

# 捕食者を利用した藻場回復の手引き

水産庁

## 目次

1. 本手引きの趣旨.....	1
2. 捕食者とその役割.....	2
コラム 1 生態ピラミッドと「緑の世界仮説」.....	3
コラム 2 捕食者が植食動物に秩序と恩恵をもたらす.....	4
3. 捕食者による藻場の回復・保全事例.....	5
3. 1 海外の事例.....	5
3. 2 国内事例.....	5
コラム 3 海洋保護区.....	7
4. 捕食者を利用した藻場回復手法の基本的考え方.....	8
コラム 4 捕食者の存在自体が植食動物の行動を制御する.....	9
コラム 5 魚類が藻場を維持する.....	10
5. 捕食者を利用した藻場回復のための考慮すべき条件.....	11
5. 1 保護対象とする捕食者.....	11
コラム 6 投石礁にイセエビが棲み着けば、ウニがいなくなり、海藻が生える.....	13
コラム 7 水産有用種の貝類はイセエビの捕食により減少しないのか.....	14
5. 2 捕食者の体サイズ.....	15
コラム 8 イセエビはガンガゼの捕食者になり得るか.....	17
コラム 9 大型ウニを捕食できる捕食者がいなければ、ウニの増加を防止できない.....	17
コラム 10 キタムラサキウニとその捕食者.....	18
5. 3 捕食者の生息密度と個体群規模.....	19
コラム 11 投石礁はイセエビの好適な隠れ場.....	20
コラム 12 捕食者の隠れ場からの距離に伴うウニと海藻の変化.....	21
6. 捕食状況の把握.....	22
6. 1 植食動物の体サイズ分布による捕食圧の推定.....	22
6. 2 捕食圧の調査.....	24
6. 3 捕食者の特定.....	25
6. 4 捕食者の体サイズ組成の調査.....	27
6. 5 捕食の影響範囲の調査.....	28
7. 対策の手順.....	29
コラム 13 水槽を用いた捕食実験.....	32
コラム 14 ケージや囲い網を用いた小規模現地実験.....	33
8. 今後の展望.....	34
参考文献.....	36

## 1. 本手引きの趣旨

ウニが大量発生し、その過剰な植食圧が藻場の減少要因として挙げられている。ウニの大量発生の原因について、海外ではウニの捕食者の乱獲が磯焼けの原因となっていることはよく知られ、全面禁漁区の設定が藻場のある豊かな生態系の回復に有力な手段として推進されている。この背景には、海外では大規模な全面禁漁区が設定され、一般漁場と禁漁区との比較研究が進んだことがある。

これに対して、我が国ではウニなどの植食動物が増えた原因や捕食者の影響については、ほとんど検討されることなく、植食動物の人為的な除去などの対症療法的対策がとられてきた。また我が国の沿岸域は地元漁村の排他的漁場として地先ごとに分割管理されてきたため、海外でみられたような急激な乱獲に陥らなかった反面、大規模な禁漁区は設定されず、捕食者の影響を科学的に検討することも難しく、研究もほとんど行われてこなかった。しかし我が国沿岸にも、規模は小さいが、漁業協同組合が管理する保護区が多数存在する。また最近の研究により、その中の一つである高知県 A 地区のイセエビ保護区において、周辺域がウニの優占する磯焼け状態になっているにもかかわらず、イセエビによるウニの捕食により大規模な藻場が維持されていることが明らかになっている。国内では、捕食の間接効果により大規模な藻場が維持されている事例はそれ以外にはまだ見出されていないが、水産基盤整備調査委託事業「藻場回復・保全技術の高度化検討調査」での検討の結果、他の海域でもイセエビが生息する場では程度の差はあるが、同様のウニの減少がみられ、その普遍性が確認された。また、イセエビ以外にもウニの捕食者は存在するが、磯焼け域では非常に少なくなっていることも推察された。

磯焼け対策として実施されている植食動物の除去は、対策を続けなければ、藻場が回復してもやがては元の磯焼け状態に戻ってしまう対症療法である。これに対して、捕食者を利用した藻場回復手法は、植食動物を増加させる原因そのものを制御する原因療法であり、持続的な効果が期待できる。その推進のためには、まず捕食者が水産資源として重要なだけでなく、藻場生態系の維持に重要な役割を果たしていることも理解し、その機能を発揮できるようにする必要がある。そのことにより、本来、捕食者が担っていた植食動物の調整役を人が肩代わりしなければならない状態の軽減、解消が期待できる。

しかし、捕食者による藻場への影響は、ウニや植食魚による食害のように直接観察できないため、わかりにくく、海外でもすぐに認められたわけではない。また、禁漁区の設定により必ずしも藻場を回復できるわけでもなく、回復に必要な条件も明らかにする必要がある。大規模な禁漁区がほとんどない我が国において捕食者を利用した磯焼け対策を推進するためには、海外での歴史的経緯や先行事例の理解は欠かせない。また、我が国では沿岸資源や漁場の管理方法が海外と異なり、海外と同じように大規模な禁漁区を設定することは現状では困難である。当面は地先の漁業協同組合による自主的な漁獲規制と漁場管理により、捕食者の役割を活かした藻場の回復・保全を検討する必要がある。しかし、将来にわたり漁業者人口が減少する中で、監視の目も届かないような漁場の増加が確実視されており、少ない人数で広い漁場を管理する手法への転換の必要性が今後益々高まることが予想される。そのような中で、当手法を広域的に適用することも、将来的には有力な選択肢の一つになる可能性が高い。

本手引きでは、国内外の事例を織り交ぜながら、捕食者の役割に注目した磯焼け対策の考え方と現行制度の下、地先レベルで適用可能な方法を中心に述べるが、最後に将来予想からより広域的に取り組むべき方向性にも言及する。

## 2. 捕食者とその役割

本手引きでは、植食動物を捕食する動物を捕食者という。

捕食者は、生物群集の中で個体数は少ないが、食物連鎖を通じて藻場の消長に大きく影響する可能性がある。その捕食者の個体群に最も大きな影響を与えているのが人による採捕である。豊かな藻場生態系を回復、保全するためには、藻場生態系における捕食者の役割に対する理解を深める必要がある。

【解説】

### 1) これまでの藻場と捕食者との関係

生態系は様々な生物で構成され、複雑で入り組んだ食う・食われるの関係（食物網）があるが、それらを食物段階から概観すると、ピラミッド状の構造をなしている。たとえば、海洋では、植物プランクトンや海藻などの植物が光合成によりエネルギーを作り出す生産者として生態系の土台をなし、その消費者である動物プランクトンやウニ・アワビなどの植食動物が植物に支えられている。さらに植食動物を食べる小魚や甲殻類などの肉食動物（捕食者）が植食動物によって支えられ、さらにそれらの肉食動物を食べる大型の肉食動物が支えられている。動物が生物を捕らえ、消化し、体の組織を作る過程で多くのエネルギーが失われる。このため、植物を食べる植食動物、植食動物を食べる肉食動物といった食物連鎖で栄養段階が一段階上がるごとに個体数が少なくなり、その最上位には数が最も少なく、他のどの生物からも捕食されない頂点捕食者が君臨するピラミッド状になる（図1）。このような概念的な生態的構造を生態ピラミッドという。

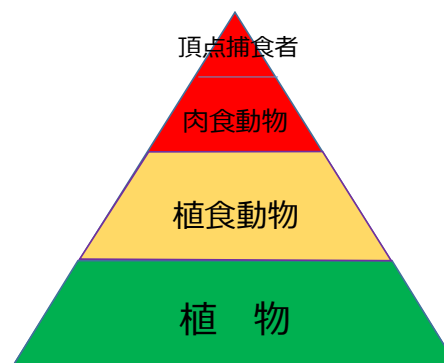


図1 生態ピラミッド

この生態ピラミッドによれば、栄養段階の高次のもはより低次のものに制限され、最終的には植物の量で規定されるため、植物よりも上位に位置する捕食者は生産力に関係しないことになる。これまでの我が国の磯焼け対策は、生態ピラミッドと同様の考えに基づき、藻場は魚介類の存在に依らない生産の基盤であるとし、磯焼けの原因や対策で捕食者が検討対象になることはなかった。

### 2) 藻場における捕食者の役割

以上の考え方とは異なり、現在の海外では、一般漁場と海洋保護区との比較研究が進み、捕食者の乱獲により磯焼けが発生することが広く認識されている（コラム1）。図2は、それを説明するための模式図である。植食動物としては、様々な生物種が想定されるが、これまでのところ、海外でもウニ以外の植食動物を対象にした研究は少ない。一般漁場では、ウニの捕食者が乱獲され、その結果、ウニが捕食から解放されて大量発生し、その過剰摂食により藻場が消失している。これとは対照的に、全面禁漁区では、捕食者個体群が回復し、捕食によりウニが減少し、藻場が回復することが明らかにされている。このように、捕食者の影響が栄養段階を次々に伝わる現象を栄養カスケードという。栄養カスケードは、少ない捕食者が生態系を大きく変えることから、生態系の管理では非常に重要なメ

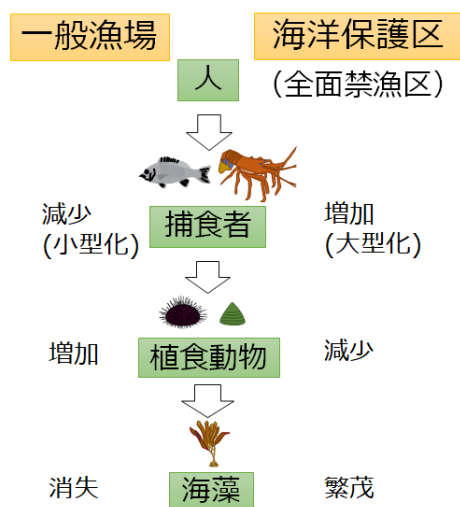


図2 一般漁場と海洋保護区での栄養カスケード

カニズムになっている（コラム2）。

以上のように、捕食者の乱獲は捕食者の資源そのものを減少させるだけでなく、植食動物の捕食を減少させることを通じて間接的に磯焼けを発生させる要因になっている。現在、地球温暖化も磯焼けの大きな要因の一つとして注目されている。地球温暖化も乱獲も人類が作り出している問題であるが、前者は地球規模での対策が不可欠であるのに対して、後者は地域規模での対策が可能であり、地域社会での取り組みが期待されている。

### コラム1 生態ピラミッドと「緑の世界仮説」

生態ピラミッドは、1927年、チャールズ・エルトン(Elton 1927)によって示された古典的な見方であるが、1960年にヘアストンら(Hairston et al. 1960)により、後に「緑の世界」仮説と呼ばれる新たな見方が発表されるまでは、地球上のすべての生物に通じる原則として信じられてきた。その仮説とは、植食動物は植物を絶滅するまで増殖する能力をもつが、そうならず世界が植物で覆われているのは、捕食者が植食動物を制御しているからというものである。この「緑の世界」仮説が提唱された背景には、世界中で大型捕食動物が虐殺や乱獲により絶滅または激減し、植食動物が大量発生したという数多くの歴史的実事がある。

「緑の世界」仮説は多くの議論を呼んだが、その科学的検証は難しく、偶然を待つ必要があった。その最初の検証例が1974年、アリューシャン列島で偶然にも生き残ったラッコの生息する島でエステスとパルミサーノ(Estes and Palmisano 1974)によって見出された。ラッコはイタチ科の動物で、その良質の毛皮を目的とした乱獲により、1900年代初頭には絶滅寸前まで減少した。ラッコがいなくなったアリューシャン列島の島々では海底一面が高密度のウニとサンゴモに覆われた不毛の場になっていたが、ラッコが偶然にも生き延び、群れが回復していた島(アムチカ)では小型のウニがまばらにしか生息せず、多くの魚類が集まるケルプ(コンブ目の大型褐藻)の森になっていた。その差は歴然とし、またラッコがウニを食べ、ウニがケルプを食べるのがよく観察されたため、その原因も明らかであった。ラッコの棲むケルプの森は「緑の世界」仮説の疑う余地のない検証例となった。

このように、捕食者の影響が2段階以上の栄養段階を伝わっていく現象は、今日一般に栄養カスケード(カスケード cascade とは連続した小さな滝をいう)と呼ばれる。栄養カスケードは少ない捕食者が生物群集を大きく変えることから非常に注目されている。しかし、ラッコ-ウニ-ケルプの栄養カスケードのように、捕食者の役割を明確にできる実例が自然の海で見出されるのはまれである。たとえば北米でのロブスター-ウニ-ケルプの栄養カスケード仮説のように、ロブスターの乱獲がウニの大量発生を招き、磯焼けの原因になっていることを多くの事実を挙げて推論しても、実験区を設けて直接証明していないことから、批判も受け、結論は得られなかった。

ウニの磯焼けがウニの捕食者の乱獲によるとする仮説が広く受け入れられるようになったのは、1970年代頃から諸外国で増えてきた全面禁漁区での研究の成果(例えば、Babcock et al. 1999)に負うところが大きい。全面禁漁区が科学的検証に必要な大規模野外操作実験の実験区となり、特に1990年代以降、多くの研究が行われるようになり、藻場における捕食者の役割の重要性が明らかにされてきた。

## コラム 2 捕食者が植食動物に秩序と恩恵をもたらす

捕食者はその被食者となる植食動物には負の効果しかもたらさないと考えられるかもしれない。しかし、必ずしもそうではなく、むしろ捕食者が栄養カスケード効果を通じて植食動物に恩恵をもたらす。その事例として、以下に述べるオオカミの再導入により森を復活させた米国イエローストーン国立公園の例 (Stolzenburg 2008) はよく知られている。

米国では、オオカミはかつてシカなどの草食動物を食べる害獣として駆除され、イエローストーン国立公園では 1926 年に絶滅した。オオカミが絶滅してまもなく、ワピチと呼ばれる大型のシカが大量発生して、植物を食い荒し始めた。次世代の森となる若芽や若木は絶え間なく食べられ、ポプラやヤナギなどの木々が次々と枯死し、最後にはワピチが食べない植物ばかりが残る状態になった。これは、数の増えたワピチにとっても飢餓状態の不幸であり、磯焼け域に高密度に生息するウニにも相通じるものがある。しかし、森の衰退が明らかになっても、その原因をワピチによる食害ではなく、気候変動や多発する山火事などの別の要因に求める研究者も多く、頂点捕食者の役割がすぐに見直されることはなかった。オオカミの保護と復活が図れたのは、かなりの年数を経た、絶滅危惧種法が成立した 1973 年から 20 年以上も後のことである。

1995 年、多くの議論の末、カナディアン・ロッキーで捕獲されたオオカミ 14 頭がイエローストーン国立公園に放たれた。オオカミは数を増し、公園内に広がって 10 年後に 300 頭を超え、徐々に立木が回復していった。しかし、オオカミが戻ってきたからといって、ワピチが捕食により激減したわけではない。草原ではワピチの方がオオカミより速く走れるため、オオカミがワピチに襲いかかってもたいていは失敗し、たまに蹴飛ばされて死ぬことさえある。ところが、急傾斜地や谷間などは、ワピチがとっさに逃げにくく、捕食される可能性が高い。そのため、オオカミが潜んでいるかもしれない低木の茂みや急な斜面などでは、ワピチは恐怖により若芽や若木を自由に食べられなくなり、そこを起点に木々が復活していった。

捕食者の不在の環境下では、植食動物はあらゆる植物を際限なく食い尽くしてしまう。その結果、飢餓状態になり、数を減らす。しかし、植食動物は好まない植物まで食べながら飢えを凌いで、絶滅することはない。これに対して、捕食者の存在下では、植食動物の行動が制限され、植物の豊富な状態が維持される。捕食を免れて生き残った植食動物は豊富な餌により大きく成長できる。かつて我が国の多くの磯根漁場では、今よりもはるかに多くの大型のアワビやウニが生息していたが、大型海藻が繁茂していたと言われている。なぜそのような状態が可能であったのかについては、情報が残されていないため、推察する以外にないが、後出の事例 (コラム 7) が示すように、可能性の高い説明として捕食者も同時に多く生息し、上述と同じ状態が維持されていたことが考えられる。また、捕食の影響で留意すべき点は、捕食者が植食動物を捕食するのは容易でなく、その試みの多くは失敗するが、植食動物に大きな影響を及ぼすことである。短期間の実験では肉食動物が植食動物を食べないことはよくある。しかし、そのことを根拠に、実際の海でも捕食の影響がないと結論づけるのは早計である。捕食は長期にわたり生態系全体を変える要因としてとらえる必要がある。

### 3. 捕食者による藻場の回復・保全事例

#### 3. 1 海外の事例

漁獲圧が高く、資源評価でかなりの不確実性がある場合、最も確実性の高い生態系回復の手段として全面禁漁区の設定が推奨され、近年、その数が世界的に急増している。これには、海洋保護区（コラム 3）を設定して商業的漁業を禁止しても、遊漁を禁止しないなどの部分的な規制では明らかな効果が得られない例が多いことが背景にある。しかし、全面禁漁区での効果に関しては、生物相の変化が長期間にわたることが多く、それらを周辺域と比較して調査した研究例は少ない。その中で、ウコの磯焼け域で設定された全面禁漁区において、捕食者－ウコ－海藻の栄養カスケード効果により藻場回復・保全されている海外の代表的な例として表 1 に示す保護区が挙げられる。いずれの保護区も規模が非常に大きく、1 km<sup>2</sup>（100 ha）をはるかに超えている。

