



久遠漁港における藻場機能回復への 取り組みについて —背後小段での潜堤構造の効果検証—

函館開発建設部 江差港湾事務所 工務課 ○田邊 翔
高橋 博
日本データサービス株式会社 伊藤 茉美

久遠漁港周辺海域は、磯焼けの進行に伴い藻場の消失が著しく、海藻を餌とするウニ・アワビの漁獲への影響が深刻化している。この課題に対し、南防波堤・南護岸に越波対策を図るとともに藻場創出機能を確保するため背後小段を備えた潜堤構造を取り入れ、令和3年度で施設が概成した。本報では、藻場モニタリングの経年変化状況と現地観測結果を用いた背後小段（潜堤）上の流動環境について検証を行い整備効果について報告する。

キーワード：再生・回復、磯焼け、潜堤、背後小段

1. はじめに

久遠漁港周辺海域では、昭和33年頃から磯焼け現象が進行し平成25年までの間に約8割の藻場が減少している（北海道立水産試験場, 1992）¹⁾。その結果、重要な沿岸漁業資源であるウニ・アワビは食物不足をきたし、藻場を棲み場とする多数の魚類が来遊しなくなるなど、沿岸漁業へ大きな影響をもたらしている。久遠地区においては、地元漁業者が中心となり、平成21年度より植食動物であるキタムラサキウニの駆除活動やホソメコンブの胞子供給のためのスポアバックの設置など、磯焼け対策および藻場の保全活動を積極的に展開している。

このような状況を踏まえ、平成26年5月に「久遠地区磯焼け対策緊急整備事業計画書」を策定し、越波対策として実施予定であった南防波堤（改良）および南護岸（改良）を、藻場造成機能を有した構造へ変更し、令和3年度迄に潜堤延長L=175m（背後小段約100m）の整備を実施した。久遠漁港周辺海域では事前の調査から、ウニの分布密度が高く、透過波高の低減を目的とする「潜堤」と流動の促進を目的とする「背後小段」の整備により、初期生長期である1~3月を含む秋季から春季のウニによる摂餌圧を減少させ、幼芽の生き残りを高め、藻場を形成させる構造である。また、当海域における磯焼けの要因として挙げられる高水温・貧栄養、母藻（コンブ）不足による胞子供給量の減少に対するソフト対策を、平成26年11月から導入し、その後ソフト対策とモニタリング調査を実施してきている。

本施設は平成26年度の整備着手から7年が経過し、コンブ・ワカメの発芽・繁茂が8サイクル目を迎えている。

現地踏査によると、図1.1に示すように構造的に閉鎖水域となる本施設北西部では水塊が停滞していた。ここでは、流動が小さいためにウニの摂餌圧を抑制できず、海藻現存量が南東部より少ないことが推察される。また、背後小段の天然岩礁ではウニ密度管理を実施しているが、モニタリング調査で水深3m以深の天然岩礁では海藻の生育はほとんどみられない。

これらのことから、高水温・貧栄養の海況では、ウニの摂餌圧を排除しただけではコンブ群落は形成できず、コンブの生育の持続には一定量の栄養塩が必要であり、つまり、高水温・貧栄養の海況で海藻類を生育させるためには、ウニの摂餌行動を抑制、および生育に必要な栄養塩を供給できる流動環境は極めて重要な因子と考えられる。そのため、北西部と摂餌圧が抑制される南東部の2地点で流速観測を行い、小段上の流動環境を把握した。

以上より、本報告では藻場モニタリングの経年変化状況と現地観測結果を用いた背後小段（潜堤）上の流動環境について解析を行い、ウニの摂餌圧抑制、藻場形成の持続性などについて確認するとともに、施設に隣接したアワビの好漁場であるアワビ島への整備による影響など二重堤の整備効果を検証するものである。

