

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 3（2021）年度まで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。平成 28（2016）年度は、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（2017）年度は、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（2018）年度は、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（2019）年度は、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（2020）年度は、前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した。令和 3 (2021) 年度は、収集したデータの解析を進めることで、保護育成機能のうち、魚類への高波浪からの避難場機能、港内の静穏域創出機能を利用したアサリ垂下養殖適地、主要調査漁港での夏期の餌場機能に関する評価手法についてとりまとめた。本研究を通して、漁港港湾等の沿岸構造物が寒冷海域の水産生物種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がる有益な成果を得ることができた。

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蛸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。

利尻島沖人工魚礁の近傍では魚類の餌料として重要な、底生生物(多毛類)が対照区に比べて多く、水深 90m において人工構造物が餌料生物の培養に寄与していることを確認したほか、利尻島沖人工魚礁の周辺海域で採取された魚類と餌料生物の安定同位体比分析により、ホッケとカレイの食物網が解明された。また、知床沖人工魚礁近傍において、高いマクロベントスの生息密度が確認され、人工魚礁が持つ餌料生物の蛸集・増殖の効果が他海域でも同様に表れていることが確認できた。さらに、沖合域の人工魚礁における捕食者（魚類）と被食者（餌料生物、餌料物質）の餌料経路に基づいた生態系を解明し、それに基づいて生態系モデル Ecopath による沖合域の漁場整備効果の評価手法を構築した。

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正な環境評価技術や種苗放流手法の確立を目標とした。最終年度である令和 3 (2021) 年度においては、成果の一般化を図るため積丹半島東部に位置する漁港に調査対象場所を拡大し、ナマコの増養殖を効率的かつ効果的に進める上で考慮する必要のある漁港内環境特性について新たな知見を取得すると共に、これまで得られた成果の妥当性や適用性を示した。本研究を通して得られた成果については、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としてマニュアルにもまとめられ、今後の幅広い普及を目指した一層の取り組み等を通して、漁港の既存ストックの水産生物増養殖場としての有効活用の推進に貢献する事が期待される。

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。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明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。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。令和 3 (2021) 年度はサケ科魚類の行動を魚カウンターを用いて計測し、流速の増加とともに遡上中止行動（下流戻り）が増加する関係を明らかにして、魚類行動の遊泳負荷に着目した河川構造物（魚道）の評価手法を構築した。

(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。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。また、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できた。さらに、継続調査とともに、収集したデータの解析を進めることで、沿岸構造物における保護育成機能の強化および有効活用技術の有用性を確認できたことから、これらの技術についてとりまとめ、整備技術の開発を行った。

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。3次元数値流体解析モデル OpenFOAM により構造物(魚礁ブロック)周辺の粒子挙動解析を行い、低次生産の餌料である粒子状有機物質の堆積量に与える人工魚礁構造物の影響を評価することができた。また、数値解析、現地観測データ、漁獲統計データで得られるパラメータを生態系モデル Ecopath モデルに入力・解析することで、人工魚礁の整備前後での漁業生産量を評価することができた。これにより、沖合域の漁場整備手法を提案し、沖合漁場整備手法マニュアルにとりまとめた。

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。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(2021)年度においては、これまでとは異なる海域、環境下にて本研究課題を通じて開発を進めてきた放流効果を高める礁の再現性が示された。当該成果については、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としてマニュアルにもまとめられ、今後の幅広い普及を目指した一層の取り組み等を通して、漁港の既存ストックの水産生物増養殖場としての有効活用の推進に貢献することが期待される。

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。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)年度は、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、魚カウンター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計測装置の開発を行った。令和2(2020)年度は流速、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、形状可変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。令和3(2021)年度は昼夜の小型魚遡上数を長時間

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

連続計測できる技術をわが国で初めて構築し、これにより、小型魚用魚道周辺における空間的行動を把握する実験を行い、数百万個体に上るアユ稚魚遡上数を計測することができた。

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.

As a result of the study toward two goals.

The specific results are as follows.

①We elucidated the mechanism by which coastal structures such as fishing ports function as conservation and breeding grounds for aquatic organisms in cold waters, and developed a function evaluation method.

We confirmed the usefulness of the technology for strengthening the protection and nurturing function and effective utilization technology in coastal structures.

②Based on the data acquired in the actual sea area, we grasped the effect of feed culture in large-scale fishing grounds and clarified the mechanism of feed culture.

We constructed a design method for facilities that efficiently and effectively supply feed in offshore areas.

③We obtained knowledge about the environmental characteristics that should be considered in order to promote the efficient and effective cultivation of sea cucumber. In addition, the world's first clarification of predatory organisms that have a significant effect on the survival of sea cucumber seedlings.

The high survival and growth of juvenile sea cucumbers in the reefs created for the purpose of avoiding predation by predatory organisms on sea cucumbers were confirmed, and it was shown to be highly effective as an intermediate breeding base for feeding damage prevention reefs.

④We measured the behavior of salmonids using a fish counter on a fishway constructed in a river, and

constructed an evaluation method for facilities focusing on the swimming load of fish behavior.
By using the shape-variable fishway in the field, we acquired fish behavior data corresponding to the shape and developed a method for improving river structures.

Keywords : coastal structures, ability to protect and nurture, enhancement of food resources, cultivation fishery, sea cucumber, fishway, 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）

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。令和 3 年度(2021)は、魚類の高波浪からの避難場機能、二枚貝垂下養殖における静穏域創出機能やそれらの餌場機能に関する評価手法についてとりまとめた。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を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、間隙水やクロロフィルa(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



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	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11	
		港奥	港外	捨石 岸壁	泊地	被覆 根固ブ ロック	岩盤 岸壁	泊地	被覆 根固ブ ロック	泊地	被覆 根固ブ ロック	港口	被覆 根固ブ ロック	砂地	消波ブ ロック	岩礁							
連続 機器 観測	水温		◎B	◎S						◎S		◎S											
	塩分			◎S						◎S		◎S											
水試料 分析	Chl.a, Pheo.		◎	◎						◎		◎											
	粒状有機物(POC, PN, PP) 栄養塩(NO ₃ -NO ₂ , NH ₄ , PO ₄) 動物プランクトン		◎	◎						◎		◎											
堆積物 試料 分析 (表層 1cm)	Chl.a, Pheo.									◎		◎											
	堆積有機物(TOC, TN) 栄養塩(NO ₃ -NO ₂ , NH ₄ , PO ₄) 粒度組成 底生生物									◎		◎											
魚類調査 【基盤 研究】	刺網		◎	◎						◎		◎											
	卵稚仔ネット ダイバー 間欠カメラ		◎	◎						◎		◎											

◎: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	1		2		3		7		8		9		10		11	
		港奥	港外	捨石 岸壁	泊地	被覆 根固ブ ロック	岩盤 岸壁	泊地	被覆 根固ブ ロック	港口	被覆 根固ブ ロック	砂地	消波ブ ロック	岩礁			
連続 機器 観測	水温			◎B	◎S					◎S		◎SB					
	塩分				◎S					◎S		◎S					
水試料 分析	Chl.a, Pheo.			◎						◎		◎					
	粒状有機物(POC, PN) 栄養塩(NO ₃ -NO ₂ , NH ₄ , PO ₄) 動物プランクトン			◎						◎		◎					
堆積物 試料 分析 (表層 1cm)	Chl.a, Pheo.									◎		◎					
	堆積有機物(TOC, TN) 栄養塩(NO ₃ -NO ₂ , NH ₄ , PO ₄) 粒度組成 AVS 底生生物									◎		◎					
魚類調査	刺網			◎	◎					◎		◎					
	卵稚仔ネット ダイバー 間欠カメラ 胃内容物			◎	◎					◎		◎					

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

きず、また2017年9月以降は水温塩分計の故障により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

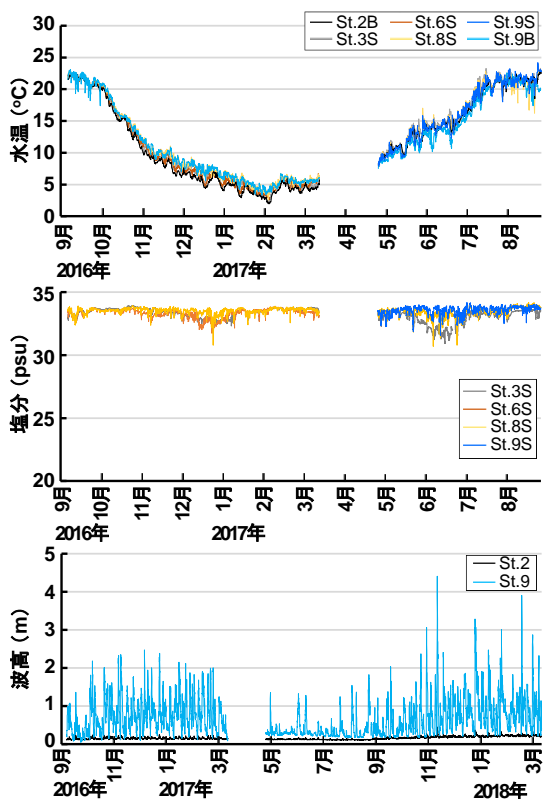


図-3 寿都漁港内外の水温、塩分、有義波高

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℃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℃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±0.03m）と、港外（最大4.41m、0.85±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。

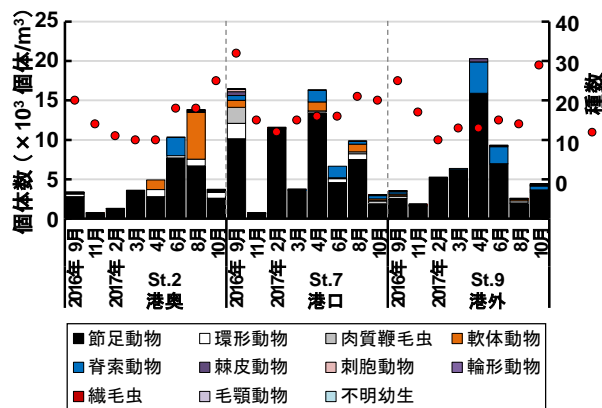


図-4 寿都漁港内外の動物プランクトン時空間分布

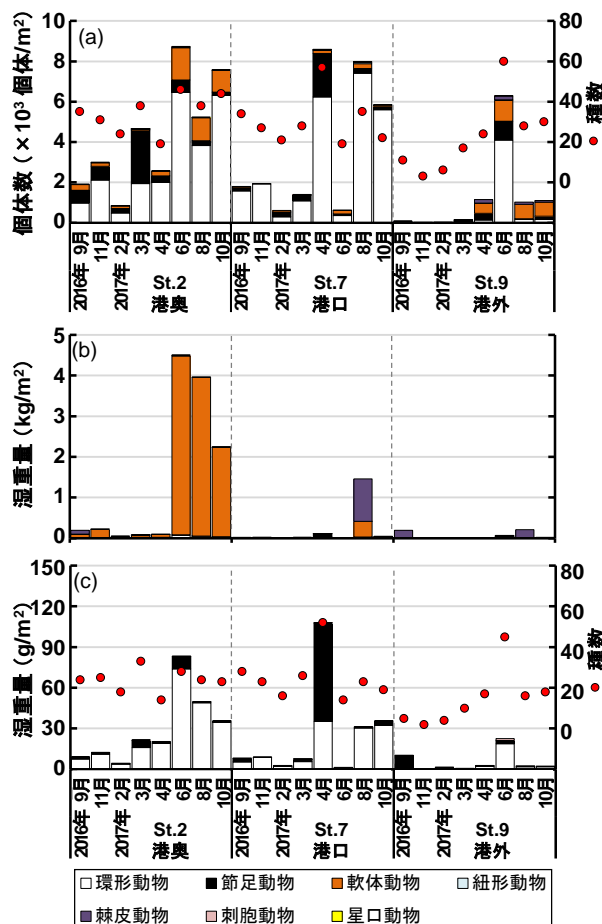


図-5 寿都漁港内外の底生動物の(a)個体数、(b)全湿重量、(c)軟体、棘皮動物を除いた湿重量の時空間分布

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 <i>Maldanidae</i> 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>Grandidierella 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)	<i>Ampithoidae</i> 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)の調査結果を図-6に示す。なお、水柱のクロロフィルa(Chl.a)、フェオ色素(Pheo.)は海洋観測指針の蛍光法、栄養塩はJIS K0102(2013)、堆積物のChl.a、Pheo.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2.7 μg/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、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。

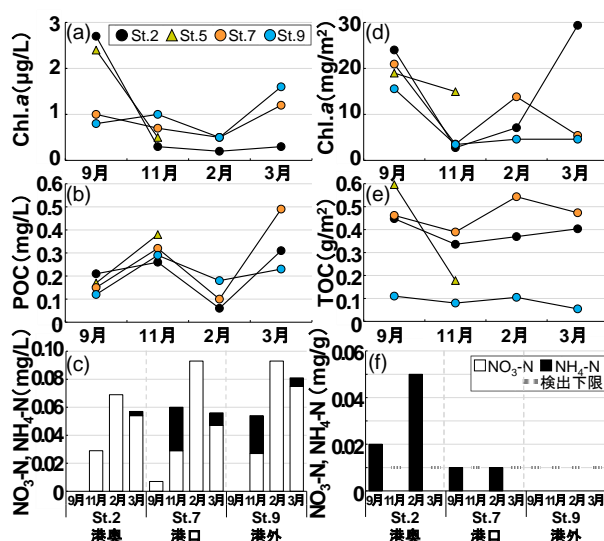


図-6 表層水((a)-(c))、堆積物((d)-(f))でのChl.a、有機炭素、硝酸およびアンモニウム態窒素の時空間分布

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 Pheo.、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、Pheo. 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、港内に比べ港外が高く、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 : $47.4 \pm 59.4 \text{ mg/m}^2$)。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

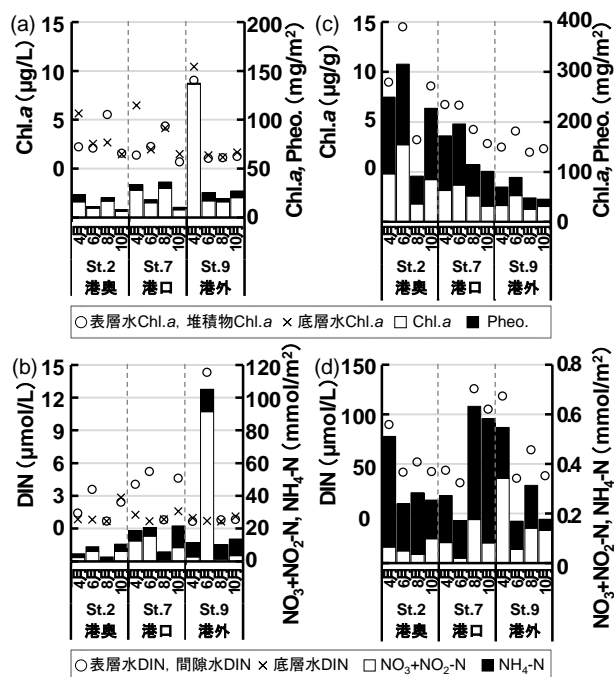


図-7 水柱((a)-(b))、堆積物((c)-(d))での Chl. a、Pheo.、DIN の濃度および積算現存量の時空間分布

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。

4. 4 魚類

2016年9月から2018年10月までマルチネット（開口部 1m×0.5m、目合い 0.335m）により採取した卵および稚仔魚とともに、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であった。ネズポ科は9、11月と8月の夏期中心、カレイ科は4、6月に確認され、4月に港口区で多かった。