表 1 捕食者－ウコ－海藻の栄養カスケード効果が明らかにされた海洋保護区（全面禁漁区）の例

保護区名	場所	設立年	面積	効果の概要
ケープ・ロドニー オカカリ・ポイント 海洋保護区 Cape Rodney to Okakari Point Marine Reserve	ニュージーラ ンド	1975	549.16 ha	保護区でフエダイ類 <i>Pagrus auratus</i> とミナミイセエビ <i>Jasus edwardsii</i> が増加、大型化し、ウニ <i>Evechinus chloroticus</i> が減少し、ケルプ場が増加し、不毛な場が減少した(Babcock et al. 1999)。
タウハラヌイ海洋 公園 Tawharanui Marine Park	ニュージーラ ンド	1982	350 ha	
マリア島海洋保 護区 Maria Island Marine Reserve	オーストラリ ア タスマニ ア島	1992	1,500 ha	保護区でミナミイセエビ <i>Jasus edwardsii</i> とベラ類 <i>Notolabrus tetricus</i> が増加し、ウニ <i>Centrostephanus rodgersii</i> が減少し、海藻被度が増加した(Edgar and Barrett 1999; Ling et al. 2009)。
トレ・グアチエト海 洋保護区 Torre Guaceto Marine Reserve	イタリア	1992	2,220 ha	保護区でウニ( <i>Paracentrotus lividus</i> と <i>Arbacia lixula</i> ) の主要な捕食者であるタイ類 ( <i>Diplodus sargus</i> と <i>D. vulgaris</i> ) が増加、大型化し、ウニが減少し、不毛な場が減少し、海藻被度が増加した(Guidetti 2006)。
ラ・パルマ海洋保 護区 La Palma MPA	カナリア諸島	2001	3,719 ha	保護区でウコの捕食魚( <i>Balistes caprisicus</i> , <i>Canthidermis sufflamen</i> , <i>Chilomycterus reticulatus</i> , <i>Bodianus scrofa</i> )が増加し、ウニ <i>Diadema</i> aff. <i>antillarum</i> が減少し、多年生海藻 <i>Lobophra variegata</i> の藻場が拡大した(Sangil et al. 2012)。

#### 3. 2 国内事例

磯焼け域に捕食の効果により藻場の大規模な維持が確認されている国内事例としては、これまでのところ高知県 A 地区のイセエビ保護区が知られている。当地区は南から高温の海水を運ぶ黒潮の影響を強く受ける太

平洋岸に位置する。近年、当海域では水温上昇が顕著で、温帯種のホンダワラ類やアラメ・カジメ類の藻場はすでに消失し(平岡ら 2012; Tanaka et al. 2012)、波浪の影響の強い極浅所に熱帯種のホンダワラ類が生残する以外は、岩礁は概ねウコの優占する磯焼け状態になっている。A 地区保護区は、そのような海域に位置する面積約 0.3 km<sup>2</sup> の小湾で、領域内では岩礁の大部分に毎年大型海藻が繁茂する特異な場となっている (図 3)。

A 地区保護区は、イセエビの資源保護のため、昭和 7 年頃から地元漁業協同組合が小湾全体を定めたもので、区内を分割した 6 区域の各々で年 1 回ずつ行われる共同操業以外には禁漁とされている。また、保護区内では投石礁 (総面積約 1.4 ha) の整備や、漁獲制限サイズの自主規制により高知県の規定 (体重 100 g) よりも大きい体重 180 g 以下の小型エビの保護区への再放流により、イセエビの生息数の増加と大型化が図られている。その結果、ウコに対するイセエビの高い捕食圧により、ウコが非常に少ない領域が維持され、藻場の持続的な形成につながっている (Kawamata and Taino in press)。

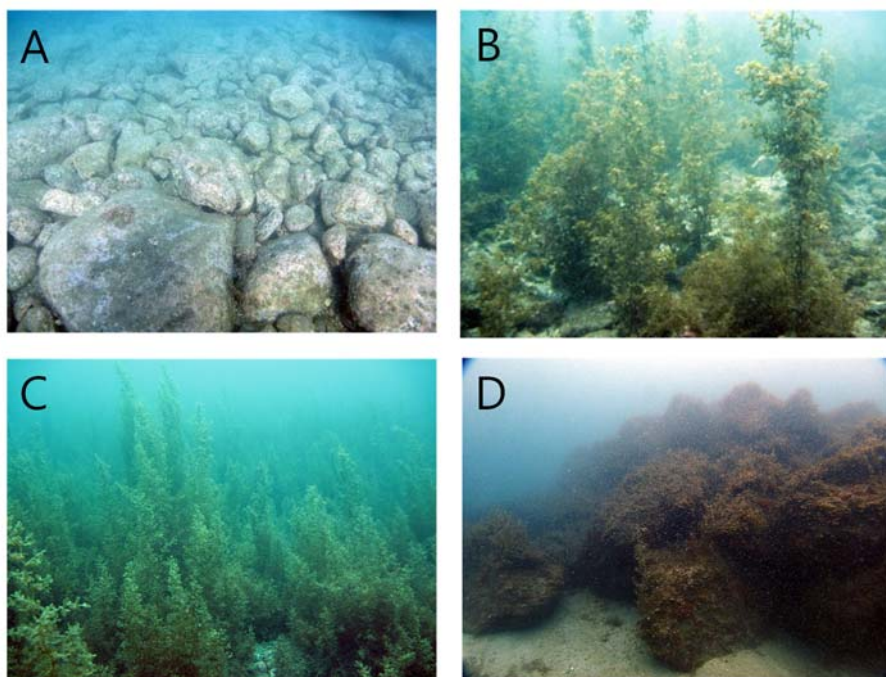


図 3 A 地区保護区周辺の典型的な岩礁 (A) と保護区内に広がる藻場 (B、C) とイセエビの隠れ場となっている投石礁 (D) の例。川俣 茂撮影。保護区外の巨礫・大礫場 (A) にはウコが岩の下に隠れて高密度に生息しているが、保護区内の投石礁 (D) にはウコはほとんど生息していない。

### コラム 3 海洋保護区

海洋保護区 Marine Protected Area (MPA) に定まった定義はないが、比較的好く用いられているものとして国際自然保護連合 IUCN による以下の定義がある。

「潮間帯または潮下帯であって、そこにある水塊及び関連する動植物相、歴史的及び文化的特徴が、閉鎖された環境の一部または全体を保護するための法律または他の効果的な手段により保全されている区域」(川俣 訳)

この定義では、MPA に一部の漁法や漁期だけを制限するものから、一切の採捕を禁止する全面禁漁区 no-take zone までの様々な保護の程度や内容のものが含まれてしまう。そのため、IUCN では MPA を表 2 に示す 7 つのカテゴリーに分類している。全面禁漁区でも、特に法律により保護されたものを一般に Marine Reserve (MR) という。MR 以外の禁漁の程度が比較的緩い MPA では藻場の維持に効果が認められないことが多い。

表 2 IUCN による保護区カテゴリー

記号	保護区のカテゴリー	主な管理目的
Ia	厳正自然保護区	厳格な保護／科学研究
Ib	原生自然保護区	厳格な保護／原生自然の保護
II	国立公園	生態系の保全と保護
III	天然記念物	特定の自然の特徴の保全
IV	生息地／種の管理区域	人の管理介入を通じた保全
V	海洋景観保護区	海洋景観の保全及びレクリエーション
VI	持続的資源利用保護区	資源の持続可能な利用

国際連合環境計画世界自然保全モニタリングセンター-UNEP-WCMC([www.protectedplanet.net](http://www.protectedplanet.net))が全世界の MPA のデータベースを取りまとめている。それによると、MR に相当するカテゴリー Ia と Ib の MPA は、世界全体で少なくとも 1,720 区存在し、海洋面積の約 1% に当たる総面積 3,278,735 km<sup>2</sup> を占める (2019 年 10 月現在)。我が国では、カテゴリー Ia または Ib に相当する MPA として西表島の崎山湾 (1983 年) と網取湾 (2015 年) に設定されている自然環境保全地域 (1,077 ha) を挙げることができるが、それ以外にはない。共同漁業権区域は MPA カテゴリー VI に分類され、総面積は 86,031 km<sup>2</sup> に及ぶ。no-take zone としては、都道府県が定める保護水面 50 区の 27.34 km<sup>2</sup> しかない。我が国では漁業協同組合が漁業を自主規制する領域を「禁漁区」と呼ぶことが多いが、遊漁も含めて動植物の採捕を完全に禁止している場合はほとんどないようである。

#### 4. 捕食者を利用した藻場回復手法の基本的考え方

捕食者の保護区の設定、漁獲サイズの自主規制等により、崩れた植食動物と海藻とのバランスを回復させ、藻場の回復、保全を図る。

##### 【解説】

植食動物と海藻は食う・食われるの関係にあるが、海藻が食べられて減少しても、餌不足で植食動物が減少し、海藻が回復するということはない。これは、磯焼けの原因となっているウニや植食性魚類の大部分が、海藻以外にも動物を含む多様な生物を餌として利用しているため、海藻がどんなによく生育できる環境であっても、植食動物の生残や植食活動が何らかの理由で制限されなければ、海藻は必ず植食動物に食い尽くされてしまう。そうならず、通常の岩礁に海藻が生育できるのは、植食動物の生残や活動を制限する何らかの要因が作用しているからである。その要因の中で捕食は最も重要な要因になっている。

ウニや植食魚による植食圧が高い磯焼け海域で、海藻が局所的に残る場がある。しかし、それらは波浪の影響が恒常的に強い浅所や砂に薄く被われた平坦な岩礁または低塩分化する河口域や湧水域などの、植食動物の侵入が厳しく制限される特殊な物理環境の場に限られる。そのような場は本来、海藻の生育にとっても厳しい場で、生態学では一般に「避難場所」と呼ばれる。藻場を大規模に回復させるためには、避難場所を造成するのではなく、捕食者の個体群を回復させ、植食動物の加入や植食活動に制御が利いた、健全な藻場生態系を取り戻す必要がある。

そのため、ウニ除去等により藻場を回復した場合でも、捕食者の役割への配慮が必要である。藻場が回復すると、ウニ、アワビ、サザエなどの植食性水産有用種の餌料環境が改善するだけでなく、捕食者も産卵のため来遊したり、棲み着いたりする。藻場に生息する捕食者は、直接的な捕食により植食動物の個体数を減らすだけでなく、その存在自体が植食動物の活動を制限することが知られている（コラム4）。藻場の中に生息する捕食者の中には、比較的大型の植食動物を捕食するカニやウツボなどの捕食者だけでなく、小型の魚類も含まれ、ヨコエビ類やワレカラ類などの小動物を捕食することにより大型褐藻類の生残と成長に寄与している（コラム5）。

しかし、これまでの磯焼け対策では、捕食者の重要性が理解されていなかったため、藻場に集まる捕食者も含む動物は対策の成果として無制限に漁獲され、藻場が生物の生息しない“ゴーストフォレスト ghost forest”化されてきた。藻場での捕食者の乱獲は、藻場の回復力<sup>注1</sup>を低下させると考えられる。この観点から、藻場に生息する捕食者個体群を回復させ、捕食による植食動物の制御を通じて、植食動物と海藻との生態的バランスを図ることが肝要である。

捕食者を利用した藻場回復手法は、植食動物を除くという点では、従来の磯焼け対策におけるウニや植食性魚類の人為的除去と変わらないが、以下の2つの点で大きく異なる。一つは、人為的除去では植食動物の利用が主目的でないために植食動物が一度に大量に駆除または漁獲されて有効に利用できなくなることがあるのに対して、捕食者を利用する手法では、植食動物は捕食者の餌として常に有効に利用される点である。もう一つは人為的除去と異なり、人の都合や自然条件によって制約されず、除去のための経費も道具も不要になることである。このような利点を活かし、当手法を推進する必要がある。

注1 藻場は環境要因の変動や人為的攪乱により消長を繰り返しているが、衰退の程度がある範囲に留まれば、元に戻ることができる。その能力を回復力（またはレジリエンス resilience）という。植食動物に対する捕食の影響はこの回復力を規定する重要な要因である。例えば、藻場は水温の高い年に一時的に衰退しても、捕食の影響が強く、植食活動が制御されている場合は、翌年に水温が平年に戻れば、回復しやすいが、逆に捕食の影響が弱く、植食活動が制限されない場合は、食圧が少なくなった海藻に集中して、藻場が壊滅する危険性が高くなる。

#### コラム 4 捕食者の存在自体が植食動物の行動を制御する

捕食は、被食者にとって生存や繁殖を危くする重大事である。このため、捕食がまれにしか起こらない場合であっても、**コラム 2** で述べたように、植食動物にとって行動を制限する重要な要因になり得る。捕食の恐れが植食動物の行動を変え、海藻の生残に影響することは、ケージや仕切り網を用いた実験(Hereu 2006; Hereu et al. 2008)でも確認されている。

図 4 は、イシガニとキタムラサキウニを用いて、捕食者の存在が植食動物のいない空間を維持できる可能性を示した野外実験の例である。イシガニはキタムラサキウニの捕食者であり、甲幅 86 mm の大型個体であれば、殻径 55 mm のウニまで捕食できることが実験的に確認されているが、その捕食数は殻径 30 mm ほどの小型のウニであっても 1 個/日ほどで多くない。しかし、殻径約 30 mm 以下のウニが通過できる目合のケージ (70×70×15 cm) の中にコンブとともにイシガニを収容しておく、ウニの侵入が防止され、コンブは摂食されないことが確認された。このことは、カニのいるケージにウニが侵入しないのは、捕食されたためでなく、ウニがカニを警戒して侵入しなかったことを示唆する。

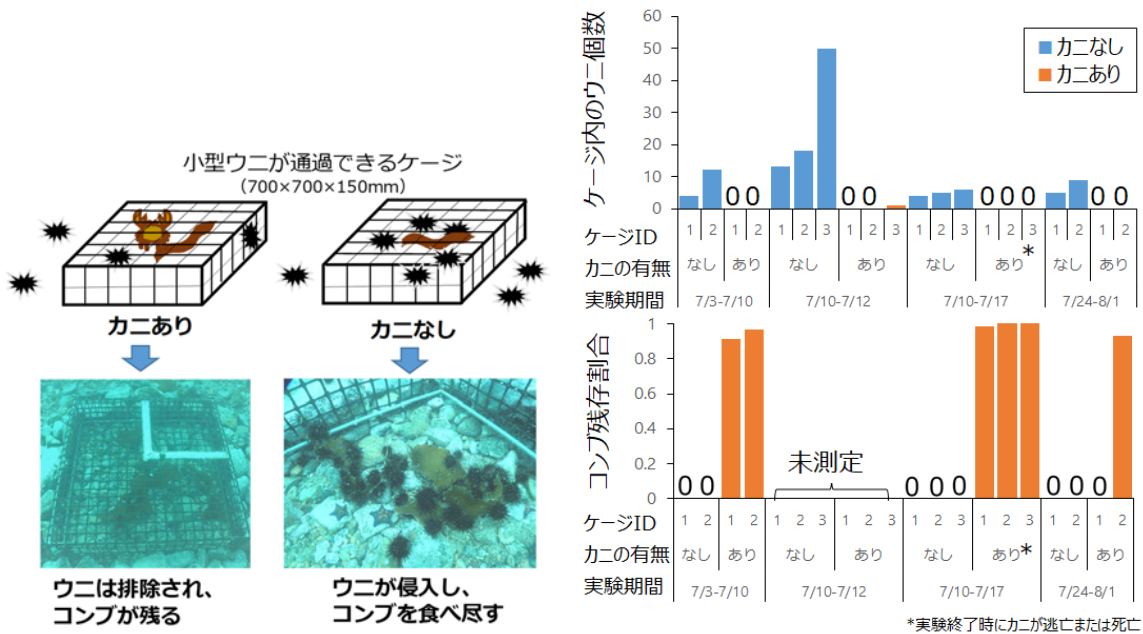


図 4 ウニの磯焼け場で実施したケージ実験の例。キタムラサキウニの優占する岩礁にウニが通過できる目合のケージを複数設置。ケージ内にコンブ葉片とともにイシガニ 1 尾を入れた実験区と入れなかった対照区を設けて、実験期間終了時のケージ内のウニの個数とコンブの残存割合を比較。

## コラム 5 魚類が藻場を維持する

多くの地先で、以前の海には今よりもはるかに多くの魚類が生息していたといわれる。藻場でダイバーが写真を撮ろうとすると、集まってくる魚を手で払わなければ、撮影ができないこともあったという。今日、残存する藻場に小魚が集まっている光景（図 5）は、藻場がそれらの魚類の重要な生息場であり、その減少が魚類の減少を想起させるかもしれない。しかし、以下の理由により、事実は因果関係が逆で、乱獲等による魚類の減少が藻場を衰退させている可能性もある。