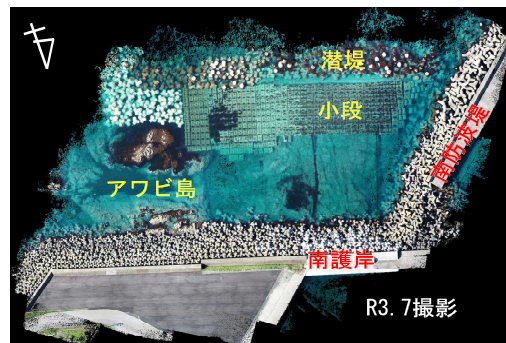


図1.1 南防波堤・南護岸二重堤（潜堤）

2. 久遠漁港周辺海域における磯焼けとその対策

2-1 久遠漁港周辺海域における磯焼けのしくみ

磯焼けの原因としくみを明らかにするためには、磯焼け初期段階で消失するコンブ・ワカメなどの大形褐藻が、生育要因（水温・栄養塩・流動など）の変化によって衰退するしくみを明確にすることが重要である。

久遠漁港の沿岸域を含む北海道日本海沿岸のホソメコンブの生育地帯では、対馬暖流の強勢化（吾妻, 1997）²により高水温・貧栄養の海況となっている。これにより、海水温度が高いと海面からの蒸発が多くなることで降水量が増加し、表層は高水温で塩分濃度が低く密度が小さい海水となる。この結果、低水温・高塩分の密度の大きい栄養豊富な深層水との混合が妨げられる。

また、コンブ類は海水が高水温・貧栄養の環境下になると、繁茂期の夏～秋の死亡率が高まり、かつ冬～春の再生産も不調になる。沿岸域がこのような環境になった場合、コンブ類藻場は浅所の狭い範囲にまで衰退・縮小する。以上のように、磯焼けは高水温・貧栄養の海況によって発生し持続される（谷口, 1991）³。

これらを踏まえ、久遠漁港周辺海域で発現していると考えられる磯焼けについて、高水温と貧栄養を起因とする主な二つの要因のしくみについて以下に示す。

1) ウニ類による摂餌圧

キタムラサキウニの水温と摂餌量の関係を図2. 1に、摂餌と流速の関係を図2. 2に示す。

水温と摂餌量の関係は、水温の上昇に伴って摂餌行動が活発化して日間摂餌率が高まるが、水温が低いほど日間摂餌率が低く、摂餌圧が低いことを示している（町口, 1997）⁴。また、ウニの摂餌量と流速の関係は、川俣ら（2001）⁵による室内実験によって、25cm/s以上で摂餌が減少し、40cm/s以上で摂餌できなくなることが報告されている。さらに、ウニ密度と海藻生育については、磯焼け現象を呈する日本海側に多く分布するキタムラサキウニが1m²当たり200g以上生息すると海藻の植生に大きな影響を与える（菊池ら, 1981）⁶。キタムラサキウニ1個体当たり50gとすると、1m²当たり4個体以下にしないと海藻は生育しないこととなる（沢田ら, 1981）⁷ことが報告されている。

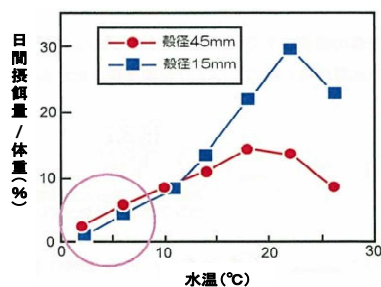


図2.1 キタムラサキウニの水温と摂餌量の関係⁴⁾

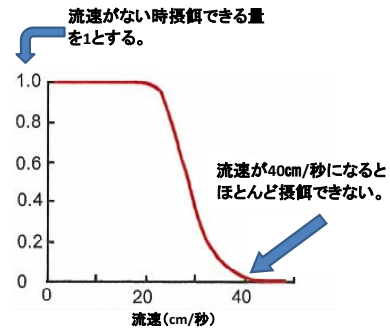


図2.2 キタムラサキウニの摂餌と流速との関係⁵⁾

以上のことから、藻場の維持とウニの生息密度は密接な関係があり、ウニは水温や流速によって摂餌行動が抑制される。加えて、高水温・貧栄養の海況による水温上昇に伴って摂餌行動が活発化しているものと推察される。

