

ウニ増殖施設の造成・改良に向けた 評価手法の開発

北海道立中央水産試験場 水産工学室 金田友紀, 干川 裕, 櫻井 泉
資源増殖部 高橋和寛, 津田藤典
(独) 水産総合研究センター水産工学研究所 水産土木工学部 桑原久実, 川俣 茂

調査実施年度

平成 16 年度～平成 19 年度

緒言

水産基盤整備事業ではウニ等を対象として自然石を敷設する増殖場造成事業を実施しているが、造成から数年を経ずに餌料となるコンブ類が繁茂しなくなり、磯焼けを呈する事例がある。

磯焼けの持続要因としては、ウニ類によるコンブ類幼孢子体への過剰な摂食が指摘されており、これまでにキタムラサキウニの摂食活動と水温・波浪条件の関係が明らかにされてきた。また、これらをベースとした増殖場造成に係る事前評価モデル¹⁾が提案されており、長期間にわたって利用可能な増殖場の造成手法として注目されている。

しかし、本モデルは①実際の構造物設計に用いるための指針までには至っていないこと、②摂食量に及ぼすキタムラサキウニの生息密度や石材の局所的な配置の違いがもたらすキタムラサキウニの行動可能範囲の変動を評価できないこと、③エゾバフンウニを対象とした施設には適用できないことなどの問題を抱えている。

本調査では、上記モデルに沿って造成したウニ類増殖場について、その妥当性を検証するとともに、モデルでは評価できない上記問題も検討することによって、実用的な技術指針を作成することを目的とする。

調査方法

1. 事前評価モデルによるウニ類増殖施設の設計および造成

事前評価モデルの概要を以下に示す。

施設設計の前に、計画海域の藻場調査・生物調査を実施し、海藻群落が毎年形成される地点と、磯焼け或いは海藻群落の形成に年毎にばらつきが見られる地点を評価地点に設定する。評価指標を季節ごとに設けるため、季節ごとの波浪を入力条件として計画区域内における底面波浪流速の空間分布を数値計算により求める。数値計算の結果から、評価地点における底面波浪流速を抽出し、評価指標とする。

設定した評価指標に基づいて、計画海域全体における底面波浪流速の判定を行い、漁場となりえる範囲を推定し、これと、実海域の藻場分布とを比較することで、評価指標の妥当性を検証する。妥当性を検証した評価指標を満たす施設を設計することで、創出される漁場面積を推定できる。

この評価モデルに従って、北海道が水産基盤整備事業として後志支庁管内寿都町の磯焼け海域にウニ類増殖施設を設計・造成した。

2. 現地調査

2-1. 現存量調査

(1) 追跡調査

寿都町美谷地区に2004年10月から翌2005年4月にかけて造成されたウニ増殖施設において、施設内の海藻類の遷移過程を把握するとともに、ウニ類の移動の実態を把握するために、2005年6月から2007年12月までの間に計15回追跡調査を実施した。なお、増殖施設は当初2004年11月に完成予定となっていたが、同年秋季以降の台風襲来をはじめとする例年のない時化のため工事が大幅に遅れ、2005年4月の完成となった。調査では、天端を通るラインを長辺・短辺方向にそれぞれ2線設定し（図2-1-1）、潜水によりベルト状に1㎡ごとのウニ類の計数と海藻被度の観察を行った。なお、2006年4月以降は各ラインの両端を天然漁場へ10mずつ延長することで調査範囲を拡大して実施した。

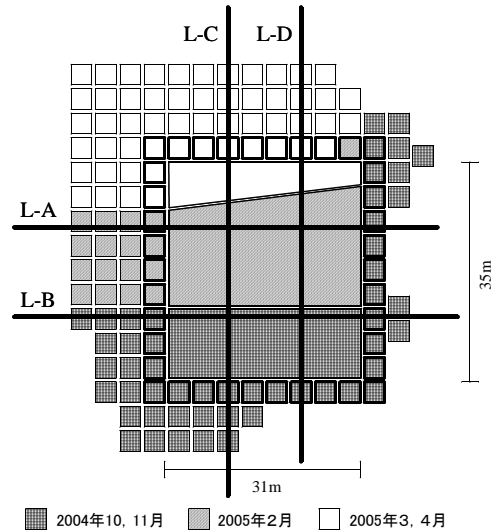


図2-1-1 施設施工日と追跡調査測線

また、2005年6月から2006年2月までは、天端のコンプ着生部（2004年10、11月施工部）の5地点で、2006年4月以降は天端上の9地点でいずれも1/4㎡枠を用いて海藻類の採集を行い、ホソメコンプについては葉長、葉幅、葉重量、根茎重量を、他の大型海藻については個別に全長、全重量を、その他海藻類については種別に重量を調べた。

(2) 広域調査

施設設置が周辺漁場の生物の分布に及ぼす影響を明らかにするために、施設造成前の2004年から造成後2007年までの4カ年にわたり、毎年6月中～下旬に図2-1-2に示す美谷地区のウニ増殖施設を含む周辺漁場において生物分布調査を行った。調査では20m間隔で120～160mの調査線を5本敷設し（図2-1-2）、20m毎に生物採集を、これらの中間地点ではウニ類の計数のみを潜水で行った。生物採集では動物類は1㎡枠を、海藻類は1/4㎡枠を用いた。採集したウニ類の個体数、殻径、重量、年齢および生殖巣重量（殻径50mm以上）を調べた。その他動物および海藻類については種別に個体数と重量を調べた。

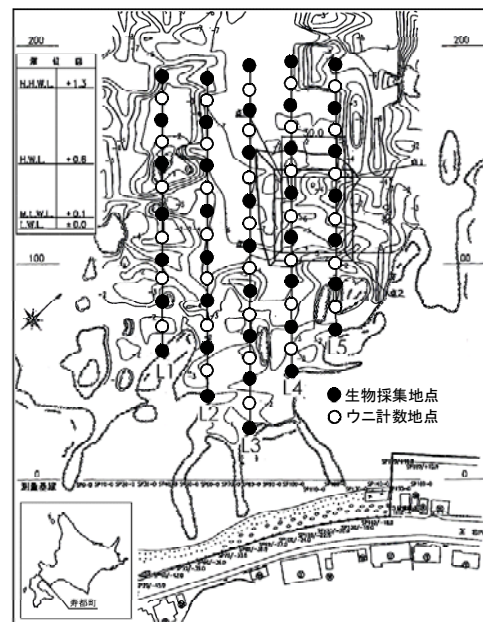


図2-1-2 広域調査地点

2-2. 環境調査

(1) 直接観測

ウニ類の摂餌に影響を与えると考えられる水温、波浪の影響を明らかにするため、施設上に記録式の水温計および波高計を設置し、水温および波浪を観測した。なお、水温観測には Onset 社製 TidbiT を用い、通年の水温を観測した。波浪観測については冬期間のデータをアイオーテック社製 Wave Hunter を用いて観測した。

(2) 瀬棚港波浪観測結果との相関

寿都町美谷海域の波浪環境について、波高計によって直接観測できなかった期間分を補完するため、図 2-2-1 に示す近隣の瀬棚港において北海道開発局 函館開発建設部 江差港湾事務所が実施している波浪観測のデータを、同事務所およびインターネットの Web サイト「国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網ナウファス」

(<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>) を通じて入手し、これらのデータと直接観測した期間（2006 年 11 月 21 日～2007 年 1 月 29 日および 2007 年 10 月 26 日～12 月 12 日）の有義波高、有義周期との相関を求めた。データはそれぞれ 2 時間毎の有義波高と有義周期である。この相関式を用い、2004 年 4 月～2007 年 8 月に、美谷地区に來襲した波の有義波高および有義周期を推定した。

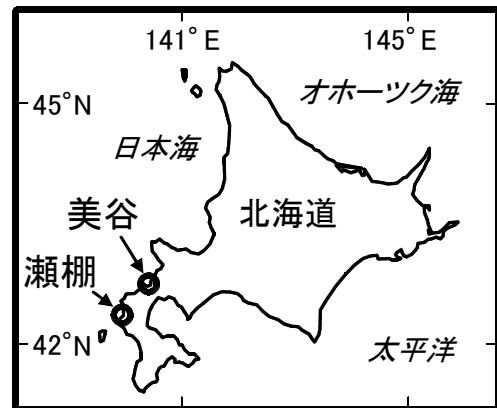


図2-2-1 調査海域

2-3. 施設内石材配置状況調査

ウニ類の摂餌行動や分布に与える影響を明らかにするため、施設内の石材配置状況を調べ、局所的違いを類型化した。

以下の方法により施設内石材の配置状況を調査した。施設上面の縁を形成する平板型ブロック上に、調査線の基点となる 8 本のアンカーピンを設置し、このアンカーピン間に沖陸方向に 2 本、浜なり方向に 2 本の水系を張り渡し、施設上面の調査定線とした（図 2-3-1）。アンカーピン位置に測量ポールを立て、2 カ所の陸上観測定点から、測量ポール先端の方位および仰角を測量し、基点位置を把握した。また、潜水により、水系から施設上面までの距離の測定を、水系に沿って 20cm 間隔で繰り返し行った。陸上基準点の高さを基準面として、水中で得られた水系から施設上面までの垂直距離を、基準面からの垂直距離に変換した。この垂直距離を用い、各計測点について、隣接する測点とのなす角度を求め、40° ごとの階級に分けた頻度分布を求めた。

また、図 2-3-2 に示すように、一つの窪みについて両山頂までの垂直高さを足し合わせ、山頂間の水平距離

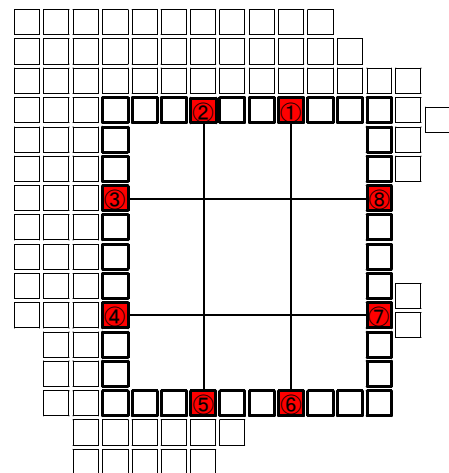


図2-3-1 増殖施設上の調査定線

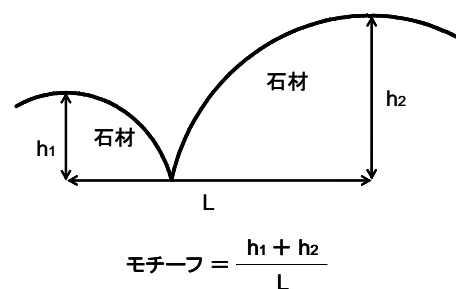


図2-3-2 モチーフの定義

で除した値をモチーフと定義し、頻度分布を求めた。石材と石材の接触部などの窪み部分では周囲に比べ流速が低下すると考えられることから、前述のモチーフに対し、振動流速がどの程度低下するのかを考察した。

調査実施時期は、2005年6月、10月、2006年4月、9月、2007年4月、10月である。2004年（平成16年）は施設が完成していなかったため、調査を実施できなかった。

3. 室内実験

3-1. 流動下におけるウニの密度と海藻摂食量の関係

流動下におけるキタムラサキウニの密度と海藻摂食量の関係を明らかにするため水槽実験を施した。実験には、長さ3.0m、幅0.3mおよび深さ0.35mの水路を持つ鉛直循環式振動流水槽を使用した（図3-1-1）。この水槽は、下部中央部に内蔵されたプロペラの回転数と方向をパーソナル

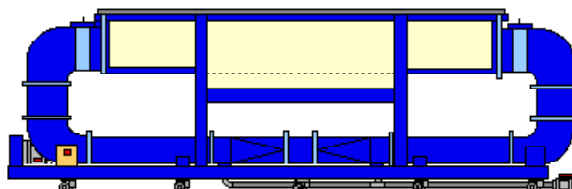


図 3-1-1 鉛直循環式振動流水槽の概要

ルコンピュータで制御することによって、水路内に種々の流速振幅と周期を持つ振動流を発生させることができる。実験は、観測水路の底面にアクリル板を敷設した後、長さ方向に1.0mずつの3区画に区切り、濾過海水を充満した状態で行った。振動流速は、観測水路の底面から5cm上方で電磁流速計にて計測した値とし、0、10、20、30および40cm/sの5段階（すべて周期6秒）を設定した。

実験には北海道後志管内の沿岸から採取した16個のキタムラサキウニを使用した。キタムラサキウニの平均殻径は52.1mm（SD=2.2）、平均重量は60.9g（SD=9.7）であり、漁獲規制サイズ50mmを越えていた。

実験は以下の手順で行った。まず、乾燥コンブを海水に24時間浸して水戻しした後、長さ30cm×幅8～10cmの大きさに裁断し、その一端を各観測区画の底面中央部面に固定したフックにバンドで結束した。次に、水槽内に濾過海水を満し、3区画の観測部上部より、キタムラサキウニをそれぞれ1個体、5個体、10個体投入し、直ちに振動流を起こした。密度はそれぞれ3.3個/m²、16.7個/m²、33.3個/m²となる。そして、24時間後に振動流を停止し、排水および供試個体の撤去を行った後、残存するコンブ片を回収した。以上の操作を、前述の5段階の振動流速条件を1セットとし、3セット分、流速を無作為に変えて繰り返し行った。なお、既往のウニ摂食実験では数日間絶食させた個体を用いているが、今回は天然に分布するウニの摂食状態に合わせて実験を行うため、飼育水槽内でコンブを摂食していた個体を供試した。また、実験開始時と終了時のコンブ片については、湿重量を計測した後、コピー機で複写し、その画像をパーソナルコンピュータに取り込んで葉面積を推定した。葉面積の推定には画像解析ソフトLIA32²⁾を用いた。水温は8℃～9℃とし、ウニを投入する区画を無作為に変えた。

