

17 食料供給力強化に貢献する寒冷海域の水産基盤の整備・保全に関する研究

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：寒地水圏研究グループ長 矢部浩規

研究担当グループ：寒地水圏研究グループ（水環境保全、水産土木）

1. 研究の必要性

世界最大の食料純輸入国である日本において、世界有数の漁場である日本周辺海域での水産資源の持続的利用の確保が重要である一方、我が国周辺の水産資源の 4 割の魚種・系群が、今後の供給に懸念がある低位水準のレベルにある。このため、生態系と調和した水産資源の持続的な利用を支える水産技術の開発が必要であり、とりわけ日本における重要な水産物の生産拠点である北海道では、周辺水域の資源生産力の向上を図るとともに、漁港の水域を増養殖や藻場造成等の場として活用していくことが求められている。

このような社会的な背景や要請を受け、本研究開発プログラムでは、寒冷海域における食料供給力強化に資する水産基盤の整備・保全に関する技術の開発を行うものである。

2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、漁港・港湾や河川流域を含む、沿岸域から沖合域が一体となって有用水産生物の持続的利用と海洋構造物の有する増養殖機能の強化に資する整備技術を開発していくことで、生態系全体の生産力の底上げと栽培漁業の支援による漁業地域の振興を図ることを目的として、以下の達成目標を設定した。

- (1) 海洋及び河川・沿岸構造物の有用水産生物の産卵場・生息場としての増養殖機能に関する評価技術の構築
- (2) 生産力向上と漁業振興に向けた海洋及び河川・沿岸構造物の増養殖機能強化のための水産環境整備技術の開発

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、令和元年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) 海洋及び河川・沿岸構造物の有用水産生物の産卵場・生息場としての増養殖機能に関する評価技術の構築

本達成目標に対しては、①沿岸構造物が有する保護育成機能、②餌料培養効果を加味した漁場整備技術、③栽培漁業支援技術、④遡河性魚類行動の四つの視点から研究を行った。

漁港・港湾等の沿岸構造物は、本来機能に加え、自然調和型機能（静穏域創出機能、藻場創出機能、産卵礁機能、魚礁機能）を有し、水産生物の貴重な保護育成場となっているが、これらの機能は定性的な理解にとどまっている。本研究は、保護育成場として機能するメカニズムを解明するとともに、それらの機能評価手法の技術開発を行うことにより、機能強化に資する整備技術の開発に繋げ、水産物の生産力向上のための技術方策を提案するものである。令和 2 年度も過年度から引き続き魚類とアサリに着目し、保護育成機能のうち餌場および避難場機能の評価のためのデータの収集および解析を進めた。主に、港内採捕魚でのバイオテレメトリー調査結果の解析とともに、水柱および堆積物での基礎生産実験、物理環境調査、アサリの垂下養殖試験に加え、海底堆積物からの栄養塩溶出実験を実施した。その結果、魚類に関しては、漁港内での餌場および避難場機能の利用やそれら機能の重要性を確認することができた。アサリに関しては、籠収容個体数の違いにより殻長や籠当たりでの成長の違いが見られ、現地の餌料環境や養殖期間や出荷サイズの目標に合わせて、収容個体数などの垂下条件を設定する必要があることが明らかとなった。加えて、基礎生産量の季節変化には水温や光量だけではなく栄養塩濃度が影響すると考えられ、夏期の高い基礎生産を支えるような漁港内の堆積物からの栄養塩供給機能も確認できた

ことから、基礎生産を用いた魚類やアサリにおける餌場機能評価の構築に重要な知見を得ることが出来た。

沖合域における水産物の生産力を向上させ、水産物の安定供給の確保を図ることを目的として、これまでに兵庫・鳥取・島根沖の日本海西部地区において直轄漁場整備（フロンティア漁場整備）事業が行われており、日本海北部海域においても資源減少が著しいスケトウダラなどを対象として事業の実施が望まれている。本研究は、魚礁等の人工構造物の造成によって、水産有用種の餌料となる生物の増集効果や人工構造物に付着する生物の餌料効果を解明することで、効果的な漁場整備事業の推進に向けた評価手法の構築および整備手法の開発を行うものである。令和2年度は、餌料培養効果のメカニズム解明とそれに基づく生産性向上技術の確立のため、過年度とは異なる海域（北海道知床半島の斜里町の沖合約10kmの人工魚礁漁場）での現地観測により、過年度までに確認されている人工構造物による餌料培養効果を検証した。今回の北海道知床斜里沖の人工魚礁の周辺海域ではカレイ等の底魚の餌料となるマクロベントスが豊富であり、特に人工魚礁の近傍では魚類にとっての良好な餌料環境の形成が伺われた。この結果は前年度までの北海道利尻島沖の人工魚礁での観測結果と整合するものであり、人工構造物の餌料培養効果を裏付けるデータとして重要であると考えられた。

漁業者の高齢化に伴い負担軽減の観点から、沖合漁業から沿岸の磯根漁業への転換が進んでいる。これに加え疲弊する日本海漁業の再生と水産物供給の安定化に向け、栽培漁業による漁業振興が重要な課題となっている。本研究は、栽培漁業支援のため種苗放流と連携した漁港港湾の静穏域を活用した増殖機能付加型漁港整備に資する技術開発を行うものである。令和2年度は、稚ナマコ放流適正サイズを検討するため、異なる放流サイズ（1cm区、2cm区、3cm区の3実験区）で稚ナマコを放流して追跡調査を行った。その結果、3cm区で一年後の定着率が最大（34%）で86個体であり、1cm区で約2倍だった。特に1cm区で放流後3カ月の間に約8割もの個体数が減少した。体長については、1年後ではどの区でも5cm前後で、1cm区で3.9倍と最大、3cm区では1.27倍と最小であった。重量に関しては1cm区で約47.8倍と最大で、3cm区で最小（2.2倍）であり、12月には1、2cm区の平均重量が3cm区を超えた。1cm区の定着個体数が、放流後3ヶ月以降安定し推移していたことから、小型種苗を放流した場合でも、初めの3ヶ月の生残率を高める方法とセットで放流出来れば、大型の種苗放流と同程度の効果が見込める可能性がある事が示されるなど費用対効果の高い放流手法の確立に重要な知見を得ることが出来た。また、過年度に稚ナマコへの捕食が認められたオオヨツハモガニの体長1~2cmの稚ナマコに対する捕食速度が過去に報告のある食害生物と比較し、非常に高い事が明らかになった。一方で、体長が2cmを超えた稚ナマコでは捕食速度が1個体/日と激減する事が確認されたことから、大きなナマコ種苗を放流する事で、食害の影響を低減できる可能性が示された。以上の結果から、種苗放流後の生残に悪影響を及ぼす生物の特定や影響の定量化、それら生物の生息環境など生態学的な知見の集積、また対策の確立が放流効果を高めるためには非常に重要であると考えられた。

北海道におけるサケ来遊数の減少を背景に、自然産卵による遺伝的多様性の高い稚魚の重要性が高まっている。これらの稚魚の生息数増加には、魚道等の親魚の遡上環境や稚魚の生息域保全が必要である。令和2年度は、美々川と勇払川との合流点の上下流にある魚道にサケカウンターを設置することで、ウトナイ堰魚道（合流点下流魚道）における遡上数とトキサタ堰魚道（合流点上流魚道）の遡上数の差分から美々川へのシロサケ遡上数を推定することができた。サケカウンターは遡上及び降下をおこなった場合の波形の記録だけでなく、途中で遡上を中止し下流へ戻ってしまう個体の行動波形も記録することができる。この機能を用いてウトナイ堰魚道とトキサタ堰魚道において2020年の9月と10月に遡上中止個体数を計測した。トキサタ堰では9月と10月とで中止個体数はほとんど変わらなかったものの、ウトナイ堰魚道では9月の中止個体数が10月の中止個体数より多かった（図-10）。さらにサケカウンターの機能を使って遡上中止個体数を明らかにして魚道の遡上環境評価手法の検討を行った。

(2) 生産力向上と漁業振興に向けた海洋及び河川・沿岸構造物の増養殖機能強化のための水産環境整備技術の開発

沿岸構造物は定性的に水産生物の保護育成機能を有していることが知られている。しかし、詳細な検討を行った事例は乏しく、水産環境整備に繋がる保護育成機能を強化するための整備技術の確立が求められている。本研究は、漁港港湾等の沿岸構造物が有する寒冷海域水産生物種への保護育成機能の強化に資する整備手法の技術開

発を行い、水産物の生産力向上のための技術方策を提案するものである。令和2年度は、昨年度有効性が確認された機能強化礁の継続観察に加え、設置場所や材質等の改良を行った。また、アサリ垂下養殖試験では、大小の異なる殻長での3つの籠固定方法による成長の違いを調べた。その結果、機能強化礁の魚類利用が確認されるとともに、隙間サイズや設置場所での利用魚種の違いや、アサリの異なる殻長での籠固定方法による成長の違いが明らかとなった。これらのことから、機能の強化目的に応じた機能強化礁の構造や設置場所、アサリの殻長に合わせた籠固定方法などの検討の必要性が明らかとなり、機能強化技術の構築における重要な知見を得ることが出来た。

海中の人工構造物には、魚類の「蛸集効果」「保護育成効果」、さらには餌料となる動物プランクトンや底生生物が蛸集・付着する「餌料培養効果」が知られ、これら人工構造物が持つ機能・効果は水産有用魚種の資源量回復に期待されている。しかし、潜水調査が難しい沖合域では十分には解明されていない。本研究は、人工魚礁等の人工構造物による魚類蛸集効果や餌料培養効果に基づく増養殖機能強化により、沖合域の漁場環境整備に資する技術の開発を行うものである。令和2年度は、単体の魚礁ブロック近傍の精密な流況解析に基づき、過大な計算負荷を手法の工夫により積層構造に発展させ、餌料培養効果に基づく沖合漁場整備技術のための新たな手法を検討した。これにより、魚礁ブロックによる流速の低減が確認され、魚類の餌料生物である底生生物の良好な生息環境を創出し、さらに底生生物の餌料となる粒子状有機物質を滞留させている可能性が示唆された。また、積層構造の計算結果から、魚礁ブロックによる流速低減の範囲が単体構造に比べて拡大することを確認し、魚礁ブロックの効果範囲評価手法へ新たな手法としての適用性が確認された。

遊休化した漁港施設等を水産生物の増養殖場として有効活用するための技術開発が求められている。一方、ナマコの種苗放流では、強い波浪や流れによる稚ナマコの流出による著しい初期減耗が報告されており、防波堤背後等の静穏域を稚ナマコの放流場及び育成場とする利活用が考えられる。このため、ナマコ生息環境上の基質の特性などを検討し、稚ナマコ育成に適した施設整備に関する技術開発を行うものである。令和2年度は、過年度に明らかとなった食害の影響低減を目的として作成・設置した放流礁内に放流した種苗の追跡調査を実施し、食害防止機能を付加した礁(食害防止礁)内の1年後の生残個体数がコントロール区(開放系)に比べ有意に高く、成長についてもこれまで実施した調査(天然環境下)と同様程度であった事などから、食害防止礁の中間育成技術としての高い効果が明らかとなった。また、新規調査フィールド(古平漁港)における食害防止礁の再現性の検証を通じた成果の一般化に向けた取り組みを開始した。

河川構造物が母川回帰したサケの遡上を阻害することはよく知られているが、サケをはじめとして魚道等の整備が進んできた。このような構造物の改善手法を考える上で、魚類の遡上数の計測は不可欠な要素である。令和2(2020)年は勇払川のウトナイ堰魚道、トキサタ堰魚道および十勝川千代田新水路階段式魚道に設置されたサケカウンター誘導水路の諸元と流速はことなり、水路幅、水路長および高さは同様で、80 cm、20 cmおよび50 cmだった。しかし、流速は異なりウトナイ堰魚道の平均値が87.5 cm/sで、階段式魚道の143.0 cm/sより小さかった。このような流速、水路幅、水路長などが異なる水路でも、遡上数あるいは降下数を自動計測する技術を構築することができ、河川構造物の改善手法につながるデータ取得を可能にした。また、布製簡易魚道を実験的に用いて同じ河川構造物に、直線状の魚道を2019年に、折り返し型魚道を2020年に設置することで、形状の異なる魚道におけるサケ科魚類の遡上数を計測した。それぞれの年で最もサケ科魚類の遡上が多かった時期の日当たりの遡上数を比較すると、直線状魚道より折り返し型の魚道のほうが多かった。魚道形状に対応した魚類行動データを取得可能し汎用性のある河川構造物の改善手法の構築に寄与する成果が得られた。

STUDY ON THE DEVELOPMENT AND CONSERVATION OF FISHERY INFRASTRUCTURE OF COLD WATERS THAT CONTRIBUTE TO STRENGTHENING FOOD SUPPLY CAPACITY

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Director of Cold-Region Hydraulic and Aquatic Environment Engineering
Research Group
YABE Hiroki

Research Group : Cold-Region Hydraulic and Aquatic Environment Engineering Research Group
(Watershed Environmental Engineering,
Fisheries Engineering)

Abstract : In Japan, a country that relies on food imports, the sustainable use of fisheries resources is required. Hokkaido is one of the fishery production bases. Thus, there is a need to increase the productivity of fisheries resources in coastal areas of Hokkaido and to improve the functionality of coastal structures such as fishing ports in terms of their ability to protect and foster aquatic organisms. By realizing these, fishery areas will be vitalized. Additionally, protecting and improving an environment for the spawning and regeneration of salmonids in rivers is essential.

In view of this, we identified two goals.

- (1) The development of methods for evaluating the ability of structures at seas, rivers, or coasts to protect and foster aquatic organisms
- (2) The development of methods for maintenance and construction of these structures to protect and foster aquatic organisms

To this end, we studied ①the ability of coastal structures to protect and nurture aquatic organisms, ② development of methods for effectively constructing fishery ground adding the ability of enhancement of food resource, ③methods for supporting cultivation fishery, and ④the behaviors of anadromous fish.

Keywords : coastal structures, ability to protect and nurture, enhancement of food resources, cultivation fishery, biotelemetry

17.1 海洋及び河川・沿岸構造物の有用水産生物の産卵場・生息場としての増養殖に関する 評価技術の構築

17.1.1 寒冷沿岸施設における水産生物の保護育成機能強化に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水産土木チーム）

研究担当者：的野博行、河合浩、伊東公人、須藤賢哉、梶原瑠美子、稲葉信晴

【要旨】

本研究は、漁港港湾等の沿岸構造物が寒冷海域の水産生物の産卵場・生息場などの保護育成場として機能するメカニズムを解明するとともに、それらの機能評価手法の技術開発を行うことにより、機能強化に資する整備技術の開発に繋げ、水産物の生産力向上のための技術方策を提案するものである。

平成 28 年度(2016)は、研究対象漁港内外での各成長段階の魚類分布調査に併せ、波浪などの物理環境とともに、水質、底質、餌料などの水産生物の生息環境調査を実施した。平成 29 年度(2017)は、調査地点や項目、分析方法などを再検討後、調査を継続した。その結果、港内は、港外に比べ静穏でありながら塩分や水温の大きな違いは見られず、底生基礎生産者や底生動物の現存量が多かったことから、漁港が水産生物への高波浪からの避難場および餌場機能を有する可能性が示唆された。また、稚仔魚は港外に比べ港内で多く採取され、幼成魚は年間を通して港内で確認されるとともに、幼成魚の胃内容物に港内で現存量の多い環形動物や節足動物の優占種が確認されたことから、それらの機能を生物が利用している可能性も示唆された。平成 30 年度(2018)は、避難場および餌場機能の評価手法を検討するために、漁港内でのバイオテレメトリーや基礎生産測定手法の有用性を確認した。令和元年度(2019)は、魚類とともに二枚貝（アサリ）での機能評価のための基礎データを継続して収集するとともに、流速での評価基準案や評価方法案を作成した。令和 2 年度(2020)は、過年度からの調査や実験の継続に加え、堆積物からの栄養塩溶出実験や、それらのデータ解析を進めることで、漁港内での魚類の餌場や避難場機能の重要性を確認するとともに、評価手法のとりまとめに向け、魚類およびアサリでの保護育成機能評価の基準値および式の構築に必要な重要なデータを取得することが出来た。

キーワード：沿岸構造物、保護育成機能、避難場、餌場、流速

1. はじめに

近年の水産資源の低迷や藻場・干潟の減少を踏まえ、水産資源の回復・増大と豊かな生態系の維持・回復を目指し、生態系全体の生産力の底上げを図るために、水産生物の生活史に対応した生息環境空間を創出する「水産環境整備」が推進されている¹⁾ (図-1)。

沿岸域は水産生物の生活史において重要な空間であり、その中でも漁港・港湾等の沿岸構造物は、本来機能に加え、自然調和型機能（静穏域創出機能、藻場創出機能、産卵礁機能、魚礁機能）を有することが知られており³⁾、水産生物の貴重な保護育成場となっている。しかし、現状ではそれらの機能は定性的に理解されており、諸機能を定量的に定義、評価した上で、効果的に機能を強化、創出するための沿岸構造物の整備技術の確立が求められている。

特に、北海道周辺海域は水産物の供給上の拠点であるものの、沿岸構造物との関連性について寒冷海域の生物種を対象に検討を行った事例は少なく、種や季節変化などの地域特性を考慮した寒冷海域沿岸構造物の保護育成機能の評価する手法の構築が必要である。



図-1 水産環境整備のイメージ²⁾

そこで本研究は、漁港港湾等の沿岸構造物が寒冷海域の水産生物種の産卵場・生息場などの保護育成場として機能するメカニズムを解明するとともに、機能評価手法の技術開発を行うことにより、機能強化に資する整備技術の開発に繋げ、水産物の生産力向上のための技術方策を提案するものである。

2. 研究全体の調査概要

はじめに、沿岸構造物周辺における水産生物の生息環境に関する現地調査を実施し、沿岸構造物周辺の環境と水産生物の行動特性の関係から、沿岸構造物が有する水産生物の保護育成機能を明らかにする(平成28~29年度)。次に、現地調査に併せ、現地や室内試験の実施、解析手法の検討を行いながら、保護機能のメカニズムを考慮した評価手法の構築を目指す(平成30年度以降)。

3. 平成28、29年度(2016、2017)の調査と分析項目

調査は北海道南西部に位置する寿都町寿都漁港周辺で行った(図-2)。本調査対象漁港は、既往の研究において藻場創出機能付加型沿岸構造物に関する定期調査、2015年3月から8月にはSt.3付近で魚類SCUBA観察および卵稚仔魚ネット調査が行われている。平成28年度(2016)は、既往データを参考にしながら今後の調査地点や項目を検討するために、既往の研究(平成28年度(2016)終了)での魚類調査に併せ、環境調査を9月から実施した。主な調査、分析項目を表-1に示す。漁港泊地における静穏域創出機能による水産生物の高波浪からの避難場および餌場機能に着目し、物理環境を連続機器観測するとともに、魚類の餌となる動物プランクトンや底生動物の現存量、またそれらの基盤となる基礎生産者や栄養塩現存量について調査した。平成29年度(2017)の主な調査、分析項目を表-2に示す。前年度までの調査地点や項目、分析方法等を再検討し(港外での刺網やSCUBA観察、港口でのインターバル写真撮影、胃内容物分析、間隙水やChl. a分析方法など)、4月下旬より調査を実施した。

4. 平成28、29年度(2016、2017)の主な調査結果

4.1 物理環境

寿都漁港周辺の2016年9月から2017年8月までの水温、塩分、2016年9月から2018年3月までの有義波高の連続機器観測結果を図-3に示す。表層および底層はそれぞれ海面下、海底上約1mである。2017年4月中は漁港周辺での漁業活動のため観測機器を設置できず、また2017年9月以降は水温塩分計の故障により



図-2 寿都漁港調査位置
(水深：海底地形デジタルデータ、日本水路協会)

表-1 H28年度(2016)調査および分析項目

項目	地点 区域	港奥		港中央			港口		港外			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
連続機器観測	周辺特徴	捨石岸壁	被覆 治地 根固ブロック	被覆 岸壁 治地 根固ブロック	被覆 治地 根固ブロック	被覆 治地 根固ブロック	被覆 治地 根固ブロック	砂地	消波ブロック	岩礁		
	水温 塩分 光合成色素(Chl.a) 波高	◎B	◎S	◎S	◎S	◎S	◎S	◎S	◎S	◎B		
水試料分析	Chl.a, Phaeo.	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△		
	粒状有機物(POC, PN, PP) 栄養塩(NO ₂ +NO ₃ , NH ₄ , PO ₄) 動物プランクトン	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△	◎△		
堆積物試料分析(表層10m)	Chl.a, Phaeo.	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	堆積有機物(TOC, TN, TP) 栄養塩(NO ₂ +NO ₃ , NH ₄ , PO ₄) 粒度組成 底生動物	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
魚類調査【希聖研究】	刺網	◎S	◎B	◎S	◎B	◎S	◎B	◎S	◎B	◎S	◎B	◎S
	卵稚仔魚ネット ダイバー 間欠カメラ	◎S	◎B	◎S	◎B	◎S	◎B	◎S	◎B	◎S	◎B	◎S

◎:9-3月、○:9, 11, 2, 3月実施、△:9, 11月のみ、S:表層、B:底層

表-2 H29年度(2017)調査および分析項目

項目	地点 区域	港奥		港口		港外		
		1	2	3	7	8	9	10
連続機器観測	周辺特徴	捨石岸壁	被覆 治地 根固ブロック	被覆 治地 根固ブロック	被覆 治地 根固ブロック	砂地	消波ブロック	岩礁
	水温 塩分 光合成色素(Chl.a) 波高		◎B	◎S	◎S	◎S	◎S	◎S
水試料分析	Chl.a, Phaeo.		◎S	◎B	◎B	◎S	◎S	
	粒状有機物(POC, PN) 栄養塩(NO ₂ +NO ₃ , NH ₄ , PO ₄) 動物プランクトン		◎S	◎B	◎B	◎S	◎S	
堆積物試料分析(表層10m)	Chl.a, Phaeo.		○	○	○	○	○	
	堆積有機物(TOC, TN) 栄養塩(NO ₂ +NO ₃ , NH ₄ , PO ₄) 粒度組成 AVS 底生動物		○	○	○	○	○	
魚類調査	刺網		◎S	◎B	◎B	◎S	◎S	◎S
	卵稚仔魚ネット ダイバー 間欠カメラ 胃内容物		◎S	◎B	◎B	◎S	◎S	◎S

◎:4-3月、○:4, 6, 8, 10, 2月もしくは3月実施、S:表層、B:底層

データが得られなかった。

水温は、観測を開始した9月初旬から10月までは時折港外St.9の底層で低い値が観測されたが全地点20℃以上で、定常的な地点間の差は小さかった。しかし、10月以降2月初めまで水温の低下に伴い、地点間の差が明確になり、港外に比べ、港内、特に港奥で低く、最低値は港奥St.2で1.9℃であった。水温差はSt.2と9で12月中旬に最大2.7℃となり、その後減少した。また2月中旬から3月中旬までは5℃前後であった。観測を再開した4月下旬では、約8℃で港内外や表層

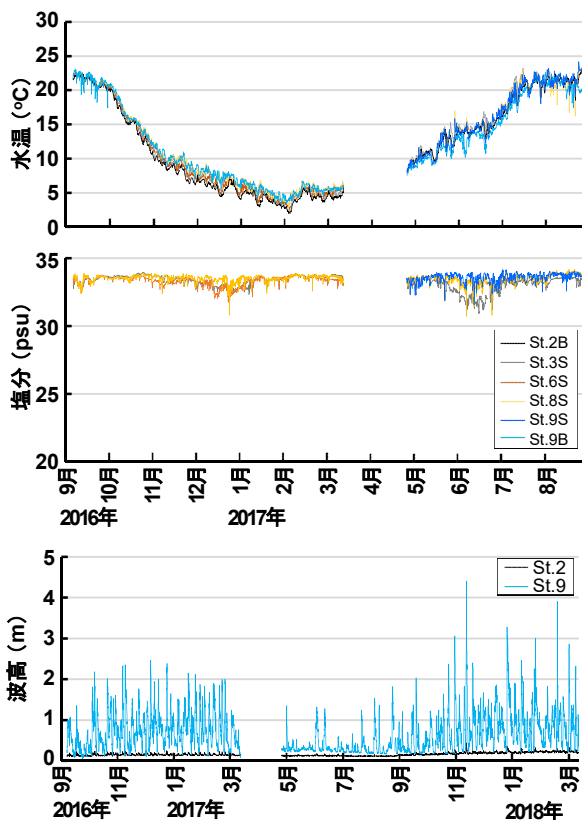


図-3 寿都漁港内外の水温、塩分、有義波高

底層に大きな違いが見られなかった。その後は、時折港外 St. 9 の底層で低い値が観測されながらも全地点 7 月中旬に約 22°C まで上昇した。8 月は港口 St. 8 表層や港外 St. 9 底層で低い値も時折見られたが、地点間の明確な違いは見られず 20°C 前後であった。

港内の塩分は、St. 7 南側や旧港に流れ込む小川の影響が考えられたが、12 月や 6 月にやや低い値が見られたものの、観測期間中は常に 30psu 以上であった。

有義波高は、2016、2017 年ともに 10 月から 3 月にかけて港外 St. 9 では 2m を超える波高が観測されたが、港内 St. 2 では最大で 0.45m であり、2017 年 10 月 1 日から 2018 年 2 月 28 日の冬期間平均は 0.20m (標準偏差 $\pm 0.03m$) と、港外 (最大 4.41m、 $0.85 \pm 0.54m$) に比べ港内はかなり低かった。

また、採水時に行った水質計鉛直観測による溶存酸素濃度は海底付近においても常に 6mg/L 以上であり、貧酸素が心配される夏期においても水柱は十分な酸素が確認された。

水温や塩分の急激な変化は生物にとって大きなストレスになるが、寿都漁港内の物理環境は、港外に比べ静穏でありながら、水温、塩分は港内外で大きな違いが見られなかった。そのため、漁港が高波浪などからの避難場としての機能を有する可能性が考えられた。

4. 2 餌環境

魚類の餌となる動物プランクトンおよび底生動物の港内外での 2016 年 9 月から 2017 年 10 月までの時空間分布を図-4、5 に示す。港外は、港内と同じ水深帯 (4-10m) が岩場であったため、水深 15m の砂場を定点 St. 9 とした。また、港内も礫や岩が広がるが、岩上や礫間に確認された堆積物を採取した。

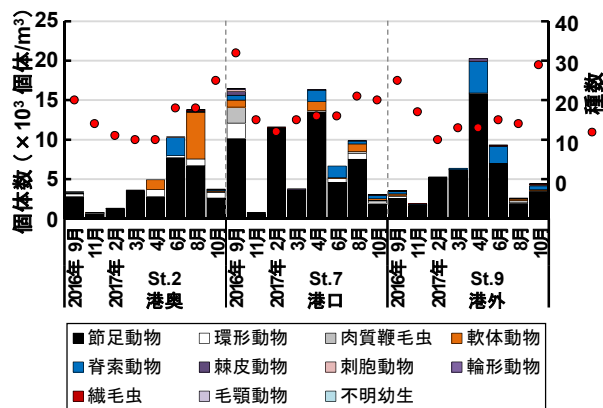


図-4 寿都漁港内外の動物プランクトン時空間分布

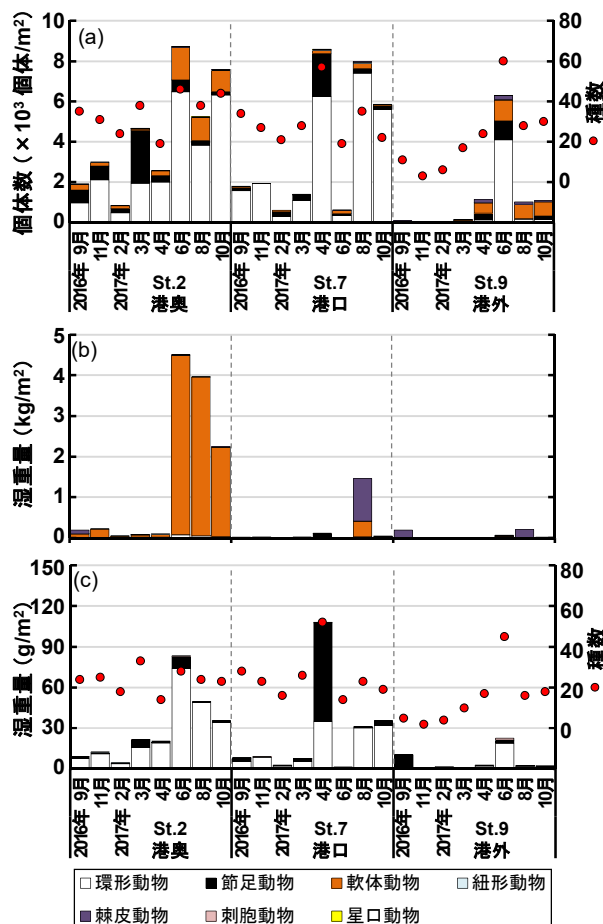


図-5 寿都漁港内外の底生動物の (a) 個体数、(b) 全湿重量、(c) 軟体、棘皮動物を除いた湿重量の時空間分布

動物プランクトンは、北原式定量ネット(目合い0.1 mm)を用い、平成28年度(2016)は水深の半分より上層、平成29年度(2017)は全層の鉛直曳で採取した。動物プランクトンの個体数は、約700から20,000個体/m³の範囲で変化し、港外や港口は4月春期、港内は8月9月夏期に高い傾向が見られ、全地点ともに2016年11月に最も低かった。また、種数は全地点ともに9月や10月の秋期に20種以上と最も多く、2月には10種類程度と少なかった。全地点において節足動物が各地点の総個体数(8回の調査の合計)の6割以上を占めていたが、港奥St.2では次に二枚貝や多毛類の幼生も多く、St.7や9ではサイズチボヤなどの脊索動物が多かった。調査期間を通しての個体数は、港外St.9と港内2点間に有意な差異は見られなかった(steel's test p>0.05)。

次に、スミス・マッキンタイヤ型採泥機(採泥面積0.05 m²×各地点2回)で採取され1 mm目合いのふるい上に残ったマクロベントスの個体数は、調査期間を通して、港外St.9と港内2点間に有意な差異が見られ、港外は港内よりも少なかった(steel's test p<0.05、St.2:4631±2761、St.7:3591±3124、St.9:1164±1984個体/m²)。動物門別では、港内2地点の総個体数の内、環形動物が約77%、節足動物が約14%、軟体動物が約9%を占めていた。各動物門の優占種上位3種を表-3に示す。環形動物は、港外では約4,000個体出現した6月を除き常に200個体以下であり、6月に港内と同様種が増加していたため、調査期間を通しての優占種は港内と港外は同様の傾向が見られた。節足動物や軟体動物は港奥と港外で異なる種が採取され、節足動物は港奥では16種であったのに対し、港外では32種と多く確認された。一方、軟体動物は港奥では37種と種数が多く、アサリが最優占種であったが、港外では27種と少なく、港内で生息が確認できていないカガイミガイ属が最も優占していた。加えて、湿重量においては港外St.9と港奥St.2に有意な差異が見られ、港奥で多かった(p<0.05、St.2:1413±1887、St.9:60.7±89.3 g/m²)。港奥では2017年6月に最大4.5 kg/m²を示し、その後も2kg以上と多く、調査期間を通しての港奥の総湿重量の約76%をアサリが占めていた。2017年8月に港口ではトリガイやオカメブヅク、港外でハシノハカシパンが急増し、各地点総湿重量の約19%、約64%、約79%を占めた。魚類の餌になり難い棘皮動物(カシパン、ウニ、ヒトデなど)や軟体動物(アサリなど)を除いた湿重量においても、大型種(キシエビ4個体で約10g/m²)が出現した9月や多

表-3 環形動物、節足動物、軟体動物の総個体数における上位優占3種

優占種	St.2	St.7	St.9
環形動物	1 <i>Scoletoma longifolia</i> (9874)	<i>Scoletoma longifolia</i> (8798)	<i>Scoletoma longifolia</i> (1006)
	2 Maldanidae spp. (3934)	<i>Chaetozone</i> sp. (3091)	<i>Nephtys</i> spp. (994)
	3 <i>Mediomastus</i> sp. (2209)	<i>Mediomastus</i> sp. (2913)	<i>Mediomastus</i> sp. (666)
節足動物	1 <i>Grandidiereilla japonica</i> (3494)	<i>Corophium</i> spp. (550)	<i>Corophium</i> spp. (550)
	2 <i>Byblis japonicus</i> (847)	<i>Pontogenia rostrata</i> (410)	Cypridinidae sp. (176)
	3 <i>Aoroides</i> sp. (565)	Ampithoidae sp. (290)	<i>Leptochelia</i> sp. (128)
軟体動物	1 <i>Ruditapes philippinarum</i> (2158)	<i>Ruditapes philippinarum</i> (200)	<i>Phacosoma</i> sp. (1152)
	2 <i>Anisocorbula venusta</i> (585)	<i>Nitidotellina hokkaidoensis</i> (110)	<i>Glycymeris</i> sp. (434)
	3 <i>Leionucula tenuis</i> (414)	<i>Macoma incongrua</i> (100)	<i>Macoma</i> sp. (420)

毛類が大量発生した2017年6月を除き、港外よりも港内で多かった。

そのため、港内では動物プランクトンだけではなく、港外に比べ底生動物も多く現存することにより、漁港が餌場機能を有する可能性が考えられた。

4.3 基礎生産環境

港内での魚類の餌環境を支える基礎生産に関して、平成28年度(2016)の結果を図-6に示す。なお、水柱のクロロフィルa(Chl.a)、フェオ色素(Phaeo.)は海洋観測指針の蛍光法、栄養塩はJIS K0102(2013)、堆積物のChl.a、Phaeo.は水質汚濁調査指針の吸光法、栄養塩は底質調査方法に従い分析した。

水柱のChl.a濃度は、9月は港奥で2.7μg/Lと高かったが、その後減少し、3月には港外と港口でやや増加した。表層1cmまでの堆積の積算Chl.a現存量は、

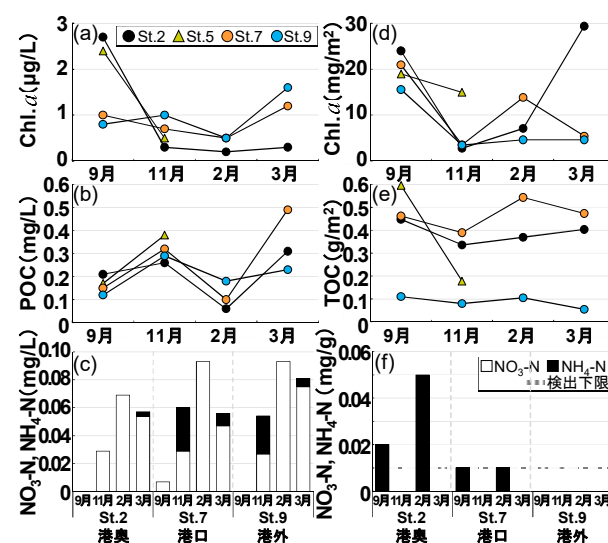


図-6 表層水((a)-(c))、堆積物((d)-(f))でのChl.a、有機炭素、硝酸およびアンモニア態窒素の時空間分布

全地点9月に高く、11月には減少し、港内では2月や3月に増加し、常に港奥で港外よりも高かった。

水柱の懸濁態粒状有機炭素量 (POC) は、調査期間を通しての港内と港外で地点間の明確な違いが見られなかった。一方、表層堆積物の全有機炭素(TOC)積算量は、常に港内が港外よりも高い値を示していた。また、C/Nモル比では、St.9は約5であったが、St.7は約10、St.2で約8であった。そのため、外海からの供給、漁港内部での生産とともに、海起源有機物よりもモル比の高い陸域からの有機物が St.7 南側より港内にも供給されていると考えられた。

溶存態無機栄養塩は、3月全地点と11月のSt.7を除いて、DIN (溶存態無機窒素：硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、亜硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、アンモニウム態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$) と DIP (溶存態無機リン：リン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$) のモル比がレットフィールド比⁴⁾の16以下であり、窒素が基礎生産の制限要因と考えられることから、DINの濃度を示す。全調査を通して $\text{NO}_2\text{-N}$ は検出下限値以下 (0.003 mg/L) であった。水柱 DIN は、11月と3月に $\text{NH}_4\text{-N}$ が検出された以外は $\text{NO}_3\text{-N}$ が多く、港内外ともに9月に最も低く、2月に最も高い値を示し、特に港外では最大 0.093 mg/L を示した。2月は表層冷却による海水の鉛直混合により外海深層から表層に栄養塩が供給され⁵⁾、水温が上昇した3月に水柱 Chl. a が増加し始めたと考えられる。また9月港奥ではDINは検出されなかったが、水柱 Chl. a が高かったことから、夏期に港奥で水柱 DIN が高かった可能性があり、特に、港内の堆積物中では9月に高濃度の $\text{NH}_4\text{-N}$ が現存したことから、港内の堆積物における有機物分解が、夏期の DIN 供給源になると考えられた。

次に平成29年度(2017)の Chl. a や Phaeo.、DIN の濃度、積算現存量の2016年9月から2017年10月までの結果を図-7に示す。堆積物の Chl. a、Phaeo. は直接アセトン抽出後の蛍光法⁶⁾、栄養塩は遠心分離処理 (3000rpm、10分) 後水試料と同様の分析を行った。

港外の水柱 Chl. a 濃度は、4月に約 $10 \mu\text{g/L}$ まで増加し、その後は約 $1 \mu\text{g/L}$ であった。港内の水柱 Chl. a 濃度は、4月に底層のみ $5 \mu\text{g/L}$ 以上と高く、6月に減少後、8月に約 $5 \mu\text{g/L}$ に増加し、昨年度同様に夏期の増加が確認された。水柱 Chl. a 濃度の港外は春期、港内は夏期に増加する季節変化は、上記の動物プランクトン個体数と同様の挙動を示していた。水柱積算 Chl. a 現存量は水深の違いに大きく依存するが、港内に比べ港外で高く、St.2と9では有意な差異が見られた ($p < 0.05$, St.2: 11.9 ± 5.1 , St.7: 20.0 ± 10.5 , St.9:

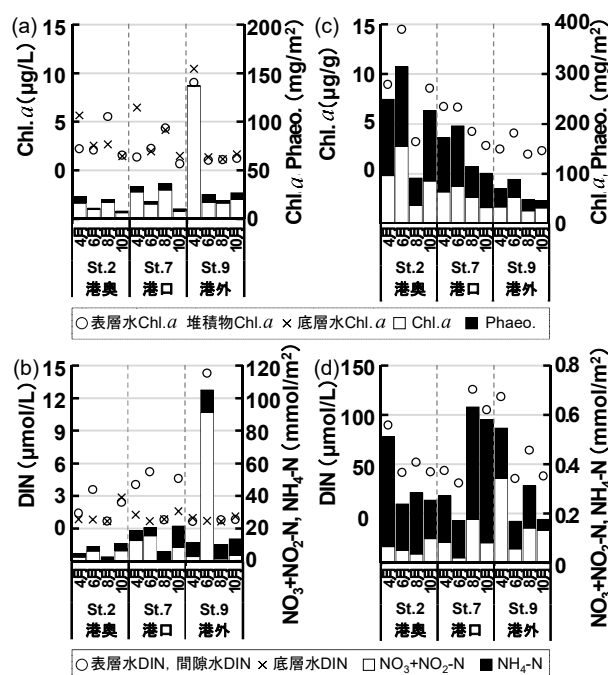


図-7 水柱((a)-(b))、堆積物((c)-(d))での Chl. a、Phaeo.、DIN の濃度および積算現存量の時空間分布

$47.4 \pm 59.4 \text{ mg/m}^2$)。一方、表層堆積物の積算 Chl. a 現存量では、St.2と9では有意な差異が見られ港内で港外よりも高かった ($p > 0.05$, St.2: 92.9 ± 48.3 , St.7: 55.1 ± 18.0 , St.9: $35.4 \pm 12.2 \text{ mg/m}^2$)。港内の堆積物表層 1cm で港外の水柱よりも積算現存量が高く、底生動物も港内で多かったことから、港内における底生低次生物生産の重要性が確認された。