図 5 磯焼け地帯に残る藻場に集まる魚類。

川俣 茂撮影。

藻場に集まる魚類が海藻の生育に寄与するメ

カニズムには二つある。一つは、排泄や産卵に伴う海藻への栄養塩の供給である。魚類が排泄物を通じて窒素やリンを水中に放出し、海藻の成長を促進することは、魚類と海藻の複合養殖（例えば、Schuenhoff et al. 2003）でよく認識されている。また、沿岸の藻場には他の海域で栄養を吸収し成長した魚類やイカ類が来遊し、産卵により栄養塩を供給している。その好例として北海道日本海沿岸のニシンが挙げられる。現在は、ウコの磯焼け域となっている同沿岸域では、ウコの過剰摂食だけでなく、貧栄養も磯焼けの要因になっている。しかし、かつては餌の豊富な北方海域で成長したニシンが産卵のため大群で来遊し、放卵・放精により莫大な量の栄養塩を供給し、コンブの成長に寄与していたことが推察されている（大谷・大西 1995; 栗林ら 2014）。

もう一つのメカニズムは小型魚による植食性の小動物の捕食である。海藻には多数の小動物が生息し、それらが魚類の餌料になることは我が国でも知られているが、その捕食による海藻への間接効果についてはほとんど知られていない。海藻に生息する小動物は多種多様な動物群からなる。その中には藻体に着生する微細藻を餌とし、海藻表面の掃除を通じて海藻の生育を促進する植食性の端脚類がいる一方で、海藻自体を食害する端脚類も存在する。海外では魚類を取り除くと、褐藻類が紅藻類に置き換わることを示した野外実験 (Duffy and Hay 2000)がある。これには、大型褐藻類を選択的に摂食する端脚類が捕食から解放されて増加したことと、その結果、増えた紅藻類との競合が原因として考えられている。藻場における海藻－端脚類－魚類の関係は、田畑における作物－害虫－スズメの関係に近い。端脚類も害虫も、捕食がなければ、爆発的に殖える高い繁殖力をもつ。スズメは害虫だけでなく、稲や麦なども食害するため、害鳥なのか益鳥なのかは明確にはわからないという考えもあるが、中国共産党主席毛沢東により行われた中国全土からのスズメの駆除という人類史上最大級の試みが、害虫の大発生と農作物への被害 (Dikötter 2010) という栄養カスケードの法則性からの予測を疑う余地のない形で実証している。

## 5. 捕食者を利用した藻場回復のための考慮すべき条件

### 5. 1 保護対象とする捕食者

保護の対象とする捕食者は、定着性があり、行動特性からも植食動物に対する高い捕食能力が期待できる種とする。選定に当たっては、漁業者の動機付けになりやすい水産的価値の高い捕食者を選択することが望ましい。

#### 【解説】

植食圧が高い磯焼け域で、捕食により局所的に植食動物の空白地帯を維持するためには、保護区を設定し、捕食者の個体群を高い密度で保全する必要がある。しかし、捕食者は一般に移動性を有する。日常的に行動する範囲（行動圏という）が広い種では、行動圏よりも広い領域に保護区を設定しない限り、効果は期待できない。したがって、保護区に必要な規模は捕食者の種に依存するが、諸外国の事例では、捕食者個体群の回復が藻場回復まで波及する例は面積が1 km<sup>2</sup>をはるかに超えるような大規模なものであることが多い。のように規模の大きい保護区を、集落単位で漁場を管理している我が国で設定するのは難しい。より小規模な保護区でも捕食者の生息密度を高められるよう、縄張りをもつ種や棲み場要求の高い種などの定着性の高い捕食者を対象にして保全する必要がある。

植食動物の個体群の制限要因として捕食は重要であるが、具体的な研究例はウニ以外の植食動物では非常に少ない。ウニの捕食者に関する科学的知見は、海外では表3に示す多種多様な動物にわたるが、我が国ではほとんどがウニの放流種苗の食害に関するものに留まる。表4には、国内におけるウニとそれ以外の植食動物の捕食者について一般情報も含めて、潜在的捕食者を列挙している。国内では、これらの捕食者が植食動物に及ぼす影響に関する報告は少なく、ウニ個体群の制御に関しては否定的な見解が多い

表3 海外で挙げられているウニの捕食者

分類	捕食者
海産哺乳類	ラッコ
魚類	モンガラカワハギ類、ベラ類、オオカミウオ類、カレイ類、タイ類、タラ類
甲殻類	ロブスター類（イセエビ類を含む）、カニ類
棘皮動物	ヒトデ類

表4 国内で植食動物を捕食することが確認されている動物

植食動物	捕食が確認されている動物
ウニ	<b>海産哺乳類</b> ラッコ <b>魚類</b> イシダイ、イシガキダイ、クロダイ、マダイ、コロダイ、カゴカキダイ、オオカミウオ、コブダイ、クサビベラ、ササノハベラ、オハグロベラ、キュウセン、ハリセンボン、クサフグ、ウツボ <b>甲殻類</b> イセエビ、イシガニ、フタハベニツケガニ、ヨツハモガニ、トゲクリガニ、ヒライソガニ、ヤマトホンヤドカリ <b>ヒトデ類</b> コルヒトデ、タコヒトデ、ヤツヒトデ、イトマキヒトデ
植食性巻貝類	<b>タコ類、カニ類、ヒトデ類</b> <b>肉食性巻貝類</b> ヒメエゾボラ
植食性魚類	<b>イカ類</b> アオリイカ； <b>タコ類</b> マダコ； <b>魚類</b> ウツボ、ハタ類、カンパチ

(例えば、三本菅 1994; 清本 2011; Fujita et al. 2013)。否定的見解が多かった理由としては、強力な捕食者が獲り尽くされた磯焼け域での調査や小型化した捕食者を用いた捕食実験が行われたりしていることが考えられる。健全な藻場域での調査や、人が獲らなければ存在するはずの超大型の捕食者を用いた捕食実験(例えば、後出するコラム 8)を行えば、違った結果が得られた可能性が高い。

ウニの捕食者の中でも、イセエビは、①日中の隠れ場を必要とし、定着性が高いこと、②夜行性であるため、日中岩の隙間等に隠れていても夜間、岩の表面へ這い出してくるウニ(図 6)を捕食しやすいこと、からウニの強力な捕食者になり得る。投石礁は、これまでウニの隠れ場になるため、海藻が生えなくなると考えられてきたが、イセエビが棲み着けば、ウニがいなくなり、海藻が生育することが明らかになっている(コラム 6)。また、イセエビは、磯焼け域に優占するウニだけでなく、アワビ、サザエなどの水産的に有用な植食動物も捕食するため、その捕食を否定的にみる人は多い。しかし、コラム 2 で述べたように、捕食者が栄養カスケード効果を通じて植食動物にも恩恵を与えることが、ウニやアワビでも見出されている(コラム 7)。

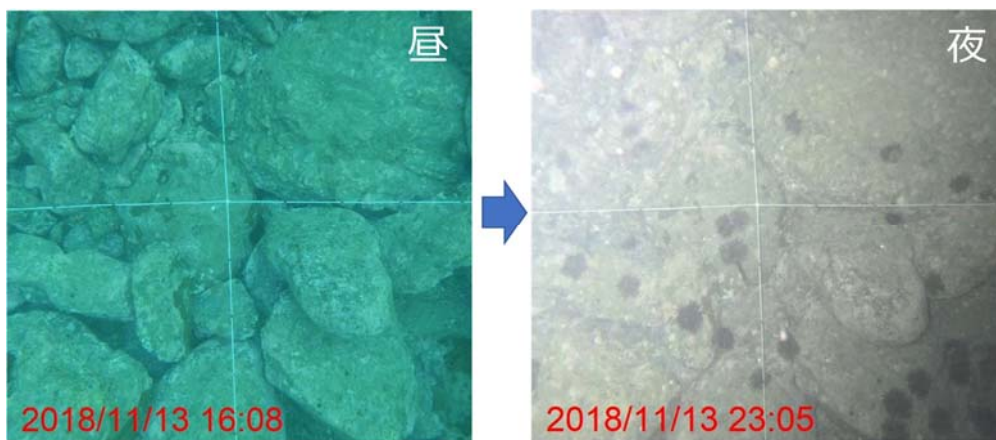


図 6 A 地区周辺の磯焼け状態の大礫場表面の昼夜差：自動フラッシュによるタイムラプス撮影画像の例。日中、岩陰に隠れていたウニ（主にツマジロナガウニ）が夜間、岩の表面に這い出している。

なお、ラッコについては、環境省レッドリストの絶滅危惧 IA 類に登録され、保護の対象となっている。ラッコは近年、北海道東岸では千島列島などからの来遊数が増加傾向にある(三谷ら 2020)。しかしラッコが定着すると、水産重要種となっているエゾバフンウニを大量に食べるため、漁業に被害を与えるのではないかと懸念され、歓迎する状況にはない。

## コラム 6 投石礁にイセエビが棲み着けば、ウニがいなくなり、海藻が生える

従来、投石礁はウニの好適な生息場になってしまい、海藻が生育しなくなると考えられてきた。しかし、投石礁に大型のイセエビが棲み着いている場合は、その捕食によりウニは非常に低い密度に制限されることが、高知県 A 地区保護区だけでなく、徳島県 B 地区のイセエビ保護区でも見出されている。

図 7 は、B 地区保護区内に設置されている捨石マウンドと周辺漁業区の投石礁でのウニ優占種のムラサキウニのサイズ別生息密度（=サイズ組成の相対頻度×平均密度）の調査例である。イセエビが生息していない周辺漁業区の投石礁には比較的小型のムラサキウニが岩の隙間に多くみられた。これに対して、イセエビ大型個体も比較的多く生息することが確認されている保護区捨石マウンドでは、ムラサキウニは捕食されにくい大型個体のみが低い密度でしかみられず、イセエビによる捕食の影響が推察された。

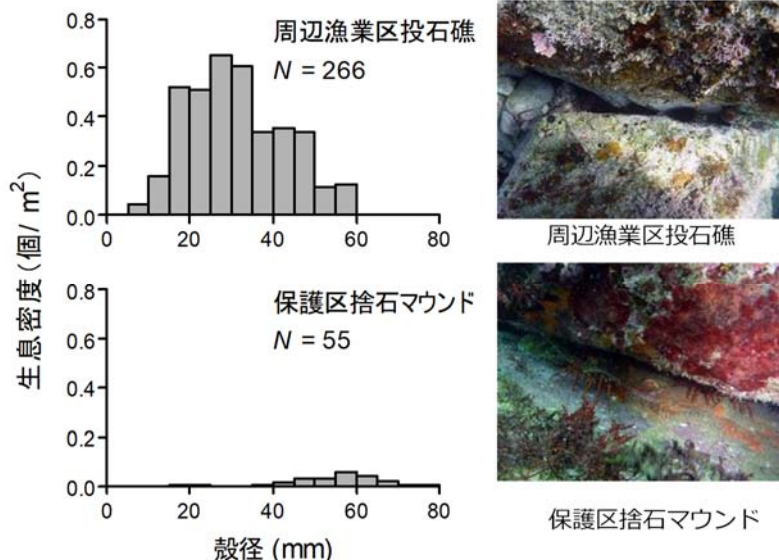


図 7 徳島県 B 地区保護区捨石マウンドとその周辺漁業区投石礁に優占的に出現するムラサキウニのサイズ級別生息密度の調査例

また当地区では、ウニのほかにブダイやアイゴなどの植食魚による食圧が、特に保護区内の捨石マウンドで高く、アラム・カジメ類やホンダウラ類の大型褐藻類は生育できないことがわかっている。そのため、イセエビによるウニ捕食は海藻植生に影響しないように思われた。しかし、ウニが比較的多く生息する周辺漁業区投石礁では、大型褐藻類は辛うじて残存しても有節サンゴモ以外の小型海藻がおそらくウニにより選択的に食べられてしまい、下草のない状態になっていたのに対して、ウニがほとんど生息しない保護区捨石マウンドでは、大型褐藻類は生育しなくても植食魚は小型海藻をほとんど食害しないようで、マクサなどの小型海藻が周年生育していた（図 8）。

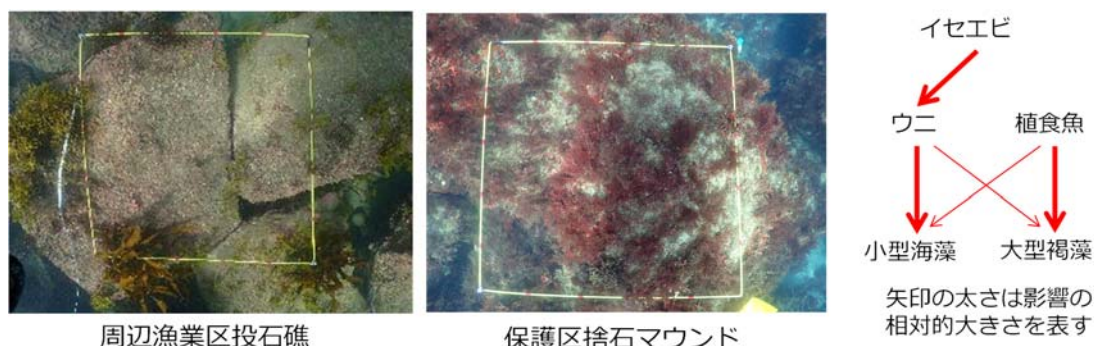


図 8 徳島県 B 地区保護区捨石マウンドとその周辺漁業区投石礁における海藻衰退期（9 月）の植生状況と想定される食物網

### コラム 7 水産有用種の貝類はイセエビの捕食により減少しないのか

イセエビはウニだけでなく、アワビやサザエなどの貝類も捕食する。このため、イセエビが増えれば、ウニだけでなく、水産的に有用な貝類も減ることを危惧する意見は多い。確かにウニやアワビの小型個体は捕食者の存在により減少する。しかし、餌料海藻が豊富になるため、稚アワビや稚ウニは成長が早くなるだけでなく、成長可能な上限サイズも大きくなって、被食を受け難い大型個体へと急速に成長できる可能性が出てくる。以下の二つの例がそのことを示している。

**例 1** 図 9 は、高知県 A 地区保護区内のイセエビが生息する造礁サンゴの近くの巨礫場と、イセエビの生息しない近隣漁場の類似した巨礫場で調べたムラサキウニの殻径組成分布密度である。磯焼け状態の近隣漁場では、ムラサキウニは高密度に生息しているも、ほとんどが殻径 50mm 以下の小型個体である。これに対して、海藻の繁茂するイセエビの生息場の近くでは、ウニの密度は捕食により全体的に減少するが、サイズ別にみると、減少しているのは約 50 mm 以下の小型群だけで、大型群は逆に増えて、殻径 70 mm 以上の超大型個体まで生息していた。

**例 2** 表 1 に記したオーストラリアのマリア島海洋保護区では、保護区設定以降、ミナミイセエビの大型個体が増加し、ブラックリップアワビ(*Haliotis rubra*)はその捕食により減少した(Barrett et al. 2009)。しかし、減少したのは小型・中型個体のみで(Barrett et al. 2009)、漁獲規制サイズを超える大型アワビの密度は周辺漁場より高い水準を維持した(図 10)。

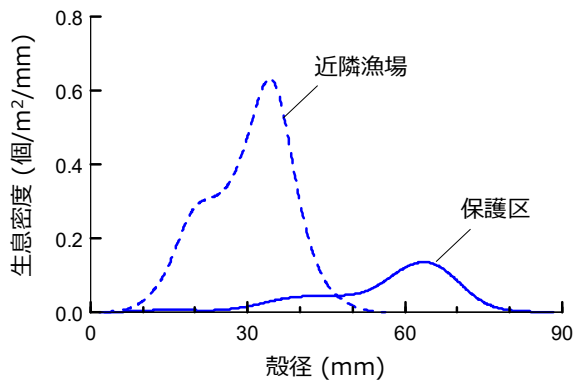


図 9 高知県 A 地区保護区内のイセエビの生息する造礁サンゴ近傍 ( $\leq 20$  m) と近隣漁場の巨礫場におけるムラサキウニの殻径組成分布密度。Kawamata and Taino (in press) のデータより作成。曲線と X 軸で囲まれた面積が平均生息密度(個/m<sup>2</sup>)になるよう、推定殻径分布密度×平均生息密度を表示。

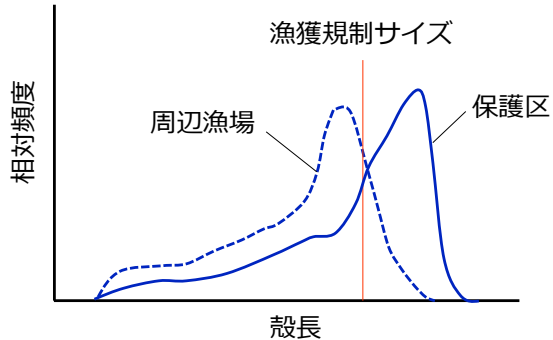


図 10 マリア島海洋保護区とその周辺漁場でのブラックリップアワビの殻長組成。Pederson et al. (2008) の図より読み取って作成。縦軸の相対頻度には生息密度の大きさが反映されていないが、両地区のアワビの生息密度は Barrett et al. (2009) より同程度であったと推察される。

