三重県早田浦におけるガンガゼ除去に伴う海藻植生の変化

石川 達也,^{1,2} 戸瀬 太貴,³ 阿部真比古,⁴ 岩尾 豊紀,⁵
森田 晃央,¹ 前川 行幸,¹ 倉島 彰^{1*}

(2016年11月30日受付, 2017年3月30日受理, 2017年6月27日J-STAGE 早期公開)

¹三重大学大学院生物資源学研究科, ²尾鷲市役所, ³和歌山県立串本古座高等学校,⁴(国研)水産研究・教育機構水産大学校, ⁵鳥羽市水産研究所Changes in algal flora by removing *Diadema* in Haidaura Bay, Mie PrefectureTATSUYA ISHIKAWA,^{1,2} TAIKI TOSE,³ MAHIKO ABE,⁴ TOYOKI IWAO,⁵
TERUWO MORITA,¹ MIYUKI MAEGAWA¹ AND AKIRA KURASHIMA^{1*}¹Graduate School of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514-8507, ²Owase City Office, Owase, Mie 519-3696, ³Wakayama Prefectural Kushimoto Koza Senior High School, Higashimuro, Wakayama 649-3503, ⁴National Fisheries University, Shimonoseki, Yamaguchi 759-6595, ⁵Toba City Fisheries Research Center, Toba, Mie 517-0005, Japan

Changes in algal flora by removing the sea urchin *Diadema* spp. were studied in Haidaura Bay, Mie Prefecture, central Japan in 1999, 2004 and 2014. The algal flora and distribution of seaweed beds and barren ground were surveyed by skin diving at 10 sampling sites. Thirteen species of Chlorophyceae, 30 species of Phaeophyceae and 67 species of Rhodophyceae were observed during the study period. In the mouth of the bay, seaweed beds were stable and the number of algal species did not show remarkable changes from 1999 to 2014. As a result of the recovery of seaweed beds from barren grounds by removing *Diadema* spp., the number of algal species drastically increased in the inner parts of the bay. Consequently, removing *Diadema* spp. increased the number of algal species including various small algae in *Diadema*-dominated barren grounds.

キーワード：磯焼け, ガンガゼ, 三重県, 藻場

藻場は沿岸の一次生産の場であるとともに、有用魚介類を含む多様な生物の生息場でもある。¹⁾しかし現在、藻場は磯焼けにより全国的に減少している。磯焼けの要因は多様で、高水温・貧栄養化などの環境変化、魚類やウニ類などの植食性動物による摂食圧の増加、生活・産業排水の流入、養殖による海域の汚濁や富栄養化などが単独または複合して藻場を衰退させることが報告されており、²⁾特にウニ類による摂食圧は磯焼けの持続要因として強く作用するとされる。¹⁾ウニ類は岩礁生態系において重要な生態学的役割を持ち、ウニ類の摂食圧が増加すると、藻場を衰退させることが世界中で報告されている。³⁻⁵⁾また、ウニ類が優占する磯焼け海域においてはウニ類を除去することで、海藻の被度や現存量が増加し藻場が回復することが知られている。¹⁾日本においても

キタムラサキウニ *Mesocentrotus nudus*⁶⁾ やムラサキウニ *Heliocidaris crassispina*,^{7,8)} ガンガゼ属ウニ類 *Diadema* spp.⁹⁾ などのウニ類を対象として除去による藻場再生が行われてきた。

三重県南部に位置する尾鷲市早田浦ではガンガゼ *D. setosum* や *D. clarki* といったガンガゼ類が優占する磯焼け海域が確認されていた。¹⁰⁾ そのため、尾鷲漁業協同組合早田支所が中心となって地域住民や三重大学ダイビングサークルなどが早田地区再生協議会を組織し、2010年よりガンガゼ類除去による藻場再生事業を開始した。早田浦では継続的なガンガゼ除去を行いガンガゼ類の密度を低く保つことで、海藻被度が増加し藻場を回復することに成功した。¹⁰⁾

ガンガゼ属ウニ類の摂食圧は海藻植生に大きな影響を

与え,¹¹⁻¹³⁾ 海藻の被度や現存量だけでなく、種数も減少させることが実験的に報告されている。^{14,15)} 従って、ガンガゼ属ウニ類が優占する磯焼け海域においては、ウニ類の除去によってその摂食圧が減少すると海藻の種数が増加すると考えられる。しかしながら、ガンガゼ類などのウニ類除去による磯焼け対策では水産的な価値が高い大型の樹冠構成種のホンダワラ類、コンブ類を調査対象とすることがほとんどであるため、⁶⁻⁹⁾ 小型海藻も含めた総出現種数や種組成がどのように変化するかはほとんど知られていない。小型海藻もイセエビの稚エビや葉上動物の生息場所や餌場としての機能を持つことから、^{16,17)} 藻場の回復を評価するためには樹冠構成種だけでなく小型海藻も含めた総出現種を対象とした調査を行うことが望まれる。我々は、早田浦内の10地点において1999年、¹⁸⁾ 2004年および2014年に海藻植生の調査を行ってきた。この間の2010年から2014年にはガンガゼ類除去による磯焼け対策が実施されている。本研究では、早田浦におけるガンガゼ類除去による磯焼け状態からの藻場の回復過程を観察し、その前後にわたる海藻植生の長期変化を明らかにしたので報告する。