水柱の DIN 濃度は、全地点ともに6月に表層で高かったが、表層塩分が約 27psu に下がっていたことから、前々日、前日の日合計 10mm 以上の降雨の影響が考えられた。また4月に港内の表層のみでDINが高い要因も、表層塩分が 32psu 以下であったことから前日の日合計 10mm 以上の降雨の影響が考えられる。一方、間隙水 DIN 濃度は、水柱とは反対に全地点6月に低い濃度を示し、8月に上昇する傾向が見られた。水柱 DIN 現存量は港奥と港外で有意な差異が見られたが ($p < 0.05$, St.2: 6.6 ± 3.6 , St.7: 16.7 ± 7.4 , St.9: $35.1 \pm 46.7 \text{ mmol/m}^2$) 間隙水では地点間の差異は見られなかった (St.2: 0.3 ± 0.1 , St.7: 0.4 ± 0.2 , St.9: $0.3 \pm 0.2 \text{ mmol/m}^2$)。水柱および堆積物ともに Chl. a と DIN 濃度がおおよそ逆の季節変化を示しており、植物プランクトンや底生微細藻類による取り込みを考慮すると、表層堆積物での高い積算 Chl. a 現存量から、港内間隙では DIN が多く再生されていると考えられた。

漁港の有する静穏域創出機能により、有機物が港内

へ堆積し、それらの無機化により再生された栄養塩を利用し港内で植物プランクトンや底生微細藻類などが基礎生産を行うことで、上記の港内での餌場機能を支えている可能性が示唆された。

口部 1m×0.5m、目合い 0.335m) により採取した卵および稚子魚とともに、刺網(網長 20m、網丈 1.2m、3枚網脚長:外網9cm、中網1.2cm)により採取した幼成魚の上下層合計の区間平均結果を図-8から10に示す。

卵は、全個数の7割以上が上層で採取され、港外区で2、6、8月に港内に比べ多く、2月に最多176個/100m³でれた。ネズッコ科は9、11月と8月の夏期中心、カレ

4.4 魚類

2016年9月から2018年10月までマルチネット(開

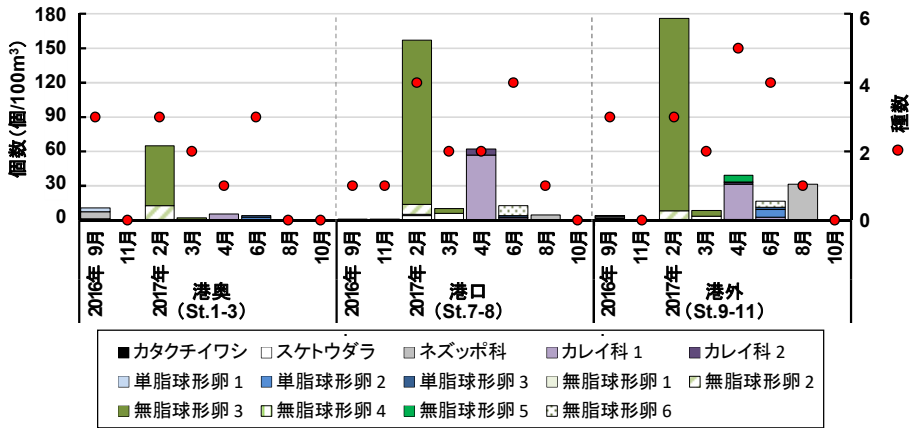


図-8 寿都漁港内外の魚卵の時空間分布

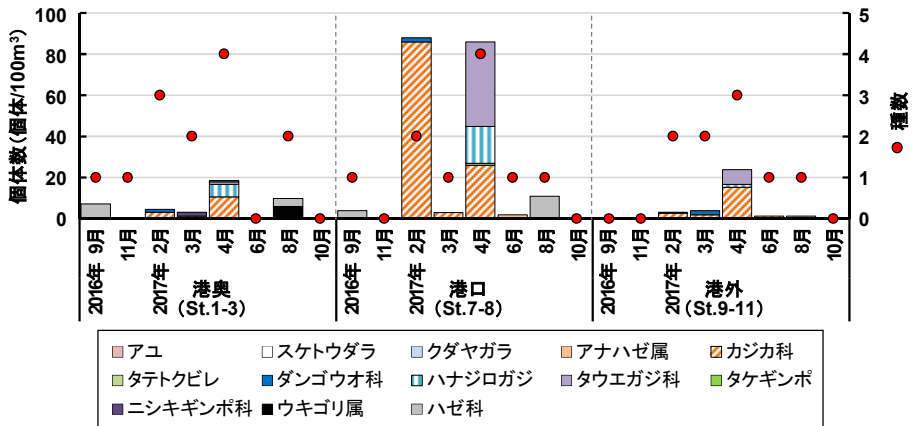


図-9 寿都漁港内外の稚子魚の時空間分布

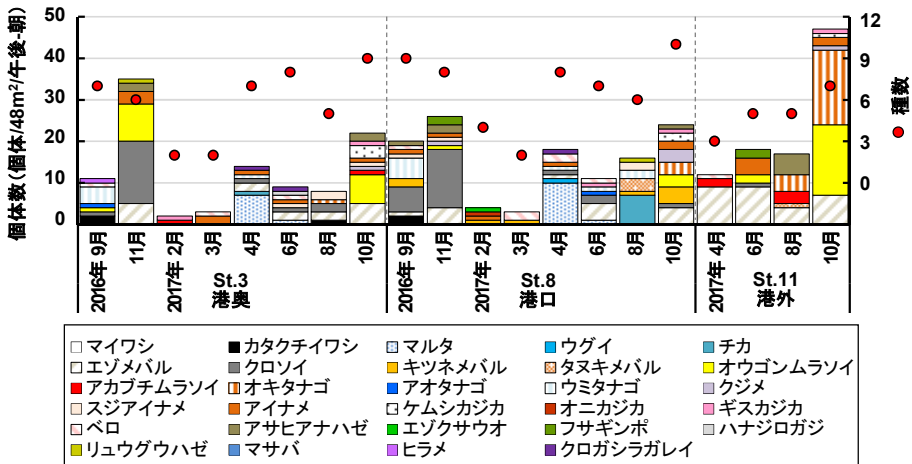


図-10 寿都漁港内外の幼成魚の時空間分布

イ科は4、6月に確認され、4月に港口区で多かった。稚仔魚は、全個体の8割が下層で採取され、全期間を通して港外よりも港内で個体数の多い地点が確認された。アユは11月、スケトウダラは2月に港奥区でのみで確認された。また、個体数の多かった、カジカ科は2~4月、ハナジロガジ、タウエガジ科は4月、ハゼ科は8、9月に港内外で確認され港口区で最も多かった。全長は4月のタテトクビレ(15mm)、ハナジロガジ(21±3mm、n=28)、タウエガジ科(14±4mm、n=33)、タケギンポ(135mm)、6月のアナハゼ属(43±8mm、n=2)、8月のウキゴリ属(37±3mm、n=9)を除き、約5-10mmであった。

幼成魚は、全個体の約7割が下層で採取され、2016年は11月、2017年は10月に最も個体数が多く、10月には種数も多かった。港内では29種が確認され、2地点の総個体数が多かった種は、クロソイ(44個体)、エゾメバル(30個体)、オウゴンムラソイ(21個体)、マルタ(19個体)、ウミタナゴ、アイナメ(14個体)であった。秋から冬にかけ水深50-100mに移動することが知られているクロソイ⁷⁾は冬期に採取されなかったのに対し、アイナメは8月以外出現し、移動性の低い種苗放流対象種のキツネメバルも冬期に港内で確認された。港外はH29年度からの調査であるが、総個体数(4回合計)はエゾメバル(29個体)、オキタナゴ(22個体)、オウゴンムラソイ(19個体)が多く、港内に比べ種数は少なく、個体数は4月以外多かった。

加えて、SCUBA観測(50m×5測線)での魚の分布位置を、①上・中層、②下層・海底面、③岩礫やブロック隙間に分けたところ、全調査で18種確認された内、キツネメバルの約90%は③で確認され、その他、エゾメバル、クロソイ、アイナメ、ベロ、フサギンポ、オキカズナギリウグウハゼも隙間を利用していることが確認され、隙間を含め構造物自体が生物への保護育成機能を有すると考えられた。

また、胃内容物では、消化されやすく種同定は困難であるが、港外に比べ港奥で個体数や湿重量が多く港内餌利用の指標になると考えられる環形動物が、アイナメ、マルタ、エゾメバル、クロガシラガレイ、クロソイで確認され、また港奥の底生動物で優占したユンボソコエビ属もアイナメ、エゾメバル、クロガシラガレイ、クロソイ、ベロで確認できたことから、港内の餌場機能を利用している可能性が考えられた。

卵と比較して遊泳力のある稚仔魚の個体数が港内で多かったことから、稚仔魚期は漁港内の波浪からの避難場機能を利用している可能性が考えられた。また、

幼成魚では移動性の大きいクロソイなどは季節的、出現頻度の高いアイナメなどは日常的に漁港内を利用していると考えられ、胃内容物からも漁港内の餌場機能利用の可能性も示唆された。

5. 平成30年度(2018)の主な調査項目

平成30年度は、これまでの調査により明らかになった漁港の有する高波浪からの避難場、餌場機能に関して、それらの機能の評価手法を検討するために、主にバイオテレメトリー手法や基礎生産測定手法の有用性を調べるとともに、保護育成機能の評価に必要な基礎データを収集した。

これまで基礎データを蓄積している寿都漁港周辺(図-2)では、港内での生物育成可能性を制御する植物プランクトンや底生微細藻類による基礎生産量と水温と光量などとの関係を定量的に把握するために、様々な方法で基礎生産の測定を行うとともに、セジメントトラップ、魚類が利用可能な隙間の分布、物理環境調査とともに、3つの隙間間隔の簡易隙間試験礁、砂利と網袋を用いたアサリ稚貝トラップ、丸籠にアサリを入れたアサリ垂下養殖の現地試験を実施した。

加えて、漁港内での魚類行動と流動環境との関係の定量的把握にバイオテレメトリー手法が利用可能であるか確認するために、物理環境観測とともにバイオテレメトリー手法による魚類行動追跡の予備調査を北海道南東部に位置する厚内漁港周辺で実施した(図-11)。

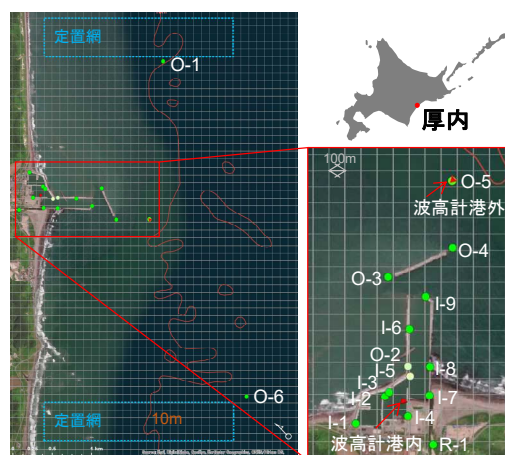


図-11 厚内漁港周辺調査位置
(水深：海底地形デジタルデータ、日本水路協会)

6. 平成30年度(2018)の主な調査結果

6.1 バイオテレメトリー手法

9月中旬に超音波受信器を厚内漁港内外に、港内9基(港奥：I-1~4、港路：I-5~9)、漁港周辺6基(港口：

0-3~4、近郊：0-5、定置網：0-1、0-6、構造物：0-2)を設置し、10月下旬に回収した。但し、0-2、I-5は流出、I-3は機械不良のため、受信データを回収出来なかった。加えて、港内外2地点に波高計、水温塩分計、クロロフィル濁度計を設置した。

魚試料は厚内漁港周辺の定置網で採捕した4魚種(クロソイ7、マツカワ4、カワガレイ1、カジカ3個体)計15個体を用いた。クロソイおよびカジカは外部標識とともに腹腔内に発信器、マツカワおよびカワガレイは体表面に発信器を、麻酔をかけて装着した。装着後、漁協施設内の水槽で馴致し異常が認められないことを確認した後、漁港内(I-1)から放流した。

10月に回収した発信器から全ての個体の行動記録を取得出来、麻酔を用いた発信器の外部装着(マツカワ・カワガレイ)、腹腔内への内部装着(カジカ・クロソイ)のいずれの個体も、発信器装着や麻酔や開腹の顕著な影響は見られなかった。発信器の装着方法も含めてバイオテレメトリー対象個体として問題ないと考えられた。加えて、魚種により異なる遊泳行動が確認され、マツカワ・カワガレイは、5~8日間かけて港外に移動、カジカは1~3日後に速やかに港外に移動、クロソイは1個体を除き放流日もしくは2日目には速やかに港外に移動し、港外の本来の生息環境に類似した空間へ移動したものと推察できた。これら魚種による速度の違いは、遊泳能力、回帰・固執性、環境感受性や適応力などを反映していると考えられる。また、例としてマツカワ1個体に装着した超音波の受信位置、港内外の有義波高の時間変化を図-12に示す。4日以上港内にいた6個体は、高有義波高時には港外に移動せず港内に留まる傾向が見られ、流動環境が魚類行動に影響を与えている可能性が示唆された。

港内構造物による超音波の反射影響が懸念されたが、全個体のデータを取得でき、港内での魚類行動追跡にバイオテレメトリー手法が利用可能であることが確認できた。しかし、発信器自体の流出や通過地で受信が確認できない事例など設置方法に課題が見られた。

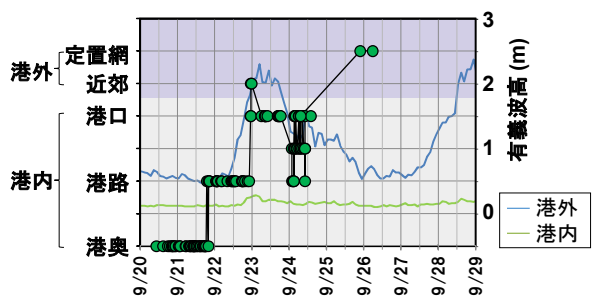


図-12 厚内漁港周辺でのマツカワの行動と有義波高

また、目的に合わせて使用する魚類の採取方法などを検討する必要性が考えられた。これらを改善することにより、漁港内での魚類行動と流動環境との関係の定量的に把握につながると考えられる。

6.2 基礎生産測定手法

9月に寿都漁港内外(St. 2、9)で表層水、底層水、表層堆積物(1cm)を採取し、表層水とともに、濾過底層水に表層堆積物を加えた試料をそれぞれの水深を考慮し光量を調整した瓶(光量約100%、30%、10%、0%)に分注し、 ^{13}C 溶液を添加した後、港内表層で約24時間培養した。24時間後のPOCの ^{13}C やChl. *a*、DOの変化量から、水柱および表層堆積物での1日当たりの基礎生産量を測定した。

例年港内のChl. *a*が高い傾向(2~6 $\mu\text{g/L}$)を示す夏期の基礎生産は、 ^{13}C 法では港内水深約4mで水柱約290 $\text{mgC/m}^2/\text{d}$ 、表層堆積物約50 $\text{mgC/m}^2/\text{d}$ 、港外水深約15mで水柱約170 $\text{mgC/m}^2/\text{d}$ 、表層堆積物約5 $\text{mgC/m}^2/\text{d}$ であった。一方、DOやChl. *a*法では表層堆積物での基礎生産を十分に検出することが出来なかった。

加えて、濾過海水を満たしたセジメントトラップを港内外の底層に24時間設置し、POCの変化量から一日当たりの沈降粒子量を測定した。沈降粒子は、港内では420 $\text{mgC/m}^2/\text{d}$ 、港外では200 $\text{mgC/m}^2/\text{d}$ であり、基礎生産、沈降粒子ともに港内で高いことが明らかとなった。沈降粒子は、基礎生産と同程度であったことから、基礎生産を基準に餌場機能を評価することで、最低限の餌場機能を定量的評価につながると考えられた。

今後、生物活性が高くなる夏期を中心に、 ^{13}C 法での基礎生産実験を繰り返すことにより港内でのChl. *a*と水温、光量での基礎生産モデル式を作成することで、港内での消費者の育成可能量が検討可能になると示唆された。

7. 令和元年度(2019)の主な調査項目

令和元年度(2019)は、魚類と二枚貝(アサリ)に着目し、引き続き保護育成機能の評価のための基礎データの収集を行うとともに、それらをもとに魚類と二枚貝での流速の評価基準値案を作成することとした。そのため、主に、港内採捕魚でのバイオテレメトリー調査、インターバルカメラ観察、基礎生産実験、セジメントトラップ、物理環境調査、日本海側16漁港夏期水質調査、アサリの垂下養殖試験、室内実験などを実施した。

8. 令和元年度 (2019) の主な調査結果

8. 1 魚類への避難場機能における流速評価手法案

魚類に関する高波浪からの避難場機能を評価するためには、魚類行動に影響を与える流速を把握する必要がある。そこで、インターバルカメラを寿都漁港口 (St. 8) に、波高計を港内外 (St. 2, 9) に4月から翌年3月まで設置した。インターバルカメラにより30分もしくは2時間間隔で撮影された画像から魚類の出現個体数を記録した。また、St. 9での通年の波向別波高頻度表より25ケースでの非定常緩勾配不規則波動方程式による波動場解析結果をもとに、微小振幅波理論により画像撮影時の底面振幅流速を算出した。

St. 8での魚類出現個体数と流速との関係を図-13に示す。流速が大きくなるに従い、出現個体数が少なく、0.2m/sより早い流速では、魚類を確認できなかった。9月以降秋期は魚類の出現数は少なく、11月以降冬期に0.3m/s以上の流速が発生しており、生活史や季節特性、水温の影響も考えられるが、夏期においても0.2m/sから0.25m/sまでで魚類を確認が出来なかったことから、0.2m/sを超える流速は、魚類行動に影響を与えると考えられた。

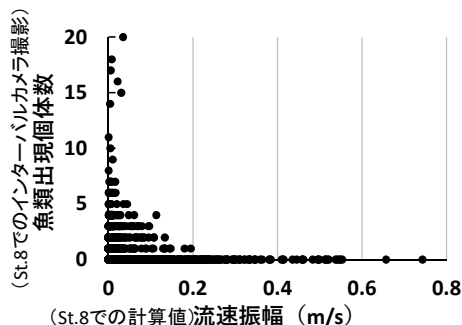


図-13 魚類出現個体数と流速の関係

そこで、基準値設定に関しては今後詳細な検討が必要であるが、今回は魚類行動に影響する流速値案として0.2m/sを用い、次に、避難場機能を評価する手法を検討することとした。

波高条件は、観測期間内の最頻有義波高とともに、沿岸波浪数値予報モデルによる数値予報GPVのうち、寿都漁港近隣の点における過去5年間での港内に入射する波向で最大の有義波高とした。本海域では常設の波浪観測が行われていないため、GPVを使った。評価領域は、岸壁や防波堤側、同程度の面積になるよう考慮し、漁港内の区分を24領域とした。漁港周辺での波動場解析を行い(図-14)、領域ごとの平均波高を算出後、領域平均水深より平均流速を算出した。

解析の結果、最頻波高では、全領域で平均流速

0.2m/s以下であったが、最大波高では一部の領域で0.2m/sを上回ったことから、2つのランクに分け、各領域を評価した(図-15)。今回の場合、青色の港奥では常に高波浪からの避難場機能が高く、赤色の港口では高波高時には避難場機能が低いと評価された。今後、基準値とともに、波高条件や領域区分なども詳細な検討が必要であるが、このような機能評価手法は、機能強化の整備に向けた有益な情報になると考えられた。

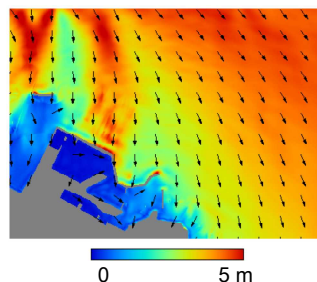


図-14 5年間最大波高時の波高計算値

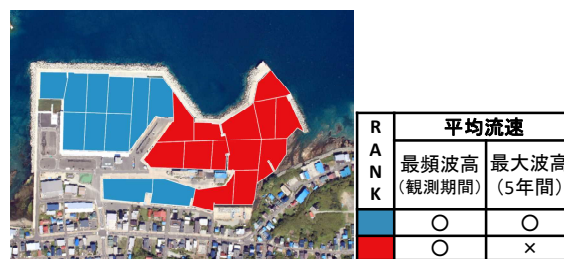


図-15 魚類避難場機能の評価方法案

8. 2 アサリでの流速評価基準値案

アサリに関しては、漁港構造物の静穏域創出機能を活用した垂下養殖技術の確立のために、波浪に伴い発生する流速とアサリや基質の移動との関係を把握する必要がある。そこで、振動流水槽実験により、アサリのサイズ別や基質の違いなどでの、アサリや基質が移動や反転する流速を観察することで、垂下養殖時の流速項目での評価基準値案を作成することとした。

試験方法は、振動流水槽に容器として丸籠を想定した模型を設置し、基質なし、基質あり(軽石、砂利)条件下で振動流を与えて、以下(i)(ii)に記載の流速についてレーザー流速計を用いて模型前面の位置で計測した。アサリは殻長により2サイズ(小: 9.0~11.3mm、大: 23.3~30.4mm)に区分し、サイズごとに基準流速値を検討した。

(i) 容器に基質がない場合

サイズごとに、模型内の底面に12個体ランダムに配置したアサリが反転した流速。

(ii) 容器に基質がある場合

アサリ小は、表層付近に定位しているため、基質移動の影響を受けると考え、表層の基質が移動した流速。アサリ大は、基質内でのアサリの移動が成長に影響すると考えられるため、丸籠の端部の基質内に水管を上向きに5個配置したアサリが移動した流速。

周期は2、5、8sの3周期とし、各周期において、アサリが反転、基質やアサリが移動するまで徐々に流速を大きく変化させた。

主な実験結果を図-16に示す。(i) 基質がない場合、アサリが反転しはじめた流速は、流速と周期に明確な傾向や、周期間で大差がなく、アサリ小は2.1(周期5秒)～5.8 cm/s(周期2秒)、アサリ大は10.0(周期2秒)～11.2 cm/s(周期5、8秒)であった。

(ii) 基質がある場合は、周期間で大差なく、基質が移動しはじめた流速は、砂利は25.2(周期8秒)～30.7 cm/s(周期2秒)、軽石は5.8(周期2秒)～13.6 cm/s(周期5秒)であり、軽石の方が小さい流速で移動しはじめた。加えて、アサリ大では、表層の基質が移動しはじめるとアサリの周辺に局所的な洗掘が生じ、アサリ自身が移動しはじめた流速は、周期間で大差なく、砂利は35.2(周期2秒)～45.8 cm/s(周期8秒)、軽石は26.6(周期2秒)～33.4 cm/s(周期5秒)であり、「軽石」の方が小さい流速でアサリが移動しはじめた。基準値案としては、上記の結果から、基質がない場合は、危険側を考慮して3回の実験のうち1個体目が反転した最も小さい流速を、基質がある場合は、基質やアサリが移動した流速を用いた(表-4)。このような基準値を用いることで、漁港構造物の有する静穏域創出機能を評価し、対策となる基質の選定などの養殖技術の確立につながると考えられた。

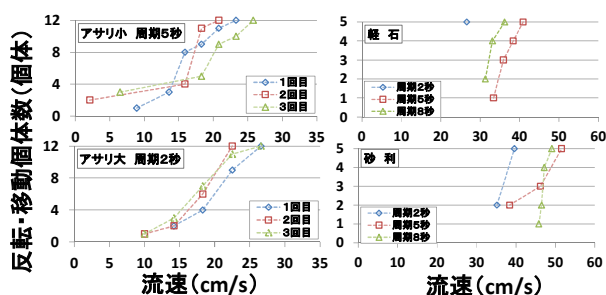


図-16 殻長や基質の違いにおけるアサリの反転・移動個体数と流速の関係

表-4 アサリ垂下養殖時の流速基準値案

アサリ サイズ	水平流速 (cm/s)		
	基質無し	基質有り	
		軽石	砂利
小	2.1	5.8	25.2
大	10.0	26.6	35.2

9. 令和2年度(2020)の主な調査項目

令和2年度(2020)も、魚類とアサリに着目し、引き続き保護育成機能の評価のための基礎データの収集および解析を進めた。そのため、主に、港内採捕魚でのバイオテレメトリー調査結果の解析とともに、基礎生産実験、セジメントトラップ、物理環境調査、アサリの垂下養殖試験に加え、海底堆積物からの栄養塩溶出実験を実施した。

10. 令和2年度(2020)の主な調査結果

10.1 魚類の漁港周辺における行動特性

寿都港内で採取した優占種2種(エゾメバル11個体、クロソイ4個体)に超音波発信器(発信間隔90秒)を装着するとともに、港内から港外にかけて超音波受信器を海底に設置し、9月から翌年1月末までの期間の魚15個体の行動をバイオテレメトリー手法により追跡した。

各個体での全受信回数のうち、St.2、8、9(図-2)で受信された回数割合の魚種毎の特徴を図-17に示す。エゾメバルは、多くの個体が港奥で受信される割合が最も高く、港外への移動が少ないことが明らかとなった。そのため、エゾメバルは港内を主要な生息場とし、港内の餌料を利用していると考えられた。また、クロソイは調査できた個体数は少なかったが、エゾメバルに比べ港内外の移動頻度が高かった。特に、港外の高波浪時には深場や港内などの流速が遅い場所への移動が観測された。これまで直接観測できていなかった、魚類の漁港の餌場、避難場機能の利用およびそれらの重要性を確認することが出来た。

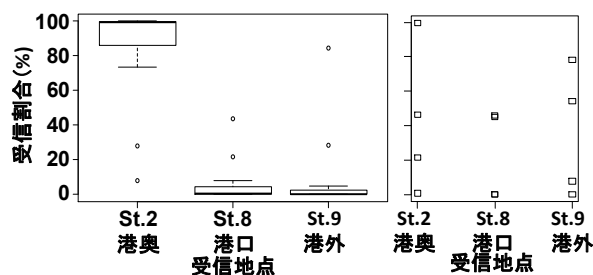


図-17 エゾメバル、クロソイの超音波受信地点の全期間内(9~1月)での受信回数割合

10.2 漁港の餌場機能評価

餌場機能に関しては、港内の水柱や堆積物での基礎生産の季節変化を継続して現地実測することで餌場機能評価に必要なデータを取得することができた。加えて、夏期の堆積物から水柱への栄養塩溶出を、室内実

験により実測した。これは、堆積物が約10cm含まれるように現地の底層水とともに柱状コアで採取し、室内で夏期水温に設定した水槽内に密閉した状態で静置し、一定時間間隔で溶存酸素(DO)を測定するとともに直上水を採取し、栄養塩濃度を分析するものである。DOと重要な栄養塩であるNH₄-Nの濃度の時間変化を図-18に示す。時間経過とともに、DOは減少するが、水中のNH₄-Nなどの栄養塩濃度は増加した。貧栄養と称される日本海側においても、夏期の漁港内の餌場機能を支える堆積物からの栄養塩供給機能を確認することができた。上記の基礎生産測定においても水温、光量のみではなく栄養塩濃度も影響していたことから、これらの結果をとりまとめ餌場機能評価手法を構築する予定である。

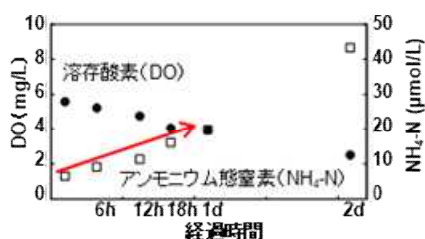


図-18 柱状コア内の堆積物上底層水の溶存酸素及びアンモニウム態窒素濃度の時間変化

次に、殻長サイズや収容個体数の異なる条件下でアサリ垂下養殖試験を江良畜養施設で行った(図-19)。初期殻長は6mm、10mm、15mm、20mmとし、丸籠に50、100、200個体収容し、約一年間垂下し、殻長、湿重量とともに全有機炭素量(TOC)を測定した。加えて、水柱POCやChl. a濃度、流速を測定した。

垂下期間でのアサリTOC増加量を図-19に示す。全サイズとも低密度で1個体当たりのTOC増加量が大きく、籠当たりでは高密度でTOC増加量が大きかった。また、POC、Chl. a、流速によるフラックス計算から、餌供給量を推定し、現地では十分な餌量が存在すると考えられた。そのため、現地の餌料環境や養殖期間や



図-19 江良漁港調査位置

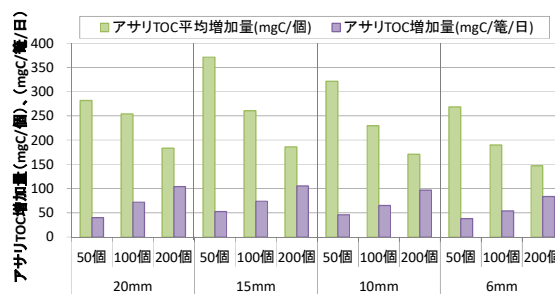


図-20 初期サイズ別の収容個体数とアサリTOC増加量との関係

出荷サイズの目標に合わせて、収容個体数などの垂下条件を設定する必要があることが明らかとなった。加えて、基礎生産では、炭素を基準にすることで、港内の魚類のみではなく、アサリなどの垂下養殖における餌場機能の評価も可能と考えられた。

11. まとめ

平成28年度(2016)は、秋期から春期までの漁港周辺の水産生物の生息環境を調査し、平成29年度(2017)は、港外での刺し網や胃内容物調査を追加するなど、調査地点や調査項目を再検討し、春期以降の調査を実施した。調査の結果、漁港泊地は水産生物への高波浪からの避難場とともに餌場機能を有するとともに、それらの機能を水産生物が利用している可能性が示唆された。平成30年度(2018)は、主にそれらの機能の評価手法を検討するために、バイオテレメトリー手法や各基礎生産測定手法の有用性を確認した。令和元年度(2019)は、港口でのインターバルカメラによる魚類観察と漁港周辺の波動場解析、アサリの室内振動流水槽実験により、魚類およびアサリでの流速項目における機能評価基準や、基準値を用いた評価方法を検討した。令和2年度(2020)は、過年度から継続した調査や実験、およびそれらのデータ解析により、漁港内での魚類の餌場、避難場機能の利用やそれらの重要性を確認することができ、評価手法のとりまとめに向け、魚類やアサリにおける保護育成機能評価の基準値および式の構築に必要なデータを取得することが出来た。

次年度も魚類とアサリの保護育成機能評価のためのデータ収集と解析を継続して進めながらとりまとめることにより、評価基準の値や式、評価手法を構築する予定である。

参考文献

- 1) 水産庁：漁港漁場整備長期計画、2012、2017。

17 水産物供給力強化に貢献する寒冷海域の水産基盤の整備・保全に関する研究

- 2) 水産庁：
https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_thema/sub40.html
- 3) 社団法人寒地港湾技術研究センター：寒冷地における自然調和型沿岸構造物の設計マニュアル、1998.
- 4) Redfield, A. C., Ketchum, B. H. and Richards, F. A. : The influence of organisms on the composition of seawater, *The Sea*, Vol.2, pp.26-77, New York, 1963.
- 5) 山本潤・渡辺光弘・林田健志・峰寛明・坂本和佳・西田芳則・田中仁：日本海北部漁場における表層冷却期の基礎生産構造に関する現地観測、土木学会論文集B2 (海岸工学)、第67巻、No. 2, pp.1026-1030、2011.
- 6) Montani, S., Tsutsumi, H. and Komorita, T. : Workshop of The First Asian Marine Biology Symposium at Phuket, Thailand, pp.1-3, 2012.
- 7) 水島敏博・鳥澤雅監修：漁業生物図鑑 新 北の魚たち、2003.

17.1 海洋及び河川・沿岸構造物の有用水産生物の産卵場・生息場としての増養殖に関する 評価技術の構築

17.1.2 北方海域の水産資源動態に対応した生産性向上技術に関する開発

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水産土木）

研究担当者：的野博行、河合浩、伊東公人、須藤賢哉、梶原瑠美子、稲葉信晴

【要旨】

本研究は、沖合域における水産生物の生産性向上を図るための漁場整備に必要な技術開発を行うものである。具体的には、魚礁等の人工構造物の造成によって、水産有用種の餌料となる生物の増集効果や人工構造物に付着する生物の餌料効果を解明することで、効果的な事業推進に向けた評価手法の構築および整備手法の開発を行うものである。

平成 28 年度(2016)は、水産有用種の餌料と付着生物との関係を明らかにするため、付着生物の経年変化を長期的観測するための基質別試験礁を設置するとともに、消波ブロックに付着する生物を採取・分析するなど、餌料効果の解明に向けた調査を行った。

平成 29 年度(2017)は、人工構造物が餌料生物等の漁場環境に及ぼす影響を明らかにするため、沖合域の水深-90m に整備された人工魚礁を対象に、流況、水質、底質などの物理的環境と植物プランクトン、動物プランクトン、底生動物などの空間分布の観測・分析など、餌料培養効果の解明に向けた調査を行った。動物プランクトン調査では、スケトウダラの餌料になる種が優先し、餌料環境の潜在性が示唆された。また、底生生物調査では、カレイ類の主要餌料になる環形動物が人工魚礁に近い地点と底質粒度が細かい地点に多く、人工魚礁と底質の2つの影響の可能性が示唆された。

平成 30 年度(2018)は、人工構造物が魚類の餌料を増殖させる「餌料培養効果」についての基礎データを得るため、平成 29 年度と同様の調査地点において主に底生生物相について調査し、特に ROV(水中ロボット)による魚礁ブロック近傍の試料採取および試験礁による構造物の付着試料の採取を試みた結果、人工構造物の餌料培養効果の可能性が示唆された。

令和 1 年度(2019)は、餌料培養効果のさらなる基礎データの蓄積とその定量評価手法の基礎的知見を得るため、平成 30 年度と同じ人工魚礁群における現地観測により魚類と餌料生物の安定同位体比分析を行って食物網を把握した。

令和 2 年度(2020)は、餌料培養効果のメカニズム解明とそれに基づく生産性向上技術の確立のため、過年度とは異なる海域での現地観測により、過年度までに確認されている人工構造物による餌料培養効果を検証した。

キーワード：生産性向上、底生生物、餌料培養効果

1. はじめに

沖合域における水産物の生産力を向上させ、水産物の安定供給の確保を図ることを目的として、直轄漁場整備(フロンティア漁場整備)事業¹⁾が行われている。

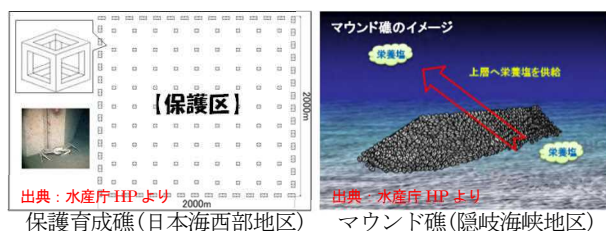


図-1 フロンティア漁場整備の工法別実施例

図-1 に示すとおり、これまでに兵庫・鳥取・島根沖の日本海西部地区において保護育成礁の整備、長崎の五島西方沖地区や鳥取・島根沖の隠岐海峡地区では、マウンド礁の整備が行われており、日本海北部海域においても資源減少が著しいスケトウダラやホッケなどを対象として事業の実施が望まれている。

スケトウダラ日本海北部系群は、1997 年の TAC(漁獲可能量)制度の開始当初より対象魚種として指定されているが、その資源量はピーク時の 1/8 程度(2014 年)まで減少している。また、ホッケ道北系群は TAC 対象魚種には指定されていないものの、近年、資源減少は

著しくピーク時の 1/10 程度(2014 年)まで減少しており、TAC 対象魚種の候補として挙げられている。

本研究は、日本海北部海域においてスケトウダラやホッケを対象として、沖合域での大規模な漁場整備を行うにあたり、効果的な事業推進に向けた総合的な評価手法の構築および整備手法の開発を行うものである。

2. 生物生産性の向上に向けた検討

第3期中長期計画では、日本海北部海域において現地観測結果をもとに四季の基礎生産構造を解明した²⁾。その結果、夏季および秋季は密度成層が発達し躍層が浅い栄養塩が枯渇し、基礎生産が低位となっているため、マウンド礁によって低層の栄養塩を供給した場合の基礎生産量の増加から、海域の漁場としての潜在性³⁾を示すとともに、水産生物の生産性向上に関する評価手法を検証した。また、保護育成礁により幼稚仔魚の隠れ場や保育場等を創造することで、外敵による捕食や漁獲から保護した場合の資源保護効果を検証した⁴⁾。

海中の人工構造物には魚類の蟄集や保護育成の効果の他、魚類の餌料となる動物プランクトンや底生生物が蟄集・付着することが知られている⁵⁾⁶⁾。このような人工構造物の「餌料培養効果」は水産有用魚種の増殖促進による資源量の回復が期待できる他、漁獲の増大や漁業者の操業の効率化など、その効果は多岐にわたると考えられている。一方、最近の調査結果より、先行して沖合域で整備している人工構造物に魚類の餌料生物である動物プランクトンが蟄集する現象が報告されている⁷⁾。このため、沖合域に整備した人工構造物に生物が蟄集・付着することによって、水産有用種の餌となる「餌料培養効果」について着目した整備効果の予測手法の検討が求められている(図-2)。

しかし、補償深度以深の光が届かない沖合域では、生物の蟄集、餌料繁殖と対象魚種の増殖機能との関連について不明であり、これらの解明が必要である。こ

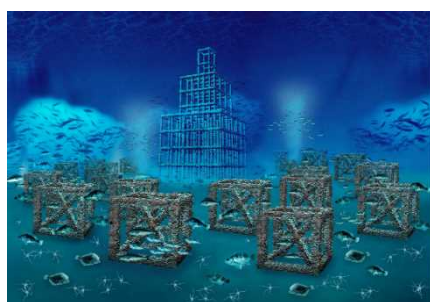


図-2 餌料培養効果のイメージ

のため、沖合海洋構造物の餌料培養効果を明らかにして、日本海北部海域でこれまで研究してきた「マウンド礁」、「保護育成礁」を含めて、この海域における総合的な大規模漁場整備の評価手法を構築するものである。

3. 現地観測の調査概要

現地観測は、図-1 に示す北海道知床半島の斜里町の沖合約 10 km の人工魚礁漁場において行った。過年度までの北海道利尻島沖の観測現場の比較対象とするため、水深条件がほぼ同じ水深 95m の人工魚礁を選定した。

現地観測内容を表-1 に示す。観測箇所は人工魚礁の中心から 170m の測点 S5 を魚礁区とし、約 5 km 離れた測点 C2 を対照区とした。機器垂下観測・採泥は測点魚礁区と対照区の 2 測点で行った。採泥は開口部面積 0.05 m² のスミス-マッキンタイヤ採泥器で行い、底質成分には表層 0.5 cm の底泥を供し、粒度・底生生物分析には採泥器全層の底泥を供した。底生生物(底泥)は試料採取後に現地で直ちに 10%ホルマリンで固定・保存して試験室に搬送した。その後底生生物は形態による種査定・計数・湿重量計測を行った。

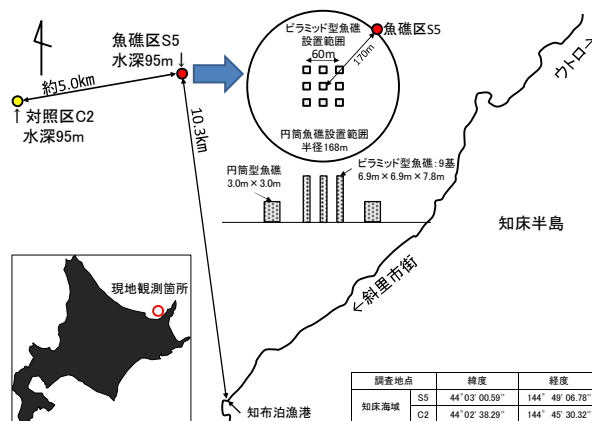


図-3 調査位置図

表-1 現地観測内容

項目・測点	方法	観測内容・分析項目
機器垂下観測 測点:S5・C2	多項目水質計CTD 観測水深0~93m	海水密度σ _T 観測時期:2020年8月2日
採泥調査: 測点:S5・C2	スミス-マッキンタイヤ採泥器開口部(0.05 m ²) 採取水深95m	分析項目:粒度組成、TOC、底生生物(現存量・組成) 観測時期:2020年8月2日