2) 流動による栄養塩供給

ワカメ・コンブ養殖では、生長初期の初冬に晴天で静穏な「小春日和」が続くと、葉体色が著しく薄い褐色になるなどの障害が現れる（谷口, 2010）⁸。そこで、海藻類の栄養塩の吸収や流動に関する知見（吉田ら, 2011）⁹を以下に整理する。

海藻体に栄養塩が十分に供給されるためには、海水中の栄養塩濃度が高いことに加え、流速がある大きさと維持され、藻体の周囲に乱流境界層が形成される必要があるとされている。コンブ科Laminarialesの海藻では、1～3cm/sの流速で流速境界層が層流状態から乱流状態へ遷移することが、海水流動の可視化技術より明らかになっている。また、実験的に海藻類の栄養塩吸収や水流との関係を調べた例では、ジャイアントケルプ*Macrocystis pyrifera*や、スサビノリの光合成がそれぞれ4cm/s、3cm/s以上の流速で飽和した。さらに、ジャイアントケルプのNO₃-N吸収は2.5cm/sで飽和した。

これらの研究に基づけば、コンブ科の生産力を維持できる流動は3cm/sから10cm/s程度必要（吉田ら, 2011）⁹ではないかと考えられる。先の葉体色障害の現象は高密度で生育する葉体付近では低流速と、葉体重量増加で揺れ動かす流動が発生せず、その結果、栄養塩の吸収が困難となり枯死・脱落したものと考える。流速は水深ともなって低下することから、生長に必要な流れの環境からも海藻が生育できる水深は制限される。さらに、高水温・貧栄養の海況では栄養塩の濃度が低く、海藻は生育しづらくなる。

以上のことから、高水温・貧栄養の海況では、ウニの摂餌圧を排除するだけではコンブ群落は形成できず、コンブの生育を保障するためには、一定量の栄養塩が必要となる。

2-2 高天端背後小段を備えた潜堤構造の建設

南防波堤・南護岸の越波対策として、護岸の沖合100mの位置に潜堤を配置した、二重堤（潜堤）とする

ことで、透過波高の低減や砕波点が沖側へ移動することにより、南防波堤・南護岸へ到達する波のエネルギーを低減できる。また、潜堤背後には小段を設置し、潜堤構造にすることで背後の流れを阻害せず、さらに背後に小段により、天端上の波浪流速を高め、ウニの摂餌圧を減少させるとともに、流動環境を向上させることで栄養塩フラックスを増加させることを目的としている。藻場の形成・維持とウニの生息密度には密接な関係があり、ウニ類の摂餌行動の抑制、および高水温・貧栄養の海況で不足する一定量の栄養塩確保に関与する流動環境への対応を踏まえ、背後小段天端を設定した。

竹田ら(1999)¹⁰⁾によると上位から1/3の流速の平均値(以下、有義流速)が25cm/s未満の各月累加出現率が30~40%以下の地点ではウニの食害を受けにくいことが報告されている。この報告に基づき、背後小段上におけるコンブの初期生長期(1~3月)の有義流速が上記条件を満たす天端高を数値波動水路(CADMAS-SURF)により検討し、L.W.L-1.5mに設定した(図2.3)。本施設は平成26年度から整備に着手し、モニタリング調査などを継続しながら、令和3年度に概成したものである。

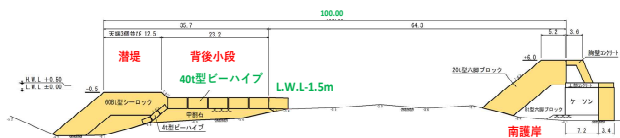


図2.3 南防波堤・南護岸二重堤(潜堤)断面図

3. 藻場モニタリングと現地観測・解析

3-1 藻場モニタリング

平成26年度から令和4年2月迄のモニタリング調査結果について経年変化として整理したうえで、磯焼け対策について試験区・対照区の結果を比較し、効果を検証・評価した。

1) モニタリング履歴

平成26年度に越波対策施設として整備された二重堤(潜堤および背後小段)は、令和4年10月で整備後7年が経過し、コンブ・ワカメの発芽・繁茂が8サイクル目を迎える。施工後の藻場創出効果、ウニの食害抑制効果などを詳細に把握するため、平成26度~令和4年度に、経年的な比較検証を行うことに留意し、同手法・同一地点でモニタリングを行っている。