材料と方法

研究海域 三重県尾鷲市早田浦（北緯 33°59′，東経 136°15′）は、その湾口部は太平洋に開き、湾奥部に向けて湾曲し狭まった形状を有する湾である（Fig. 1）。早田浦は護岸工事がほとんどなされておらず、自然の海岸線が多く残っている。1999年5月14日に予備調査を行って早田浦全体の植生状況を把握し、調査地点10カ所を定めた。¹⁸⁾ 調査地点は主に湾内の岬状地形の岩礁域に設定し、可能な限り等間隔に配置した。各調査地点における観察範囲は、潮間帯から水深約3mの範囲の約50m×50mとした。湾奥部のSt. 3, 5周辺では1999年時点でマダイ *Pagrus major* などの魚類養殖が行われていたが、2002年に廃業した。また、早田浦においては2010年2月からガンガゼ類除去による藻場再生が行われている。St. 2周辺では2010年2月から2013年11月までに14回の除去を行い、83,166個体のガンガゼ類が除去された。St. 3周辺は2010年2月から2012年12月までの計12回の除去で30,829個体、St. 5周辺では2012年3月から2014年3月までの計6回の除去で9,726個体が除去されている。その結果、St. 2周辺では2010年8月から、St. 3周辺では2011年3月から、St. 5周辺では2012年6月から海藻被度の増加が確認された。¹⁰⁾

海藻植生調査 1999年5月19, 20日，2004年6月16日，2014年5月21, 22日に前述の調査地点で海藻植生調査を行った。各調査地点をボートで周り、潮間帯から水深約3mの範囲に見られる海藻を素潜りで採集

Fig. 1 Maps of the study sites in Haidaura Bay.

した。無節サンゴモ類は採集および海域での種同定が困難であったため、無節サンゴモ類として目視で有無を記録した。採集した海藻は研究室に持ち帰り種を同定し、押し葉標本を作製した。同時に湾全体の磯焼け域と藻場の分布域についても目視観察を行った。藻場は樹冠構成種によって、ヤツタモク *Sargassum patens*, ヨレモクモドキ *S. yamamotoi* などのホンダワラ類によるガラモ場、アントクメ *Ecklonia radicata* などの一年生コンブ目藻場に区分した。海藻の生育状況から判断して大型褐藻や小型海藻が著しく少なく、無節サンゴモ類が優占する海域を磯焼け域とした。

LFD 指数の算出 調査年ごとに海藻相の寒暖指数を表した LFD 指数を求めた。出現した褐藻のコンブ目 Laminariales, ヒバマタ目 Fucales, アミジグサ目 Dictyotales を対象として、LFD 指数の算出方法や海藻の区分けは田中¹⁹⁾に従い、下記の式で求めた。

$$LFD = (W \times 1 + H \times 2) / (C + W + H) \quad (0 \leq LFD \leq 2)$$

C: 寒帯性種数, W: 温帯性種数, H: 熱帯性種数

調査地点のグルーピング 1999年, 2004年, 2014年それぞれの調査地点間の海藻の種組成の類似度を示す Jaccard 指数を算出し、NMDS（非計量多次元尺度法）により調査地点を二次元平面上にプロットし、グルーピングを行った。これらの解析には統計ソフト R Ver. 3.1.0, Package vegan (vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0-10.2013; <http://CARN.R-project.org/package=vegan>) を用いた。

結 果

早田浦における磯焼け域、ガラモ場、および1年生

Fig. 2 Distributions of seaweed beds and barren grounds in Haidaura Bay.

コンブ目群落の分布範囲を Fig. 2 に示す。調査期間を通してサガラメ *Ecklonia arborea* やカジメ *Ecklonia cava* などの多年生コンブ目は確認されなかった。1999 年では湾口部に位置する St. 1, 6-10 周辺ではガラモ場やアントクメによる 1 年生コンブ目群落がみられ、湾奥部の St. 2-5 周辺でガンガゼ類が優占する磯焼け海域が確認された。魚類養殖停止後の 2004 年では 1999 年と比較して藻場や磯焼け域の分布に大きな変化は無く、湾奥部の磯焼けは持続していた。ガンガゼ類除去後の 2014 年の St. 1, 6-10 周辺では 1999 年と 2004 年と同じく藻場が確認された。しかし、湾奥部の St. 2, 3, 5 周辺では

Fig. 3 The number of algal species of Ulvophyceae, Phaeophyceae and Rhodophyceae collected at each station in 1999, 2004 and 2014.