4. 観測地点毎の水塊構造

図-4 は 2020 年 8 月 2 日の魚礁区(S5)と対照区(C2)における海水密度σ_TのCTD値の鉛直分布を示している。両測点とも水深が浅いほど低密度(高水温・低塩分)、

深いほど高密度(低水温・高塩分)の傾向がある。魚礁区では水深 76m 付近に密度躍層が見られるがそれ以浅の躍層は明確ではない。対照区では水深 10m 付近に躍層が見られるがそれ以深の躍層は明確ではない。オホーツク海の水塊構造は一般的に表層から水深 50m までの低塩分水(オホーツク海表層低塩分水)と 50m 以深の高塩分水(高密度水)の二層の水塊を形成するとされ⁸⁾、夏期(8月)の知床半島の沖合域での観測⁹⁾でも水深 30m 付近に顕著な水温・塩分躍層が確認されている。今回の水塊構造はそれに比べると躍層の深度が一定せず、オホーツク海特有の二層の水塊構造が明瞭ではない。当海域特有の物理環境が現れた可能性があるが、その要因については現時点では明らかではない。

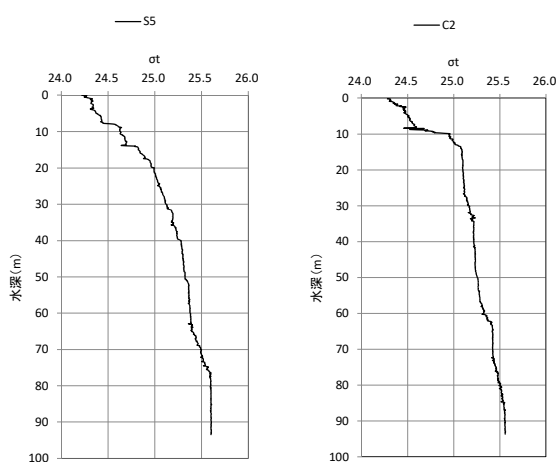


図-4 魚礁区(左)と対照区(右)のσ_Tの鉛直分布

5. 底質の粒度組成と底生生物

図-5 は魚礁区と対照区の底泥の粒度組成を示す。粒度組成比は「地盤材料の工学的分類方法(日本統一分類法)」¹⁰⁾に基づき分類・算出した。S5 が礫(粒径 2 mm 以上) 0%、砂(0.075~2 mm) 96.4%、細粒分(泥分:シルト・粘土の合計、0.075 mm未満) 3.6%であり、C2 が礫 0.2%、砂 97.6%、細粒分 2.2%であり、中礫(4.75~19 mm)以上の粒径は未検出である。50%粒径は S5=0.271 mm、C2=0.268 mmであり、中砂(0.25~0.85 mm)に相当する。以上より、両地点の地盤は砂であり、粒度組成は殆ど同じであると判断できる。

図-6 は魚礁区と対照区の底泥の単位重量 g 当たりの TOC(全有機炭素)を示す。TOC は底泥中の有機物の指標のひとつであり、港湾における底生生物の棲息環境評価での適用事例¹¹⁾がある。

魚礁区が 1.38 mg/g で対照区 0.67 mg/g よりも高い。TOC は底質の粒度組成のうち泥分(シルト・粘土の合

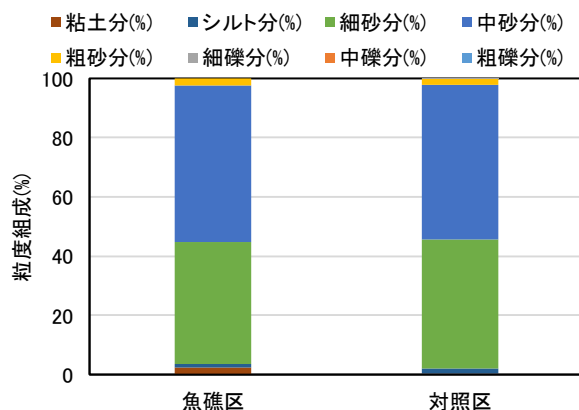


図-5 底質の粒度組成

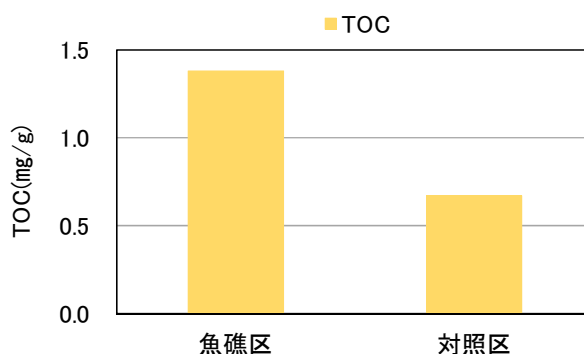


図-6 底質の TOC

計)と高い相関があるとされる¹²⁾。魚礁区が対照区より TOC が高いのは、図-5 により泥分が魚礁区の方が対照区よりも高いためと考えられる。

港湾施設での底生生物の棲息環境評価¹¹⁾においては、TOC が多いほど生息数が低い傾向であるが、20 mg/g 以下では傾向が異なるとされている。今回の値は 20 mg/g 以下であるため、後述の底生生物(マクロベントス)の棲息には悪影響が無いと判断される。

図-7 は底泥中のマクロベントス(底生生物のうち 1.0 mm 篩に残るもの)の個体数・種数を、図-8 は湿重量を示す。生物個体は顕微鏡による形態判別から種査定と計数を行い、底泥 m² 当たり換算した個体数・湿重量を図示している。図-7 の個体数の内訳は、全 6 門に分類した。

個体数の総数では魚礁区 3,520 個体/m²・対照区 1,960 個体/m²、湿重量では魚礁区 85.8 mg/m²・対照区 40.5 mg/m²、種数では対照区 46 種・魚礁区 31 種と何れも魚礁区が高い。内湾域の若狭湾の水深 26~185m(平均 81m)での観測事例¹³⁾¹⁴⁾では、マクロベントスの個体数=1334±583 個体/m²・湿重量=16.0±13.4g/

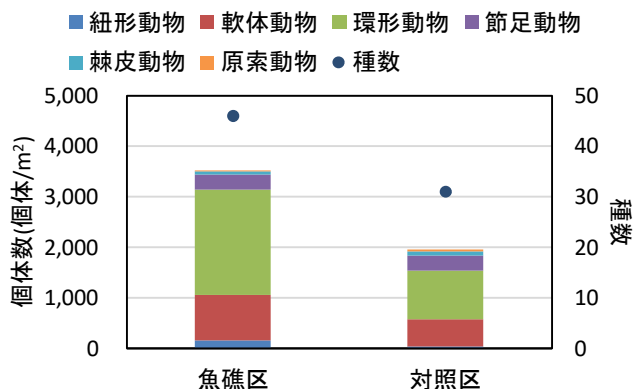


図-7 底生生物(マクロベントス)の個体数と種数

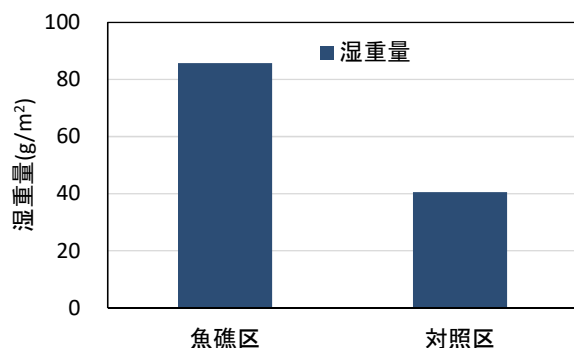


図-8 底生生物(マクロベントス)の湿重量

m²(文献 14)より平均±標準偏差として算出)である。今回は、個体数・湿重量は両地点とも若狭湾をかなり上回っており、海域としてはマクロベントスの現存量が豊富であると考えられる。一方、魚礁区と対照区の現存量の違いについては、マクロベントスの現存量が水深や底質環境によって異なる¹⁵⁾ことに基づき考察する。今回の底質環境は、粒度組成は殆ど同じ(図-5)、TOC(有機物含量の指標、図-6)は0.67~1.38 mg/gと低く底生生物の棲息環境として良好¹¹⁾である。また、水深条件は両地点とも95mで同じである。以上より、魚礁区と対照区の現存量の違いについては海域の環境条件ではなく、人工魚礁の影響が現れた可能性が推察される。水深約4mの浅い人工魚礁での観測事例⁶⁾では、他海域に比べて構造物の近傍でマクロベントスの現存量が多いことが確認されている。また、当チームによる水深90mの人工魚礁での観測¹⁶⁾では、泥分=29.6%・TOC=5.4mg/g(以上は平均値)の条件において人工魚礁に近いほどマクロベントスの個体数が多い傾向が確認されている。これらは人工構造物による滞留域の発生等

の流動環境の変化¹⁶⁾による効果が示唆されるが、今回の観測においても同様の効果が現れた可能性が考えられる。

分類の構成比では、S5・C2 両地点の平均で環形動物(多毛類)=55.5%、軟体動物(貝類)=27.6%と優先し、節足動物=8.5%、紐型動物=4.5%、棘皮動物=2.6%、原索動物=1.1%の順である。環形動物が最も優先なのは他海域での観測事例^{16)13)~15)}にも合致する。環形動物はカレイ類の重要な餌料¹⁷⁾であることから、特に現存量が多い人工魚礁の近傍では良好な餌料環境が形成されていることが推察される。環形動物に次いで多い貝類はカレイ¹⁷⁾やマダラ¹⁸⁾の餌料でもあるため、漁場の餌料環境に貢献していると考えられる。

以上より、今回の北海道知床斜里沖の人工魚礁の周辺海域ではカレイ等の底魚の餌料となるマクロベントスが豊富であり、特に人工魚礁の近傍では魚類にとっての良好な餌料環境の形成が伺われた。この結果は前年度までの北海道利尻島沖の人工魚礁での観測結果¹⁶⁾と整合するものであり、人工構造物の餌料培養効果を裏付けるデータとして重要であると考えられる。今後は、この豊富なマクロベントスの棲息を支える底質環境を含む底生生態系のメカニズムの解明を進めることで、よりの確な漁場環境の評価を進めたいと考えている。

6. まとめ

本調査の主要な結果を以下に示す。

- ① 一般的に夏季において見られる水塊の成層化が明確ではなく、当海域特有の物理環境が現れている可能性がある。
- ② 他海域に比べて高いマクロベントスの生息密度が確認され、特に人工魚礁の近傍で生息密度が高い。過年度までに確認されている人工魚礁が持つ餌料生物の増殖・増殖の効果が他海域でも同様に表れていると推察される。

今後は人工魚礁による生産性向上技術と漁場整備効果の評価手法の確立に向けて、餌料生物としてのベントスを増殖させるメカニズムの解明と異なる海域での餌料培養効果評価の一般化を進める必要があると考えている。

参考文献

- 1) 水産庁HP：国が施行する特定漁港漁場整備事業計画(漁場)

17 水産物供給力強化に貢献する寒冷海域の水産基盤の整備・保全に関する研究

- 2) 河合浩・山本潤・大橋正臣：北海道開発局管内の漁場整備に資する水域環境のバックグラウンド調査-沖合漁場における物理環境や基礎生産の現状について-、北海道開発技術研究発表会、環 3、2013.
- 3) 山本潤・渡辺光弘・林田健志・峰寛明・坂本和佳・西田芳則・田中仁：日本海北部漁場における表層冷却期の基礎生産構造に関する現地観測、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、第 67 巻、No. 2、pp. 1026-1030、2011.
- 4) 河合浩・山本潤・渡辺光弘：北海道開発局管内における保護育成を目的とした漁場整備の効果算定の一例、北海道開発技術研究発表会、環 24、2012.
- 5) 柿元皓・大久保久直・板野英彬・新井健次：魚礁における動物プランクトンの分布様式について、水産土木、V01. 19、No. 2、pp. 21-28、1983.
- 6) 伊藤靖・中野喜央・藤澤真也：人工魚礁およびその周辺における小型動物の分布-漁場施設の魚類増殖効果に関する研究 I-、日本水産工学会誌、45 巻 2 号、pp. 101-110、2008.
- 7) 公共事業の事後評価書（水産関係公共事業の期中の評価）：特定漁港漁場整備事業（フロンティア漁場整備事業）日本海西部地区、2015.
- 8) 青田昌秋、植松恵理子：氷海の研究とオホーツク海、地学雑誌、98-5、pp. 70-82、1989.
- 9) 平川和正、葛西広海：オホーツク海南西部表層域における季節的鉛直移動カイアシ類 *Neocalanus plumchrus* (Marukawa) の秋季消失と脂肪蓄積状況 (短報)、日本プランクトン学会報、64(1)、pp. 22-26、2017.
- 10) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 [第一回改訂版]、2021.
- 11) 内藤了二、中村由行、浦瀬太郎、金子尚弘：港湾域の底泥中化学物質濃度と底生生物叢の関係、環境工学研究論文集、第 44 巻、pp. 7-16、2007.
- 12) 鈴木輝明、青山裕晃、中尾徹、今尾和正：マクロベントスによる水質浄化機能を指標とした底質基準試案、水産海洋研究、64(2)、pp. 85-93、2000.
- 13) 林勇夫、北野裕：若狭湾主湾部のマクロベントス群集-I、日本海区水産研究所研究報告、38 号、pp. 133-158、1988.
- 14) 林勇夫、北野裕：若狭湾主湾部のマクロベントス群集-II、日本海区水産研究所研究報告、38 号、pp. 159-169、1988.
- 15) 辻本良、小善圭一、林清志、渡辺孝夫、今尾和正：富山湾の底質環境とマクロベントスの分布、富山県水産試験場研究報告、17 号、pp. 19-36、2006.
- 16) 須藤賢哉、稲葉信晴、伊藤敏朗、中村知道、松岡央明、吉田侑矢、吉野真史：採泥器付き ROV による人工魚礁近傍での底泥試料採取の試み、2019 年日本水産工学会学術講演会学術講演論文集、No.796、pp. 105-106、2019.
- 17) 西川潤、園田武、櫻井泉、瀬戸雅文、中尾繁：苫小牧沿岸域における底生魚類群集の食性とマクロベントス、日本水産学会誌、66 (1)、pp. 33-43、2000.
- 18) 橋本良平：東北海区漁場におけるマダラの食性と生息水深の変動に関する研究、東北区水産研究所研究報告、33 号、pp. 51-67、1974.

17.1 海洋及び河川・沿岸構造物の有用水産生物の産卵場・生息場としての増養殖に関する 評価技術の構築

17.1.3 漁港港湾の静穏域を活用した栽培漁業支援技術に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水産土木チーム）

研究担当者：的野博行、河合浩、須藤賢哉、伊藤公人、梶原瑠美子、稲葉信晴

【要旨】

本研究は、栽培漁業支援のため種苗放流と連携した漁港港湾の静穏域を活用した増殖機能付加型漁港整備に資する技術開発として、水域および生息環境の評価技術について検討するものである。これは漁港港湾水域が種苗放流適地と成り得るか否かを検討するものであり、現地実証試験を行うことで適正な環境評価技術や種苗放流手法の確立を目標とするものである。

初年度にあたる平成28年度(2016)は、対象漁港の環境調査、実証試験における試験礁の設置、種苗放流を実施した。

平成29年度(2017)は、放流後の稚ナマコの定期的な残存調査及び再度の種苗放流を実施により、港内においてナマコの放流、中間育成を行う場合、生息空間を埋没させるほどの流入堆砂や漂砂移動が大きな場所は適さない事や明らかになった。

平成30年度(2018)は、稚ナマコの継続的な残存調査及び漁港全体の底質環境についての検討し、本漁港は北東に隣接する河川や港外からの影響により東部港口周辺の底質に有機物が蓄積し易い傾向にある事や西部港奥及び港口の底質中から水産生物の生育に望ましくない量の全硫化物が認められるなど、港内の放流適地選定における重要な知見を得た。

令和元年度(2019)は、稚ナマコ放流適正密度及び港内のナマコ分布特性についての検討を行う事で、費用対効果の高い放流手法の確立に資する知見を得るとともに港内に分布するナマコが特に防波堤根固めブロック上を生息域として利用している事や、港内ナマコ資源量が2年間で約3倍に増加した事などを明らかにした。

令和2年度(2020)は、稚ナマコの放流適正サイズを検討するとともに、放流サイズが食害(オオヨツハモガニ)に及ぼす影響についても評価し、費用対効果の高い放流手法の確立に資するサイズに関する重要な知見を得るとともに食害の影響を考慮した稚ナマコ放流サイズを明らかにした。

キーワード：栽培漁業、種苗放流、稚ナマコ、生息環境、分布特性、放流密度、放流サイズ、食害生物

1. はじめに

北海道は全国の約2割の水産物生産量を占め水産物の安定供給に大きく貢献している。近年、漁業者の高齢化に伴い負担軽減の観点から、沖合漁業から沿岸の磯根漁業への転換が進んでいる。これに加え疲弊する日本海漁業の再生と水産物供給の安定化に向け、栽培漁業による漁業振興が重要な課題となっている¹⁾。

特に浜や地域全体の活性化のために、漁港機能の再編・集約化に伴う港内泊地の有効利用（増養殖機能の付加）等が推進されている。また、水産生物の増殖や生育に配慮した漁港施設整備と種苗放流の連携により、

静穏な漁港水域を活用した増養殖による栽培漁業の発展が期待されている^{2),3)}。栽培魚種の中でも、ナマコは中国において高級食材として需要が高まり、北海道では、1990年代には年間6億円前後で推移していた漁獲金額は、2003年以降中華圏向けの輸出量増大に伴い劇的に増加し、2010年には100億円を超え、ここ数年では80から100億円の範囲で推移している(図-1)。

また、輸出金額も水産品輸出総額の内、ホタテに次ぐ第2位に至る地域の主力産業となっており、地域漁業を活性化させる魚種として注目されている。しかしながら、ナマコの資源量は頭打ち状態にあり、種苗の

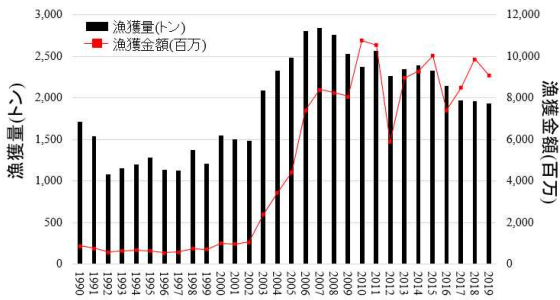


図-1 北海道におけるナマコ漁獲量及び漁獲金額の推移 (1991年～2019年)⁴⁾

生産技術とともに、放流技術の確立による資源保全(維持・増大)等の栽培漁業強化が求められている。

本研究では、栽培漁業支援のため、種苗放流と連携した漁港港湾の静穏域を活用したナマコの増養殖機能付加型漁港整備に資する技術開発として、環境評価技術について検討することを目的とする。

2. 検討概要

水産土木チームでは、これまでの研究から生物の蝸集行動を利用した「底質改善に関するナマコ摂餌生態」、「貝殻礁や人工海藻による生息環境創出手法」に関する知見を有している。ナマコの生息環境として、強い波浪は付着力が弱い稚ナマコを流出させるなどの損害を与えることが知られており^{5),6),7)}、減耗の著しい稚ナマコの育成場として漁港等静穏域は重要な役割を果たすと考えられる。しかし、漁港港湾等の静穏域に生息するナマコの生態に関する調査や稚ナマコ育成に特化した生息環境創出手法の検討事例は少なく、不明な点が多い。このため静穏域(漁港港湾)における、ナマコ生息の底質や基質の特性、餌料環境などの検討を実施し、稚ナマコ育成に適した生息環境を評価することは重要な課題である。

これらのことから「①種苗放流適地としての漁港港湾水域に関する適正環境評価技術の構築」、「②実証試験による効率的な種苗放流手法の確立」の2つの目標を設定し、評価技術の構築を目指すこととした。

平成28年度(2016)は対象漁港の環境調査、実証試験における試験礁の設置と種苗放流、平成29年度(2017)は試験礁内の稚ナマコ個体数の変化や成長、そして種苗放流前の水温や塩分など物理環境観測による生息環境調査、平成30年度(2018)は稚ナマコの継続的な残存調査、種苗放流及び漁港全体の底質環境についての検討、令和元年度(2019)は、稚ナマコ放流適正密度及び港内のナマコ分布特性についての検討を実施し、令和2年度(2020)は、稚ナマコ放流適正サイズ及び稚ナマ

コの食害生物と稚ナマコサイズの関係について評価を行った。

3. 調査方法

3.1 調査対象漁港

対象漁港は北海道南部の漁港であり、泊地の底質は主に砂質である。漁港の左右には小規模河川が存在することが特徴的である(図-2)。

3.2 環境調査方法

平成28年度(2016)の環境調査では、港内外に河口部を加えた8地点(No.1～No.8;図-3)を設定し、調査項目は表-1に示すとおりである。港内の静穏度の検討のため、港内外(港内:No.4, 港外:No.9)に波高計を設置し、放流時期である12月を含む秋季から冬季の波高変化について観測を実施した。平成29年度(2017)については、港内外の冬季の波高観測に加え、港内のA地点における水温、塩分、濁度、光量子密度及びクロロフィルa濃度についても観測した(表-1)。平成30年度(2018)は、港内全体及び左右に位置する港口部(図-4)の水深やアマモ場などを含めた底質環境(表-1)について検討を行った。



図-2 調査対象漁港 (試験礁の設置位置 A、B、C 地点)



図-3 環境調査の測点 (No. 1～No. 8)



図-4 漁港全体の底質環境調査 (St. 1~St. 14)

表-1 調査項目

項目	詳細	測点	時期
水質	DO, SS, NH ₄ -N, NO ₂ -N, N O ₃ -N, COD, PO ₄ -P, Chl. a, SiO ₂ -Si, POC, PON	No. 1~8	2016年10月 2016年12月
底質環境	水深, アマモ場, COD, 強熱減量, 全硫化物, Chl. a, フェオフィチン, 粒度	St. 1~14	2016年1月
底質	粒度, 強熱減量, COD, 硫化物, Chl. a, フェオフィチン, TOC, TON	No. 1~8	2016年12月
波高	水圧式波高計, 2時間毎20分観測, Δt:0.5sec	No. 9 No. 4	2016年9月~ 2017年2月 2017年9月~ 12月中旬
生息環境	水温・塩分 (INFINITY-CTW), Chl. a 及び濁度 (INFINITY-CLW), 光量子 (COMPACT-LW)	A地点	2017年9月~11月19日

3.3 実証試験方法

3.3.1 稚ナマコ放流試験礁の設置

当漁港において実証実験としてナマコ種苗を放流する試験礁を防波堤の近傍 (A地点、B地点) と対象地点として港内中央部 (C地点) に設置することとした (図-2)。防波堤近傍の地点については、放流後の稚ナマコが漁港構造物 (防波堤マウンド等) を利用する可能性があると考えたためである。試験礁の設置は、2016年11月に実施した。

3.3.2 放流試験礁

放流試験礁は、中心に小型貝殻ブロック「貝藻くん」 (写真-1、NETIS登録No. CGK-150001-A、開発会社: 海洋建設株式会社) を配置し、その周辺に空隙や材質の

異なる5種類のユニットを設置したものである (写真-2)。図-5に放流試験礁全体 (単位: 1基) を示しており、この試験礁を各地点 (図-2 A、B、C地点) に5基ずつ、合計15基を設置した。この試験礁は放流した稚



写真-1 小型貝殻ブロック

(海洋建設株式会社 NETIS 登録 No. CGK-150001-A)



写真-2 放流基質の設置状況

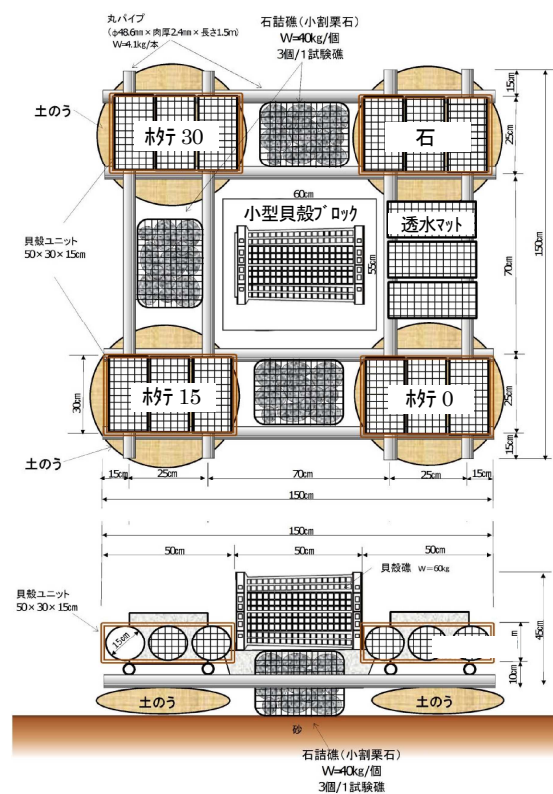


図-5 放流試験礁 (全体)

ナマコの初期流出を防止し、中間育成の場としての稚ナマコの利用を目的としている。空隙や材質の違いによる定着や成長の状況、ユニット内に発生する生物の量や種類とナマコ生息との関係については「17.2 生産力向上と漁業振興に向けた海洋及び河川・沿岸構造物の増養殖機能強化のための水産環境整備技術の開発」の報告書にまとめており、本報告書では漁港全体及び試験礁を設置した地点の環境が稚ナマコ放流場、そしてその後の生息環境として適正かどうかの評価に焦点を置いてまとめている。

3.4 ナマコ個体数調査

放流後の稚ナマコ個体数調査は、1回の調査で各地点(A, B, C地点)に5基ずつ設置した放流試験礁のうち1基のみ陸揚げを行い、小型貝殻ブロックと各ユニットから稚ナマコを取り分け、メントール麻酔後に計数するとともに体長・体幅、湿重量の測定を行った(写真-3)。計測後の稚ナマコは各ユニットに再放流した。放流1年目(2017年)の追跡調査は、2月、4月、6月、8月、10月、12月の計6回、2年目(2018年)は3ヶ月に一度(3月、6月、9月、12月)の計4回実施した。放流数は図-5の中心にある小型貝殻ブロックに約2,000匹/基とした(2,000匹×5基×3地点=合計30,000匹)。また、放流はダイバーが行い、稚ナマコの水中の逸散を防止するため、事前にネットをかけて、ネッ



写真-3 ナマコ個体数調査状況
(左: ナマコ採取, 右: 計測)



写真-4 稚ナマコの放流の様子

ト内部に放流した(写真-4)。

3.5 異なる密度による放流試験

2018年12月から一年間B地点にてホタテ15のみで構成した放流試験礁を設置し、異なる密度(1000個体、500個体、250個体の3実験区)の稚ナマコを放流する事で、適切な放流密度を把握するための追跡調査を行った(図-6)。3か月に一度の頻度で礁の陸揚げを行い、各実験区から稚ナマコを取り分け、3.4に記載した方法にて計数、体長・体幅、湿重量の測定を行った。計測後の稚ナマコは各実験区に再放流した。

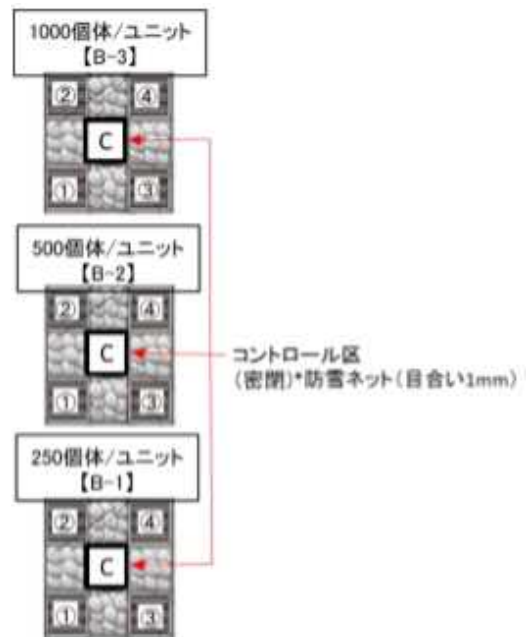


図-6 異なる放流密度の実験区 (B地点)

3.6 港内のナマコ分布

2017年及び2019年の12月の午前9時頃から漁港全域のライン調査を実施し、ナマコの分布状況を把握した。2017年は全39地点、2019年は全25地点について方形枠(1m×1m)内のナマコを採捕し、3.4に記載した方法にて計数、体長・体幅、湿重量の測定を行った。また測定後のナマコは再放流を行った。

3.7 異なるサイズによる放流試験

2019年12月にB地点にてホタテ15のみで構成した放流試験礁に、前もって測定した異なる体サイズ(1~2cm、2~3cm、3cm以上の3つの実験区)の稚ナマコを250個体放流し、放流適正サイズを把握するための追跡調査を約一年の間実施した(図-7)。3か月に一度の頻度で礁の陸揚げを行い、各実験区から稚ナマコを取り分け、3.4に記載した方法にて計数、体長・体幅、

湿重量の測定を行った。計測後の稚ナマコは各実験区に再放流した。

3.8 食害生物による稚ナマコへの影響評価

過年度の調査(17.2.3 栽培漁業支援強化のための漁港港湾の有効活用手法および整備技術の開発)で稚ナマコの捕食が確認されているオオヨツハマゴニについて、ナマコの放流サイズが捕食回避にどのような影響を及ぼすかに関して室内水槽試験を通して評価を行った(写真-5)。

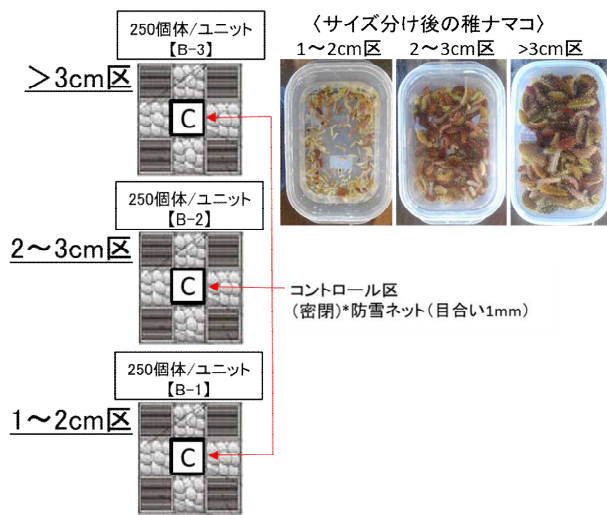


写真-5 室内水槽試験による捕食の影響評価

4. 結果と考察

4.1.1 水質・底質環境について

水質・底質分析結果として、ナマコの餌料環境に関する有機物 (A) 水質: 粒状有機炭素 (POC) 及びクロロフィル *a* (Chl. *a*), (B) 底質: Chl. *a*, フェオフィチン (Pheo.) 及び全有機炭素 (TOC) について 2016 年 12 月の観測結果を図-8 に示す。No. 1~No. 4 は港内、

No. 5, No. 6 は港外に位置しており (図-3)、表層および底層水の Chl. *a* や POC は、No. 1 の POC が若干大きい。これに対し底質 (堆積物) の Chl. *a*、Pheo.、TOC は港内側が大きいことが認められた。これは港内堆積物に有機物が多いことを示しており、港内は静穏で堆積傾向となっていると考えられる。港の形状より No. 1、No. 2 が港奥、No. 4 が港口に近く、底質 (堆積物) の Chl. *a*、Pheo.、TOC は港口の No. 4 で大きく、港奥の No. 1、No. 2 が小さいことから、堆積傾向として港外からの有機物が港内に入ってすぐに堆積していると考えられる。

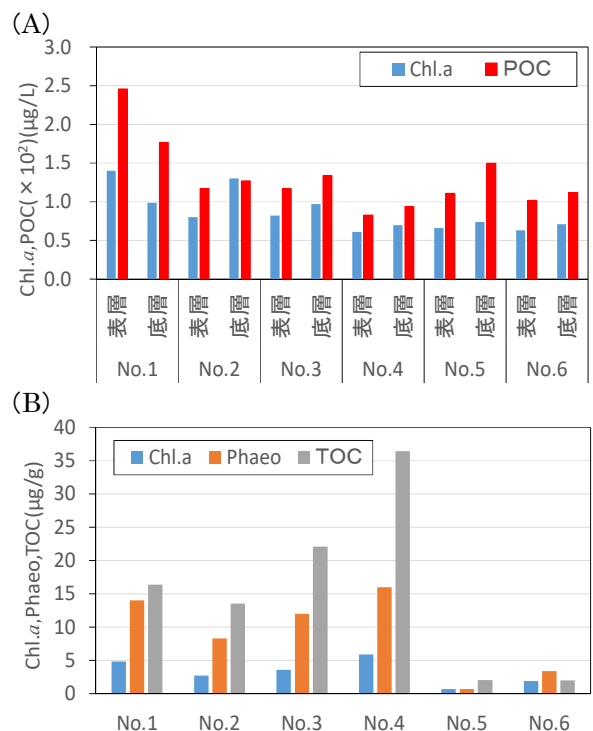


図-8 2016年12月観測、水質・底質分析結果 (A: 水質、B: 底質)

4.1.2 物理環境調査

冬季の波高の変化を図-9 に示す。本漁港は冬季に港口周辺のA地点であっても有義波高が0.5m以下であり静穏な環境であったといえる。放流時の小さいナマコにとっては、波浪やこれによる流れで放流場所からの離散、流出することが放流後の定着に大きく影響する事が報告されているが^{5),6),7)}、本調査の放流時の環境については兩年共に静穏性が保たれており良好であったと考えられる。図-10 に 2017 年 8 月 31 日から 11 月 19 日までの連続観測結果を示す。この期間の水温は 9 月の 20°C 程度から 11 月に確認された最低水温 10°C の範囲で変化した (図-10(A))。塩分は表層、底層ともにほぼ 34PSU で一定であったが、9 月 18 日に表層の塩分低

下が生じている (図-10(A))。濁度についても9月18日に表層、底層ともに上昇している。その後も表層は9月24日から10月8日まで高い状態が続いていた (図-10(B))。光量子密度は天候に左右されるがA地点は水深が5m程度のため、底層にまで光が届いていることがわかる (図-10(C))。近隣のアメダスによる降水量については、9月18日に時間降水量が40mm程度と期間の最大値を示した (図-10(D))。これは台風18号の接近

によるものであり、台風の降水による本漁港の周辺河川の出水、これによる陸域からの土砂の供給がA地点の堆砂の要因の一つとして考えられる。

4.1.3 漁港全体の底質環境

港内全体及び左右に位置する港口部の水深やアマモ場を含めた底質環境を図-11に示す。水深は、港奥から港口そして港外に向けて深くなっており、港内では2.6mから5.2mの範囲であった (図-11A)。またアマモの群落は中央部、そして西部防波堤に沿って湾外に向けて分布していた (図-11A)。東部港口 (St. 14) 及び港口付近 (St. 7と11) の底泥については、有機物量の指標となるCOD (図-11B) や強熱減量 (図-11C) の値が高く、本漁港の北東に隣接する河川の影響を大きく受けていると考えられる。水産用水基準では水産生物生育に適している基準値は、CODで20 mg/g dry weight 以下としている。本漁港においては、東部港奥のSt. 1 (22 mg/g dry weight)、港口部付近の観測点St. 7 (27 mg/g dry weight) 及びSt. 14 (51 mg/g dry weight)、そして西部港奥のSt. 3 (36 mg/g dry weight) の底泥で基準値を超えており、有機物の底泥への蓄積が進んでいる事が確認された。一方で、全硫化物に関しては水産生物の生育に望ましい基準値 (0.2 mg/g dry weight 以下) を超えた地点は西部港奥のSt. 3 (0.36 mg/g dry weight) 及び西部港口のSt. 9 (0.22 mg/g dry weight) の2地点のみであった (図-11D)。有機物の集積は細菌に酸化分解される際の酸素消費により貧酸素形成を促進し、それに伴い有機物の嫌気分解による硫化水素の発生が生物の生息環境に悪影響を引き起こす事が知られている。St. 14 や7では有機物の集積が確認された一方で、全硫化物に関しては、水産用水基準値を下回っていた。しかし、0.1mg/g程度でもアサリなどの底生生物の生残に影響を及ぼすという報告⁹⁾されている事から、留意が必要である。図-11(E, F)はChl. a及び藻類の死細胞量の指標となるフェオフィチン濃度を示している。Chl. a及びフェオフィチンはCODや強熱減量の多寡と同様の傾向を示し、東部港口と防波堤沿いの測点で特に高い値を示した。これは、底泥中の有機物からの栄養塩類の溶出が、高いChl. a及びフェオフィチン濃度と関係していると考えられる。ナマコの種苗生産で着底直後の初期育成の際に餌として底生微細藻類を用いる事やナマコの消化管内容物中から多くの底生珪藻が観察されている事⁹⁾から、Chl. aやフェオフィチンのモニタリングは餌環境を把握する上で重要であると考えられる。図-11(G)

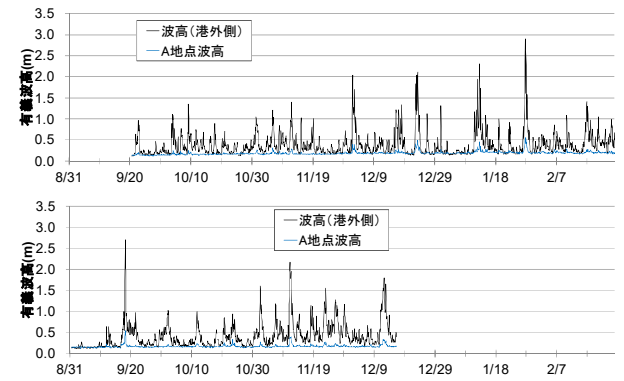
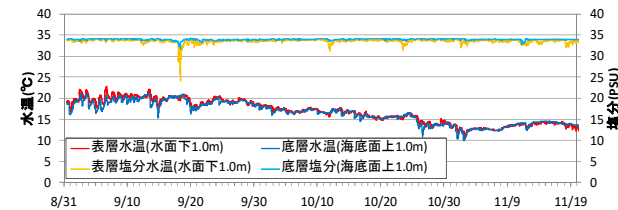
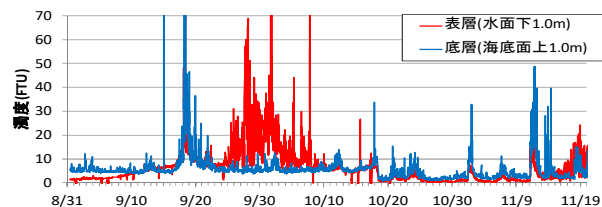


図-9 冬季の波浪(上:2016年冬季,下:2017年冬季)

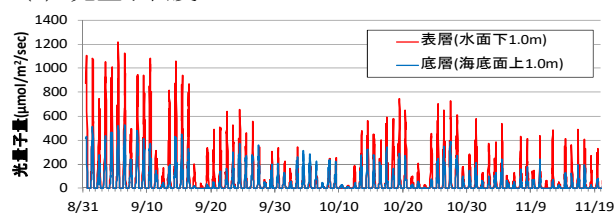
(A) 水温・塩分



(B) 濁度



(C) 光量子密度



(D) 降水量

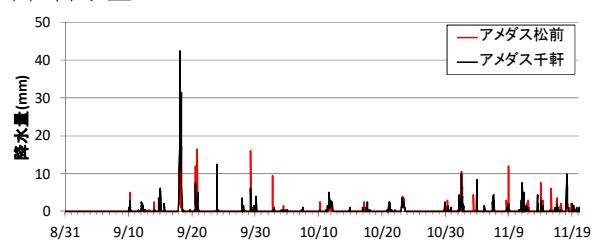


図-10 A地点の連続観測結果 (2017年)

は、底泥中の粒度分布(中央粒径)を示している。同じ材料・質量で比較した場合、粒子が小さくなるほど比表面積が大きくなり有機物の吸着も大きくなることから、粒度組成は底泥中の有機物含有量に影響を及ぼすと考えられる。本調査においても、COD や強熱減量の値が高い測点では中央粒径が比較的小さい値を示している。ナマコの成長と砂粒の関係性¹⁰⁾や消化管内容物中の粒子サイズの傾向についての報告¹¹⁾など摂餌選択に関与する事が示唆されているため、稚ナマコ生息に適した環境と底泥粒度の関係性についての検討も重要と考えられる。