得られた計測値を用いて、キタムラサキウニの摂食速度F（g湿重/日/個体）を（1）式³⁾により算出した。

$$F = w(r^2 S_s - S_e) \quad \dots (1)$$

ここに、wは実験終了時のコンブ片の単位面積当たりの湿重量（g湿重/mm²）、rは実験開始時と終了時のコンブ片の長さの比、S_sとS_eはそれぞれ実験開始時と終了時の葉面積（mm²）である。

さらに、キタムラサキウニの摂食に対する振動流速の影響を評価するため、各個体区ご

とに摂食速度 F を最大の摂食速度 F_{max} で基準化し、摂食速度比 $R (=F/F_{max})$ を算出した。そして、川俣³⁾に準拠して流速 U (cm/s) と R の関係を表す以下の曲線式を求めた。

$$R=1-\exp[-\exp\{(a_1-U)/a_2\}] \quad \dots (2)$$

$$R=b_1(c-U)+b_2(c-U)^2 \quad (U<cとする) \quad \dots (3)$$

ここに a_{1-2} , b_{1-2} および c は実験係数である。(2)式は全流速域におけるウニの摂食活動を1つの式で表現することを目的としているのに対して、(3)式はウニの摂食活動が振動流によって制限され始めた流速域に限定して摂食限界流速 c を推定することを意図している。両式とも修正Marquadt法を用いて係数の最小2乗値を繰り返し計算により推定した。推定には解析ソフトNLRAna⁴⁾を用いた。

上述の実験条件では流速のパターンが不足していたこと、キタムラサキウニの密度についてもより磯焼け海域の状態を反映させること、また後述するエゾバフンウニにおける水温の影響を鑑み、以下の通り実験条件を設定し、追加実験を行った。

振動流速は、観測水路の底面から5cm上方で電磁流速計にて計測した値とし、0, 5, 10, 15, 20, 25, 30および35cm/sの8段階(すべて周期6秒)を設定し、それぞれ流速を無作為に変えて繰り返し実験を行った。実験には北海道後志管内の沿岸から採取した20個のキタムラサキウニを使用し、それぞれの観測部に3個体、7個体、10個体投入した。密度はそれぞれ10個/m², 23.3個/m², 33.3個/m²となる。キタムラサキウニの平均殻径は51.9mm (SD=2.7mm)、平均重量は61.3g (SD=10.1g)であった。水温は8°C, 10°C, 18°Cおよび22°Cに設定した。

3-2. 生息空間とウニの行動の関係

生息空間の違いによるキタムラサキウニの行動変化を明らかにするため、以下の実験を行った。

垂直循環型流動環境シミュレーション水槽内の長さ8m, 幅1.5m, 深さ1mの観測水路部にウニ逃避防止用のフェンスを設置し、長さ1.4m, 幅1.5mの実験区画を設けた。この実験区画内に、塩ビの箱およびコンクリートブロックを台座とし、表面を縦10cm×横10cm×高さ6cmの小型コンクリートブロックで被覆した、施設の石材配置状況を再現するための基礎を築いた(図3-2-1)。基礎の中央部には長さ0.4m, 幅1.5m, 深さ0.5mの溝があり、ここに、前述の小型ブロックを配して、施設の石材の配置状況(溝の長さ方向の中央部で基礎の角部となす角度が100°, 140°, 180°, 220°, 260°の5段階)を再現した(写真3-2-1)。

基礎部分の角部には5個のフックを取り付けてある。ここに、基礎の上面で、

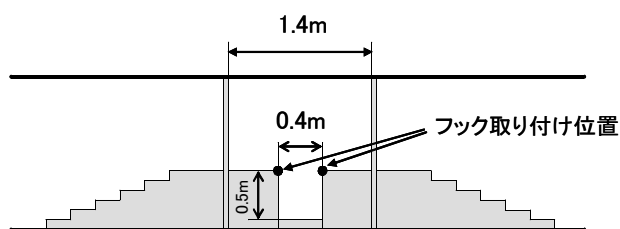


図3-2-1 生息空間実験の基礎部分の概要

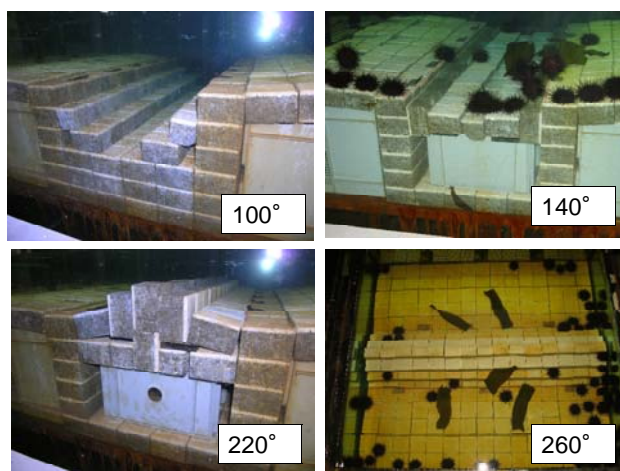


写真3-2-1 実験施設に再現した凹凸の様子
(260°のみ上方から撮影)

水深が 0.5m となるよう海水を満し、周期 6.0 秒、振動流速を 0, 10, 20 および 30cm/s とし、それぞれ 24 時間、作用させた。実験区画内に北海道後志管内の沿岸や寿都町美谷の施設から採取した 50 個のキタムラサキウニを投入し、約 48 時間馴致させた。密度は 23.8 個/m²となる。平均殻径は 51.0mm (SD=4.6mm), 平均重量は 62.7g (SD=18.3g) であった。ここに、3-1. と同様の処置をしたコンブ 5 片を、コピーを取った後にラップバンドを用いてフックに結束した。24 時間の摂食実験終了後、摂食されていないコンブを回収し、実験前と同様にコピーを取り、3-1. と同様に摂食速度 F を求めた。水温は 2005 年度は約 10℃, 2006 年度は約 20℃とした。

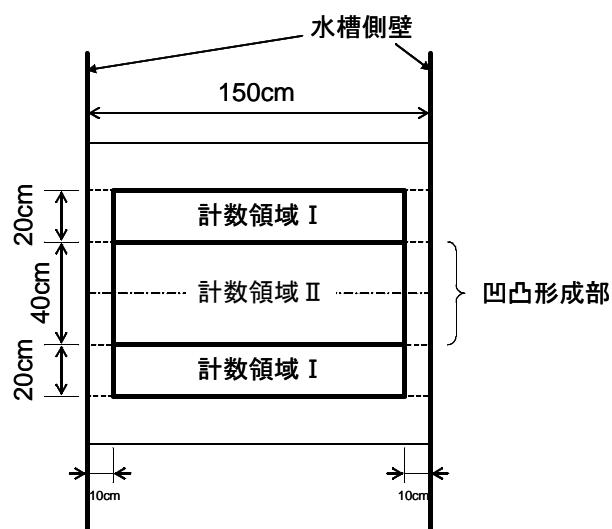


図3-2-2 実験中のウニの計数領域

また、実験中のウニの行動を、水槽上部に取り付けたデジタルカメラで、1 分間隔で撮影した。このデジタル写真から、図 3-2-2 に示す計数領域内のウニの個数をパソコン上で計数した。

3-3. エゾバフンウニの摂食活動と水温・波浪の関係

エゾバフンウニの摂食行動に及ぼす水温および波浪の影響を殻径別に検討するため、北海道栽培漁業振興公社鹿部支所で飼育された殻径 18.6~66.2mm のエゾバフンウニ 29 個体を入手し、5℃, 10℃ および 15℃ に調温した水槽内で 1~2 か月間、市販の乾燥コンブを給餌しながら馴致飼育した。ウニの殻径については、大型群 (殻径 60.9~66.2mm), 中型群 (殻径 39.1~50.1mm) および小型群 (殻径 18.6~30.3mm) の 3 つに区分し、実験 1 回当たり大型群では 4 個体、中型群では 10 個体および小型群では 15 個体を供試した。なお、これらの供試個体数は、後述する実験時間内に一定量のコンブがウニに食べ尽くされない最大の個体数として、事前に静水条件下で求めた値である。

実験には、3-1. と同じ鉛直循環式振動流水槽を使用した (図 3-1-1)。実験は、観測水路の底面にアクリル板を敷設し、濾過海水を充満した状態で行った。また、実験時の振動流速については、水路中央部の底面直上 5cm の位置を電磁式流速計で計測した値とし、0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 および 40cm/s の 11 段階 (すべて周期 6 秒) を設定した。

実験は、3-1. と同様の手順で行った (写真 3-3-1)。ただし、水温を 5℃, 10℃ および 15℃ に設定した。また、摂食速度 F, 流速 U と摂食速度比 R の関係について、各殻径群ごとに (1) 式、(2) 式および (3) 式を適用した。



写真 3-3-1. 実験の状況 (大型群)

4. 事前評価モデルの妥当性の検証

施設天端高を適切に設計して波浪を制御し、波当たりの強くなった波浪によってキタムラサキウニの食圧をコントロールすることで有用なホソメコンブの初期成長段階を保護し、多年生海藻群落相への遷移を防止するのが、本モデルの主旨であるので、2. 現地調査の結果から、施設に作用した波浪および藻場創生面積について検討し、モデルの妥当性を検証した。

波浪については、海藻類の繁茂、ウニ類の活動等を考慮し、夏期を5月～9月、冬期を10月～翌年4月とし、2-2. (2) より2時間毎の有義波高及び有義周期を推定し、これを月単位で平均した。この平均有義波高および周期を施設に來襲する波浪、および、施設の天端水深を2mと仮定し、中山⁵⁾の実験式よりH1点、H2点における波高を推定した(図4-1)。それぞれの波高から、微小振幅波理論に基づいて施設天端面での振動流速を求め、事前評価モデルにて設定した値と比較した。

また、石材と石材の接触部などの窪み部分では周囲に比べ流速が低下すると考えられることから、2-3. で求めたモチーフに対し、振動流速がどの程度低下するのかを考察した。

藻場創生面積については、2-1. のライン調査の結果から天端面全体における藻場面積を推定し、事前評価モデルにて想定した藻場創出面積と比較した。

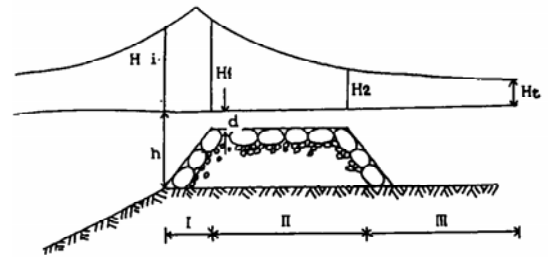


図4-1 礁周辺での波高変化

調査結果

1. 事前評価モデルによるウニ類増殖施設の設計および造成

造成予定地周辺の事前調査から、天然海域においてホソメコンブ群落が形成される地点の、夏期の振動流速は0.78m/s以下、冬期の振動流速は0.78m/s以上であることがわかった。水深7~8mの海域に上述の振動流速を発生させるため、数値計算からウニ類増殖礁の天端高を水深2mと設定した。また、施設の設置により後背域の波浪環境が静穏化する可能性があるため、これも数値計算により、周辺海域も含めホソメコンブ生育量が最大となる施設形状を設定した。その結果、沖陸方向に35m、浜なり方向に30mの天端面を持ち、周辺をブロック、中詰め石材を下層が中割石、上層が大割石である礁とした。

工事は2004年10月までの完成を予定していたが、台風などの荒天の影響により、ホソメコンブの遊走子が放出される12月上旬までには岸側の一部を除き完成が間に合わなかった。翌2005年4月に全ての施設が完成した。

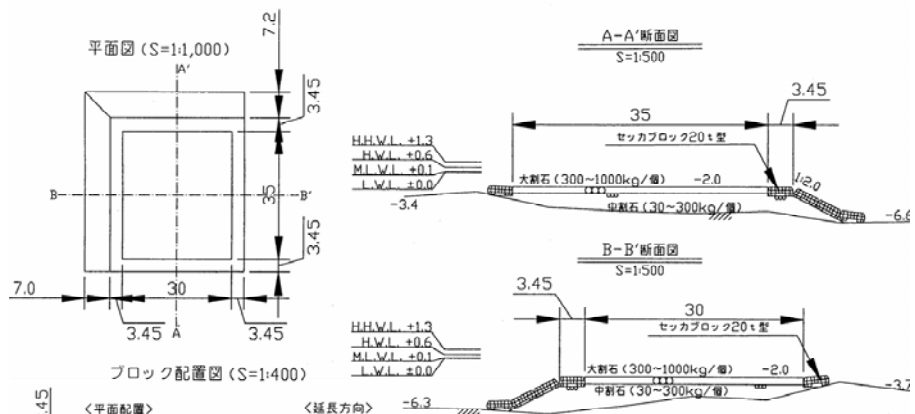


図1-1 北海道寿都町に造成されたウニ類増殖施設の設計図面

2. 現地調査

2-1. 現存量調査

(1) 追跡調査

(ア) 海藻被度および現存量

増殖施設における海藻被度とキタムラサキウニ密度の推移を4測線のうちL-BとL-Cについて図2-1-3に例示した。

2005年はホソメコンブの遊走子が放出される直前の10~11月の造成適期に施工された施設の一部(図2-1-1)にのみホソメコンブが着生したが、2006年2月以降は施設の広い範囲に海藻類がみられ、4~6月には特にホソメコンブが天端のみならず、ブロック部でも高い被度でみられた。2007年4~6月も同様に天端およびブロック部で100%近い高い被度でコンブの着生がみられた。