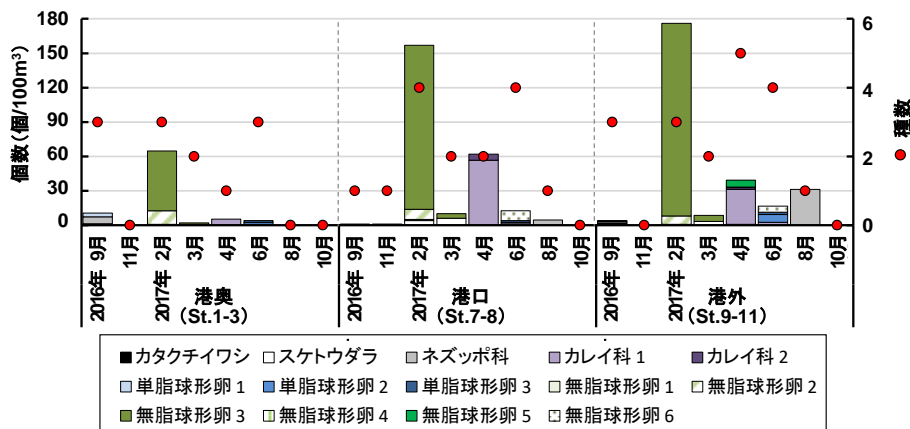


図-8 寿都漁港内外の魚卵の時空間分布

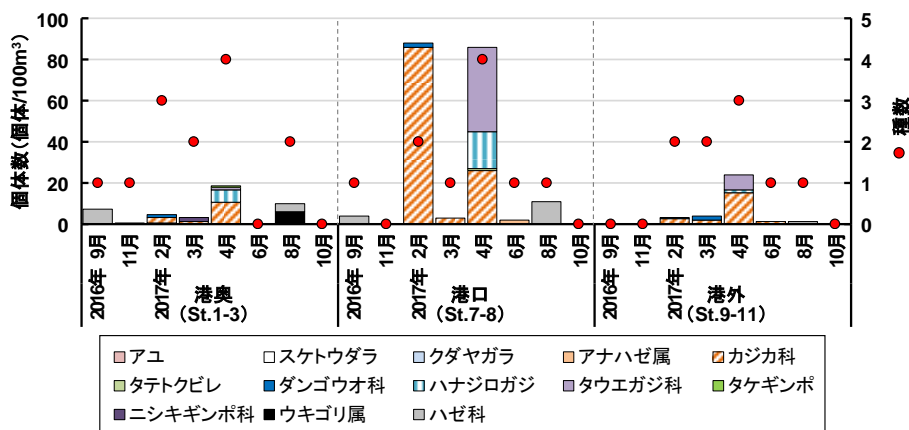


図-9 寿都漁港内外の稚子魚の時空間分布

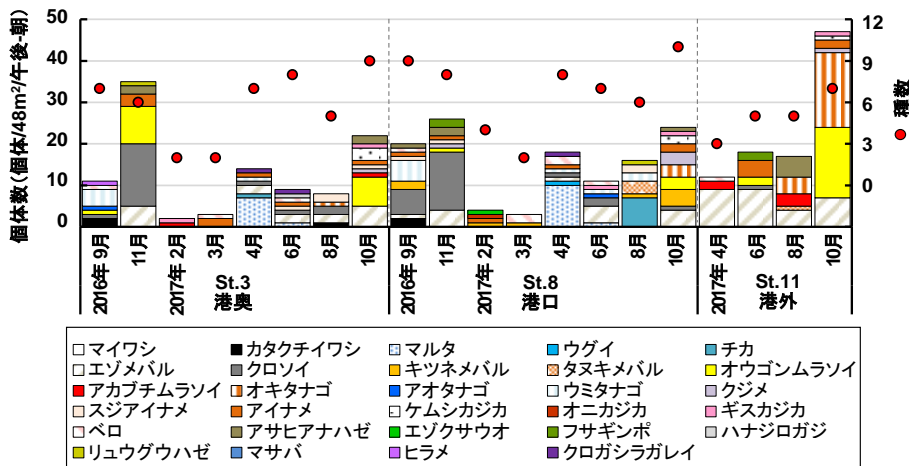


図-10 寿都漁港内外の幼成魚の時空間分布

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、ハナジログジ、タウエガガジ科は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)、ハナジログジ(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)。

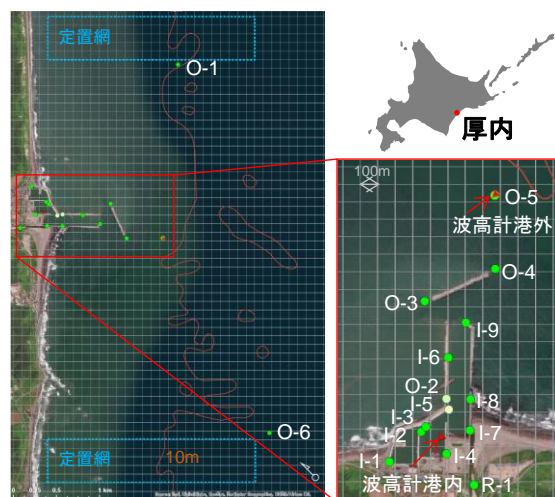


図-11 厚内漁港周辺調査位置
(水深：海底地形デジタルデータ、日本水路協会)

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

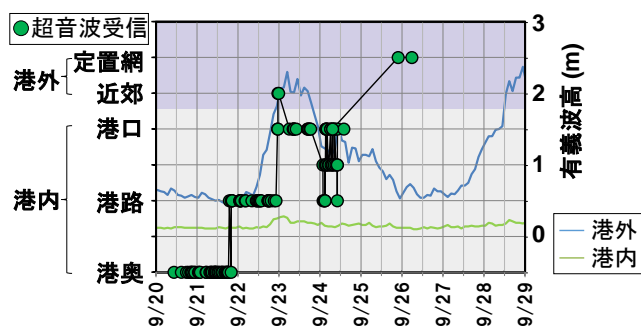


図-12 厚内漁港周辺でのマツカワの行動と有義波高

確認できた。しかし、受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。また、目的に合わせて使用する魚種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性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。

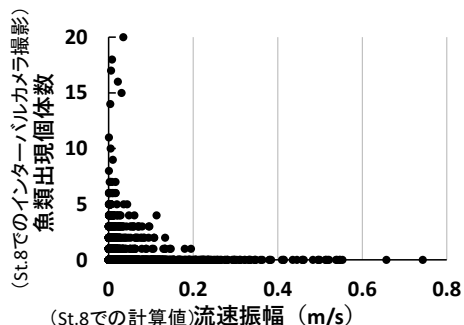


図-13 魚類出現個体数と流速の関係

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。

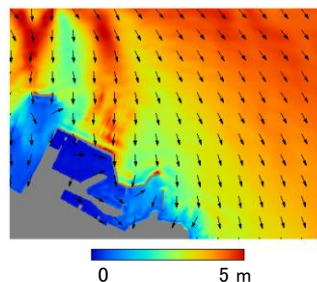


図-14 5年間最大波高時の波高計算値

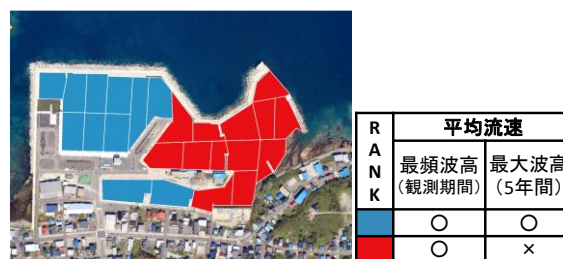


図-15 魚類避難場機能の評価方法案

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。

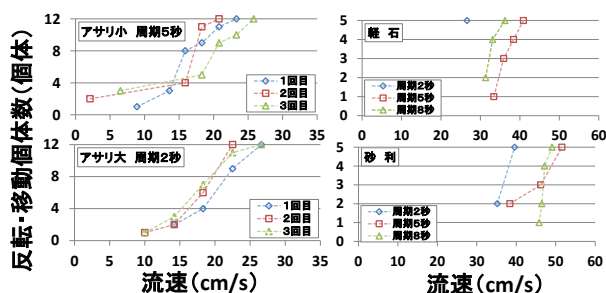


図-16 殻長や基質の違いにおけるアサリの反転・移動個体数と流速の関係

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。

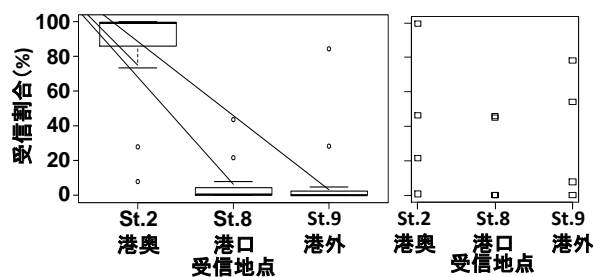


図-17 エゾメバル、クロソイの超音波受信地点の全期間内(9~1月)での受信回数割合

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アンモニウム態窒素(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。

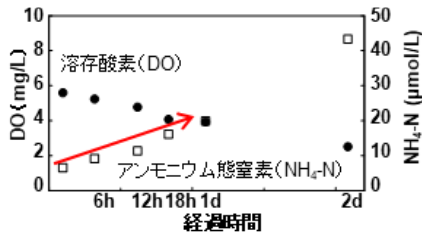


図-18 柱状コア内の堆積物上底層水の溶存酸素及びアンモニウム態窒素濃度の時間変化

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-20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。



図-19 江良漁港調査位置

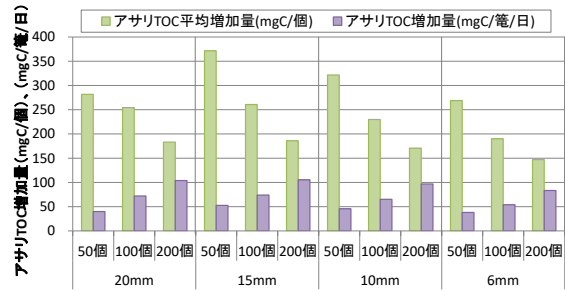


図-20 初期サイズ別の収容個体数とアサリTOC増加量との関係

11. 令和3年度(2021)の主な検討項目

令和3年度(2021)は、引き続き魚類とアサリに関するデータの収集とともに、これまで得られたデータの解析を進めることで、保護育成機能の評価手法についてとりまとめた。主に、魚類への高波浪からの避難場機能、港内の静穏域創出機能を活用したアサリ垂下養殖適地の評価手法とともに、主要調査漁港での夏期の餌場機能評価手法を検討し、主要調査漁港と他の日本海側15漁港との水質比較により餌場評価手法適用範囲を確認した。

12. 令和3年度(2021)の主な検討結果

12.1 漁港における魚類への高波浪から避難場機能の評価

魚類への高波浪からの避難場機能の評価手法に関しては、令和元年度(2019)には流速基準値を用いて検討を行ったが、漁港設計を行う際には波高で静穏性を評価するため、避難場機能も同様に、波高を用いた評価手法が実用的と考えられた。そのため、上記8.1での観測結果を波高に着目し再解析した。その結果(図-21)、

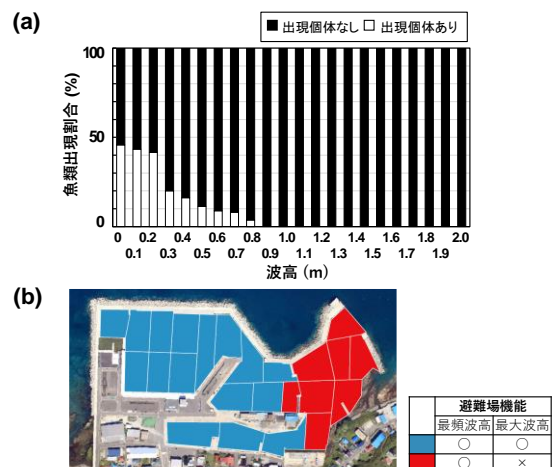


図-21 (a)魚類出現有無割合と波高の関係、(b)波高閾値による魚類への高波浪からの避難場機能の評価

魚類の出現が確認されなくなる波高を基準値として用いることで、流速と同様に港内の避難場機能を評価することができた。また、本対象域での魚類行動に影響を与える流速や波高の値は、既往研究^{8)、9)、10)}や現地環境を考慮すると、妥当な値と考えられた。

基準値に関しては、魚種や体長などの魚類の特徴や水温などの海域の特徴によって異なると考えられるため、対象の魚種や漁港に適した設定を検討する必要があるが、本手法は、高波浪からの避難場機能を定量評価できるため、機能強化の整備に向けた有用な情報と考えられる。

12. 2 二枚貝垂下養殖の適地評価

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、令和元年度(2019)に検討したアサリの殻長の大小や基質となる軽石や砂利での流速基準値(表-4)を用いて、漁港内での垂下養殖適地を評価する手法を検討した。上記 8.1での波高条件や評価領域において、領域の平均表面流速から評価した場合(図-22)、最大波高時に基準値を上回る領域が、アサリの殻長や基質により異なることが明らかとなり、各領域に適したアサリの殻長や基質を選定することが可能になると考えられた。

また、アサリの餌料供給に関しては、流速も重要な制限要因となることから、基準値に関しては、アサリや基質の特徴によって異なると考えられるため、対象の養殖手法に適した設定を検討する必要があるが、本手法の流速による適地評価と、次項(12.3)での餌場評価を組み合わせることで、収容個体数を設定するなど、効率的な垂下養殖に貢献できると考えられた。

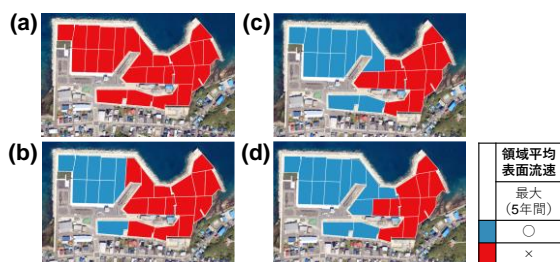


図-22 (a) アサリ小、(b) アサリ大、(c) 軽石、(d) 砂利での垂下養殖の適地評価

12. 3 漁港における水産生物の餌場機能の評価

餌場機能評価に関しては、平成30年度(2018)から令和2年度(2020)まで、上記6.2の方法により測定した基礎生産量と水温、光量、栄養塩との関係から、

夏期の基礎生産モデル式を作成した。このような漁港内で水産生物の餌場の基盤となる基礎生産量を評価する手法は、対象種の育成可能量の把握に貢献できると考えられる。

また、主要調査漁港である寿都漁港と日本海側の他15漁港での水質環境の比較により(図-23)、河川流入量や有機物量等が多い地点や漁港を除いては、主要漁港と他漁港での明確な差異がないことが確認された。そのため、今後、適用外の他海域での栄養塩や光量での基礎生産量測定によりモデル式を高度化する必要があるが、主要漁港で構築した餌場機能の評価手法は日本海側の他の多くの漁港でも適応可能と示唆された。

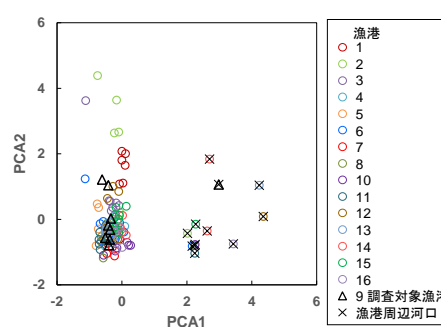


図-23 夏期における主要調査漁港と他15漁港との水質環境の比較

13. 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した。令和3年度

(2021) は、収集したデータの解析を進めることで、保護育成機能のうち、魚類への高波浪からの避難場機能、港内の静穏域創出機能を利用したアサリ垂下養殖適地、主要調査漁港での夏期の餌場機能に関する評価手法についてとりまとめた。

6 年間の本研究を通して、漁港港湾等の沿岸構造物が寒冷海域の水産生物種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がる有益な成果を得ることができた。

参考文献

- 1) 水産庁：漁港漁場整備長期計画、2012、2017.
- 2) 水産庁：
https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_thema/sub40.html (2021年6月24日確認)
- 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.
- 8) 塚本勝巳：魚類の遊泳運動：水中への応用、比較生理生化学、Vol. 10 (4)、pp. 249-262、1993.
- 9) 今井義弘：ホッケ、キツネメバルの遊泳速度 (短報)、北水試研報、Vol. 53、pp. 25-27、1998.
- 10) 今井義弘、高谷義幸：回流水槽による北海道南西沿岸の魚類の行動観察、北水試研報、Vol. 52、pp. 9-16、1998.