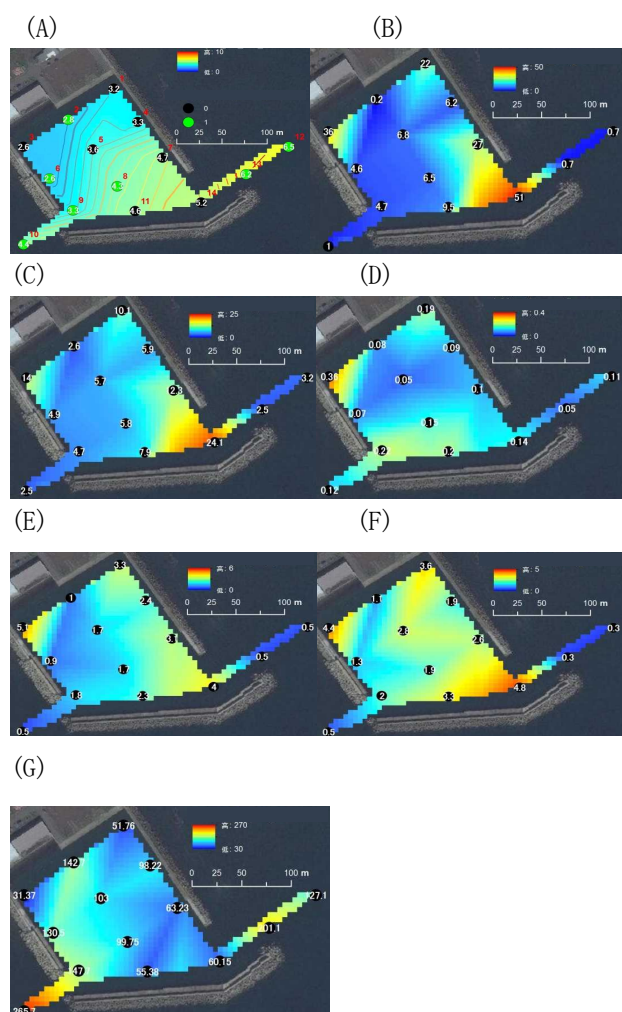


図-11 (A) 水深及びアマモ群落の有無, ○内の数字は水深 (m), アマモ群落の有無は○の色 (●: 無し, ●: 有り), (B) 化学的酸素要求量 (COD: mg/g dry weight), (C) 強熱減量 (%), (D) 全硫化物量 (mg/g dry weight), (E) Chl. a 濃度 (µg/g dry weight), (F) フェオフィチン濃度 (µg/g dry weight), (G) 中央粒径 (µm)

4. 2 実証試験結果

4.2.1 試験礁内のナマコ個体数調査

稚ナマコ放流後の地点生息個体数の調査結果を図-12に示す。稚ナマコは試験礁の中心の小型貝殻ブロックに放流後、時間の経過と共に試験礁全体に移動していくことが認められた。一方で、A 地点は個体数の増加の度合いが小さく、放流後 342 日後 (2017 年 11 月) では減少に転じ、2 年後の定着数も他の 2 地点と比較し半分程度であった。これは A 地点が河川や港外の影響を受けやすい地点で、写真-6 のように放流基質が堆積物に埋没する事が影響したと考えられる。本漁港は周辺に河川があり、比較的大きな降雨などで陸域からの土砂や落ち葉などの有機物が港内に流入しており、特に A 地点は堆積量が多い事が認められた。このことから港内においてナマコの間育成を行う場合、生息空間を埋没させるほどの流入堆砂や漂砂移動が大きな場所は適さないと考えられる。一方で定着個体数は最小だったものの 2 年後に採捕された稚ナマコの平均標準体長は全地点中最大の 6.3cm と有意に高かったことから、底質中の有機物含有量が成長に有利に働いていた可能性が考えられる。種苗放流適地を検討する上で稚ナマコの定着、そして成長を高めるための様々な視点から適切な環境特性を見極める事が重要になると考えられる。また、放流してから約 1 年後及び 2 年目についても 2018 年 3 月と 12 月を除いては、C 地点において定着個体数が一番高かった。C 地点はアマモ場に隣接しており (写真-7)、アマモ葉体上には稚ナマコの餌として重要な羽状目珪藻などの付着藻類が多く生息し、秋から冬にかけてアマモの落葉が周辺に堆積し、バクテリアなどの微生物によって細かな有機物片 (デトライト) が供給される¹²⁾など、餌環境も含め定着環境として良好であった可能性が考えられる。一方で、試験礁以外の周辺環境からは全くナマコの分布が確認出来なかった事から漁港中央部に位置している事による物理的な生息域の分断による影響と捉えることも出来る。2 年後 (2018 年 12 月) の定着個体数について若干ではあるが最も高い値を示した B 地点は、東部防波堤沿いの被覆ブロックに隣接している (写真-8)。2 年後の平均標準体長についても C 地点より高い傾向 (B 地点: 4.68cm, C 地点: 4.34cm) が認められた。漁港全体のナマコ分布調査でも B 地点が隣接する東部防波堤側に偏って分布している事が確認されている事や B 地点の試験礁内から明らかに放流個体では無い標準体長が 20cm を超える個体も見つかった事から、ナマコが外部 (漁港水中コンクリート構造物) と試験礁を移動してい

る可能性が示唆された。本研究の対象魚種であるマナマコは成長と共に分布域が変わる事も報告されている¹³⁾。本研究における稚マナコの放流適地の選定は放流して定着した個体が成長し効果的に地域のマナコ資源増大に寄与するための評価技術である必要がある。従って、B地点のように成長した個体が周辺に分布域を拡大できるような環境を放流の時点で考慮する事も重要であると考えられる。

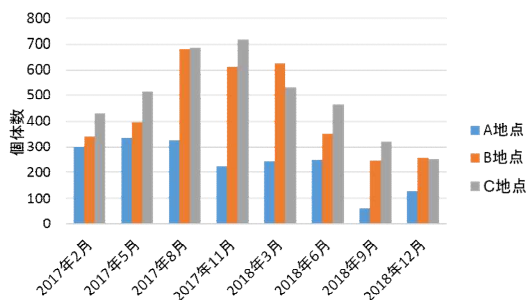


図-12 地点別マナコ生息個体数 (5種類のエッグの合計)

(A) (B)

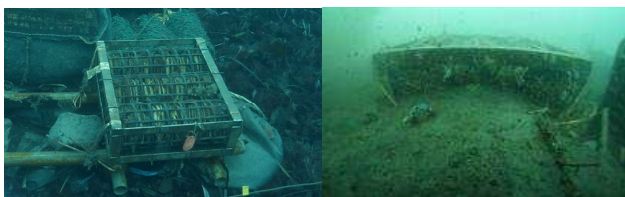


写真-6 A地点の堆砂状況 (A)堆砂前、(B)堆砂後



写真-7 C地点の様子 (左手側にアマモ場)

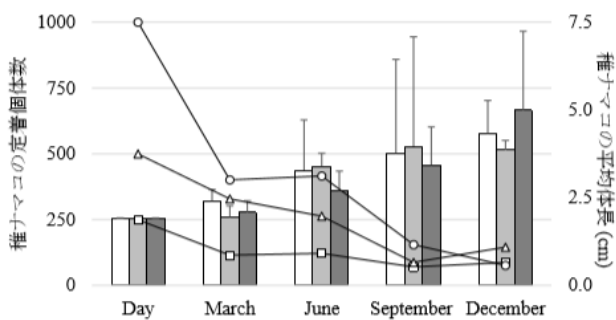


写真-8 B地点の試験礁(右)及び被覆ブロック(左)

4.2.2 異なる放流密度による生残・定着への影響

3つの異なる放流密度の試験区の結果を図-13に示す。個体数の変化については、1000個体放流した区では、放流後3か月には個体数が約60%減少し、1年後には放流した個体数の約7%と最も低く、放流密度が一番低かった250個体放流区では一年後に87個体生残し、放流個体数の約35%と最も多かった。体長を指標にした成長については、1000個体放流区の個体の1年後の標準体長が約2.6倍と高く、次いで250個体放流区の約2.3倍、最低が500個体放流区の約2倍だった(図-13 A)。重量については、1000個体放流区で約10倍と最高値で、次いで250個体放流区の約8.6倍、500個体放流区では重量の増加率についても約5.1倍と最低であった(図-13 B)。放流した稚マナコ一個体当たりの利用可能基質面積が250個体では最も広く、餌の競合等、その他生息環境の面からも低密度区で高い生残・定着が維持されたのではないかと考えられる。

(A)



(B)

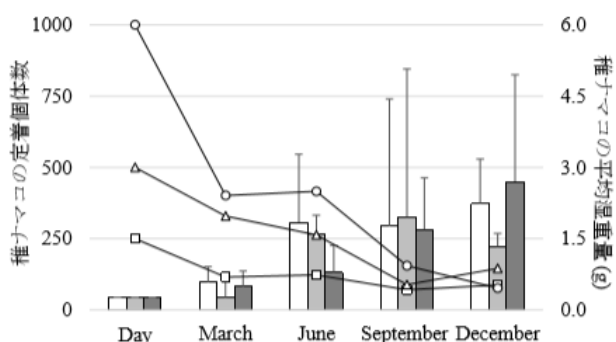


図-13 異なる放流密度試験区における稚マナコの定着個体数と成長 (A: 平均標準体長、B: 平均湿重量)

4.2.3 異なる放流サイズによる生残・定着への影響

3つの異なる放流サイズの試験区の結果を図-14に示す。3cm 区で一年後の定着率が最大（34%）で86 個体であり、1cm 区で約2倍だった（図-14）。特に1cm 区で放流後3カ月の間に約8割の個体数が減少した。体長については、1年後ではどの区でも5cm前後で、1cm 区で3.9倍と最大、3cm 区では1.27倍と最小であった（図-14 A）。重量に関しては1cm 区で約47.8倍と最大で、3cm 区で最小（2.2倍）であり、12月には1,2cm 区の平均重量が3cm 区を超えた（図-14 B）。1cm 区の定着個体数が、放流後3ヶ月以降安定し推移していたことから、小型種苗を放流した場合でも、初めの3ヶ月の生残率を高める方法とセットで放流出来れば、大型の種苗放流と同程度の効果が見込める可能性がある。

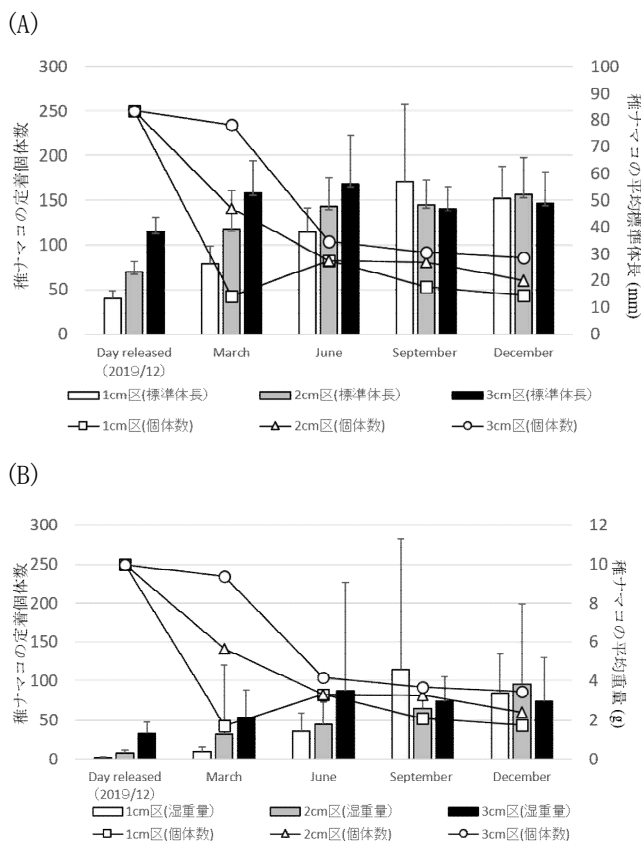


図-14 異なる放流サイズの試験区における稚ナマコの定着個体数と成長 (A: 平均標準体長、B: 平均湿重量)

4.3 港内分布調査結果

2017年及び2019年の港内のナマコ分布を図-15に示すが、港内に分布していたナマコの個体数は2019年には2017年と比べ3倍以上に増加している事が認められた。一方で、分布していた個体は平均標準体長では、2019年が14.09±3.3cmと2017年(12.50±4.0cm)

よりも大きかったが、平均湿重量では、2017年の方が高かった。漁港内の分布場所に注目すると、防波堤沿いの根固めブロック上のみ出現しており、特に2016年から種苗放流を継続している東防波堤沿い（B地点周辺）に分布している事が認められた。北海道以南では、砂泥地や藻場などにも本種は分布している事が報告されている¹³⁾事から、本漁港に分布するナマコは、足場の安定したブロック上に分布する事で寒冷海域特有の冬場の強い波浪等による流出など物理的な悪影響に適応している可能性がある。一方で、小型のナマコの分布はほとんど認められなかった。マナマコは一般的に隠れ場所が生息条件に重要で¹⁴⁾、夜行性¹⁵⁾である事から、小型の個体がほとんど確認出来なかったと考えられる。

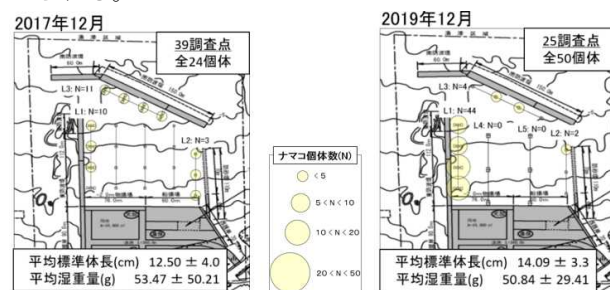


図-15 2017年及び2019年の港内のナマコ分布

4.4 異なる稚ナマコサイズの捕食への影響

稚ナマコへの捕食行動が認められたオオヨツハモガニ及びケブカヒメヨコバサミを用いた稚ナマコ（標準体長1~2cm）に対する結果を図-16、稚ナマコ（標準体長2~3cm）に対するサイズの異なるオオヨツハモガニの結果を図-17に示す。体長1~2cmの稚ナマコの捕食（殺戮含む）試験については、オオヨツハモガニでは、7.7±2.38 個体/日、ケブカヒメヨコバサミでは、3.3±0.47 個体/日と非常に高い値が認められた。一方で、体長2~3cmの稚ナマコの捕食試験では、小型のオオヨツハモガニによる捕食は見られず、全体の捕食速度も1個体/日を下回った。ただ、オオヨツハモガニの大型オスの中には1日あたり最大で4個体捕食する個体も確認された。

一般的に海洋性の無脊椎動物の個体群動態は捕食による影響を大きく受ける事が知られているため¹⁶⁾、種苗放流による資源増大を図ろうとする場合、放流場となる環境中の捕食生物による影響を考慮する事が重要と考えられている。南方系の食用ナマコであるハネジナマコの種苗を食害生物への対策無しで放流した場合、1時間後には放流種苗の60%以上がモンガラカワハギ科やベラ科の魚類の捕食の影響で減少したという

報告もある¹⁷⁾。一方で、マナマコの食害生物についての知見は限定的であり¹⁸⁾、最も危険とされる食害生物はイトマキヒトデとされていた¹⁹⁾。本実験から捕食対象とするナマコ稚仔のサイズ(1~2cm)で比較した場合、オオヨツハモガニはイトマキヒトデの4倍以上の捕食速度でナマコ稚仔を捕食(殺戮)する事、また、大きなナマコ種苗を放流する事で、食害の影響を低減できる可能性が本実験の結果、明らかとなった。これらの結果は、種苗放流後の生残に悪影響を及ぼす生物の特定や影響の定量化、それら生物の生息環境など生態学的な知見の集積、また対策の確立が放流効果を高めるために肝要である事を示している。

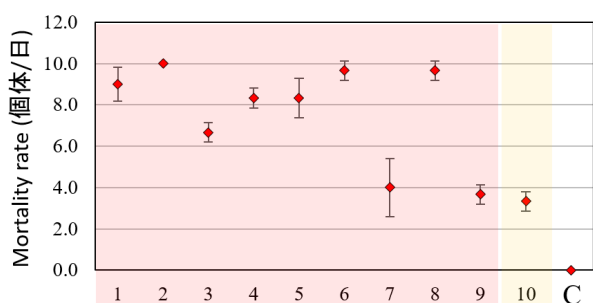


図-16 稚ナマコ(1~2cm)に対する捕食試験結果
(1-9:オオヨツハモガニ、10:ケブカヒメヨコバサミ
C: コントロール区)

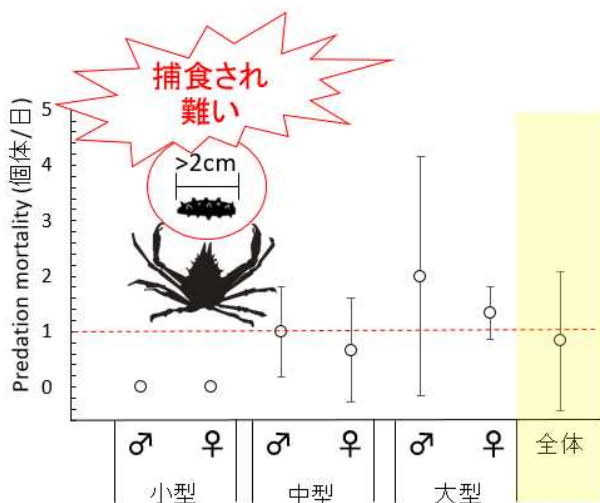


図-17 稚ナマコ(2~3cm)に対する捕食試験結果

5. まとめ

「漁港港湾の静穏域を活用した栽培漁業支援技術に関する研究」における評価技術に関する平成28年度(2016)、平成29年度(2017)、平成30年度(2018)、令和元年度(2019)及び令和2年度(2020)の検討結果について以下に取りまとめる。

- 本漁港は北東に隣接する河川や港外からの影響により東部港口周辺の底質に有機物が蓄積し易い傾向にある事が判明した。
- 西部港奥及び港口の底質中から水産生物の生育に望ましくない量の全硫化物が認められた。
- 本漁港は冬季に港口周辺であっても静穏であり、水温や塩分、光量子量等の環境についても、稚ナマコ放流・定着には比較的良好であった。
- A地点>B地点>C地点の順で2年後の平均標準体長が大きく、2年後の標準体長がA地点で有意に高かった ($p<0.01$)。一方で、約2年後の定着数はB地点>C地点>A地点の順で堆積傾向があったA地点において低位であった。
- 港内においてナマコの放流、中間育成を行う場合、生息空間を埋没させるほどの流入堆砂や漂砂移動が大きな場所は適さない事が分かった。
- 低密度で放流した試験区で、最も定着率が高く、高成長が認められた。
- 3cm以上のサイズで放流した区で、1年後の定着率が最も高かった。一方で、約1cmで放流した場合は、初期減耗は大きいものの、放流後3ヶ月で3cm前後まで成長した後、定着数は安定し、高成長が認められた。
- 漁港全体の分布から防波堤根固めブロック上にナマコは分布し、特に2016年から継続的に種苗放流しているB地点周辺に多く分布している事が示された。
- 室内水槽捕食試験により、オオヨツハモガニやケブカヒメヨコバサミがナマコ稚仔の生残に大きな影響を及ぼす食害生物である事が世界で初めて明らかとなった。また、稚ナマコのサイズの大型化で食害の影響を低減できる可能性が示された。

本研究は、栽培漁業支援のため種苗放流と連携した漁港港湾の静穏域を活用した増殖機能付加型漁港整備に資する技術開発するために、漁港港湾水域がナマコ種苗放流適地と成り得るか否かを検討するものであり、現地実証試験を行うことで適な環境評価技術や種苗放流手法の確立を目標としている。最終年度である令和3年度においては、これまでとは異なる新たな漁港を調査対象場所としてこれまで蓄積した知見、技術の一般化に向け研究を推進し、漁港港内の静穏域を活用した栽培漁業支援のための評価技術についてのマニュアル化等に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 北海道水産林務部：日本海振興基本方針、2014.
- 2) 農林水産省：水産動物の種苗の生産及び放流並びに水産動物の育成に関する基本方針、2015.
- 3) 北海道開発局：北海道マリンビジョン21 (改訂版) 北海道漁港漁村の将来像、2013.
- 4) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構水産研究部：“マリンネット北海道”
<http://www.hro.or.jp/list/fisheries/marine/index.html>
- 5) 光永直樹, 松村靖治：サイズ別に放流した人工稚ナマコの成長と生残、長崎水産試験場研究報告書、第30号、pp.7-13、2004.
- 6) 桑村勝士, 有江康章, 小林信, 上妻智行：人工増殖場に放流したマナマコ (アカナマコ) の移動、生存および成長、福岡水研報、第5号、pp.9-14、1996.
- 7) Masataka Tanaka: Diminution of Sea Cucumber *Stichopus japonicus* juveniles released on artificial reefs, Bull. Ishikawa Pref Fish. Res. Center, pp.19-29, 2000.
- 8) 平澤充成, 善功企, 寺崎英一, 的野一郎, 森崎真, 田中信夫：底質中の硫化物に着目した人工干潟のアサリ生息場への適用性に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 72(2), pp.1399-1404, 2016.
- 9) 近田靖子, 酒井勇一：稚ナマコの摂餌珪藻観察手法の検討、北水試験報、第68号、pp.71-74、2005.
- 10) 木原稔, 田本淳一, 星貴敬：水槽内でのマナマコの摂餌行動におよぼす砂粒の影響, 水産技術, 2(1), pp.39-43, 2009.
- 11) Zhao, P., Yang, H.S. : Selectivity of particle size by sea cucumber *Apostichopus japonicus* in different culture systems, Mark Sci., 34, pp.11-16, 2010.
- 12) Xujia, L., Yi, Z., Hongsheng, Y., Shaoguo R. : Eelgrass Detritus as a Food Source for the Sea Cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka (Echinodermata: Holothuroidea) in Coastal Waters of North China: An Experimental Study in Flow-Through Systems, PLOS one, 8 (3), e58293, 2013.
- 13) 篠原義昭, 西垣友和, 瀬田智文, 道家章生：宮津湾におけるマナマコ *Apostichopus japonicus* の成長、京都府農林水産技術センター研究報告、第39号、pp.17-22、2017.
- 14) 五嶋聖次, 藤芳義裕, 井出名誉, Gamboa, U. R., 中尾繁：サロマ湖におけるマナマコの分布、水産増殖、42巻2号、pp.261-266、1994.
- 15) Sun, J., Zhang, L., Pan, Y., Lin, C., Wang, F., Kan, R., & Yang, H. : Feeding behavior and digestive physiology in sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Physiology & behavior, 139, 336-343, 2015.
- 16) Bell, J.D., Munro, J.L., Nash, W.J., Rothlisberg, P., Loneragan, N.R., Ward, R., Andrew, N.R. : Restocking and stock enhancement of marine invertebrate fisheries. *Advances in marine biology*, Vol 49, 1-374, 2005.
- 17) Dance, S., Lane, I., Bell, J.D. : Variation in short-term survival of cultured sandfish (*Holothuria scabra*) released in mangrove-seagrass and coral reef flat habitats in Solomon Islands. *Aquaculture*, 220, 495-505, 2003.
- 18) Yu, Z., Yang, H., Hamel, J.F. : Larval, Juvenile, and adult predators. The Sea Cucumber *Apostichopus japonicus*: History, Biology and Aquaculture. Eds Yang, H.S., Hamel, J.F., Mercier, A., Academic Press, Amsterdam, 243-256, 20.
- 19) Hatanaka, H., Uwaoku, H., Yasuda, T. : Experimental studies on the predation of juvenile sea cucumber, *Stichopus japonicus* by sea star, *Asterina pectinifera*. *Suisanzoshoku* 42, 563-566, 1994.

17.1 海洋及び河川・沿岸構造物の有用水産生物の産卵場・生息場としての増養殖に関する 評価技術の構築

17.1.4 自然再生産を目指した水産有用種の行動に着目した河川・沿岸構造物の評価・改善手 法に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境保全）

研究担当者：巖倉啓子、野上毅、布川雅典

【要旨】

本研究は水産有用種に対する河川や沿岸構造物の影響評価手法の開発をおこない、自然再生産を目指した水域環境類型化技術の確立を目指すものである。平成 30 年度は、おけるシロサケ遡上数を自動計測システムにより計測するとともに稚魚降河時期に必要な河口緩流域の生息数調査を行ったところ、長期間の遡上数や降下数を計測することができ、河口緩流域はシロサケ稚魚の降海前滞留場所であることが判明した。令和元年度は、複数の遡上数自動計測システム設置により、支流ごとの遡上数を明らかにした。また、荒天時シロサケの漁港迷入時に対する漁港影響を検討したところ、厚内漁港ではシロサケの巡航速度未満が発生することから、回遊ルートへの復帰が可能であることがわかった。令和 2 年度は、サケカウンターの設置箇所の工夫により、計測困難な支流におけるシロサケ遡上数の推定評価技術の開発を行った。さらにサケカウンターの機能を使って遡上中止個体数を明らかにして魚道の遡上環境評価手法の検討を行った。

キーワード：サケカウンター、勇払川、十勝川、遡上数、魚道、ワンド、シロサケ稚魚、緩流域、トキサタ堰、厚内漁港

1. はじめに

北海道における 2017 年秋期のシロサケ来遊数（沿岸と河川での捕獲数の合計値）は 1989 年以降最低となった。2018 年秋期の来遊数も年比 53% と依然低い水準が続いている。このような事態をうけて、自然産卵魚（野生魚）への関心が高まっている。以前からも生態系保全や水産資源維持の観点から、遺伝的多様性を持つ自然産卵魚による資源管理の必要性が求められてきた¹⁾。このような野生魚個体群の保全と維持には産卵場までの遡上経路の確保と、稚魚の降河時に必要な緩流域の保全が必要である。

河川構造物にはこれまで多くの魚道等の整備により流水の縦断的連続性が確保されてきた。河川法の改正を受けて、これらに加えてより多くの構造物に魚道等が整備されるようになった。このような魚道の効果は、魚類の遡上数を計測することで評価される²⁾。こ

の評価を行うために、従来からよく用いられているその計測方法は目視およびカメラ調査である³⁾。シロサケなどの遡上期間は秋期から冬期の数ヶ月に渡り、さらにシロサケの遡上は 1 日の 24 時間中任意の時間に行われ、夜間の遡上も多いと思われる。長期間計測や夜間計測を行うためには、手間と費用を考えた場合難しい。自動計測装置による計測がこれらの調査に取って代わる一つの方法である⁴⁾。

北海道中央部に位置するウトナイ湖には北西から美々川、北東からは勇払川が流入しており、勇払川流域の主な河川はこれらの二つの河川である。美々川で約 45 年前にシロサケ稚魚放流が中止されたが、現在でも親魚遡上を確認されている⁵⁾。しかし、夜間の遡上数や数ヶ月にわたる長期間の遡上数はわかっていない。遡上数の解明は自然再生産を考えた上で重要な資料となる。

現在の勇払川は支笏湖から数キロ下流に源流を持ちウトナイ湖を経由して、安平川に合流後日本海へ流出している。しかし、かつては勇払川のウトナイ湖より上流は、ウトナイ湖を経由せず苫小牧市内を蛇行しながら貫流していた。その後、治水安全度の向上と有効な土地利用を図るためウトナイ湖を経由する流路に改修された。改修以前の勇払川にはシロサケ産卵も見られたものの⁵⁾、その後の報告は知られていない。

一方で、シロサケ稚魚はふ化後海へ降下し、海水温が低い間は沿岸で過ごす。しかし、この時期の沿岸域での稚魚数減耗がおおきい^{6,7)}といわれ、沿岸域での減耗抑制が重要と考えられている⁸⁾。北海道東部十勝川の河口域では治水目的の構造物により支流流入部付近にワンド状地形が作られている(以下ワンドとする)。また、右岸には十勝川本川の短絡による旧河川跡が(以下旧川とする)緩流域として残され、小型漁船の停泊地として利用されている。

この十勝川では約 6000 万尾のシロサケ (*Oncorhynchus keta*) 稚魚が毎年放流されているにもかかわらず近 5 年の来遊数の減少は深刻である。シロサケ稚魚がワンドや旧川などの人工的な緩流域を利用するならば、治水目的等による人工構造物の設置により形成された緩流域がシロサケ幼稚魚の減耗防止に貢献できる可能性が考えられる。北米では、湿地再生ではあるものの、河口部に緩流域の復元が行われ、復元後数年でキングサーモン (*O. tshawytscha*) 稚魚が利用していること^{9,10)}や、シロサケ稚魚の滞在日数が数日間であることが明らかにされている¹¹⁾。しかし、道内外で河川内の緩流域においてシロサケ稚魚が利用していることを明らかにした事例はほとんど知られていない。

シロサケ親魚の回帰ルート上に漁港等沿岸構造物

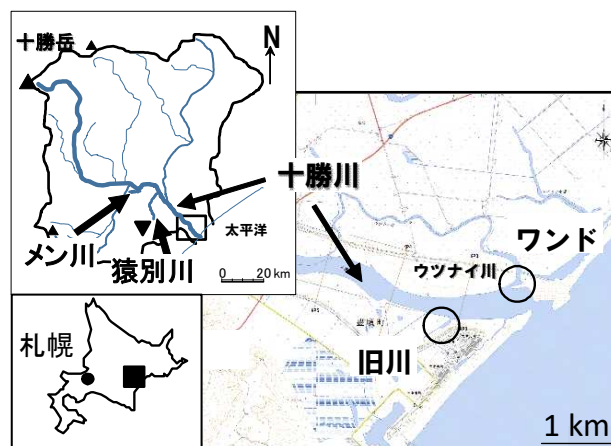


図-1 十勝川河口域の旧川とワンド。国土地理院電子地図改変。

がある場合に、漁港内でシロサケが確認されている。シロサケ来遊数が激減している近年、より多くのシロサケ親魚が河川へ回帰できることが重要である。十勝川河口沿岸に位置する厚内漁港は、流砂の影響を避けるため防波堤が沖方向に 600 m も突き出す形状をしているためか、シロサケ産卵時期になると港内でシロサケ個体が確認できる。これらのシロサケが回帰途中で漁港内に迷入している可能性がある。これらのシロサケが荒天時にも港外へ移動できるかどうかの検討はこれまでなされていない。

2. 研究全体の概要

流域全体での定量的な魚類行動の把握手法の構築に関する研究を平成 28 (2016) 年から令和 2 (2020) 年度に行う。まずはシロサケの河川遡上行動調査を実施し、さらにサケカウンターを開発することで遡上数を把握するための新手法を検討する。平成 30 (2018) 年度から構造物の評価手法を検討するための

表-1 十勝川河口域旧川とワンドの物理環境の概要

調査項目	調査日 (2018年)					
	4月中旬 (4月12日)	4月下旬 (4月13日)	5月上旬 (5月9日)	5月中旬 (5月16日)	5月下旬 (5月24日)	6月上旬 (6月7日)
旧川						
水深 (m)			1.0-3.0			
水温(標準偏差)(°C)	8.0 (0.30)	8.9 (0.00)	10.5 (0.46)	14.5 (0.85)	15.3 (0.72)	18.0 (0.06)
DO(標準偏差)(mg/L)	6.3 (0.37)	6.3 (0.00)	7.4 (1.12)	7.8 (0.82)	7.6 (0.13)	6.2 (0.63)
EC(標準偏差)(mS/m)	20.2 (0.00)	14.9 (0.00)	18.2 (0.08)	16.0 (3.65)	16.2 (0.18)	14.4 (2.67)
ワンド						
水深 (m)			0.5-1.0			
水温(標準偏差)(°C)	11.4 (0.21)	11.0 (0.00)	9.3 (0.12)	16.2 (0.23)	18.4 (0.75)	19.6 (0.32)
DO(標準偏差)(mg/L)	6.1 (0.04)	5.6 (0.00)	10.5 (0.50)	8.4 (0.46)	8.4 (0.51)	10.3 (2.54)
EC(標準偏差)(mS/m)	18.3 (0.31)	14.2 (0.00)	18.8 (1.22)	20.2 (0.00)	17.7 (2.21)	20.2 (0.00)

基礎データ収集をはじめ、魚類行動の遊泳負荷に着目した河川・沿岸構造物の評価に関する研究を行っている。

3. 平成 30 (2018) 年度の調査地

調査地は北海道中央部安平川水系勇払川（流域面積 219 km²）のウトナイ堰と北海道東部十勝川（流域面積 9,010 km²）の河口域である。

勇払川流域では勇払川以外に大きな支流として美々川があり、この美々川では 1971 年まで人工ふ化放流が行われていたが現在は行われていない⁵⁾。しかし、毎年 10 月になるとシロサケ親魚が勇払川を遡上し美々川流域で産卵しているのが知られている。

勇払川中流に位置するウトナイ湖から流れ出た勇払川には、ウトナイ湖の水位を維持するためのウトナイ堰があり、左岸側に魚道が設置されている。サケカウンターは、この魚道に設置した。勇払川ウトナイ堰魚道（以下ウトナイ魚道）では遡上が活発になる⁵⁾ 11 月から遡上が終了する翌年 1 月まで（2018 年 11 月 8 日 10 時から 2019 年 1 月 31 日 24 時）までシロサケの遡上・降下数を計測した。調査地の魚道を移動する個体が夜間に移動しているのかを調べるために、ウトナイ魚道では 2018 年 11 月 9 から 11 日の調査期間中に記録されたデータから、夜間に移動した個体数も計数した。

シロサケ稚魚の緩流域の利用実態を明らかにするために、稚魚捕獲調査を行った。調査は十勝川河口の右岸の旧川と左岸のワンドで（図-1）行った。この旧川は 45 年ほど前には分流した十勝川の最下流の一部であったが、現在は水際が整備され人工的な湛水面のような形状を呈している。旧川の面積は 0.008 km² であり、水深は 3 m 未満で、水温は調査期間の 4 月上旬から 6 月上旬の間で 8.0℃から 18.0℃に上昇していた（表-1）。また DO と EC はそれぞれ、6.2 mg/l から 7.8 mg/l、14.4 mS/m から 20.2 mS/m の範囲だった（表-1）。気象庁ホームページによると、4 月上旬から 4 月中旬までの十勝沖の海面水温は 3℃以下で、4 月下旬になっても 6℃程度しか上がらなかった。この水温はシロサケ稚魚が降下して海洋生活初期に適温とされる 8 から 13℃より低かった。

4. 平成 30 (2018) 年度設置のサケカウンター

2018 年度は、サケカウンターはウトナイ湖の直下流に位置するトキサタ堰に付帯した魚道に設置した。サケカウンターは、鉄骨製の架台に 2.0 m × 0.8 m

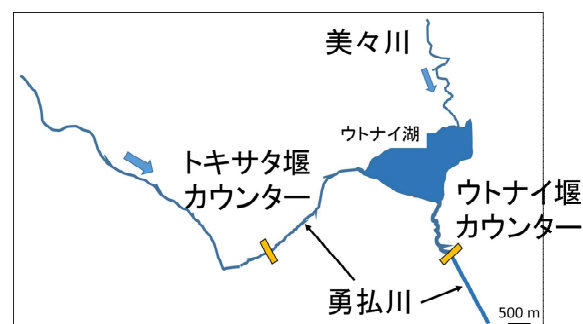


図-2 勇払川流域でのカウンター設置箇所。オレンジ色の■がサケカウンターを示す。

（長さ×幅）の木製水路がついている。この木道魚道に 3 本のセンサー電極を流下方向に上流端から 30 cm 間隔で設置し、両端に 5.0 V の電圧を印加している。この木製水路を魚道の隔壁間に設置し、センサー上の流水の電気抵抗を計測する。センサー上を対象魚が通過した際に、流水の電気抵抗が変化し、センサーから出力される電圧信号がパルス状の波形を描く。パルス波の形状により遡上・降下を判定して遡上数を計数する¹²⁾。

カウンターセンサーからの信号の読み取りは FishCountSystem_Anlyzer03（田村電子工房、高崎市）を使用した。これは、遡上個体を作る波形だけではなく、遡上か降下を自動判別する能力があり、そのほかに判定不能なものも計数する。また、閾値を設定することで、シロサケではない小型魚を一定の精度で判別することも可能である。今回はこの閾値を 1000 mV に設定して、遡上と降下と判断されたものを研究対象とした。なお、設置時の各カウンター木製魚道の流速と水深は、162.2 cm/s および 20.2 cm だった。

5. 令和元 (2019) 年度サケカウンターの設置

2019 年度は勇払川上流と美々川へのシロサケ遡上数を明らかにする目的で、2018 年度に設置したウトナイ堰に加えて、ウトナイ湖から約 3 km 上流にあるトキサタ堰（図-2）の魚道にもサケカウンターを設置した。ウトナイ堰と同様に、魚道に 1.65 m × 0.9 m（長さ×幅）の木製水路がついた架台を設置した（図-2）。この木製水路にウトナイ堰のセンサーと同様にセンサーを設置して、加印することで遡上数を計測した。センサーからの信号は魚類遡上数計測システム（アンプ分離方式ポータブルデータ収集ユニット）（田村電子工房、高崎市）を用いて記録し、FishCountSystem_Anlyzer03（田村電子工房、高崎市）により判別した。

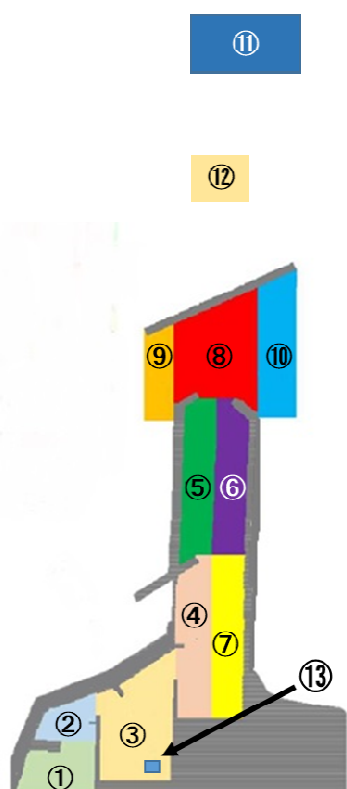


図-3 厚内漁港における物理量評価エリア。図中の番号は評価エリアを 13 エリアに分割したエリア番号を示す。

表-2 評価地点別の平均水深(m)

地点番号	水深 (m)
11	9.41
12	8.47
9	5.56
10	5.6
8	4.63
5	3.01
6	3.08
4	2.24
7	2.37
3	3.39
2	3.01
1	3
13	3.5

6. 平成 30 (2018) 年度の十勝川における稚魚放流

旧川およびワンドで魚類捕獲調査を実施し、緩流域を利用するシロサケ稚魚の個体数を明らかにした。捕獲調査は、4月中旬から1から2週間程度の間隔をおき合計6回実施した。調査は平成28年4月中旬

(12日)、下旬(26日)、5月上旬(9日および10日)、中旬(16日および17日)、下旬(24日)、および6月上旬(7日)である。旧川およびワンドは潮位の影響を受けるが、すべての調査日で概ね水位が一致する日中の時間帯に合わせて実施した。

シロサケ稚魚の捕獲は引き網と投網を用いた。引網は旧川では4回、ワンドでは3回実施した。一方、投網はどちらの調査地でも7回実施した。捕獲した面積は旧川およびワンドでそれぞれ、0.003 km²と0.006 km²である。捕獲したシロサケ稚魚は、それぞれの調査回ごとに個体数と尾叉長を記録した。捕獲した個体は胃内容物および耳石分析用の標本を除き速やかに放流した。

旧川およびワンドにおけるシロサケ稚魚の摂餌の有無を明らかにするため胃内容物を分析した。各回、各地点無作為に5個体程度以上の標本を選び、捕獲数が多かった場合は標本数を増やした。持ち帰った標本は、実体顕微鏡下で胃内容物を可能な限りの分類レベルで同定した。

本調査の第1回(4月中旬:4月12日)のシロサケ稚魚捕獲時には、ふ化場からの放流は本格的には行われていない。そこで、第1回の捕獲個体に野生魚が含まれているかどうかを知るために第1回調査時にワンドで捕獲された個体から、35個体を無作為に抽出し、耳石分析をおこなった。耳石分析は北海道区水産研究所で行った。

