

【学会賞受賞講演】

藻場回復のためのハードとソフト対策に関する研究

桑 原 久 実 *

Studies on Tangible/Intangible Measures for Seaweed Bed Recovery

Hisami KUWAHARA *

Abstract

Reduction of seaweed beds called 'isoyake' has happen in most of coastal prefectures in Japan, most of are due to excessive grazing by sea urchins and herbivorous fish. Several studies and countermeasures have been undertaken to recover from barren ground, but there were problems such as one-off trials and impracticality, therefore, it was necessary to show the concept and procedure of systematic measures. First, Isoyake Recovery Guideline (First Edition, Fisheries Agency, 2007) showed the basic concept and concrete procedure for countermeasures as follows. (i) adaptive management for successful reforestation through continuous learning and feedback control, (ii) flow chart consisted for selecting appropriate recovery techniques, (iii) organized cooperation of volunteers, citizens, enterprises, specialists, and local governments to support fishermen. Next, from the elemental technology development for tangible/intangible measures, reforestation facilities that control of sea urchin grazing with stones and blocks, development of sea urchin suction device and technological development to remove the gathering *Kyphosua bigibbus* with a gill net were briefly outlined.

1. はじめに

水産生物を安定に継続して生産するためには、藻場をはじめとする水産生物の生活基盤（住処、餌場、産卵場等）を良好な状態に保つ必要がある。筆者が磯焼け対策の研究を始めたのは1990年半ばで、既に、藻場が大規模に消失する磯焼けが大きな問題^{1,2)}になっていた。**Photo 1**は、ウニの食害による磯焼けを示す。ウニ（黒丸）が高密度に分布し、海藻の幼芽を食べるので藻場が形成されない。餌料海藻が無いのでウニのほとんどが空ウニ（身入りが少ない）であり、漁業者は売り物にならないため漁獲しないので、写真のような磯焼け状態が継続する。**Photo 2**は魚の食害による磯焼けを示す。通常、カジメは茎の先端に葉があるが、この葉が魚の食害により脱落し茎だけになっている。茎の先端にある成長帯まで食べられると枯れることになる。このような磯焼けを改善するために、幾つかの研究や対策に取り組まれてきたが、単発的な試行であったり、効果が認められるが実用性がなかったりが繰り返され、系統立てて具体的な対策に取り組む事例は見あたらなかった。



Photo 1 Barren ground by sea urchins.



Photo 2 Barren ground by herbivore fishes.

2021年9月6日受付, 2021年9月7日受理

キーワード: 磯焼け, 藻場回復, ハード対策, ソフト対策

Key words : Barren ground, Seaweed bed restoration, Tangible measures, Intangible measures

Fisheries Technology Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-8684, Japan (国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産技術研究所 〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4)

* Tel: 045-788-7677, Fax: 045-785-8175, kwahr@affrc.go.jp

本論は、2020年度日本水産工学会学会賞（日本水産工学会賞）の授賞業績の概要を取り纏めたものである。

筆者が「磯焼け対策ガイドライン」の作成に取り組むのは、緊急磯焼け対策モデル事業（水産庁，2004-2006）の事務局を担当することに始まる。これまでの対策を見ると試行錯誤を繰り返す傾向が認められたため、対策の計画づくり、藻場形成の阻害要因の特定、要素技術の選定等について統一した考え方が必要と考えられた。各要素技術は、技術進歩に伴い新しいものが出てくるので、その都度更新すれば良いが、磯焼け対策の基本的な考え方は、対策の根幹をなすものであり、将来的にほとんど変わることない極めて重要なものと考えられた。これについては、「2. 磯焼け対策の基本的な考え方と進め方」で示す。

次からは、筆者が、具体的な対策要素技術の開発に取り組んだものを紹介する。北海道西南部の日本海側は我が国では有名なキタムラサキウニの食害による磯焼け域である。石（大割石）やブロックを用いて藻場造成が行われているが、ウニの食害を制御していないため設置後2〜3年で元の磯焼けに戻ることが多い。このためウニの食害制御を考慮した施設を考案した。これについては「3. 石やブロックによるウニ食害制御を考慮した藻場造成」で示す。また、ウニによる磯焼け域では、ウニは高密度（一般に10個体/m²以上）で広域に分布するため、これらの除去対策には多くの労力と時間を必要とする。ウニ除去作業を軽減するために、ウニの吸引装置を開発した。これについては、まだ試作段階なので問題点を含めて「4. ウニ吸引装置の開発」で示す。さらに、植食性魚類の食害を防ぐため直方体ブロックの上にフェンス（側面、上面も）を設置し、そのフェンス内部に成熟した海藻を生育させ、ここから海藻の種を周辺に供給することによって藻場を回復する取り組みが行われてきた（これを核藻場と呼ばれる）。しかし、フェンス外部では、植食性魚類の食圧が高く、周辺に藻場が広がる事例はほとんど見られなかった。このため、植食性魚類の除去技術の開発が重要で有り、この取り組みについては「5. 蛸集するノトイスマミの刺し網除去技術の開発」で示す。

この度、日本水産工学会賞をいただき誠にありがとうございます。推薦や選考に携わっていただいた諸先生方や学会員の皆様に厚くお礼申し上げます。学会賞の授賞講演（2021年6月13日）でもお話ししましたように、私の研究は、ほとんどが共同研究で実施したものです。ご協力いただいた共同研究者の方々に改めて、お礼申し上げます。

2. 磯焼け対策の基本的な考え方と進め方^{3, 4)}

1) 基本的な考え方

磯焼けは、ほぼ全国的にみられ、その多くがウニや魚などの食害型によることが知られている⁵⁾。このためガイドラインは、植食動物の食害対策に焦点をあてること

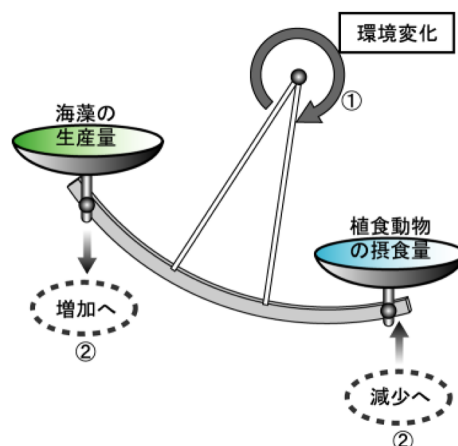


Fig. 1 Situation of isoyake in Japan.