磯焼け海域がガラモ場に変化していた。

各調査年、調査地点ごとの緑藻、褐藻、紅藻の種数を Fig. 3 に示した。どの調査年においても、海藻種数は湾口部に位置する St. 1, 6-10 で多く、湾奥部の St. 2-5 で少ない傾向が見られた。2014 年の St. 3 を除き、いずれの調査地点でも紅藻の種数が最も多かった。St. 1, 6-10 では、St. 8 で 1999 年から 2004 年に紅藻が 19 種増加したことを除き、調査期間を通して種数の変化はあまり見られなかった。1999 年から 2004 年に湾口部の St. 1, 6-10 に出現した 81 種のうち 70.4% の 57 種が両年で共通し、2004 年から 2014 年に出現した 91 種のうち 70.3% の 64 種が両年で共通して認められた。St. 2, 4, 5 の海藻種数は、1999 年はそれぞれ 6 種、9 種、7 種、魚類養殖廃業後の 2004 年は 14 種、10 種、8 種で変化は小さかったが、ガンガゼ類除去後の 2014 年では 36 種、23 種、28 種と大きく増加していた。1999 年と 2004 年では無節サンゴモ類のみが確認された St. 3 においては 2014 年には 27 種に増加していた。湾奥部の St. 2-5 においては、スギノリ目が 1999 年で 8 種、2004 年で 6 種確認されたが、2014 年には 31 種に、アミジグサ目が 1999 年では確認されず、2004 年では 1 種であったが、2014 年には 6 種に増加していた。

Fig. 4 Number of species in 1999, 2004 and 2014.

年ごとに全調査地点で確認された種数を Fig. 4, 種リストを Table 1 に示した。調査期間を通して確認された総種数は 110 種で、緑藻は 5 目 13 種、褐藻は 4 目 30 種、紅藻は 8 目 67 種であった。全ての年で紅藻、褐藻、緑藻の順で種数が多かった。1999 年では緑藻 7 種、褐藻 14 種、紅藻 48 種、2004 年では緑藻 9 種、褐藻 17 種、紅藻 47 種であり、1999 年と 2004 年では総種数及び、緑藻、褐藻、紅藻の割合に大きな変化はみられなかった。St. 2, 3, 5 周辺でガンガゼ類が除去された後の 2014 年では緑藻 12 種、褐藻 29 種、紅藻 59 種と総種数および緑藻、褐藻、紅藻の全てで種数が増加した。全調査年で共通して確認された種数は緑藻 7 種、褐藻 12 種、紅藻 38 種であった。1999 年と 2004 年で共通して確認された種は緑藻 7 種、褐藻 12 種、紅藻 40 種、1999 年と 2014 年では緑藻 7 種、褐藻 14 種、紅藻 42 種、2004 年と 2014 年では緑藻 8 種、褐藻 16 種、紅藻 43 種であった。また、早田浦で主要な藻場であるガラモ場を構成するホンダワラ属の出現種は 1999 年でヒジキ *S. fusiforme*, トゲモク, ヒラネジモク *S. okamurae* の 3 種のみであったが、2004 年で 5 種、2014 年で 14 種であった。2014 年ではキレバモク *S. alternato-pinnatum* やマジリモク *S. carpophyllum* などの亜熱帯性ホンダワラ類が湾奥部で認められた。

LFD 指数の算出に用いたコンブ目、ヒバマタ目、アミジグサ目海藻の各調査年における出現総種数を Table 2 に示す。コンブ目の寒帯性種は研究期間を通して、生育が確認されなかった。温帯性を示すとされるチガイソ科ではヒロメ *Undaria undarioides* が 2014 年に新たに確認された。カジメ科ではアントクメが全調査年を通して見られた。ヒバマタ目ではキレバモクやマジリモクといった熱帯性を示す *Sargassum* 亜属の種と、トゲモクやヨレモクモドキといった温帯性を示す *Sargassum* 亜属以外の種の両者とも、1999 年から 2014 年にかけて種数が増加した。特に *Sargassum* 亜属については 1999 年には早田浦では確認されなかったが、2004 年に 1 種、2014 年に 6 種と増加した。増加した *Sargassum* 亜属は