7. 令和2(2020)年度サケカウンターの設置

2020年度はウトナイ堰とウトナイ堰の魚道(図-2)には過年度と同様な木製水路(誘導水路)を設置し、これにアルミ製のセンサーを3本取り付け、5.0Vの電圧を印加している。センサー信号は魚類遡上数計測システム(アンプ分離方式ポータブルデータ収集ユニット)(田村電子工房、高崎市)を用いて記録し、FishCountSystem_Anlyzer03(田村電子工房、高崎市)により判別した。

8. 平成30(2018)年度の稚魚捕獲と捕獲個体の胃内容物および耳石標識分析

2018年の春期には、4箇所の一般社団法人十勝釧路管内さけ・ます増殖事業協会の事業所と北海道区水産研究所(北水研)のふ化場1箇所から、約4,500万尾の放流が行われた。4月上旬から始まり、5月中旬に最も多くなり、6月に終了した。また、4月中の放流はほとんど北水研の事業所から放流されていた。な

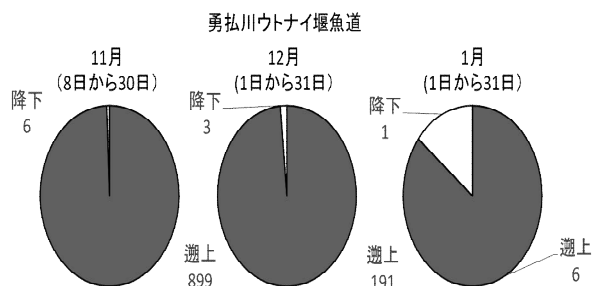


図-4 ウトナイ魚道の遡上数と降下数の割合 2017年11月は8日から30日、12月および1月は1日から31日まで計測した。それぞれの母数に違いがあることに留意。

お、シロサケ稚魚はおもに事業所およびふ化場付近の河川（メン川および猿別川）から放流される。

9. 令和元（2019）年度の厚内漁港周辺の流速計算

2019年度は2018年度に測定したシロサケ行動データと厚内漁港（図-3）での流速値との関係を分析するため、まず波高計を漁港内外に設置し、この観測データを用いて現況再現された波の場の解析モデルにより漁港内外の波高分布を算出した。そして、この波高値から底面流速を算出した。ここで本漁港におけるシロサケ行動観察した時期は、比較的静穏で周期と波高が小さく、微小振幅波理論が成り立つと考えられたため、以下のとおり微小振幅波の底面流速 U およびこの振幅 u を算出した。

$$U = u \cdot \cos(kx - \omega t)$$

$$u = k \frac{H g \cosh k(z+h)}{2 \omega \cosh kh}$$

$$\omega^2 = gk \tanh kh$$

U : 水平流速

u : 水平流速振幅

ω : 角周波数

k : 波数

h : 水深

g : 重力加速度

H : 波高

漁港内外の評価エリアとして、図-3のように13のエリアに分けた。これは波の回折や調査地点に配置されている受信機の位置、各エリアの面積を勘案して、

沖(11,12)、港口(8,9 および 10)、港路(4,5,6 および 7)、港内(1,2 および 3)、波高計周辺(13)とした。また、これらの領域の平均水深は表-2の通りであった。

計算ケースについては、事前調査から得られた物理データより、調査期間内における高波浪時を5ケース、また波浪の周期が大きい場合の6ケースを選定した。本漁港は比較的海底勾配が緩やかで等深線が汀線にほぼ平行な海底地形をしており、漁港に対して垂直に波が進入するが、防波堤をかわして港内に進入する波向として2ケース（波向：105°～165°）を設定した。よって、合計13ケースの解析を行い、平均波高や最大波高、流速振幅を算出した。

10. 平成30（2018）年度の結果及び考察

10.1 計測期間中のシロザケの行動

ウトナイ魚道では11月の3日間（9、10および11日）に多くの遡上があったことから、11月遡上数（899個体）で測定期間中の遡上全個体数（1,096個体）の82%を越えていた。12月までは一定量の遡上があるが、1月はほとんど遡上していない。また、降下はほとんどみられなかった（図-4）。特定の日に遡上が多くなったのは、降雨により水位が上昇したためだと考えられる。

遡上数の多かった11月9日から11日では96%が夜間に遡上していた。12月もこの傾向は変わらず、遡上の62%、降下の79%が夜間に行われていた。サケ科は目で見て採餌するため夜間は睡眠するといわれているが、産卵時期の移動は産卵行動のためのそれがほとんどであることから、一般的に知られているサケ科魚類の行動とは関係なく夜間にも移動していると考えられた。

10.2 稚魚捕獲数と放流数の変動

本研究により調査期間中に十勝川河口の旧川とワンドにおいてシロサケ稚魚が確認された。採取したシロサケ稚魚は旧川が98個体、ワンドが399個体で合計495個体だった。河口域の旧川とワンドの両箇所でもシロサケ稚魚を捕獲することができ、シロサケ稚魚によるこれら緩流域の利用を確認できた。どちらの調査地でも40から50mmおよび50から60mmの階級での捕獲数が多かった（図-5）。

旧川における捕獲時期別捕獲数を比べると、4月下旬が最も多く、全捕獲数（98個体）の約60%を占めていた（表-3）。次に5月下旬の22個体、続いて5月上旬の10個体が多かった。この3回で全捕獲数の90%以上を占めており、それ以外の捕獲日では0個

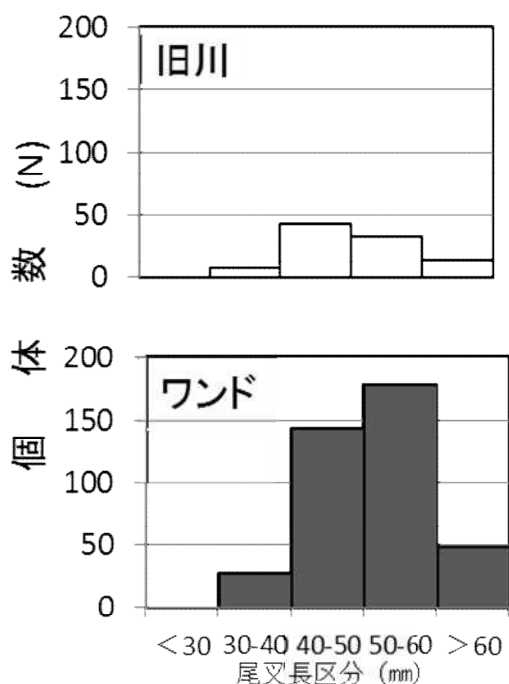


図-5 旧川とワンドで捕獲されたシロサケ稚魚の尾叉長別の個体数

体と捕獲数が調査日によりばらついた。捕獲数の多かった4月下旬は個体又長40から50mmで、次に捕獲数が多かった。5月下旬は50から60mmの個体が多かった。

ワンドにおける捕獲時期別捕獲数は、旧川とは異なり、4月中旬(4月12日)が168個体と最も多く、次いで5月下旬(5月24日)が102個体とこの2時期で多く捕獲されていた(表-3)。6回目捕獲(6月7日)の11個体(全捕獲数の3%以下)を除けば、4月下旬から5月下旬まで、全捕獲数の10%前後の捕獲数で安定して捕獲されている。捕獲数の多かった4月中旬は尾叉長40から50mmの捕獲数が多かったが、5月上旬以降は尾叉長50から60mmが多かった。これは旧川とワンド量調査地点で同様な傾向だった。

十勝川におけるシロサケ稚魚の放流数は5月中旬がもっとも多い(6.平成30(2018)年度の十勝川における稚魚放流参照)。一方で、旧川とワンドの捕獲数のピークは、それぞれ、4月下旬と4月中旬(表-3)。このように今回の調査によるシロサケ稚魚の捕獲ピークは、上述の十勝川におけるシロサケ稚魚の放流数のピーク(5月中旬)と合致していない。

捕獲数のピークがみられた4月中旬から下旬の海水温は3℃から6℃で、シロサケ稚魚の生息にとって

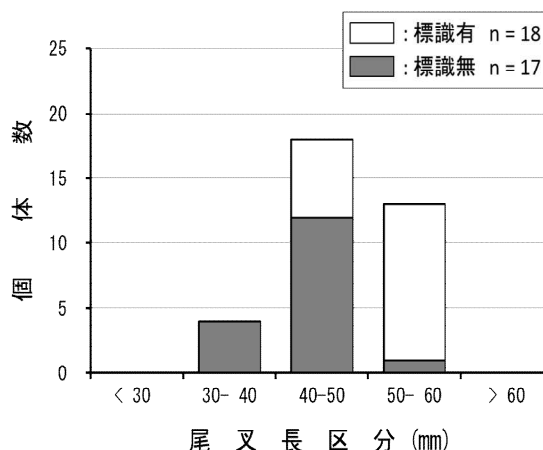


図-6 2018年4月中旬(4月12日)にワンドで捕獲されたシロサケ個体の尾叉長区分ごとの無標識魚と放流魚の割合

適温ではないことから、旧川やワンドが沿岸生活できる時期を待つ場所である可能性が考えられる。このため、水温の低い4月に上流から降下してきたシロサケ稚魚が緩流域に進入し、海水温より高い水温のワンドや旧川で滞留することで、一時的にその場の個体数が増加していたのかもしれない。このことから、捕獲数と放流数のピークとが異なるという結果がみられたのではないと思われる。

ワンドでは4月中旬に耳石に標識が認められない無標識個体が多く確認された(図-6)。耳石への標識は、放流個体に対し、発眼卵の段階で水温調整により耳石に一定の標識を付ける技術である。これにより耳石の標識を読み取ることで、放流時期と場所(事業所)が判明する。しかし、十勝川においてこの耳石への標識を行っているのは、水産研究所十勝さけます事業所のみで、増殖事業協会の放流魚には標識がついていない。したがって、無標識の個体が必ずしも野生魚であるとは限らない。

しかし、この時期の増殖事業協会の放流個体はわずかであること(全体の11%)、放流魚(通常は重量1g、尾叉長約5cm程度で放流される)に比べて、一般に野生魚は小さい。このことから、今回捕獲された無標識個体の多くが自然産卵による野生魚である可能性がある。これまで流域内における親魚による自然産卵の有無は、バイオテレメトリーといわれる行動計測手法により調査可能となってきた¹³⁾。十勝川でも放流河川以外でも複数河川で自然産卵が行われている。また、産卵床環境を満たす河川区間も多く存在していることから¹⁴⁾、自然産卵による野生魚が生息してい

表-3 各調査日毎の十勝川河口域における旧川とワンドで捕獲されたシロサケの胃内容物

調査日	2018年 4月12-13日		2018年 4月26-27日		2018年 5月9-11日		2018年 5月16-18日		2018年 5月23-24日		2018年 6月6-7日	
	旧川	ワンド	旧川	ワンド	旧川	ワンド	旧川	ワンド	旧川	ワンド	旧川	ワンド
調査箇所												
捕獲個体数	5	168	57	26	10	49	4	43	22	102	0	11
分析個体数	3	20	12	16	8	13	4	14	15	15	0	11
平均尾叉長(mm)	45.0	49.8	47.8	46.6	53.0	51.7	53.0	50.6	50.5	55.7	-	48.9
綱	個体数 ^{※1}											
顎脚綱	ソコムジンコ目 ^{※2} +++++											
クモ綱	ダニ目 1											
	クモ目 1											
軟甲綱	ヨコエビ目 37											
	カゲロウ目 1											
	カワゲラ目(幼虫) 1											
	カワゲラ目(成虫) 1											
	カメムシ目 1											
	トビケラ目 1											
	チョウ目 1											
	科(幼虫) 4											
	科(蛹) 19											
	科(成虫) 17											
	ハエ目(幼虫) 3											
	ハエ目(成虫) 1											
	コウチュウ目 1											
	アリ目 1											
	その他陸生昆虫 1											
硬骨魚綱	その他魚類 13											

※1) 個体数は、標本ごとに確認した昆虫類の数の合計を示す。「昆虫類の全体の形状が概ね確認できる」、「頭部のみ」は1個体としてカウントし、それ以外(例えば「足の一部」等)は不明昆虫片としている。

※2) ソコムジンコ目は、最大数を記載した(+:0~10個体, ++:11~100個体, +++:101~500個体, ++++:501~1000個体)。

る。4月捕獲の個体には多くの野生魚が含まれていた可能性が高い。このことから捕獲数と放流数のピークが異なる結果がみられた可能性が考えられる。

10.3 胃内容物分析結果と河口部緩急域の機能

旧川とワンドいずれの調査地においても多くのシロサケ稚魚の胃内容物に昆虫等の餌生物が確認された。また、いずれの調査地の個体にもユスリカ科(Chironomidae spp.)が多く含まれていた。旧川ではカワゲラ目(Plecoptera spp.)やトビケラ目(Trichoptera spp.)など流水性底生動物が胃内容物に多く含まれていた。ワンドではソコムジンコ目(Harpacticoida spp.)やヨコエビ目(Amphipoda spp.)などの止水性大型無脊椎動物が多く含まれていた(表-3)。

止水域である旧川では流水性底生動物が生息している可能性は低いため、河川降河時に摂餌したものである。一方、ワンド内はほぼ止水であることから、

ワンドにおけるシロサケ稚魚の胃内容物に見られた止水性底生動物は、ワンドで採餌されたものであると考えられる。また、4月中旬のワンドの水温は海洋でプランクトンなどの採餌を行う水温¹⁵⁾程度はあることから、これらの緩流域が水温上昇までの滞留場所に加えて、採餌場として機能している可能性が考えられる。

11 令和元(2019)年度の調査と結果と考察

11.1 ウトナイ堰とトキサタ堰のシロサケ遡上数

2019年9月10日からこのウトナイ堰では、シロサケ遡上数が計測できており、少なくとも1匹以上の遡上が見られ、9月に一日平均では約5匹の遡上が見られた。また、9月23日には14匹の遡上が見られた。この日の日降水量(苫小牧)が59.5mmであり水位が上がったために遡上数も増加したと思われる。

表-4 2018年9月のウトナイ堰とトキサタ堰の遡上数と降下数

調査期間	堰	遡上数(N)	ウトナイ堰遡上数に対するトキサタ堰遡上数割合	
			遡上数(N)	降下数(N)
9月18日-10月4日	ウトナイ堰	99	81.8	2
	トキサタ堰	81		

トキサタ堰では、9月18日から計測が始まり、当初は遡上は見られないと考えられていたが、多くの個体が遡上していることがわかった。

9月計測から10月5日までの期間で、ウトナイ堰の遡上数に対するトキサタ堰の遡上数の割合は81.8%であった(表-4)。

ウトナイ堰の遡上数日変動とトキサタ堰のそれとが数日の遅れで同期していることから、トキサタ堰におけるサケカウンターで計測された遡上数は遡河性魚類のものであると考えられ、この時期はその多くがシロサケだと思われる。これまで勇払川流域では、シロサケの自然産卵は美々川と改修前の勇払川

で報告されており^{5,10)}、改修後の勇払川での報告はない。しかし、今回の測定からこの時期のウトナイ湖に遡上したシロサケの多くが美々川ではなく勇払川に遡上していることが判明した。

11.2 厚内漁港周辺の波高

実際に観測して得られた波高と、計算により得られた波高は厚内港沖においてはほぼ一致していることが分かった。また、厚内港内ではほぼすべてのケースで計算値の方が観測値よりも高い値であるが、おおむね一致しているため支障のない範囲で再現されていると判断した。

表-5 各評価地点における各 case ごとの流速振幅 (m/s)

case.1			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	10.69	9.41	0.6526
12	10.69	8.47	0.6815
9	10.69	5.56	0.3131
10	10.69	5.60	0.3630
8	10.69	4.63	0.2360
5	10.69	3.01	0.2281
6	10.69	3.08	0.2052
4	10.69	2.24	0.1179
7	10.69	2.37	0.1322
3	10.69	3.39	0.0252
2	10.69	3.01	0.0121
1	10.69	3.00	0.0040
13	10.69	3.50	0.0151

case.2			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	10.01	9.41	0.6412
12	10.01	8.47	0.6772
9	10.01	5.56	0.3721
10	10.01	5.60	0.3192
8	10.01	4.63	0.2290
5	10.01	3.01	0.2090
6	10.01	3.08	0.1949
4	10.01	2.24	0.1030
7	10.01	2.37	0.1215
3	10.01	3.39	0.0249
2	10.01	3.01	0.0105
1	10.01	3.00	0.0034
13	10.01	3.50	0.0154

case.7			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	10.33	9.41	1.0658
12	10.33	8.47	1.1562
9	10.33	5.56	0.7530
10	10.33	5.60	0.5291
8	10.33	4.63	0.4230
5	10.33	3.01	0.3463
6	10.33	3.08	0.3407
4	10.33	2.24	0.1767
7	10.33	2.37	0.2142
3	10.33	3.39	0.0470
2	10.33	3.01	0.0214
1	10.33	3.00	0.0068
13	10.33	3.50	0.0282

case.8			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	11.14	9.41	0.8122
12	11.14	8.47	0.8870
9	11.14	5.56	0.5820
10	11.14	5.60	0.3738
8	11.14	4.63	0.3111
5	11.14	3.01	0.2514
6	11.14	3.08	0.2533
4	11.14	2.24	0.1330
7	11.14	2.37	0.1625
3	11.14	3.39	0.0282
2	11.14	3.01	0.0137
1	11.14	3.00	0.0046
13	11.14	3.50	0.0164

case.3			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	8.21	9.41	0.2633
12	8.21	8.47	0.2733
9	8.21	5.56	0.0909
10	8.21	5.60	0.1517
8	8.21	4.63	0.0857
5	8.21	3.01	0.0926
6	8.21	3.08	0.0809
4	8.21	2.24	0.0482
7	8.21	2.37	0.0560
3	8.21	3.39	0.0125
2	8.21	3.01	0.0045
1	8.21	3.00	0.0016
13	8.21	3.50	0.0085

case.4			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	9.11	9.41	0.9663
12	9.11	8.47	1.0436
9	9.11	5.56	0.6297
10	9.11	5.60	0.4992
8	9.11	4.63	0.3709
5	9.11	3.01	0.3204
6	9.11	3.08	0.2992
4	9.11	2.24	0.1578
7	9.11	2.37	0.1887
3	9.11	3.39	0.0395
2	9.11	3.01	0.0159
1	9.11	3.00	0.0054
13	9.11	3.50	0.0246

case.9			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	11.14	9.41	0.7822
12	11.14	8.47	0.8701
9	11.14	5.56	0.5771
10	11.14	5.60	0.3722
8	11.14	4.63	0.3116
5	11.14	3.01	0.2601
6	11.14	3.08	0.2649
4	11.14	2.24	0.1404
7	11.14	2.37	0.1640
3	11.14	3.39	0.0349
2	11.14	3.01	0.0185
1	11.14	3.00	0.0057
13	11.14	3.50	0.0199

case.10			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	11.5	9.41	1.2944
12	11.5	8.47	1.3353
9	11.5	5.56	0.6561
10	11.5	5.60	0.6918
8	11.5	4.63	0.4722
5	11.5	3.01	0.4180
6	11.5	3.08	0.3819
4	11.5	2.24	0.2183
7	11.5	2.37	0.2453
3	11.5	3.39	0.0430
2	11.5	3.01	0.0207
1	11.5	3.00	0.0069
13	11.5	3.50	0.0254

case.5			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	9.18	9.41	0.9737
12	9.18	8.47	1.0464
9	9.18	5.56	0.5916
10	9.18	5.60	0.5072
8	9.18	4.63	0.3690
5	9.18	3.01	0.3087
6	9.18	3.08	0.2897
4	9.18	2.24	0.1553
7	9.18	2.37	0.1868
3	9.18	3.39	0.0413
2	9.18	3.01	0.0170
1	9.18	3.00	0.0057
13	9.18	3.50	0.0258

case.6			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	6.80	9.41	0.2820
12	6.80	8.47	0.3162
9	6.80	5.56	0.2394
10	6.80	5.60	0.1072
8	6.80	4.63	0.0994
5	6.80	3.01	0.0906
6	6.80	3.08	0.0915
4	6.80	2.24	0.0487
7	6.80	2.37	0.0508
3	6.80	3.39	0.0130
2	6.80	3.01	0.0045
1	6.80	3.00	0.0017
13	6.80	3.50	0.0085

case.11			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	12.51	9.41	1.2449
12	12.51	8.47	1.2741
9	12.51	5.56	0.5990
10	12.51	5.60	0.6764
8	12.51	4.63	0.4647
5	12.51	3.01	0.4222
6	12.51	3.08	0.3670
4	12.51	2.24	0.2149
7	12.51	2.37	0.2377
3	12.51	3.39	0.0435
2	12.51	3.01	0.0234
1	12.51	3.00	0.0079
13	12.51	3.50	0.0263

case.12			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	6.98	9.41	0.8251
12	6.98	8.47	0.9187
9	6.98	5.56	0.6899
10	6.98	5.60	0.3508
8	6.98	4.63	0.3068
5	6.98	3.01	0.2667
6	6.98	3.08	0.2684
4	6.98	2.24	0.1422
7	6.98	2.37	0.1521
3	6.98	3.39	0.0387
2	6.98	3.01	0.0134
1	6.98	3.00	0.0052
13	6.98	3.50	0.0267

case.13			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	10.34	9.41	0.5769
12	10.34	8.47	0.6379
9	10.34	5.56	0.4014
10	10.34	5.60	0.2645
8	10.34	4.63	0.2117
5	10.34	3.01	0.1820
6	10.34	3.08	0.1806
4	10.34	2.24	0.0937
7	10.34	2.37	0.1122
3	10.34	3.39	0.0228
2	10.34	3.01	0.0104
1	10.34	3.00	0.0033
13	10.34	3.50	0.0141

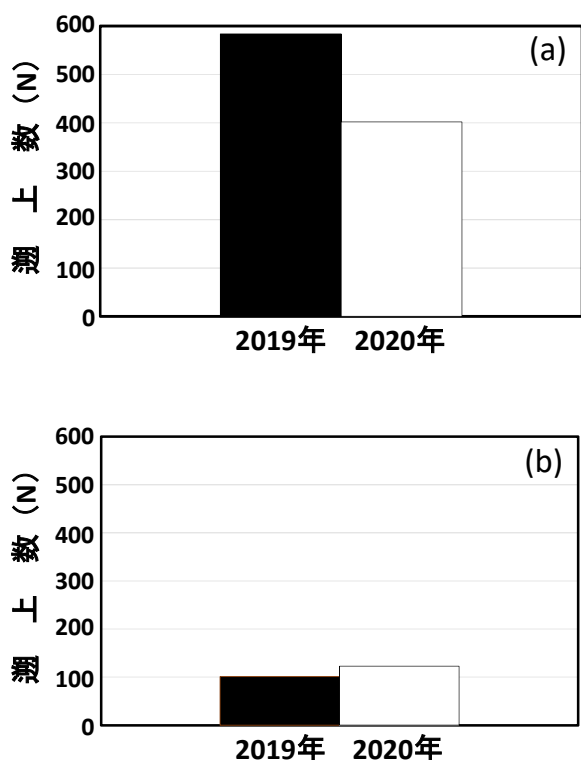


図-7 2020年に計測された勇払川ウトナイ堰(a)とトキサタ堰(b)におけるシロサケ遡上数

11.3 厚内漁港周辺の流速

流速振幅の計算によって得られた結果を表-5に示した。case. 10で漁港の沖側である地点番号11と12(図-3)で最大1.33 m/sの流速が認められた。しかし、沖防波堤港側で港口付近の地点8~10では同caseでも最大0.69 m/sとなり、さらに港側の港路付近の地点4~7では最大0.41 m/sとなっていた。港奥である地点13では0.04 m/sと流速が減少していた。したがって防波堤内では波高だけでなく流速も減少していることが分かった。

11.4 厚内漁港からのシロサケ行動と流速の関係

平成30(2018)年に漁港から発信器を装着して放流したシロサケ3個体は放流後直後もしくは翌日に港外へ移動していた。このときの最大流速は、0.269 m/sであり、この時期は平穏な状態であった。そこで、今年度は比較的荒天時の流速を計算により算出したところ、前述したように、厚内漁港郊外付近、港口付近および港路付近それぞれで最大1.33 m/s、最大0.69 m/sおよび最大0.41 m/sだった。シロサケが遊泳する速度である巡航速度が2×体長~6×体長とされていることから、港で放流した個体の平均尾叉長が66 cmであることから、最も小さな巡航速度でも約1.3 m/s程度となる。突進速度は巡航速度より遙かに大きく

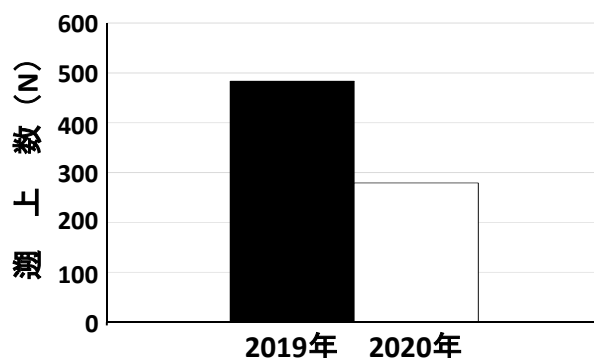


図-8 2020年のウトナイ堰とトキサタ堰の遡上数から推定された美々川のシロサケ遡上数

10×体長とされていることから、荒天時でも港外へ移動することは容易だと推測される。

12 令和2(2020)年度の調査と結果と考察

12.1 勇払川に設置したサケカウンターによる遡上数と美々川の遡上数推定

令和2(2020)年度にもトキサタ堰では9月と10月にシロサケの遡上が確認されたものの(図-7)、どちらの年も11月になるとほとんどトキサタ堰魚道では遡上が確認されなくなった。しかしウトナイ堰では11月以降もシロサケの遡上が認められることから、美々川に遡上しているものと考えられる。このことから、ウトナイ堰魚道の遡上数からトキサタ堰魚道の遡上数の差分が美々川への遡上数と解釈できる。

美々川は自然度の高い河川で、勇払川本流に設置されているような魚道をとまなう河川横断構造物は設置されていない。本研究で使用しているサケカウンターは理論的には自然河川においても計測はできるものの、正確な遡上数を計測するには、魚道のような水面幅が数メートル程度の水路が存在することが必要である。このことから、美々川に遡上するシロサケをサケカウンターにより直接計測することが困難である。しかし、本研究では美々川と勇払川との合流点の上下流にある魚道にサケカウンターを設置することで、ウトナイ堰魚道(合流点下流魚道)における遡上数とトキサタ堰魚道(合流点上流魚道)の遡上数の差分から美々川へのシロサケ遡上数を推定することができた(図-8)。

本研究で用いた適切な設置方法によるサケカウンターシステムを用いることで、シロサケの流域間移動の現象を季節毎に解明し、これにより支流域毎の遡上数計測方法を構築することができた。このような方法によって、遡上数が支流ごとや季節的に異なる

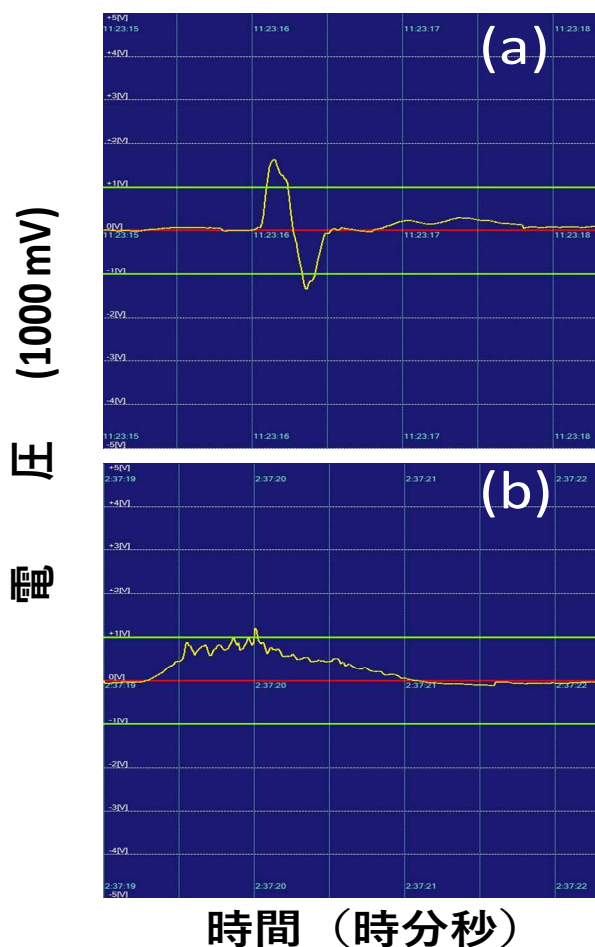


図-9 勇払川 2020年9月17日にFishCountSystem_Anlyzer03によって「遡上」(a)と遡上を中止して「下流戻り」(b)と判定された場合の波形

るといった流域内における自然産卵個体動態に関する情報が明らかになった。こうした情報は、シロサケ産卵域の保全計画を策定あるいは河川工事を行う際に重要な生息域情報となりうる。

12.2 ウトナイ堰とトキサタ堰の遡上中止個体数

サケカウンターは遡上及び降下をおこなった場合の波形の記録だけでなく、途中で遡上を中止し下流へ戻ってしまう個体の行動波形も記録することができる。魚類が遡上する場合は、電圧の正と負方向にそれぞれ凸の波形が連続して観測される (図-9(a))。一方で、遡上を途中で中止した個体の行動は、正の電圧方向にだけ凸の波形が現れる (図-9(a))。サケカウンターからのセンサーを読み取るソフトウェア (FishCountSystem_Anlyzer03)はこのような中止個体波形の個数を記録することができる。これにより遡上中止個体数をウトナイ堰魚道とトキサタ堰魚道に置

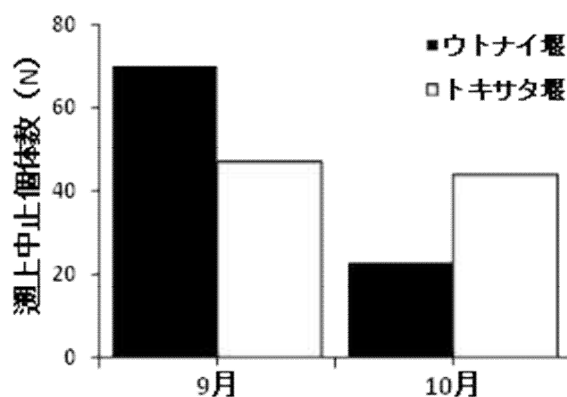


図-10 2020年の9月と10月のウトナイ堰魚道とトキサタ堰魚道を途中で遡上を中止した個体数

いて2020年の9月と10月に計測した。トキサタ堰では9月と10月とで中止個体数はほとんど変わらなかったものの、ウトナイ堰魚道では9月の中止個体数が10月の中止個体数より多かった (図-10)。ウトナイ堰魚道に設置されたサケカウンターは、堰の湛水域からの流入口に接するように設置されており、流速とその変動が小さい。ウトナイ堰は流入口からコの字型に湾曲して河川水が誘導水路へ流れ込む。そのため、増水による流況の変化を受けやすい。9月には流域の降雨による増水によって、流況が変化し木製魚道内の流速が大きくなり、遡上を中止する個体が多くなったと推測される。

サケカウンターと流速等の物理環境を計測することで、魚道内の遊泳負荷量と遡上行動との関係を明らかにでき魚道の評価をおこなうことができると考えられる。

13 まとめ

平成30(2018)年度はサケカウンターの使用による遡上数や降下数があきらかになり多くの魚道等の構造物評価に役立つと期待される。人工的な旧川跡やワンドといった沿岸構造物による生息場所が、シロサケ生息域においては生活史上有効であることが明らかになった。このような地域では、緩流域造成や現在存在している緩流域の機能としてサケ科魚類の保全の視点も考慮に入れる必要がある。

令和元(2019)年度は、サケカウンターの複数設置により支流ごとの遡上実態を把握した。また、荒天時の漁港にシロサケ親魚が迷入した場合の港外への移動の可能性を検討した。今後は遡上数の計測を継続して精度向上を目指す予定である。

令和 2 (2020) 年度はサケカウンターの効果的な設置方法を実践して、流域内において遡上数が直接計測できないような支流の遡上数の推定を行った。また、サケカウンターが有する遡上及び降下数計測機能以外の遡上中止個体の行動数計測機能を用いて、魚道の遡上環境の評価技術開発を検討した。

参考文献

- 1) 真山紘 (2004) さけ・ます類の河川遡上生態と魚道, さけ・ます資源管理センターニュース 13: 1-7.
- 2) Noonan M. J., Grant, J. W. A. and Jackson C. D. (2012) A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries* 13: 450-464.
- 3) ダム水源地環境整備センター ダム水源地環境整備センター (199 1998) : 最新魚道の設計—魚道と関連施設, 信山社サイテック, 581p
- 4) Welsh S. A and Aldinger J. L. (2014) A Semi-Automated Method for Monitoring Dam Passage of Upstream Migrant Yellow-Phase American Eels. *North American Journal of Fisheries Management* 34: 702-709.
- 5) 梶山雅秀・真山紘(1996)野生産サケの復活をめざして, 魚と卵 165: 41-52.
- 6) Bax, N. J. (1983) Early marine mortality of marked juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) released into Hood Canal, Puget Sound, Washington, in 1980. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 40: 426-435.
- 7) Healey, M. C.(1982) Timing and relative intensity of size-selective mortality of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during early sea life. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*39: 952-957.
- 8) 関 二郎(2005) 北海道太平洋沿岸域におけるサケ幼稚魚の摂餌特性と餌料環境に関する研究, さけ・ます資源管理センター研究報告 7:1-104.
- 9) Bottom, D., K. Jonesb, T. Cornwellb, A. Grayc and C. Simenstade(2005)Patterns of Chinook salmon migration and residency in the Salmon River estuary (Oregon), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*64:79-93.
- 10) Shreffler, D., C. Simenstad and R. Thom(1990)Temporary Residence by Juvenile Salmon in a Restored Estuarine Wetland, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*47:2079-2084.
- 11) Gray, A., C. Simenstad, D. Bottom and T. Cornwell(2002) Contrasting Functional Performance of Juvenile Salmon Habitat in Recovering Wetlands of the Salmon River Estuary, Oregon, U.S.A., *Restoration Ecology*10:514-526.
- 12) 近藤康行・権田豊(2012)魚カウンターによるサケの遡上計測に関する研究, 土木学会論文集 G (環境) 68(1): 1-12.
- 13) 有賀 誠・津田 裕一・藤岡 紘・本多 健太郎・光永 靖・三原 孝二・宮下 和士(2009)石狩川におけるシロザケ *Oncorhynchus keta* の遡上行動—テレメトリーシステムの利用—, 応用生態工学 12:119-130.
- 14) 卜部浩一(2015)十勝川水系札内川における二次流路の環境特性.北水試研報 88:33-42.
- 15) Nagata, M., Y. Miyakoshi, D. Ando, M. Fujiwara, M. Sawada, H. Shimada and H. Asami(2007) Influence of coastal seawater temperature on the distribution and growth of juvenile chum salmon,with recommendations for altered release strategies. *North Pacific Anadromous Fish Commission Bulletin* 4:223 - 235.
- 16) 森田健太郎 (2020) 勇払川のサケ, *SALMON 情報*, 14: 38-39.