施設天端部における海藻現存量の推移を図2-1-4に示した。2005年は上記の通り造成適期に施工された部位にのみホソメコンブが着生したが翌年2月まで他の海藻はほとんどみられずほぼコンブの純群落となっていた。その後2006年4月以降コンブの分布は天端の広い範囲に拡大し、海藻現存量は6月に平均29.2kg/m²と極大値を示し、その内訳はホソメコンブ27.9kg/m²、ワカメ0.3kg/m²、ケウルシグサ0.2kg/m²でこれら大型1年生海藻が97%を占め、残りは小型多年生のモロイトグサが0.8kg/m²とわずかにみられるのみであった。

2007年は上記の通り海藻被度としては前年同様に極めて高かったが、現存量およびその変動パターンは前年と大きく異なった。即ち、2006年は4~6月の間に現存量が急激に増加したのに対し、

2007年は4月が極大で現存量は平均6.8kg/m²と前年同月の2.1kg/m²と比べて3倍以上と多くなっていたが、6月には5.9kg/m²と減少し前年の1/5程度の現存量となった。これに関して、図2-1-5に示したように、2007年は4月から6月にかけてホソメコンブの密度の減少と葉体、特に葉長の縮小がみられた。前者について、2007年は5月の底面波浪流速が2004年以降では最も速かったことが推定されており(後述:表4-1)、このために流失量が大きかつ

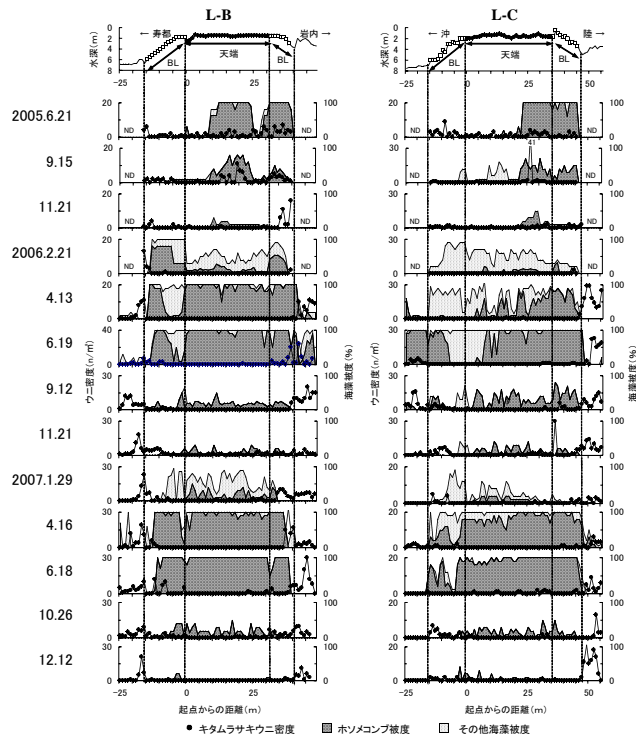


図2-1-3 増殖施設および周辺におけるキタムラサキウニの密度と海藻被度の推移

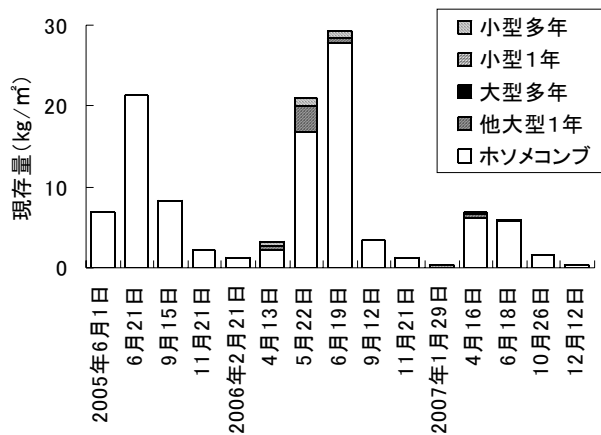


図2-1-4 天端部における海藻現存量の推移

た可能性が考えられる。また、後者については2007年4～6月の水温が1～2℃高かった（後述：図2-2-4）ことにより、ホソメコンブの末枯れが促進された可能性が考えられる。

なお、2007年6月時点での海藻現存量の内訳はホソメコンブが5.8kg/m²と全体の約99%を占め、その他大型1年生のワカメおよびスジメ、小型多年生のモロイトグサがごく僅かにみられたのみであり、今のところ多年生海藻への遷移の兆候はみられない。

(イ)キタムラサキウニの分布

2005年6月から2007年12月までの増殖施設周辺におけるキタムラサキウニの分布の推移を図2-1-6に示した。また、キタムラサキウニの密度と海藻の被度を場所別（天端部、ブロック部および施設近傍10m以内の天然漁場）にまとめて図2-1-7に示した。

キタムラサキウニは、2005年6月時点ですでに天端上で多くみられ、同年9月には特に天端部のコンブ群落内で密度が高くなり、その後秋から冬にかけて次第にブロック部あるいは天然漁場へ移動したと思われた。これに対して2006年は前述のとおりコンブをはじめとする海藻が天端やブロック部の広い範囲で繁茂し、2～9月の間キタムラサキウニは天然漁場またはブロック部の海藻群落縁辺部に蝟集・滞留し、天端上への移動は11月までみられなかった。2007年も冬季から海藻が繁茂した4～6月さらには10月時でも天端上へのキタムラサキウニの顕著な移動はみられなかった。

これまでの調査結果から、冬季には天端部でのキタムラサキウニの密度は3か年とも極めて低くなった。これは冬季の波浪による振動流速が非常に大きくなったため（後述：表4-1）、ブロック部や天然漁場へ移動したものと思われ、これにより冬季から春季にコンブをはじめとする海藻類の幼芽が植食動物の被食から免れていると考えられる。

なお、キタムラサキウニの密度は天端部では2005年6月の平均1.1個体/m²が最大で、それ以降多少の上昇が一時的にみられるが、全体的に低い状態

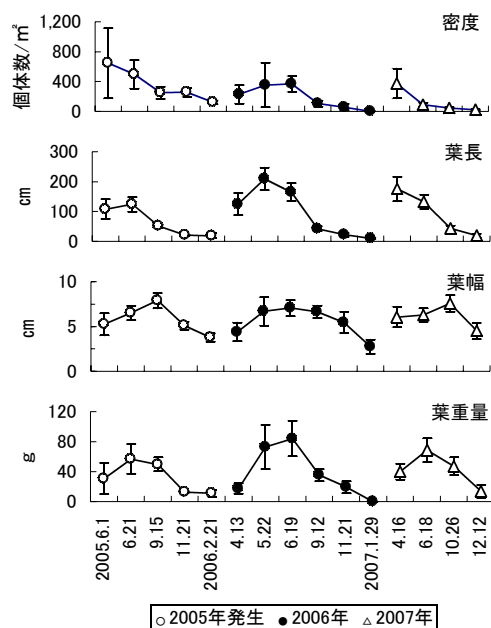


図2-1-5 天端におけるホソメコンブの密度、葉長、葉幅および葉重量の推移。垂線は標準偏差

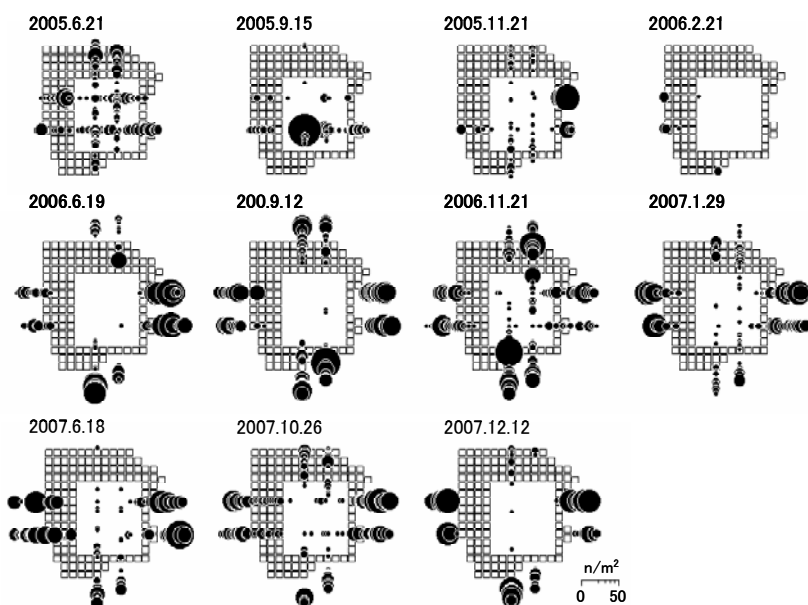


図2-1-6 キタムラサキウニの分布の推移

で経過している。この要因として、2006年および2007年は施設の天端およびブロック部ではホソメコンブを中心とした海藻類の繁茂がみられたことから「掃き出し作用⁶⁾」が働いたことが考えられた。また、施設以外の天然漁場でも餌料となる海藻が豊富であったため、冬季に天然漁場へ移動したキタムラサキウニは天端部へ移動しなくても十分な餌料供給があったことが考えられた。その一例として天然漁場との境界部に相当する施設ブロック部と施設沖合い約50m・水深7mおよび施設沖合い約250m・水深10mの天然漁場における7月時の殻径組成と生殖巣指数組成を図2-1-8に示した。施設ブロック部のウニは天然漁場のウニに比べて常に殻径が大きく、すべての個体が生殖巣指数18を超えており、平均23.7と良好な身入り状況であった。さらに、図2-1-9に示したように施設ブロック部のキタムラサキウニの生殖巣指数は4月時点で平均20を超えるなど、天端へ移動するまでもなく海藻群落の縁辺部で餌料の供給が十分であったことが伺われた。

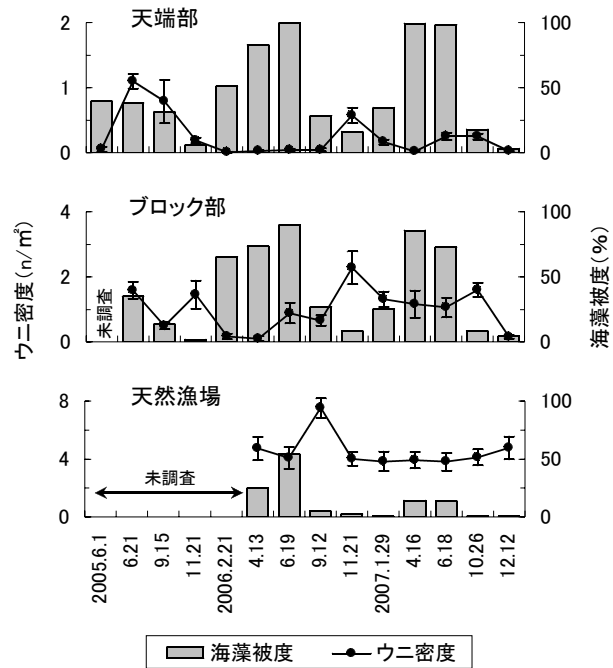


図2-1-7 キタムラサキウニ密度と海藻被度の部位別平均値の推移。垂線は標準誤差

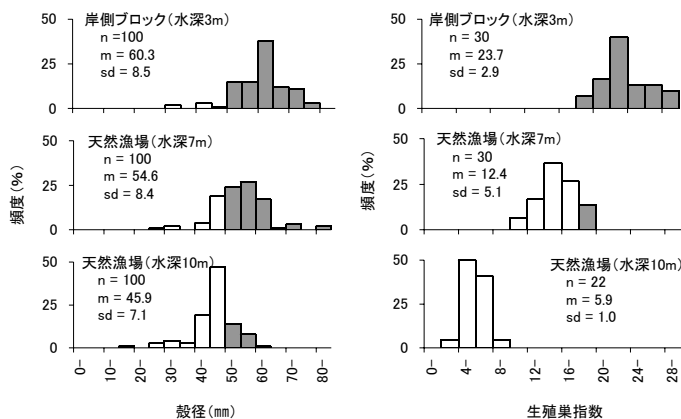


図2-1-8 キタムラサキウニの殻径と生殖巣指数の比較 (2007年7月10日)

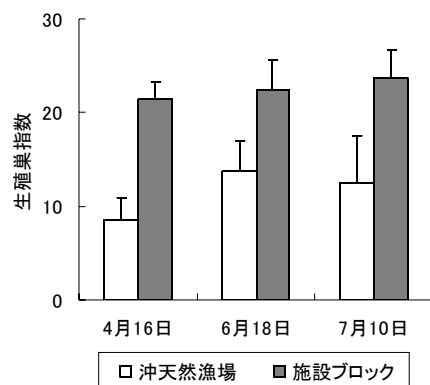


図2-1-9 キタムラサキウニの施設ブロック上での生殖巣指数の推移

なお、本施設では夏季にウニ類の摂食活動によって多年生海藻群落への遷移を防ぐことを期待していたが、天端上へのウニの移動がほとんどみられなかったために、その効果は不明である。しかし2006年、2007年とコンブ現存量に変動があるものの結果的には海藻群落の多年生化はみられていないことから、事業終了後も本増殖施設における海藻群落の遷移過程ならびにウニの移動状況についての観察を継続していく必要がある。