ヒイラギモク *S. ilicifolium* を除き、湾奥部の St. 2-5 で確認された。アミジグサ *Dictyota dichotoma* やウミウチワ *Padina arborescens* などのアミジグサ目については温帯性種、熱帯性種ともに大きな差はなかった。これらの種から算出した LFD 指数は 1999 年と 2004 年は 1.31 で同じ値であった。しかし、2014 年の LFD 指数は 1.41 と増加し、他年と比較して熱帯性種の増加を示唆する値を示した。

各年の各調査地点間の種組成の Jaccard 指数によるグルーピングを Fig. 5 に示した。無節サンゴモ類以外が確認されなかった 1999 年と 2004 年の St. 3 が含まれる「磯焼けグループ」、無節サンゴモ類以外の海藻が確認されたものの目視調査で磯焼け海域と判断された 1999 年と 2004 年の St. 2, 4, 5 が含まれる「貧植生グループ」、その他が含まれる「藻場グループ」の 3 つに本研究の調査地点はグルーピングされた。St. 2, 4, 5 は 1999 年と 2004 年は貧植生グループに分類されていたが、除去後の 2014 年には藻場グループに含まれていた。同様に 1999 年と 2004 年に磯焼けグループであった St. 3 は 2014 年に藻場グループに含まれた。湾口部の St. 1, 6-10 については全年で藻場グループに含まれ、2014 年の調査地点は全て藻場グループに含まれた。

考 察

磯焼けには発生要因と持続要因がある。¹⁾ 発生要因としては魚類による食害,^{20,21)} 高水温^{22,23)} や水質の汚濁、それらの複合的な作用^{2,24)} などがあり、持続要因としては発生要因が継続的に作用することに加えてウニ類による食害などが挙げられている。^{1,6-10)} 早田浦では、湾奥部の磯焼けの発生要因の 1 つは魚類養殖による水質汚濁とされている。¹⁰⁾ しかし、磯焼け域と判断された調査地点においては、湾内の魚類養殖廃業後の 2004 年にも磯焼けや貧植生の状況が変わらなかったことから、水質汚濁は磯焼けの持続要因ではないと考えられた。これらの調査地点では、ガンガゼ類除去後の 2014 年の調査で藻場の再生が確認されたことから、早田浦の磯焼けの主な持続要因はガンガゼによる摂食圧と考えられる。カリブ海においてガンガゼ属の *D. antillarum* は最も重要な植食動物とされ、²⁵⁾ その摂食圧によって藻類やサンゴの被度がコントロールされている。^{11,26-28)} カナリア諸島においては *D. africanum* が直立海藻の生育を制限し、同諸島沿岸域の広大な磯焼けの主要因と報告されている。²⁹⁻³¹⁾

磯焼けから藻場が再生する要因の 1 つとして、磯焼け海域に高密度に生息していたウニ類の大量死^{11,26)} ・人為的除去⁶⁻⁹⁾ による摂食圧の低下が挙げられる。早田浦の磯焼け海域ではガンガゼ類が高密度に生息していたが、2010 年からの除去によってガンガゼ類の密度が 2 個体/