17.2 生産力向上と漁業振興に向けた海洋及び河川・沿岸構造物の増養殖機能強化のための水産環境整備技術の開発

17.2.1 寒冷沿岸施設における水産生物の保護育成機能強化に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水産土木チーム）

研究担当者：的野博行、河合浩、伊東公人、須藤賢哉、梶原瑠美子、稲葉信晴

【要旨】

本研究は、寒冷海域の漁港港湾等の沿岸構造物が有する水産生物の保護育成機能に関して、それらの機能強化および有効活用に資する沿岸構造物の整備手法の技術開発を行い、水産物の生産力向上のための技術方策を提案するものである。

初年度である令和元年度(2019)は、簡易な海底創出礁や表面積を増加させる機能強化礁の現地試験を行うとともに、アサリの港内垂下養殖試験と北海道内の天然干潟との成長を比較することにより、沿岸構造物上での底生生物が生息可能な海底空間の創出や付着生物が生息可能な表面積の増加手法による餌場機能強化の有効性、また港内静穏域を利用したアサリ垂下養殖の有効性を確認した。令和2年度(2020)は、機能強化礁の設置場所や材質等の改良を行うとともに、機能強化礁の継続観察による魚類の機能強化礁の利用状況、アサリ垂下養殖試験では殻長の違いでの籠の固定方法による成長への影響を確認した。

キーワード：沿岸構造物、保護育成機能、海底生息場創出、付着表面積増加、餌場機能強化、アサリ垂下養殖

1. はじめに

日本国内では、近年の水産資源の低迷や藻場・干潟の減少を踏まえ、生態系全体の生産力の底上げを図るために、水産生物の生活史に対応した生息環境空間を創出する「水産環境整備」が推進されている¹⁾。

従来、漁港・港湾等の沿岸構造物は、定性的ではあるが、水産生物の保護育成機能を有していることが知られている。そのため、沿岸構造物においても、水産環境整備に繋がる保護育成機能を強化するための整備技術の確立が求められている。しかし、北海道周辺海域は水産物供給上の重要な拠点であるものの、寒冷海域の生物種を対象とした沿岸構造物との関連性について検討を行った事例は乏しい。そのため、種や季節変化などの地域特性を考慮した、寒冷域での機能強化技術の開発が必要である（図-1）。

これらのことから本研究は、漁港港湾等の沿岸構造物が有する寒冷海域水産生物種への保護育成機能の強化に資する整備手法の技術開発を行い、水産物の生産力向上のための技術方策を提案するものである。

事前研究（17. 1. 1）により、寒冷海域漁港では、保護育成機能の内、静穏域創出や高波浪からの避難場機能、餌場機能を有することが明らかとなった²⁾。そ

こで、それらの機能を強化する、もしくは有効活用する手法を中心に検討することとした。

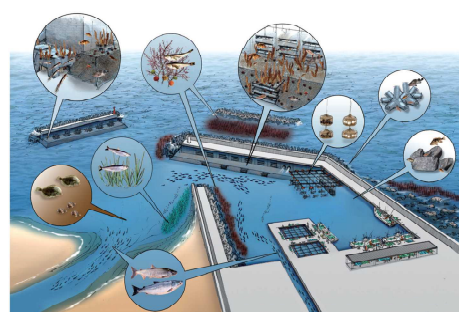


図-1 保護育成機能強化型漁港のイメージ

2. 研究全体の調査概要

対象生物を魚類と二枚貝（アサリ）に分け、技術開発を検討することとした。初年度の令和元年度（2019年）は、それぞれの機能強化や有効活用に関する簡易な現地試験を実施することにより、手法の有効性を確認する。次年度以降は、有効性が確認された手法に関して改良を行うとともに、他の機能や手法についても順次有効性の検証を行うことにより、手法を取りまとめていく計画である。

3. 令和元年度（2019）の主な調査項目

令和元年度（2019年）は、魚類に関しては餌場機能強化としての海底創出や表面積増加、アサリに関しては静穏域活用としての垂下養殖の有効性を確認することとした。

3.1 餌場機能強化

調査は北海道南西部に位置する寿都町寿都漁港で行った（図-2）。

本漁港は、既往の研究において、港内では動物プランクトンに加え、港外に比べ底生動物も多く現存することにより、餌場機能を通年有することが示唆されている²⁾。これは、周辺は岩礁域であるが、浅く静穏な港内には有機物や砂粒子などが堆積し、光、堆積有機物から再生生産された栄養塩、安定した海底基質により、海底での底生基礎生産や底生動物の生息が可能となり、浮遊生態系に底生生態系が加わることで餌場機能を支えていると考えられた。

そのため、沿岸構造物のブロック上にも、砂粒子などが堆積可能で、底生生物が生息可能な空間を創出する手法で、餌場機能強化の有効性を検討することとした。

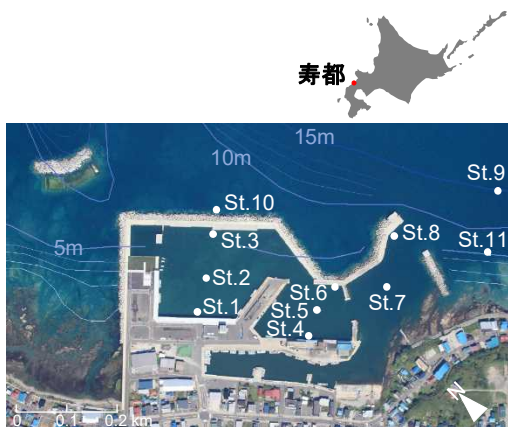


図-2 寿都漁港調査位置
(水深：海底地形デジタルデータ、日本水路協会)

そこで簡易な海底創出礁（図-3）として、砂利（粒径5～10mm、4L）を入れた袋（目合い4mm、40cm×60cm）を、St.2の泊地（①）とともに、St.3周辺の被覆ブロック（底面②、斜面③）、根固ブロック（④）上に7月に設置し、約1年後に回収し、底生動物の現存量を測定した。

加えて、付着基質の表面積や隙間空間を増加させ、付着生物が生息可能な空間を創出する手法でも、餌場機能強化の有効性を検討することとした。

そこで機能強化礁（図-3）として、板（塩化ビニル製、0.56㎡/枚）を約50cm間に3、4、10枚連ね、St.2の泊地（①）とともに、St.3周辺の根固ブロック（④）上に6月に設置し、約2ヶ月後に回収し、周囲の動物プランクトン、付着生物の現存量を測定した。

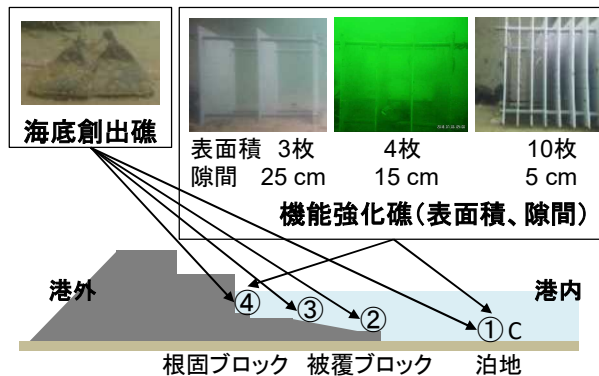


図-3 海底創出礁および機能強化礁の設置位置

3.2 静穏域活用（アサリ垂下養殖）

アサリ垂下養殖試験は、北海道南西部に位置する松前町江良漁港の-3.5m岸壁（蓄養）L=89mの内、蓄用施設内の先端1区画を活用して実施した（図-4）。1区画の形状は4.0m×4.0m、水深D.L.-3.1m、天端高D.L.+1.5mで、D.L.±0.0m以深は周囲が海水交換可能なスリット構造である（図-5）。



図-4 江良漁港調査位置

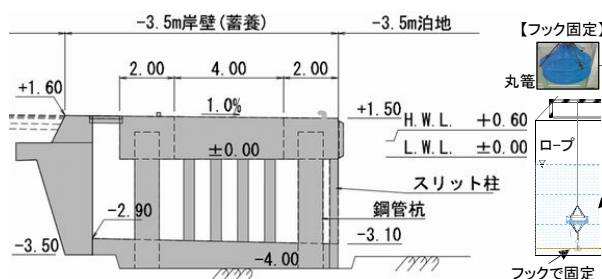


図-5 蓄養施設構造図および垂下方法
(高さはD.L.表示)

垂下条件を表-1に示す。アサリの初期サイズは全平均 10.0mm と 14.9mm、収容個体数は 50、100、150 個とし、全 6 ケースの条件下で垂下試験を行った。収容容器には、丸籠(直径 40cm×高さ 10cm、底面積 1,256cm²、1分目)内に基質材(砂利(粒径 5~10mm)と軽石(粒径 6~12mm)を 1:1 混合)を厚さ 8cm 程敷き詰めたものを用いた。

また、容器(丸籠)の固定方法は、フック固定とし、施設上部に設置済みの手摺りからロープで丸籠を水深 D.L.-2m の位置に垂下し、丸籠の下面に取り付けたフックで、施設内の海底に配置したロープに固定した。

表-1 垂下条件

ケース	初期サイズ	収容個体数	容器固定方法	基質	垂下水深
1	10.0mm (7.2~12.7mm)	50	丸籠 フック 固定	砂利 1 : 軽石 1	D.L.- 2m
2		100			
3		200			
4	14.9mm (11.2~17.9mm)	50			
5		100			
6		200			

4. 令和元年度(2019)の主な調査結果

4.1 餌場機能強化

設置 1 年後の海底創出礁に現存していた底生生物の個体数、種組成を、St.2 の泊地堆積物での結果とともに図-6 に示す。

簡易な海底創出礁を泊地とともに根固めや被覆ブロック上に設置することで、底生生物の生息空間が創出され、ブロック上でも魚類の餌料となる底生動物が泊地と同程度の 6000 個体/m² 前後出現した。種組成も泊地と大きく変わらず、魚類の餌となりやすい環形動物が最優占していた。また、軟体動物では全礁でアサリの生息が確認された。

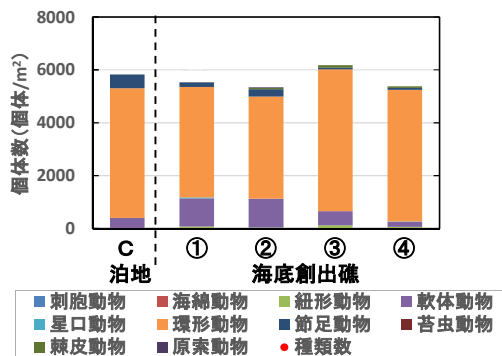


図-6 泊地と海底創出礁での底生動物

次に、設置 2 ヶ月後の機能強化礁周辺の動物プランクトンの個体数、種組成を、St.2 の泊地水柱の結果とともに図-7 に示す。

簡易な表面積を増加させた機能強化礁を泊地とともに根固ブロック上に設置することで、魚類の餌料となる動物プランクトンが泊地水柱に比べ、約 3~15 倍多く出現した。種組成は、泊地と同様に魚類の餌となりやすい節足動物が最優占していた。機能強化礁には、ばらつきが大きい多くの微細藻類が付着しており、泊地水柱のみでは Chl. a は 3.8mg/m³ であったが、機能強化礁内は 0.1~112.6mg/m³ の Chl. a の増加が確認された。そのため、付着生物の生息空間が付加されたことによる、付着性の基礎生産者の増加に伴い、動物プランクトンが増加したと考えられた。

これらの結果から、両手法は餌場機能の強化手法として有効であると考えられた。

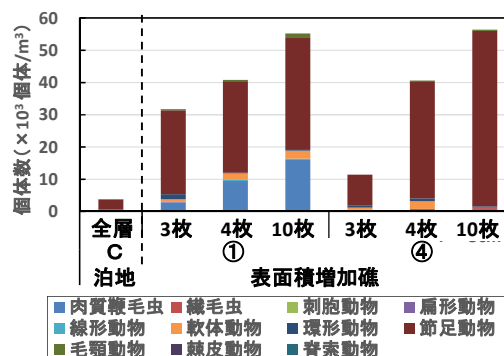


図-7 泊地と表面積礁での動物プランクトン

4.2 アサリ垂下養殖

約 1 年間の殻長の増加やアサリ TOC 増加量について、北海道内の干潟で報告のある成長結果(北斗市³⁾、火散布沼⁴⁾)と比較した。アサリ TOC 増加量の比較は単位面積当たりとし、6 月の試験開始時と約 1 年後(353 日後)の殻長から、以下に示す関係式を基に算出した。

$$\text{「個体湿重量」} = 0.0002 \times \text{「殻長」}^2 \cdot 9835$$

$$\text{「軟体部湿重量」} = 0.2236 \times \text{「個体湿重量」}^1 \cdot 0262$$

$$\text{「TOC」} = 353.4 \text{ mgC/gww (軟体部湿重量当たり)}$$

結果を表-2 に示す。本研究での殻長増加は、収容個体数を考慮しない全体の初期平均殻長 10.0mm では約一年後の平均殻長が 25.3mm、14.9mm では 27.3mm と、北斗市の報告と同程度であった。加えて、単位面積当たりのアサリ TOC 増加量も、全ケースで 111~306

gC/m²/yr と計算され、火散布沼の報告と同程度であった。江良漁港のように日本海沿岸で周辺が岩礁域であっても、垂下試験により干潟と同程度に成長することが明らかとなり、二枚貝垂下養殖による漁港内静穏域活用の有効性が確認できた。

表-2 垂下試験と北海道内の天然干潟との成長比較 (約1年間)

	江良漁港 (垂下)	北斗市 3) (干潟)	火散布沼 4) (干潟)
殻長 (mm/yr)	10.0→25.3 14.9→27.3	12.9→26.4	—
アサリTOC (gC/m ² /yr)	111~306	—	130

5. 令和2年度(2020)の主な調査項目

令和2年度(2020年)は、魚類に関しては餌場機能強化としての海底創出礁や表面積および隙間増加による機能強化礁の継続観察とともに、設置場所や材質等の改良を行い、アサリに関しては静穏域活用としての垂下養殖における殻長の違いによる籠固定方法の成長への影響を確認した。

5.1 餌場機能強化

調査は引き続き、寿都漁港で行った(図-2)。図-3に示す隙間サイズや設置場所の異なる各機能強化礁の前面にインターバルカメラを設置し、撮影された画像から魚類の出現個体数を記録し、可能な限り種同定を行った。加えて、遊泳位置が機能強化礁の隙間内部か外部であるかも記録した。

また、機能強化礁について3つの改良版を作成し、表層や海底に設置した。水深による機能強化の違いを検討するために、底層よりも光量が多く、魚卵採取量が多い²⁾表層に設置できる形の機能強化礁を作成した。また、漁港整備を意識した形でも機能強化可能か確認するために、海底創出礁と機能強化礁の複合型やコンクリート素材の機能強化礁を作成した。

5.2 アサリ垂下養殖

アサリ垂下養殖試験は、引き続き江良漁港の蓄用施設内の先端1区画を活用して実施した(図-4、5)。

垂下条件を表-3に示す。アサリの初期サイズは全平均10mm、収容個体数は100個とし、全3ケースの条件下で垂下試験を行った。収容容器には、丸籠内に基質材(砂利(粒径5~10mm))を厚さ3cm程敷き詰めたものを用いた。また、籠の固定方法は図-8に示すように「フック固定」、「単管固定」、「固定なし」の3ケースとした。高波浪時の丸籠の動揺は、固定なし、フッ

ク固定、単管固定の順で大きいと考えられる。6月の設置から2年間継続して試験を実施し、1年目、2年目の9月までの成長時期に分けて、成長比較を行った。

表-3 垂下条件

ケース	初期サイズ	収容個体数	丸籠固定方法	基質	垂下水深
1	10mm (5.6~10.7mm)	100	フック	砂利 (厚さ3cm)	D.L. -2m
2			単管		
3			なし		

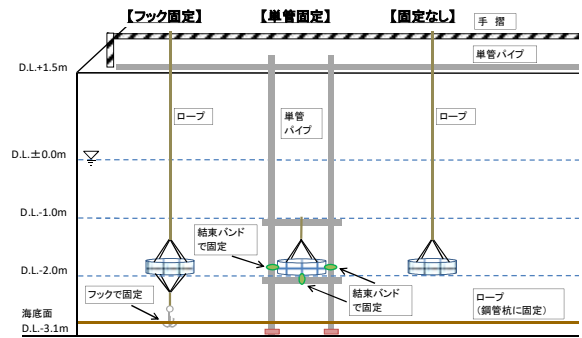


図-8 丸籠の固定方法

6. 令和2年度(2020)の主な調査結果

6.1 餌場機能強化

インターバルカメラで撮影された魚類の個体数を、図-9に示す。ハゼ類は、泊地に設置された隙間が小さい試験礁で多く観察された。一方、アイナメ類は、根固ブロック上で隙間が大きい試験礁で多かった。加えて、ウミタナゴ類は、根固ブロック上ではあるが隙間外で多い傾向が見られた。撮影されたハゼ類は体長10cm程度、アイナメ類は20~30cmであった。また、ハゼ類やアイナメ類は下層や海底に、ウミタナゴ類は上、中層を遊泳していた。そのため、このような違いは、魚の体長や種により行動特性の違いが影響していると考えられた。機能強化の対象種を想定する場合、目的に合った設置場所や隙間サイズの整備が重要であることが示唆された。

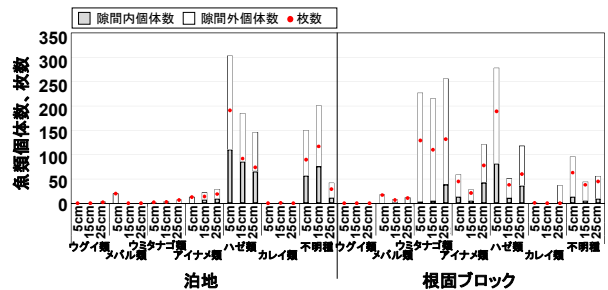


図-9 機能強化礁で観察された魚類

6. 2 アサリ垂下養殖

異なる籠固定方法や殻長サイズ条件下でのアサリ垂下養殖試験における、異なる籠固定方法での殻長の変化を図-10 に示す。殻長サイズにより異なる籠固定方法で成長が増大していた。殻長の小さい1年目では単管固定、殻長が大きくなった2年目ではフック固定で最も成長が有意に大きかった (Tukey-Kramer 法 $p < 0.05$)。また、ともに固定しない場合に成長が最も小さかった。事前研究 (17. 1. 1) で示したように、殻長が小さい場合は流速の影響を受けやすい。そのため、殻長が小さい場合では、籠の動揺による流速の影響が低減するように籠を固定することによって、成長が大きくなったと考えられる。これらのことから、殻長サイズや環境に合わせた籠固定方法を検討する必要がある、それらに対応可能な整備が重要であることが明らかとなった。

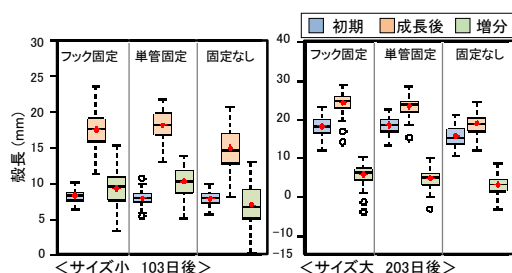


図-10 籠固定方法による成長の違い

7. まとめ

初年度である令和元年度(2019)は、簡易な海底創出礁や表面積を増加させた機能強化礁の現地試験を行うとともに、アサリの港内垂下養殖試験と北海道内の天然干潟との成長を比較することにより、沿岸構造物上での底生生物が生息可能な海底空間の創出や付着生物が生息可能な表面積の増加手法による餌場機能強化の

有効性、また港内静穏域を利用したアサリ垂下養殖の有効性を確認することができた。令和2年度(2020)は、有効性が確認された機能強化礁の継続観察に加え、設置場所や材質等の改良を行った。また、アサリ垂下養殖試験では、異なる殻長での3つの籠固定方法による成長の違いを調べた。その結果、機能強化礁の魚類利用とともに隙間サイズや設置場所での利用魚種の違いや、アサリの殻長サイズによって籠固定方法による成長の違いが明らかになり、目的に応じた機能強化礁の設置場所や構造、アサリの殻長に合わせた籠固定を検討する必要があることを確認することが出来、機能強化技術の構築における重要な知見を得ることが出来た。

次年度は継続調査とともに解析データを取りまとめることにより、機能強化技術を構築し、沿岸構造物における保護育成機能の強化技術のマニュアル(仮称)を作成予定である。

参考文献

- 1) 水産庁：漁港漁場整備長期計画、2012、2017.
- 2) 梶原瑠美子, 丸山修治, 伊藤敏朗, 大橋正臣, 門谷茂：寒冷海域漁港における通年の水産生物の保護育成機能, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 75(2), pp. 1_1019-1_1024, 2019.
- 3) 田村亮輔, 中川宙飛, 五嶋聖治：北海道函館湾におけるアサリの成長, 北海道大学水産科学研究集報, 64(2), pp. 37-44, 2014.
- 4) Komorita, T., Kajihara, R., Tsutsumi, H., Shibamura, S., Yamada, T. and Montani, S.: Food sources for *Ruditapes philippinarum* in a coastal lagoon determined by mass balance and stable isotope approaches, PLOS ONE, Vol.9 (1), 1-11, 2014.

17.2 生産力向上と漁業振興に向けた海洋及び河川・沿岸構造物の増養殖機能強化のための水産環境整備技術の開発

17.2.2 北方海域の水産資源動態に対応した生産性向上技術に関する開発

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水産土木）

研究担当者：的野博行、河合浩、伊東公人、須藤賢哉、梶原瑠美子、稲葉信晴

【要旨】

本研究は、沖合域における魚礁等の人工構造物の造成による餌料培養効果に基づいて、水産生物の生産性向上を図るための漁場環境整備に必要な技術開発（水産環境整備技術の開発）を行うものである。

令和1年度(2019)は、数値モデルによる魚礁ブロック近傍の流況解析により、魚礁ブロック近傍における滞留域が把握され、既往の底生生物の生物量分布との整合から、餌料培養効果に基づく沖合域での水産環境整備技術確立に向けた基礎的知見を得た。

令和2年度(2020)は、令和1年度の単体の魚礁ブロック近傍の精密な流況解析に基づき、過大な計算負荷を手法の工夫により積層構造に発展させ、餌料培養効果に基づく沖合漁場整備技術のための新たな手法を検討した。

キーワード：流況解析、積層構造、餌料生物

1. はじめに

日本の漁業生産量は1984年の1282万tをピークに減少を続け、特に生産量の多くを占めている沖合漁業ではピーク時の696万t(1984年)から197万t(2019年)まで激減している(図-1)¹⁾。日本有数の天然礁である武蔵堆を擁する北海道の日本海北部漁場においても、スケトウダラ・ホッケ・マガレイ等の漁獲量が減少しており²⁾、資源の枯渇が危惧されている。我が国では近年、国土面積の約12倍にも相当する広大な排他的経済水域を有効活用することで水産資源を回復させようという取り組みが推進され、水産有用魚種を対象とした魚礁ブロック等人工構造物を用いた保護育成場の造成など沖合域の水産環境整備が進められている³⁾。

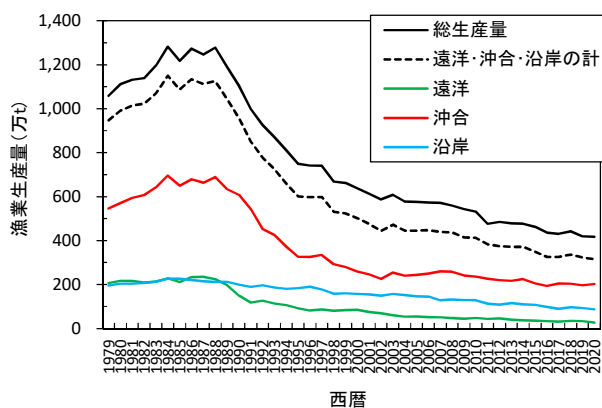


図-1 漁業生産量の推移(2020年は概算値)¹⁾

海中の人工構造物には、魚類の「蟻集効果」「保護育成効果」、さらには魚類の餌料となる動物プランクトンや底生生物が蟻集・付着する「餌料培養効果」が知られている⁴⁾⁵⁾。このような人工構造物が持っている機能・効果は水産有用魚種の増養殖促進による資源量の回復が期待できる他、漁獲の増大や漁業者の操業の効率化など、水産環境整備における効果は多岐にわたると考えられている。しかしながら、沿岸域においては人工構造物の効果について人工魚礁の観測事例^{4)~8)}がある一方で、潜水作業による調査が難しい沖合域における魚礁ブロック等の人工構造物が周辺の流動等の物理環境を含めた漁場環境に与える影響は十分に解明されていないのが現状である。

本研究は、日本海北部海域においてスケトウダラやホッケを対象として、沖合域での大規模な漁場整備を行うにあたり、人工魚礁等の人工構造物による魚類蟻集効果や餌料培養効果に基づく増養殖機能強化により漁場環境整備に資する技術の開発を行うものである。

2. 流動モデルを用いた流況解析による検討の概要

本研究では、北海道利尻島の沖合約10kmの水深約90mの人工魚礁の魚礁ブロックを対象として、魚類や餌料生物を含む生態系に影響を及ぼすと考えられる魚礁構造物近傍の流れに着目し、海洋分野での適用事例が増えている3次元数値流体解析モデルであるOpenFOAM⁴⁾⁹⁾¹⁰⁾を用いた人工魚礁近傍の流況解析を行った。

令和1年度の解析では、実際の人工魚礁¹¹⁾に設置さ

れている魚礁ブロック(図-2(上))を対象に後述の3次元数値流体解析を実施した。当該ブロックは、非構造格子(図-2(下))の構造部材で構成される複雑な形状であり、方塊等の単純な形状に比べて擾乱等の発生による複雑な流況の発現が予測される。よって、海洋分野の構造物に対する3次元数値流体解析のうち、非構造格子の計算格子設定が可能で計算自由度が高く、今回対象とする比較的複雑な形状の魚礁ブロックによる流況の再現精度が高いと考えられる OpenFOAM を採用した。

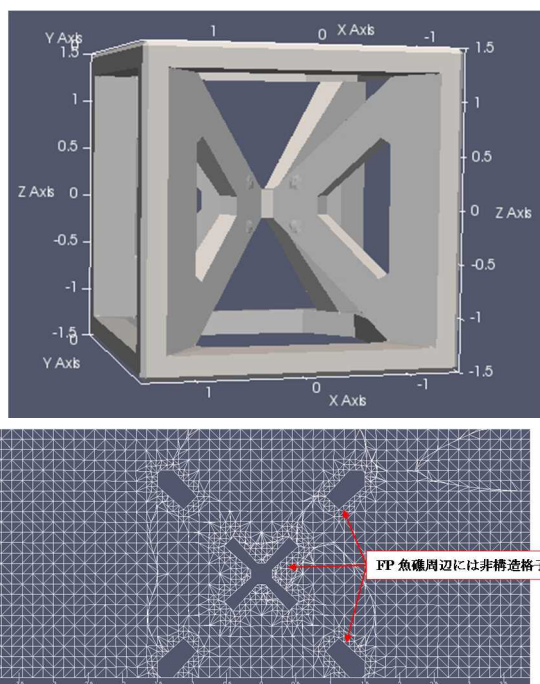


図-2 解析対象の魚礁ブロック(上)と非構造格子(下)

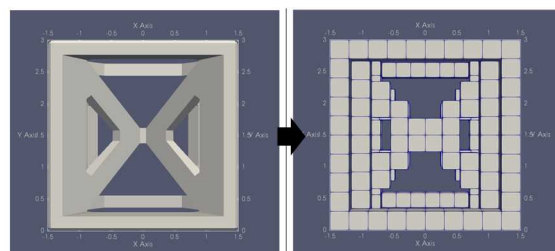


図-3 魚礁ブロックの3D-CAD(左)と計算モデル(右)

令和1年度の最初の単体ブロックの計算モデルの作成では、OpenFOAMの利点を活かして、流況の再現性向上のため構造体部材の極近傍の空間は非構造格子を採用し、それ以外の空間には計算負荷低減のため構造格子を採用した(図-2(下))。これにより令和1年度ではOpenFOAMの計算が既往研究での水理模型実験結果¹²⁾と整合することを確認した上で、ブロック近傍での渦流と後流域での流速分布を再現することができた¹³⁾。

単体ブロックでの流況再現は精度が高いものの、計算格子数が多いため演算時間が長く(5分間の流況再現に約36日間の演算時間)計算機の過大な負荷が課題であった。これを解決するために、実用的な精度を保ちつつ計算格子数を減らし(図-3)、併せて乱流モデルの手法の見直しを行うことで計算負荷の低減を図ることで、より複雑な立体構造への展開を試みた。

令和1年度の計算条件を基本とし、計算時間の短縮を図るため、計算条件を修正した。令和1年度と今回の計算条件を表-1に示す。計算条件の違いは、格子サイズと乱流モデルのみである。このうち乱流モデルは今回はレイノルズ平均(RANS; Reynolds-averaged Navier-Stokes equation)に基づくk-εモデル(Laundar-Spaldingモデル)¹⁴⁾を採用した。レイノルズ

表-1 計算条件の比較(実縮尺)

項目	令和1年度設定値		令和2年度設定値
ソルバ	interFoam(VOF [Volume Of Fluid]) 体積割合に基づいた界面捕獲法(固定メッシュ)による、不混和流体の非圧縮・等温2相流用非定常解析ソルバ		同左
離散化法	有限体積法		同左
計算領域	幅24m × 高さ48m × 長さ96m		同左
計算格子	最大格子サイズ: 1.2 m 最小格子サイズ: 0.01875 m		最大格子サイズ: 0.6m 最小格子サイズ: 0.3m
模型諸元	魚礁ブロック: 縦3m × 横3m × 高さ3m		同左
水深条件	18m		同左
境界条件	流入境界	流速0.16m/sとなる流量を指定	同左
	底面境界・構造物	境界での流速を0とする(noSlip)	同左
	壁面境界	Slip	同左
	流出境界	自由流出境界(ノイマン境界)	同左
乱流モデル	LESモデル(1次方程式型サブグリッドスケール(SGS)モデル)		レイノルズ平均モデル(標準k-εモデル)
計算時間	5min		同左

平均モデルは、令和1年度のLESモデル¹⁵⁾に比べて詳細な流速変動を再現できないが、平均的な流れ場を少ない演算時間で計算できるという利点がある。

3. 魚礁ブロック単体構造の流況解析計算結果

3.1 演算時間の比較

単体ブロックの演算に関する令和1年度と令和2年度の比較を表-2に示す。格子サイズと乱流モデルの変更により、演算時間が大幅に短縮された。

表-2 演算時間の比較

	令和1年度	令和2年度
計算格子数	6,898,051	961,748
演算時間	3,136,600 秒(36.3 日)	4,635 秒(1.3 時間)

3.2 断面・底面流速分布計算結果の比較

断面流速分布の計算結果の令和1年度と令和2年度の比較を表-3に、計算時間5分時点の魚礁ブロック近傍の断面流速分布を図-4に、平面流速分布を図-5に示す。なお、平面流速分布(図-5)は底面から0.6mの位置で表示している。

断面流速分布の計算結果(表-3、図-4)では、令和1年度の計算結果で見られた鉛直上下方向の流れ等が今回の計算結果で見られない部分があったが、流れ場が時空間的に平均化された結果であり、平均的な流れ場は概ね同等であると判断できる。

断面流速分布の計算結果(図-5)では、令和1年度と令和2年度の流れ場に大きな違いは無く、平均的な流

れ場は概ね同等であると判断できる。

以上より、単体の魚礁ブロックにおいては計算負荷低減のための計算条件変更は計算結果に大きな差異は生じず、流れ場を概ね再現していると考えられる。

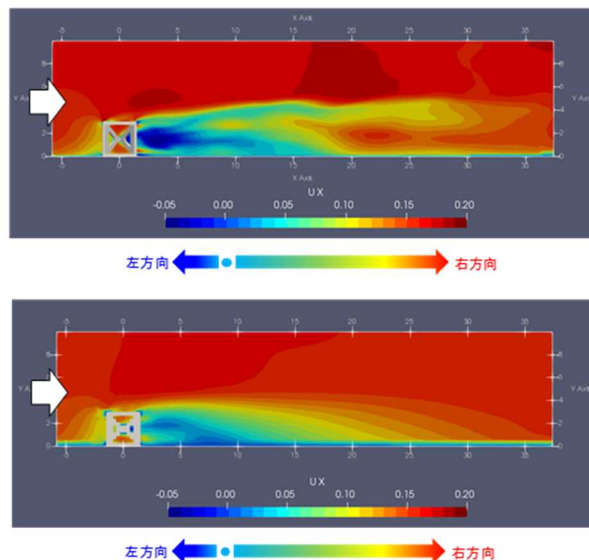


図-4 魚礁ブロック周辺の断面流速分布
(上:令和1年度、下:令和2年度)

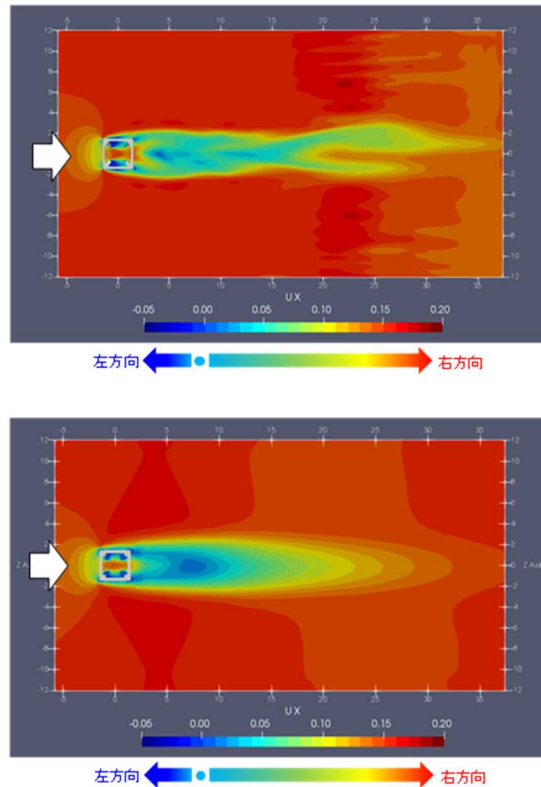


図-5 魚礁ブロック周辺の平面流速分布
(上:令和1年度、下:令和2年度)

表-3 断面流速分布計算結果の比較

令和1年度	令和2年度
【断面水平流速分布】 ①魚礁ブロック背後の30m程度まで流速低減が見られた。 ②魚礁ブロックの直背後10m程度では特に流速が小さく、一部で流下方向とは逆の流速が見られた。	【断面水平流速分布】 ①魚礁ブロック背後の30m程度まで流速低減が見られた。 ②FP魚礁の直背後10m程度では特に流速が小さいが、顕著な逆流は見られなかった。
【断面鉛直流速分布】 ①魚礁ブロックにより生じる鉛直上向きの流速は、魚礁直上2m程度まで及んだ。 ②魚礁ブロック正面から入射した流れが、ブロックの形状の影響で鉛直上向きおよび鉛直下向きの流れに分断され、ブロック背後でもその影響が及んでいる。	【断面鉛直流速分布】 ①魚礁ブロックにより生じる鉛直上向きの流速は、魚礁直上2m程度まで及んだ。 ②魚礁ブロック正面から入射した流れが、ブロックの形状の影響で鉛直上向きおよび鉛直下向きの流れに分断されるが、背後への影響は殆ど見られなかった。

3. 3 断面フラックスによる比較検証

令和1年度に対する令和2年度の流れ場の再現精度を検証するため、魚礁ブロック背後の6m×6mの領域について、底面から15cmピッチの断面の鉛直流速を断面フラックスとして抽出し比較を行った。

本比較における各抽出断面のうち15・105・210・300cmの鉛直流速分布図を図-6に、令和1年度と今回の断面平均鉛直流速の比較を図-7に示す。図-7より、断面B+165～断面B+300(底面上1.5m～3.0mの範囲)にかけて今回と令和1年度の断面平均鉛直流速は同等であった。一方、断面B+015～断面B+150(底面から1.5mの範囲)にかけて、今回と令和1年度の間に差異が見られた。両者の差を評価するためRSME(Root Mean Squared Error; 二乗平均平方根誤差)を算出すると、0.001(m/s)であった。

以上の検討結果から、今回の計算条件は令和1年度の平均的な流れ場の特徴を概ね再現しており、断面平均鉛直流速を比較しても0.001 m/s程度の誤差に収まることから、計算コスト削減を図るうえで妥当な条件設定であると判断できる。よって表-1の計算条件を基本として、人工魚礁の積層構造の計算を実施した。

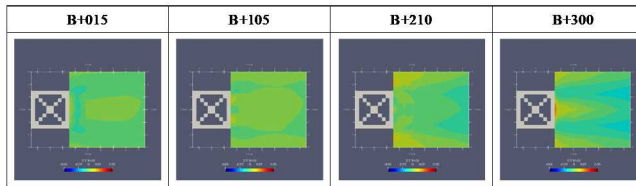


図-6 各抽出断面の鉛直流速分布図

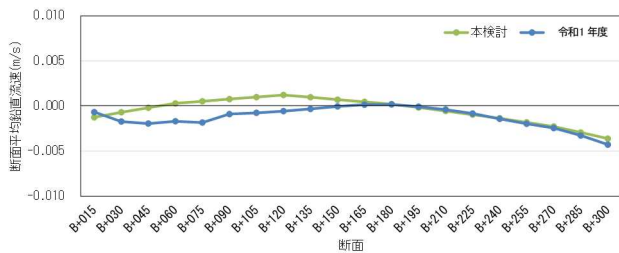


図-7 各断面における断面平均鉛直流速の比較

4. 魚礁ブロック積層構造の流況解析計算結果

4.1 計算条件

積層構造は、水平方向・鉛直方向に魚礁ブロックが3個並ぶ構造とした。計算条件の一覧を表-4に、計算領域を図-8に、計算用の魚礁ブロックモデル(積層構造)を図-9にそれぞれ示す。なお、計算の安定化のため、水深条件および計算領域(高さ)を単体ブロックよ

りも拡大している。気液界面(水面)の気相側で流速が大きく変化しやすく、その変化が上面や流出境界へ影響すると計算が発散することがあることから、水面と境界の距離を離すことで安定化を図ったものである。

表-エラー! 指定したスタイルは使われていません。
積層構造の計算条件(実縮尺)

項目	設定値	
ソルバ	interFoam(VOF [Volume Of Fluid]) 体積割合に基づいた界面捕獲法(固定メッシュ) による、不混和流体の非圧縮・等温2相流用非 定常解析ソルバ	
離散化法	有限体積法	
計算領域	幅48m × 高さ96m × 長さ96m	
計算格子	最大格子サイズ : 0.6m 最小格子サイズ : 0.3m	
模型諸元	魚礁ブロック:縦3m × 横3m × 高さ3m	
水深条件	48m	
境界条件	流入境界	流速0.16m/sとなる流量を指定
	底面境界・ 構造物	境界での流速を0とする(noSlip)
	壁面境界	Slip
	流出境界	自由流出境界(ノイマン境界)
乱流モデル	レイノルズ平均モデル(標準k-εモデル)	
計算時間	5min	

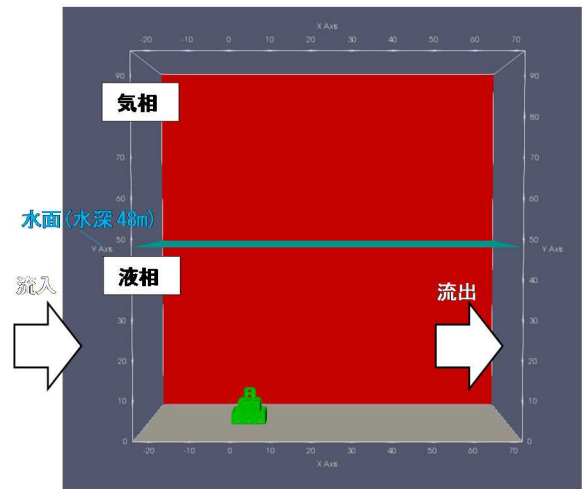


図-8 積層構造の計算領域

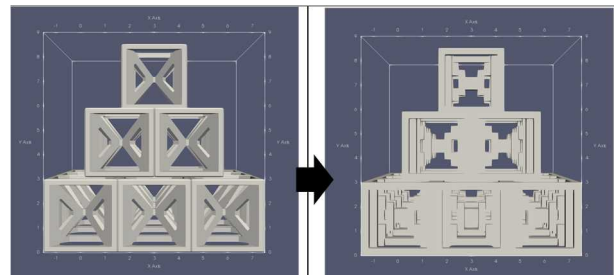


図-9 積層構造の3D-CAD(左)と計算モデル(右)

4.2 計算結果

積層構造の魚礁ブロック周辺の断面流速分布を図-10に、底面流速分布を図-11に示す。

断面水平流速分布(図-10)については、積層構造の魚礁ブロックの背後に発生する流速低減の範囲が単体ブロックに比べて大きく、40m程度まで流速低減の範囲が見られた。魚礁ブロックの直背後20m程度の範囲においては特に流速が小さく、この範囲も単体ブロックに比べて大きい。また、一部で流出方向とは逆向きの流速が見られた。以上より、単体魚礁ブロックの場合と比べ、構造物による流速低減の影響範囲が拡大することが確認された。

断面鉛直流速分布(図-10)については、魚礁ブロック正面から入射した流れが、積層構造の形状に沿うように鉛直上向きに流れる様子が確認された。魚礁ブロックの直背後では鉛直上向きの流れが発生し、さらにそれより下流側では鉛直下向きの流れが発生することが確認され、魚礁背後で大きな渦流が発生することが示唆された。これは令和1年度の単体ブロックの精密な流況解析でも確認されており、それと整合する。

海底の流速は底生生物相に影響を与える重要な要因とされ¹⁶⁾¹⁷⁾、流速低減が堆積物食者(多毛類等)を優占させることも報告されている¹⁸⁾。当該人工魚礁の過年度の観測でも人工魚礁近傍で多毛類の生息密度が魚礁区外と比較して高い傾向が確認されており¹¹⁾、また、魚礁ブロック近傍に粒子状有機物質の滞留が確認され

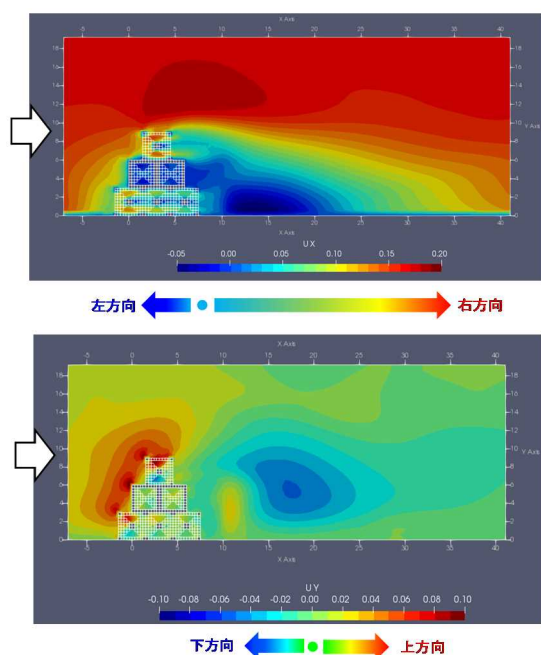


図-10 積層構造の魚礁ブロックの断面流速分布

(上: 水平流速分布、下: 鉛直流速分布)

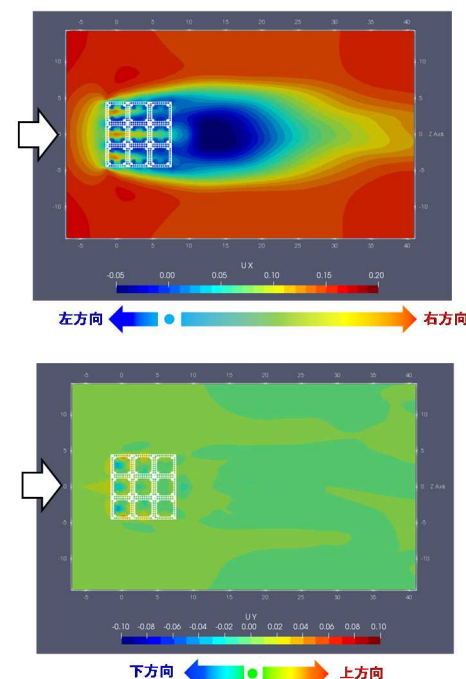


図-11 積層構造の魚礁ブロックの平面流速分布

(上: 水平流速分布、下: 鉛直流速分布)

ている¹⁹⁾。以上の魚礁ブロックによる流速低減は、魚類の餌料生物である底生生物の良好な生息環境を創出し、さらに底生生物の餌料となる粒子状有機物質を滞留させている可能性を示唆している。

今回のように単体ブロックの流況解析を積層構造に発展させることにより、人工魚礁における餌料生物の増殖効果(餌料培養効果)をより適切に評価でき、餌料培養効果に基づく人工構造物による漁場整備に繋げることが期待できると考えている。

5. まとめ

本報告の主要な結果を以下に示す。

- 令和1年度の単体魚礁ブロックの精密な流況解析の課題であった計算負荷について、計算格子数と計算手法(乱流モデル)の改良により演算時間を大幅に短縮でき、より複雑な積層構造への計算手法の展開を可能とした。
- 今回の積層構造の計算結果から、魚礁ブロックによる流速低減の範囲が単体構造に比べて拡大することを確認し、魚礁ブロックの効果範囲評価手法へ新たな手法としての適用性が確認された。

今後は、餌料培養効果に関する流況解析と現地観測の生物データの定量的な解明により、沖合漁場整備技

術の開発に繋げることが期待される。

参考文献

- 1) 農林水産省:海面漁業生産統計調査、長期累年統計表一覧
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/#
(2021年6月16日確認)
- 2) 国立研究開発法人水産研究・教育機構:わが国周辺の水産資源の現状を知るために一令和2年度魚種別系群別資源評価(119種) <http://abchan.fra.go.jp/digests2020/index.html>
(2021年6月16日確認)
- 3) 中村隆・岡貞行・山本竜太郎・柳瀬知之・浅川典敬・中川良文:沖合漁場整備の政策的意義と技術的課題、平成19年度日本水産工学会秋季シンポジウム講演集、講演9、2007.
- 4) 柿元皓・大久保久直・板野英彬・新井健次:魚礁における動物プランクトンの分布様式について、水産土木、Vol.19、No.2、pp.21-28、1983.
- 5) 伊藤靖・中野喜央・藤澤真也:人工魚礁およびその周辺における小型動物の分布—漁場施設の魚類増殖効果に関する研究 I—、日本水産工学会誌、45 巻 2 号、pp.101-110、2008.
- 6) 穴口裕司・永松公明・田原実・足立吉宏:人工魚礁における生物多様性に関する研究事例、水産工学、Vol.50、No.3、pp.219-224、2014.
- 7) Xinyuan Yanga, Chenggang Lina, Xiaoyue Songa, Min Xua, Hongsheng Yang: Effects of artificial reefs on the meiofaunal community and benthic environment—A case study in Bohai Sea, China, Marine Pollution Bulletin, 140, pp.179-187, 2019.
- 8) Emily Higgins, Robert E. Scheibling, Kelsey M. Desilets, Anna Metaxas: Benthic community succession on artificial and natural coral reefs in the northern Gulf of Aqaba, Red Sea, PLoS ONE, 14(2), 2019.
- 9) 川崎浩司・松浦翔・坂谷太基:3次元数値流体力学ツール OpenFOAM における自由表面解析手法の妥当性に関する検討、土木学会論文集 B3(海洋開発)、Vol.69、No.2、pp.748-753、2013.
- 10) 遠藤次郎・磯崎由行・大村智宏・小林学・古市尚基・杉松宏一:直杭式栈橋に作用する津波波力特性に関する数値解析、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.74、No.2、pp.253-258、2018.
- 11) 須藤賢哉・稲葉信晴・石井馨:沖合域の人工構造物周辺における底生生物相、寒地土木研究所月報、No.796、pp.11-17、2019.
- 12) 林健二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良:開水路中に水没設置された立方体および直方体の流体力、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.67、No.4、pp.1141-1146、2011.
- 13) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所:食料供給力強化に貢献する寒冷海域の水産基盤の整備・保全に関する研究、令和1年度研究開発プログラム報告書、2020.
- 14) Launder, B.E. and Spalding, D.B., Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, The numerical computation of turbulent flows (1974), pp.269-289.
- 15) Princeton University Combustion Energy Frontier Research Center
(<https://cefc.princeton.edu/sites/cefc/files/Files/2013%20Lecture%20Notes/Poinsot/5-Codes-DNS-LES-RANS.pptx.pdf>)(2021年6月16日確認)
- 16) 松政正俊:海草による環境変化と底生生物、海洋と生物、Vol.22、No.6、pp.550-556、2000.
- 17) Serena Donadi・Britas Klemens Eriksson・Karsten Alexander Lettmann・Dorothee Hodapp・Jörg-Olaf Wolff・Helmut Hillebrand: The body-size structure of macrobenthos changes predictably along gradients of hydrodynamic stress and organic enrichment, Marine Biology, 162(3), pp.675-685, 2015.
- 18) 菊池泰二:砂泥底の生態系とベントス、水産土木、Vol.22、No.1、pp.25-33、1985.
- 19) 須藤賢哉・稲葉信晴・石井馨:沖合人工魚礁の整備評価手法に関する研究、産総研北海道センターワークショップ in 函館、ポスターセッション—漁業—03、2019.