になる。我が国における磯焼け域の状況をイラストで示したのがFig. 1である。磯焼け対策は、このように、海藻の生産と植食動物の摂食のバランスが崩れ、後者が前者を上回っている（天秤が右に傾く）状態から、この釣り合いを回復させることが目的となる。このようにバランスを崩した、そもそもの原因である環境変化（時計回りの矢印）、例えば、気候変動、沿岸域や流域の乱開発などの影響を解決して大規模に藻場を回復したいところであるが、残念ながら、我々の知見や技術は、そのレベルに達していない。このため、ガイドラインに示す対策は、面積は限られるが（例えば、100 m×100 mなど）、対策の実施場所や維持・管理の方法を明確にし、植食動物の摂食量を減少させ（右の皿）、海藻の生産量を増加させ（左の皿）で、天秤のバランスを回復させることを目指している。この際、重要なのは、その順番で有り、植食動物の摂食量を減少させた後に、海藻の生産量を増加させないで、海藻の生産増大から始めると植食動物に海藻の餌を与えている状態となり、藻場回復は期待できない。また、いきなり大規模な対策は失敗の危険が伴うことから、はじめは小規模の繰り返しを行うべきである。ガイドラインは、対策が系統立てて順序よく行えるように情報を提供している。

2) 対策を進めるための3本柱

ガイドラインは、対策を順調に進めるために3つの柱を基礎にしており、それらの概要は次のようである。

1本目の柱：磯焼け対策は「A. 磯焼けの感知」〜「H. 目標達成の判定とフィードバック」の8つのプロセスを検討するに当たって、順応的管理を導入した。これにより、複雑に要因が絡みあい解決が困難な現象でも、対策後のモニタリングから対策の成否の理由を理解し、それをフィードバックすることによって、各地先に合致した磯焼け対策に向かって着実に知見が蓄積できるようになる（Fig. 2）。

2本目の柱：磯焼け対策フローを導入し、「A.」〜

「H.」の各プロセスと系統樹の分岐点での検討を順に行うことによって、対策が試行錯誤にならないようにした（Fig. 3）。具体的には、①磯焼けの感知や藻場形成の阻害要因の特定など、今まで曖昧であった事項について、簡単で具体的な方法を示した。②多数の既存資料から⁶⁾、これまで散在していた要素技術を分析し、系統樹として整理する⁷⁾と共に、各要素技術の長所・短所を明らかにし、要素技術を適切に実施できるように情報提供した。③ウニや植食性魚類を除去するためのインセンティブを高めるために、植食動物の有効利用について全国的に事例収集し紹介した^{8,9)}。④磯焼け対策に、環境に対して高い意識をもつ一般市民（学生を含む、ボランティアダイバー等）の積極的な導入を推進するようにした^{10,11)}。

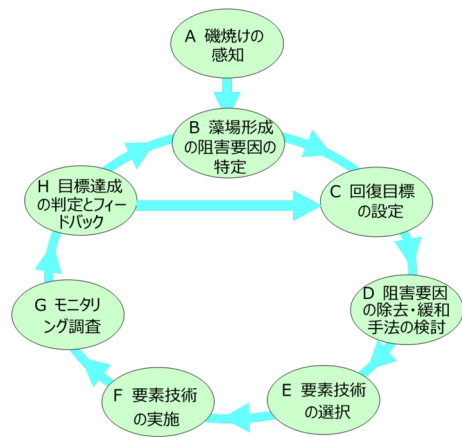


Fig. 2 Adaptive management in isoyake recovery.

3本目の柱：漁業者が中心となり、行政担当者、専門家、地域住民、ボランティアなどと協力し、持続的に磯焼け対策が行えるような実施体制の整備の重要性を示した（Fig. 4）。協力者と一緒に対策を実施することは、精神的にも肉体的にも、一人にかかる負担の軽減につながる。また、モニタリング結果について、対策を実施した仲間と一緒に、あれこれ議論して次の調査を工夫することは楽しいことだと考える。

2021年3月に磯焼け対策ガイドラインは改訂され第3版が発刊された。上述したように、磯焼け対策の基本的な考え方や進め方は初版から変化はない。新しく加わった内容は、海区域に磯焼け域の海中風景、代表的な植食動物が海藻を食べる（食べた）風景および各要素技術の道具や使い方が、多くの写真で示され非常にわかりやすくなった。また、ガイドラインを補助する別冊として、「ドローンや衛星等の空中画像を用いた広域藻場調

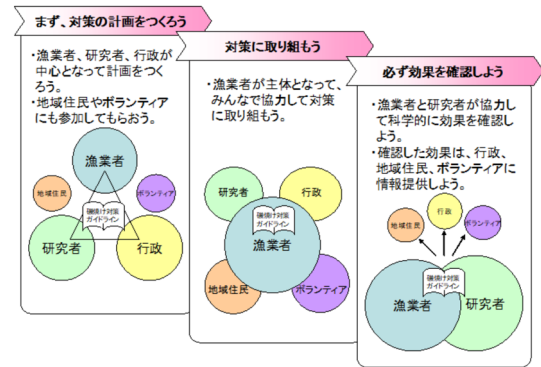


Fig. 4 Organized cooperation to support fishermen.