Table 1 List of seaweeds collected in Haidaura Bay

	1999	2004	2014		1999	2004	2014
Ulvophyceae				<i>Corallina</i> sp.			○
Phaeophilales				<i>Jania</i> sp.			○
<i>Ulva conglobata</i>	○	○	○	<i>Lithophyllum okamurae</i>	○	○	○
<i>Ulva pertusa</i>	○	○	○	Non-articulated coralline algae	○	○	○
<i>Ulva</i> sp.			○	Gelidiales			
<i>Umbraulva japonica</i>		○	○	<i>Gelidiophycus freshwateri</i>		○	○
Cladophorales				<i>Gelidium crinale</i>	○	○	
<i>Microdictyon japonicum</i>			○	<i>Gelidium elegans</i>	○	○	○
<i>Chaetomorpha crassa</i>	○	○	○	<i>Gelidium japonicum</i>			○
<i>Cladophora</i> sp.			○	<i>Pterocladia tenuis</i>	○	○	○
Siphonocladales				Bonnemaisoniales			
<i>Boodlea coacta</i>			○	<i>Asparagopsis taxiformis</i>	○	○	○
<i>Valonica macrophysa</i>			○	<i>Delisea japonica</i>	○	○	○
Caulerpales				Gigartinales			
<i>Caulerpa brachypus</i>	○	○	○	<i>Tylosus lichenoides</i>	○	○	○
<i>Caulerpa chemnitzia</i>	○	○	○	<i>Dudresnaya japonica</i>			○
<i>Caulerpa okamurae</i>	○	○	○	<i>Gloiopeltis furcata</i>	○		○
Codiales				<i>Gloiopeltis tenax</i>			○
<i>Codium cylindricum</i>			○	<i>Chondracanthus intermedius</i>	○	○	○
<i>Codium fragile</i>		○		<i>Chondracanthus tenellus</i>	○	○	○
<i>Codium intricatum</i>	○	○	○	<i>Chondrus ocellatus</i>	○	○	○
<i>Codium</i> sp.			○	<i>Chondrus verrucosus</i>	○	○	○
Phaeophyceae				<i>Grateloupia angusta</i>	○	○	○
Dictyotales				<i>Grateloupia asiatica</i>	○	○	○
<i>Dictyopteris pacifica</i>	○		○	<i>Grateloupia chiangii</i>	○		○
<i>Dictyopteris prolifera</i>	○	○	○	<i>Grateloupia elliptica</i>	○	○	○
<i>Dictyopteris nudulata</i>	○	○	○	<i>Grateloupia lanceolata</i>	○	○	○
<i>Dictyota dichotoma</i>	○	○	○	<i>Grateloupia livida</i>	○		
<i>Dictyota divaricata</i>	○	○	○	<i>Grateloupia sparsa</i>			○
<i>Distromium decumbens</i>			○	<i>Grateloupia</i> sp.			○
<i>Pachydictyon coriaceum</i>		○		<i>Polyopes polyideoides</i>			○
<i>Padina arborescens</i>	○	○	○	<i>Polyopes prolifer</i>	○	○	○
<i>Rugulopteryx okamurae</i>	○	○	○	<i>Prionitis crispata</i>	○	○	○
<i>Spatoglossum crassum</i>	○	○	○	<i>Hypnea japonica</i>	○	○	○
<i>Spatoglossum latum</i>	○	○	○	<i>Hypnea variabilis</i>	○	○	○
<i>Zonaria diesingiana</i>	○	○	○	<i>Hypnea</i> spp.	○	○	○
Scytosiphonales				<i>Callophyllis adhaerens</i>	○	○	○
<i>Colpomenia sinuosa</i>	○	○	○	<i>Callophyllis japonica</i>			○
<i>Hydroclathrus clathratus</i>				<i>Kallymenia perforata</i>		○	○
Laminariales				<i>Ahnfeltiopsis concinna</i>	○		○
<i>Undaria undarioides</i>			○	<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	○	○	○
<i>Ecklonia radicata</i>	○	○		<i>Ahnfeltiopsis okamurae</i>	○	○	○
Fucales				<i>Plocamium telfairiae</i>	○	○	○
<i>Sargassum alternato-pinnatum</i>			○	<i>Portieria hornemannii</i>	○	○	○
<i>Sargassum carpophyllum</i>			○	<i>Portieria japonica</i>	○		
<i>Sargassum fusiforme</i>	○		○	<i>Schizymenia dubyi</i>		○	○
<i>Sargassum hemiphyllum</i>		○		<i>Meristotheca papulosa</i>	○	○	○
<i>Sargassum hornei</i>			○	Gracilariales			
<i>Sargassum ilicifolium</i>		○	○	<i>Gracilaria incurvata</i>	○		○
<i>Sargassum micracanthum</i>	○	○	○	<i>Gracilaria parvispora</i>			○
<i>Sargassum nipponicum</i>				<i>Gracilaria textorii</i>	○	○	○
<i>Sargassum okamurae</i>	○	○	○	Rhodymeniales			
<i>Sargassum patens</i>		○	○	<i>Champia bifida</i>			○
<i>Sargassum piluliferum</i>			○	<i>Champia parvula</i>	○	○	○
<i>Sargassum salicifolioides</i>			○	<i>Lomentaria catenata</i>	○	○	○
<i>Sargassum yamamotoi</i>			○	Ceramiales			
<i>Sargassum yendoi</i>			○	<i>Ceramium paniculatum</i>	○		
Rhodophyceae				<i>Ceramium</i> sp.			○
Nemaliales				<i>Acrosorium venulosum</i>			○
<i>Actinotrichia fragilis</i>			○	<i>Acrosorium</i> sp.			○
<i>Dichotomaria falcata</i>		○		<i>Martensia jejuensis</i>	○	○	○
<i>Tricleocarpa jejuensis</i>	○	○	○	<i>Chondria crassicaulis</i>	○	○	○
<i>Scinaia japonica</i>	○	○	○	<i>Chondrophycus undulatus</i>	○	○	○
Corallinales				<i>Laurencia brongniartii</i>		○	○
<i>Amphiroa anceps</i>	○	○	○	<i>Laurencia okamurae</i>	○	○	○
<i>Amphiroa zonata</i>	○	○	○	<i>Laurencia pinnata</i>			○
<i>Amphiroa misakiensis</i>		○		<i>Laurencia</i> spp.	○	○	○
<i>Corallina aberrans</i>	○	○	○	<i>Neosiphonia savatieri</i>			○
<i>Corallina crassissima</i>	○	○	○	<i>Palisada intermedia</i>	○	○	○
<i>Corallina officinalis</i>	○	○		<i>Polysiphonia fragilis</i>	○		
<i>Corallina pilulifera</i>		○	○				
				Number of species	69	73	100