2) 藻場モニタリング手法

潜水技師により、試験区5測線および対照区4測線の合計9調査測線(図3.1)で目視観察、写真撮影、ビデオ撮影を行った。調査時期は有用海藻繁茂期の7月と初期生長期の2月とした。目視観察は方形枠を設置し、海藻の種類毎の被度(根回り、葉体)、付着動物(植食動物など)の種類毎の個体数を計数するとともに、基質の

状態(破損、移動、浮遊砂などの堆積状況)についても観察した。さらに、潜水技師により各測線上毎に海藻が最も繁茂している地点を選定し、0.5m方形枠内の動植物を採集した。採集した動植物はホルマリンで固定したうえで分析室に搬入し、有用海藻(コンブ・ワカメ)は各葉体の葉長および湿重量、有用動物(ウニ類、エゾアワビ)は各個体の殻径、湿重量の測定を行った。

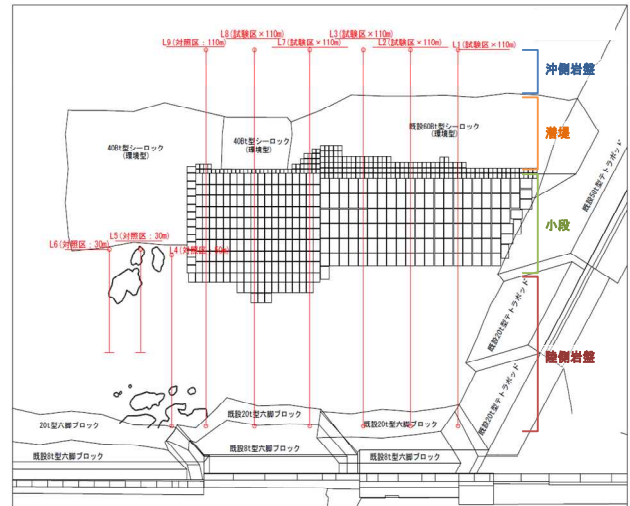


図3.1 藻場モニタリング調査位置

3-2 現地観測および解析手法

ウニの摂餌行動に最も影響を与える外力は、流速振幅である。そこで、流速とウニの摂餌行動を定量的に把握するために、現地に流速計を設置し観測を行い、流速振幅を算定した。

1) 現地観測

設置箇所は波浪の影響を受けるため、架台に流速計を取付けアンカーボルトで固定し耐波性能を高めて現地に設置した(図3.2)。設置期間は海藻類の初期生長期を含む令和3年10~令和4年2月までの約5ヶ月間の連続観測を行った。観測は水塊が停滞しているとみられる北西部(St.A)と調査結果から摂餌圧が抑制されているとみられる南東部(St.B)の2地点で行った。また、観測機器の設定は観測間隔60分、観測時間20分(サンプリング間隔0.5秒)とした。