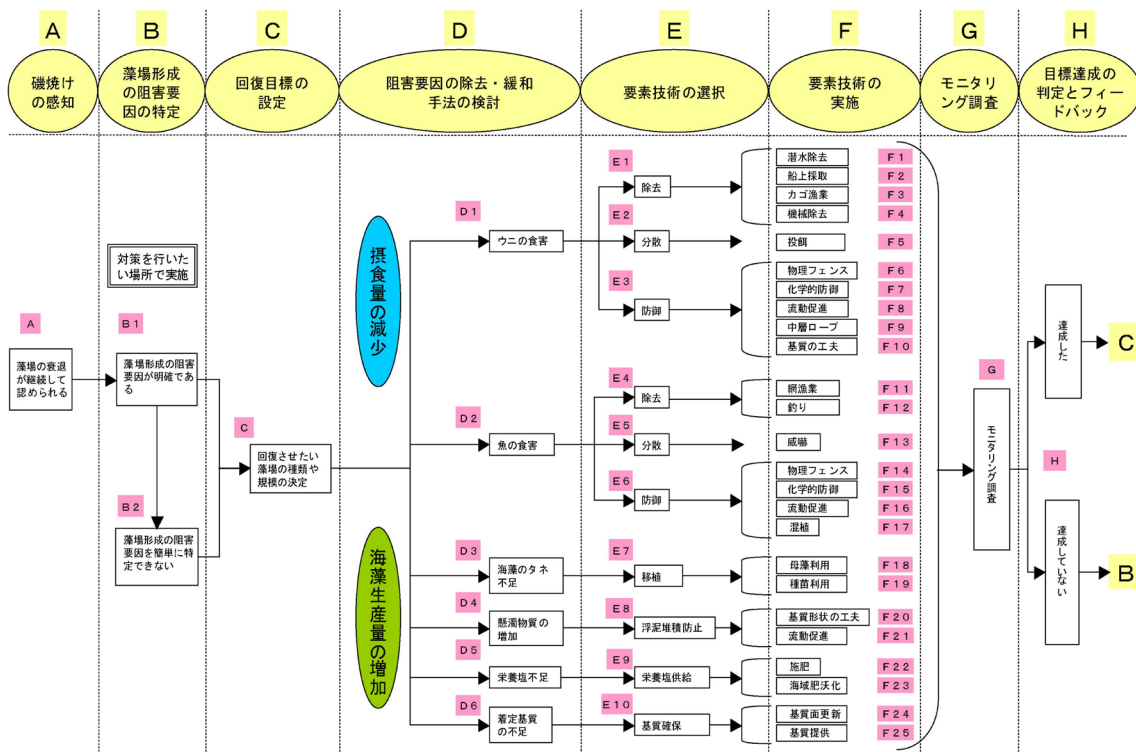


Fig. 3 Flow chart for selecting appropriate recovery techniques.

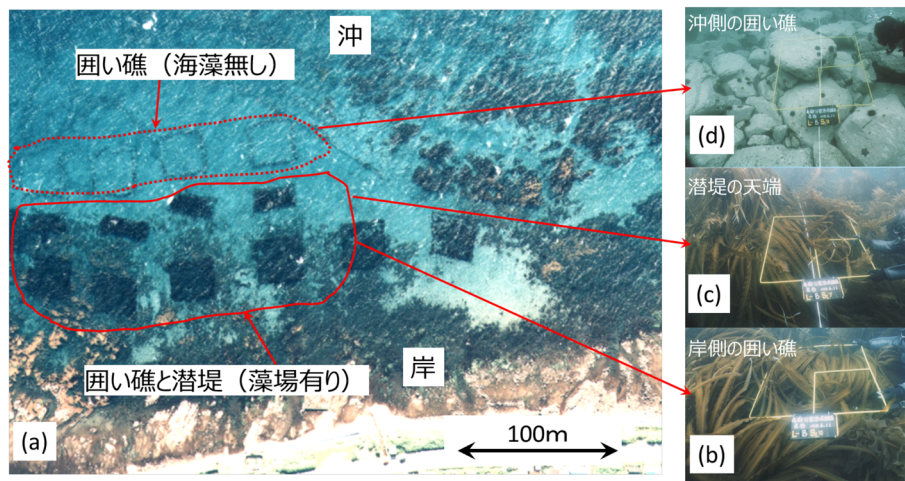


Photo 3 Distribution of seaweed beds in facilities using aerial photograph(a) and underwater photography(b-d). (Biya district, Suttu-cho, Hokkaido).

査」,「磯焼け対策における施肥」および「捕食者を利用した藻場回復」が作成されている。これらは、下記の水産庁 HP からダウンロードできるようになっている。

https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_gideline/index.html

3. 石やブロックによるウニ食害制御を考慮した藻場造成

Photo 3 は、北海道南西部日本海側にある美谷地区に設置された藻場造成施設を示している。(a)は空中写真で、岸から沖に向かって、囲い礁 (30 m×30 m に大割石を敷き周りをブロックで囲った施設)、潜堤、囲い礁が、沿岸方向に4組設置されている。岸側にある囲い礁と潜堤は黒くなっているが、沖側の囲い礁は白く見える。(b)~(d)の水中写真を見ると、前者はホソメコンブ群落の形成により黒く、後者は磯焼けのため大割石が露出して白く見えたことがわかる。これらの施設は近隣にある(水質の水温、塩分、栄養塩等は同様と考えられる)にもかかわらず、藻場形成に大きな違いが生じた要因について検討してみると、波浪による底面流速がキタムラサキウニの摂食に影響して生じたことがわかった¹²⁾。水深が浅いと底面波浪流速は大きくなるのでウニの摂食量が減少し、逆に、水深が深いと底面波浪流速が小さくなるのでウニの摂食量が増加するため¹³⁾、このことが藻場形成に大きな違いを生じさせたのである。