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、石澤健志、梶原瑠美子、稲葉信晴、松本卓真

【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をし、最終的に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、コンクリート基質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。

令和元年度(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。

令和 3 年度(2021)は、沖合域の餌料生物の発生状況や餌料物質や集積状況を把握し、漁獲等による調査結果を解析することにより、人工魚礁周辺の餌料培養メカニズムを解明した。以上のデータに基づき生態系モデルにより漁場整備効果を評価する手法を構築した。

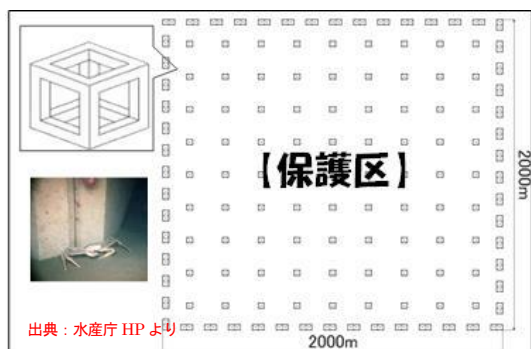
キーワード：生産性向上、餌料生物、餌料培養メカニズム

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 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



保護育成礁(日本海西部地区)



マウンド礁(隠岐海峡地区)

図-1 フロンティア漁場整備の工法別実施例

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以浅の栄養塩が枯渇し、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。

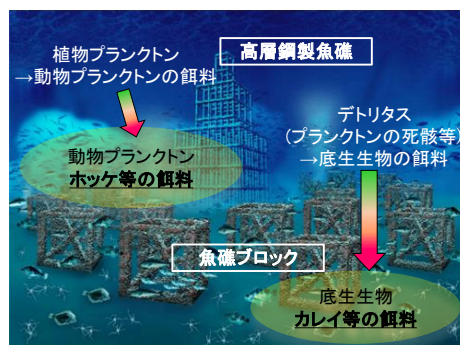


図-2 餌料培養効果のイメージ

3. 現地観測の概要

日本海北部海域でのスケトウダラやホッケを対象とした漁場整備は、漁場が沖合にあるため水深が深いところでの整備が想定される。調査は図-3、4に示す北海道利尻島沖の南西約10kmの沖合にある人工魚礁漁場および比較対照として図-5に示す北海道斜里沖の人工魚礁漁場を研究対象として選定した。観測地点はフロンティア漁場整備の対象である補償深度以深となる水深90m以深の人工魚礁を選定した。以下に平成28年度(2016)～令和3年度(2021)の現地観測の概要を示す。平成28年度～令和2年度の観測内容の詳細については参考文献8)～12)を参照されたい。

3.1 平成28年度(2016)～平成30年度(2018)

2016年に利尻島沖の人工魚礁(図-3、4)の周辺海域において3km×1kmの範囲でマルチビーム測深機による測深を行い、調査対象の人工魚礁の位置を把握し、測深機の反超音波反射強度を利用して海底地盤の底質を推定した。図-3の平成29年(2017)～平成30年(2018)

には人工魚礁の測点 A0～A5(表-1)において底質および底生生物の調査を行った。また測点 A1*及び測点 A2*では採泥器付き ROV により人工魚礁ブロックの極近傍での採泥により魚礁構造物近傍における底生生物の生物量の把握を行った。魚礁構造物表面に付着する付着生物を把握する目的で測点 A2' に試験礁を設置した(図-3、4)。

3.2 令和元年度(2019)

利尻島沖の人工魚礁(図-3、4)において魚類と餌料生物の食物網を把握するための安定同位体比分析を行った。分析に供する試料採取を、測点 A1・A2・A5 において行った。

3.3 令和2年度(2020)

利尻島沖の観測データの比較対照とするため、水深条件がほぼ同じ水深 95m の北海道知床半島の斜里町の沖合約 10 km の人工魚礁漁場の測点 S5・C2(図-5)において底生生物の観測を行った。

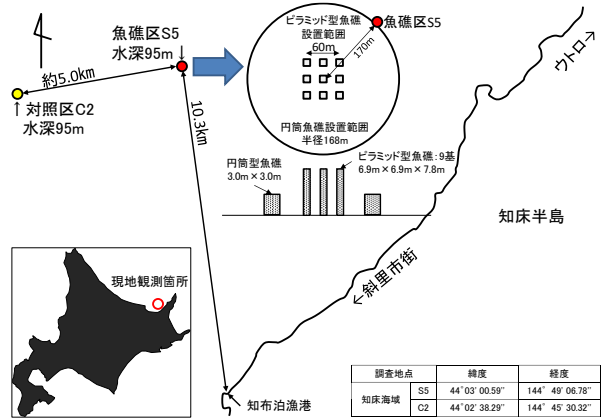


図-5 調査位置図(斜里沖)

3.4 令和3年度(2021)

利尻島沖の人工魚礁(図-3、4)の測点において魚類の餌料生物である動物プランクトンと、利尻島沖周辺海域の主要な水産有用種(魚類)であり捕食者であるホッケの漁獲調査を行った(表-2)。

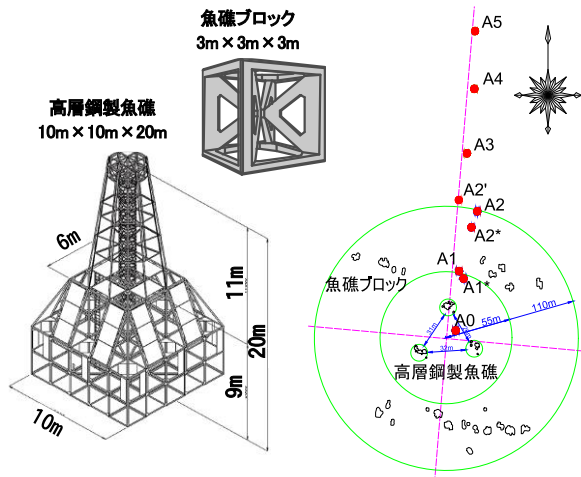


図-3 調査位置図(利尻島沖)

表-1 現地観測地点座標値

観測地点	緯度	経度
A0	45° 02' 30.997"	141° 08' 54.267"
A1	45° 02' 32.6"	141° 08' 54.368"
A1*	45° 02' 32.4"	141° 07' 54.54"
A2	45° 02' 34.22"	141° 07' 52.028"
A2'	45° 02' 34.517"	141° 07' 54.318"
A2*	45° 02' 33.786"	141° 07' 54.81"
A3	45° 02' 35.78"	141° 07' 54.608"
A4	45° 02' 37.519"	141° 07' 54.848"
A5	45° 02' 39.079"	141° 07' 54.848"
G1	45° 02' 32.90"	141° 07' 53.12"
G2	45° 07' 20.23"	141° 04' 48.34"

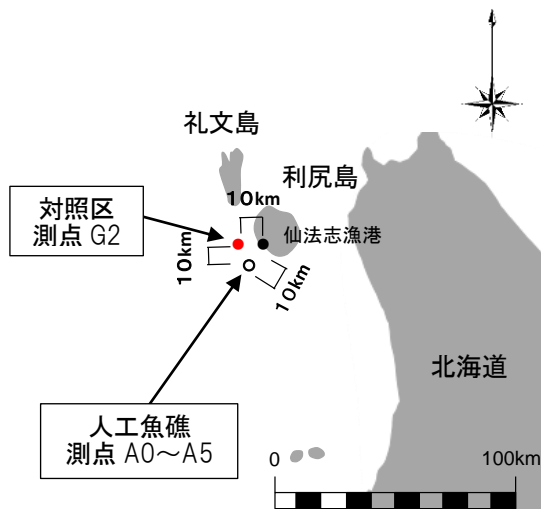


図-4 測点位置図(利尻島沖)

表-2 現地観測及び調査内容

項目・地点	方法	観測内容・分析項目
機器垂下観測 地点:A1・A2・A5・G2	多項目水質計CTD 観測水深0~90m	海水密度σ _T 観測時期:2021年7月21日、22日、8月7日、20日、9月15日、16日、27日
採水調査 地点:A1・A2・A5・G2	ハンドーン型採水器 採水水深1m、89m	分析項目:水質15項目、植物プランクトン、環境DNA解析 観測時期:2021年8月7日、20日、9月27日
動物プランクトン採取 地点:A2・G2	北原式ネット、ノルパックネット(0~30m、30~60m、60~90m)	分析項目:計数、同定 観測時期:2021年8月18日、9月27日
動物プランクトン採取地点:A0・A2・A21・G2	改造ノルパックネット(0~30m、30~60m、60~90m)	分析項目:計数、同定 観測時期:2021年8月18日
動物プランクトン採取地点:A2・G2	改造ノルパックネット(全層)	分析項目:安定同位体 観測時期:2021年8月18日

採泥調査 地点:A0・A2・ A21・G2	スミスマッキンタイヤ採 泥器(開口部0.05 m ²) 採泥水深90m	分析項目:底質 9 項目、底生生物、 底生微細藻類、環境 DNA、 底生微細藻類(生)、底生微細藻類 安定同位体、マクロベントス安定 同位体、POC、PON 観測時期:2021年8月20日、22日
定点観測 地点:A2・G2	魚群情報付き衛星プイ、 電磁流速計、水温・塩分 計、小型メモリー光量子 計、クロロフィル濁度 計、セジメントトラップ、 定点観測計量プイ 設置水深:海面上、水深 1m、60m、87m、88m	分析項目:流向・流速、水温・塩 分、光量子、クロロフィル、濁度、 沈降物、魚群 観測時期:2021年 7月21日～8月21日、 9月15日～10月2日
テストピース採取 地点:A2・G2	テストピース設置・回収 設置水深90m	分析項目:計数、種同定 観測時期:2021年 8月7日～21 日、9月15日～10月2日
刺網魚獲物 地点:G1・G2	定置刺網設置・回収 設置水深90m	分析項目:計数、種同定、胃重 量、胃内容物 観測時期:2021年 9月29日

4. 平成 28 年 (2016) ～令和 3 年 (2021) の主な調査結果

平成 28 年度 (2016) にはマルチビーム測深により、利尻島沖の調査対象とする人工魚礁の位置を把握した。同時に測深機の超音波反射強度を活用して底質の概略判定を行った結果、当該海域の底質は多くが砂質土(一部に粘性土を含む)と判定された。平成 29 年度 (2017) には採泥による粒度組成分析により人工魚礁周辺の粒度組成 (全測点の平均) が礫分 48.4%、砂分 31.8%、シルト・粘土分 19.8%であった (図-6)。以上より、人工魚礁周辺の地盤では概ね一定の粒度組成であることが確認された。

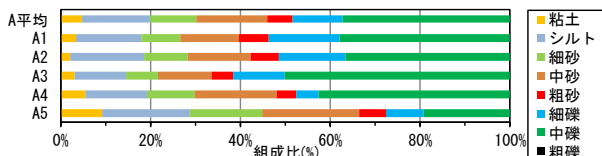


図-6 底質の粒度組成比(利尻島沖測点 A1～5)

平成 30 年度 (2018) には利尻島沖の人工魚礁において底生生物の生物量の調査を行った。図-7 は、底生生物の 1 m²あたりの個体数と湿重量を示す。魚礁区 (測点 A0～A2*) は対照区 (測点 A3～A5) に比べて個体数・湿重量の平均値がともに高く、底生生物の現存量が高い傾向が確認された。分類群別の個体数割合では、環形動物(ゴカイ・イソメ等の多毛類)が最も優占し、利尻島沖の人工魚礁の魚礁区はカレイ類(環形動物が主要な餌料とされる)にとって望ましい餌料環境であると考えられる。以上より、沖合域の人工魚礁が魚類の餌料生物を増殖させる餌料培養効果を発揮している証左を得ることができた。

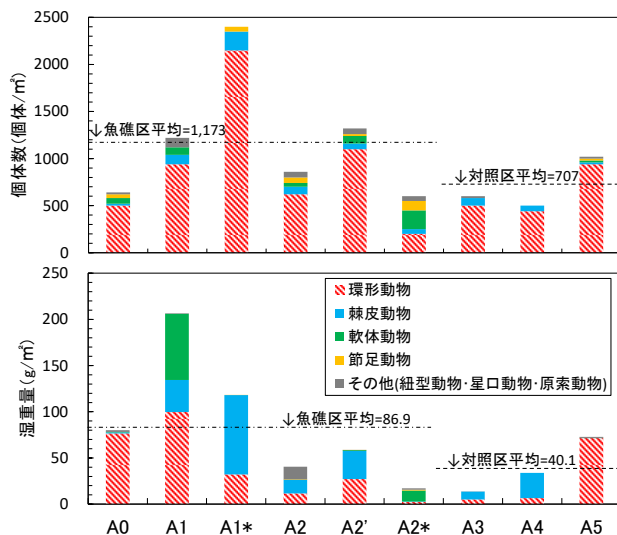


図-7 底生生物の個体数(上)と湿重量(下)(利尻島沖)

令和元年 (2019) には利尻島沖の人工魚礁において餌料経路の把握のための安定同位体比分析を行った。図-8 は、A1・A2・A5 地点における魚類、餌料生物の採取試料による炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ と窒素安定同位体比 $\delta^{15}\text{N}$ の分析結果を $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップとして示している。これにより、ホッケの食物網は植物プランクトン～動物プランクトン～ホッケという餌料の経路が推察された。また、主に海底付近の生態系に属するカレイの食物網は底泥有機物(または底生微細藻類)～底生生物～カレイという経路が推察された。以上により利尻島沖の人工魚礁における餌料経路を把握することができ、漁場整備効果評価手法における生態系モデル構築に必要な主要魚種の餌料のパラメータを得ることができた。

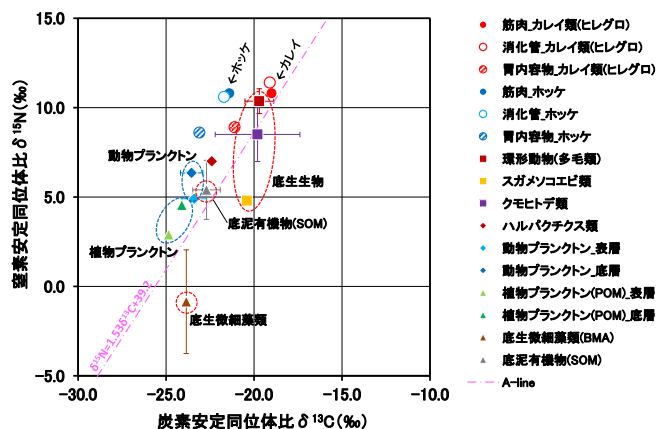


図-8 人工魚礁周辺海域 (A1・A2・A5 地点) の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ