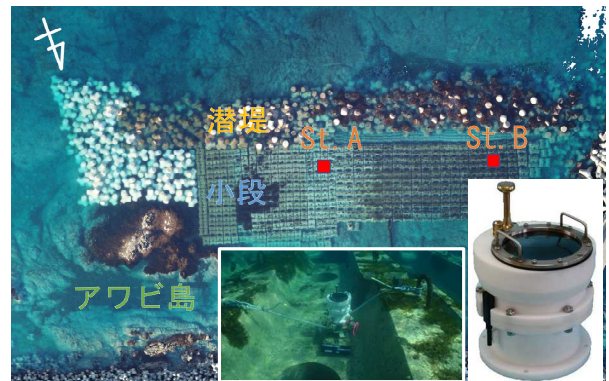


図3.2 観測機器の形状・設置位置

2) 最大底面軌道流速振幅

ウニ類の生息に影響を及ぼす最大底面軌道流速振幅（理論値）（以下、底面軌道流速と称す）は、観測した有義波高から微小振幅波理論により導出した。

底面軌道流速および有義波高は背後小段の天端上（水深1.5m）での値である。

4. 効果の検証

藻場機能を付加するため高天端とした背後小段を備えた潜堤構造により、流動が高められウニによる摂餌圧を減少させることができるか、併せて、栄養塩フラックスの増加に伴って持続的な藻場形成がなされているか、藻場モニタリングの経年変化状況と背後小段上で観測した流動環境より、藻場創出効果の検証を行った。なお、栄養塩フラックスと海藻の生長について川俣（2004）¹¹⁾が、栄養塩濃度が同じであれば流速が大きいほど海藻の生長はよいと報告している。

4-1 ウニ類の摂餌圧抑制効果

海藻類の初期生長期で背後小段と背後小段陸側の天然岩礁におけるウニ生息密度の推移を図4.1に示す。

背後小段とその陸側に位置する天然岩礁の水深が異なるため、単純な比較はできないが、明らかに天然岩礁より背後小段において生息密度が低い傾向がみられる。また、海藻初期生長期の背後小段では海藻が生育しないとされる4個体/m²以下（沢田ら, 1981）⁷⁾の0.6個体/m²と極めて生息密度が低い。このことから、水深1.5mの高天端の背後小段では、ウニの摂餌行動が抑制される流動環境になっているものと推察される。

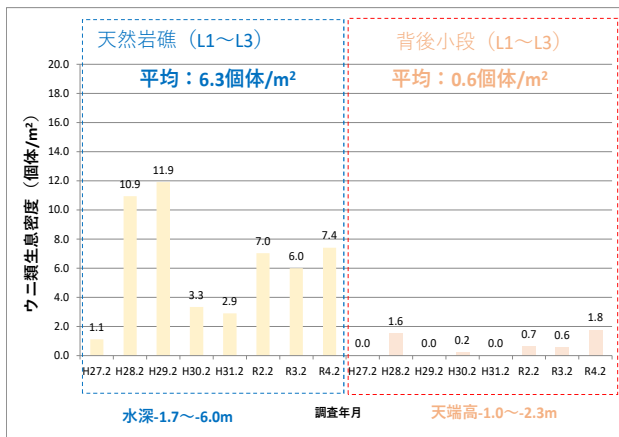


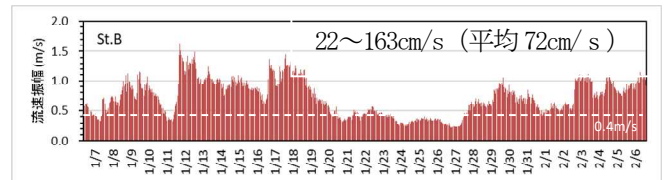
図4.1 ウニ類生息密度の推移【2月海藻類初期生長期】

観測期間中のうち海藻初期生長期に該当する1~2月の期間中の、背後小段のほぼ中央付近（水深1.5m）における波による底面軌道流速について、ウニの摂餌行動に影響を与えるとされる流速の文献値25cm/sおよび40cm/sに着目して整理した。図4.2は底面軌道流速の経時変化を、図4.3は底面軌道流速の出現頻度を示したも

のである。

海藻初期生長期において、ウニ類の摂餌が減少するとされる底面軌道流速25cm/s以上の頻度は97.7%、摂餌ができず退避行動を起こすとされる流速40cm/s以上の頻度も82.8%と高率であった。このことから高天端（水深1.5m）の背後小段上では、ウニの摂餌行動が抑制される流動環境が形成されていることが推察された。