磯焼けとなった沖側の囲い礁と同じ失敗(通年、海藻が生えない)を繰り返さないために、ウニの成長や身入りに貢献する餌料海藻が生育可能な藻場造成施設を検討することにした。Fig. 5 は、その施設の概要をイラストで示した。この海域の一般的な植生は、水深が深い場所から浅い場所になるに従って、順に、①年中ウニ食害による磯焼け、②春はコンブ群落が形成するが初夏以降に磯焼け、③春から晩夏までコンブ群落を維持しウニの成長や身入りに貢献する、④通年ウニの食害が少ないので海藻の遷移が進み多年生海藻が優占する4つの領域に区分できる。このような植生は、底面の波浪流速がウニの摂食量に影響することによって生じることから、②の領域の水深を浅くして底面の波浪流速を増大させて③の領域を広げることによって、ウニの成長や身入り促進に必要な餌料海藻を増加させることを考えた。Fig. 6 は③の領域の底面波浪流速の年変化を水色で示したものである。この水色より波浪流速が小さいと磯焼け域に、大きいと多年生海藻になる。③の領域を造成するた

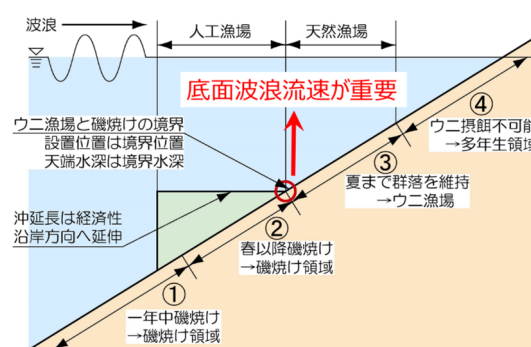


Fig. 5 Concept of designing seaweed bed development facility on the Sea of Japan side of southwestern Hokkaido.

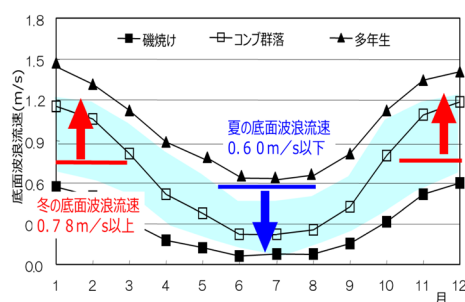


Fig. 6 Conditions for bottom wave velocity to form kelp community by controlling the grazing of sea urchins.

長や身入りに貢献する、④通年ウニの食害が少ないので海藻の遷移が進み多年生海藻が優占する4つの領域に区分できる。このような植生は、底面の波浪流速がウニの摂食量に影響することによって生じることから、②の領域の水深を浅くして底面の波浪流速を増大させて③の領域を広げることによって、ウニの成長や身入り促進に必要な餌料海藻を増加させることを考えた。Fig. 6 は③の領域の底面波浪流速の年変化を水色で示したものである。この水色より波浪流速が小さいと磯焼け域に、大きいと多年生海藻になる。③の領域を造成するた

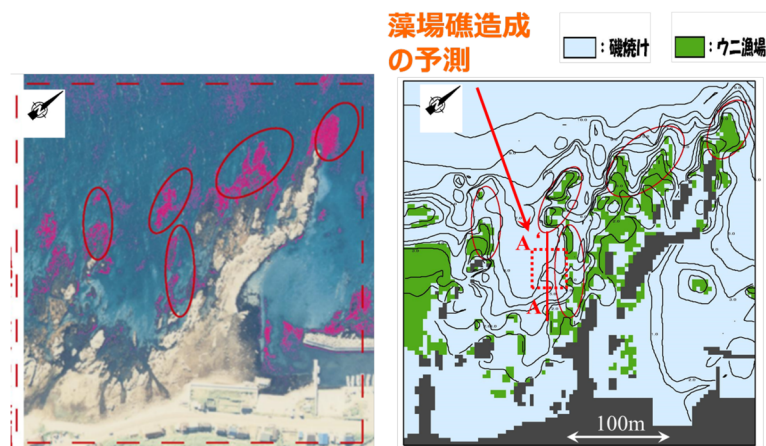


Fig. 7 Validity of kelp community distribution evaluated by bottom wave velocity and newly constructed seaweed bed facility.

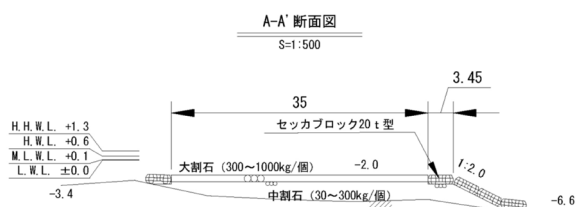


Fig. 8 Cross section of new seaweed bed development facility (A-A').

めに、冬場はウニの摂食からコンブの幼芽を護るために底面波浪流速0.78 m/s 以上、夏場はウニがコンブをしっかり食べて身入りを促進するために0.60 m/s 以下となる条件を設定した。Fig. 7 は北海道寿都町地先において新規の藻場造成施設を検討したものである。左図は空中写真からコンブ群落が認められた領域を赤色、右図は数値解析（非定常緩勾配不規則波動方程式，沖波は、冬期 $H=1.59$ m, $T=6.5$ s, 夏期 $H=0.56$ m, $T=5.2$ s, 波向きは共に WNW）で得られた底面波浪流速から上述した③の条件（底面波浪流速が冬場は0.78 m/s 以上、夏場は0.60 m/s 以下）を満たす領域を緑色で示した。右図のコンブ群落の予測は、左図の実際の分布と良く一致しており、③の領域の造成条件の妥当性が確認された。次に、右図から、③の条件を満たすように嵩上げ施設を検討（嵩上げのために必要な石材等も考慮）した結果、赤い四角（点線）が造成候補施設（岸沖35 m×沿岸30 m, 天端水深-2 m）となった¹⁴⁾。なお、この施設は、ある水深から石材やブロックを積み上げると背後域に静穏域ができ、これがウニの摂食を高めることになり、新たな磯焼けを作ることが懸念されることから、Fig. 5 のように遮蔽域をなるべく作らない施設形状が望ましいと考える。Fig. 8 の施設（Fig. 7 右図の A-A'断面）が、実際に現地（北海道寿都町地先）で2004年に施工され、コンブ群落やウニの成長・身入り等について、モニタリング調査が実施されている^{15,16)}。