(2) 広域調査

(ア) 動物類

ウニ増殖施設造成前の2004年と造成後の2005年以降毎年6月に実施した施設を含む周辺漁場における動物類の平均密度の推移を表2-1-1に示した。施設設置前後で大きな密度変動がみられた種はキタムラサキウニとエゾバフンウニであり、その他の種には顕著な変動はみられなかった。エゾバフンウニは、2004年にはほとんどみられなかったが2007年の平均密度は1.0個体/m²と増加傾向にあるが、これは周辺の広い海域で卓越発生した2003年級が成長して年々採集されやすくなった結果であり、施設設置の影響で増加したものとはいえない。

表2-1-1 広域調査における動物類の平均密度（個体数/m²）の推移

種名	2004年	2005	2006	2007
キタムラサキウニ	6.8	3.9	4.8	4.9
エゾバフンウニ	0.1	0.3	0.5	1.0
バフンウニ	0.0	0.0	0.0	0.0
イトマキヒトデ	0.7	0.1	0.7	0.9
エゾヒトデ	0.0	0.0	0.1	0.0
タコヒトデ	0.0	0.0	0.0	0.0
マナマコ	0.4	0.0	0.0	0.1
ヨツハマモガニ	0.1	0.1	0.0	0.1
ヤドカリ類	0.0	0.0	0.1	0.2
ユキノカサ	0.0	0.0	0.0	0.1
エゾアワビ	0.0	0.0	0.0	0.1
コシダカガンガラ	0.0	0.0	0.2	0.5
イガイ	0.0	0.0	0.1	0.0
合計	14.1	8.1	11.1	13.2

キタムラサキウニは2004年秋の台風などの影響で2005年には大きく減少したがその後上昇傾向にあり、2007年の平均密度は4.9個体/m²で前年と同程度であった。キタムラサキウニの2007年の平均殻径は53.3mmで前年よりやや大きく、漁獲制限殻径50mm以上の割合も、前年より6ポイント増えて65%になった（図2-1-10）。平均生殖巣指数は2004年の13.4から徐々に上昇し、2007年は17.8となり、むき身として出荷が可能な指数値が18を超えるものの割合も、47.4%まで上昇した。これは後述のように、周辺の天然漁場で餌料となる海藻の生育が年々良好になっているのに加え、増殖施設設置により施設由来のホソメコンブをはじめとする海藻類が比較的広い範囲のウニの餌料として身入りに貢献した可能性がある。年齢組成では2齢以下の若齢個体の占める割合がやや高くなったほか、依然1998年発生の8齢群が33.6%、1996年以前に生まれた10齢以上の高齢群が19.0%を占め、これまで同様に卓越発生群を主体とした年齢構成になっていた。

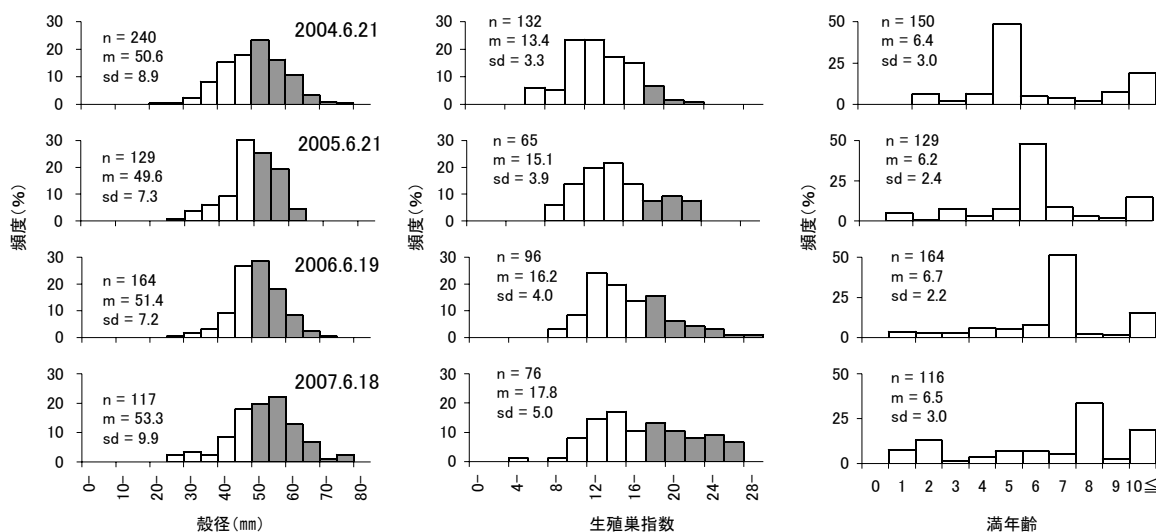


図2-1-10 広域調査におけるキタムラサキウニの殻径組成、年齢組成および生殖巣指数

(イ) 海藻類

増殖施設周辺の天然漁場（施設内の6地点を除いた33地点）の海藻現存量の合計は2004年が395 g/m²であったのに対し、2005～2007年は1,200～1,300 g/m²と3カ年とも2004年の3倍程度に増加し（表2-1-2）維持している。中でもホソメコンブの割合が高まっていることが特徴であり、2004年の69 g/m²に対し2005年は4.2倍、2006年は8.0倍、2007年は8.6倍となった。この周辺漁場でのコンブ現存量の増加については、天然コンブの年変動の他に、施設から流れ藻として供給されることにより、天然コンブへの摂食圧が軽減されている可能性が考えられる。また、小型1年および小型多年生海藻も増加傾向にある一方で、大型多年生（フシスジモク1種のみ）は減少傾向がみられた。

また、増殖施設内の6地点を含めた2007年の合計現存量は1,760 g/m²で、含めない場合（1,281 g/m²）に対して1.4倍、ホソメコンブについては同様に1.9倍となった。2005年、2006年に比べると増殖施設に生育したコンブは少ないが、この他に前述のように4～6月の間には流れ藻や末枯れとして周辺漁場に大量に供給されたと考えられ、周囲のウニ類をはじめとする各種生物の身入りや成長の向上に多大な貢献をしたものと考えられる。

表2-1-2 広域調査における海藻類の平均現存量（g/m²）
各年の左列は増殖施設内の6地点を除いた場合の値

種名/生活型	2004年		2005年		2006年		2007年	
	6月21日		6月21日		6月19日		6月18日	
	33地点	39地点	33地点	39地点	33地点	39地点	33地点	39地点
ホソメコンブ	69	59	291	1,511	550	2,604	596	1,132
その他大型1年	20	23	690	584	322	273	117	128
大型多年	123	104	51	43	43	36	4	4
小型1年	11	9	2	3	13	11	198	168
小型多年	172	154	271	229	239	258	366	330
合計	395	348	1,305	2,370	1,167	3,182	1,281	1,760

2-2. 環境調査

(1) 直接観測

(ア) 水温観測

水温の観測結果について、過去4年間の各月の平均値と偏差を図2-2-2に示す。2007年2月は前年に比べやや高く、平均6.3℃で推移した。このことはキタムラサキウニの摂食圧を高めることに影響していた可能性がある。また4月から6月にかけても前年より1～2℃高かった。これについてもウニの摂食圧を高めると考

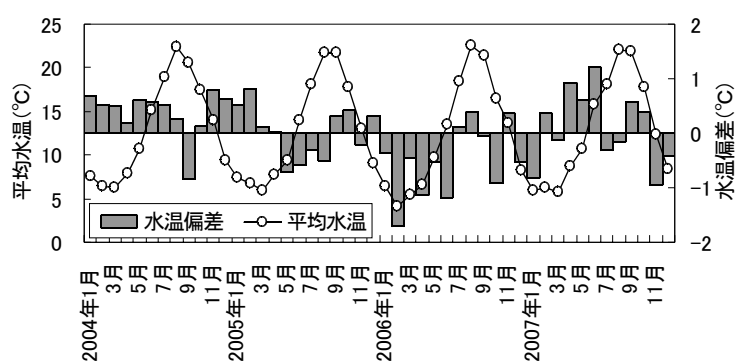


図2-2-2 水温観測結果（過去4年間の月平均値と偏差）

えられるが、ホソメコンブ葉体の観察から、それ以上にホソメコンブの末枯れを促進した可能性があり、前述のホソメコンブ現存量減少の一因になったと考えられる。

(イ) 波浪観測

1. で述べたとおり施設の完成が遅れたことから、当初計画していた2004年冬期における波高計の設置が困難となり、波浪観測データを収集できなかった。また、翌2005年11月21日に沖端ブロック上に設置し、翌平成18年2月21日に回収したが、計測器の内部に海水が浸水し、内部の精密機器部が破損した。このため、冬期間の波浪データを収集できなかった。

2006年11月21日に沖端ブロック上に設置し、翌2007年1月29日に回収した。波高計は研究室へ持ち帰り、パソコンと接続してデータを収集した。

波浪観測結果を図2-2-3に示す。観測期間中に水温は低下し続け、2007年1月中は6℃前後で推移した。今年度は平成17年度に比べ、水温は低く推移している。また有義波高2mを超える時化が幾度か観測され、2006年11月26日には4mの有義波高を観測した。

この有義波高について、ウニ増殖施設上での浅水による波高変化を、中山⁵⁾により求め

施設に入射した波は、施設前縁の法面部から施設上面の沖側縁辺部に掛けて波高が上昇し、その後、碎波もしくは石材間への透水現象により波高が減衰していたと推測される。図中の△は（施設設置水深/入射波高）が4.0以下の条件（碎波条件）での、岸側縁辺での推定波高を示している。岸側縁辺での波高は低くても1.3m程度あった。

これについて碎波後の波ではあるが、簡単のため微小振幅波理論を適用し、波高1.3m、周期6.5秒、水深2mの条件で施設上面での振動流速を推定したところ、1.35m/sとなった。また、非碎波となる入射有義波の平均波高0.76mおよび平均周期5.43秒から同じく微小振幅波理論を適用して施設上面での振動流速を推定したところ0.76m/sとなり、いずれもウニ類が行動不可能な流速状況であったことがわかった。

次に、2007年10月26日に沖端ブロック上に設置して120分間隔で20分間の自動観測を行

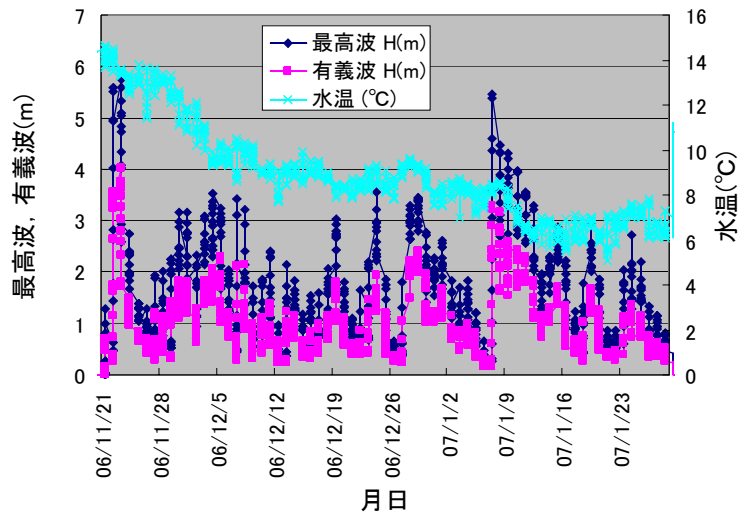


図2-2-3 波浪観測結果（2006年度）

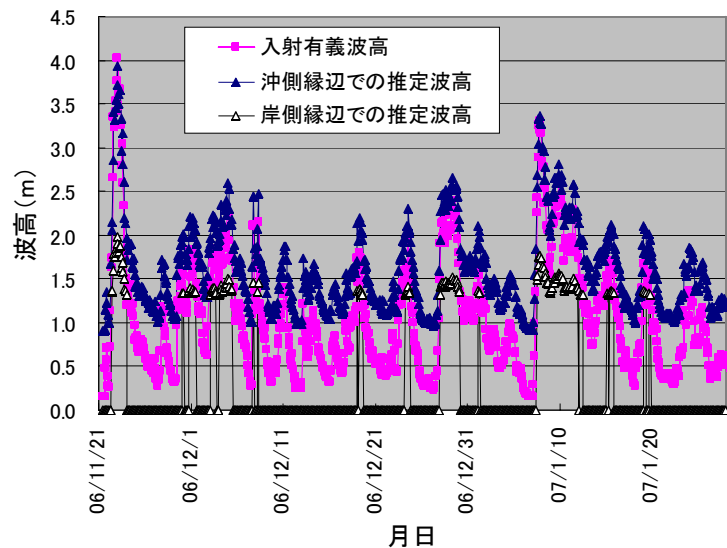


図2-2-4 施設への入射有義波高および施設上で変形した推定波高

い、2007年12月12日に回収した。波浪状況の直接観測結果を図2-2-5に示す。観測期間中、有義波高が3mを超える猛烈な時化が2度、2mを超える時化も2度、来襲していた。それ以外でも波高1m程度の波が常に来襲しており、キタムラサキウニは活動しづらい環境であったと考えられる。