この効果の発現によって、海藻初期生長期の幼芽がウニ類からの摂餌を免れて生き残り、藻場形成に繋がっていくものと推察される。



流速振幅解析期間：令和3年1月7日~2月6日

図4.2 海藻初期生長期の底面軌道流速の経時変化

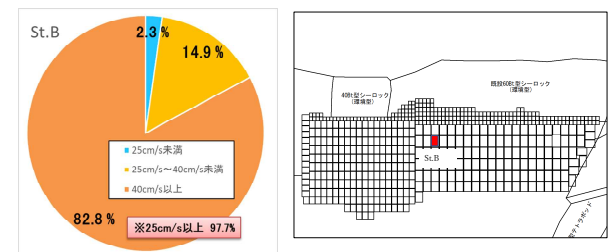


図4.3 海藻初期生長期の底面軌道流速の出現頻度

4-2 藻場形成の持続性

高天端の背後小段上において、海藻繁茂期に藻場が継続的に形成されているかについて以下に評価する。

海藻類の繁茂期で背後小段と背後小段陸側の天然岩礁における大形植物現存量の推移を図4.4に、藻場の形成状況を写真4.1、写真4.2に示す。なお、大形海藻とは、藻場形成種であるホソメコンブとワカメの2種を示す。また、図中には、せたな町大成水産種育苗育成センター（資料：北海道沿岸漁場海況観測取りまとめ、北海道栽培漁業振興公社）で観測した、海藻初期生長期である1~3月の水温データをプロットした。

海藻繁茂期である7月の7年間の大形植物の平均現存量をみると、天然岩礁の452.6g/m²に対して、背後小段では3倍以上の1,732.6g/m²の現存量で、天然岩礁では生育がみられない年があっても、年変動はあるものの藻場が継続して形成されている。なお、年変動の要因としては、①水温が海藻類の生育に与える影響、②小形海藻（植物遷移）による付着基質の占有、③流動環境の強弱などの影響などが考えられる。

先述した海藻初期生長期の底面軌道流速の経時変化をみると、22~163cm/s（平均72cm/s）の範囲で、海藻初期生長期における流速は10cm/s以上であり、水深1.5m以浅はコンブ科の生産力を維持できるものと推察される。

なお、水温と海藻繁茂の関係については、冬季水温が低ければ植物現存量が高い傾向がみられる。

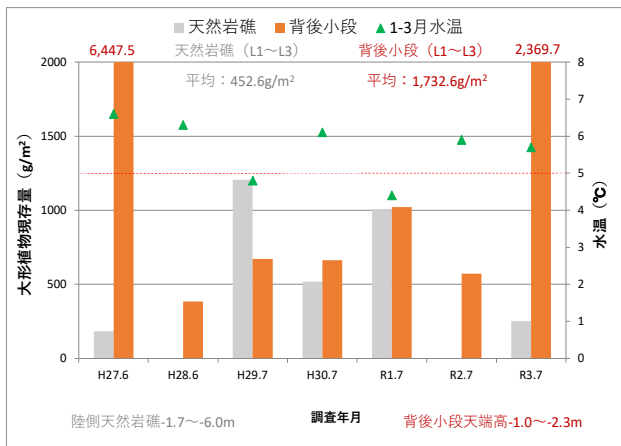


図4.4 背後小段部における大形植物現存量



写真4.1 ワカメ藻場 (R3.7撮影)

写真4.2 コンブ藻場 (R3.7撮影)

4.3 二重堤整備効果の検証

1) 整備された二重堤の越波対策施設としての効果

檜山漁業協同組合大成支所への聞き取りによると、二重堤の施工後は大型低気圧の来襲時においても南護岸への越波被害は確認されず、対策施設整備により越波防止が図られている。

2) 背後小段上の月別の流動環境

観測期間中の久遠漁港と松前港（茂草沖）の有義波高の相関を図4.5に示す。この関係を用いて松前港（茂草沖）で過去5年間（2017～2021年）の観測結果から久遠漁港背後小段上における有義波高を換算して求め、波による底面軌道流速0.25m/s以上が生じる月別頻度を図4.6に示す。

コンブ類など海藻の初期生長期（1～3月）の背後小段上の底面軌道流速0.25m/s以上の発生頻度は、調査結果から摂餌圧が抑制されていると考えられた南東部

（St.B）では99.9～100.0%であったのに対し、水塊が停滞していると考えられた北西部（St.A）では、施設中央部（St.B）よりやや頻度が低いものの95.2～98.7%が確保されている。