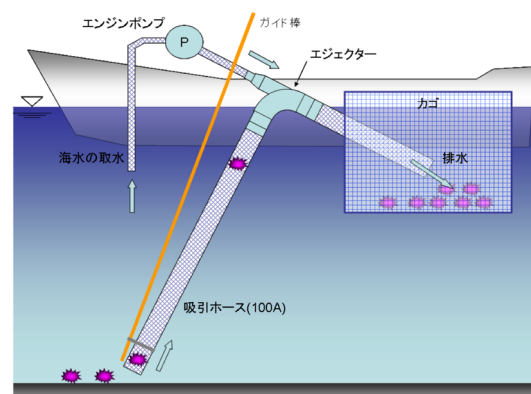


Fig. 9 Overview of sea urchin suction device.

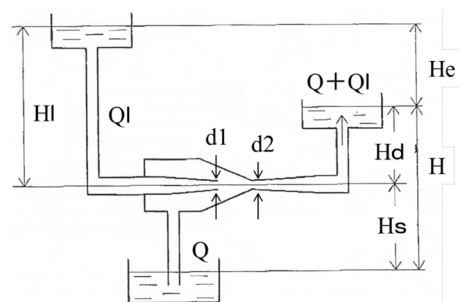


Fig. 10 Explanation of ejector principle.

4. ウニ吸引装置の開発

Fig. 9 はウニ吸引装置の概要を示している。大がかりな装置ではなく2人で船外機船に積み込み30分程度で設置できることを前提とした。吸引は、エンジンポンプからエジェクターに海水を送り込むことから始まる。このエジェクター内ではノズルは細くなっているため強い水流（ジェット流）が発生する（Fig. 10）。これにより、エジェクター内に負圧が生じ、海底に延ばしたホースからウニが吸い上げられる。このエジェクターは、水理学や流体力学を用いて理論的に設計できる¹⁷⁾。効率 η は $Q \cdot H / Q1 \cdot He = x \cdot y$ から求まる。x は流量比 ($Q/Q1$)、y は揚程比



Photo 4 Sea urchin suction test conducted with the cooperation of fishermen.

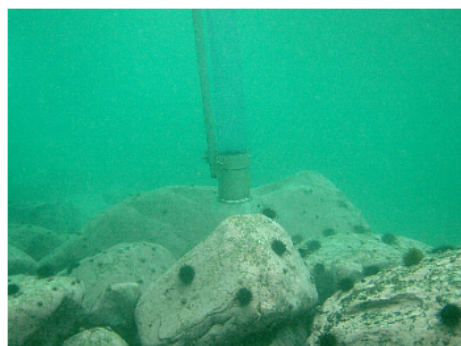


Photo 5 Sea urchin and suction port.

(H/He) であり、これらは断面面積比 $(d1/d2)^2$ とほぼ線形の関係にある。効率 η が最大になるような条件で、吸引対象の大きさ $d2$ 、吸引時の高さ（水深） H などを考慮して、ジェット口径 $d1$ を求める。エジェクタ部分はキャビテーションなども考慮して設計する。吐出ホースの先端には、目合い4 mm の回収袋を設置して、目合いより小さい砂や巻き貝等は外部に排出され、目合いより大きいウニは内部に採取されるように考えた。

宮城県女川町指ヶ浜で、この装置の実証試験を実施した。指ヶ浜地先は、キタムラサキウニ（約10個/m²）と小型巻貝の食害により磯焼けが継続している。小型船外機船に機材（エンジンポンプ、エジェクタ等）をロープで固定し、吸引ホースにガイド棒の長さ4mのSUSパイプ（両端を塞いであり、中空で浮力を持たせた）を取り付けた。船上から箱メガネで海中を覗きながらウニを吸引することとした（Photo 4）。除去は、漁業者2名に協力いただいた。ウニ除去試験の結果、水深2m前後、30分間の作業で500個程度（約17個/分）のウニ除去が可能であることがわかった。タモやヤスを用いた船上採取によるウニ除去速度の例が「磯焼け対策ガイドライン」に掲載されており、それによると9.8個/分（北海道江良地先）となっている。今回のウニ吸引試験と比較すると、タモやヤスの約1.6倍の速度でウニ除去できることがわかった。この除去速度は、潜水除去によるものとはほぼ同様の値であった。なお、回収網に収容されたウニに



Photo 6 Sea urchin collected in the net bag.