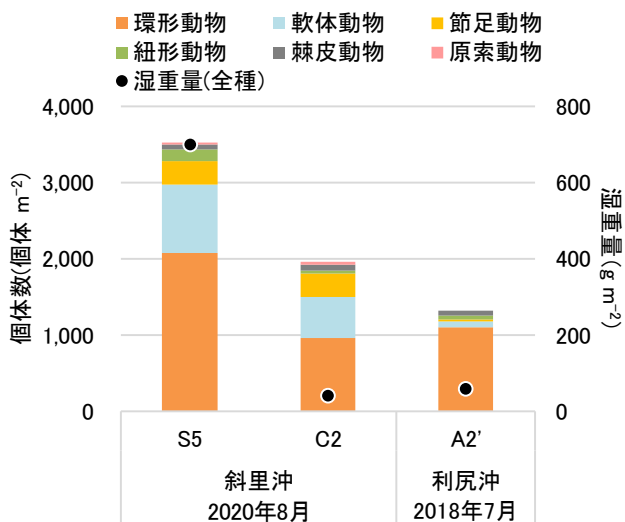


図-9 底生生物の現存量

令和2年度(2020)には、利尻島沖とは異なった海域条件での餌料培養効果を確認するため、北海道斜里沖の人工魚礁の水深95mの測点S5(魚礁区)と測点C2(対照区)において底生生物の調査を行った。底生生物の現存量は、個体数の総数、湿重量、種数と何れも測点S5(魚礁区)が高かった(図-9)。一方で底質の粒度組成は測点S5・C2の両地点とも粒度組成と中央粒径は殆ど同じで砂質土の地盤であった。よって、魚礁区と対照区の底生生物の現存量の違いは底質等の環境条件ではなく、人工魚礁の影響が現れたと考えられる。令和2年(2020)～令和3年(2021)には、利尻島沖の主要魚種ホッケを対象として、餌料環境とホッケの成長特性の関係を把握するための調査を行った。図-10にホッケの主要な餌料となる動物プランクトンの個体数(水柱平均)について、測点A2(魚礁区)と測点G2(対照区)の比較を示す(2020)。

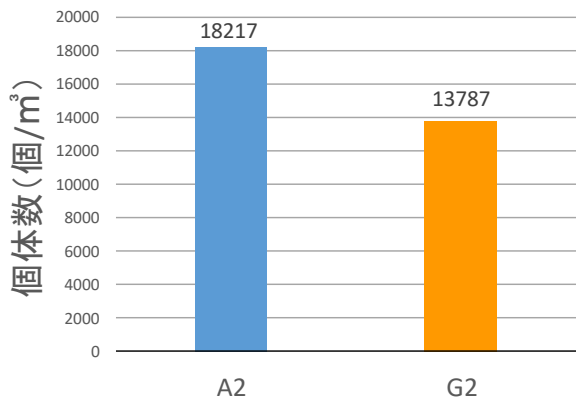


図-10 魚礁区と対照区の動物プランクトン個体数(水柱平均)

測点A2では測点G2よりも動物プランクトンの個体数が多かった。これにより測点A2(魚礁区)は動物プランクトンを主な餌料とするホッケ(図-8)にとって好適な餌料環境となっていると考えられる。

図-11にホッケの漁獲数と空胃率の魚礁区と対照区の比較を示す。魚礁区において漁獲数が高く空胃率が低い。これにより、魚礁区のホッケの餌料(主に動物プランクトン)が豊富であり、人工魚礁の餌料培養効果によりホッケが蟄集したことが示唆された。

図-12、13に漁獲調査(刺網)による、測点G1(魚礁区)・G2(対照区)でのホッケの体長と重量の比較を示

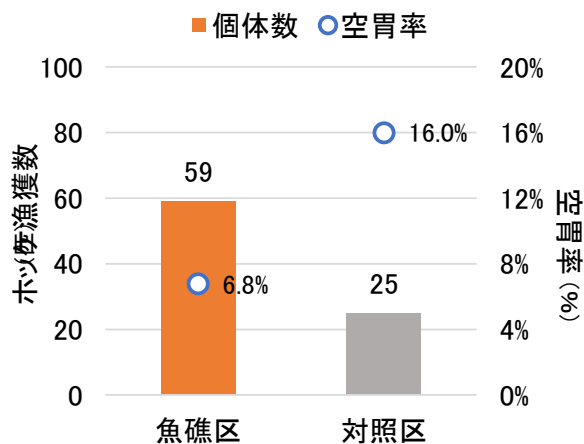


図-11 魚礁区と対照区のホッケの漁獲数と空胃率

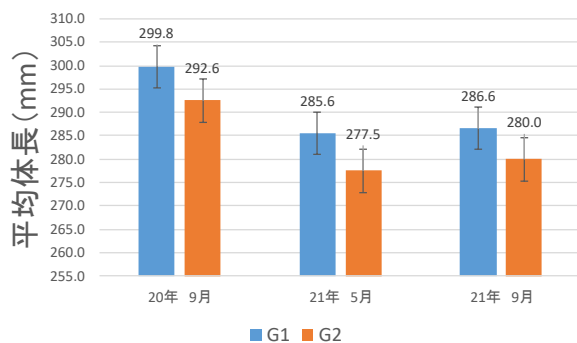


図-12 魚礁区と対照区のホッケの平均魚体長

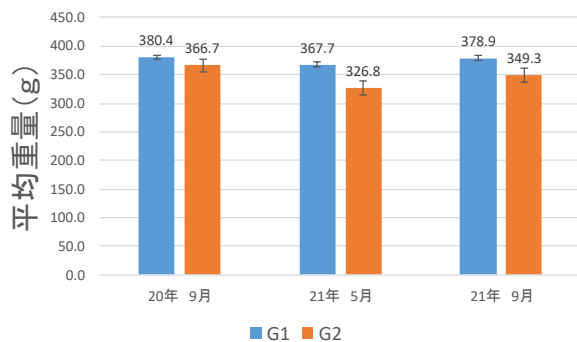


図-13 魚礁区と対照区のホッケの平均重量

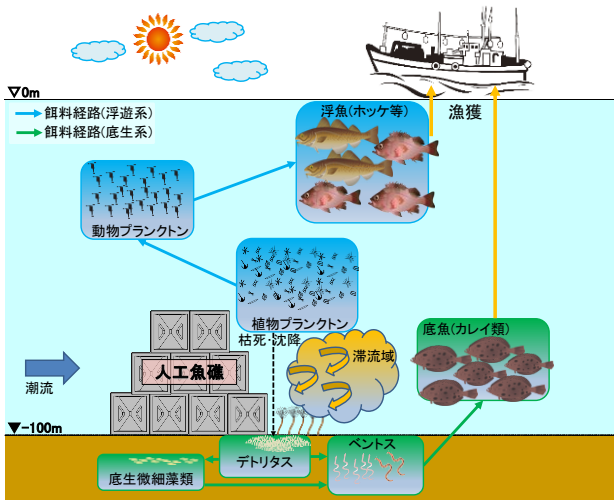


図-14 沖合域における生態系概念図

す(2020~2021年)。平均魚体長及び平均重量とも、測点G1(魚礁区)が測点G2(対照区)よりも高かった。これより、餌料培養効果で餌料が豊富となったことによりホッケの成長が促進されている可能性がある。

以上の現地観測結果(餌料培養効果、対象魚の食性解析による餌料経路、人工魚礁における餌料の豊富さと魚類の増集の関係等)に基づいて、沖合域の人工魚礁漁場における生態系を整理すると図-14に示すような捕食者(魚類)と被食者(餌料生物、餌料物質)の餌料経路になる。この生態系概念に基づき、既成の生態系モデルEcopath with Ecosim¹³⁾により解析した餌料生物と捕食者(魚類)の餌料経路と栄養段階を図-15に示す。Ecopathモデルは被食者(餌料生物)と捕食者(魚類)の生物量をパラメータとして入力することで漁場における生産量を評価することができる。本研究で得られた餌料生物と魚類、利尻海域の漁獲統計データに基づき被食者と捕食者のデータをパラメータとして入力して解析することで、人工魚礁の整備前と整備後の生産量を計算できる。これによって人工魚礁の餌料培養効果に基づいた漁場整備効果を評価する手法を構築することができた。

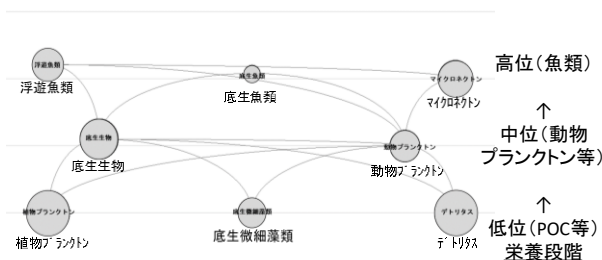


図-15 生態系モデル Ecopath with Ecosim¹³⁾による餌料経路の解析結果

5. まとめ

本報告の2016年度から2021年度までの主要な結果を以下に示す。

- ① 利尻島沖人工魚礁の近傍では魚類の餌料として重要な、底生生物(環形動物)が対照区に比べて多く、水深90mにおいて人工構造物が餌料生物の培養に寄与していることを確認した。
- ② 利尻島沖人工魚礁の周辺海域で採取された魚類と餌料生物の安定同位体比分析により、ホッケとカレイの食物網が解明された。
- ③ 知床沖人工魚礁近傍において、高い底生生物の生息密度が確認され、人工魚礁が持つ餌料生物の増集・増殖の効果が他海域でも同様に表れていることが確認できた。
- ④ 沖合域の人工魚礁における捕食者(魚類)と被食者(餌料生物、餌料物質)の餌料経路に基づいた生態系を解明し、それに基づいて生態系モデルEcopathによる沖合域の漁場整備効果の評価手法を構築した。

本研究を通して得られた成果については、大規模漁場の整備手法の構築に貢献することが期待される。

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)
- 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

備)：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) 須藤賢哉・大橋正臣・伊藤敏朗：北方海域の沖合域での漁場整備に向けた現地観測の試み、北海道開発技術研究発表会、環 24、2017.
- 9) 須藤賢哉・稲葉信晴・伊藤敏朗：沖合域の人工構造物周辺における漁場環境の解明に向けた現地観測、北海道開発技術研究発表会、環 19、2018.
- 10) 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.
- 11) 須藤賢哉・稲葉信晴・渡邊浩二：沖合域での漁場環境モニタリング手法の構築に向けた衛星通信による遠隔観測の試み、北海道開発技術研究発表会、推進 20、2020.
- 12) 須藤賢哉・松本卓真・稲葉信晴・的野博行：北海道斜里沖の人工魚礁周辺の底生生物相と餌料環境、寒地土木研究所月報 9 月号、No. 822、pp. 23-28、2021.
- 13) Ecopath with Ecosim WEB:
https://www.google.com/search?q=Ecopath&rlz=1C1TKQJ_jaJP1004JP1005&oq=Ecopath&aqs=chrome..69i57j0i30l8j0i10i30.4754j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-

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）

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。

令和3年度(2021)は、漁港内水域におけるナマコ分布状況と詳細な海底環境特性についての検討を行う事で、漁港内のどのような環境がナマコ増養殖を進める上で生息場として機能しており、今後、港内においてより効果的かつ効率的なナマコ増養殖を進めていく上で、重要な海底環境条件を明らかとした。また、これまでの成果を総括し、漁港港湾の静穏域を活用したナマコ増養殖に関する水域および生息環境の評価技術に関してとりまとめた。
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。

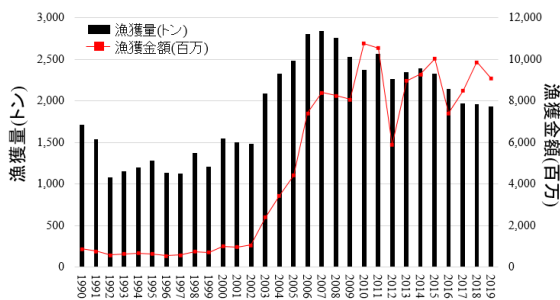


図-1 北海道におけるナマコ漁獲量及び漁獲金額の推移 (1991年～2019年)⁴⁾

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増殖行動を利用した「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の実施、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し、令和3年度(2021)は、漁港内水域におけるナマコ分布状況と詳細な海底環境特性についての検討を行った。

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(Chl.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)

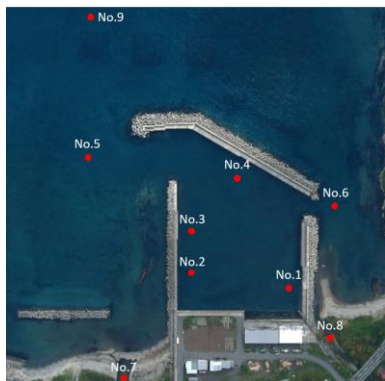


図-3 環境調査の測点 (No. 1~No. 8)



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



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

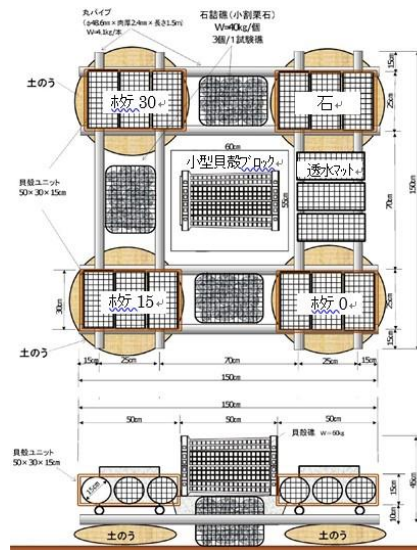


図-5 放流試験礁 (全体)

ずつ、合計 15 基を設置した。この試験礁は放流した稚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-4)。



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

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 (1,000 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。

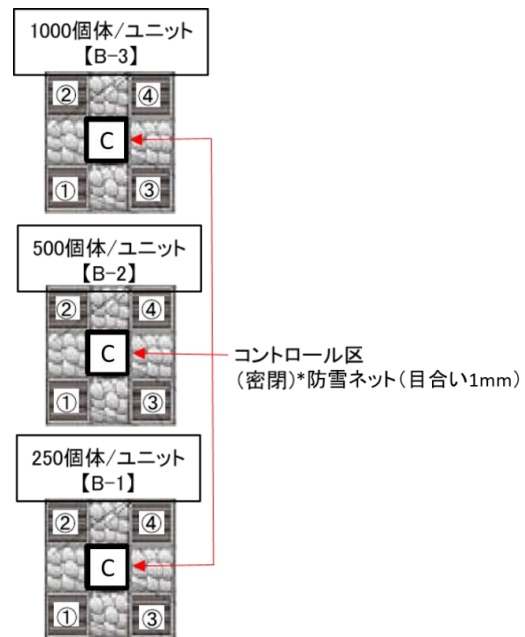


図-6 異なる放流密度の実験区 (B 地点)

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モガニについて、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)。