このことから計画時に想定したとおり、背後小段を高天端としたことにより海藻の初期生長期においてウニ類による摂餌圧が低減される流動環境が形成されており、所定の性能を発現していることが確認できた。

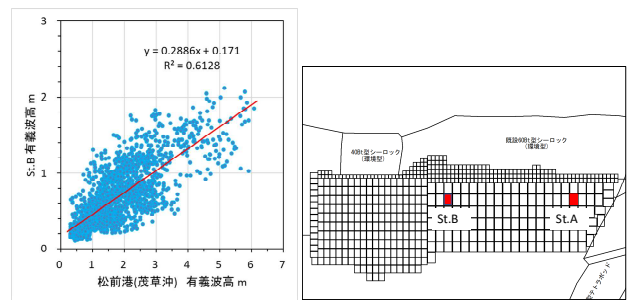


図4.5 観測期間中の波高相関

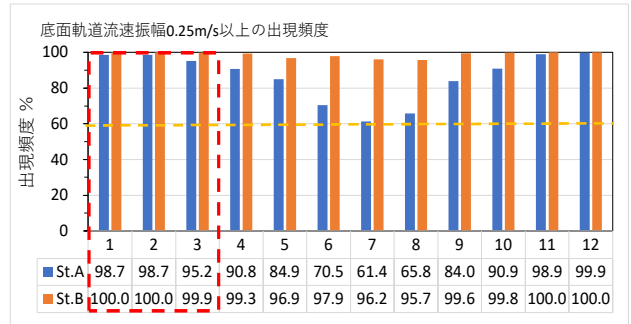


図4.6 小段上底面軌道流速0.25cm/s以上の頻度

初期生長期以外の流動環境についてみると、一般的に日本海側では静穏期であり、生活史的に海藻類の繁茂期にあたる5～7月においても底面軌道流速0.25m/sの出現頻度が60%以上と流れの速い環境にあるため、ウニ類による摂餌圧が低減され、また、フラックスも大きくなることから藻体を維持する栄養塩が供給され、水生生物の蛸類・産卵・保育・餌場となる藻場機能が長い期間に渡り、維持・発揮されているものと推察される。

コンブ科のカジメは高水温・強光条件によって代謝速度を高めるが、貧栄養海中では急速に窒素・リン不足に陥り早期に死亡する。また、生長期に子嚢斑形成のために必要な炭素・窒素を十分に蓄積できなかった個体は、成熟期にはこれらの物質消費を賄えず死亡すると推定されている（谷口ら, 1999）¹⁰⁾。久遠漁港の背後小段上には、写真4.3に示すように10月時点においてもコンブが残存しており、生長期に必要な物質を蓄え、大量に物質を消費する成熟期を乗り越え、母藻となって遊走子を供給し、背後小段上で世代交代が行われているものと推察される。



写真4.3 残存するホソメコンブ (R4.10撮影)

3) 整備された施設の活用

令和3年7月調査時に、背後小段ではアワビ漁が行われていた(写真4.4)。漁業協同組合への調査直後のヒアリングでは、他の海域は、磯焼け現象によって海藻がほとんど生育していないが、背後小段上には毎年海藻が確実に繁茂していることが示された。また、5月の背後小段上でのアワビ漁時には、エゾアワビが視認できないほどに海藻が繁茂していたことも示されている。

背後小段の被覆ブロックの溝部に蟠集するエゾアワビの生息状況を写真4.5に示す。エゾアワビはブロックの溝部に高密度(写真14個体)で生息しており、タモ網などの漁具で採取がしやすく、天然岩礁の複雑な凹凸や狭い溝などがある基質より、漁獲効率が高いものと推察できる。

以上のことから、背後小段上では継続して藻場が形成されており、これによってアワビ漁場が成立していると考えられた。



写真 4.4 小段アワビ漁
(R3.7 撮影)



写真 4.5 溝部アワビ
(R4.10 撮影)