## 5. 2 捕食者の体サイズ

捕食のサイズ依存性を考慮し、植食動物の大型個体も捕食できる捕食者大型個体を保護の対象とする。

### 【解説】

捕食は捕食者と被食者の体サイズに依存する。ウニやアワビなどの種苗放流でよく知られているように、被食者の捕食死亡率は発生初期段階で高く、成長に伴い低下する。一方、捕食者が漁獲により小型化すると、捕食能力が低下して被食者が被食を回避しやすくなるので、捕食者の体サイズは捕食圧を規定する重要な要因となる。

図 11 は、イセエビ 32 尾を同程度の大きさの個体 2 尾ずつ 16 組に分けて収容した水槽内 16 区画(80×80 cm)に、大きさの異なるツマジロナガウニとムラサキウニをそれぞれ 5 個ずつ同時に入れて実施した捕食実験の結果である。イセエビは、捕食しやすい小型ウニから捕食する傾向があり、またムラサキウニよりも捕食されやすいツマジロナガウニでは、イセエビが頭胸甲長 CL (両眼上棘基部中央点から頭胸甲後端中央点までの長さ；後出の図 23 参照) 70 mm 以上の大型個体になると、ウニの大きさにほとんど影響されない捕食を示した。一方、ムラサキウニに対しては、CL70 mm 以下の小～中型エビが殻径 40 mm 以上の大型ウニをほとんど捕食できないといった顕著なサイズ依存性を示した。この結果から、大型のムラサキウニの捕食のためには、少なくとも CL70 mm 以上の大型イセエビが必要であると推察された。また、棘が非常に長いガンガゼについても捕食実験を行い、

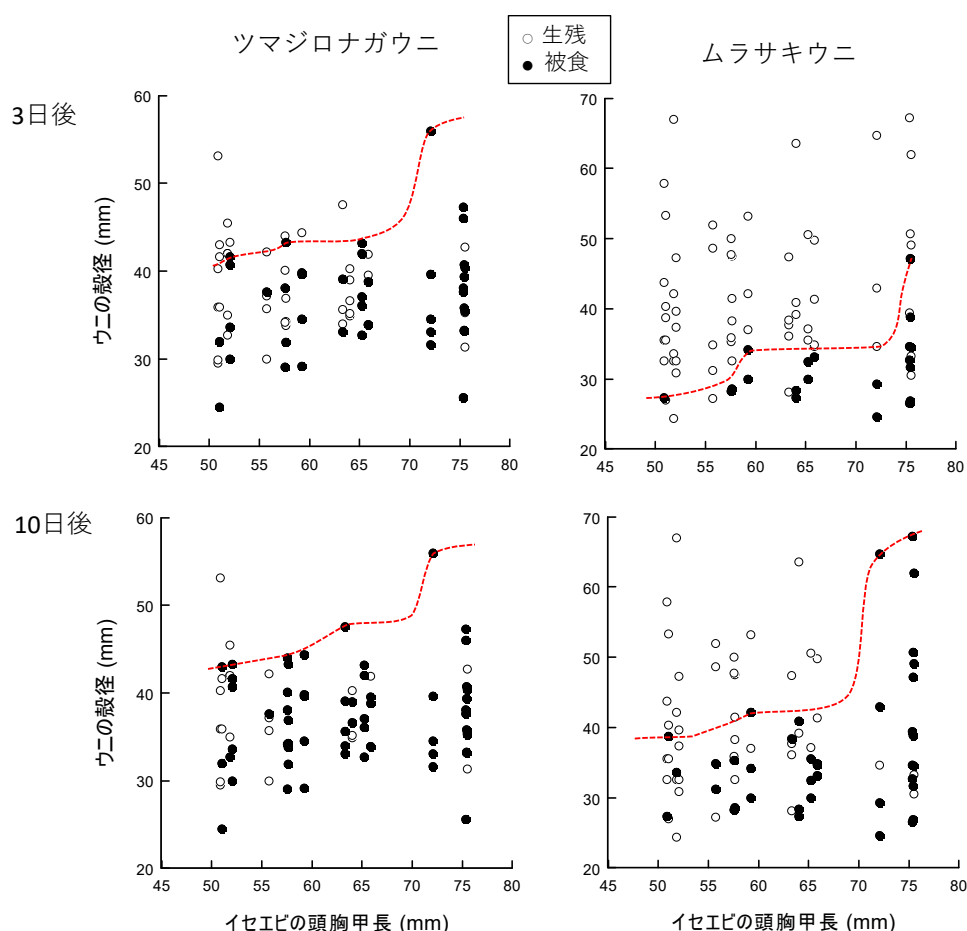


図 11 イセエビによるウニの捕食実験結果 (Kawamata and Taino (in press)のデータより作成)。赤色の破線は被食されたウニの上限サイズの包絡線を示す。

イセエビはより大型個体でなければ捕食できないことが示唆された（コラム 8）。

大型捕食者の必要性に対して、小型の捕食者であっても、多く生息すれば、ウニは、稚ウニの段階で捕食されるので、徐々に少なくなつて、やがて磯焼けが解消するのではないかと考える人は多い。しかし実際には、小型のイセエビが生息してもウニが高密度で生息する投石礁の例（コラム 9）や稚ウニを捕食するヒトデが高い密度で生息してもウニの優占状態が持続する事例（コラム 10）が示すように、磯焼け域に生息する最大級サイズのウニまで捕食できる捕食者が存在しなければ、ウニの密度は減少しない。

捕食者の中には、イセエビのように重要な水産資源であるため、都道府県の漁業調整規則や漁協の自主規制により、採捕に体長制限（表 5）を設け、小型個体を保護している種もある。しかし、この場合には、捕食能力の高い大型個体が選択的に採捕されてしまうため、以下の二つの理由により植食動物の個体群を制御できない可能性が高い。一つは、捕食者が小型のウニしか捕食できない場合は、捕食者が高密度に生息しても幼生から加入してくる稚ウニをすべて捕食するのが難しいことである。そのため捕食可能な上限サイズ（被食回避サイズ）が小さければ、成長によりすぐにそのサイズを超えられてしまう。もう一つは、ウニの磯焼け域にウニの少ない場を局所的に維持しようとしても周辺域から比較的大型のウニが移動してくれば、その増加を止められないことである。実際に、オーストラリアのタスマニアでは、ウニの重要な捕食者であるミナミイセエビの資源保護のため、体長制限により小型個体の漁獲を禁止しても、ウニの大型個体を捕食できる大型エビが消失してしまい、大型のウニが増えて磯焼けが発生している(Ling et al. 2009)。

表 5 各都道府県が資源保護のため、採捕を禁止しているイセエビの体サイズ上限（2019 年 9 月現在）

都道府県名	採捕禁止上限体サイズ ( )内は CL 換算値 <sup>1)</sup>
千葉県、東京都、神奈川県、静岡県、徳島県、高知県、鹿児島県	体長 <sup>2)</sup> 13 cm (CL 44 mm)
三重県	CL 42 mm
和歌山県、熊本県、宮崎県、長崎県	体長 15 cm (CL 51 mm)
大分県	全長 <sup>2)</sup> 20 cm (CL 68 mm)

<sup>1)</sup>CL への換算には、経験式(井上 1963) :  $BL = 2.908CL + 2.5$  を用いた。

ここに、BL : 体長(mm)、CL : 頭胸甲長(mm)。

<sup>2)</sup>目の付け根から尾端までの長さ

以上のように、イセエビのように磯焼け域に生息するウニの大型個体まで捕食できる能力をもつ捕食者であっても、捕食者に大型個体が存在しなければ、植食動物の個体群制御は難しい。また、植食動物の捕食に必要な捕食者の体サイズは、現在、漁業調整規則等で規定されている採捕可能な最小サイズより大きい可能性が高い。そのことにも留意して、捕食者の大型個体をある程度残せるよう、漁獲管理を別に考える必要がある。

### コラム 8 イセエビはガンガゼの捕食者になり得るか

ガンガゼは極めて長い棘をもつウニであり、イセエビでも捕食できないのではないかと疑問があった。そのため、海水を掛け流した 1 t 水槽 9 槽にサイズの異なるイセエビ 9 尾を 1 尾ずつ収容し、様々なサイズのガンガゼを与え、捕食の有無を調べてみた (図 12)。その結果、イセエビは CL85 mm 以上の大型個体でなければ、殻径約 40 mm 以上のガンガゼを捕食できないこと、実験に用いたイセエビに CL95 mm を超える超大型個体が 1 尾しかいなかったため、明確ではないが、全体的傾向から CL>約 95 mm でガンガゼを活発に捕食できるようになることが推察された。しかし、一般の漁場では CL90 mm 以上のイセエビはほとんど漁獲されてしまうため、現状ではイセエビはガンガゼの捕食者になり得ないと考えられる。

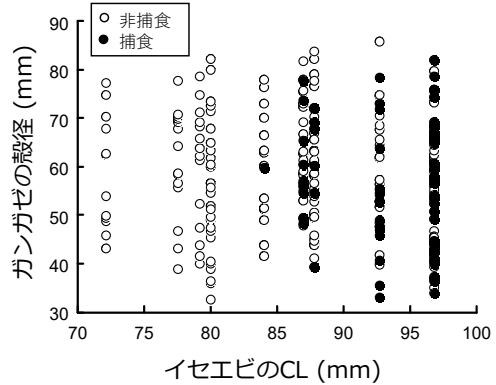


図 12 サイズの異なるイセエビに与えたサイズの異なるガンガゼの捕食の有無

### コラム 9 大型ウニを捕食できる捕食者がいなければ、ウニの増加を防止できない

イセエビが生息しても大型ウニまで捕食できなければ、ウニの増加を防止できない事例として鹿児島県 C 地区の投石礁 (図 13) を挙げることができる。当投石礁は砂の薄く覆う冠砂域に設置されたもので、イセエビの生息数は 11~12 尾と少ないが、規模 (57 m<sup>2</sup>) が小さいため、生息密度 (4.8~5.2 尾/25 m<sup>2</sup>) は比較的高かった。にもかかわらず、投石礁には殻径 38 mm を超える大型のムラサキウニが非常に高い密度 (平均約 28 個/m<sup>2</sup>) で生息していた。これは、そのイセエビの大部分が CL50 mm 以下の小型個体であったため、ムラサキウニを捕食できる限界サイズも小さかった (図 11 の水槽実験の結果から殻径 38 mm ほど) が原因として考えられた。そのため、殻径 38 mm 未満の小型ウニは、投石礁周辺には生息できても投石礁では捕食されてほとんど消失するが、より大型のウニが周辺から投石礁へ移動してくれば捕食されずに増えることが予想された。この予想は、図 13 の調査結果はその予想に合致した。

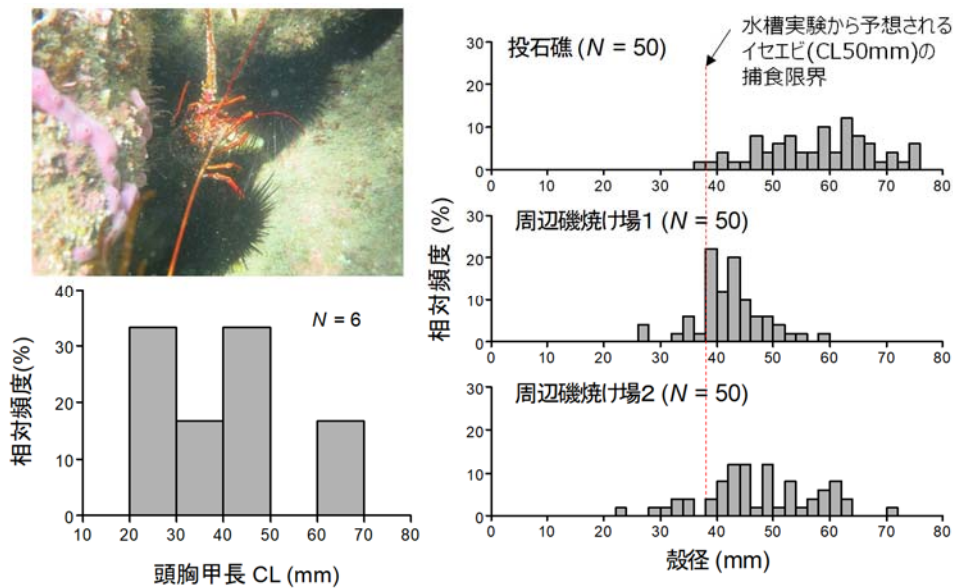


図 13 鹿児島県 C 地区での事例：小型イセエビが生息する小規模な投石礁とその周辺磯焼け場でのムラサキウニの殻径組成。左下の図は投石礁でステレオ撮影により推定したイセエビのサイズ組成。

### コラム 10 キタムラサキウニとその捕食者

キタムラサキウニは、冷水性のウニで、北日本沿岸では大量発生してその高い摂食圧により磯焼けの要因となっている岩礁が広範囲に分布する。しかし、市場価値の高い水産資源であるため、その密度が高すぎて磯焼けになっても漁業者にウニを駆除するという考えは起こり難い。むしろ、漁場から除去したウニを海藻のある場所に移殖したり、カゴなどで養殖したりして有効活用することが細々と行われているため、藻場回復は期待し難い状況にある。

キタムラサキウニの捕食者については、種苗放流に関連してヨツハマガニとイトマキヒトデが稚ウニ（殻径 ≤ 2 cm）を捕食するが、殻径が 2 cm に達すると、捕食できなくなることが示されている(白石 1997)。三陸沿岸には、イトマキヒトデが高密度（5 個体/m<sup>2</sup> ほど）で生息している岩礁があるが、キタムラサキウニが高密度に生息し、磯焼け状態が持続している。以上のことは、稚ウニしか捕食できないイトマキヒトデではキタムラサキウニの優占状態は解消されず、大型のウニまで捕食できる捕食者が必要であることを示している。

キタムラサキウニの大型個体まで捕食する可能性のある捕食者としては、カニ類が考えられる。図 14 は、その一つとして考えられたイシガニを用いて、キタムラサキウニの捕食におけるサイズ関係を把握するために行った水槽実験の結果である。イシガニは、キタムラサキウニを盛んに捕食し、甲幅約 70 mm 以上の大型個体であれば、殻径 55 mm ほどの大型ウニまで捕食できることが示された。

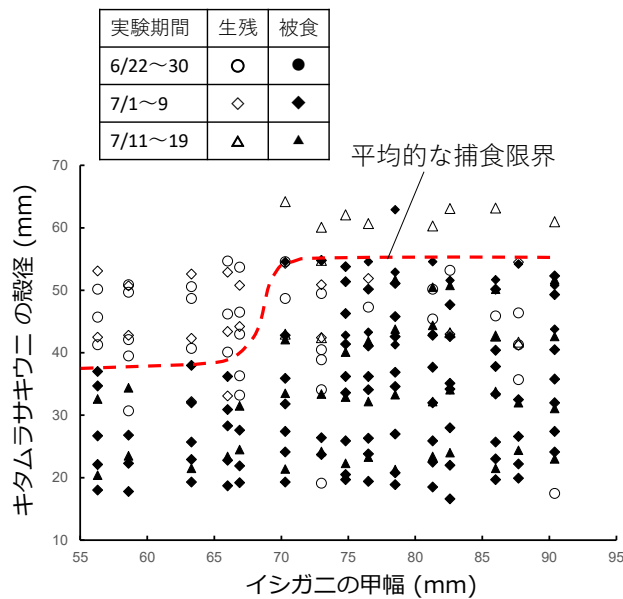


図 14 サイズの異なるキタムラサキウニに対するイシガニの捕食実験結果

### 5. 3 捕食者の生息密度と個体群規模

捕食者を利用して藻場を回復・保全するためには、保護区を設定し、捕食者の漁獲管理と生息場の整備等により、保護区内に捕食者を高い密度で維持する必要がある。

【解説】

植食動物の捕食者の多くは漁業や遊漁により、広域的に密度が低下し、体サイズも小さくなっていると考えられる。そのため、捕食の効果を高め、藻場を回復、保全するためには都道府県や地域レベルでの漁獲管理により、捕食者の生息密度の回復と大型化を図ることが望ましい。しかし、それができない場合でも、A 地区保護区のように、地先の組合単位で、捕食者の採捕を自主的により厳しく制限すれば、捕食者を利用した藻場の回復・保全の可能性はある。

保護区の設定では、一般に設定可能な規模や場所が制約されるため、定着性のある捕食者であっても、限られた領域に捕食者が高い密度で定着するよう、捕食者の生息に適した場を選定する必要がある。もしそのような場が保護区内に十分に存在しない場合は、保護区内に捕食者の生息場を整備することも必要である。

A 地区保護区は、全面禁漁区の設定により藻場が回復している海外の事例に比べて、規模（約 0.3 km<sup>2</sup>）が小さく、保護の程度も緩い。にもかかわらず、保護区のおおむね全域にわたり藻場が維持できている要因の一つとして、大規模な投石礁の整備がある。投石礁は、長径 1～2 m ほどの大割石を 1～6 m の高さに積み上げたもので、保護区となっている小湾の湾奥に配置されている。イセエビは夜行性の捕食者であり、日中、隠れるための隠れ場を必要とする。しかし A 地区沿岸域には、イセエビの隠れ場となる天然の場は非常に少ない。対照的に、保護区内にはイセエビの好適な隠れ場となる投石礁（コラム 11）が広く存在するため、定着するイセエビの個体数が増え、年 1 回の漁獲量とバランスして、大型個体が高い密度で維持されていると考えられる。