は、ほとんど損傷が認められなかった（Photo 6）¹⁸⁾。

実証試験の結果、ウニ吸引装置は潜水除去と同程度に、良好な除去速度で作業できることがわかった。ただし、吸引ホースは直径10 cmで高さ2 m（ほぼ水深）の水柱であり、ガイド棒を水中で動かして、ホース下端にある吸引口をウニ直上に静止させ、ウニを吸引させるには、腕力と体力が必要であり、長時間の作業は難しい。また、実証試験時は天候に恵まれ、波は静穏であったため順調に除去作業が進めたが、少し波があると大幅に作業効率が落ちることが予想された。最近では、ICTを用いた技術が飛躍的に進んでいることから、これらの技術を用いた新たなウニ除去装置の開発が期待される。

5. 蛸集するノトリスズミの刺し網除去技術の開発

植食性魚類の食害対策は、ウニ同様に、除去対策が重要であるが、具体的な手法が開発されていない。このため、植食性魚類の生態的な分布特性を把握し、蛸集する条件を見つけ出し刺し網などで効率良く漁獲する技術開発を検討した。長崎県の漁業者から、植食性魚類の1つであるノトリスズミが、消波ブロック周辺に蛸集するとの情報を得たため、蛸集条件の把握と効率良く漁獲する試験を行ったので報告する。

ノトリスズミの蛸集条件を把握するため、長崎県長崎市、平戸市、壱岐市にある漁港の消波ブロック周辺において、2011年4月～2012年2月の間に42箇所、SCUBA潜水による調査を実施した。これらの調査からノトリスズミの蛸集は、冬期に、漁港の外郭施設にある大型消波ブロック（約20トン）で見られることが概ねわかってきた。続いて、蛸集条件を詳細に把握するために、壱岐市にある沼津、和歌、初瀬の漁港に注目した調査を実施した（Photo 7）。Photo 8はノトリスズミが消波ブロック周辺を回遊する状況、Photo 9は消波ブロックの空隙に隠れる状況を示している。Fig. 11は、消波ブロックにおけるノトリスズミの蛸集（おおよその目視尾数）と水温との関係を示している。水温が高いと魚群規模は小さく、水温が低い（特に、15℃程度になる）と

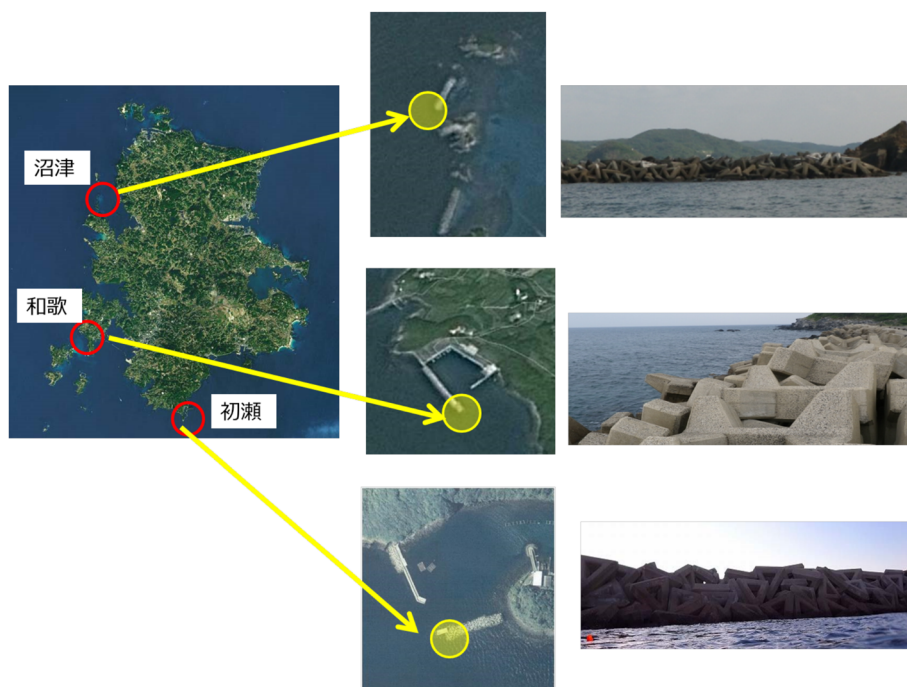


Photo 7 Three fishing ports in Iki City, Nagasaki Prefecture, where large schools of *Kyphosua bigibbus* are reported.



Photo 8 Situation where schools of *Kyphosua bigibbus* migratory around the wave-dissipating block.



Photo 9 Situation where *Kyphosua bigibbus* hides in the void of the wave-dissipating blocks.

大きくなることがわかる。以上より、ノトリスズミの蛸集は、漁港外郭施設の先端付近に設置された約20トン消波ブロックに、水温が15°C程度になると大規模に蛸集することがわかった。

初瀬漁港外郭施設の消波ブロック周辺に蛸集したノトリスズミを刺網で漁獲する試験を行った。刺網は、長さが115m、高さが9.5m、目合いは4寸目、材質はナイロンで、刺網の下辺は鉛ロープ120g/m、上辺は浮子50g/個を約75cm間隔で取り付け付けた。この刺網を2つ作成した。調査時間は、2012年2月14日15時（設置）～15日10時（回収）である。Photo 10は、初瀬に設置した刺網の状況を示している。魚群を囲うように、港内側に刺網A、港外側に刺網Bを設置し、施設先端部で両者を連結させた。Photo 11は、刺網によるノトリスズミの漁獲状況を示している。1回の刺し網で345尾の漁獲に成功した（Photo 12）^{19）}。

ノトリスズミが、このように消波ブロック周辺に蛸集

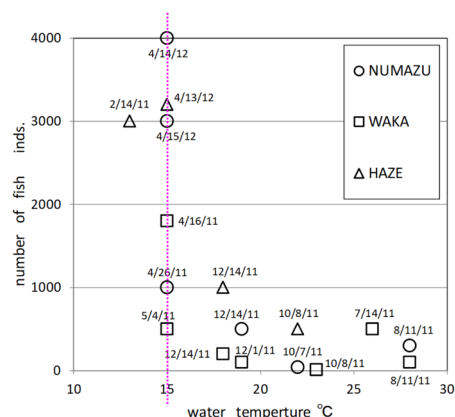


Fig. 11 Relationship between water temperature and schools of *Kyphosua bigibbus* gathering in wave-dissipating block.