Table 2 Number of species classified according to distribution of taxonomical groups in cold, warm and hot sea waters of Laminariales, Fucales and Dictyotales in each year

	Laminariales	1999	2004	2014	Fucales	1999	2004	2014	Dictyotales	1999	2004	2014
Cold												
Warm	Alariaceae				Fucaceae				Dictyotaceae			
	<i>Undaria</i>	0	0	1	<i>Sargassum</i> (except subgenus <i>Sargassum</i>)	3	4	8	<i>Dictyopteris</i>	3	2	3
	Lessoniaceae								<i>Pachydictyon</i>	0	1	0
	<i>Ecklonia</i>	1	1	1					<i>Rugulopteryx</i>	1	1	1
									<i>Spatoglossum</i>	1	2	2
Hot												
					Fucaceae				Dictyotaceae			
					<i>Sargassum</i> (subgenus <i>Sargassum</i>)	0	1	6	Other than above	4	4	5

Fig. 5 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination, using Jaccard index of species compositions of seaweeds at each study site in 1999, 2004 and 2014.

ラモ場の回復が本研究の調査でも確認された。

湾奥部の St. 2-5 では、1999 年と 2004 年の種数は少なく、磯焼けもしくは貧植生グループとされたが、2014 年には藻場グループになった。これは、1999 年以前に湾奥部で発生し 2004 年まで持続していた早田浦の磯焼け海域が、ガンガゼ類の密度低下に伴う摂食圧の減少によって藻場に変化したことを示している。湾口部の St. 1, 6-10 については 1999 年、2004 年、2014 年で出現種数や種組成の変化が小さく、Jaccard 指数によるグルーピングでも藻場グループとされた。これらの地点では、磯焼けは見られず藻場が維持されている。その理由としては、養殖場から離れているため水質汚濁の影響を受けにくかったこと、¹⁰⁾ 湾口部に位置し、外海からの波浪の影響でガンガゼ類の摂食圧が低く抑えられたこと²⁹⁾ が挙げられる。これらのことから、ガンガゼ類除去は除去が行われた湾奥部の海藻種数を大きく増加させたが、除去前から藻場であった湾口部の種数には大きな影響を与えなかったと考えられた。

Hernández *et al.*³⁰⁾ は *D. africanum* の個体密度が 2 個体/m² より高くなれば直立海藻が劇的に減少し、6.5 個体/m² 以上で直立海藻が生育できないことを報告している。Ishikawa *et al.*¹⁵⁾ はガンガゼ個体密度を段階的に操作したケージ実験において、2 個体/m² より密度が高くなると海藻種数が激減することを明らかにした。この実験では、4 個体/m² の実験区では種数が少ないながらも直立海藻が確認されたが、8 個体/m² の実験区では直立海藻は生育しなかった。St. 3 周辺の除去区ではガンガゼ除去前の 2010 年 12 月でガンガゼ類個体密度が 8.8 個体/m²、St. 2 付近の除去区では 4.0 個体/m² であった。¹⁰⁾ 本研究ではガンガゼ類の密度は調査されていないが、1999 年と 2004 年の St. 3 で無節サンゴモ類のみが確認されたのは、他の調査地点と比較してガンガゼ類の密度が高かったためであると考えられる。このように、ガンガゼ類の摂食圧が持続要因となった磯焼け海域においては、ガンガゼ類の個体密度によって認められる海藻

m² 以下になると海藻の被度が増加し、¹⁰⁾ ガンガゼ類除去が行われた St. 2, 3, 5 周辺においては 2014 年ではガ

の多様性が異なると推察される。

高密度に生息するガンガゼの摂食圧が海藻の種数を減少させることは実験的に報告されており^{14,15)} ガンガゼ類を除去することで海藻の被度だけでなく種数も増加すると考えられる。実際に、早田浦におけるガンガゼ類除去では、除去区内で海藻の種数の増加が認められた。¹⁰⁾ 本研究においても、ガンガゼ類除去が行われた St. 2, 3, 5 においては、1999 年、2004 年と比較して、除去後の 2014 年では藻場構成する大型褐藻や小型海藻の種数が大きく増加しており、これらの研究とも一致する。