一般に、捕食者の生息密度が生息場で高くなると、生息場での餌が枯渇するため、索餌活動が生息場の周辺へと拡大し、植食動物の密度の低下した領域もそれに伴い拡大する。大型のイセエビが多数生息する礁（隠れ場）周辺でのウニと海藻の空間変化を図 15 に模式的に示す。イセエビは、日中、隠れ場に身を潜め、夜間そこから這い出して周辺を活発に索餌活動し、翌朝には隠れ場に戻ることを繰り返す。そのため、捕食圧は隠れ場の近傍で高いが、隠れ場から離れるにつれて減少し、ある距離以上では周辺域と同程度の低い水準となる。その結果、隠れ場とその周辺はウニ密度が非常に低い領域となり、海藻が繁茂する。またその領域には、豊富な餌により成長し、イセエビに捕食され難くなった大型のウニと幼生から加入した稚ウニが低い密度でしか出現しないが、隠れ場から離れてウニの密度が次第に高くなると、ウニは小型化する。A 地区保護区の投石礁周辺で行った調査結果（コラム 12）は上記の予想を裏付けただけでなく、藻場域が、捕食圧の高い領域にとどまらず、ウニ密度の高い領域まで拡大することを示した。

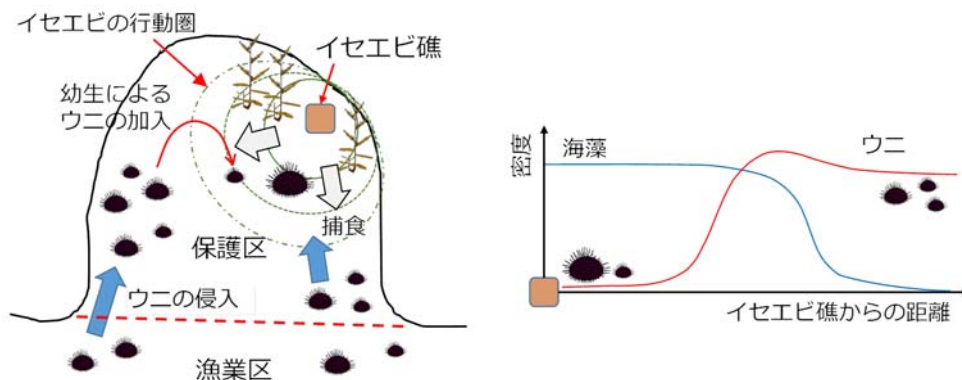


図 15 ウニの磯焼け域にイセエビ保護区を設定した場合の捕食によるカスケード効果の空間変化模式図

### コラム 11 投石礁はイセエビの好適な隠れ場

図 16 は高知県 A 地区保護区内の投石礁と造礁サンゴ域で、日中、目視観察により調べたイセエビの生息密度の調査例である。ここで、造礁サンゴ域とは、イセエビが隠れ場として利用する造礁サンゴがよく発達した領域であり、A 地区沿岸に多数点在してもイセエビがほとんど生息しないパッチ状の小さな造礁サンゴとは異なる。図 16 の結果は、投石礁でのイセエビの生息密度が年一度、秋に行われるイセエビ漁によりかなり減少するが、翌年の夏には回復すること、その回復後の密度が造礁サンゴ域に比べて約 3 倍も高く、投石礁がイセエビの好適な隠れ場になっていることを示す。当保護区ではこのような投石礁が、面積で造礁サンゴ域の約 7 倍あり、イセエビの主要な隠れ場となっている。

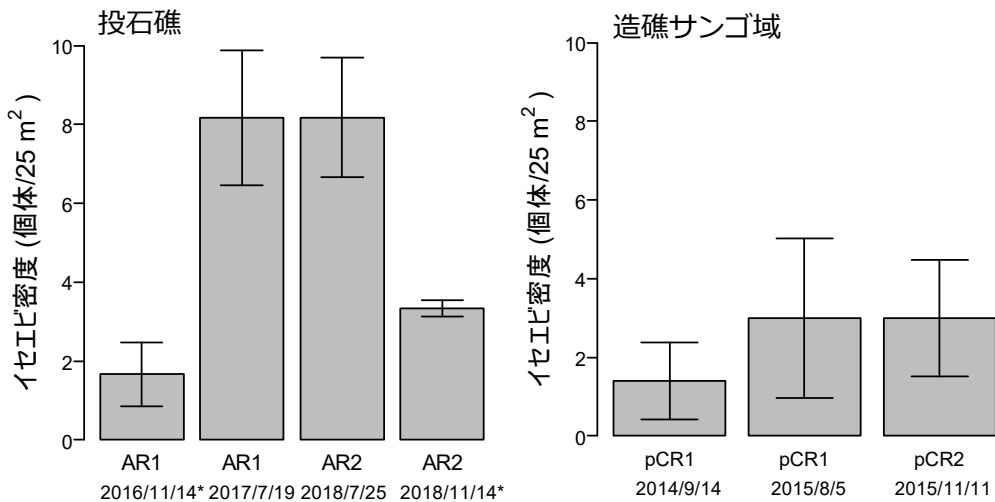


図 16 A 地区保護区内の投石礁と造礁サンゴ域における日中のイセエビ密度 (Kawamata et al. (2019)のデータを含む)。棒グラフ下方の記号：地点名、\*付きの日付は年一度のイセエビ漁直後であることを示す。

## コラム 12 捕食者の隠れ場からの距離に伴うウニと海藻の変化

図 17 は A 地区保護区における、投石礁からの距離に伴うウニ密度と海藻被度の变化の観察例である。投石礁から約 65 m まではウニ密度は低く、海藻被度で生育する状態が維持されている。ウニ密度が明らかに高くなるのは、投石礁からの距離が 70 m に達してからである。しかし、投石礁からの距離が約 70~90 m でのウニ密度は保護区外の磯焼け場での平均的な密度よりも高いにもかかわらず、海藻が投石礁の近くと同じように高い被度で出現した。これらの原因は明らかになっていないが、海藻の残っている領域に周辺からウニが蝟集していることと、投石礁の周辺に形成された大きな藻場から大量に供給される海藻の胞子や幼胚によって藻場の領域がウニ密度の高い領域にも拡大することが考えられる。

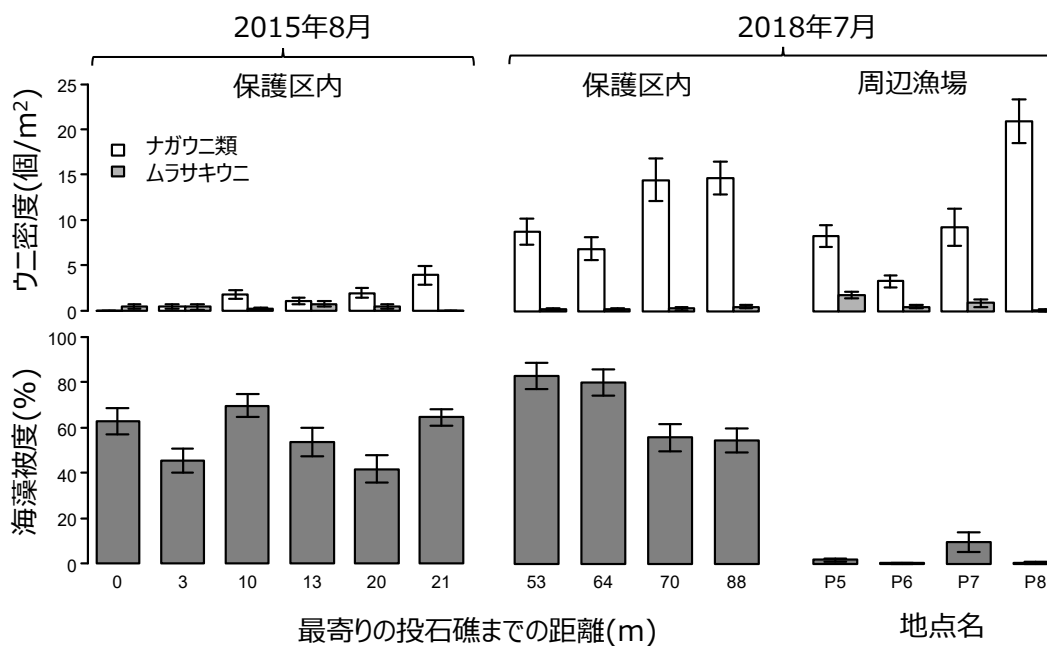


図 17 A 地区保護区内の投石礁からの距離に伴うウニ密度と海藻被度の変化 (Kawamata and Taino (in press))

## 6. 捕食状況の把握

捕食は、植食動物に影響する、制御可能な要因である。藻場生態系の健全性や、植食動物の個体群制御の可能性を検討することを目的として、植食動物に対する捕食状況の把握を行う。捕食が認められた場合は、捕食者の特定と体サイズ組成の調査を行う。さらに、捕食者の生息場が特定できる場合は、捕食の影響範囲を調査する。

### 【解説】

藻場は、海藻のみで成立するのではなく、様々な動物がバランスよく存在する生態系の一部として成立する。乱獲により水産資源の減少・低迷が続く沿岸域において、植食動物のみが際だって増加している場合、捕食の強度が減少している可能性が高い。捕食は、植食動物の個体群、ひいては海藻植生に影響する、制御可能な要因である。その現状の把握は、藻場生態系の健全性や、捕食者の漁獲管理による植食動物の個体群制御の可能性を検討する際の重要な判断材料となる。

植食動物に対する捕食者の影響には、捕食による植食動物の個体数の減少だけでなく、活動抑制効果もある。ここでは、植食動物の捕食による死亡率を「捕食圧」と呼んで、前者の影響の程度を表す指標として用いる。また、後者の活動抑制効果はコラム 2 やコラム 7 で述べたように被食回避のための防衛行動と考えられ、植食動物が長時間、隠れ場に留まったり、捕食者から逃避したりする行動として現れる。

以下では、植食動物の体サイズ分布より捕食状況を推定する方法と、捕食圧を直接調べる方法、捕食が認められた場合に実施する捕食者の特定と体サイズ組成調査の方法、及び捕食者の生息場が限られる場合における捕食の影響範囲の調査方法について述べる。

### 6. 1 植食動物の体サイズ分布による捕食圧の推定

ここでは、主に理論的考察とウニに関する知見より推察される、植食動物の体サイズ分布の一般的傾向とそれに基づく捕食圧の推定方法について述べる。アワビでも同様の傾向が認められるが、他の植食動物については、不明の点が多いため、参考的に止める。

一般に、動物の死亡率は、発生初期に高く、成長に伴って低下するため、動物の体サイズ組成は、図 18A のような分布になると予想される。しかし、植食動物のように栄養段階の低い動物で、そのような組成分布を示すことはまれで、むしろ親の量に無関係に、図 18B のようにある年に加入量が極端に増加して個体群の主群をなす卓越年級群を示すことの方が多い。ウニの場合でも、磯焼け域においては、激浪や高水温の年に、卓越年級群が発生し、体サイズ組成分布を示すことが報告されている(Agatsuma and Hoshikawa 2007; 清本 2011)。卓越年級群が発生する原因については、稚仔の発生量が、捕食者が食べ尽くせないほど大量になるとは考え難いことから、激浪や高水温により、産卵量が増加するためというよりも、捕食者の斃死または捕食活動の減少が起り、その結果、稚仔の生残率が高まるためと考えられる。

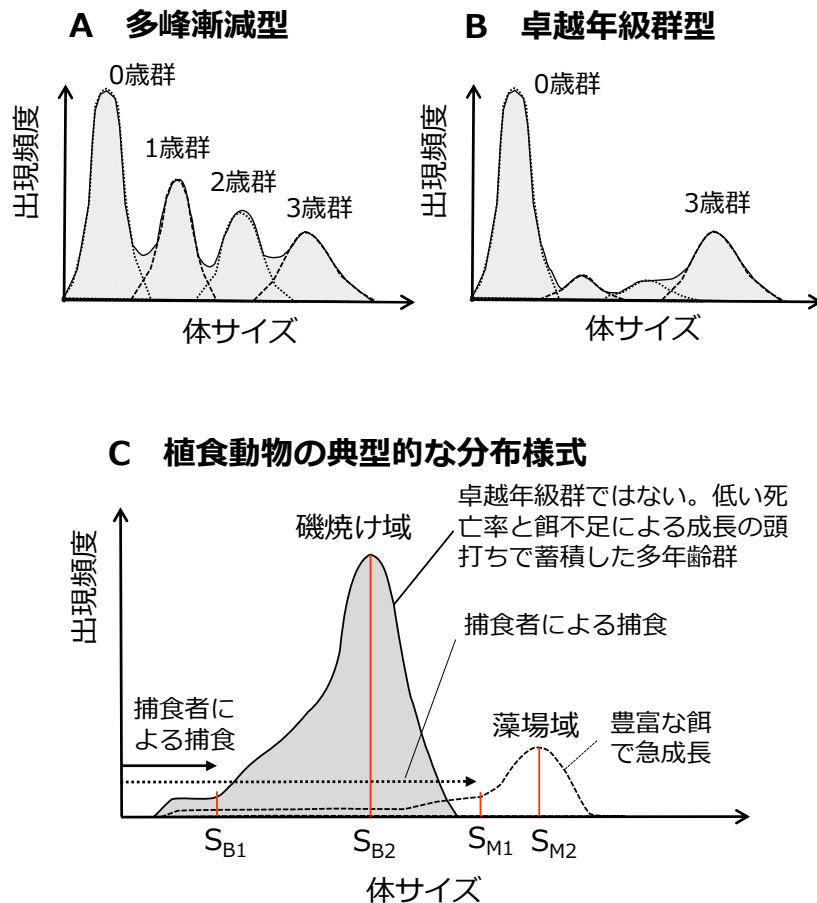


図 18 動物の体サイズ組成分布における特徴的な様式 (A と B) と植食動物の場合の典型的分布型 (C)

しかし、激浪などの特別の事象や漁獲の影響がなければ、健全な藻場とウニの優占する磯焼け域における植食動物の体サイズ級別分布は、[コラム 7](#) などの事例から、[図 18C](#) の模式図のようになると考えられる。稚ウニはいずれの場合でも少ない。この原因としては、稚ウニは巨礫の下などに隠れていることが多いため、見落としの可能性も考えられるが、捕食圧の低い場で巨礫をひっくり返して調べても、稚ウニが見出されるのはまれである ([Kawamata and Taino in press](#)) ことから、その可能性は低く、捕食以外の要因は考え難い。いずれにしても、ウニの成育初期 ( $< S_{B1} \approx$  殻径 15~30 mm, [図 18C](#)) の生残は通常、磯焼け域であっても、非常に低いが、ウニが小型個体 ( $> S_{B1}$ ) まで成長すると、磯焼け域では捕食可能な捕食者がかなり少なくなり、死亡率が著しく低下して、大部分のウニが生残するようになる。しかし、磯焼け場での成長は、餌不足により中型サイズ ( $\approx S_{B2}$ , [図 18C](#)) で頭打ちになるため、多年級群からなる単峰分布が形成されることになる。これに対して、捕食能力の高い捕食者が生息する藻場では、ウニは中型サイズまで捕食により個体数が減少するが、豊富な餌のために急速に成長して捕食され難いサイズ ( $S_{M1}$ , [図 18C](#)) に達して、磯焼け場ではみられない大型~超大型サイズ群 ( $\approx S_{M2}$ , [図 18C](#)) を形成する。以上のことから、高い捕食圧が維持されていれば、稚ウニが大量発生する余地はなく、卓越年級群も発生しない。逆に、稚ウニの大量発生や小~中型ウニの卓越年級群がみられる場合は、捕食圧は低いと判断できる。

捕食圧の推定のために行う植食動物の調査は、できるだけ捕食以外の要因で植食動物の分布が制限されていない場所を選択して行う必要がある。波動流の強い浅所、砂が薄く堆積する比較的静穏で平坦な岩礁、淡水が影響する領域は、物理環境的にウニが少ないので、避ける。調査適地としては、波浪の影響が比較的

弱く、砂の堆積のない大礫・巨礫場が挙げられる。そのような場であれば、ウニだけでなく、捕食者の活動もほとんど制限されないため、両者の食う・食われるの関係を明確にしやすい(Kawamata and Taino in press)。

## 6. 2 捕食圧の調査

捕食圧の調査には、一般に植食動物の係留実験と標識放流実験が用いられる。

係留実験とは、糸を体組織の一部に貫通させて植食動物をある場所に繋ぎ止めるもので、移動範囲は限られるため、追跡調査が容易になるだけでなく、死亡の有無を確実に調べられる。しかし、植食動物が拘束により自然状態よりも捕食されやすくなるため、係留実験による死亡率は実際よりも高い「潜在的捕食圧」を反映したものとなる。このため、係留実験による死亡率は絶対評価ではなく、場所間や植食動物の体サイズ群間の相対評価に用いる。なお、係留実験では、係留自体が死亡原因になる可能性があるため、係留による影響がないことを水槽実験等で確認しておく必要がある。