17.2 生産力向上と漁業振興に向けた海洋及び河川・沿岸構造物の増養殖機能強化のための水産環境整備技術の開発

17.2.3 栽培漁業支援強化のための漁港港湾の有効活用手法および整備技術の開発

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水産土木チーム）

研究担当者：的野博行、河合浩、須藤賢哉、伊藤公人、梶原瑠美子、稲葉信晴

【要旨】

本研究は、漁港港湾における構造物の水産生物に対する増養殖機能強化に資する技術開発として、漁港港湾の有効活用手法及び整備技術について検討するものであり、漁港港湾の泊地や遊休化した施設等を水産生物の増養殖場として有効活用するために必要となる手法及び技術の開発による増殖機能付加型漁港の整備に資する技術の確立を目標としている。

初年度にあたる平成 30 年度 (2018) は対象漁港にて材質・空隙の異なる基質に放流した稚ナマコの個体数変化、体成長及び稚ナマコの餌料環境調査を実施し、種苗放流基質の材質はホタテ、空隙が 15mm 及び 30mm の基質で種苗稚ナマコの比較的良好な定着が確認され、空隙が大きい基質ではクロロフィル *a* やフェオフィチンが高く、体長の大きなナマコが多かったことから、体成長と空隙と餌料環境の密接な関係性が明らかにした。

令和元年度 (2019) は、詳細な餌料環境分析の他、食害生物の影響についての検討を行い、ホタテの空隙が大きい基質上の単位面積当たりの羽状目珪藻がより高密度で、各基質に分布した稚ナマコの糞中でも同様の傾向を示した事や、糞中の羽状目珪藻の生細胞比率がバイオフィーム中と比べて極端に低いことから、基質の種類、空隙を制御する事で餌料環境を最適化できる可能性についての知見を得るとともに、周年を通して試験礁内でオオヨツハマガニ及びケブカヒメヨコバサミが優占し、両種による稚ナマコの食害による生残への悪影響を明らかにした。

令和 2 年度 (2020) は、過年度に明らかとなった食害の影響低減を目的として作成・設置した放流礁内に放流した種苗の追跡調査を実施し、食害防止機能を付加した礁 (食害防止礁) 内の 1 年後の生残個体数がコントロール区 (開放系) に比べ有意に高く、成長についてもこれまで実施した調査 (天然環境下) と同様程度であった事などから、食害防止礁の高い効果が明らかとなった。また、新規調査フィールド (古平漁港) における食害防止礁の再現性の検証を開始し、成果の一般化に向けた取り組みを開始した。

キーワード：栽培漁業、種苗放流、稚ナマコ、生息基質、空隙、餌料環境、食害

1. はじめに

北海道は水産物の生産量、生産額共に日本一であり、全国の約 2 割程度を占め我が国における水産物の安定的な供給に貢献している。一方で、漁業者の高齢化や就業者数の減少、燃料費の高騰などの様々な問題に伴い、沖合漁業から沿岸の磯根漁業への転換が急速に進んでいる。近年、スケトウダラやスルメイカ、ホッケなどの漁獲不振等により疲弊する日本海漁業の再生と水産生産の安定化は喫緊の課題である¹⁾。

我が国では漁港漁場整備法 (昭和 25 年法律第 137 号) に基づき、漁港漁場整備長期計画 (H29-H33) を定め、「漁港ストックの最大限の活用と漁村のにぎわいの創

出」を重点課題として位置付け、浜や漁業地域全体の活性化を目指し、漁港機能の再編・集約化に伴う港内泊地の有効利用についての取り組みが精力的に進められている。具体的な港内泊地の有効活用策として、高い静穏性を生かした水産有用種の増殖や生育場をなる施設整備が検討されている^{2),3)}。

近年、世界的な漁食需要の高まりを背景に北海道においても水産物の輸出金額が増加傾向で推移している (図-1 A)。特に中華圏向けの輸出量増大に伴い北海道産のマナモコの需要が高まっており、1990 年代には 6 億円前後で推移していた漁獲金額は、2003 年以降劇的に増加し、2010 年には 100 億円を超えた⁵⁾。輸出金額

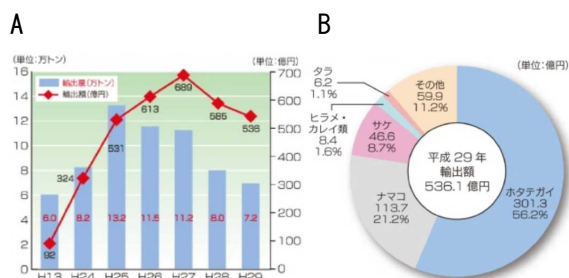


図-1 北海道における水産物輸出品数及び金額の推移とその内訳⁴⁾

においても、水産品輸出総額の内、ホタテに次ぐ第2位の地域の主力産業となっており、地域漁業を活性化させる魚種として注目されている(図-1 B)。一方で、高まる需要を背景に資源量は減少し、体サイズの小型化など乱獲の兆候を示す漁場も多く見られている。現在、道全域でナマコ資源の回復を目指した種苗放流が精力的に実施されているが、未だ効果は限定的あるいは低位である。強い波浪や流れによる稚ナマコの流出による著しい初期減耗が報告されており^{6),7)}、漁港港湾等の静穏域を稚ナマコの放流場及び育成場として活用する事が有効であると考えられる。一方で、漁港港湾等に生息するナマコの生態に関する調査や稚ナマコ育成に特化した生息環境創出手法の検討事例は少なく、不明な点が多い。このため静穏域における、ナマコ生息環境として適切な基質の特性(材質や空隙等)や餌料環境などの検討を実施し、稚ナマコ育成に適した漁港港湾施設の有効活用手法及び整備技術の開発は重要な課題である。そこで、当チームは、漁港港湾構造物の水産生物増養殖機能強化に資する技術開発の一環として、ナマコを対象生物とした漁港港湾の有効活用手法および整備技術の構築を目指し調査・研究を進めている。

平成30年度(2018)は対象漁港に設置したナマコ種苗放流・中間育成場としての試験礁内の稚ナマコ個体数の経時的変化及び成長が基質や空隙によってどう変化するか、また基質や空隙、環境の違いが稚ナマコの餌環境に与える影響について検討を行った。令和元年度(2019)は、追加的なより詳細な餌料環境分析を実施した他、天然環境下における食害生物の影響についての検討を行った。令和2年度(2020)は、過年度に明らかとなった食害の影響低減を目的として作成・設置した放流礁内に放流した種苗の追跡調査を実施し、新規に作成した礁の効果を検証した。また、新規調査フィールド(古平漁港)における調査を通じた成果の一般化に向けた取り組みを開始した。

2. 調査方法

2.1 調査対象漁港

対象漁港は北海道南部の漁港であり、泊地の底質は主に砂質である。漁港の左右には小規模河川が存在することが特徴的である(図-2)。



図-2 調査対象漁港

(試験礁の設置位置 A、B、C 地点)

2.2 実証試験方法

2.2.1 試験礁の設置

当漁港における実証実験として種苗放流・中間育成場としての試験礁を、防波堤の近傍(A地点、B地点)と対象地点として港内中央部(C地点)に設置することとした(図-2)。これは、放流した稚ナマコが漁港構造物(防波堤マウンド等)への移動など利用する事を考慮したためである。試験礁の設置は、放流約一ヶ月前の2016年11月に実施した。

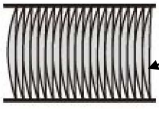
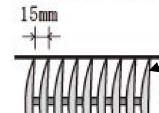
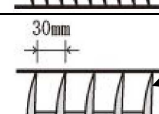

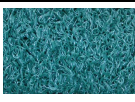
2.2.2 放流試験礁

放流試験礁は、中心に小型貝殻ブロック「貝藻くん」(海洋建設株式会社)を配置し、その周辺に空隙の異なる5種類のユニットを設置した(表-1)。図-3は放流試験礁全体(単位:1基)を示しており、この試験礁を各地点(図-2 A、B、C地点)に5基ずつ、合計15基を設置した。ユニットの種類、空隙は、表-1に示している。材料としてはホタテ貝殻、石材、透水マットを用い、それらを円柱状高密度ポリプロピレンメッシュパイプに入れ、3セットを1ユニットとした。ホタテ貝殻を用いた基質についてはスペーサーを用いて任意の空隙(0mm, 15mm, 30mm)を設定した。この試験礁は稚ナマコの放流中間育成場として空隙や材質の違いによる定着や成長、餌環境の差異について検討するための設計となっている。

2.2.3 ナマコ個体数調査

放流後の稚ナマコ個体数調査は、1回の調査で各地点(A、B、C地点)に5基ずつ設置した放流試験礁のうち1基のみ陸揚げを行い、小型貝殻ブロックと各ユニットから稚ナマコを取り分け、計数するとともにメントール麻酔後、体長・体幅、湿重量の測定を行った。計測後の稚ナマコは各ユニットに再放流した。放流1

表-1 基質（ユニット）

ユニット名	構造	材料等
ホタテ 0	 ホタテ貝殻	材料：ホタテ貝殻 ※スペーサー無し
ホタテ 15	 ホタテ貝殻	材料：ホタテ貝殻 ※15mm スペーサー
ホタテ 30	 ホタテ貝殻	材料：ホタテ貝殻 ※30mm スペーサー
石		材料：割石 ※代表径 2cm~4cm
透水マット		材料：ポリプロピレン ※プラスチック立体網状形成品 ※NETIS 登録 No. KT-140118-A

年目(2017年)の追跡調査は、2月、4月、6月、8月、10月、12月の計6回、2年目(2018年)は3ヶ月に一度(3月、6月、9月、12月)の計4回実施した。放流数は図-3の中心にある小型貝殻ブロックに約2,000匹/基とした(2,000匹×5基×3地点=合計30,000匹)。また、放流はダイバーが行い、稚ナマコの水中での逸散を防止するため、事前にネットをかけて、ネット内部に放流した(写真-1)。



写真-1 放流状況

2.2.4 基質バイオフィルムのクロロフィル a 及びフェオフィチン測定

試験礁内に配置している各基質(表-1)の表面に形成されるバイオフィルム中のクロロフィル a 及びフェオフィチン量について2018年6月、9月、12月の3回調査を実施した。基質上のバイオフィルムはブラシを用いて良く剥離させた後、予め一定量の滅菌人工海水で満たした遠沈管に懸濁させ、GF/Fフィルターを用いて濾過した。濾過試料はその場で90%アセトンに浸出させクロロフィル a の抽出を行い、蛍光法にてクロロフィル a の蛍光値を測定した。また、酸処理をしたものをフェオフィチン量とし測定した。

2.2.5 バイオフィルム及び糞粒中の微細藻類の計数

各基質上のバイオフィルムを2.3×2.3cm四方の範囲から滅菌菌ブラシを用いて剥離し、採取した。採取試料は滅菌人工海水(MARINE ART SF-1, 富田製薬株式会社)に懸濁させ、ボルテックスで良く攪拌後に、一部をGF/Fで濾過しバイオフィルム乾重量(BDW)とし、残りはグルタルアルデヒド(終濃度1%)にて固定し微生物計数用の試料とした。BDW試料は濾過後速やかに冷凍し、室内にて十分乾燥させた後、乾重量を計測した。更に、各基質から稚ナマコを無作為に10個体抽出し、滅菌人工海水にて体壁等を良く洗浄後、滅菌人工海水で満たされた滅菌容器に稚ナマコを収容し、糞粒を採取した。糞粒は基質毎にまとめて一つ試料とし、微生

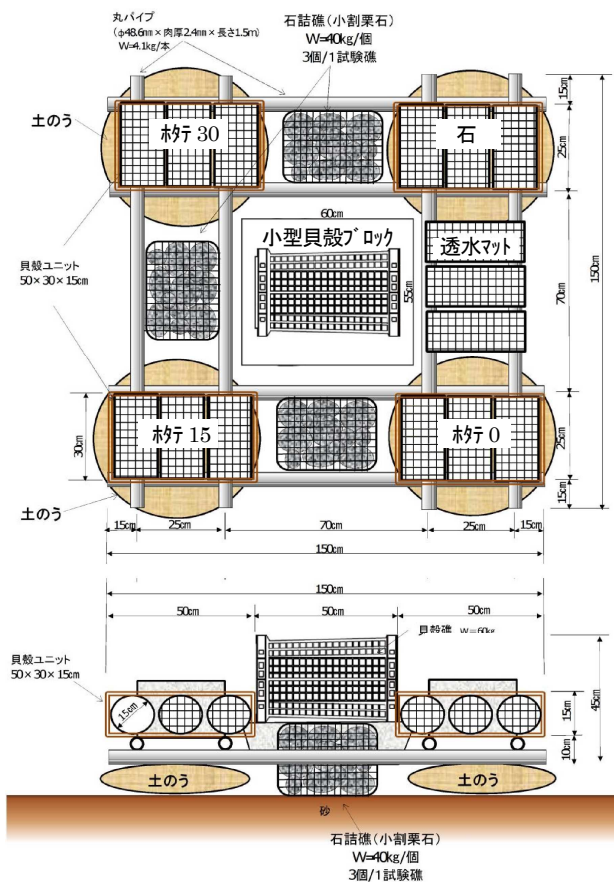


図-3 放流試験礁(全体)

物計数用の固定試料を得た。バイオフィーム及び糞試料は、サンプル水中に均等に分布させるため、ボルテックスを用いて十分に攪拌した後、倒立顕微鏡を用いて珪藻及びその他の微細藻類を同定・計数した。計数の際には、微細藻類の細胞質の有無によって個別に計数を行い、全サンプルについて3回づつ計数を行った。

2.2.6 カニ及びヤドカリ組成及び胃内容物の観察

調査時に各ユニット内に出現したカニ及びヤドカリを70%エタノールにて固定し、計数及び種同定を行った。また、一部の試料について、胃内容物の顕微鏡観察を行い、ナマコの捕食状況を確認した。また、調査水域からカニ及びヤドカリを採捕し、一時的に飼育し、ナマコの室内捕食試験を実施した。

2.2.7 食害防止礁の効果の検証

C地点設置した目合いのサイズ(大・中・小・開放区)の異なる礁(写真-2)に稚ナマコを2019年12月に200個体放流し、約3ヶ月に一度の頻度で追跡調査を実施した。追跡調査では、礁を陸揚げした後、稚ナマコを取り分け、計数するとともにメントール麻酔後、体長・体幅、湿重量の測定を行った。計測後の稚ナマコは各礁内に再放流した。放流はダイバーが行い、開放区に関しては、放流中の稚ナマコの水中での逸散を防止するため、事前にネットをかけて放流した。



写真-2 目合いの異なる礁の設置状況

3. 調査結果と考察

3.1 実証試験結果

3.1.1 試験礁内のナマコ個体数調査

稚ナマコ放流後の地点生息個体数(小型貝殻ブロックを除く)の調査結果を図-4に示す。稚ナマコは小型

貝殻ブロックに放流後、時間の経過と共に試験礁全体に移動していくことが認められた(図-4)。一方で、A地点は個体数の増加の度合いが小さく、放流後342日後(2017年11月)では減少に転じ、2年後の定着数も他の2地点と比較し半分程度であった。これはA地点が河川や港外の影響を受けやすい地点で、写真-3のように放流試験礁の基質ユニットが堆積物に埋没する事が大きく影響したと考えられる。図-5は調査期間中の基質別のナマコ個体数割合の変化を示している。2年後の基質毎の個体数はA地点についてはホタテ15及び30が一番高く、次ぎに石が多かったが、試験礁の埋没などの影響もあり、全体の個体数は低位であった。B及びC地点については、両地点ともホタテ15>ホタテ30>ホタテ0>石>透水マットの順で個体数の違いが認められた。放流1年目はホタテ0の個体数が高い傾向が確認されたが、2年目以降からホタテの空隙が大きいユニット中の個体数の全体に占める割合が増加傾向を示した。図-6に2年後の地点別試験礁内のナマコの平均標準体長を示したが、空隙が大きくなるに従い平均標準体長が高い事が分かる。以上の事は、稚ナマコが成長に伴い利用する空隙を変化させている事を示唆している。一方で、2年後の個体数が一番低かったA地点では平均標準体長が最も高かった事から、埋没を逃れた大きな個体が選択的に生残した可能性が考えられるが、基質毎の大きな違いは見られなかった。

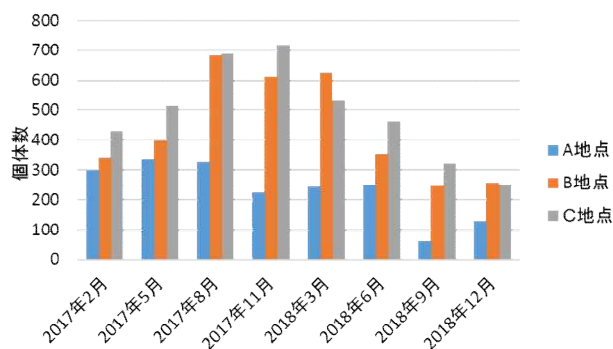


図-4 地点別の生息個体数(5種類のユニットの合計)

(A)

(B)

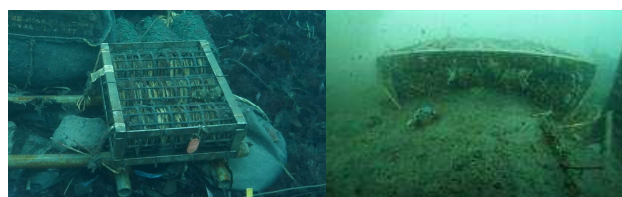


写真-3 A地点の堆砂状況((A)堆砂前、(B)堆砂後)

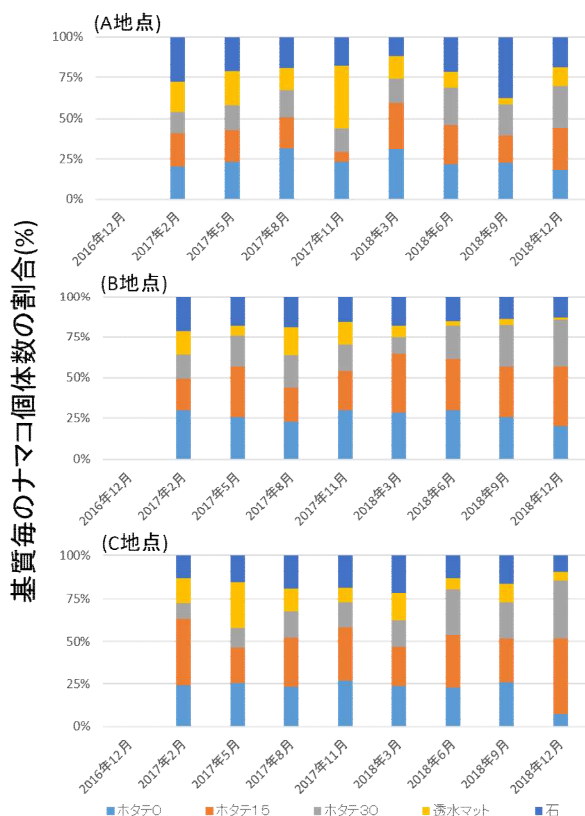


図-5 ナマコ個体数の基質別の割合

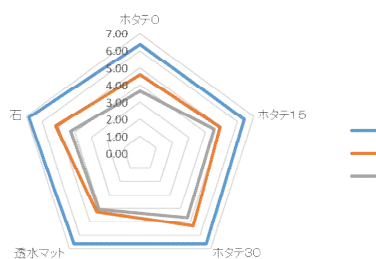


図-6 2年後の平均標準体長 (cm)

3.1.2 基質毎のクロロフィル a 及びフェオフィチン量

基質毎の餌環境の指標としてのクロロフィル a 及びフェオフィチン量及び割合について図-7 に示した。両色素量の合計を基質間で比較するとホタテ 30>15>透水マット>石>ホタテ 0 であった事が認められた。特に基質ホタテで比べると空隙が大きくなればなるほど色素の総量は増え、特にクロロフィル a 量の全体に占める割合が高まることを示している。前述で試験礁内のナマコの平均標準体長が、ホタテの空隙が大きくなるに連れ高い傾向が認められていることから、クロロフィル a 及びフェオフィチン量(餌環境)と体成長が密接に関

係している事が考えられる。

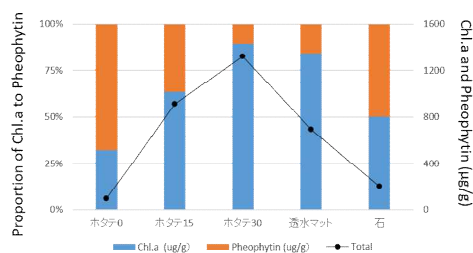


図-7 基質毎のクロロフィル a 及びフェオフィチン量と割合

3.1.3 バイオフィーム及び糞粒の微細藻類密度と組成

各基質に形成されたバイオフィーム乾重量(BDW)の分析結果を図-8 に示す。バイオフィーム乾重量(BDW)は基質ホタテでは空隙が大きくなるに従い増加し、空隙が 0mm と 30mm では約 14 倍もの違いが認められた。また、小型貝殻ブロックでも同様に高い値(2.19mg dry weight/cm²)が確認された。バイオフィーム中の微細藻類密度及び組成を図-9 で示す。全細胞数で各基質を比較すると、Chl. a と一致し、ホタテ 30 で最大で 1.54×10⁴cells/cm² であった。小型貝殻ブロック中から中心目珪藻が低密度で観察されたが、どの基質中においても羽条目珪藻が優占した。また、バイオフィーム中の生細胞比率(=細胞数(細胞質有り)/全細胞数)は、ホタテ 15 及び 30 で高く 70%程度であった。透水マットに関しては、基質の構造上、単位面積あたりの正確な値が得られなかったため除いている。

図-10 には稚ナマコの糞粒中の微細藻類密度と組成を示した。糞粒中の微細藻類の細胞密度についても、バイオフィーム中と一致し、ホタテ 30 で 2.4×10⁴ cells/mg dry weight と最も高く、小型貝殻ブロックで最小を示した。糞粒中では羽条目珪藻が優占したが、全て糞粒から中心目珪藻やシアノバクテリアなどが観察された。また、糞粒中の羽条目珪藻の生細胞比率は 8~26%と低く、ホタテ 30 で 8%と最も低かった。

以上の結果から、空隙が基質上に形成されるバイオフィーム中の微生物組成や密度に大きな影響を及ぼしている可能性が高い。また、ホタテの空隙が大きい基質上の単位面積当たりの羽状目珪藻がより高密度で、各基質に分布した稚ナマコの糞中でも同様の傾向を示した事や、糞中の羽状目珪藻の生細胞比率がバイオフィーム中と比べて極端に低い事から、人工的に生息空間としての基質、空隙を制御する事で餌料環境を最適化できる可能性が示唆された。

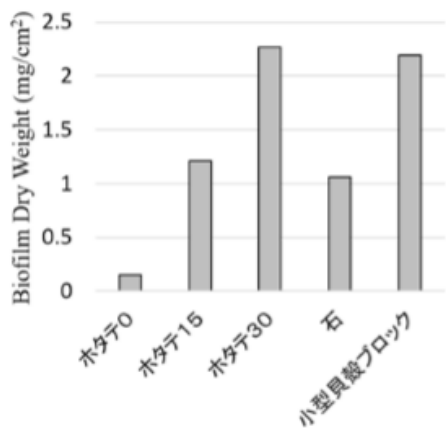


図-8 基質毎のバイオフィーム乾重量(mg/cm²)

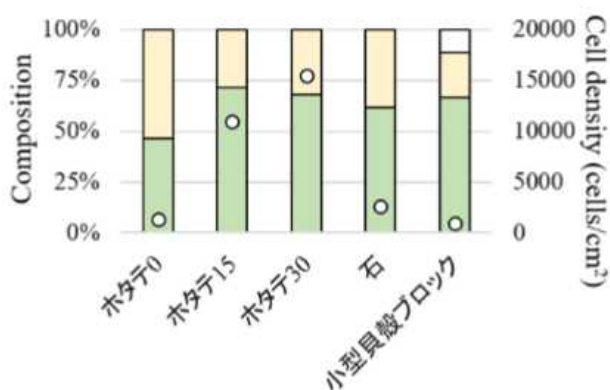


図-9 基質バイオフィーム中の微細藻類密度及び組成

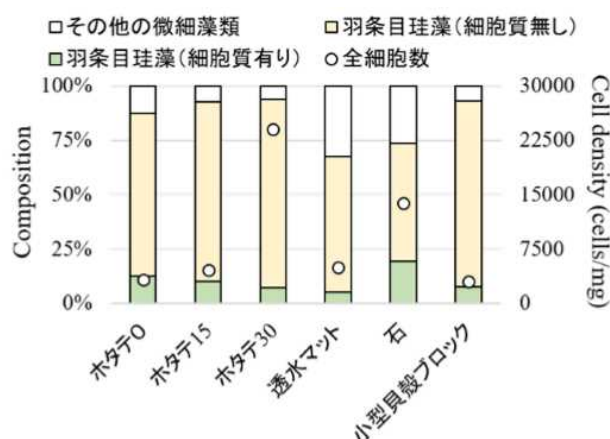


図-10 稚ナマコ糞粒中の微細藻類密度及び組成

3.1.4 出現したカニ及びヤドカリ組成と胃内容物

図-11 に St. C の礁内に出現したカニ及びヤドカリの個体数及び種組成の変化を示す。カニ・ヤドカリ類は2017年では8月にピーク(110個体)を示した後、減少したがまた2018年の6月から9月にかけて急増し、

2018年は12月に最大値(138個体)を示した。中でも、北方系のモガニ類最大の種であるオオヨツハマモガニ⁸⁾及びヤドカリ科ヒメヨコバサミ属のケブカヒメヨコバサミが周年を通して優占した。また、上記2種の胃内容物の顕微鏡観察の結果、両種からマナモコの骨片が検出され(写真-4)、また、室内飼育試験の結果、両種による稚ナマコの捕食が確認されたことから、両種が稚ナマコの食害生物である可能性が高く、放流した種苗ナマコの生残に悪影響を及ぼしている可能性が示唆された。

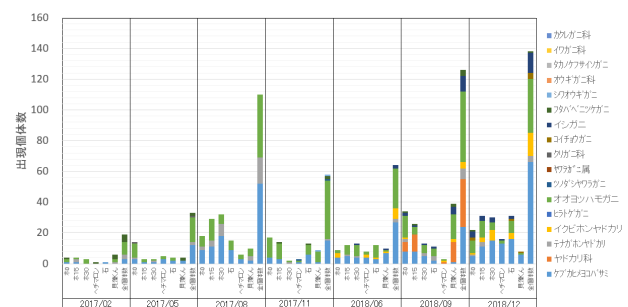


図-11 出現したカニ及びヤドカリ個体数と組成(St. C)

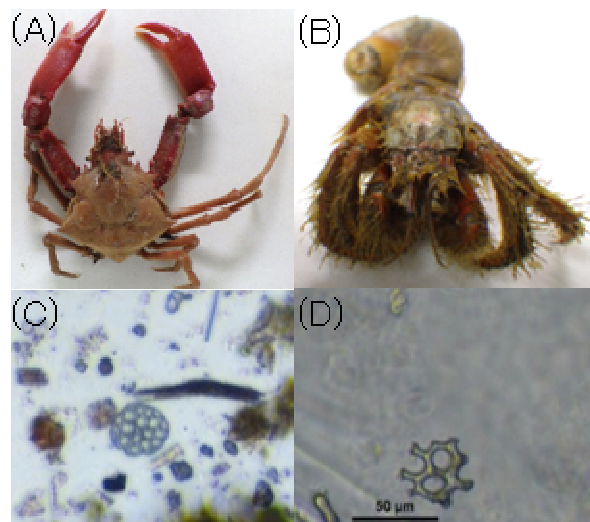


写真-4 オオヨツハマモガニ(A)、ケブカヒメヨコバサミ(B)、オオヨツハマモガニ胃内容物(C)及びケブカヒメヨコバサミ胃内容物(D)から検出されたナマコ骨片

3.1.5 食害防止礁の効果の検証

目合いの異なる礁(大・中・小・開放区)に200個体放流した稚ナマコの1年後の礁内の個体数及び体長を図-12に示しているが、1年後の生残率は全ての食害防止礁で開放区と比べ約1.5倍高いという結果が得られた。成長に関しては、小と中で、放流後半年までは開放区と同程度であったが、夏場以降から、低調であつ

た。これは、礁のメッシュが詰まるなどの影響で、餌供給が悪化した事が考えられる。一方で、大に関しては、調査期間を通して好成績であり、1年後の礁内のナマコ総重量では開放区を大きく上回り、高い効果が認められた。

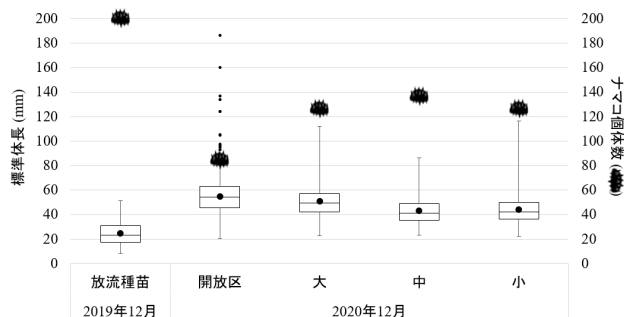


図-12 放流1年後の礁内のナマコ体長及び個体数

4. まとめ

「栽培漁業支援強化のための漁港港湾の有効活用手法および整備技術に関する研究」における平成30年度(2018)の検討結果について以下に取りまとめる。

- ・生息空間を埋没させるほどの流入堆砂や漂砂移動が大きな堆積傾向の強い環境は、ナマコ中間育成を行う場所として適さないと考えられる。
- ・材質はホタテ、空隙が15mm及び30mmの基質で種苗稚ナマコの比較的良好な定着が確認された。
- ・空隙が大きい基質ではクロロフィルaやフェオフィチンが高く、体長の大きなナマコが多かった事から、体成長と空隙と餌料環境の密接な関係性が示された。
- ・ホタテの空隙が大きい基質上の単位面積当たりの羽状目珪藻がより高密度で、各基質に分布した稚ナマコの糞中でも同様の傾向を示した事や、糞中の羽状目珪藻の生細胞比率がバイオフィーム中と比べて極端に低い事から、基質の種類、空隙を制御する事で餌料環境を最適化できる可能性が示唆された。
- ・オオヨツハモガニ及びケブカヒメヨコバサミが周年を通して、試験礁内で優占し、両種による稚ナマコの食害による生残への悪影響が示唆された。
- ・過年度に確認された食害生物による捕食を回避する事を目的として作成された礁内における稚ナマコの高い生残・成長が確認され、食害防止礁の中間育成基盤としての高い効果が示された。

本研究は、漁港港湾における構造物の水産生物に対する増養殖機能強化に資する技術開発として、漁港港湾の有効活用手法及び整備技術について検討するものであり、漁港港湾の泊地や遊休化した施設等をマナマコの増養殖場として有効活用するために必要となる手法及び技術の開発による増殖機能付加型漁港の整備に資する技術の確立を目標としている。最終年度である令和3年度においては、これまでとは異なる新たな漁港を調査対象場所としてこれまで蓄積した知見、技術の一般化に向け研究を推進し、栽培漁業支援強化のための漁港港湾の有効活用手法および整備技術の開発を進める予定である。

参考文献

- 1) 北海道水産林務部：日本海振興基本方針、2014.
- 2) 農林水産省：水産動物の種苗の生産及び放流並びに水産動物の育成に関する基本方針、2015.
- 3) 北海道開発局：北海道マリンビジョン2 1 (改訂版) 北海道漁港漁村の将来像、2013.
- 4) 北海道開発局：知る・学ぶ - 北海道の漁業 - <https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ns/suisan/ud49g700000q5ut.html>
- 5) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構水産研究部：“マリンネット北海道” <http://www.hro.or.jp/list/fisheries/marine/index.html>
- 6) 光永直樹, 松村靖治: サイズ別に放流した人工稚ナマコの成長と生残, 長崎水産試験場研究報告書, 第30号, pp. 7-13, 2004.
- 7) 桑村勝士, 有江康章, 小林信, 上妻智行: 人工増殖場に放流したマナマコ (アカナマコ) の移動生存および成長, 福岡水研報, 第5号, pp. 9-14, 1996.
- 8) 大土直哉: モガニ属をめぐる分類学的・生態学的研究から見えてきた沿岸岩礁域生態系の多様性, Cancer 28, pp. 57-63, 2019.