ガンガゼ類除去後の 2014 年では 1999 年、2004 年と比較して緑藻、褐藻、紅藻の全てで種数が増加した。その中でも褐藻のホンダワラ属藻類が 1999 年で 3 種、2004 年で 5 種、2014 年で 14 種と大きく増加した。2014 年には、温帯性のヨレモクモドキ、マメタワラ *S. piluliferum*、アカモク *S. horneri*、エンドウモク *S. yendoi* に加えて、キレバモクやマジリモク、フクレミモク *S. salicifolioides* などの亜熱帯性ホンダワラ類が確認された。八谷ら³²⁾ は亜熱帯性ホンダワラ類が温帯性種と比較して付着器からの再生能力が高く、摂食圧が高い環境下での生残に適する可能性を示唆している。ガンガゼ類の除去が開始されてすぐの磯焼け海域では、ガンガゼ類が優占し摂食圧が高い環境であると考えられる。そのような環境下では、食害に比較的強い亜熱帯性ホンダワラ類の種数が増加しやすいと推察される。一方で、早田浦では温帯性、亜熱帯性に関わらずホンダワラ類が、それまでみられなかった湾奥部で確認された。ガンガゼ類の除去により摂食圧が低下し、ホンダワラ類が生育できる環境が確保されたことが、ホンダワラ類の種数の増加に大きく寄与したと考えられる。

亜熱帯性ホンダワラ類が出現したことで種数だけでなく、LFD 指数も 1999 年と 2004 年の 1.31 から 2014 年で 1.41 へ増加した。Haraguchi and Sekida³³⁾ は高知県沿岸において、水温の上昇が温帯性ホンダワラ類の減少と亜熱帯性ホンダワラ類の増加に寄与したことを報告し、水温上昇による磯焼けは亜熱帯性種の移入を容易にすることを示唆している。早田浦においては 1999 年から 2014 年にかけての連続的な水温の記録がないため、亜熱帯性ホンダワラ類の増加に水温の上昇がどれほど寄与したかは不明であるが、LFD 指数によると早田浦の海藻相は暖海的にシフトしたと考えられる。

本研究では、5 年および 15 年の間隔をあけて同一地点の海藻植生を調査することで、磯焼け海域からガンガゼ類除去によって藻場が回復した海域の海藻植生の変化を明らかにした。ガンガゼ類の摂食圧が主な持続要因の磯焼け海域において、ガンガゼ類除去を行うことで藻場構成種のホンダワラ類だけでなく多様な小型海藻が増加することが本研究の結果から示された。

謝 辞

本研究を実施するにあたって、調査にご協力いただいた尾鷲市役所（当時）の栗藤和治氏、尾鷲市役所の竹内大介氏ならびに尾鷲漁業協同組合早田支所の皆様に深謝いたします。

文 献

- 1) 改訂磯焼け対策ガイドライン、水産庁、東京、2015。
- 2) 藤田大介 2002. 磯焼け。「21 世紀初頭の藻学の現況」（堀 輝三、大野正夫、堀口健雄編）日本藻類学会、山形。pp. 102-105。
- 3) 藤田大介、町口裕二、桑原久美。「磯焼けを起こすウニ—生態・利用から藻場回復まで—」成山堂書店、東京、2008。
- 4) Filbee-Dexter K, Scheibling RE. Sea urchin barrens as alternative stable states of collapsed kelp ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2014; **495**: 1-25.
- 5) Ling SD, Scheibling RE, Rassweiler A, Jhonson CR, Shears N, Connell SD, Salomon AK, Norderhaug KM, Pérez-Matus A, Hernández JC, Clemente S, Blamey LK, Hereu B, Ballesteros E, Sala E, Garrabou J, Cebrian E, Zabala M, Fujita D, Jhonson LE. Global regime shift of catastrophic sea urchin overgrazing. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2015; **370**: 20130269.
- 6) Agatsuma Y, Matsuyama K, Nakata A, Kawai T, Nishikawa N. Marine algal succession on coralline flats after removal of sea urchin in Suttu Bay on the Japan sea coast of Hokkaido, Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1997; doi:10.2331/suisan.63.672 (in Japanese with English abstract).
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 秋本恒基、清本節夫、鈴木健吾、前野幸男、後川龍男。2008 宗像市大島におけるガンガゼ類の分布と駆除。福岡県水産海洋技術センター研究報告 2008; **18**: 77-83。
- 10) Kurashima A, Ishikawa T, Takeuchi D, Iwao T, Maegawa M. Effects of removing *Diadema* on barren ground in Haidaura Bay, Mie Prefecture. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2014; doi:10.2331/suisan.80.561 (in Japanese with English abstract).
- 11) Lessios HA. Mass mortality of *Diadema antillarum* in the Caribbean: What have we learned? *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1988; **19**: 371-393.
- 12) Tuya F, Sanchez-Jerez P, Haroun RJ. Influence of fishing and functional group of algal on sea urchin control of algal communities in the eastern Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2005; **287**: 255-260.
- 13) Muthiga NA, McClanahan TR. *Diadema*. In: Lawrence JM (eds). *Sea urchins: Biology and Ecology*. Elsevier, Amsterdam. 2013; 257-274.
- 14) 道津光生、太田雅隆、益原寛文。長崎県松島周辺の高潮植生に及ぼすガンガゼ類の食圧の影響について。海洋生物環境研究所研究報告 2002; **4**: 1-10。
- 15) Ishikawa T, Maegawa M, Kurashima A. Effect of sea urchin (*Diadema setosum*) density on algal composition and biomass in cage experiments. *Plankton and Benthos Research* 2016; **11**: 112-119.
- 16) 山本智子、濱口昌巳、吉川浩二、寺脇利信。植生の異なる