一方、植食動物の標識放流実験は、植食動物に標識を取り付けて野外に放流し、追跡して生残を確認することにより、死亡率を推定する方法である。標識放流実験では、植食動物は自由に移動できるため、自然状態に近い死亡率が得られると考えられるが、植食動物の移動量が大きい場合や追跡期間が長くなる場合は追跡が困難になり、死亡率自体が求められなくなる可能性がある。このため、データが得やすい係留実験の方がよく用いられる。

捕食による死亡率は、植食動物の体サイズだけでなく、場所や時期にも依存する。死亡率が高ければ、短時間の調査でも捕食を観察できる可能性はあるが、多くの磯焼け場では小型の植食動物以外は捕食できる動物がほとんど消失しているため、植食動物の体サイズによって長期間にわたり捕食が起こらない可能性がある。そのため、磯焼け場では小型個体を含む様々なサイズ群の植食動物を用いて捕食圧を調査する必要がある。

### 1) ウニの係留実験

ウニの殻に反口側から口側に向けて、中央の口器（アリストテレスのランタン）近くを避けて殻の周辺部にモノフィラメント糸を突き通す（図 19）。その方法として、布団針や縫い針を用いる方法が最も簡単である。その手順は以下のとおりである。まずウニを、口側を下にして木製の板の上に置く。次に、モノフィラメント糸を通した針を殻の周辺部に突き立て、金槌で打ち込む。このとき、口側の針先が棘を突いて少し大きめの穴が空いてしまうことがある。そのようなことが起こらないようにするためには、針先を簡単に突き通せる部分（歩帯）を探しながら針を小突くようにして打ち込む。最後に口側から少し出た針先をペンチで引き抜く。係留に使用するモノフィラメント糸には細くて強度の高い釣り糸が適する。大型のウニでは、捕食者が引っ張っても切れないよう、結節強度の高いものを選ぶ。ウニの殻から重りまでの間の釣り糸の長さがあまり長くなると、絡みついて運搬時の取り扱いが難しくなる。20cm ほどが適切であろう。

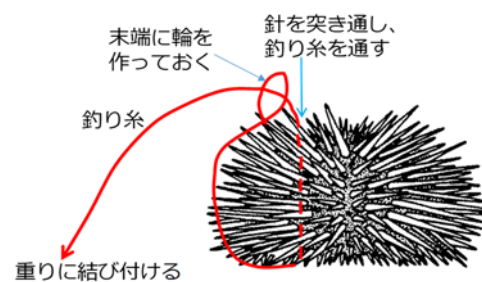


図 19 ウニの係留方法

### 2) 調査方法

捕食圧は、季節や波浪などの条件によって変化するため、短期間の調査では適切な評価は難しい。その点で、ウニの係留実験は比較的長期間の追跡調査が容易であるため、有利である。調査期間としては、想定される

捕食者の捕食活動が最も活発化する時期に調査を実施すると効率的に適切なデータが得られる。調査期間としては、たとえば、イセエビ対ウニであれば、2ヶ月ほどが想定される。

捕食圧は相対評価で行わなければならないため、参照区を設けて多点同時に調査を実施する必要がある。また時期的な変化を想定して、複数回の追跡調査により生残率（または死亡率）を調べる。

### 3) 捕食圧の解析

捕食圧は、係留または放流した植食動物の生残率からコックス比例ハザードモデルにより評価する。その手順を以下の事例で説明する。

**事例：**図 20 は A 地区保護区において、イセエビの生息する投石礁から距離の異なる 4 地点に係留したウニの生残率の経時変化を示す。各地点には同程度の大きさのツマジロナガウニ 30 個を 1 m 間隔に設置した重りに係留し、1 日、15 日、31 日及び 63 日後の生残率を調べた。各地点の死亡率は、係留 0～1 日後、1～15 日後、15～31 日後、31～63 日後の 4 つの観察期間に対して求められる。これらの死亡率は、一晩に捕食により死亡する確率（以下、瞬間死亡率という）と観察期間の日数によって変わる。当地ではウニの捕食者はイセエビ以外にはほとんど存在しない(Kawamata and Taino in press)ので、瞬間死亡率はほぼイセエビによる捕食圧を表すと考えられる。その捕食圧は、イセエビの繁殖周期、水温、波浪などの内外要因の変化に伴い、経時的に変化するが、イセエビの隠れ場の近くほど高くなると考えられる。コックス比例ハザードモデルでは、各場所間の瞬間死亡率の比が一定であると仮定し、基準となる瞬間死亡率（これをベースラインハザードという）に対する比を求める。この例では、投石礁から 80 m 以上離れると、係留ウニの生残率は周辺域と同じようになることが分かっているので、投石礁から 86 m 点の観測値を基準とする。コックス比例ハザードモデルのパラメータは、R 言語のパッケージ survival の関数 coxph を用いて推定できる。表 6 はその解析結果（抜粋）である。

表 6 はその解析結果（抜粋）である。表 6 がベースラインハザードに対する瞬間死亡率の比である。これより、投石礁より 60 m 以内の範囲では、捕食圧が一般漁場に比べて約 3 倍高く、統計的有意差 ( $P < 0.05$ ) が認められるが、79 m 点では有意な差はないと判断できる。

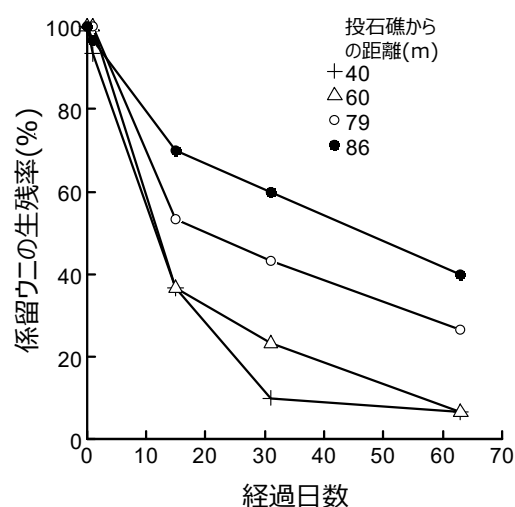


図 20 係留ウニの生残率の調査事例

表 6 コックス比例ハザードモデルによる解析結果

地点	係数 $\beta$	$e^\beta$	z 値	P
40 m 点	1.127	3.087	3.65	<0.001
60 m 点	0.984	2.675	3.22	0.0013
79 m 点	0.408	1.504	1.28	0.1994

## 6. 3 捕食者の特定

現場で植食動物の捕食者を調べる方法には、①植食動物を放流して目視観察する方法、②捕食者の胃内容物調査、③植食動物の被食痕から推察する方法、④係留した植食動物を録画する方法、がある。①の方法は捕食圧が高く、短時間で捕食が観察できる場合に有効な方法である。②の方法は、捕食者が予めわかって確認のために行う場合には有効であるが、捕食者が複数種存在する場合にその相対的影響を把握するのは困難である。③の方法は、特徴的な捕食痕が残る場合にのみ有効な方法で、イセエビによるウニの捕食

を判断するのに有効になることがある。イセエビが比較的大型のウニを捕食する場合は、口器よりも少し大きめの穴を空けて、殻内の組織をきれいに食べて、殻はほとんど無傷のまま残る（図 21）ことが多い(川俣ら 2016)。そのような死殻はイセエビ類特有の捕食によるもので、捕食者の推定に用いることができる。しかし、小型のウニではイセエビは殻ごと食べてしまい、ほとんど何も残らないことに注意する。

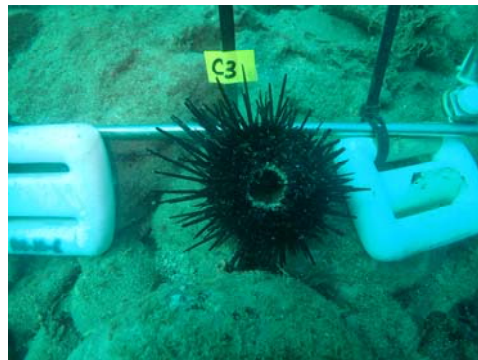


図 21 イセエビ特有の捕食痕のある係留ウニの死殻

以上の三つの方法と異なり、④の録画による方法は、植食動物の捕食シーンを撮影できれば、捕食者の特定は比較的容易である。今日、タイムラプス（インターバル）撮影機能を有する様々なカメラが市販されており、長時間録画に

より捕食者の特定が比較的容易になった。しかし、捕食者が夜行性である場合や捕食頻度が低い場合は、夜間や長期間のタイムラプス撮影が難しいため、特定は必ずしも容易ではない。適切な撮影時間間隔の設定や撮影用ライトが必要である。撮影の時間間隔については、捕食シーンが撮影できるよう、少なくとも 1 回の捕食に要する時間よりも短くする必要がある。イセエビによるウニ捕食では、ウニの大きさと種類にもよるが、3～5 分間隔でも捕食シーンの撮影は可能である(川俣ら 2016)。夜行性であるイセエビの夜間撮影にはフラッシュを利用できる。フラッシュはイセエビの行動にほとんど影響を与えない。海底をなるべく広範囲に撮影するため、カメラを海底から少し離れた高さに固定する。透明度にもよるが、海底から 1.2 m 離れて撮影した画像からでも頭胸甲長の測定は可能である。

なお、夜間撮影用として赤外線ライトを用いたカメラがあるが、水中では赤外線は水に強く吸収されてしまい使用に適さない。

図 22 は、A 地区保護区内でウニの捕食者を特定するため、釣り糸で重りに係留したムラサキウニを自動フラッシュによりタイムラプス撮影した画像の例である。小型（平均殻径 36 mm）と大型（平均殻径 63 mm）のウニを係留したところ、2 晩で CL40～150 mm のイセエビが観察されたが、ウニを捕食したのはすべて CL80 mm 以上の大型個体で、その大部分は他の海域ではほとんどみられない CL100 mm 以上の超大型個体であった (Kawamata and Taino in press)。

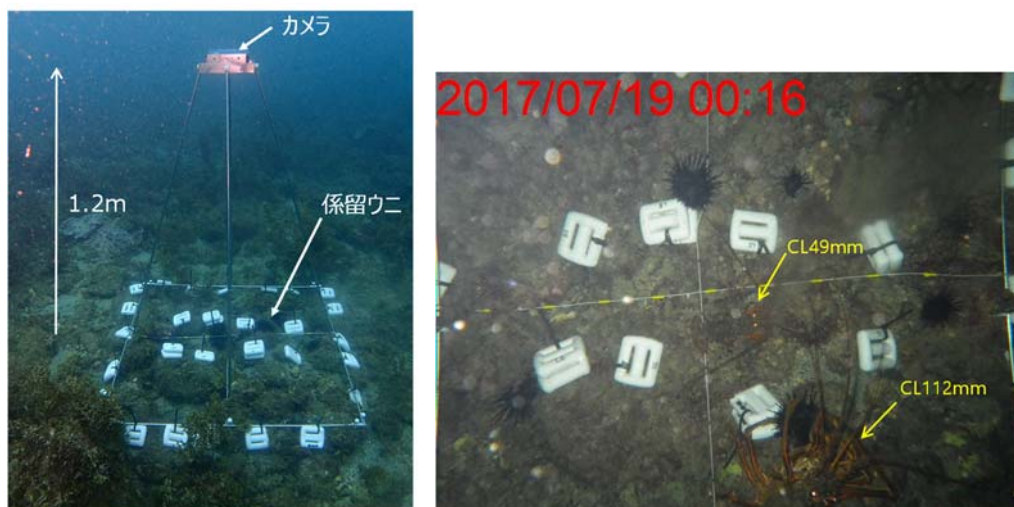


図 22 A 地区保護区内で行った係留ウニのタイムラプス撮影画像の例。右側写真中央の小型イセエビは県が規定する採捕可能な下限サイズを超えているが、係留ウニを全く捕食しなかった。

## 6. 4 捕食者の体サイズ組成の調査

捕食者の体サイズ組成の調査は、一般に漁獲物調査によって行われる。漁獲物調査は、個体そのものを直接計測できるため、精度のよいデータを得ることができる。しかし、漁獲物には、使用する漁具の漁獲性能にサイズ選択性の問題があるため、実際の個体群の体サイズ組成を反映していない可能性があること、試験操業自体が制限されること、漁獲が捕食者の個体群や行動に影響する可能性があることなどから、漁獲によらない非接触調査が望まれることもある。

非接触調査法としては、従来は専らダイバーによる目視観察が行われてきたが、熟練が必要であり、精度の問題もあり、映像技術を用いた代替法が検討されている。ただし、通常のカメラ1台で撮影しても奥行き情報が得られないため、正確な長さ計測のためには、複数のカメラを用いて異なる位置から被写体を同時に撮影するステレオ撮影と3次元画像解析が必要となる。ただし、平面画像に近似できる場合であれば、通常のカメラ映像でも信頼できる体サイズ計測は可能である。その例として、イセエビのタイムラプス撮影がある。イセエビは海底上を移動するため、[図 22](#)のように平坦な海底面上にXY座標を示すスケールを置いて撮影を行えば、画像解析によりイセエビの頭胸甲長を正確に計測することができる。

イセエビの場合、体サイズは一般に頭胸甲長 CL ([図 23](#) 左上) で表すが、日中の調査ではイセエビは岩の間などの穴に隠れているため、ステレオカメラを用いても CL は測定できない。また、保護区での調査では、イセエビを捕獲せずに巣穴にいる状態で調べる必要がある。そのようなときに [Kawamata and Taino \(2018\)](#) の方法は有効である。当方法では、まずステレオカメラで巣穴に隠れた状態のイセエビを撮影する。撮影ではフラッシュを用いて鮮明な画像を得る。イセエビは、フラッシュにより逃げることがないので、複数枚の写真撮影が可能である。予め決めた 14 の参照部位長 ([図 23](#) 左) のうち、可能なものを 3次元画像解析により計測する。参照部位長と CL との間には一定の関係があり、既知の回帰式 (アロメトリー式) を用いて、参照部位長から CL を推定する。通常、イセエビ 1 尾に対して複数の参照部位長を計測できるため、複数の CL 推定値が得られる。また、参照部位長と CL との関係には雌雄差があるものもないものがあり、その差を利用して雌雄判別が可能になる。雌雄判別ができると、より精度の高い CL 推定値が得られる。この方法により、95% のイセエビの CL を相対誤差 10% 以下で推定でき、投石礁では、少し見にくい写真 ([図 23](#) 右) であっても発見されたイセエビ (触角しか見えない個体も含む) のうち、約 61~83% の個体の CL 推定が得られている ([Kawamata and Taino in press](#))。

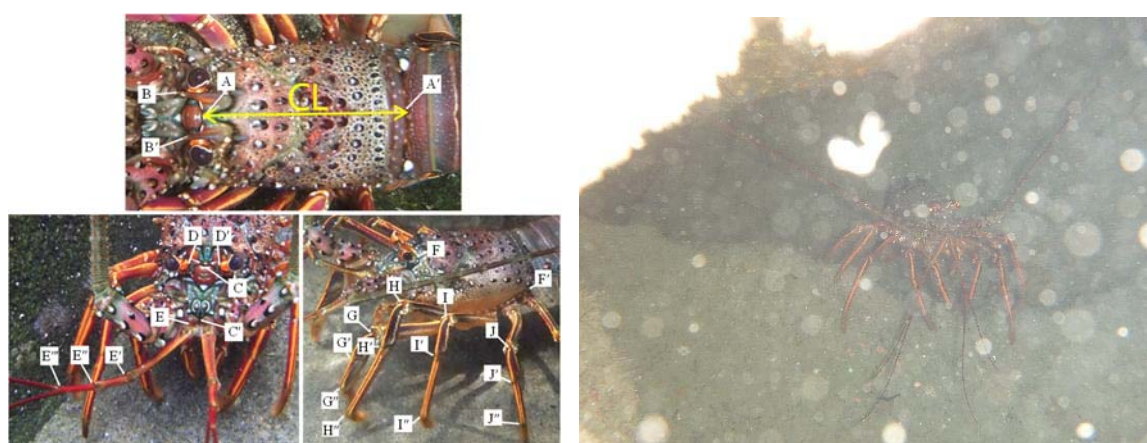


図 23 ステレオカメラを用いたイセエビの CL 推定法 ([Kawamata and Taino 2018](#))における参照部位長の定義 (左) と CL を推定できた画像の例。A-A'間距離が頭胸甲長 CL で、それ以外の B-B'間距離、C-C'間距離などが参照部位長。

## 6. 5 捕食の影響範囲の調査

イセエビのように捕食者の行動圏が生息場（隠れ場）の周辺に限られる場合、生息場の近傍では捕食圧は高いが、生息場からの距離の増加に伴い捕食圧は低下して、ある距離以上では周辺の磯焼け域と同じ水準になる（「6. 2 捕食圧の調査」参照）。捕食圧が周辺域と同じ水準に達するまでの範囲がイセエビの行動圏と考えられる。また、その被食者がウニのように移動性が低ければ、捕食の影響が植食動物の生息密度や体サイズ組成に現れるので、それらの空間変化から捕食の影響範囲として捕食者の行動圏を推定できる。

