻の被度は低いものの、その被度は増加した。水温環境を比較すると 2014 年 12 月から 2015 年 5 月は平年と比べ水温がやや低く、一方 2015 年 12 月から 2016 年 5 月は水温がやや高い傾向が認められた (Fig. 2)。また、夏季の最高水温は、2014 年が 28.9℃、2015 年が 29.4℃、冬季の最低水温は 2015 年が 12.1℃、2016 年が 12.6℃であった。小型海藻の被度の増加量は水温等の環境要因の影響も受けている可能性が考えられる。

植食性魚類の食圧が高い環境下でも小型海藻藻場が造

成できる理由として, 小型海藻は大型海藻に比べ植食性魚類による食害を受けにくいことが考えられる。本研究では, ノトリスズミによる食害に対しては, キレバモクが最も受けやすく, 次いでウミウチワが受けやすい傾向が認められた。一方で, その他の小型海藻では顕著な食害を確認することができなかった。ノトリスズミの胃内容物調査でも, 大型海藻が繁茂している春季においてはホンダワラ類やワカメ *Undaria pinnatifida* などの大型海藻が胃内容物の大きな割合を占めることが知られている。²²⁾ これらのことは, 小型海藻, 特に紅藻と緑藻はノトリスズミによる食害を受けにくいことを示唆している。アイゴによる食害に対しては, キレバモク, モツレミル及びウミウチワが受けやすい傾向が認められた。アイゴにおいても, 四季藻場で採集された個体の胃内容物調査により大型海藻がその大部分を占めることが報告されている。²³⁾ ニザダイに対しては, 上述の2種とは異なり, モツレミル, ヒラガラガラ及びマクサの3種はキレバモクよりも食害を受けやすい傾向が認められた。ニザダイでは, 胃内容物調査により, サンゴモ *Corallina officinalis*, オバクサ *Pterocladia tenuis* やヒメテングサ *Gelidiophycus freshwateri* 等のテングサ類が餌としての重要性が高いことが明らかとなっている。²⁴⁾ 一方, 本実験では, 褐藻の中で見てみると, 小型海藻(ウミウチワ, シワヤハズ及びヘラヤハズ)はキレバモクに比べニザダイの食害を受けていなかった。これらのことから, 紅藻や緑藻に属する小型海藻はニザダイによる食害を受けやすいものの, 褐藻の中で比較すると, 小型海藻は大型海藻に比べ食害を受けにくいと考えられる。日本沿岸では, アイゴとリスズミ類の他にブダイが藻場の衰退に強く関与していると考えられており,^{4,18,19)} 今後, ブダイの食害に対する各海藻の評価が必要である。

本実験では, 小型海藻は, 大型海藻に比べ植食性魚類の食害を受けにくい傾向を示す一方で, 少なからず食害を受けることも明らかとなった。アイゴを用いた実験では, 最終的にヒラガラガラとマクサを除く全ての小型海藻で大きな食害を確認した。また, ニザダイでは実験に使った全ての紅藻及び緑藻で食害が認められた。この結果は, 海藻が少なく, 植食性魚類が多い環境下では小型海藻でも食害が生じる可能性を示唆している。ただし, アイゴをはじめとした多くの植食性魚類では海藻だけでなく動物やデトリタス等も摂餌することが報告されている。^{23,25)} 一方, 本実験では海藻のみを与えており, 小型海藻種への食害を過大評価している可能性もあることから, 今後, 慎重に検討を進める必要がある。

磯根資源に対する小型海藻の機能として, イセエビの稚エビの生息場所になることやアワビ類・サザエの餌資源になることなどが報告されている。^{10,12)} 本研究では, 造成された小型海藻藻場のムラサキウニでは, 2月から