以上2回の波浪観測データは、次節の(2)で述べる瀬棚港における波浪観測データとの相関を求めるのに用いた。

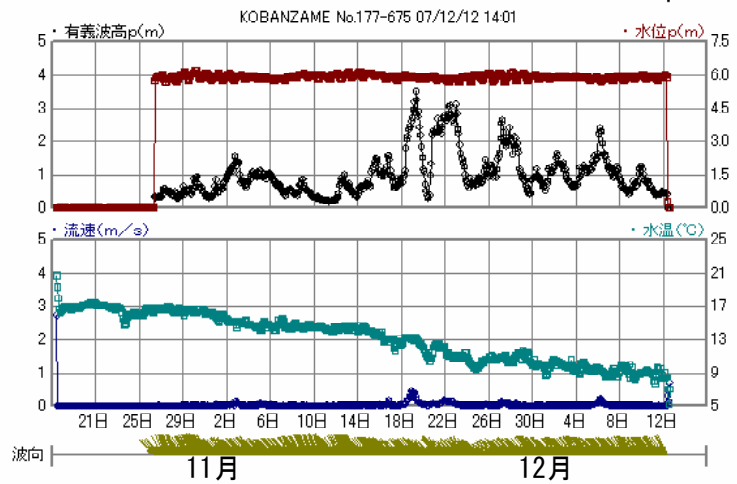


図2-2-5 波浪観測結果

(2) 瀬棚港波浪観測結果との相関

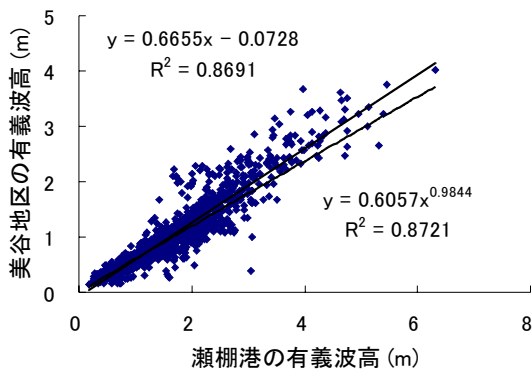


図2-2-6 美谷および瀬棚港の有義波高の相関

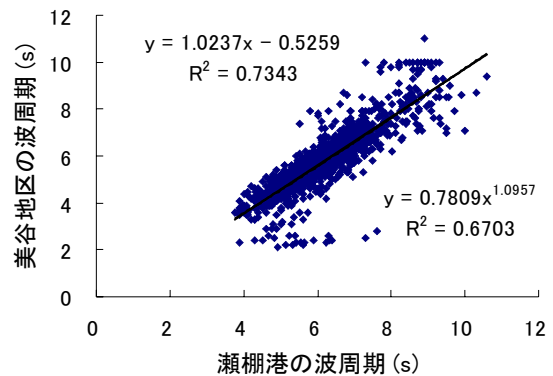


図2-2-7 美谷および瀬棚港の有義周期の相関

直接観測結果と瀬棚港における波浪観測結果について、有義波高の相関を図2-2-6に、有義周期の相関を図2-2-7に示す。それぞれのデータに対し、1次関数および指数関数による近似を行ったところ、有義波高については指数関数(4)式、有義周期については1次関数(5)式による近似の相関係数が高かった。

$$y_1 = 0.6057x_1^{0.9844} \quad \dots (4)$$

$$y_2 = 1.0237x_2 - 0.5259 \quad \dots (5)$$

ここに x_1 は瀬棚港における有義波高(m)、 x_2 は瀬棚港における有義周期(s)、 y_1 は美谷地区における推定有義波高(m)、 y_2 は美谷地区における推定有義周期(s)である。

(4)式、(5)式を用いて瀬棚港の波浪データから推定した寿都町美谷地区の波浪の有義波高および有義周期を図2-2-8に示す。

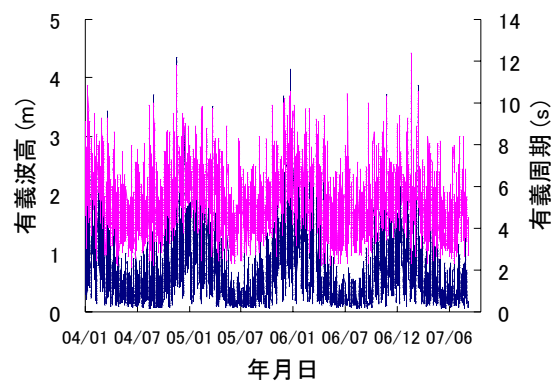


図2-2-8 推定した有義波高および有義周期
青線：有義波高、赤線：有義周期

2-3. 施設内石材配置状況調査

陸上基準面から施設上面までの垂直距離計測について、代表して2007年10月の結果を図2-3-3に示す。各調査回とも、沖陸方向（定線1-6，定線2-5）では施設天端

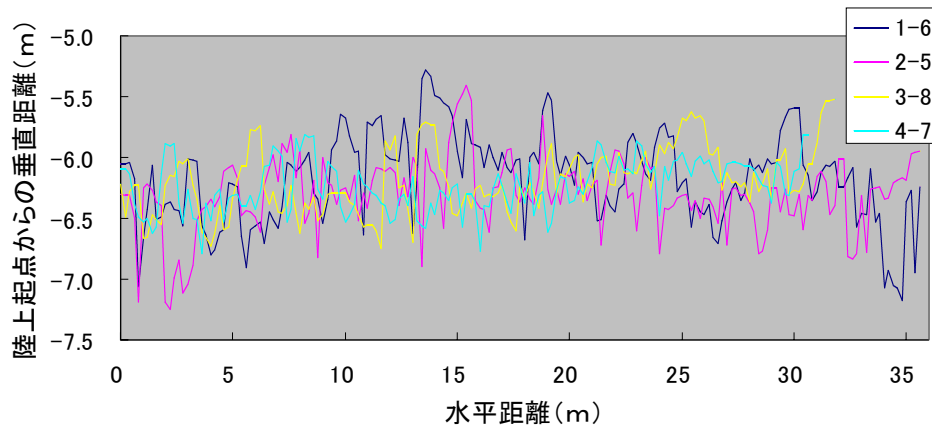


図2-3-3 施設天端面の起伏計測結果（2007年10月調査分）

面は中央部が膨らんだ形状をしており、かつ、施設全体が浜なり（定線3-8，定線4-7）に傾斜していることがわかる。沖陸方向では、天端面周囲の囲いブロックの水深差が約40cm程度であり、中央部の上に凸となる部分は巨大な石材の表面であると考えられ、全体としてはほぼ水平に施工されたと思えることができる。

図2-3-4に、ある測点において隣接する測点となす角度についての頻度分布を示す。測点間の角度は、時間を経るごとに多少変動しているが、3年間の調査期間中、180°または220°にモードを持っていることがわかった。石材配置状況の変位は、波浪によって起こったもので、より安定する配置になっているものと考えられる。

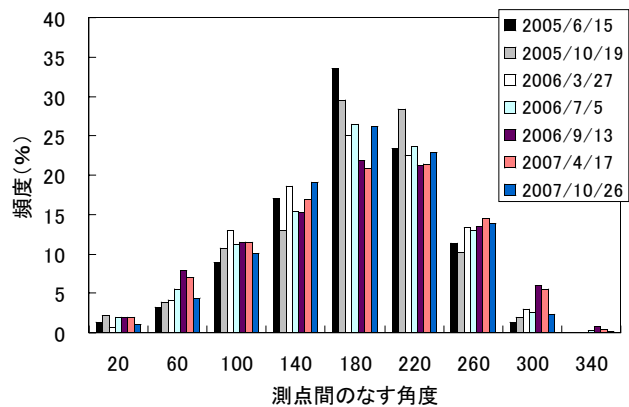


図2-3-4 測点間のなす角度の頻度分布

図2-3-5に、調査日毎に施設天端上の4定線分のモチーフをまとめた頻度分布を示す。いずれの調査日においても、1前後にモードを持つことがわかった。

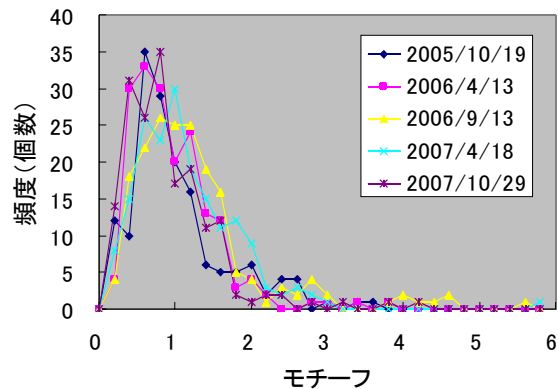


図2-3-5 モチーフの頻度分布

モチーフは1つの定線上に最小で34，最大で50，平均すると43.8個存在していた。

3. 室内実験

3-1. 流動下におけるウニの密度と海藻摂食量の関係

振動流速による総摂食量および摂食速度Fの変化を図3-1-2に示す。流速0cm/sを除いては、10個体による総摂食量が最も大きく、次いで5個体，1個体の順となった。これは、単純に個体数が多くなった分、摂食量も増えたものと考えられる。流速0cm/sでは5個体に

よる総摂食量が最も大きく、次いで10個体、1個体の順となった。また摂食速度Fは、振動流速30cm/sおよび40cm/sを除いた各流速段階で5個体区が大きかった。これらは、移動や摂食活動が可能な流速域では、10個体区は密度が高いことで個体同士が干渉し合ったため、1個体当たりの摂食量が少なくなったのではないかと考えられる。この逆に、1個体区の場合の摂食速度Fが小さいのは、今回の実験区画に対して密度が低すぎ、ウニが徘徊してもコンブに出会わなかったことが原因である可能性がある。

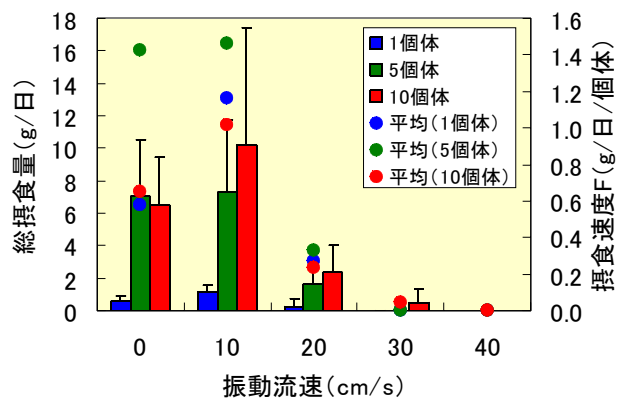


図3-1-2 ウニ密度別の振動流速と摂食速度の関係

1個体区および10個体区では、振動流速0cm/sの摂食速度比が振動流速10cm/sの摂食速度比よりも小さい場合が多かった。このため、摂食速度比Rと振動流速Uの関係を表す(2)式および(3)式において、統計的に有意な関係を得られたのは(2)式および(3)式とも5個体の場合のみであった(図3-1-3, 3-1-4, 表3-1-1)。以上より、密度によって摂食速度に差が認められたことから、個体数や振動流速のパターンを増やし、さらなる検討を行った。

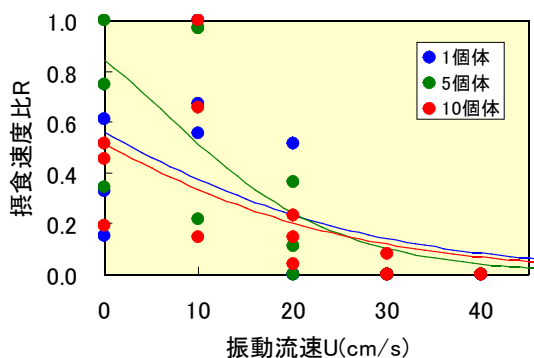


図3-1-3 振動流速と摂食速度比の関係
(2)式による近似曲線

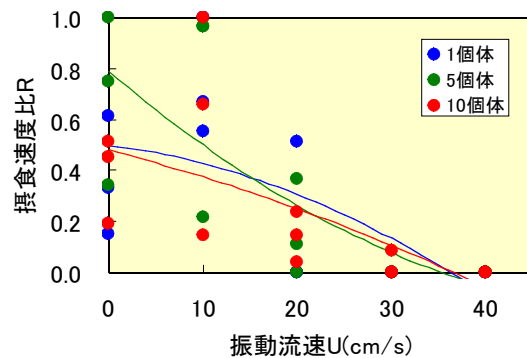


図3-1-4 振動流速と摂食速度比の関係
(3)式による近似曲線

表3-1-1 キタムラサキウニの密度による摂食速度比Rと振動流速Uの関係式

タイプ	区分	回帰式	決定係数 ²	有意水準P
(2)式	1個体区	$R=1-\exp[-\exp\{(-3.585-U)/17.860\}]$	0.353	<0.05
	5個体区	$R=1-\exp[-\exp\{(6.496-U)/10.567\}]$	0.595	<0.01
	10個体区	$R=1-\exp[-\exp\{(-5.507-U)/17.224\}]$	0.382	<0.05
(3)式	1個体区	$R=-0.023(-54.644-U)-0.0003(-54.644-U)^2$	0.437	<0.05
	5個体区	$R=0.013(35.333-U)+0.0003(35.333-U)^2$	0.605	<0.01
	10個体区	$R=0.0167(36.615-U)-9.78E-05(36.615-U)^2$	0.440	<0.05