イセエビによるウニの捕食の場合、捕食圧はウニの係留実験により直接測定できるほか、以下のようにウニの生息密度とサイズ組成からも間接的に推定できる。

イセエビの隠れ場からの距離の異なる複数点でウニの生息密度とサイズ組成を調査する。調査地点は、隠れ場からの距離以外の環境要因が同じになるよう、等深線に沿ってウニが好む大礫・巨礫場などの同じような底質条件の場を選ぶ。また、周辺対照区でも同じような環境の場で同様の調査を行い、バックグラウンドデータを取得する。図 24 は、A 地区保護区での調査結果の例で、イセエビの生息する投石礁からの距離別のウニ殻径組成を示す。図 17 に示したように、投石礁からの距離の増加に伴い、ウニの生息密度が増加するが、それだけでなく、ウニの最大サイズや最頻度サイズが小さくなる。この投石礁からの距離に伴うウニの小型化は、少なくとも距離 76 m まで継続的にみられたが、距離 88 m では大型個体のサイズが周辺漁場の磯焼け場と同程度に小型化した。このような殻径サイズの変化からも捕食の影響範囲を推定することができる。

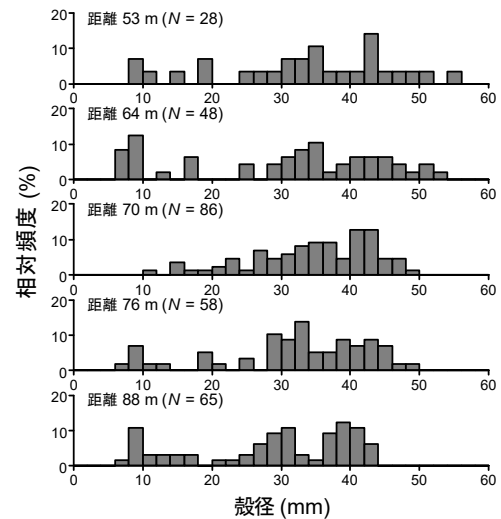


図 24 A 地区保護区内投石礁からの距離に伴う優占ウニ（ツマジロナガウニ）の殻径組成の変化

## 7. 対策の手順

捕食者と植食動物の個体群の現状と将来予想に基づき、捕食による植食動物個体群の制御の必要性和その可能性のある対策として捕食者の個体群管理を検討する。その管理は、計画(P)、実行(D)、評価(C)、改善(A)の PDCA サイクルを繰り返すことにより、効果確かめながら実施し、捕食者大型個体を徐々に増やせるよう、規模拡大を図る。

### 【解説】

「6. 捕食状況の把握」により把握される、植食動物の生息状況及び捕食状況を踏まえて、捕食者を利用した藻場回復を検討する。それらの情報に加えて、対象域とその周辺海域での藻場とその食害状況の推移、並びに、これまでの植食動物対策についても情報を収集し、捕食者—植食動物—海藻からなる生物群集がどのような状態にあり、今後どのように変わるかを判断、予想する。その結果から、対象域が表7中の4つのケースのどれに該当するかを考えて、対策を検討する。

表7 藻場状況の分類と、想定される捕食者保護のシナリオと将来予測

ケース名	状況	捕食者保護のシナリオと将来予測
ケース1	高い植食圧の磯焼け状態が持続する海域で、局所的に藻場が維持* <sup>1</sup>	シナリオ 1A：保護の現状維持により藻場も維持 シナリオ 1B：保護の後退により藻場が減少
ケース2	食害により藻場が減少傾向	シナリオ 2A：保護の強化により藻場が維持 シナリオ 2B：保護の現状維持により藻場が衰退
ケース3	植食動物の人為的除去により藻場が再生	シナリオ 3A：再生藻場での捕食者の保護により藻場の持続性が向上 シナリオ 3B：植食動物の人為的除去のみを継続的に実施し、藻場を維持
ケース4	植食圧の高い磯焼け状態が長年持続	シナリオ 4A：捕食者個体群の復活を図り、藻場を回復、維持 シナリオ 4B：植食動物の人為的除去等により再生した藻場を、捕食者の保護区として維持

\*<sup>1</sup> 捕食以外の要因で藻場が残る場合で、波浪の影響の強い浅所、砂に薄く覆われた静穏で平坦な岩礁、淡水や濁りが恒常的にある領域などの植食動物の活動が物理的に制限される場を除く。

ケース1は、植食圧の高い磯焼け域ですでに捕食者の保護区がある、高知県A地区や徳島県B地区のような場合が該当する。捕食により藻場が維持されていることを理解せずに、捕食者の保護に努めない場合（シナリオ1B）は藻場が減少する可能性が高いことに留意する。

ケース2は、植食活動の増加、または水温上昇等に起因する海藻の生育不良により、藻場が減少傾向にある場合である。この場合は、捕食者個体群が残っている可能性があり、捕食者保護の強化により藻場を維持できる（シナリオ2A）可能性がある。

ケース3は、磯焼け域において、従来の方法である植食動物の人為的除去により藻場への転換に成功している場合である。磯焼け域に藻場が局所的に形成されると、アワビ、サザエなどの貝類、稚仔魚だけでなく、捕食者も生息するようになる。このような場合に、捕食者の役割を理解し、捕食者がある水準に達するまでは漁獲せずに保護すれば、藻場の安定化と植食動物除去の軽減が期待できる（シナリオ3A）。逆に、捕食者の役割を理解せずに、捕食者を乱獲すると、植食動物の除去を継続的に行わない限り、藻場を維持できない（シナリ

オ3B)。

ケース 4 は、植食圧が高い磯焼け状態が長年継続し、すでに有力な捕食者が絶滅状態になっている可能性が高い場合である。このような場合は、有力な捕食者の探索から始め、捕食者の生息適地を保護してその捕食によりその周辺に植食動物の少ない領域が形成され、藻場が回復するのを待つ（シナリオ 4A）か、植食動物の人為的除去等により藻場を再生させ、その藻場を捕食者の保護区とすること（シナリオ 4B）が考えられる。

いずれのケースでも、捕食・被食の体サイズ依存性や捕食量に関する知見に基づき、捕食者個体群の適切な管理計画を立てる必要がある。捕食に関する知見が十分でない場合は、水槽での捕食実験（コラム 13）により知見を収集する。ケース 4 などのように、保護すべき捕食者自体が明らかでない場合は、その選定から始めなければならない。その際に、想定される手順を図 25 に示す。

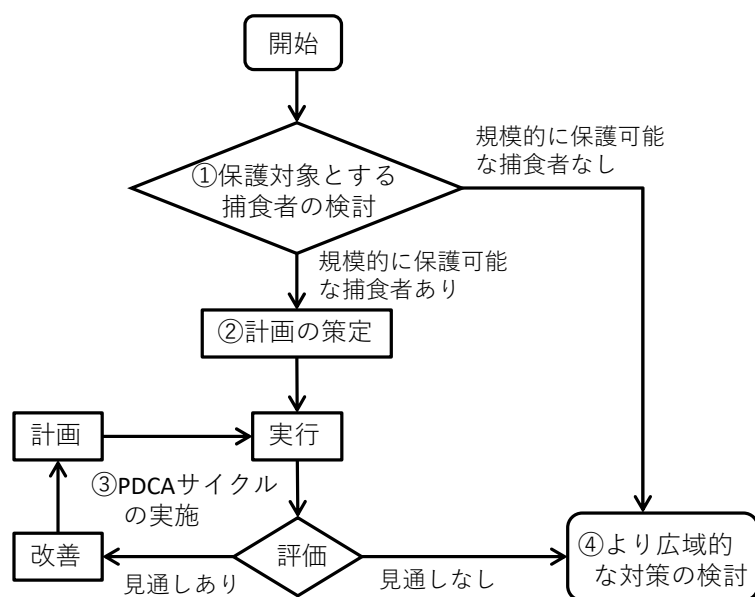


図 25 捕食者を利用する手法の手順

### ① 保護対象とする捕食者の検討

保護対象とすべき捕食者が不明の場合は、対象海域に生息する動物を調査しただけでは、捕食者が乱獲により絶滅近くまで減少していたり、本来の捕食能力を持たない小型個体ばかりになっていたりして、見過ごされる可能性がある。そのような見落としがないよう、現地での漁獲物調査だけでなく、文献や聞き取り調査により、潜在的捕食者を探索する。潜在的捕食者の中から、捕食能力の高い捕食者を選定する。捕食能力については、文献情報がなければ、捕食実験（コラム 13）により、捕食者が捕食できる植食動物の上限サイズや、磯焼け域の平均的サイズの植食動物を年間捕食できる個体数等を調べる。水槽実験により見出された潜在的捕食者については、さらにケージや囲い網を用いた小規模現地実験（コラム 14）を行い、現地でのデータを得ることが望ましい。それにより、実験水槽にはなかった様々な要因の影響を洞察でき、確証をもって計画策定を行うことができる。

磯焼け域においてウニ除去等により藻場の再生に成功している場合は、自然に生息したり来遊したりする捕食者も有力な保護対象になり得る。その中には、イセエビのように比較的良好に知られた捕食者のほかに、ウツボのような、知見の乏しい捕食魚も含まれる。捕食魚は、個体数が少なくても、植食性魚類の行動に大きく影響する可能性があるため、保護対象候補とすることが望ましい。

選定された捕食者が、漁協が管轄する地先で保護可能であるかを判断する。

## ② 計画の策定

主要な手段となる保護区の設定と漁獲管理について計画を策定する。

保護区の設定では、植食動物の人為的除去により再生させた藻場の分布域や、捕食者の生息に適した自然地形や、防波堤、投石礁、魚礁などの人工構造物の設置状況を把握して、保護区の候補地をしばりこむ。保護区の選定では、管理のしやすさや現状の利用状況なども考慮する。保護区の設定では、特に漁獲制限に対する漁業者の抵抗感は強いが、磯焼けや過疎化により、ほとんど利用されていない漁場は受け入れやすい候補地になり得る。しかし従来、漁業にあまり利用されていない劣等漁場の中には、捕食者の生息に適した場がないために保護区に設定しても捕食者の生息が見込めない場合もある。そのような場では、投石礁や増殖礁の設置も選択肢の一つとなる。

漁獲管理では、保護区内に生息する捕食者の個体数や体サイズ分布を予め把握しておき、それに基づいて残すべき捕食者の体サイズ群の目標個体数または許容漁獲個体数を定め、漁獲管理を行う。

## ③ PDCA サイクルの実施

大規模な保護区を最初から設定したり、短期間に保護区の効果を期待したりすることは難しい。また捕食者は、植食動物だけでなく、様々な生物に影響を及ぼし、生態系全体を徐々に変えていくため、生物相が安定するまでに長期を要する可能性がある。以下の項目の点検により、効果を確認しながら、漁獲管理と保護区を徐々に強化・拡大して、植食圧の高い磯焼け漁場を海藻の繁茂する優良漁場に変えていく。

- 捕食者の個体数増加と大型化
- 捕食者の生息場周辺での植食動物の減少
- 植食動物の減少に伴う藻場の拡大

最初の段階では小さな効果しかみられない。しかし、捕食者が存在すれば、捕食の効果は必ず現れる。その効果を見逃すことなく、定量的に把握し、予測を立てながら規模拡大を図ることが肝要である。しかしながら、捕食者の行動圏が保護区の範囲を越えているなどの理由により捕食者を増やし、大型化できる見通しが立たない場合もあり得る。評価ではそのようなことがないかを点検する。

## ④ より広域的な対策の検討

有望な捕食者が見つかったも、集落や漁協単位で設定・管理できる規模の保護区では、捕食者個体群の回復を図れないことは十分あり得る。そのような場合は、公的研究機関や都道府県などの協力を得て、行動圏などから逆に捕食者個体群の保全に必要な保護区の面積や領域を割り出し、保護区の設定を地域社会全体で検討する。

### コラム 13 水槽を用いた捕食実験

水槽での捕食実験は、植食動物の潜在的な捕食者を探索したり、捕食可能量や捕食に及ぼす体サイズの影響を把握したりするための最も簡便な方法であるが、以下の事項に留意する必要がある。

**捕食・被食におけるサイズ依存性** 「5.2 捕食者の体サイズ」で述べたように、食う・食われるの関係にはサイズ依存性がある。実験に用いる捕食者と植食動物には図 11 や図 14 の実験のように、様々なサイズの個体を用いて捕食可能なサイズ範囲を把握できるようにする。

**捕食の経時変化** 捕食には季節変化があるだけでなく、学習や脱皮も影響することがあり、短時間の捕食実験では捕食率が過小評価される可能性があることに留意する。

図 26 は、イセエビ 1 個体にムラサキウニ（殻径 24～67mm）を不足なく与え続けたときの捕食率の実験例である。実験開始直後からウニを捕食したイセエビ個体がある一方で、2 ヶ月近くウニを全く捕食しなかった個体もみられた。しかし、いずれのイセエビもウニを捕食し始めると、継続的に捕食するようになり、イセエビによるウニの捕食には学習が必要であることが示唆された。また、イセエビは大型個体ほどよく捕食し、最大（CL91 mm）のイセエビで年間 342 個のムラサキウニを捕食したが、捕食率は脱皮の前後で減少するほか、8 月下旬～9 月中旬に活発化した後、12 月～2 月にほぼ停止するという顕著な季節変化を示した。

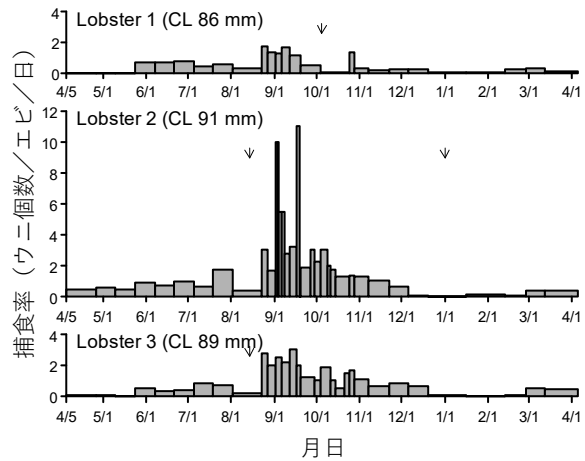


図 26 捕食実験例：イセエビによるムラサキウニの捕食率。↓：脱皮日を示す。

図 27 は、イシガニ 1 個体にキタムラサキウニ（殻径 18.8～42.6 mm）を与えたときの捕食率の実験例である。捕食は 5～6 月頃から 11 月頃にみられ、12～4 月頃（水温 12℃以下）はほぼ停止することと、甲幅 80～90mm ほどのイシガニは 112～350 個（1.5～5.6kg 湿重量）/年/尾のウニを捕食できることが示された。

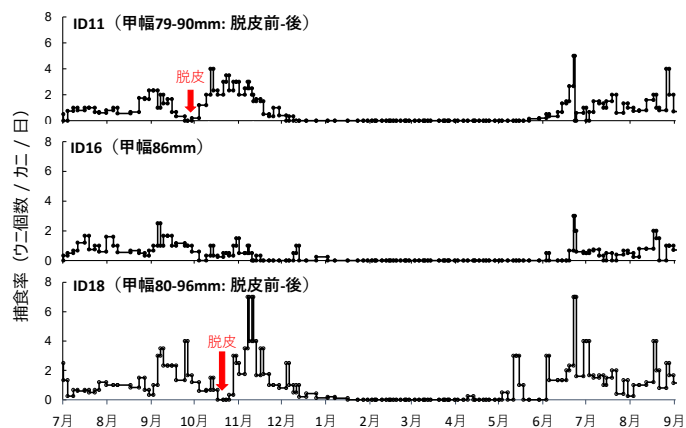


図 27 捕食実験例：イシガニによるキタムラサキウニの捕食率

**実験値の解釈** 実験水槽では、一般に捕食者に対して植食動物のみを不足なく与えて、捕食率として一定期間

（日、週、月など）に捕食する植食動物の個体数や重量が求められる。しかし、実海域では捕食者は植食動物だけでなく、様々な生物を消費しているため、実際の捕食率はそれよりも減少すると考えられる。したがって、捕食率の実験値は潜在的な最大捕食率であり、参考値として用いる。

#### コラム 14 ケージや囲い網を用いた小規模現地実験

捕食者の存在が植食動物に及ぼす影響を定量的に評価する実験手法として、囲い網やケージを用いた方法（例えば、Andrew and Choat 1982; Hereu 2006）がある。囲い網は、比較的広い面積を確保でき、捕食魚にも適用できるが、波浪により破損しやすいため、波の遮蔽域に限られる。その点で、ケージを用いた実験（以下、ケージ実験という）は、小規模であれば、耐波性能を比較的確保しやすく、実施しやすい。以下では、そのケージ実験について解説する。

ケージの目合は、対象とする植食動物を予めケージに入れておく場合は、植食動物と捕食者がともに通過できないものとしなければならない。しかし、対象とする植食動物が捕食者よりかなり小さい場合は、コラム 4 で述べたように、目合を植食動物は通過できても、捕食者ではできない大きさにすると、捕食者による影響範囲を調べることもできる。ケージの材料には、耐久性に優れたステンレス鋼や溶融亜鉛めっき鋼などを用いることができるが、線径が細くなるので、腐食により破損しやすく、数年以上維持するのは難しい。実験期間が 1 年ほどで、波浪もあまり強くなければ、耐候性のある硬質プラスチック製ネットを用いる方がよい。ケージの大きさは、生物的にはできるだけ大きくした方がよいが、製作、設置等の便宜も考慮して決める。1×1m～2×2m ほどが実用的であろう。試験地にはケージを設置しやすい平坦な岩礁を選定する。