7月にかけて, 周辺の磯焼け域のウニと比べ, 平均GIが高い傾向を確認した。本地先ではGI6%をウニ漁業の開始の基準としており, 宮崎県のムラサキウニ漁業ではこれを板ウニとして利用できる基準としている。⁹⁾ 小型海藻藻場ではこの基準を深場と浅場ともに3月から5月にかけて上回ったが, 磯焼け域では浅場でのみ5月に上回った。近年, 高田²⁶⁾は, 水槽実験によりマクサやクロソゾ *Palisada intermedia* などの小型海藻がムラサキウニの餌料として効果があることを明らかにしている。本研究結果は, 小型海藻藻場が造成できれば, ウニのGIの向上を通じて, 1個体から得られる生殖腺重量が増えるだけでなく, 利用できる時期が長くなることにより, 地先のムラサキウニ漁業に貢献することを示唆している。さらに, 小型海藻藻場のムラサキウニのGIは, テングサ類やコブソゾなどの紅藻が優占する浅場ではシマオウギやシワヤハズなど褐藻が優占する深場に比べ高い傾向が認められた。紅藻(クロソゾやマクサ)は褐藻(シワヤハズやウミウチワ等)や緑藻(ミル *Codium fragile*)に比べムラサキウニに対する餌料効果が高い傾向を示していることから,²⁶⁾ 小型海藻藻場の構成種の違いがムラサキウニの身入りの差に影響する可能性がある。

近年, 磯焼け対策として植食性魚類の除去手法の開発が進められているが,⁴⁾ 植食性魚類はウニと比べ移動能力が高く, 効率的に除去することが難しい状況が続いている。このような状況下で, 収量を増加させたい磯根資源がムラサキウニである場合, ウニの密度管理により小型海藻藻場を造成し, ウニの身入りの向上を図る手法は有効と考えられる。小型海藻の中でも, マクサはムラサキウニの餌として餌料価値が高いことから,²⁶⁾ 今後, マクサを中心とした小型海藻藻場を効率よく造成するための技術の開発が期待される。また, ウニ漁場として長期的に利用するために, どの程度のウニ密度であれば造成した小型海藻藻場が維持できるのか明らかにすることも重要な課題となる。

謝 辞

長崎市新三重漁業協同組合の中國文晴氏, 久保豊氏, 村瀬篤氏及び潜水部会の皆様には調査の実施に当たってご協力いただいた。また, 調査手法や解析結果を検討するにあたり, 水産技術研究所の中川雅弘博士, 八谷光介博士, 邵花梅博士には有益なご助言をいただいた。本研究の一部は農林水産技術会議委託プロジェクト研究「生態系ネットワーク修復による持続的な沿岸漁業生産技術の開発」により実施したものである。