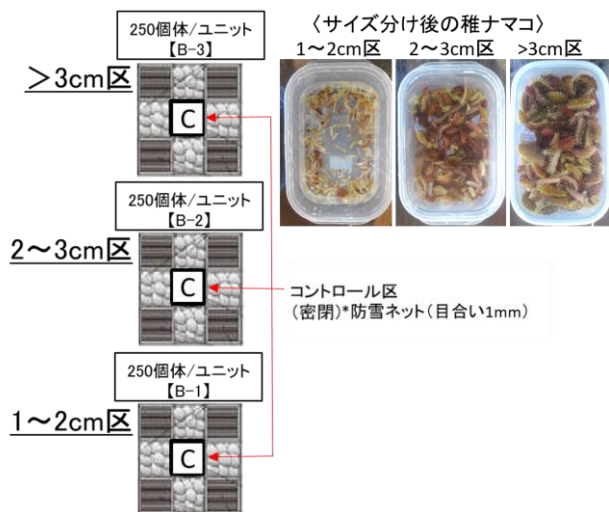


図-7 異なる体サイズの実験区 (B地点)



写真-5 室内水槽試験による捕食の影響評価

3.9 漁港内のナマコ分布と海底地形

2021年10月から11月にかけて積丹半島東部の漁港内の対象水域(写真-6)において海底地形を把握するためにマルチビーム音響測深機を用いた調査、また、予め海底地形を把握した区域において、ベルトトランセクト調査を含む潜水によるナマコ分布調査を実施し、マナマコの分布状況や特徴的な地形、底質環境について詳細に把握した。更に、港内全15地点にて採泥を行い、底泥サンプルの化学的環境及び粒度について以下

の分析を行った(強熱減量・全窒素・TOC・硫化物・クロロフィルa・フェオフィチンa及び粒度組成)。



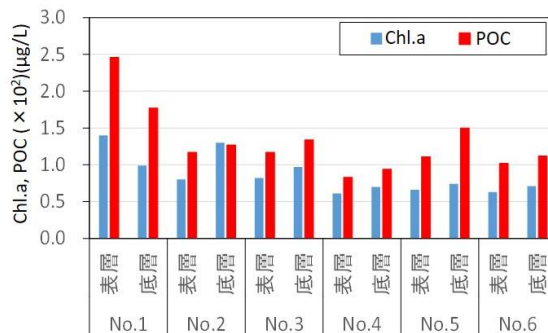
写真-6 積丹半島東部漁港の調査対象水域

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係る有機物 (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が若干大きいですが、全体的には港内外で大きな違いが見られなかった。

(A) 水質



(B) 底質

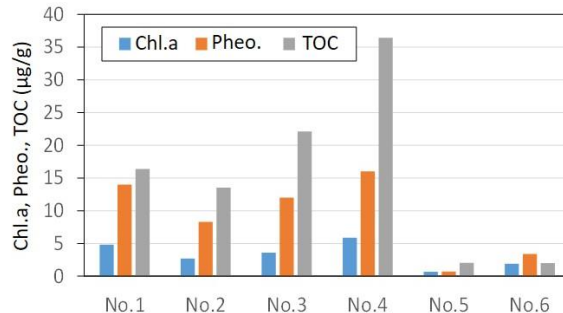


図-8 水質 (A)・底質 (B) の分析結果 (2016年12月観測)

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。

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（図-2）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。

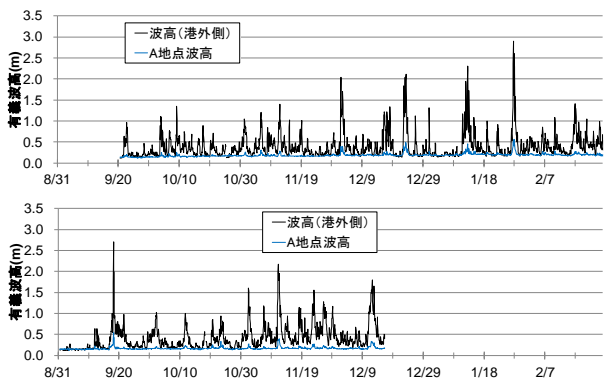
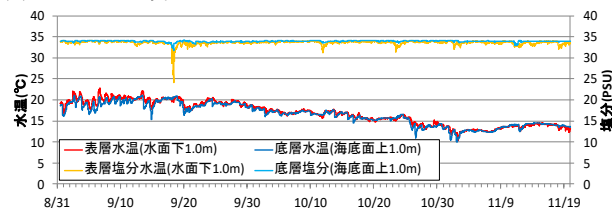
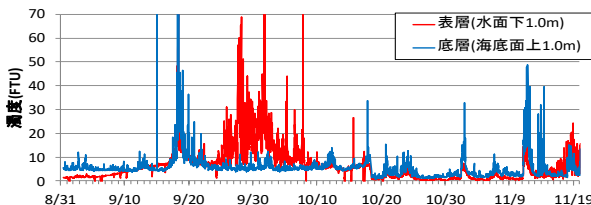


図-9 冬季の波浪(上:2016年冬季,下:2017年冬季)

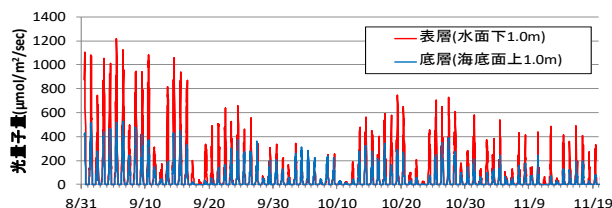
(A) 水温・塩分



(B) 濁度



(C) 光量子密度



(D) 降水量

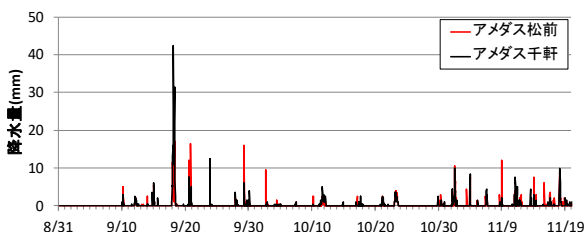


図-10 A 地点の連続観測結果 (2017 年)

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-11 A）。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-11 A）。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-11 B）や強熱減量（図-11 C）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-11 D)。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⁸⁾されていることから、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)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事から、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。

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割合が小さく、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-7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

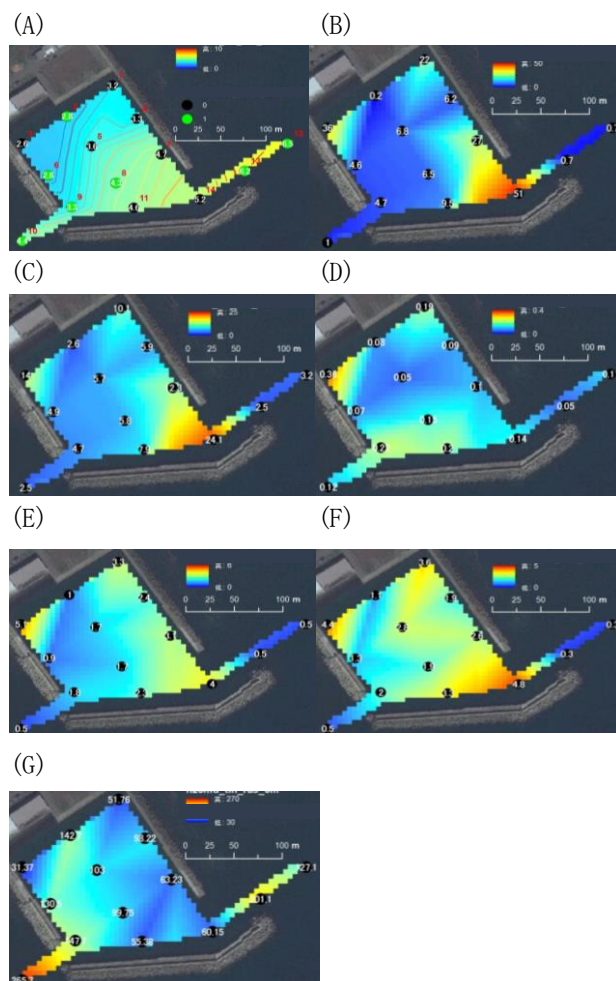


図-11 (A) 水深及びアマモ群落の有無, ○内の数字は水深 (m), アマモ群落の有無は○の色 (●: 無し, ●: 有り), (B) 化学的酸素要求量 (COD: mg/g dry weight), (C) 強熱減量 (%), (D) 全硫化物量 (mg/g dry weight), (E) Chl. *a* 濃度 ($\mu\text{g/g}$ dry weight), (F) フェオフィチン濃度 ($\mu\text{g/g}$ dry weight), (G) 中央粒径 (μm)

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と有意に高かった事から、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-8)、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-9)。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⁾。本研究における稚ナマ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ナマ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。

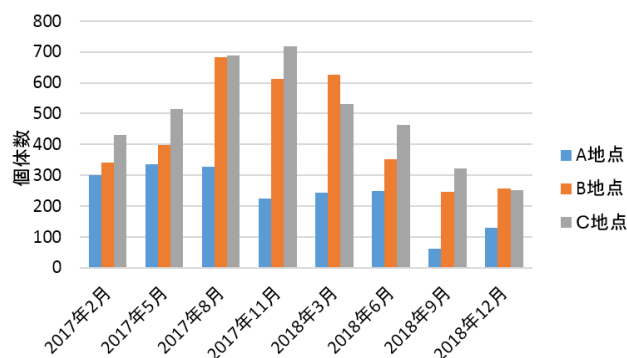


図-12 地点別ナマコ生息個体数
(5種類のユニットの合計)

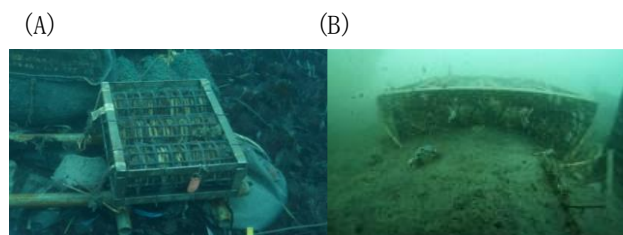


写真-7 A地点の堆砂状況(A)堆砂前、(B)堆砂後



写真-8 C地点の様子(左手側にアマモ場)

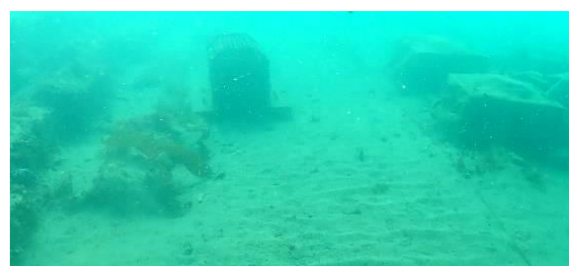


写真-9 B地点の試験礁(右)及び被覆ブロック(左)

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、1,000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、1,000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-13A)。重量については、1,000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-13B)。放流した稚ナマコ一頭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。

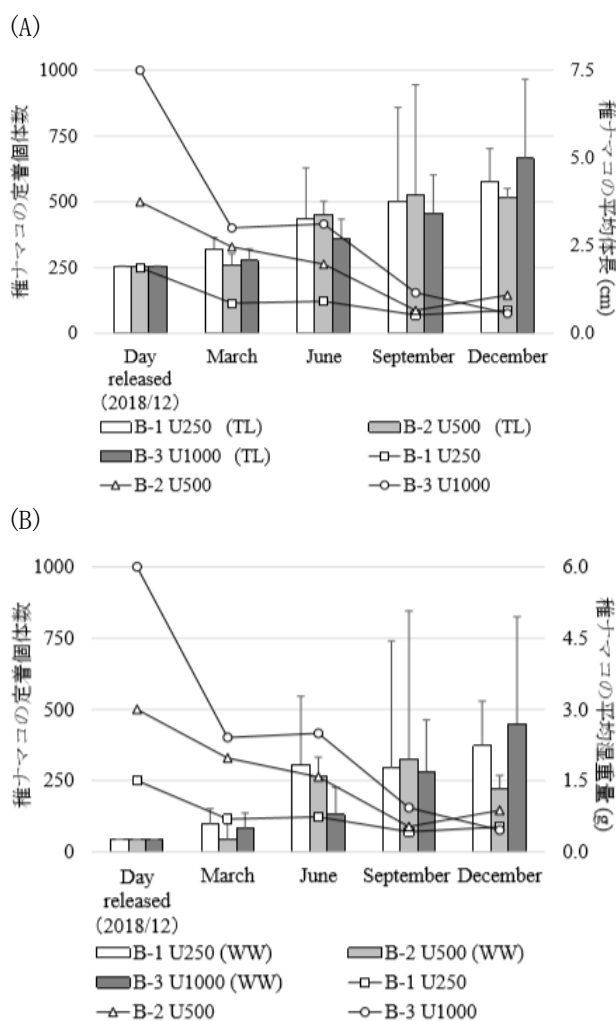


図-13 異なる放流密度試験区における稚ナマコの定着個体数と成長 (A: 平均標準体長、B: 平均湿重量)

4.2.3 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 個体放流区で一年後の定着率が最大 (34%) で86 個体であり、1cm 区の約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(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。

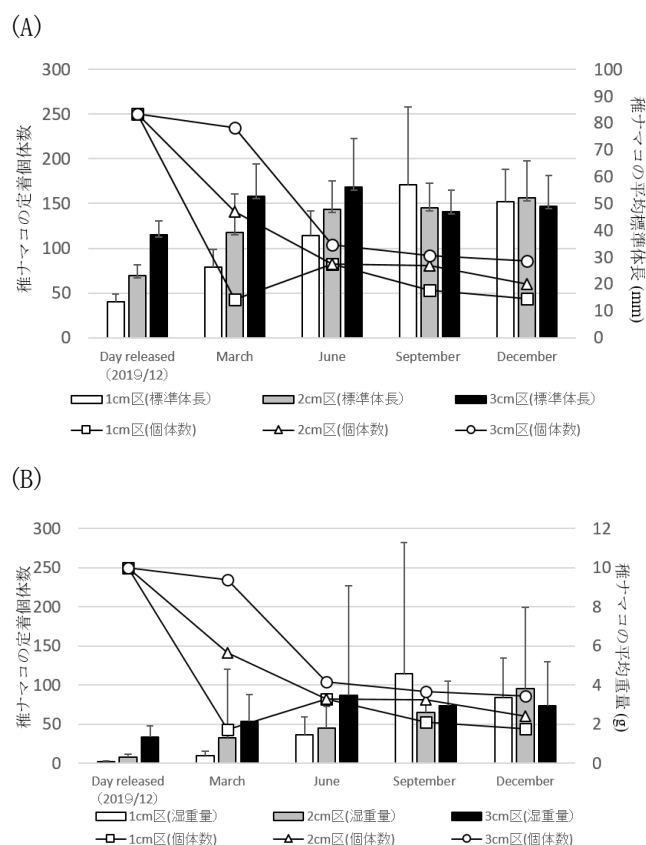


図-14 異なる放流サイズの試験区における稚ナマコの定着個体数と成長 (A: 平均標準体長、B: 平均湿重量)

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 $14.09 \pm 3.3\text{cm}$ と2017年 ($12.50 \pm 4.0\text{cm}$) 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⁾ ことから、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⁾であることから、小型の個体がほとんど確認出来なかったと考えられる。