する理由は解明されていないが、室内試験やピンガーを用いた魚の追跡試験から、ノトリスズミは夜にも目が見え、大きく移動することが明らかになっている^{20）}。ま

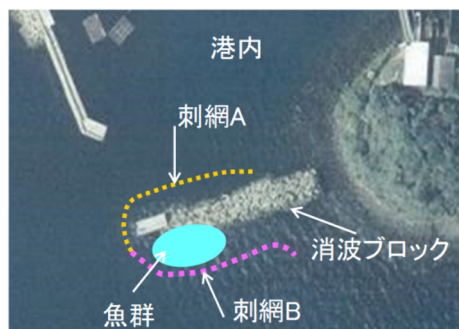


Photo 10 Installation status of two gill nets (pink and yellow).



Photo 11 Situation of *Kyphosus bigibbus* caught by gillnet.



Photo 12 Situation of *Kyphosus bigibbus* landed on the ship.

た、ノトリスズミの行動特性を利用し、養殖生け簀に漏斗状の入り口を付けたトラップが開発され、新しい除去の取り組みが始まっている²¹⁾。植食性魚類は、生態・生理的な特性が十分把握されていないので、基礎的な知見も着実に明らかにしていく必要がある²²⁾。

6. ま と め

筆者が、磯焼け対策に関する研究事業を担当する中で、感じたことを記述して、本邦のまとめとしたい。

緊急磯焼け対策モデル事業は、これまでの磯焼け対策に関する取りまとめと実際の海域で藻場を回復するモデル試験（17の都道府県で実施）を同時に行い、これらからガイドラインを作成することになった。東京海洋大学の藤田大介准教授に委員長をお願いし、大学、水産試験

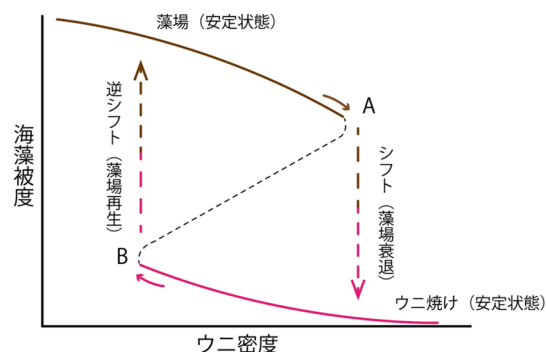


Fig. 12 Discontinuous phase shift of seaweed bed and sea urchin burn ground (A and B are thresholds).

場、水産総合研究センター（当時）の藻場に関する専門家の委員からなる磯焼け対策検討委員会を設置して進めた。年度の始めと終わりに全国検討会を東京で開催し、ウニ対策、魚対策、調査の3つの専門部会を都道府県のモデル試験地区で開催した。事業実施前は、都道府県の担当者間で磯焼けに関する知見に大きな差が見られたが、頻繁な検討会と専門部会を通じて、全国的な磯焼け対策の関係者ネットワークが自然に構築され、すぐに全体に高いレベルになったことを思い出す。このような人のネットワークが作れたことは、ガイドライン発刊と同様に大きな事業成果であったと思う。

続いて、ガイドラインを用いて磯焼け対策の成功事例をつくることを目的に、大規模磯焼け対策促進事業（2007-2010）が始まる。全国の漁業者を対象にガイドラインの講習会を開き、成功事例づくり実施（漁業者が中心になって磯焼け対策に熱心に取り組む）地域には、サポートスタッフを派遣して漁業者にアドバイスをを行うことを進めた。このサポートスタッフには、水産試験場や普及指導員の人員不足等もあり、藻場造成に詳しい10人余りの民間企業の方々に協力いただいた。この事業を通じて、実際に、磯焼け対策を進めるには、①サポートスタッフの1～2回のアドバイスでは無理で、漁業者への密接な指導とコミュニケーションが必要なこと、②サポートスタッフのアドバイスを理解して漁業者にわかりやすく伝える漁業者の代表者が必要なこと、③漁業者に、小さくても良いので、なるべく早く成功体験ができるように、計画づくりすること、④ガイドラインには記述されていない新しい技術がサポートスタッフと漁業者との工夫によって数々生まれること、等がわかった。

その後、「環境・生態系保全対策事業」そして「水産多面的機能発揮対策事業」と漁業者が主体となる全国規模の藻場保全事業が実施されるようになる（藻場保全の活動組織は約300になる）。これら緊急磯焼け対策モデル事業に始まる一連の成果は参考図書として関係者によって取りまとめられている²³⁻²⁵⁾。

Fig. 12は、ガイドラインの第2版から取り入れた図

で、海藻被度とウニ密度との関係を示している。これは、Scheffer²⁶⁾の概念を踏まえて、これが磯焼け現象にも適応できるとFilbee-dexter & Scheibling²⁷⁾が示したことによる。対策は階段を上るように成果が出るのではなく、不連続なヒステリシスを伴うことを前提に考えることを示している。赤線はウニ密度が高く、この食害により海藻の被度が低くなった磯焼け状態を想定している。藻場を回復させるためにウニ除去を行い密度を下げるように対策（赤線の左に移動）を進めるが、海藻被度はあまり増加しない。しかし、ウニ密度がB点に達すると突然に上部にシフトし、海藻被度は劇的に回復することがわかる。この状態（茶色の実線）になるとウニ密度が少し増加しても海藻被度はあまり低下せず高い状態を維持する。ところが、管理を怠りウニ密度がA点に達すると突然に下部の赤線へシフトし海藻被度は著しく低下する。漁業者から「昔は、ウニがいっぱいたければ海藻もたくさんあった。」とよく聞かすが、これは上部の茶色線の状態を示しており、現在の磯焼け域は下部の赤線の状態にあると考えられる。以上のことから、ガイドライン第2版では、現在、除去によりウニ密度を減少させる対策を進めているが、なかなか海藻被度が回復せず、対策の成果が見えにくいのは、赤線上にあるため、対策を持続してB点に近づけるよう呼びかけた。ただし、B点とは、具体的に、どのような状態で、どのようにすれば早く確実に到達できるのか、わかっていない。これがわかれば、現状からB点に到達するために必要な対策を定量的な5W1Hで示せるようになると思う。これは、磯焼け対策にとって重要な課題であり、筆者は、引き続き努力したいと考えている。