次に、条件を増やした摂食実験の結果を図3-1-5に示す。3-3. で後述するエゾバフンウ

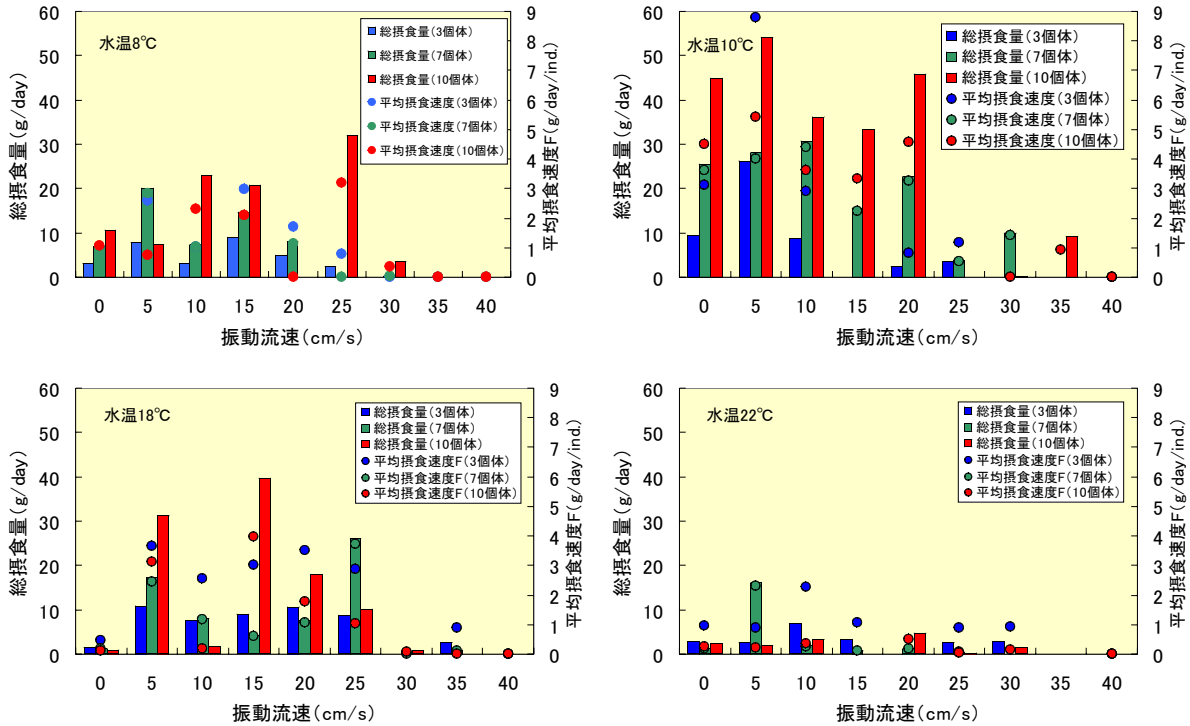


図3-1-5 水温別のウニ密度による振動流速と摂食速度の関係

ニの摂餌実験と同様に、キタムラサキウニについても、その摂食量は水温に影響を受け、水温 10℃での摂餌量が最も多くなることがわかった。水温 10℃というのは、北海道南西海域では4月下旬から5月上旬の、ホソメコンブが急激に伸長する時期に当たる。そこで水温 10℃の実験数を増やし、各流速値で最大の摂食速度を用いて摂食速度比を求め、(2) および (3) 式を当てはめた (図 3-1-6, 図 3-1-7, 表 3-1-2)。

この結果、ウニの密度が高いほど摂食速度比が高くなること、また摂餌限界流速 (実験係数 c) も高くなることがわかった。実験中の様子を目視観察したところ、流速が大きい場合、密度の低い実験区ではウニが移動しなくなったり、底面に付着できずに転倒するケースが見られた。逆に密度の高い実験区では他の個体を支えに移動したり、他の個体が押さえたコンブを摂食するケースが見られた。

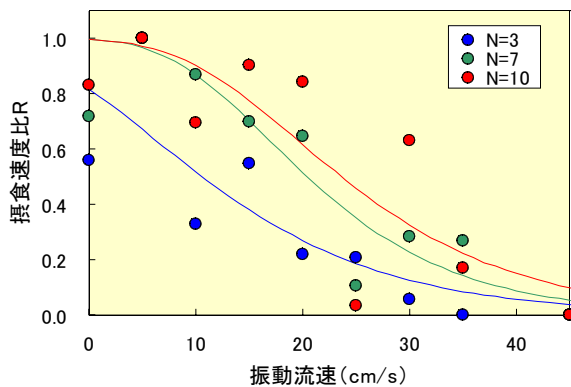


図3-1-6 振動流速と摂食速度比の関係
(2) 式による近似曲線

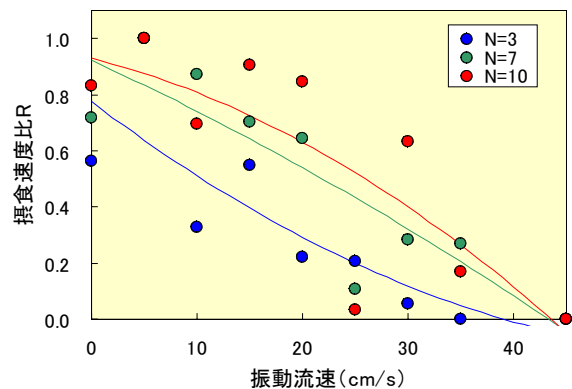


図3-1-7 振動流速と摂食速度比の関係
(3) 式による近似曲線

表3-1-2 キタムラサキウニの密度による摂食速度比Rと振動流速Uの関係式

タイプ	区分	回帰式	決定係数 r^2	有意水準P
(2) 式	3個体区	$R=1-\exp[-\exp\{(6.2515-U)/11.1117\}]$	0.758	<0.01
	7個体区	$R=1-\exp[-\exp\{(16.8693-U)/9.0498\}]$	0.854	<0.01
	10個体区	$R=1-\exp[-\exp\{(18.9279-U)/10.0884\}]$	0.713	<0.01
(3) 式	3個体区	$R=0.0083(39.8170-U)+0.0003(39.8170-U)^2$	0.757	<0.01
	7個体区	$R=0.0267(42.5056-U)-0.0001(42.5056-U)^2$	0.806	<0.01
	10個体区	$R=0.0332(42.5331-U)-0.0003(42.5331-U)^2$	0.710	<0.05

(2) 式について、本年度および昨年度のウニ密度 (個/m²) と実験係数 a_1 および a_2 の関係を図 3-1-8 に示す。実験ケースが少ないため誤差を含むと考えられるが、係数 a_1 の推定を次式により、 a_2 の推定値を4つのデータの平均 10.204 として推定した、ウニ密度による摂食速度比の変化を図 3-1-9 に示す。

$$a_1=0.6197 \cdot x-0.7697 \quad \dots (6)$$

ここに x はキタムラサキウニの密度 (個/m²) である。決定係数は比較的高く、これらの結果から、ウニ密度を変数として、振動流速と摂食速度比の関係式を推定可能であることがわかった。

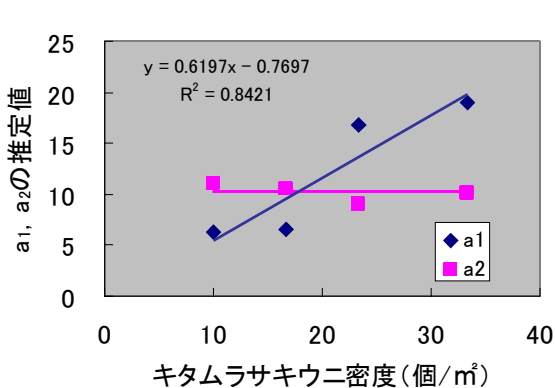


図3-1-8 ウニ密度と実験係数 a_1 および a_2 の関係

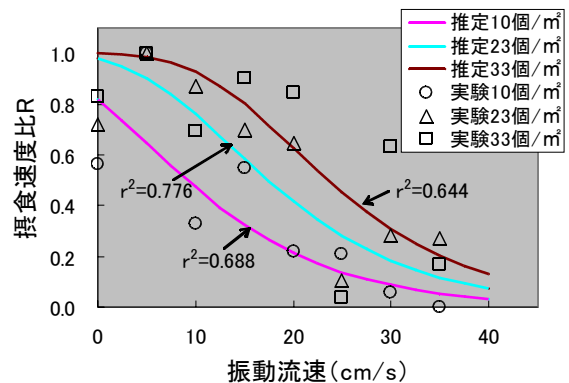


図3-1-9 ウニ密度による摂食速度比の推定

3-2. 生息空間とウニの行動の関係

まず、水槽内の水温をキタムラサキウニの摂食が活発化する春先の海水温に合わせ 10℃ とした。しかし実験途中で流動水槽に故障が発生したため、凹凸条件 140°、180°、振動流速 0.1m/s、0.2m/s の結果のみの試行となった。振動流速は平坦部での底面直上の計測結果である。

実験結果を図 3-2-3 に示す。凹凸条件が 180° の場合、既往の知見と同様に、振動流速が大きくなると摂食速度が減少する傾向がみられた。140° (窪み) の場合では、流速の増大に

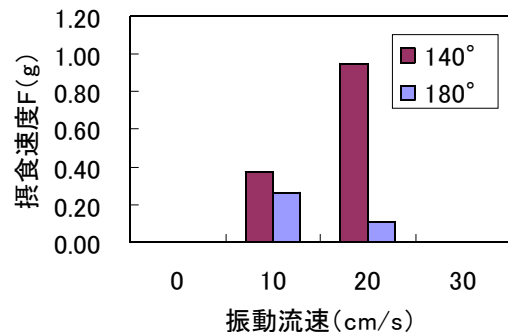


図3-2-3 生息空間による振動流速と摂食速度の関係(水温10℃)

に伴い、摂食速度も増加した。このときキタムラサキウニは窪み部分に集まりコンブを摂食している様子が観察された。

次に、流速値および底面の凹凸条件を増やして実施した流速下における摂食実験結果を図3-2-4に示す。

夏季を想定して水温を高くしたことから、全体として摂食速度が低くなっていた。底面が平坦（180°）な場合、前年度と同様、流速の増加に従って摂食速度は低下した。底面に凹凸がある場合、全体的に平坦時より摂食速度は増大し、特に100°や260°の凹凸が激しい場合、流速が30cm/sと大きくなって摂食速度の低下はわずかであった。

実験中のウニの分布について、領域ごとに計数した結果を図3-2-5に示す。なお、サンプルは、流動下でのウニの移動が少ないため1時間に1枚のデジタル写真を使用した。

また、水槽底面が平坦（180°）な位置での流速（以下、設定流速と称する）と凹凸部における流速実測値の関係を図

3-2-6に示す。流速計測位置は、底面が凹となる場合は平坦部と同水深で、凸となる場合は凸部の頂上直上とし、電磁流速計を用いて計測した。

実験施設の角度が100°の場合、設定流速の増加に伴い領域IIの分布数が高まった。これは、領域II内の凹部での流速が周辺に比べて低下することで、ウニが定位しやすくなったことによるものと思われる。その結果、設定流速0.3m/sの条件下でも摂食速度が低下しなかったと考えられる。施設角度140°や180°といった比較的平坦な底面の場合、領域IIでの流速低下は見られず、結果としてウニが特定の領域に分布することなく、実験区画内全域に分散していた。この条件での摂食速度も低く推移していた。施設角度220°および

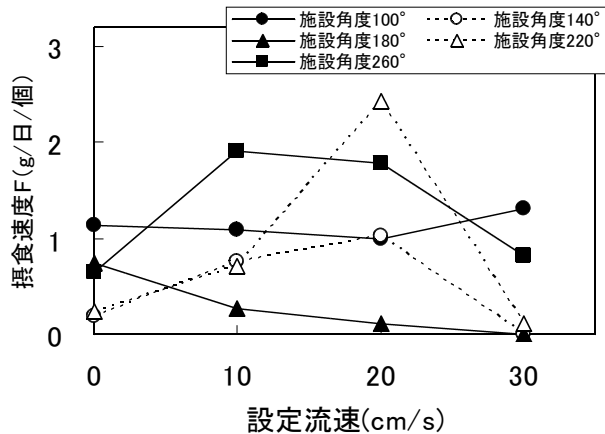


図3-2-4 生息空間による振動流速と摂食速度の関係 (水温20°C)

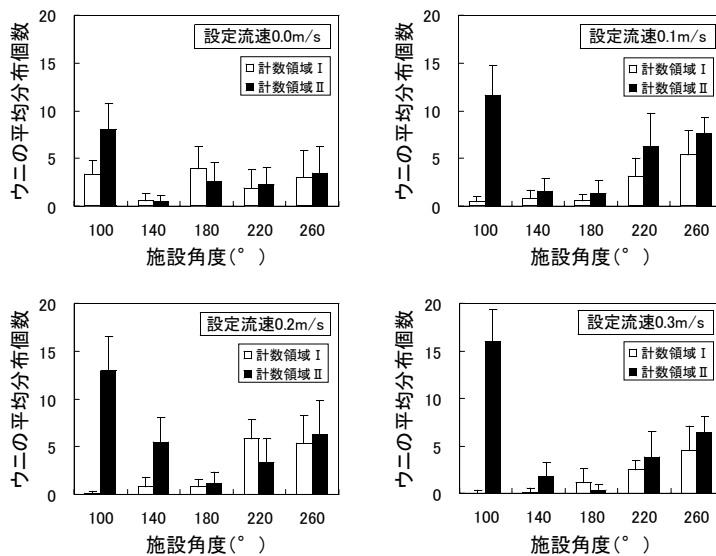


図3-2-5 実験中のウニの分布数

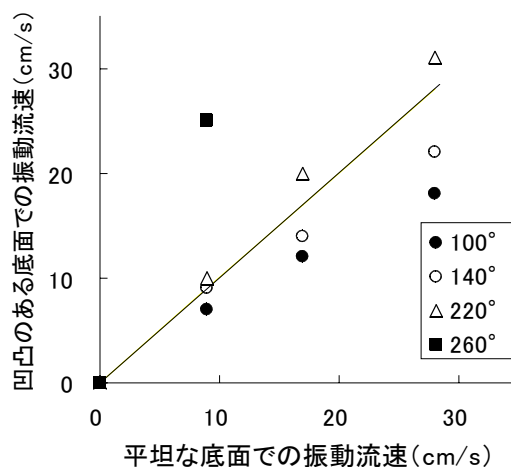


図3-2-6 平坦部に対する凹凸部での流速

260° の凸となる底面の場合，設定流速増加によるウニ分布数の変動はあまりなく，領域Ⅰと領域Ⅱの分布数が近い値を示していた。これは，平坦な領域Ⅰと角度のある領域Ⅱとの境界付近で流速の低下が起これウニが定位しやすくなっていたためと考えられる。この結果，設定流速 0.2m/s や 0.3m/s の条件下でも摂食速度が比較的高い状態を維持していた。