17.2 生産力向上と漁業振興に向けた海洋及び河川・沿岸構造物の増養殖機能強化のための水産環境整備技術の開発

17.2.4 自然再生産を目指した水産有用種の行動に着目した河川・沿岸構造物の評価・改善手法に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境保全）
研究担当者：巖倉啓子、野上毅、布川雅典

【要旨】

本研究では、厚内漁港周辺の定置網周り定置網回避後の行動と、定置網周辺から十勝川河口までの行動を調査し（平成 30 年度）、シロサケは港内に迷入した場合でも、本来の回帰ルートに戻れることが示唆された。令和元（2019）年度は勇払川に設置されている魚類遡上数自動計測システムでの計測と同時に画像撮影を行い、その遡上数の精度を向上させる方法を検討した。また、上流域に生息するイワナを対象とした遡上数自動計測システムを開発し、これにより中型魚の移動実態を明らかにして上流域の河川構造物の評価・改善手法に資するデータ収集を可能とした。令和 2（2020）年は流速、水路幅、水路長などが異なる水路でも、遡上数あるいは降下数を自動計測する技術を構築し、河川構造物の改善手法につながるデータ取得を可能にした。また、魚道形状に対応した魚類行動データを取得可能し汎用性のある河川構造物の改善手法の構築に寄与する成果が得られた。

キーワード：沿岸回遊、バイオテレメトリー、漁港、サケ、画像解析、イワナ、河川上流域、形状可変型魚道

1. はじめに

北海道のサケは河川から降海した後、沿岸域で数週間過ごす。さらに、オホーツク海および西部亜寒帯ジャイアを経て、ベーリング海・アラスカ湾で成熟して北海道にもどってくることが明らかとなっている¹⁾。また、河川等の淡水域での遡上動態はその研究例も多く、過年度の寒地土木研究所の研究においても数多くなされている。それに対して、回帰中の北海道沿岸域での行動には不明な点が多く残されている。

サケは食糧資源として重要視されてきた。日本では、1929年にサケ・マス流し網漁法が開発され、沖合域で

の漁獲が可能となった。第二次世界大戦後はマッカーサーラインによる制限を受けていたが、1952年のサンフランシスコ講和条約発効により、マッカーサーラインが撤廃され、沖合でのサケ・マスの漁獲が盛んとなった。その後、排他的経済水域の概念発達や、1993年に発効した北太平洋における溯河性魚類の系群の保存のための条約（NPAFC 条約）による公海上での漁獲の禁止等から、沖合でのサケ・マスの漁獲は激減している。

北海道におけるサケ・マス類の捕獲はそのほとんどが定置網を用いる。つまり近海で捕獲されている。一



図-1 厚内漁港位置図（国土地理院電子国土 web site より）

方で、沖合における漁獲は、平成 24 年から 26 年までは流し網によるものが全体漁獲のわずか約 5%程度であった。しかし、平成 27 年以降は、ロシアによる流し網漁禁止法の成立の影響を受けて激減している。このため近年では、沿岸域におけるサケの捕獲は重要度を増してきている^{2,3,4,5,6)}。

このようにサケ資源量の重要性から、これまで湾内や沿岸のサケ回遊行動についてはよく調べられてきた。それらは、生理学的あるいは行動学的興味で注目されることが多く、沿岸構造物による回遊への影響についての報告は少ない。

河川構造物が母川回帰したサケの遡上を阻害することはよく知られているが、それぞれの構造物の機能は我が国の社会基盤として非常に重要である。近年は、社会基盤の機能を保ちつつ、サケをはじめとして河川生態系の保全を担保するものとして魚道等の整備が進んできた。このような構造物の改善手法を考える上で、魚類の遡上数の計測は不可欠な要素であるが、その手法や精度向上は難しく研究は少ない。

河川上流部にはサケ科魚類が生息するが、例えばイワナは我が国の山地溪流に生息し、数年間の寿命を持ち生涯複数回の産卵を行う。その産卵行動では、本流から産卵場のある支流への移動を行う。しかし、河川構造物はその移動を阻害する。現在では多くの構造物に魚道等の整備が進むが、その評価を行うための基礎データとして遡上数は必要不可欠である。魚道等の遡上数の自動計測はサケ等で行われている⁷⁾が、イワナ用の自動計測システム（以下イワナカウンター）はこれまで開発されていない。

2. 研究全体の概要

構造物周辺の魚類行動追跡に関する現地調査を河川と沿岸構造物を対象として実施し、河川・沿岸構造の回遊魚に与える影響に対する基礎データを明らかにする（平成 28（2016）年から令和 3（2021）年度）。次に、河川・沿岸構造物の改善手法の構築を目指し、現地調査の実施とデータ解析手法の検討を行っていく（令和元（2019）年以降）。

3. 調査方法

3.1 平成 30（2018）年度調査地

調査地点は、厚内漁港周辺域を「漁港内」「漁港外」、河川域を「十勝川」および「厚内川」に区分し、それぞれで調査地点を 1 点以上設定した。各区域の概要を以下

に示す。

(1) 漁港周辺

厚内漁港は北海道十勝郡浦幌町厚内に位置し、太平洋に面している（図-1）。北海道太平洋側の沿岸は、親潮の影響範囲であり、親潮系水塊は栄養塩が豊富で漁獲が多い。このため、多くの漁港が設置されている。厚内漁港は、湾構造を持たず外洋に直接接する位置にある。そのため、比較的波が高く、長さ 600m 程度の大規模な堤防が配備されている（図-1）。また、堤防の東西にはサケ定置網が存在している。

サケは、漁港内に年間約 300 万尾、隣接する厚内川には 150 万尾放流されており⁸⁾、漁獲されたサケの一定割合は放流魚体であることが推察される。

(2) 河川域

1) 厚内川

厚内川は浦幌町にあり、その河口は厚内漁港の西に隣接する。厚内川では、サケが年間 150 万尾放流されている⁸⁾。

2) 十勝川

十勝川は、その源を大雪山系の十勝岳（標高 2,077 m）に発し、山間峡谷を流れて十勝ダムを經由して十勝平野に入り、畑作地帯を流下しながら佐幌川、芽室川、美生川、然別川等多くの支川を合わせて、流域最大の市街地である帯広市に入る。その後、急勾配である音更川および札内川、利別川等を合わせ、低平野に広がる畑作地帯を流下し、豊頃町において太平洋に注ぐ、幹線流路延長 156 km（全国 17 位）、流域面積 9,010 km²（全国 6 位）の一級河川である。十勝川の河床勾配は、然別川合流点付近までの上流部が約 1/200～1/450、然別川合流点付近から利別川合流点付近までの中流部が約 1/600～1/1,200、利別川合流点付近から河口までの下流部が約 1/3,000～1/5,000 である。

十勝川流域には、サケ捕獲場が千代田堰堤（十勝川）と猿別川うらいの 2 箇所あり、平成 30 年度は 117,300 尾捕獲の計画である。また、ふ化施設は 5 カ所あり、計 60,500 千尾の稚魚を放流する計画である⁸⁾。

3.2 平成 30（2018）年度調査方法

3.2.1 供試魚の準備、発信器の装着

供試魚を準備し、陸上で発信器を装着後、厚内漁港内または浦幌町定置 1 号周辺で放流した。これらの作業は 9 月 20 日および 21 日に行った。

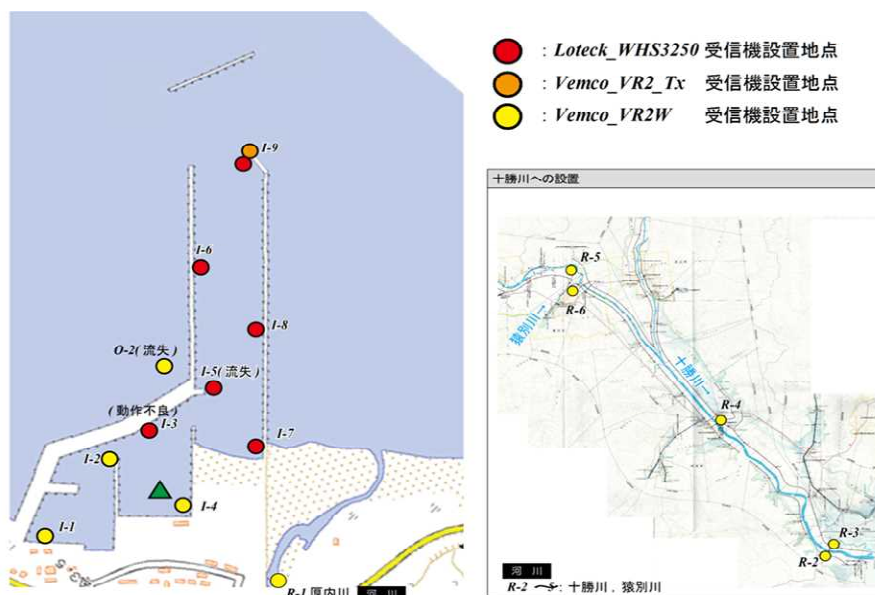


図-2 漁港内および河川での超音波受信機設置位置 (国土地理院電子国土 web site を一部使用)



図-3 漁港外の超音波受信機設置位置

サケ 15 尾は、浦幌鮭定置 1 号で採捕し直ちに船上にて、体重と尾叉長を測定後、無麻酔で超音波発信器を装着した。12 尾には Lotek Wireless 社製 MM-MR-11-45 を装着し、3 尾には Lotek Wireless 社製 MM-MR-11-45TP (温度塩分センサー付き) を装着した。

サケは船上にて発信器装着後、船上の水槽内に馴致し異常が認められないことを確認した後、浦幌定置網 1 号で 12 尾放流した。また Lotek Wireless 社製

MM-MR-11-45TP (温度塩分センサー付き) を装着したサケ 3 尾は、漁港まで持ち帰り、漁港内で放流した。

3.2.2 超音波受信機の設置

超音波受信機は、厚内漁港内 10 基、河川 6 基 (厚内川 1 基および十勝川 5 基)、厚内漁港外 6 基合計 22 基設置した(図-2 および 3)。使用した受信機は、Vemco 社製 VR2Tx、Lotek Wireless 社製 WHS3250 および Lotek Wireless 社製 WHS3250L である。



図-4 超音波受信機設置位置と観測区分（広域図）

漁港内の超音波受信機は、超音波発信器および陸上構造物をロープで接続し、堤防等での擦れ防止のため、ロープはホースで養生した。超音波受信機は海底から30～50cmの高度で設置した。河川への設置は漁港内のそれと同様と、可能な限り川底近くに設置した。

漁港外の超音波受信機はO-1とO-6では、超音波受信機は上部に赤白測量旗とフラッシャーを付け、その下にフロート、受信機および土嚢がロープで接続される系で設置した。O-2では、漁港内のそれと同様に堤防から漁港外に向けて設置した。O-3とO-4では、管理者である北海道帯広建設管理部に許可をもらい航路標識下部のチェーンに結束バンドとロープを用いて設置した。O-5では、物理観測機器と一緒に設置した。

超音波受信機は設置前に作動確認を行い、作動が良好であることを確認しているが、漁港内I-3に設置したそれは、観測終了後データ回収を試みたところ、データを回収することができなかった。I-5およびO-2に設置した超音波受信機は、流失し回収することができなかった。

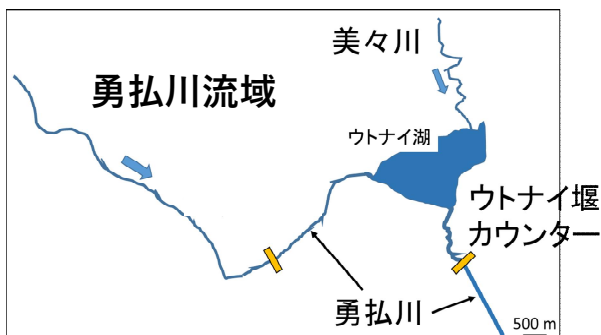


図-5 勇払川とウトナイ堰

3.3 令和元（2019）年度調査地

3.3.1 勇払川ウトナイ堰

2019年度は、サケの遡上数の計測精度を改善する手法を検討するために、従来から苫小牧市勇払川（図-5）に設置されている魚類遡上数自動計測システム（以下サケカウンターと呼ぶ）を用いた。

3.3.2 九頭竜川水系峠川桂清水

イワナカウンターは、岐阜県郡上市石徹白を流れる石徹白川水系峠川（図-6）に流入する桂清水に設置した。石徹白は標高700m、冬期は平均累積積雪深

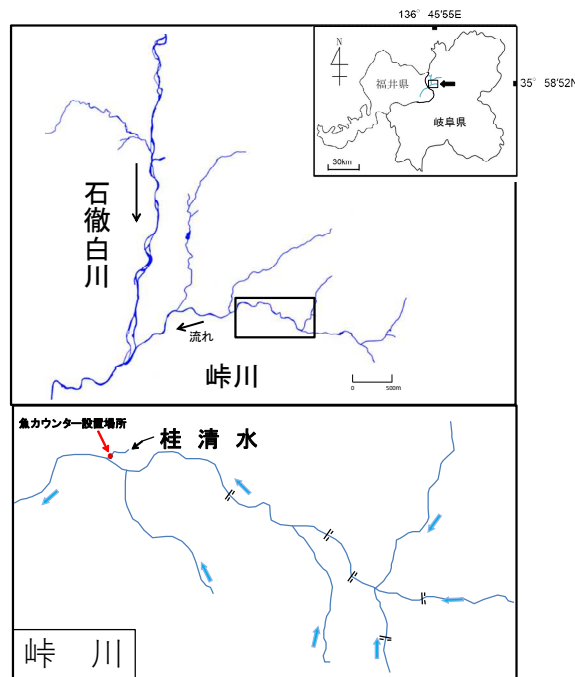


図-6 イワナカウンターの設置場所位置図

(1981-2010年)が約3.5mにもなる積雪寒冷地である。桂清水は湧水から本流へ流れる平均水面幅2.3m、流量が26 l/sの細流である。

3.4 令和元(2019)年度調査方法

3.4.1 サケカウンターによる計測とタイムラプスカメラ撮影

サケカウンターはウトナイ湖流出口に位置するウトナイ堰魚道に設置した。木製魚道(2.0m×0.8m(長さ×幅))上の3本のセンサー電極に対象魚が通過すると、流水の電気抵抗が変化し、センサーから出力される電圧信号が左右対称状のパルス波形を描く。パルス波の形状により遡上・降下を判定して遡上数を計数する。ただし、対象魚が水面近くや魚体を反転させてセンサー上を移動した場合は左右対称のパルス状波形にはならず、後述するシステムでも判定が難しい。サケの遡上数の計測は2018年8月から2020年2月まで行ったが、比較的遡上数の多かった9月から12月のデータを今回使用する。

カウンターセンサーからの信号の読み取りはFishCountSystem_Anlyzer03(田村電子工房、高崎市)を使用した。これは、遡上個体を作る波形だけではなく、遡上か降下を自動判別する能力があり、そのほかに判定不能なものも計数する。また、閾値を設定することで、サケではない小型魚を一定の精度で判別する。このようなシステムで判別できない遡上を確認するために、木製魚道の側面にアクリル板を貼り付け、そこからタイムラプスカメラ(TLC200pro、Brinno社製、台湾)を用いて画像を撮影した。サケカウンターの計測期間の中で濁りや夜間等を除いて条件のよい時を選んで撮影した映像を今回の報告では使用する。

3.4.2 イワナ遡上数計測装置(イワナカウンター)

峠川支流の1つの桂清水と峠川本流の合流地点において2019年9月30日から12月18日の期間にイワナカウンターを設置した。イワナカウンターにはセンサー部とデータ記録解析部からなる。センサー部には木製の水路に3本のセンサー電極を10cm間隔で取り付け、両端に5.0Vの電圧を印加した。センサーの信号の読み取りにはFishCountSystem_Analyzer03(田村電子工房、高崎市)を用い、木製水路を通過した魚の遡上数、降下数を計数した。本研究では閾値を1000mVに設定して遡上、降下と判別されたものを研究対象とした。ただし、魚カウンターが稼働せずデータ欠測期間が存在した。

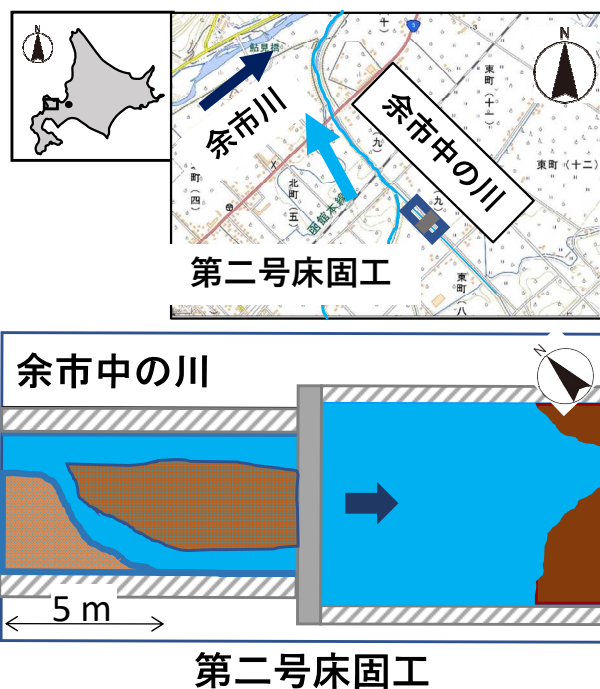


図-7 余市中の川の調査地位置図

3.5 令和2(2020)年度調査地(余市川水系中の川)

余市川水系余市中の川第二号床固工(図-7)において、北海道河川環境研究会により2019年と2020年に簡易魚道が設置されており(図-8)これを使用した。第二号床固工は堤体高が1.35m(水面比高0.8m)であり、サケ科魚類の遡上が可能と考えられ、土のう積みにより水面比高0.95m程度に嵩上げを行っている。この簡易魚道はトラック荷台の被いに使われるシートを魚道底部に用いたもので、容易に形状を変更可能な形状可変型布製簡易魚道である。本研究では汎用性のある河川構造物の改善手法の構築を目的として、この簡易魚道を実験的にもちいて魚道形状を変化させる前後に取得された魚類行動データを利用した。2019年の魚類行動データは前述の北海道河川環境研究会が計測したデータを使用した。

3.6 令和2(2020)年度調査方法

3.6.1 千代田新水路階段式魚道のサケカウンター

十勝川流域には、十勝川の治水安全度を向上させることを目的に日本最大となる起伏式ゲートを4門配置した千代田新水路が2007年に運用を始めている¹⁰⁾。このゲートを回避するように新水路右岸に階段式魚道が設置されており、サケカウンターをこの魚道に設置した。3本のセンサー電極が取り付けられた木製魚道(2.0m×0.8m(長さ×幅))とのその架台を魚道

の最上流部に設置した。このセンサーには微弱電流がながれ、電極上を対象魚が通過すると、センサーから出力される電圧信号が生じて遡上および降下を判定して遡上数を計数する。

3.6.2 可変型布製簡易魚道の設置とシロサケ遡上数計測装置（サケカウンター）の設置

余市中の川第二床固工付近に設置された魚道形状可変型の布製簡易魚道（以下布製魚道）は、2019年と2020年のシロサケあるいはサクラマスといったサケ科魚類遡上期に設置された。魚道を通過する魚類はシロサケ、サクラマスおよびヤマメが観察され、これらうちシロサケとサクラマス（以下サケ科魚類）の遡上を対象とした。

床固工堰堤上流部から10 m下流に直線状に伸びる形状の魚道が2019年9月6日に北海道河川環境研究会により設置された（図-8）。サケ科魚類の遡上数は魚道上流出口におけるトラップ捕獲あるいはビデオ撮影により計測された。計測は9月6日から13日、19日から23日、26から28日および30日に河川環境研究会で行われた。

2020年には堰堤上流から4 m下流に設置した長さ1.7 m、幅0.9 mの折り返し箱へ接続するように布製魚道が設置され、さらに魚道を延ばし折り返し箱から堰堤直下の落水部に魚道入口を設置した（図-8）。遡上してきたサケ科魚類は、落水部に集まる傾向が高いことから折り返して落水部に魚道入口を設置された。この設置は北海道河川環境研究会がおこなった。

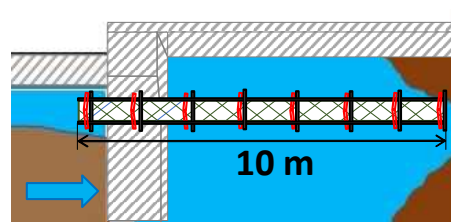
遡上数の計測は布製魚道の上下流に設置されたサケカウンター（センサー電極を30 cm間隔、5.0 V電圧印加）により行い、センサーの信号からの遡上および降下数の読み取りにはFishCountSystem_Analyzer03（田村電子工房、高崎市）を用いた。本研究では閾値を1000 mVに設定して遡上および降下と判別されたものを研究対象とした。計測は2020年9月3日から11月18日まで行った。

4. 平成30（2018）年度の結果と考察（サケの遊泳行動）

サケの行動を把握するために設置した超音波受信機は、設置位置によって、漁港内、漁港外（近傍）、漁港外（浦幌定置2号）、漁港外（浦幌定置1号）および河川域に分類した（図-4）。

発信器が装着されたサケは、放流後の動きで大きくA個体群からD個体群の4つに分類することが出来た。A個体群は漁港内で放流したのち、漁港外に移動した

a) 2019年



b) 2020年

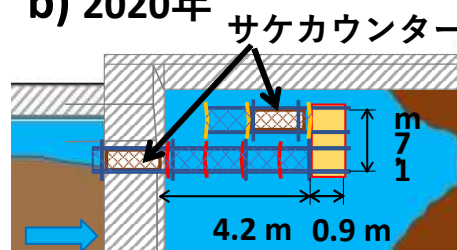


図-8 余市中の川二号床固工における形状可変型布製簡易魚道。2019年に設置された直線型(a)、2020年に設置された折り返し型(b)魚道

(3尾)。B個体群は漁港外（浦幌定置1号）で放流されたのち、定置網で捕獲された（4尾）。C個体群は漁港外（浦幌定置1号）で放流されたのち、浦幌定置2号近傍を通過した（4尾）。D個体群は漁港外（浦幌定置1号）で放流されたのち、漁港外近傍を通過し、さらに浦幌定置2号近傍を通過した（3尾）。以下では各個体群の行動を詳細に記述する。

4.1 A個体群

A個体群は放流直後もしくは翌日には3個体全てが漁港外へと移動した（図-7）。漁港放流直後は放流地点である漁港内の奥側で数時間から1日留まるものの、一旦移動すると漁港内の奥から沖防波堤の北側を通過

し、直ちに漁港外へ移動した。3 個体中 1 個体は浦幌定置網 3 号の南箱で捕獲されたが、漁業者の協力により、再放流された。その後の超音波発信器の受信は認められなかった。本結果はサケは漁港内に迷入した場合でも、本来の回帰ルートに戻りうることを示唆している。

漁港内に放流したサケには、深度と温度が測定出来る超音波発信器を装着した。3 匹のデータはすべて約 0.5 m~2.1 m の範囲の深度であった。このことから、ほぼ一定の深度にサケがいたことが分かる。温度センサーについても同様で、ほぼ全てのデータが一定であり、12.5 °C~15 °C の範囲を遊泳していたことが示された。

4.2 B 個体群

B 個体群は漁港外（浦幌定置 1 号：図-4-参照）で放流後、漁港外（浦幌定置 1 号）でのみ超音波が受信され、その後定置網に捕獲された 4 尾である。

No. S7（オス）、No. S9（オス）そして No. S14（メス）は 9 月 20 日放流後東に進み、放流から 2 日後の 9 月 22 日にはそれぞれ、浦幌定置 1 号から北東方向約 15 km の音別定置 1 号、約 10 km の 2 号そして約 4 km の 4 号で捕獲された。

サケはベーリング海やアラスカ湾で成長し、南西方向に移動し北海道に来る。そのため、捕獲後の東への最大 15 km 程度の移動は、想定されていなかった。

No. S11（メス）は放流から 4 日後の 9 月 24 日に豊頃定置 3 号で捕獲された。豊頃定置 3 号は十勝川河口より西側に位置している。このためこの個体はさらに西へ回帰する個体の可能性も考えられる。

4.3 C 個体群

C 個体群は浦幌定置 1 号で放流された後、漁港外近傍（図-4）を通過せずに、浦幌定置 2 号（図-4）周辺を通過した個体群である。C 個体群は浦幌定置網 1 号の中間地点付近、つまり沿岸からの距離おおよそ 1.5 km で放流されている。その後、沿岸からの約 1.5 km の距離の港外（近傍：図-4）を通過せず、約 2 km 沖合の漁港外（浦幌定置 2 号：図-4）周辺の通過が確認されている。また、上述した通り、B 個体群も漁港外（浦幌定置 2 号）を通過していないことから、浦幌定置 1 号で放流した 12 個体のうち 8 個体が漁港外（浦幌定置 2 号）を通過していないこととなる。このことは、一度沿岸に（浦幌定置 1 号）に接近したサケはある程度の範囲で、より沖合に移動することを示唆している。

4.4 D 個体群

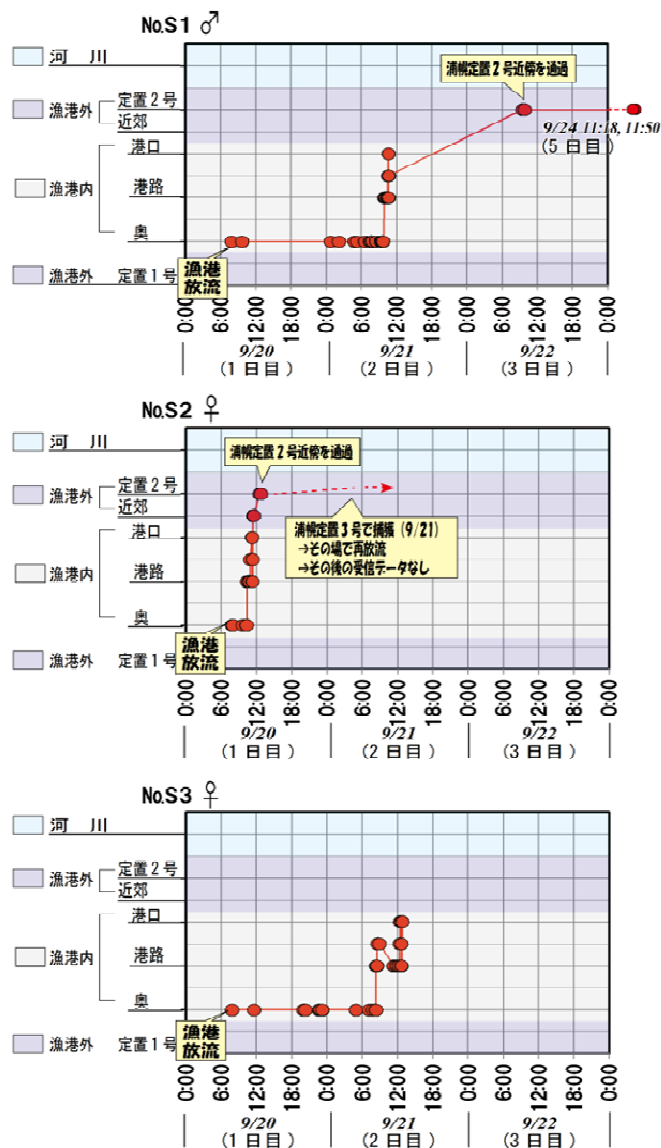


図-9 A 個体群の行動

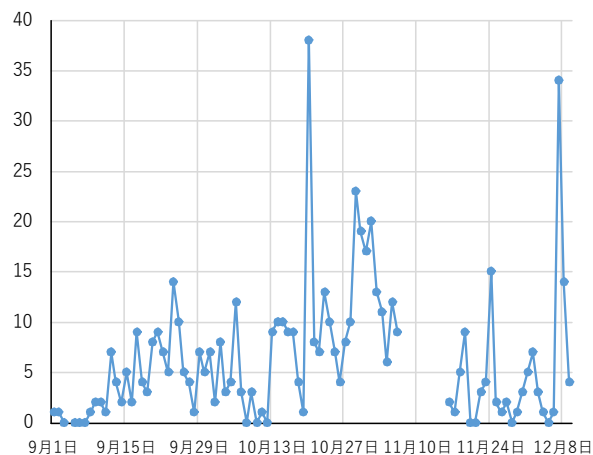


図-10 勇払川のサケ遡上数。データがない部分はシステム不具合によるデータ欠損を示す。

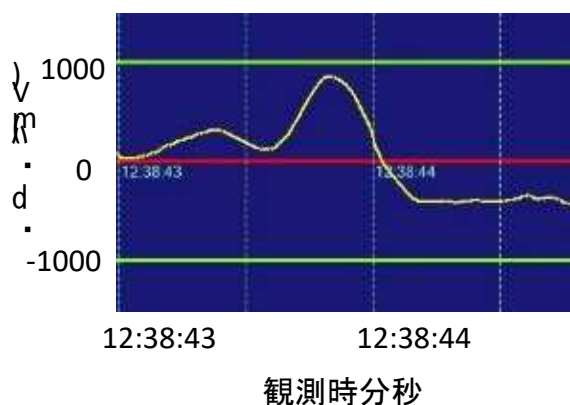


図-11 サケカウンターによる判定外に判定された波形。

D 個体群は浦幌定置 1 号近傍で放流された後、漁港外近傍 (図-4) を通過して移動していた。この個体群の行動は、C 個体群の行動と似ているものの、漁港外浦幌定置 2 号 (図-4) 周辺を通過している点で異なっている。

No.S5 と No.S15 は漁港外 (近傍) を通過後、漁港外 (浦幌定置 2 号) を通過した。それに対し、No.S13 は漁港外 (浦幌定置 2 号) での受信記録はないものの十勝川河口での受信記録は存在する。厚内漁港から、十勝川河口までは数百メートル単位で定置網が配置されており、放流した地点と同程度もしくはより沿岸を十勝川河口まで移動したとは考え難い。また B 個体群と C 個体群が沖合に出て行っていることから、サケは母川回帰の途中で陸に近づいたり遠ざかったりを繰り返しながら移動していると考えられた。厚内漁港から十勝川河口までの定置網の先端に超音波受信機を設置する等の、面的に広範囲な観測をさらに行うことで、このような仮説が明らかになるかもしれない。

4.5 十勝川に到達した個体

放流した 15 個体中、6 個体が十勝川河口周辺に到達していたことが、十勝河口橋上流約 4 km 上流に設置した受信機の受信状態から確認された。このうち河川(猿別川)で捕獲されたものは 2 個体だった。これ以外の個体は、十勝川本川での産卵や捕獲場以外での捕獲、死亡等が考えられた。また、河口周辺まで到達したにもかかわらず別の河川に遡上している可能性もある。

発信器を装着して放流したサケ 15 個体のうち、6 個体の超音波を十勝川河口から約 4km 上流の十勝河口橋に設置した超音波受信機で検出した。このう



図-12 サケカウンターのセンサーを通過するシロサケ。魚体を反転させていることがわかる。

ち十勝川水系で捕獲されたものは 2 個体のみであった。この原因として、下記 3 点が考えられたが、本調査では原因の特定は出来なかった。

- ①十勝河口橋周辺まで到達したが、再び降海し、別の河川に遡上した
- ②十勝川流域で獲場以外で捕獲された
- ③十勝川流式内の超音波受信機の受信エリア外で死亡した

これらの仮説の検証には、河口域周辺への受信機の複数設置が必要である。

5 令和元 (2018) 年の結果と考察

5.1 サケカウンターシステムの遡上判定に対するカメラ画像による補正

調査期間中のサケカウンターによるサケと思われる遡上数を図-8 に示した。日による変動が多いものの、9 月および 10 月は一定量のサケと思われる個体が遡上しているのが計測された。12 月に入って多くの個体 (37 個体) が遡上した。さらに、システムにより判定

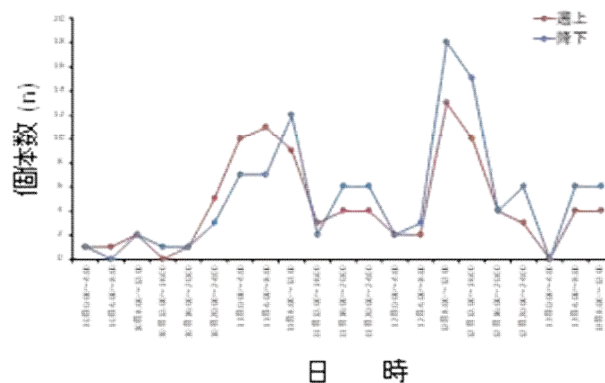


図-13 ピーク時の 4 時間ごとの本流と桂清水間のイワナ遡上数

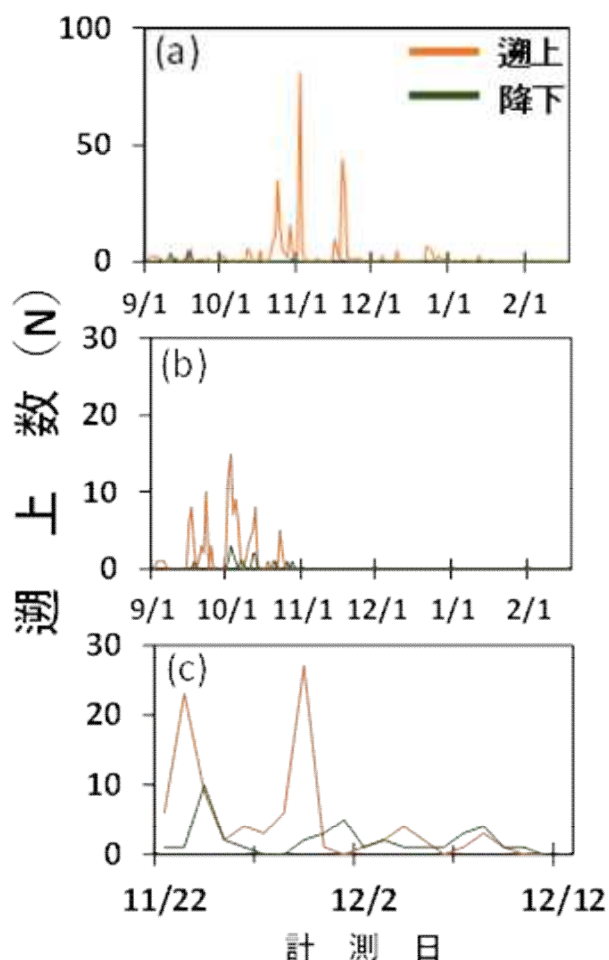


図-14 勇払川ウトナイ堰魚道(a)、トキサタ堰魚道(b)および十勝川千代田新水路階段式魚道(c)におけるシロサケ遡上及び降下数

外に分類された波形が3個体分あった。

この日(12月7日)の日中はタイムラプスによる画像撮影も同時に行っており、37個体午前7時から17時までのサケカウンターにより遡上と判定されたケース(27個体)すべてでサケの画像が撮影されていた。つまり、誤判定の確率は0%であった。

しかし、システムにより、判定外となった7つの波形のうち1つ(図-9)に対応する時間12時38分に撮影された画像にもサケの遡上シーンが撮影されていた(図-10)。

ここでの波形(図-9)は最大値が±1000 mVを超えていなかった。このときの判定基準が±1000 mVに設定されていたために判定外に判定されてしまったと考えられる。また、画像からこの個体は遡上時に魚体を反転させ水面近くを通過して遡上していることがわかる(図-10)。そのため、十分な体長があったにもかかわらず

らず、センサーを通ったときに1000 mVの電位に達しなかったと思われる。

このようにカウンターだけでは遡上と判定できなかった遡上形態を画像撮影することで遡上と判定することができた。精度の高い遡上数の把握にはこの画像との組み合わせを用いることが有効だと考えられた。

5.2 イワナカウンターによるイワナの遡上実態

桂清水では、9月30日から12月18日の期間に延べ遡上数383個体、降下数341個体が確認された。遡上数が最も多かったのは11月11日であった(図-11)。

サケを対象としたサケカウンター⁷⁾では、受信したパルス派の大小からサケと小型魚を判別できることがある。しかし、この桂清水に生息するイワナ、アマゴおよびカジカの体長の違いはサケと小型魚ほど大きくなく、この方法により本カウンターを通過した魚類の種類は判別できない。そのため、本結果がイワナによるかどうかは判別できない。しかし、桂清水で同時期に行われた調査では、イワナ、アマゴおよびカジカの捕獲数はそれぞれ、85個体、3個体および0個体であった。よって、今回計測された移動数はイワナによるものだと考えられた。

4時間ごとの遡上数と降下数を解析すると、11日0時~12時の時間帯に同日の全遡上数の73.2%、降下数の65.0%がみとめられた。12日には8時~16時の時間帯に同日の全遡上数の67.6%、降下数の68.8%が認められた(図-11)。一般的にサケ・マス類の産卵遡上は日中に活発化し、夜間に停滞する日周変化を示すことが知られ⁹⁾、本研究の結果を支持している。

イワナの遡上数・降下数のピークが認められた11月11日および12日の前には1週間以上降雨が観測されなかったが、11月11日午後12時から12日午前2時までの14時間に計23 mmの降水があった(最高3 mm/h)。眞山⁹⁾は、サケ・マス類の遡上に影響を与える重要因子として河川流量の増加を指摘している。本研究でみられた結果も降雨後の流量増加とともに遡上数が増加したと推測される。

6 令和2(2020)年の結果と考察

6.1 誘導水路形状や物理環境が異なる箇所におけるサケカウンターによる遡上数および降下数の計測

勇払川のウトナイ堰魚道、トキサタ堰魚道および十勝川千代田新水路階段式魚道に設置されたサケカウンター誘導水路の諸元と流速を示した(表-1)。ウトナイ堰魚道と新水路階段式魚道の誘導水路は、水路幅、水

表-1 勇払川ウトナイおよびトキサタ堰魚道および十勝川千代田新水路階段式魚道に設置された、サケカウンター用誘導水路の流速及び諸元

設置場所	流速 (cms ⁻¹)	水路幅 (cm)	水路長×水路高さ(cm)
ウトナイ堰魚道	87.5±20.1	80.0	200×50
トキサタ堰魚道	99.9±15.4	90.5	100×70
新水路階段魚道	143.0±21.5	80.0	200×50

路長および高さは同様に、80 cm、20 cm および 50 cm だった。しかし、流速は異なりウトナイ堰魚道の平均値が 87.5 cm/s で、段式魚道の 143.0 cm/s より小さい。トキサタ堰魚道はこれらの魚道よりも水路長が短く水路幅が大きい。また、魚道の流入口に誘導水路がおかれていることから、流速が小さく 100 cm/s を下回りばらつきも小さい。誘導水路の設置では、水面波がなるべく生じない場所が選ばれるが、このような適切な場所が存在するかどうかは設置する魚道形状に依存している。そのため、誘導水路の流速値は設置する魚道の特性が大きく影響していると考えられる。

流速、水路幅、水路長などが異なる水路でも、これらのすべての誘導水路でシロサケの遡上数と降下数が計測できており（図-14）、現在このサケカウンターはこの範囲であれば長期間自動計測できる手法といえる。このような手法により河川構造物（魚道）の改善手法につながるデータである遡上数あるいは降下数の取得が可能になった。

6.2 形状や物理環境が異なる誘導水路におけるサケカウンターによる遡上および降下数の計測

床固工堰堤から下流に向けて直線状に伸びた魚道と折り返し型魚道による遡上数を計測した（図-15）。直線型魚道と折り返し型魚道とでは、計測期間が異なることから、それぞれの年で最もサケ科魚類の遡上が多かった時期を抽出して日当たりの遡上数で比較した。2019 年は 9 月 26 日から 28 日で遡上数は 3.0 個体/日、2020 年は 9 月 25 日から 30 日で 4.7 個体/日であった（図-15）。直線状魚道より折り返し型の魚道のほうが多かった。2019 年と 2020 年では計測方法に違いがあり、今回観測された遡上数の違いは、魚道形状の違いのほかに、サケ科魚類が魚道上流出口に設置されたトラップを忌避して遡上しなかった可能性は否定できない。しかし、2019 年は 17 日間の計測期間のうち、サケ科魚類がトラップや魚道内を遊泳した期間は 4 日間であり、それ以外は

魚道の入口付近や堰堤落差付近で確認されている。一方で、2020 年は計測期間のうち、遡上最盛期以外に計測初期の 9 月 17 日から終期の 11 月 10 日ころまで少ないながら遡上計測されている。また、遡上したサケ科魚類は、堰堤等からの落水に集まることがよく知られていることから、2019 年に遡上数が少なかったことは、堰堤落水部分から遠く離れた下流に入口を設けた形状による影響が大きいと考えられた。これらのデータは構造物（魚道）の改善手法を明らかにするものである。

7 まとめ

平成 30（2018）年度は、水産有用種の行動を構造物としての漁港周辺で調査し、沿岸構造物の回遊魚に与える基礎データを追加して、河川・沿岸構造物の改善手法構築に資するデータ蓄積を行った。

令和元（2019）年は、河川構造物の改善手法構築に必要な魚道遡上量の精度向上に向け、魚類遡上数自動計測システムの計測と同時に魚道内の画像撮影を試み、新たな方法を検討した。さらに、上流域での産卵環境改善手法構築に向けて、中型水産有用種の移動数自動

a)直線型2019年



3.0 個体/日

b)折り返し型2020年



4.7 個体/日

日あたり遡上数(最盛期)

図-15 余市中の川における形状の異なる布製魚道のサケ科魚類の日当たり遡上数。(a)直線型魚道(2019年)
(b)折り返し型魚道

計測装置の開発を行った。今後は、上流域の定量的な魚類行動把握手法の構築に向けて継続的にデータ収集解析を行っていく。

令和 2 (2020 年) は流速、水路幅、水路長などが異なる水路でも、遡上数あるいは降河数を自動計測する技術を構築し、河川構造物 (魚道) の改善手法につながるデータ取得を可能にした。また、可変型魚道を実験的に用いることで、形状に対応した魚類行動データを取得することが可能となり、汎用性のある河川構造物の改善手法の構築に寄与する成果が得られた。

参考文献

- 1) 浦和茂彦：日本系サケの回遊系と今後の研究課題：さけ・ます資源管理センターニュース、No. 5、pp. 3-7、2000.
- 2) 農林水産省：北海道農林水産統計年報 (平成 24 年)、北海道農政事務所、2012.
- 3) 農林水産省：北海道農林水産統計年報 (平成 25 年)、北海道農政事務所、2013.
- 4) 農林水産省：北海道農林水産統計年報 (平成 26 年)、北海道農政事務所、2014.
- 5) 農林水産省：北海道農林水産統計年報 (平成 27 年)、北海道農政事務所、2015.
- 6) 農林水産省：北海道農林水産統計年報 (平成 28 年)、北海道農政事務所、2016.
- 7) 布川雅典・権田豊・中村繁人：サケカウンターによるサケ(*Oncorhynchus keta*)移動数計測：SALMON 情報、No. 14、pp. 34-37、2020.
- 8) 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 北海道区水産研究所：平成 30 年度さけます人口ふ化放流計画集録、pp.97、2019.
- 9) 眞山紘：さけ・ます類の河川遡上生態と魚道、さけ・ます資源管理センターニュース、13 号、pp.1-7、2004
- 10) 島田友典, 渡邊康玄, 横山洋, 石川伸, 吉樹岳志, 武田淳史, 大島省吾：十勝川千代田実験水路の基礎的な土砂挙動特性、応用力学論文集、11 巻、pp. 699-707、2008