ケージ実験の例として、キタムラサキウニの磯焼け場で行ったイシガニを捕食者とした実験（図 28）を示す。この例では、ステンレス製フレームにより補強した硬質プラスチック製ネット（開口部：28.5×30mm）からなる 2×2×0.25m のケージを製作した。キタムラサキウニの優占する巨礫場に、内部底面に大礫を敷き詰めたケージ 3 基設置した。各ケージの中にはアカモク種苗が着生したブロックとともに、キタムラサキウニ 37 個と大型のイシガニ（甲幅 75～89mm）を 0 尾（対照区）、1 尾または 2 尾を入れて実験を開始した。イシガニなしのケージでは周辺からもウニが侵入し、アカモクは 13 日目ですでに消失していた。これに対して、イシガニ 1 尾及び 2 尾のケージでは、ウニの密度は減少して低水準（<20 個/4m<sup>2</sup>）を維持するとともに、アカモク種苗は 3 ヶ月以上生残り、成長していた（図 29）。イシガニは実験途中で死亡により不在となったため、追加する必要があったが、この実験により、大型のイシガニが少なくとも 1 尾/4m<sup>2</sup> 以上生息すれば、ウニの密度が低く抑えられ、海藻が生残できる可能性が示唆された。



図 28 磯焼け場に設置したケージ

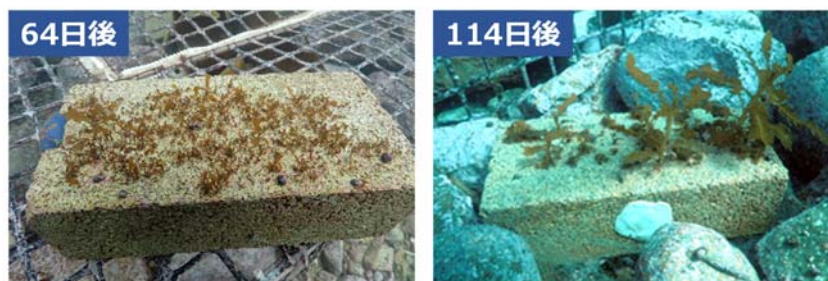


図 29 イシガニを入れたケージ内に残ったアカモク

## 8. 今後の展望

捕食者の保護は、藻場を含む生物資源の回復のための最も有力で実現可能性の高い手段である。その実現には、保護区的设计と効果予測のための手法の確立と密漁などに対して実効性のある対策が必要であり、広域的な取り組みが不可欠である。

### 【解説】

捕食者に関する問題は、藻場だけでなく、漁場や漁業全体に関わる問題でもある。

捕食者利用による藻場回復には、従来と異なる漁獲管理が必要となる。その違いを図 30 に模式的に示す。従来の漁業では、漁獲に体長制限を設け、未成熟個体は保護しても、所定の規制サイズを超えた成熟個体は、若齢であっても漁獲が規制されないため、大型高齢群の欠落した体サイズ組成となる（図 30 上図）。その極端な管理形態が、水産有用種の種苗を放流し、漁獲サイズに達した個体をすべて採捕するという一代採捕型の栽培漁業である。このようなつくり育てる漁業が推進されてきた背景には、農業のように生物的・物理的環境を制御できれば、対象生物のみをより多く生産できるという期待がある。しかし陸上では、圃場整備、耕作、農業による病虫害防除、ネットなどによる食害防除、施肥といった管理が技術的・経済的に可能であるが、海域では同様の作業が容易ではなく、期待した効果を得るのは難しい。

このような現実を直視すれば、捕食者を利用した藻場回復は、管理作業をほとんど要しない点で、実現可能性が高く、今後推進すべき一つの選択肢となる。しかし、その実現には、藻場がどのような生物的・物理的メカニズムの上に維持されているのかを理解し、それを考慮した、適切な漁獲管理が必要である。その中で、漁獲対

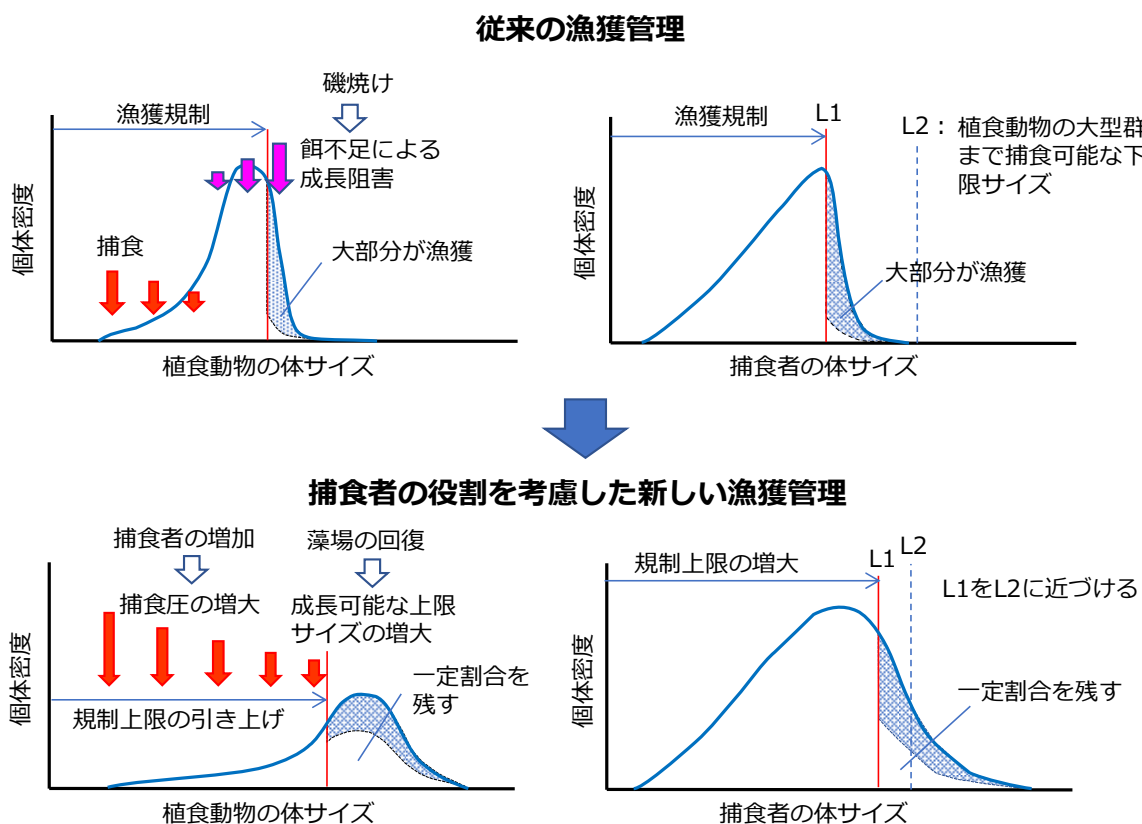


図 30 従来の漁獲管理と捕食者の役割を考慮した新しい漁獲管理との違いを説明するための模式図。想定される水産的に有用な植食動物とその捕食者の体サイズ別個体密度の変化

象となる捕食者と植食動物の大型高齢個体の保護が最重要課題となる。ここで、植食動物の大型個体も保護対象としているのは、捕食者の保護により高まる捕食圧に耐えて植食動物の個体群を維持するためである。大型個体は、高齢<sup>注1</sup>であるために再生産に寄与しないので早めに獲った方がよいといった考えがあるが、一般に高齢・大型個体は大きい卵を大量に産むなど、繁殖能力に優れている（例えば、栗田 2010）ことから、その保護は加入量の増加のために望ましい。捕食者と植食動物の大型群を維持するための方法として、図 30 下図に示すように漁獲における体サイズ規制上限の引き上げとその上限サイズを超える大型群を一定程度残すことが考えられる。

しかし、大型群をどの程度残せばよいか、残した結果、生物相がどのように変わるかについては、知見が十分でない現状では予測も難しい。まずは、人の影響の及ばない条件下で、生態系を構成する種の個体群がどのように推移していくのかを明らかにし、科学的知見の充実を図る必要がある。しかしながら、従来の集落単位で管理する小規模保護区では、効果や保護対象種に限りがあるだけでなく、密漁の危険が増すことを懸念して調査の実施自体が難しい。十分な規模の保護区の設定には、都道府県などの行政による密漁対策が不可欠である。理想的には、都道府県レベルでの大規模な全面禁漁区を設定し、魚介類がどのように殖え、周辺域への魚類の移動（この効果をスピルオーバー効果 spillover effect<sup>注2</sup>という）や卵・稚仔の広がりにより周辺漁場でどのような効果が得られるかをモニタリングするとともに、捕食者の行動範囲と体サイズ組成の変化や生物相に及ぼす間接効果などを調査し、科学的知見に基づき、より効果的な保護方法を確立することが望まれる。

将来にわたり確実視される高齢化と人口減少、及び長期にわたる魚価の低迷から、人手を要しない保護区導入の必要性は今後、益々高まることが予想される。漁業者の減少が漁獲量を減少させ、捕食者個体群を回復させるのではないかという見方もあるが、それは希望的観測に過ぎない。遊漁の影響はあらゆる地先に及んでおり、また近くに漁業者が住まなくなった漁場では、資源を持続的に利用するという意識が薄れ、売れるものはすべて獲るといった略奪的漁業が強まったり、漁業者の監視の目が届かないために密漁が横行したりする可能性の方が高い。十分な密漁対策を施した実効性のある保護区の設定が望まれる。それと同時に、公的研究機関が保護区の設定前後の生物相のモニタリングと周辺海域との比較調査による効果把握を行い、保護区政策を推進するための科学的知見の集積を図る必要がある。

---

注1 自然界では、年齢的に弱った個体は死ぬ前に捕食されてしまうため、自然界における高齢個体とは、一般に生理的寿命よりもかなり若く、生存競争に勝ち残った強壮な個体である。

注2 一般に波及効果と訳されるが、我が国の水産分野では「しみ出し効果」と呼ばれることが多い。しかし、spillover とは一杯になったものが周辺に流れ出すことを指す単語で、この場合は保護区内で飽和状態まで殖えた魚介類が周辺に溢れ出すことを意味する。その意味からは、溢流<sup>いつりゅう</sup>効果の方が適訳である。

## 参考文献

- Agatsuma, Y., and H. Hoshikawa. 2007. Northward extension of geographic range of the sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* in Hokkaido, Japan. *J. Shellfish Res.* **26**:629–635.
- Andrew, N.L., and J.H. Choat. 1982. The influence of predation and conspecific adults on the abundance of juvenile *Evechinus chloroticus* (Echinoidea: Echinometridae). *Oecologia* **54**:80–87.
- Babcock, R. C., S. Kelly, N. T. Shears, J. W. Walker, and T. J. Willis. 1999. Changes in community structure in temperate marine reserves. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **189**:125–134.
- Barrett, N.S., C.D. Buxton, and G.J. Edgar. 2009. Changes in invertebrate and macroalgal populations in Tasmanian marine reserves in the decade following protection. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **370**:104–119.
- Dikötter, F. 2010. Mao's Great Famine: The History of China's Most Devastating Catastrophe, 1958–1962. Bloomsbury, London (中川治子訳, フランク・ディケーター著「毛沢東の大飢饉、史上最も悲惨で破壊的な人災 1958–1962」, 草思社, 2019).
- Duffy, J.E., and M.E. Hay. 2000. Strong impacts of grazing amphipods on the organization of a benthic community. *Ecol. Monogr.* **70**:237–263.
- Edgar, G. J., and N. S. Barrett. 1999. Effects of the declaration of marine reserves on Tasmanian reef fishes, invertebrates and plants. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **242**:107–144.
- Elton, C. 1927. *Animal Ecology*. Macmillan Co., New York.
- Estes, J. A., and J. F. Palmisano. 1974. Sea otters: their role in structuring nearshore communities. *Science* **185**:1058–1060.
- Fujita, D., R. Ogata, S. Akita, K. Takagi, and H. Yamada. 2013. Are there any top-down controls in *Diadema* barrens in the warm temperate Pacific coasts of Japan? *Cahiers de Biologie Marine* **54**:615–624.
- Guidetti, P. 2006. Marine reserves reestablish lost predatory interactions and cause community changes in rocky reefs. *Ecol. Appl.* **16**:963–976.
- Hairston, N. G., F. E. Smith, and L. B. Slobodkin. 1960. Community structure, population control, and competition. *Am. Nat.* **94**:421–425.
- Hereu, B. 2006. Depletion of palatable algae by sea urchins and fishes in a Mediterranean subtidal community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **313**:95–103.
- Hereu, B., M. Zabala, and E. Sala. 2008. Multiple controls of community structure and dynamics in a sublittoral marine environment. *Ecology* **89**:3423–3435.
- 平岡 雅規, 田中 幸記, 田井野 清也, 蜂谷 潤. 2012. 温暖化最前線の藻場変動と対応策. *海洋と生物* **34**:314–318.
- 井上 正昭. 1963. イセエビの相対成長について. *水産増殖* **11**:143–147.
- 川俣 茂, 田井野 清也, 宮地 麻央, 中村 洋平. 2016. イセエビによるツマジロナガウニのサイズ選択的捕食. *日本水産学会誌* **82**:306–314.
- Kawamata, S., and S. Taino. 2018. A novel in situ method for estimation of the carapace length of sheltering spiny lobsters, *Panulirus japonicus*, via stereo photography. *Fish. Res.* **201**:56–67.
- Kawamata, S., S. Taino, and K. Tanaka. 2019. Persistent macroalgal beds in the warming waters of southwest Japan: a trophic cascade in a marine protected area with artificial reefs. pp.96–99 in *Proceedings of International Conference on Fisheries Engineering 2019*. the Organizing Committee of the International Conference on Fisheries Engineering, Nagasaki, Japan.
- Kawamata, S., and S. Taino. in press. Trophic cascade in a marine protected area with artificial reefs: spiny lobster predation mitigates urchin barrens. *Ecol. Appl.*
- 清本 節夫. 2011. 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* **66**:48–60.
- 栗田 豊. 2010. 産卵親魚個体群の繁殖能力の時空間的変化が加入量に及ぼす影響. *水産海洋研究* **74**:4–18.
- 栗林 貴範, 阿部 剛史, 門谷 茂. 2014. 北海道日本海沿岸における栄養塩濃度の長期トレンドと海藻藻場. *沿岸海洋研究* **52**:75–81.
- Ling, S.D., C.R. Johnson, S.D. Frusher, and K.R. Ridgway. 2009. Overfishing reduces resilience of kelp beds to climate-driven catastrophic phase shift. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **106**:22341–22345.
- 三谷 曜子, 北野 雄大, 鈴木 一平. 2020. 道東沿岸域において再定着しつつあるラッコの摂餌生態の解明

- 日米北太平洋ラッコ研究グループ—. 自然保護助成基金助成成果報告書 **28**:116–122.
- 大谷 清隆, 大西 光代. 1995. 北海道南西沿岸のこんぶ生産量の春ニシン漁獲量と沿岸水温による重回帰分析. 海の研究 **4**:175–185.
- Pederson, H., N. Barrett, S. Frusher, and C. Buxton. 2008. Effect of predator–prey and competitive interactions on size at emergence in the black-lip abalone *Haliotis rubra* in a Tasmanian MPA. Mar. Ecol. Prog. Ser. **366**:91–98.
- 三本菅 善昭. 1994. 磯焼けの生態. 水産庁中央水産研究所.
- Sangil, C., S. Clemente, L. Martín-García, and J.C. Hernández. 2012. No-take areas as an effective tool to restore urchin barrens on subtropical rocky reefs. Estuar. Coast. Shelf Sci. **112**:207–215.
- Schuenhoff, A., M. Shpigel, I. Lupatsch, A. Ashkenazi, F.E. Msuya, and A. Neori. 2003. A semi-recirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed. Aquaculture **221**:167–181.
- 白石 一成. 1997. 肉食動物のキタムラサキウニに対する捕食に及ぼす水温の影響. 水産増殖 **45**:321–325.
- Stolzenburg, W. 2008. Where the Wild Things Were: Life, Death, and Ecological Wreckage in a Land of Vanishing Predators. Bloomsbury USA (中野香方子訳, ウィリアム・ソウルゼンバーグ著 「捕食者なき世界」. 文藝春秋, 2014).
- Tanaka, K., S. Taino, H. Haraguchi, G. Prendergast, and M. Hiraoka. 2012. Warming off southwestern Japan linked to distributional shifts of subtidal canopy-forming seaweeds. Ecol. Evol. **2**:2854–2865.

## 調査担当者

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産技術研究所（旧水産工学研究所）<sup>1)</sup> 川俣 茂  
水産技術研究所（旧東北区水産研究所）<sup>1)</sup> 八谷光介  
徳島県農林水産総合技術支援センター水産研究課 棚田教生<sup>2)</sup>、中西達也<sup>3)</sup>  
鹿児島県水産技術開発センター 猪狩忠光、市来拓海、吉満 敏

## 手引き執筆者

川俣 茂

<sup>1)</sup> 令和2年7月、所属機関名が組織改変により変更

<sup>2)</sup> 平成30年度担当

<sup>3)</sup> 平成31年度担当