参考文献

- 1) 藤田大介：磯焼けの現状. 水産工学, **39**(1): 41-46, 2002.
- 2) D. Fujita: Current status and problems of isoyake in Japan. *Bull. Fish. Res. Agen.*, **32**: 33-42, 2010.
- 3) H. Kuwahara, O. Hashimoto, A. Sato and D. Fujita: Introduction of Isoyake Recovery Guideline (Fisheries Agency, Japan). *Bull. Fish. Res. Agen.*, **32**: 51-60, 2010.
- 4) 水産庁：磯焼け対策ガイドライン. 水産庁：1-208, 2007.
- 5) 桑原久実・綿貫 啓・青田 徹・横山 純・藤田大介：磯焼け実態把握アンケート調査の結果. 水産工学, **43**(1): 99-107, 2006.
- 6) 桑原久実・綿貫 啓・青田 徹・安藤 亘・川井唯史・寺脇利信・横山 純・藤田大介：文献から見た磯焼け対策研究の歩み. 水産工学, **43**(1): 81-87, 2006.
- 7) 桑原久実・綿貫 啓・青田 徹・安藤 亘・川井唯史・寺脇利信・横山 純・藤田大介：磯焼け対策における要素技術の整理. 水産工学, **43**(1): 89-97, 2006.
- 8) 北川雅彦・麻生真悟・菅原 玲・田嶋健一郎・干川 裕・川井唯史：磯焼け漁場有効利用技術開発事業（受託）（栽培振興課）4 ウニ肥育技術の開発4.2 ウニ肥育用飼料の開発. 北海道立中央水産試験場事業報告書, 206-218, 1999.
- 9) 森中房枝・安藤 亘：イスズミの食品利用の拡大に向けて. **48**(1): 73-75, 2011.
- 10) 佐々木謙介・徳永成光・猪狩忠光・吉満 敏・田中敏博：鹿児島水産高校とともに行った藻場回復の取り組み. 水産工学, **48**(1): 65-68, 2011.
- 11) A. Watanuki, T. Aota, E. Otsuka, T. Kawai, Y. Iwahashi, H. Kuwahara and D. Fujita: Restoration of Kelp Beds on an Urchin Barren, Removal of Sea Urchins by Citizen Divers in Southwestern Hokkaido. *Bull. Fish. Res. Agen.*, **32**: 83-87, 2010.
- 12) 桑原久実・川井唯史：北海道寿都町美谷海域の沿岸施設におけるホソメコンブ群落の形成機構. 海岸工学論文集, **46**: 1166-1170, 1999.
- 13) 川俣 茂：磯根漁場造成における物理的攪乱の重要性. 水産工学, **31**(2): 103-110, 1994.
- 14) 桑原久実・寺井 稔・畑谷 勇・酒向章哲：ウニ漁場造成に係る事前評価手法の開発とその適用. 海岸工学論文集, **51**: 1091-1095, 2004.
- 15) 金田友紀：《水産工学シリーズ》北海道南西部日本海沿岸における磯焼けの修復技術. 北水試だより, **77**: 18-21, 2009.
- 16) 金田友紀：新たな設計のウニ増殖場（嵩上げ礁）の効果. 試験研究は今, 705, 2012.
- 17) 熊谷輝雄・村岡正宏：固体流送用ウォータージェットポンプについて. 噴流工学, **12**(1): 14-23, 1995.
- 18) 桑原久実・綿貫 啓・小沢誠二・石岡 昇・藤田大介：磯焼け対策に用いるウニ吸引装置の開発. 平成21年度日本水産工学会学術講演会, 11-12, 2009.
- 19) 桑原久実・南里海児・山仲洋紀：長崎県壱岐のノトイスズミを効率良く刺網で漁獲する方法. 平成24年度日本水産工学学術講演会, 53-54, 2011.
- 20) 桑原久実・南里海児・吉村 拓・野田幹雄・安藤 亘：ノトイスズミ除去対策の取り組み. 月刊海洋, **47**(6): 284-289, 2015.
- 21) 門田 立：魚類による海藻食害問題の解決を目指して～植食魚ノトイスズミの対策技術開発への挑戦～. 西海せいかい, **25**: 2, 2019.
- 22) 桑原久実：魚の食害対策に係わる技術と課題. 水産工学, **51**(3): 253-257, 2015.

-
- 23) 藤田大介・野田幹雄・桑原久実：海藻を食べる魚たち～生態から利用まで～(磯焼け対策シリーズ1), 成山堂書店, pp. 1-288, 2006.
- 24) 藤田大介・町口裕二・桑原久実：磯焼けを起こすウニ～生態・利用から藻場回復まで～(磯焼け対策シリーズ2), 成山堂書店, pp. 1-316, 2008.
- 25) 藤田大介・村瀬 昇・桑原久実：藻場を見守り育てる知恵と技術(磯焼け対策シリーズ3), 成山堂書店, pp. 1-304, 2010.
- 26) M. Scheffer, S. Carpenter, J. A. Foley, C. Folke and B. Walker: Catastrophic Shifts in Ecosystems. *Nature*, **413**(6856): 591-596, 2001.
- 27) K. Filbee-Dexter and R. E. Scheibling: Sea Urchin Barrens as Alternative Stable States of Collapsed Kelp Ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **495**: 1-25, 2014.