以上の結果から凹凸の激しい底面では流速の低下が生じ，ウニが高いコンブ摂食圧を維持できる環境となることがわかった。

3-3. エゾバフンウニの摂食活動と水温・波浪の関係

エゾバフンウニの摂食速度比Rと振動流速Uの関係式を殻径および水温別に計算した結果，統計的に有意な関係が得られたのは，(2)式では大型群および中型群の各々10℃の2ケース（ともに $P < 0.01$ ），(3)式では大型群の10℃の1ケース（ $P < 0.01$ ）のみであった。このため，殻径および水温条件をそれぞれ込みにし（図3-3-1，3-3-2，3-3-3，3-3-4），摂食速度比と振動流速の関係式を再計算した（表3-3-1）。その結果，得られた関係式はすべて

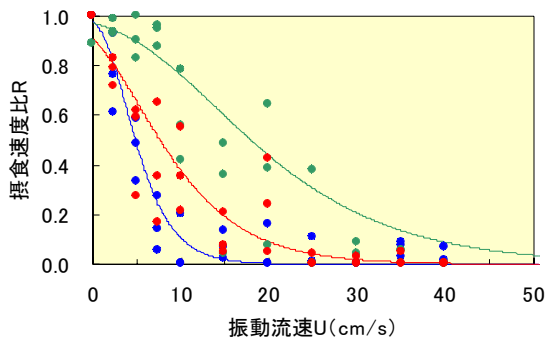


図3-3-1 水温別に整理した振動流速と摂食速度比の関係(その1)

●:5℃, ●:10℃, ●:15℃, 図示した曲線は，本文中の(2)式である

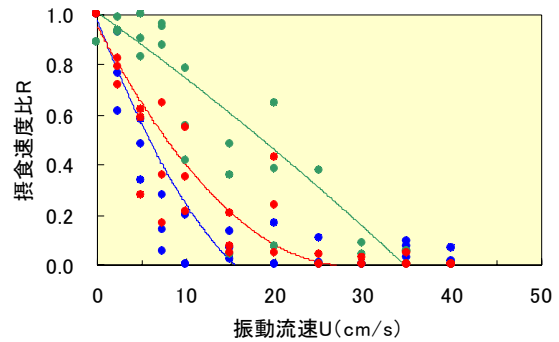


図3-3-2 水温別に整理した振動流速と摂食速度比の関係(その2)

●:5℃, ●:10℃, ●:15℃, 図示した曲線は，本文中の(3)式である

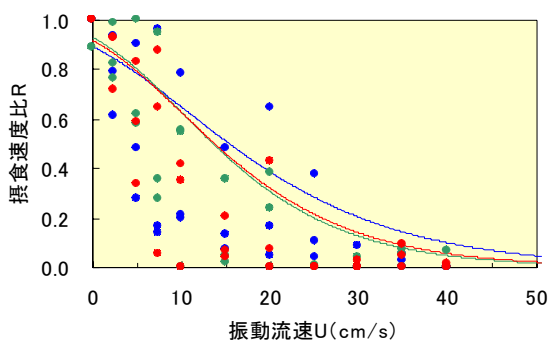


図3-3-3 殻径別に整理した振動流速と摂食速度比の関係(その1)

●:大型, ●:中型, ●:小型, 図示した曲線は，本文中の(2)式である

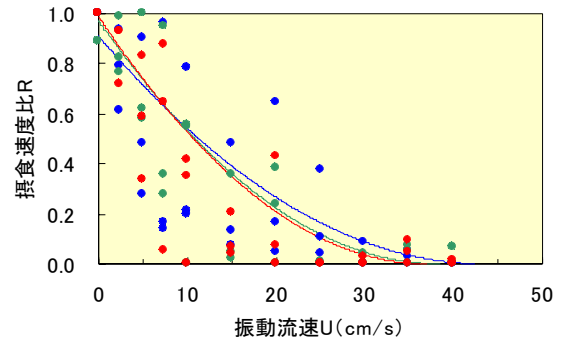


図3-3-4 殻径別に整理した振動流速と摂食速度比の関係(その2)

●:大型, ●:中型, ●:小型, 図示した曲線は，本文中の(3)式である

統計的に有意となったが、水温条件ごとに整理した関係式のほうが殻径条件ごとに整理したものに比べて曲線の当てはまり精度が高かった。このことから、エゾバフンウニの振動流速に対する摂食限界は、殻径よりも水温の影響を強く受けることが示唆され、本種は水温5～15℃の範囲内では10℃付近で最も摂食行動が活性化すると考えられた。

今後、エゾバフンウニの摂食行動を考慮したウニ増殖場造成を計画するにあたっては、保護すべきコンブ類幼孢子体が出現・成長する時期の水温および波浪条件を把握し、この時の底面波浪流速が表3-3-2に示した水温別の摂食限界流速以上となるように基質の天端水深を決めることが望ましいと考えられた。

表3-3-1 エゾバフンウニの摂食速度比Rと振動流速Uの関係式

タイプ	区分	回帰式	決定係数 ²	有意水準P
(2)式	5℃	$R=1-\exp[-\exp[(3.823-U)/2.814]]$	0.925	<0.01
	10℃	$R=1-\exp[-\exp[(13.952-U)/10.908]]$	0.742	<0.01
	15℃	$R=1-\exp[-\exp[(5.413-U)/6.163]]$	0.769	<0.01
(3)式	5℃	$R=0.003(15.505-U)+0.002(15.505-U)^2$	0.871	<0.01
	10℃	$R=0.033(34.642-U)-0.0001(34.642-U)^2$	0.727	<0.01
	15℃	$R=0.004(26.936-U)+0.001(26.936-U)^2$	0.790	<0.01
(2)式	大型	$R=1-\exp[-\exp[(10.616-U)/13.102]]$	0.458	<0.05
	中型	$R=1-\exp[-\exp[(9.877-U)/10.076]]$	0.637	<0.01
	小型	$R=1-\exp[-\exp[(9.846-U)/10.692]]$	0.662	<0.05
(3)式	大型	$R=0.001(42.411-U)+0.001(42.411-U)^2$	0.483	<0.05
	中型	$R=0.00002(38.421-U)+0.001(38.421-U)^2$	0.644	<0.05
	小型	$R=0.000003(37.004-U)+0.001(37.004-U)^2$	0.703	<0.01

表3-3-2 エゾバフンウニの摂食限界流速

水温	流速
5℃	15.5 cm/s
10℃	34.6 cm/s
15℃	26.9 cm/s

4. 事前評価モデルの妥当性の検証

ウニ増殖施設天端面に作用したと推定される振動流速値を表4-1に示す。夏期は、H1地点の底面流速が設定値を下回ることがなかった。しかし波高が小さくなるH2地点の底面流速は設定値を大きく下回っていた。ただし、キタムラサキウニの摂食限界振動流速は0.40m/sとされており³⁾、6月、7月の振幅

表4-1 ウニ増殖礁天端面における推定振動流速（単位：m/s）

月	計画	2004年		2005年		2006年		2007年	
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2
1月	0.78 <			1.88	1.13	1.91	1.15	1.63	0.92
2月	0.78 <			1.86	1.12	1.85	1.06	1.74	1.01
3月	0.78 <			1.83	1.10	1.84	1.07	1.62	0.82
4月	0.78 <	1.41	0.72	1.40	0.75	1.29	0.59	1.27	0.57
5月	< 0.78	1.13	0.42	1.15	0.42	1.17	0.48	1.24	0.55
6月	< 0.78	1.10	0.39	0.97	0.24	1.02	0.28	1.03	0.30
7月	< 0.78	1.13	0.40	1.03	0.28	1.04	0.27	1.04	0.31
8月	< 0.78	1.14	0.41	1.10	0.35	1.01	0.25	1.16	0.44
9月	< 0.78	1.20	0.45	1.15	0.44	1.18	0.44		
10月	0.78 <	1.47	0.75	1.45	0.76	1.40	0.72		
11月	0.78 <	1.75	0.94	1.76	1.06	1.65	0.93		
12月	0.78 <	1.91	1.14	2.04	1.23	1.64	0.98		

海藻の維持に寄与するものと考えられる。しかし、ウニ摂食圧の恒久的な排除は、海藻群落相を高次に引き上げるとの報告⁸⁾もあり、今後の継続した観察が必要と考える。

冬期の11月から翌年の3月までは全ての月で設定値を超えていたが、4月および10月では、設定値を下回っていた。ただし、前述の通り、0.4m/sを超える振動流速下ではキタムラサキウニは摂食活動を行えないことから、ホソメコンブの幼孢子体が摂食から保護されていたものと推察できる。

次に石材の隙間における流速の低下について考察する。今、施設天端上の沖端の水深を2mと設定し、上述のとおりH1およびH2点の波高を推算する。中山⁵⁾の実験結果を基に、H1からH2点までの波高の減衰を直線近似し、この近似式に沿って各モチーフ点における波高を求めるとともに、そのモチーフを構成する二つの山頂と一つの谷部の深度において微小振幅波理論に基づいて振動流速を求める。二つの山頂における流速の平均値に対し、谷部における振動流速の占める割合を減衰率とする。

2005年10月から2007年9月までの石材配置調査の、沖陸の調査定線1-6および2-5について上記の減衰率を求めた(図4-2)。なお、計算に与えた波高、周期は、それぞれの調査時の前の期間の平均を与えることとした。例えば2007年9月の調査時の計算には2007年5月から2007年8月までの夏期の波高、周期の平均値を用いた。

モチーフは石材規模によらず、形状が相似であれば同じ値をとること、また、その石材が鉛直方向のどの位置にあるかによって底面流速が変化することから、モチーフでまとめた流速減衰率には大きなバラツキが認められた。そこで各モチーフについて最も減衰しない値を抽出し近似式を当てはめると、式3のとおりとなった。この式は、モチーフを形成する場所においては少なくとも(7)式に従う減衰が生じ、高波浪時でもキタムラサキウニの摂食圧が高く維持される可能性があることを意味する。

$$y_3 = 100e^{-0.2994x_3} \quad \dots (7)$$

ここに x_3 はモチーフ、 y_3 は減衰率(%)を表す。

室内実験における水槽底面の凹凸を変えたキタムラサキウニのコンブ摂食実験の結果(図3-2-4)では、底面が平坦な場合に比べ、100°、140°の窪みを持つ場合のコンブ摂食量が上回った。特に100°では設定流速が30cm/sであっても高い摂食量を維持していた。このとき、窪みが角度100°の場合、モチーフは0.75、140°の場合のモチーフは0.25と計算できる。それぞれのモチーフについて(7)式より振動流速の減衰率を求めると、角度100°の場合は約80%、角度140°の場合は約90%であった。図3-2-6から、平坦な実験条件である180°の流速値に対し、100°の場合は64~78%、140°の場合は79~100%の減衰率となっており、(7)式は妥当であると判断できる。

前述の通り、実施設のモチーフは1前後にモードを持っていた。モチーフ1を(7)式に代入すると、減衰率は約73%と算出できる。施設上の1mにつき1個以上のモチーフが

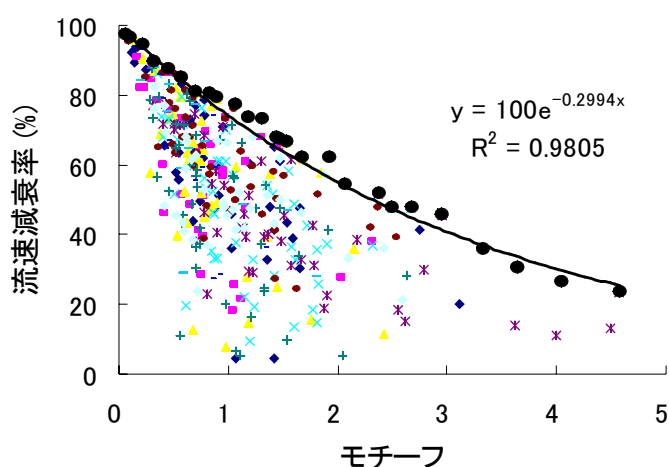


図4-2 モチーフと流速減衰率との相関

存在し、その多くが振動流速を約73%減衰させるとすると、キタムラサキウニの摂食量の増大が予想される。

2-1(1)(ア)節の生物調査結果から推定した、本事業によって創出された藻場面積を表4-2に示す。なお、実際の施設天端面は設計よりも浜なり方向に1m長かったため、その面積は1,085㎡であった。推定値は、いずれも最盛期の6月についてのものである。2005年のコンブ群落面積は396㎡に留まった。これは前年の施設完成がホソメコンブ遊走子の放出期に間に合わなかったためである。しかし翌年からは天端面全てがホソメコンブ群落に覆われ、設計通りの結果となった。さらに実施

表4-2 創出された藻場面積

計画面積	推定面積		
	2005年	2006年	2007年
1,035㎡	396㎡	1,085㎡+α	1,085㎡+α

設では、図2-1-3に示すとおり、施設を構成する周辺のブロック上にもホソメコンブが生育し、結果として計画を上回るホソメコンブ群落を創出することができた。

以上の結果より、事前評価モデルに従って設計・造成したウニ類増殖施設において、波浪流速の制御によってキタムラサキウニの摂食圧をコントロールし、海藻群落を形成することが出来たことから本モデルは妥当であると結論づけられる。