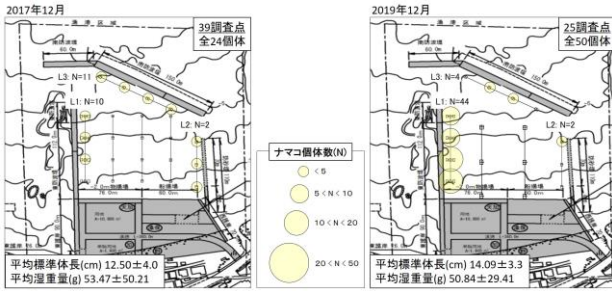


図-15 2017年及び2019年の港内のナマコ分布

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²⁰⁾。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。

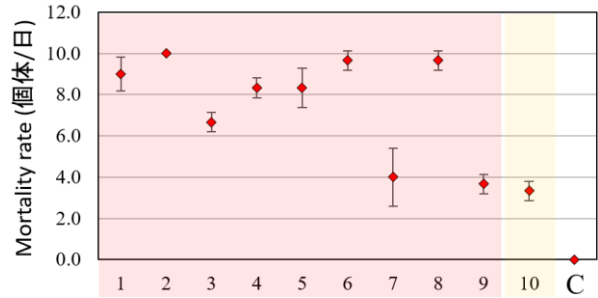


図-16 稚ナマコ(1~2cm)に対する捕食試験結果 (1-9:オオヨツハモガニ、10:ケブカヒメヨコバサミ C: コントロール区)

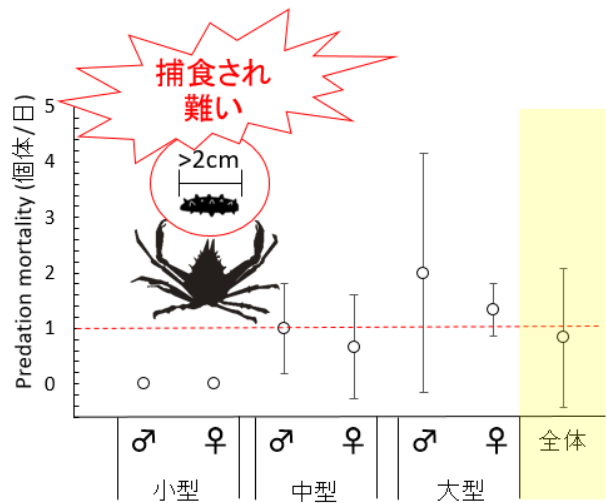


図-17 稚ナマコ(2~3cm)に対する捕食試験結果

4.5 漁港内の海底環境とナマコ分布の関係性

マルチビーム音響測深機により得られた海底地形上にベルトトランセクト調査で明らかとなったナマコ分布箇所、密度情報を追加した結果を図-18に示す。マナマコは、「シルト・砂」が95%以上を占める底質環境におけるマナマコ生息密度が最も少なく、「岩盤・礫・カキ殻等」安定した底質の割合が50%、残り50%が「シルト・砂」で占められた海底における生息密度が最も高かった。また、海底を占める「岩盤・礫・カキ殻等」の割合が50%以上の環境では、その他環境と比較して相対的に高い生息密度が維持されていた。底泥中の有機物量の指標や硫化物の値については、有機物や硫化物が多い地点周辺のマナマコ生息密度は低い傾向にはあったものの一定程度の分布は認められた事から、海底環境に占める底質の種類及び割合が生息密度に与える影響がより大きい事が示唆された。

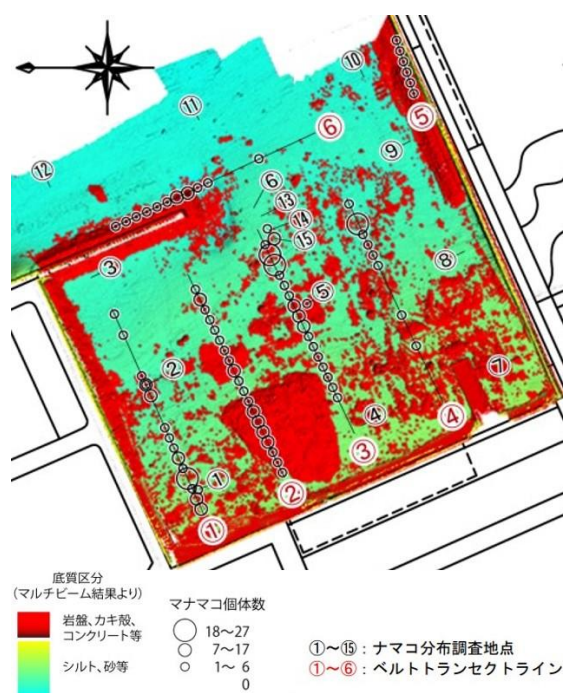


図-18 漁港内海底環境とナマコの分布状況

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)、令和 2 年度 (2020) 及び令和 3 年度 (2021) 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で放流した場合には、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、オオヨツハマゴニヤ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。
- ・漁港内の海底環境がナマコの生息密度に大きく影響を及ぼしている事が明らかとなったことから、今後、ナマコ増養殖場として漁港内を有効活用する上でどのような環境で実施すべきかや適地拡大を考える上で重要な成果が得られた。

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正な環境評価技術や種苗放流手法の確立を目標とした。最終年度である令和 3 年度においては、成果の一般化を図るため積丹半島東部に位置する漁港に調査対象場所を拡大し、ナマコの増養殖を効率的かつ効果的に進める上で考慮する必要のある漁港内環境特性について新たな知見を取得すると共に、これまで得られた成果の妥当性や適用性を示した。本研究を通して得られた成果については、漁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としてマニュアルにもまとめられ、今後の幅広い普及を目指した一層の取り組み等を通して、漁港の既存ストックの水産生物増養殖場としての有効活用の推進に貢献する事が期待される。

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> (2021年6月24日確認)
- 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) 桑村勝土, 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) Tanaka, M: 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, Mar. 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, 2020
- 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.
- 20) Inaba, N., Matsumoto, T., Kawai, H., Anaguchi, Y., Matsuno K. : Predation of juvenile Japanese Sea cucumber *Apostichopus japonicus* by kelp crab *Pugettia ferox*. Front. Mar. Sci. 8: 684989, 2021.

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：新目竜一、村山雅昭、巖倉啓子、谷瀬敦、柏谷和久、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（2018）年度はシロサケ遡上数を魚カウンター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、長期間の移動数が計測可能となり、さらには河口緩流域は上記稚魚の降海前滞留場所であることが判明した。令和元年（2019）度は、複数の魚カウンターの設置により、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の流速しか発生しないことから、迷入したシロサケは元の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（2020）度は、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。さらに魚カウンターの機能を用いた遡上環境評価手法の検討を行った。令和 3 年（2021）度は簡易魚道に遡上したサケ科魚類の遡上数を魚カウンターで明らかにし、さらに遡上中止個体数と日平均流速との関係を明らかにして、遊泳負荷に着目した魚道の評価方法の検討を行った。キーワード：魚カウンター、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、簡易魚道、遊泳負荷量(流速)

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 年秋期の来遊数も平年比 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。しかし、長期間計測や夜間計測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、現在でも親魚遡上が確認されている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大きい^{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

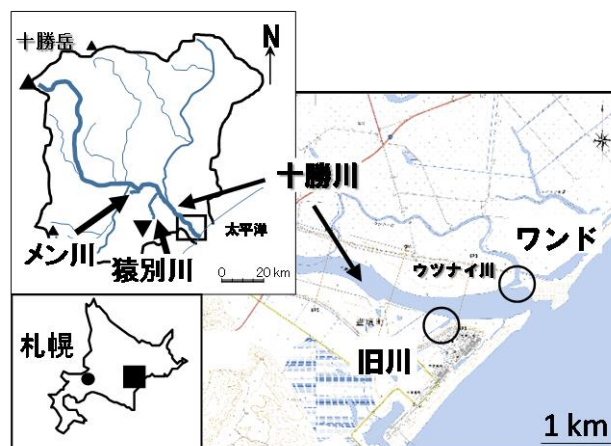


図-1 十勝川河口域の旧川とワンド。国土地理院電子地図改変。

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) 年度に行った。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した。平成 29 (2017) 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令和3(2021)年度まで行った。

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。サケカウンターを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および降下数を計測した。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、2018 年の 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

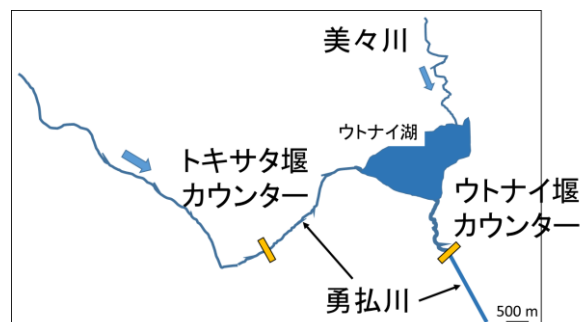


図-2 勇払川流域でのカウンター設置箇所。オレンジ色の■がサケカウンターを示す

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（長さ×幅）の木製水路がついている。この木製水路に 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⁾。

サケ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水路の流速と水深は、162.2 cm/s および 20.2 cm/s だった。

5. 令和元 (2019) 年度および令和 2 (2020) 年度サケカウンターの設置

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

2019年度と20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。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、印加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。

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

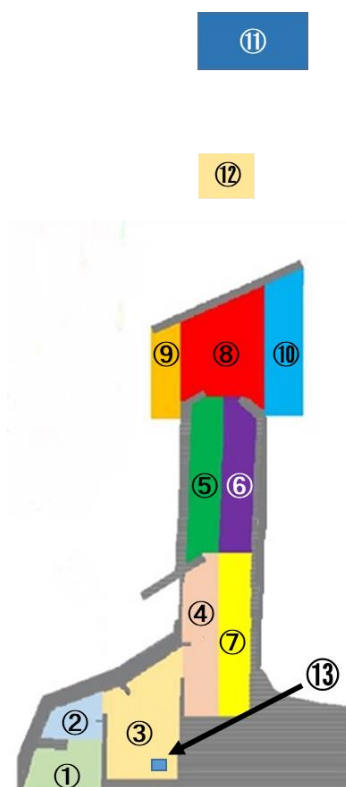


図-3 厚内漁港における物理量評価エリア。図中の番号は評価エリアを13エリアに分割したエリア番号を示す。

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トキサタ堰の魚道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、5.0 Vの電圧を

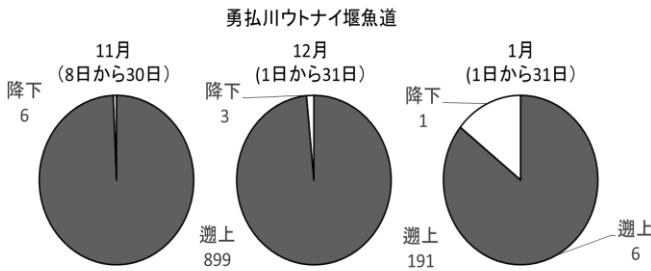


図-4 ウトナイ堰魚道の遡上数と降下数の割合 2017年11月は8日から30日、12月および1月は1日から31日まで計測した。それぞれの母数に違いがあることに留意

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箇所的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进行分析するため、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入る波向として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. 令和 3 (2021) 年度の調査地と魚カウンター

2021年度の調査地は北海道中央部の仁木町を流れる余市川の支流中の川である。この河川において、2021年のサケ科魚類の遡上期に北海道河川環境研究会によって簡易魚道（以下魚道とする）が設置され、この魚道を使ってサケ科魚類の遡上数と流速との関係を明らかにした。魚道の設置は2021年8月30日から31日に行われ、9月4日から11月22日まで魚類移動数の計測を行った。移動数の計測は魚類遡上数計



図-5 調査地位置図。赤丸が魚カウンター設置地点

11. サケ科魚類の下流戻り時の流速

魚道には魚カウンターのセンサーを取り付けた水路（幅 0.36 m×長さ 1.5 m）があり、この部分の流れは出水を除いて一様な流れである。そこで、この部分の流速を魚道周辺に設置した水位計（HOBO U20：Onset 社製、Bourne, MA, USA）による水位、水路勾配および粗度計数を用いて Manning 式から算出した。また、魚カウンターは遡上数と降下数の計数だけでなく、水路を遡上途中で下流へ引き返した場合（以下下流戻りとする）の数も計数できる。そこで、2021 年 9 月 23 日から 28 日の間の下流戻りの個体数と上記で算出した流速との関係を調べた。

12. 平成 30 (2018) 年度の結果及び考察

12.1 計測期間中のシロザケの行動

ウトナイ堰では 2018 年 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。

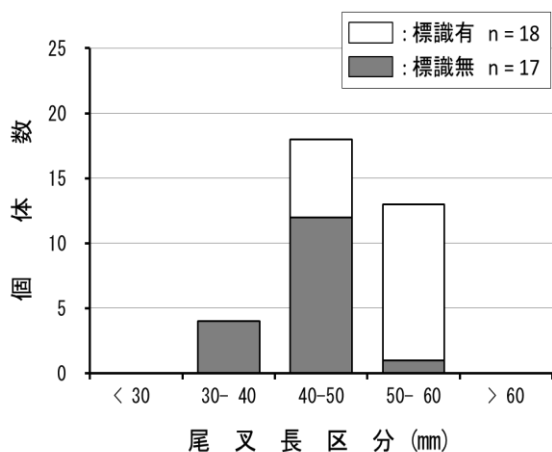


図-7 2018 年 4 月中旬(4 月 12 日)にワンドで捕獲されたシロサケ個体の尾叉長区分ごとの無標識魚と放流魚の割合

遡上数の多かった 2018 年 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

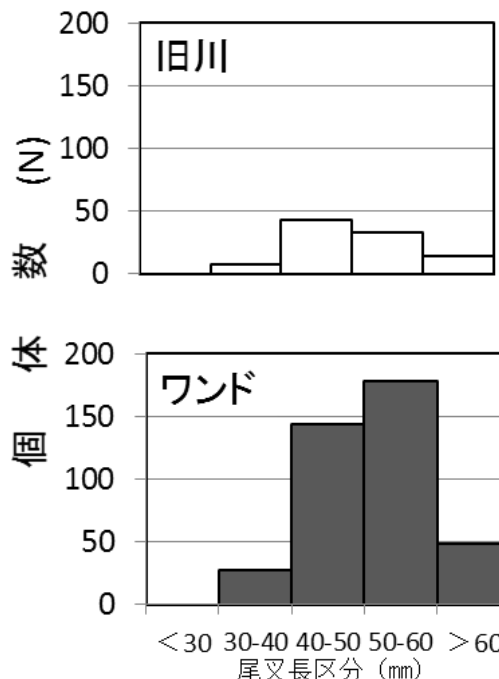


図-6 旧川とワンドで捕獲されたシロサケ稚魚の尾叉長別の個体数

いると考えられた。

12.1 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 50 mm および 50 から 60 mm の階級での捕獲数が多かった（図-6）。

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

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	ソコムジコ目 ^{※2}	++++		++++		+++		++++		+		+	
クモ綱	ダニ目			1									
	クモ目			1		2				1			
軟甲綱	ヨコエビ目			3		37		9		3			
	カゲロウ目	1	1	1	1	4	1	1	11				
昆虫綱	カワゲラ目(幼虫)	1	2			1	1	1	3				
	カワゲラ目(成虫)												
	カメムシ目			1						2	1		3
	トビケラ目	1								3			
	チョウ目			1			1						
	科												
	(幼虫)	4	6	6	25	9	23	12	28	55	61		24
	科												
	(蛹)	19	13	20	2	25	11	6	112	46	89		55
	科												
	(成虫)	17	4	14	1	43	6	1	18	87	11		34
	ハエ目(幼虫)		3			1	1			1			
	ハエ目(成虫)	1	2		8					34	1		
	コウチュウ目				1								
	アリ目												
	その他陸生昆虫				1					4	12		3
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)。