潜堤に隣接してアワビの好漁場であるアワビ島が存在する(アワビ島の位置は図1.1参照)。令和3年にアワビ島の沖合に潜堤の一部である消波ブロックが設置された。この影響により流動が変化し、アワビ島周辺海域での海藻の生育やエゾアワビの生息に影響が生じることが懸念されている。現時点における藻場調査データからは、海藻の生育量やエゾアワビの現存量の変化は年変動の範囲と考えられ、施設整備による明確な影響はみられていない。施設完成後の状況など、今後の推移を把握し、生態への影響を継続して把握する必要がある。

なお、漁業者は天然岩礁のアワビ島でアワビの生息個体数が減少したとしても、背後小段が新たなアワビの好漁場として漁業生産に貢献する代替施設になると期待している。

5. さいごに

令和4年3月に閣議決定された新たな「漁港漁場整備長期計画」では、「養殖適地の拡大」、「カーボンニュートラルに向けた藻場保全と創造」を推進することとなっている。本施設が藻場機能回復に一定の効果があることは確認されたが、今後は藻場調査結果や空撮結果から海藻現存量を推定し、桑江ら(2019)¹³⁾杉村ら(2021)¹⁴⁾に準じて現状と整備後のCO₂吸収量の算出することにより、

カーボンクレジットへの活用など、新たな事業効果が期待される。持続可能な藻場機能の管理・保持にむけ、整備完了後の状況把握など、今後も必要な調査を継続していきたい。

【参考文献】

- 1) 北海道立水産試験場(1992)：北海道南西部大成町の磯焼け。研究報告38号
- 2) 吾妻行雄(1997)：キタムラサキウニの個体群動態に関する生態学的研究。北水試研報, 51, 1-66
- 3) 谷口和也(1991)：CO₂気候変化と増・養殖業への影響-藻類。農業および園芸, 66, 215-220
- 4) 町口裕二(1997)：磯焼けに及ぼす棘皮動物の餌料海藻摂餌選択制と摂餌圧の影響。磯焼け発生機構の解明と予測技術の開発。農林水産技術会議事務局, 研究成果317, 49-59
- 5) 川俣 茂(2001)：北日本沿岸におけるウニおよびアワビの摂食に及ぼす波浪の影響とその評価。水研センター研報, 第1号, pp. 59-107.
- 6) 菊地省吾・浮永久(1981)：藻場・海中林の水産上の効用。藻場・海中林, 日本水産学会編, 恒星社厚生閣, pp. 2-9.
- 7) 沢田満, 三木文興, 足助光久(1981)：コンブ藻場, 日本水産学会編, 藻場・海中林, 恒星社厚生閣, pp. 130-141
- 8) 谷口和也(2010)：磯焼けのしくみと海中造林。海藻資源(23), 2-22
- 9) 吉田吾郎・新村陽子・樽谷賢治・浜口昌巳(2011)：海藻類の一次生産と栄養塩の関係に関する研究レビュー。水産総合センター研究報告, 34号, 1-31
- 10) 竹田義則・坪田幸雄・永田晋一郎・袖野宏樹(1999)：自然環境調和型構造物における藻場の流速とウニの食害に関する研究。海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1221-1225
- 11) 川俣茂(2004)：振動流中におけるアラメ幼孢子体の成長速度。平成16年度日本水産工学会学術講演会講演要旨集, 25-28
- 12) 谷口和也・長谷川正俊(1999)：磯焼け対策の課題。谷口和也編, 磯焼けの機構と藻場修復, pp. 25-37, 恒星社厚生閣, 東京
- 13) 桑江朝比呂・吉田吾郎・堀正和・渡辺謙太・棚谷灯子・岡田知也・梅澤有・佐々木淳(2019)：「浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計」土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 75, No. 1, 10-20
- 14) 杉村佳寿・小林登茂子・三戸勇吾・吉原哲・岡田知也・桑江朝比呂(2021)：博多港におけるブルーカーボンオフセット制度の創設と今後の展望。土木学会論文集G(環境), 77巻2号, p. 31-48