追補

本事業の最終年度の検討委員会において指摘を受けた事項について検討したので報告する。

1. ウニ増殖礁に作用した底面流速の評価方法

波浪によるウニ食圧制御の効果を検討するため、増殖礁に作用した波浪流速の推定時に全ての波浪について微小振幅波理論を適用し、礁天端面での底面波浪流速として流速を算出した。これについて検討委員より、「波高によっては礁上で砕波し、微小振幅波理論を適用できない。砕波時は激浪として除外し、非砕波の波について底面波浪流速を算出し、ウニの摂食可能・不可能な流速の割合として示すべき。」との指摘を受けた。

これを受けて、中山⁵⁾に従って h （施設設置水深）/ H_i （入射波高）が4未満となる波高は砕波するとして解析対象から除外し、残りの波高データについては、礁天端面で浅水変形した波高に微小振幅波理論を適用し、礁天端面での底面波浪流速を算出した。この結果を月単位で頻度としてまとめた（図4-4）。

ホソメコンブが幼胞子体を伸長させる1月から4月までを見ると、2005年および2006年は、3月まで底面波浪流速0.78m/s以上のしめる割合が70%~80%と高く、キタムラサキウニの摂食圧を排除していたと考えられる。2007年は若干割合が減り、40%~60%であった。4月はいずれの年も底面波浪流速0.78m/s以上は30%~40%と低かったが、室内実験から明らかとなっている³⁾キタムラサキウニが摂餌困難となる0.4m/s以上の底面波浪流速は50%~70%と依然高く、ホソメコンブ幼胞子体が保護されていたことが示唆される。また、夏季には0.4m/s以下の底面波浪流速が60%~80%を占め、ホソメコンブを摂食することができたと考えられる。

以上の検討結果より、本増殖礁は、その設計により波当たりを強め、当海域の食害生物であるキタムラサキウニの摂食圧を適切にコントロールすることで、メンテナンスフリーで餌料海藻であるホソメコンブ群落の形成を持続させることが可能であると考えられる。

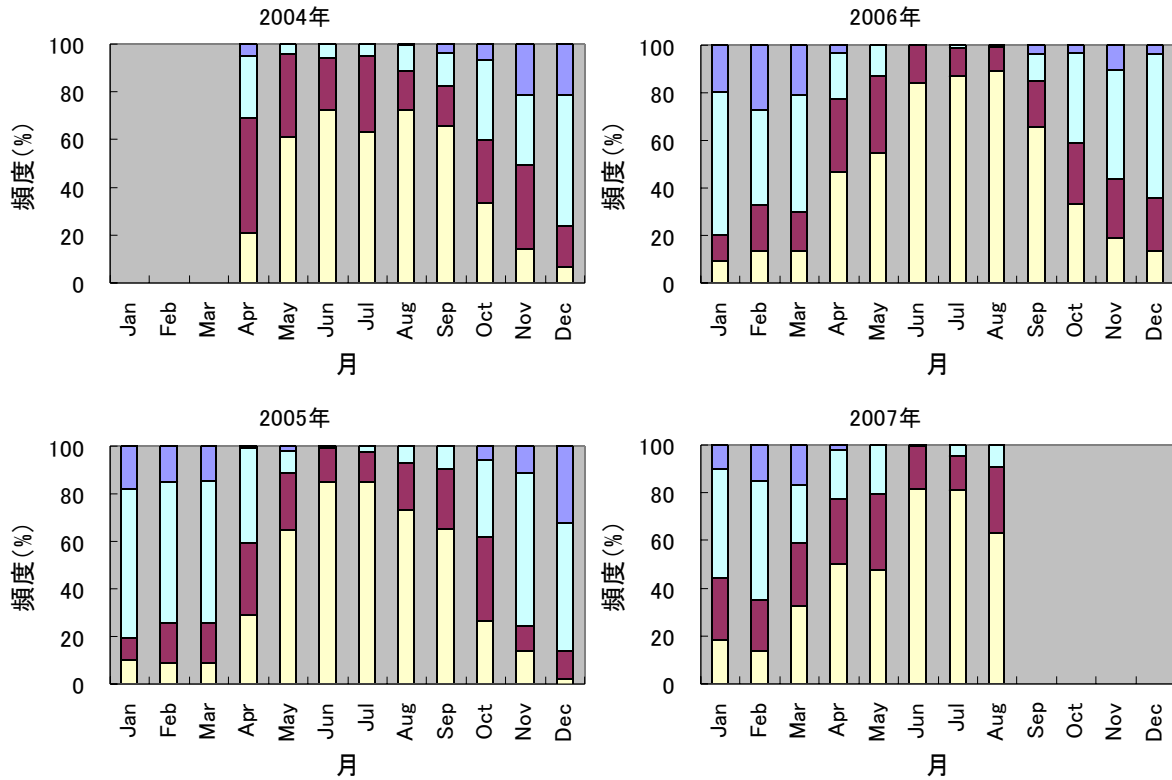


図4-4 礁天端面における月別の底面波浪流速頻度

■ : 0.4m/s未満, ■ : 0.4m/s以上0.78m/s未満, □ : 0.78m/s以上, ■ : 碎波

2. 施設天端面の石材配置状況について

同じく検討委員会において、海中での計測結果から石材の配置状況をモチーフを用いて評価したが、これは無次元量であるため、今後、現実の礁に適用することは難しく、通常底質を評価する手法として用いられる粒度組成を適用すべきと評された。

そこで、計測結果の窪みから窪みまでの水平距離が一つの石材の直径を表していると仮定して、粒径（石材の直径）の出現頻度を求め、これを足し合わせた累積粒径曲線を得た（図4-5）。この曲線より、累積頻度が25%、75%となる粒径（それぞれ

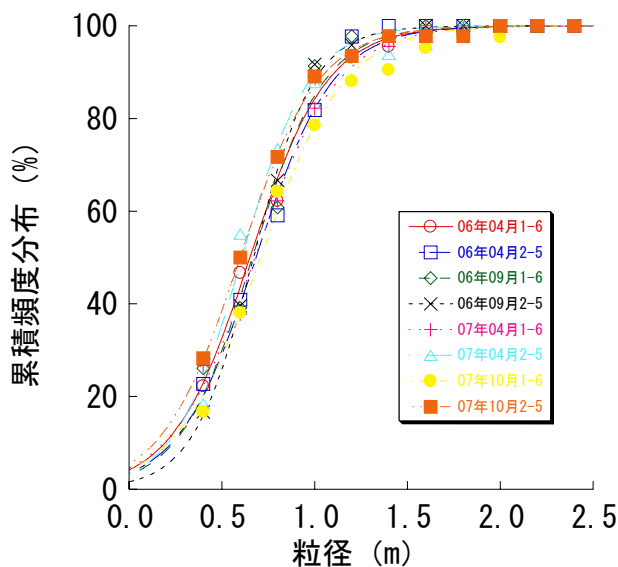


図4-5 施設天端面の石材に関する累積粒径曲線

25%、75%となる粒径（それぞれ

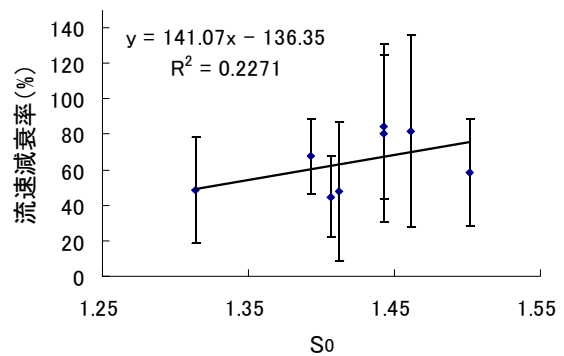


図4-6 淘汰係数 S_0 と流速減衰率の関係

d25,d75) を用いて淘汰係数 $S_0 (= \sqrt{(d75/d25)})$ を算出した。また、礁天端の設計水深を基準に、追補 1. のとおり砕波する波高を除いた波高データを夏季、冬季に分けた平均値を用いて窪みでの流速の減衰率を算出し、淘汰係数との関係を求めた (図 4-6)。

事業実施期間を通じて本増殖礁の石材の淘汰度は約 1.3 ~ 1.5 と大きな変化はなく、理論上の流速減衰率との相関は低かった。今後、他の増殖礁のデータを蓄積することで相関関係が明らかになると考えられる。

以上の結果を使い分けると、モチーフでは最低限起こりうる波浪減衰率を見積もることができ、淘汰係数では今後精度を高めた上で、礁全体の具体的な波浪減衰率を求められる。

考 察

北海道や青森県などでキタムラサキウニの過剰な摂食による磯焼けが持続し、漁業生産量の低下を招いていると考えられている。これまで沿岸漁業生産の向上を目的に水産基盤整備事業では、囲い礁や投石礁の設置によって餌料海藻を繁茂させ、ウニ類やアワビ類の生産増大を目指してきた。しかし、これまでの事業では、磯焼け対策ガイドライン⁷⁾にあるとおり、ウニ類の食圧と海藻の生育速度とのバランスが満たされない施設が設計され、施設完成直後は一時海藻が繁茂しても数年後に磯焼けとなる場合が多かった。

本調査では、増殖施設の造成前に、数値計算によって対象海域の夏季と冬季の底面波浪流速分布を求め、このうち、海域中に存在する天然の海藻群落における流速を基準とし、造成施設天端面の底面波浪流速が基準を満たすよう設計する方法 (事前評価モデル) が妥当であることを検証した。すなわち、このモデルに従って増殖施設を造成することで、ウニ類の摂食圧が波浪によって制御され、メンテナンスフリーで長期間にわたって海藻群落を形成させることが可能と考えられた。

さらに、ウニ類の収容密度の管理や、使用する石材の選定にあたっては、本調査で明らかとなった流動下におけるキタムラサキウニ密度と海藻摂食量の関係および海底面の凹凸と海藻摂食量の関係をもって、事前評価モデル中の流動-キタムラサキウニ摂食圧の関係を補正することで、より現場に即したモデルが構築でき、施設の安全性 (海藻群落形成機能の持続性) を高められると考える。

摘 要

1. 事前評価モデルに従って、キタムラサキウニの摂食圧を制御可能なウニ増殖施設を北海道寿都町美谷地区に設計・造成した。
2. 施設上および周辺においてウニ類および海藻類の分布調査を実施し、春季から夏季にかけて施設天端面および周辺ブロック上にホソメコンブ群落が形成され、キタムラサキウニはその周辺に蝸集することが明らかとなった。
3. ホソメコンブ群落形成に伴い、周辺磯焼け海域に生息するキタムラサキウニよりも施設に蝸集したキタムラサキウニの生殖巣重量が大きくなり、餌料供給施設として機能していたことが明らかとなった。
4. 施設上において波浪観測を行うと共に近隣港湾における波浪観測データとの相関を明らかにし、施設に來襲する波浪を推定した。
5. 來襲する波浪からキタムラサキウニが摂食可能な底面波浪流速の月間比率が明らかとなった。

6. 生物調査および底面波浪流速の推定より、事前評価モデルで設定した底面波浪流速が施設天端上に作用することで、主にキタムラサキウニの摂食圧を制御し、ホソメコンブ群落を形成することができた。
7. 施設天端面の凹凸を潜水により海中で計測し、計測点間が作る角度などから石材分布の経時変化を把握した。
8. 天端面の凹凸をモチーフでまとめ、波浪流速の減衰率との関係が示された。
9. 室内実験より、キタムラサキウニの摂餌速度は密度によって変動することが明らかとなり、これを振動流速と摂餌速度の関係式中に取り入れることができた。
10. 室内実験から、底面の凹凸と流速減衰の関係が明らかとなり、前述のモチーフと流速減衰率の関係式の妥当性が検証された。
11. 底面の凹凸が激しいほど、速い流速条件下でもキタムラサキウニはコンブを摂食できたことから、実施設においても天端面の形状によってはキタムラサキウニ摂食圧の抑制効果が低減することが示唆された。
12. エゾバフンウニについて水温、流動と摂餌速度の関係が明らかとなり、事前評価モデル中に取り入れることが可能となった。
13. 本調査の3年間分の調査結果では、ホソメコンブが幼胞子体の時期、キタムラサキウニの摂食圧が波浪によって制御されていたと推察されたが、これまでに磯焼け状態となった他の増殖施設においては、設置後数年で摂食圧ー海藻生育のバランスが崩れていることから、本施設においても、さらに数年の経過観察を要するものとする。

引用文献

- 1) 桑原久実・寺井稔・畑谷勇・酒向章哲，2004：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，第51巻，pp.1091-1095
- 2) 山本一清，2003：LIAforWin32 (LIA32) 0.376 β 1，
<http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/%7Eshinkan/LIA32/index.html>
- 3) 川俣茂，2000：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，北海道大学学位論文，pp.1-151
- 4) 川俣茂，2004：LNRAna 6.6d，<http://www.vector.co.jp/soft/win95/business/se104065.html>
- 5) 中山哲巖，1994：人工リーフの水理特性及び被覆材の安定に関する実験的研究（その2），水工研技報 水産土木，16号，pp.35-45
- 6) B.Velimirov and C.L.Griffiths，1979：Wave-induced kelp movement and its importance for community structure. *Botanica Marina*, 22, pp.169-172
- 7) 全国漁港漁場協会，2007：磯焼け対策ガイドライン，社団法人 全国漁港漁場協会，東京，pp.1-209
- 8) 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，pp.1-66