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-7)。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。

12.2 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

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

		ウトナイ堰	トキサタ堰	ウトナイ堰遡上数に対するトキサタ堰遡上数割合 (%)	降下数 (N)
9月18日-10月4日		99	81	81.8	2 5

表-5 各評価地点における各 case ごとの流速振幅 (m/s)

case.1				case.2				case.3				case.4			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	10.69	9.41	0.6526	11	10.01	9.41	0.6412	11	8.21	9.41	0.2633	11	9.11	9.41	0.9663
12	10.69	8.47	0.6815	12	10.01	8.47	0.6772	12	8.21	8.47	0.2733	12	9.11	8.47	1.0436
9	10.69	5.56	0.3131	9	10.01	5.56	0.3721	9	8.21	5.56	0.0909	9	9.11	5.56	0.6297
10	10.69	5.60	0.3630	10	10.01	5.60	0.3192	10	8.21	5.60	0.1517	10	9.11	5.60	0.4992
8	10.69	4.63	0.2360	8	10.01	4.63	0.2290	8	8.21	4.63	0.0857	8	9.11	4.63	0.3709
5	10.69	3.01	0.2281	5	10.01	3.01	0.2090	5	8.21	3.01	0.0926	5	9.11	3.01	0.3204
6	10.69	3.08	0.2052	6	10.01	3.08	0.1949	6	8.21	3.08	0.0809	6	9.11	3.08	0.2992
4	10.69	2.24	0.1179	4	10.01	2.24	0.1030	4	8.21	2.24	0.0482	4	9.11	2.24	0.1578
7	10.69	2.37	0.1322	7	10.01	2.37	0.1215	7	8.21	2.37	0.0560	7	9.11	2.37	0.1887
3	10.69	3.39	0.0252	3	10.01	3.39	0.0249	3	8.21	3.39	0.0125	3	9.11	3.39	0.0395
2	10.69	3.01	0.0121	2	10.01	3.01	0.0105	2	8.21	3.01	0.0045	2	9.11	3.01	0.0159
1	10.69	3.00	0.0040	1	10.01	3.00	0.0034	1	8.21	3.00	0.0016	1	9.11	3.00	0.0054
13	10.69	3.50	0.0151	13	10.01	3.50	0.0154	13	8.21	3.50	0.0085	13	9.11	3.50	0.0246

case.5				case.6				case.7				case.8			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	9.18	9.41	0.9737	11	6.80	9.41	0.2820	11	10.33	9.41	1.0658	11	11.14	9.41	0.8122
12	9.18	8.47	1.0464	12	6.80	8.47	0.3162	12	10.33	8.47	1.1562	12	11.14	8.47	0.8870
9	9.18	5.56	0.5916	9	6.80	5.56	0.2394	9	10.33	5.56	0.7530	9	11.14	5.56	0.5820
10	9.18	5.60	0.5072	10	6.80	5.60	0.1072	10	10.33	5.60	0.5291	10	11.14	5.60	0.3738
8	9.18	4.63	0.3690	8	6.80	4.63	0.0994	8	10.33	4.63	0.4230	8	11.14	4.63	0.3111
5	9.18	3.01	0.3087	5	6.80	3.01	0.0906	5	10.33	3.01	0.3463	5	11.14	3.01	0.2514
6	9.18	3.08	0.2897	6	6.80	3.08	0.0915	6	10.33	3.08	0.3407	6	11.14	3.08	0.2533
4	9.18	2.24	0.1553	4	6.80	2.24	0.0487	4	10.33	2.24	0.1767	4	11.14	2.24	0.1330
7	9.18	2.37	0.1868	7	6.80	2.37	0.0508	7	10.33	2.37	0.2142	7	11.14	2.37	0.1625
3	9.18	3.39	0.0413	3	6.80	3.39	0.0130	3	10.33	3.39	0.0470	3	11.14	3.39	0.0282
2	9.18	3.01	0.0170	2	6.80	3.01	0.0045	2	10.33	3.01	0.0214	2	11.14	3.01	0.0137
1	9.18	3.00	0.0057	1	6.80	3.00	0.0017	1	10.33	3.00	0.0068	1	11.14	3.00	0.0046
13	9.18	3.50	0.0258	13	6.80	3.50	0.0085	13	10.33	3.50	0.0282	13	11.14	3.50	0.0164

case.9				case.10				case.11				case.12			
地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)	地点番号	周期(sec)	水深 (m)	流速振幅(m/s)
11	11.14	9.41	0.7822	11	11.5	9.41	1.2944	11	12.51	9.41	1.2449	11	6.98	9.41	0.8251
12	11.14	8.47	0.8701	12	11.5	8.47	1.3353	12	12.51	8.47	1.2741	12	6.98	8.47	0.9187
9	11.14	5.56	0.5771	9	11.5	5.56	0.6561	9	12.51	5.56	0.5990	9	6.98	5.56	0.6899
10	11.14	5.60	0.3722	10	11.5	5.60	0.6918	10	12.51	5.60	0.6764	10	6.98	5.60	0.3508
8	11.14	4.63	0.3116	8	11.5	4.63	0.4722	8	12.51	4.63	0.4647	8	6.98	4.63	0.3068
5	11.14	3.01	0.2601	5	11.5	3.01	0.4180	5	12.51	3.01	0.4222	5	6.98	3.01	0.2667
6	11.14	3.08	0.2649	6	11.5	3.08	0.3819	6	12.51	3.08	0.3670	6	6.98	3.08	0.2684
4	11.14	2.24	0.1404	4	11.5	2.24	0.2183	4	12.51	2.24	0.2149	4	6.98	2.24	0.1422
7	11.14	2.37	0.1640	7	11.5	2.37	0.2453	7	12.51	2.37	0.2377	7	6.98	2.37	0.1521
3	11.14	3.39	0.0349	3	11.5	3.39	0.0430	3	12.51	3.39	0.0435	3	6.98	3.39	0.0387
2	11.14	3.01	0.0185	2	11.5	3.01	0.0207	2	12.51	3.01	0.0234	2	6.98	3.01	0.0134
1	11.14	3.00	0.0057	1	11.5	3.00	0.0069	1	12.51	3.00	0.0079	1	6.98	3.00	0.0052
13	11.14	3.50	0.0199	13	11.5	3.50	0.0254	13	12.51	3.50	0.0263	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

spp.)など流水性底生動物が胃内容物に多く含まれていた。ワンドではソコミジンコ目(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と思われる。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。

13 令和元(2019)年度の調査と結果と考察

13.1 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。

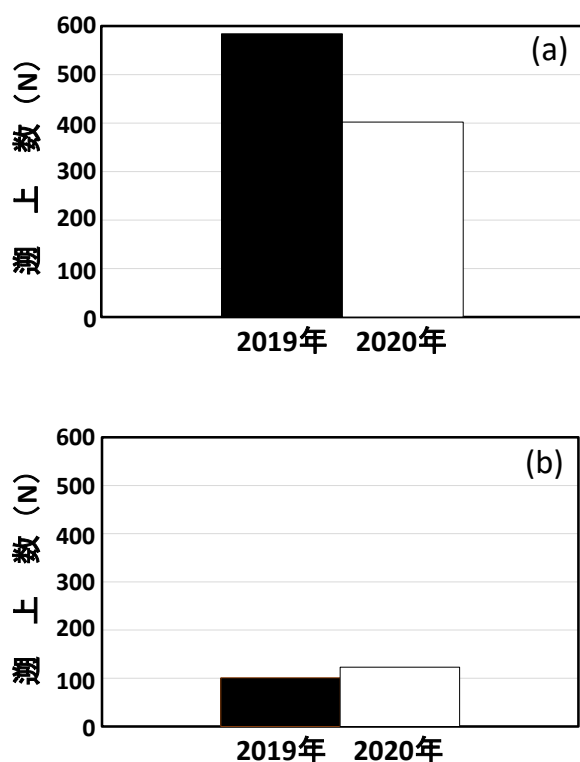


図-8 2019年度及び2020年に計測された勇払川ウトナイ堰(a)とトキサタ堰(b)におけるシロサケ遡上数

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たことから、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, 16)}、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。

13.2 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。

13.3 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1.33m/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0.69m/sとなり、さらに港側の港路付近の地点4~7では最大0.41m/sとなっていた。港奥である地点13では0.04m/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。

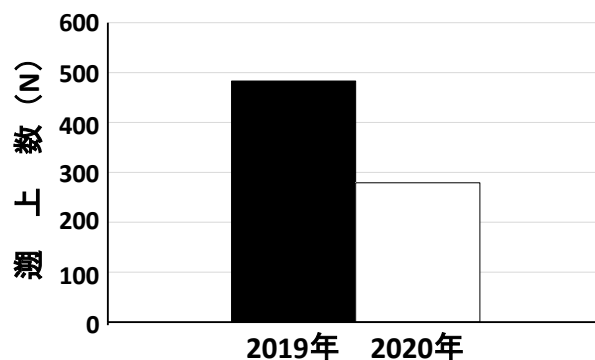


図-9 2019年度及び2020年のウトナイ堰とトキサタ堰の遡上数から推定された美々川のシロサケ遡上数

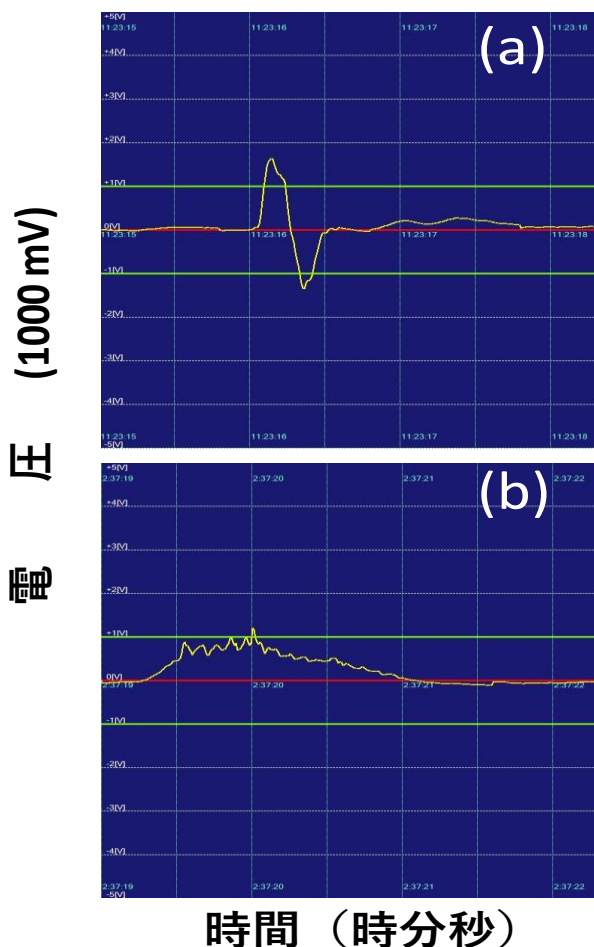


図-10 勇払川 2020年9月17日にFishCountSystem03によって「遡上」(a)と遡上を中止して「下流戻り」(b)と判定された場合の波形

13.4 厚内漁港からのシロサケ行動と流速の関係

平成 30 (2018) 年に発信器を装着して厚内漁港から放流したシロサケ 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 $2 \times$ 体長 $\sim 4 \times$ 体長とされている³⁾ことから、港で放流した個体の平均尾又長が 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 $10 \times$ 体長とされている¹⁷⁾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。

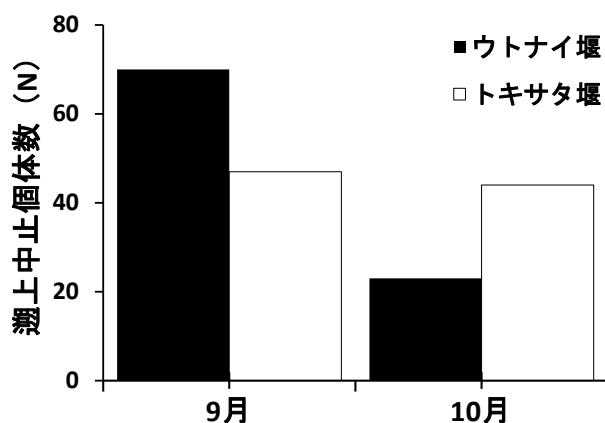


図-11 2020年の9月と10月のウトナイ堰とトキサタ堰を途中で遡上を中止した個体数

14 令和2(2020)年度の調査と結果と考察

14.1 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を確認されたものの(図-8)、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を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、ウトナイ堰の遡上数からトキサタ堰の遡上数の差分が美々川への遡上数と解釈できる。

美々川には勇払川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原理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-9)。

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

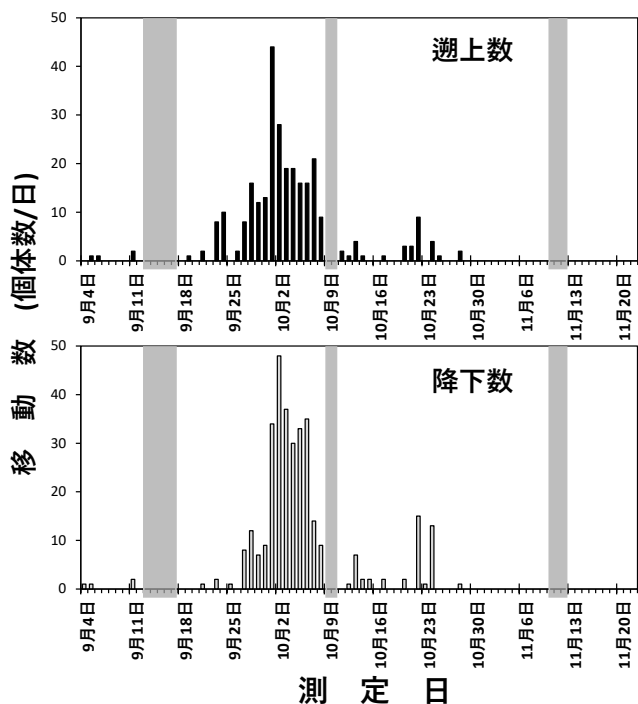


図-12 測期間中(9月4日～11月22日)の魚道のの上流端における1日あたりのサケ科魚類の遡上数および降下数。灰色網がけは欠測期間

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。

14.2 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、下流戻りの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-10(a))。一方で、下流戻りは、正の電圧方向にだけ凸の波形が現れる(図-9(b))。サケカウンターからのセンサー信号を読み取るソフトウェア(FishCountSystem_Anlyzer03)はこのような下流戻りの波形の個数を記録することができる。これにより下流戻りの個体数をウトナイ堰とトキサタ堰において2020年の9月と10月に計測した。トキサタ堰では9月と10月とで下流戻りの個体数はほとんど変わらなかったものの、ウトナイ堰では9月の下流戻りの個体数が10月の中止個体数より多かった(図-11)。ウトナイ堰の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