文 献

- 1) 平岡雅規, 浦 吉徳, 原口展子, 土佐湾沿岸における水

- 温上昇と藻場の変化. 海洋と生物 2005; **27**: 485–493.
- 2) 吉村 拓, 清本節夫, 八谷光介, 中嶋 泰. 長崎市沿岸に広がる“春藻場”とは?—その実態と今後の課題について—. 月刊海洋 2009; **41**: 629–636.
 - 3) 清本節夫, 門田 立, 種子田 雄, 吉村 拓. 九州西岸域における藻場の変遷. 海洋と生物 2018; **236**: 210–219.
 - 4) 水産庁. 「第3版磯焼け対策ガイドライン」東京. 2021.
 - 5) 四井敏雄, 前迫信彦. 対馬東岸の磯焼け帯における藻場回復実験. 水産増殖 1993; **41**: 67–70.
 - 6) 田井野清也, 細木光夫. 植食動物の除去による藻場回復の実践, 高知県での試み. 水産工学 2011; **48**: 47–50.
 - 7) Agatsuma Y, Matsuyama K, Nakata A, Kawai T, Nishikawa N. Marine algal succession on coralline flats after removal of sea urchins in Suttu Bay on the Japan Sea coast of Hokkaido, Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1997; **63**: 672–680 (in Japanese with English abstract).
 - 8) Ishikawa T, Tose T, Abe M, Iwao T, Morita T, Maegawa M, Kurashima A. Changes in algal flora by removing *Didemna* in Haidaura Bay, Mie Prefecture. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2017; **83**: 599–606 (in Japanese with English abstract).
 - 9) 宮崎県. 宮崎県沿岸における藻場造成及び管理に関する指針. 2014.
 - 10) 吉村 拓, 八谷光介, 清本節夫. 小型海藻藻場の重要性和磯焼け域におけるその回復の試み. 水産工学 2015; **51**: 239–245.
 - 11) 藤田大介. 小型海藻群落の生産力. 「海藻を見守り育てる知恵と技術」(藤田大介, 村瀬 昇, 桑原久実編) 成山堂書店, 東京. 2010; 125–129.
 - 12) 藤田大介. 小型藻類. 「藻場の海藻と造成技術」(能登谷正弘編) 成山堂書店, 東京. 2003; 145–160.
 - 13) 長崎県水産部. 「長崎県における磯焼け対策ガイドライン(平成30年度改訂版)」, 長崎. 2018.
 - 14) Sura SA, Molina NE, Blumstein DT, Fong P. Selective consumption of macroalgal species by herbivorous fishes suggests reduced functional complementarity on a fringing reef in Moorea, French Polynesia. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2021; **536**: 151508.
 - 15) 桐山隆哉, 藤井明彦, 藤田雄二. 藻食性魚類によるヒジキの摂食と摂食痕の特徴. 水産増殖 2005; **53**: 355–365.
 - 16) Yamada H, Shimabukuro H, Hayakawa J, Nakamoto K, Kawamura T, Kon K. Assessment of feeding preference for subtropical macrophytes in young *Siganus fuscescens*. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2016; **82**: 631–633 (in Japanese).
 - 17) 清本節夫. 長崎県橘湾沿岸の転石海岸におけるムラサキウニの個体群動態, 特に台風が及ぼす影響について. 日本ベントス学会誌 2011; **66**: 48–60.
 - 18) Fujita D. Current status and problems of isoyake in Japan. *Bull. Fish. Res. Agen.* 2010; **32**: 33–42.
 - 19) Vergès A, Steinberg PD, Hay ME, Poore AG, Campbell AH, Ballesteros E, Heck KL, Booth DJ, Coleman MA, Feary DA, Figueira W, Langlois T, Marzinelli EM, Mizerek T, Mumby PJ, Nakamura Y, Roughan M, van Sebille E, Gupta AS, Smale DA, Tomas F, Wernberg T, Wilson SK. The tropicalization of temperate marine ecosystems: climate-mediated changes in herbivory and community phase shifts. *Proc. R. Soc. B Sci.* 2014; **281**: 20140846.
 - 20) Kadota T, Noda T, Yoshimura T. Diel feeding patterns in the herbivorous fish *Kyphosus bigibbus* held in aquaria. *Aquacult. Sci.* 2021; **69**: 135–142.
 - 21) 山崎 誠, 清本節夫. 長崎県平戸島産ムラサキウニの生殖周期. 西海区水産研究所研究報告 1993; **71**: 33–40.
 - 22) Yatsuya K, Kiyomoto S, Yoshimura T. Seasonal changes in dietary composition of the herbivorous fish *Kyphosus bigibbus* in southwestern Japan. *Fish. Sci.* 2015; **81**: 1025–1033.
 - 23) Noda M, Ohara H, Urakawa K, Murase N, Yamamoto KI. Diet and prey availability of *Siganus fuscescens* occurring in a *Sargassum* bed at Futaoi Island in the Sea of Hibiki with respect to feeding on large brown macroalgae. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2011; **77**: 1008–1019 (in Japanese with English abstract).
 - 24) 小池裕貴, 新藤達弥, 藤田大介. 初島産ニザダイの食性. 海藻資源 2020; **45**: 28–30.
 - 25) Choat JH, Clements KD. Vertebrate herbivores in marine and terrestrial environments: A nutritional ecology perspective. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1998; **29**: 375–403.
 - 26) 高田順司. 小型海藻のムラサキウニに対する餌料効果. 水産開発 2016; **124**: 4–8.