- る実験藻場における生物群集の決定要因. 水産工学 1999; **36**: 1-10.
- 17) 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.
- 18) 倉島 彰, 森田晃央, 栗藤和治, 前川行幸. 三重県早田浦の海藻植生. 三重大学生物資源紀要 2001; **27**: 41-49.
- 19) 田中次郎. 褐藻 (コンブ目, ヒバマタ目, アミシグサ目) の分布にもとづく海藻相解析. 藻類 1997; **45**: 5-13.
- 20) 増田博幸, 角田利晴, 林 義次, 西尾四良, 水井 悠, 堀内俊助, 中山恭彦. 藻食性魚類アイゴの食害による造成藻場の衰退. 水産工学 2000; **37**: 135-142.
- 21) 桐山隆哉, 藤井明彦, 吉村 拓, 清本節夫, 四井敏雄. 長崎県下で1998年秋に発生したアラメ類の葉状部欠損現象. 水産増殖 1999; **47**: 319-323.
- 22) 川尻正博, 佐々木 正, 景山佳之. 下田市田牛地先における磯焼け現象とアワビ資源の変動. 静岡県水産試験場研究報告 1981; **15**: 19-30.
- 23) Serisawa Y, Imoto Z, Ishikawa T, Ohno M. Decline of the *Ecklonia cava* population associated with increased seawater temperatures in Tosa Bay, southern Japan. *Fish. Sci.* 2004; **70**: 189-191.
- 24) 八谷光介, 桐山隆哉, 清本節夫, 種子田雄, 吉村 拓. 2013年に発生した長崎県壱岐市郷ノ浦地先におけるアラメ・カジメ場の衰退過程について—夏季の高水温による発生と秋季の食害による拡大—. *Algal Resources* 2014; **7**: 79-94.
- 25) Lessios HA, Garrido MJ, Kessing BD. Demographic history of *Diadema antillarum*, a keystone herbivore on Caribbean reefs. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2001; **268**: 2347-2353.
- 26) Levitan DR. Algal-urchin biomass responses following mass mortality of *Diadema antillarum* Philippi at Saint John, U.S. Virgin Islands. *J. Exp. Biol. Ecol.* 1988; **199**: 167-178.
- 27) Carpenter RC. Long-term effects on sea urchin population-dynamics and coral reef algal communities. *Mar. Biol.* 1990; **104**: 67-77.
- 28) Idjadi JA, Haring RN, Precht WF. Recovery of the sea urchin *Diadema antillarum* promotes scleractinian coral growth and survivorship on shallow Jamaican reefs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2010; **403**: 91-100.
- 29) Tuya F, Boyra A, Sanchez-Jerez P, Barbera C, Haroun R. Can one species determine the structure of the benthic community on a temperate rocky reef? The case of the long-spined sea-urchin *Diadema antillarum* (Echinodermata: Echinoidea) in the eastern Atlantic. *Hydrobiologia* 2004; **519**: 211-214.
- 30) Hernández JC, Clemente S, Sangil C, Brito A. The key role of the sea urchin *Diadema* aff. *antillarum* in controlling macroalgae assemblages throughout the Canary Islands (eastern subtropical Atlantic): An spatio-temporal approach. *Mar. Environ. Res.* 2008; **66**: 259-270.
- 31) Sangil C, Clemente S, Martín-García L, Hernández JC. No-take areas as an effective tool to restore urchin barrens on subtropical rocky reefs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2012; **81**: 207-215.
- 32) 八谷光介, 清本節夫, 吉田吾郎, 吉村 拓. 九州西岸に生息するホンダワラ属13種の付着器からの再生能力. 藻類 2012; **60**: 41-45.
- 33) Haraguchi H, Sekida S. Recent changes in the distribution of *Sargassum* species in Kochi, Japan. *Kuroshio Science* 2008; **2**: 41-46.