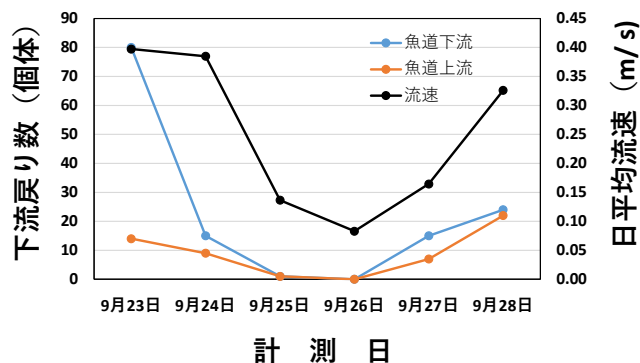


図-13 2021年の9月23日から28日の魚道途中で遡上を中止した(下流戻り)個体と水路の日平均流速

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。

15 令和3(2021)年度の調査と結果と考察

15.1 簡易魚道を遡上したサケ科魚類

余市中の川第二床固工に設置された簡易魚道ではサケ科親魚の遡上および降下が2021年9月28日ころから増加し始め、10月1日にピークを迎え10月1週目には移動数が減少して11月には移動がみられなかった(図-12)。9月4日から11月22日の間の遡上および降下数はそれぞれ195個体と330個体だった。2020年の遡上数と降下数がそれぞれ55個体と80個体だった¹⁸⁾。2020年の計測期間は9月3日から11月18日で未計測日はなく、2021年の計測日数とほとんど変わらなかったことから、2021年で移動数が増加したことは測定日数による違いとは考えられない。

一方で、余市川河口を含む日本海中部海区のシロサケ漁獲量を見ると、2021年の10月31日までの漁獲量に対する2020年の10月31日の漁獲量の比は109.9%であった¹⁹⁾。これは余市川やその支流でも2021年のサケ親魚回帰数が2020年よりも多いことを示唆しており、2021年に中の川簡易魚道で計測されたサケ科魚類の遡上数が2020年より多かったひとつの要因としてシロサケの回帰数増加が考えられる。

15.2 簡易魚道における「下流戻り」個体

2021年に余市中の川に設置された簡易魚道では、魚カウンターセンサーを取り付けた水路で下流戻り個体が観察された。そのときの流速との関係を見てみると、簡易魚道に設置された水路で確認された下流戻り個体数は、日平均流速が大きくなると増加し、日平均流速が小さくなると減少した。0.1 m/s の平均流速では下流戻り個体は存在しなかったが、約 0.15 m/s 程度で下流戻り個体が現れ、0.35 m/s を超えると多くの個体が下流に戻っていた (図-13)。

体長約 60cm シロサケの巡航速度は体長 (cm) × 2 ~ 体長 (cm) × 4 とされている³⁾ことより、約 1.2 m/s 程度が最小の巡航速度となる。今回の結果から、水路内の日平均流が 0.15 m/s 以上となると下流戻り個体を確認できたことから、その流速は巡航速度より小さな値であることがわかる。シロサケの最大遊泳能力を示す突進速度は、体長の 10 倍以上といわれている¹⁷⁾ことから、2021年に明らかになった流速値より遙かに小さい。2021年はサケ科魚類が下流戻りした瞬間の流速は計測できておらず、日平均流速よりも大きい可能性が考えられる。しかし、2021年度の結果からサケ科魚類がストレスを感じずに遡上できる場合の流速値は巡航速度や突進速度よりも小さな値の可能性が示唆される。

16 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明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。

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。

令和 3 (2021) 年度はサケ科魚類の行動を魚カウンターを用いて計測し、流速の増加とともに下流戻りが

増加する関係を明らかにして、魚類行動の遊泳負荷に着目した河川構造物 (魚道) の評価手法の構築を検討した。

参考文献

- 1) 眞山紘 (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 (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) 帰山雅秀・眞山紘(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. Simenstadc (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) ト部浩一(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) 塚本勝巳・梶原武 (1973) 魚類の遊泳速度と遊泳能力、水産土木 10: 31-36.
 - 18) 布川雅典・権田豊・中村繁人(2020)サケの遡上数を自動計測するサケカウンター, 第 64 回(2020 年度)北海道開発技術研究発表会論文.
 - 19) 北海道(2022)令和 3 年秋さけ漁獲速報 (旬報), 水産局 漁 業 管 理 課 web site (<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ggk/76979.html>) , 2022 年 6 月 10 日確認, 2022.

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）

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。令和3年度(2021)は、機能強化礁に関するこれまでの調査結果を解析し、保護育成機能の強化技術に関してとりまとめ、整備技術の開発を行った。

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

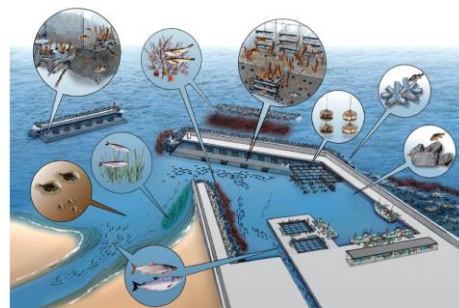


図-1 保護育成機能強化型漁港のイメージ

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。

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)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。

3. 令和元年度（2019）の主な調査項目

令和元年度（2019）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。

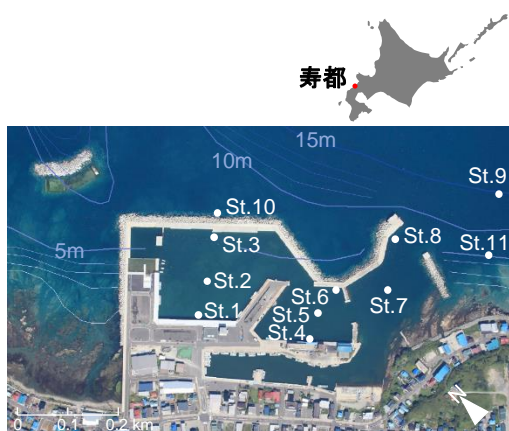


図-2 寿都漁港調査位置
(水深：海底地形デジタルデータ、日本水路協会)

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、0.56m²/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。

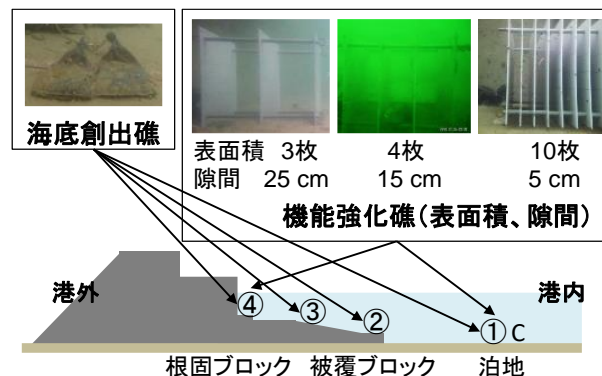


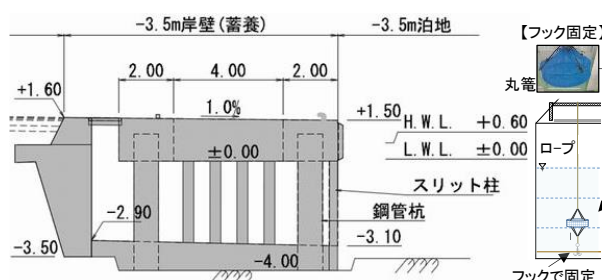
図-3 海底創出礁および機能強化礁の設置位置

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



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。

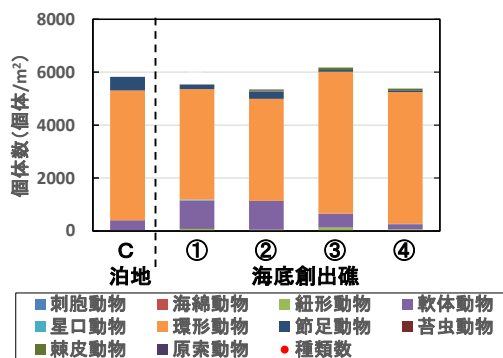


図-6 泊地と海底創出礁での底生動物

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。

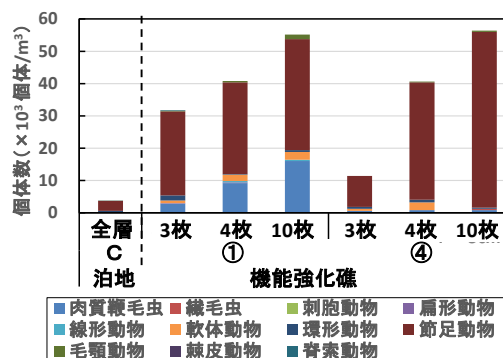


図-7 泊地と機能強化礁での動物プランクトン

4.2 静穏域活用(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)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下記の3つの改良版を作成し、表層や海底に設置した。表層型機能強化礁は、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⁾表層に設置できるように固定部分を改良した。また、海底創出礁と機能強化礁を一体化させた複合型や、コンクリート素材の機能強化礁を、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作成した。

5.2 静穏域活用(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		

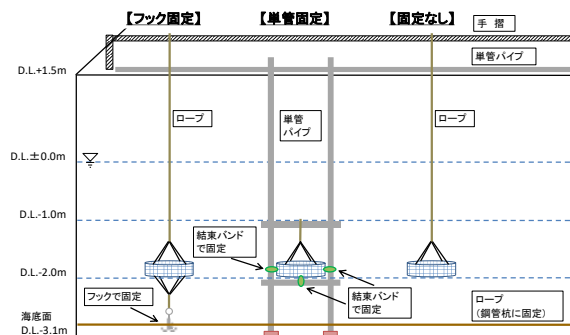


図-8 丸籠の固定方法

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。

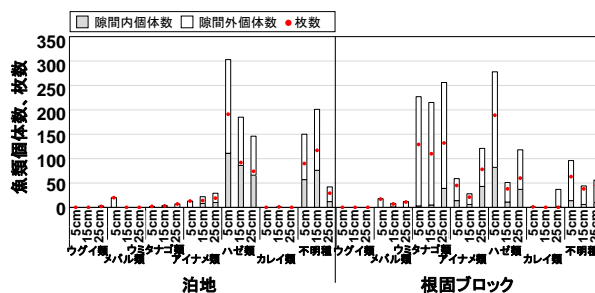


図-9 機能強化礁で観察された魚類

6. 2 静穏域活用（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。

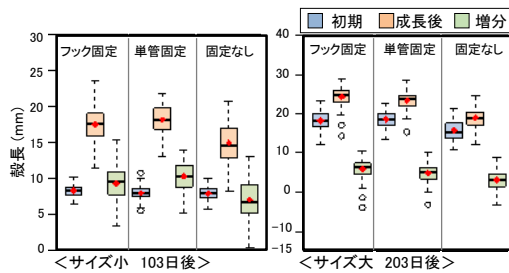


図-10 籠固定方法による成長の違い

7. 令和3年度（2021）の主な検討項目

令和3年度（2021）は、継続調査とともに、改良した機能強化礁を含め、これまでに得られたデータの解析を進めることで、保護育成機能の強化および有効活用技術に関してとりまとめを行った。そのために、主に、隙間サイズ、設置場所や水深、素材の異なる機能強化礁での、餌料となる基礎生産者、付着動物や動物プランクトンの現存量に加え、それらの魚類利用に関する違いから、餌場機能の強化技術について検討した。

8. 令和3年度（2021）の主な検討結果

上記 3.1 の機能強化礁の設置後 2～6 ヶ月間隔で試料を採取し分析したこれまでのデータをまとめ、泊地の水柱や堆積物などの周辺環境と機能強化礁における、基礎生産者（微細藻類）を Chl. a の現存量として図-11 に、付着動物を図-12、動物プランクトンを図-13 に示し、魚類を図-14 に示す。

機能強化礁を設置していない泊地環境と改良前の

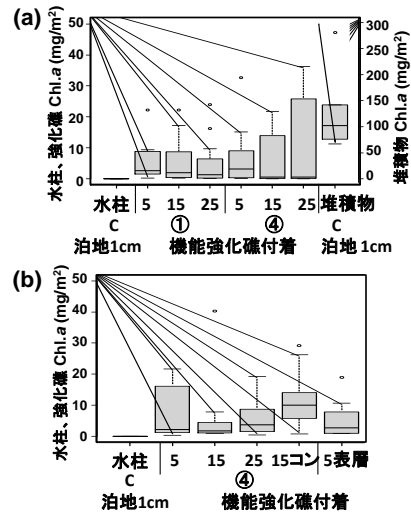


図-11 泊地と機能強化礁での Chl. a 現存量
(a) 隙間サイズ、設置場所、(b) 隙間サイズ、素材、設置水深での違い

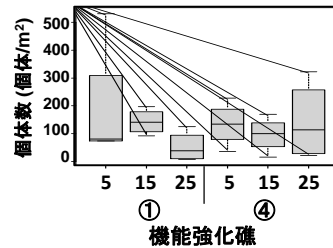


図-12 機能強化礁の付着動物

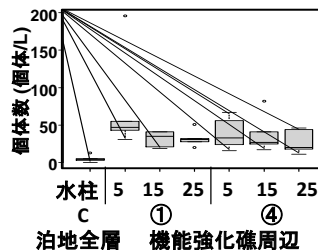


図-13 泊地と機能強化礁での動物プランクトン

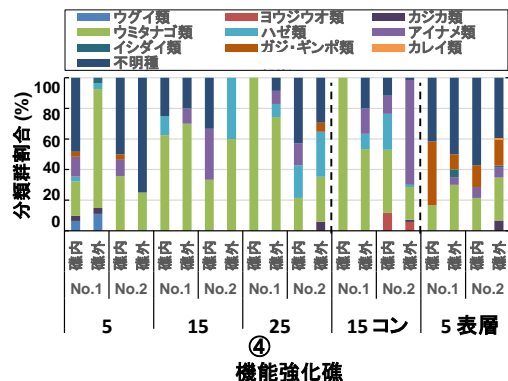


図-14 機能強化礁で観察された魚類

機能強化礁との比較（図-11 (a)）では、泊地の堆積物は、有意に水柱や機能強化礁に比べ高い Chl. *a* 値であったが (Steel-Dwass 法 $p < 0.05$)、泊地と根固ブロック上に設置した機能強化礁では有意な差は見られず ($p > 0.05$)、水柱に比べ有意に高い値を示していた。また、改良後のコンクリート素材や表層設置に関しても（図-11 (b)）、機能強化礁間では有意な差は見られなかったが、機能強化礁は水柱に比べ有意に高い Chl. *a* 値を示していた。また改良の有無に係わらず、隙間サイズ間では有意な違いは見られなかった。そのため、試験条件下の設置場所や水深、材質や隙間サイズの違いに関係なく、機能強化礁を設置することにより水柱に基礎生産者が増加することが明らかとなった。

また、基礎生産者を利用する付着動物や動物プランクトンにおいても同様に、設置場所や隙間サイズに有意な差はないが、機能強化礁を設置することにより水柱に両者の個体数が増加することが確認された（図-12、13）。加えて、付着動物では環形動物、動物プランクトンでは節足動物が優占しており、事前研究（17. 1. 1）での魚類胃内容物調査から、両者は魚類の餌料になり易いと考えられた。そのため、機能強化礁における水柱での表面積の増加によって基礎生産者から魚類までつながる餌場機能としての強化の有効性を確認できた。

観察された魚類の分類群割合では、表層で小型のガジ・ギンポ類が多かったが、それ以外は素材や隙間サイズで明確な違いは見られなかった（図-14）。しかし、隙間サイズの違いにより、アイナメ類では観察される体長が異なっていた。図-9の結果も踏まえると、機能強化礁を利用する魚類では、設置地点や水深により出現種割合、隙間サイズにより利用する魚類の体長に影響を与えることが確認された。

これらのことから、対象魚種の食性や生態に合わせた設置場所や隙間サイズの設定に留意する必要があるが、生物が生息可能な付着基質や隙間、海底環境を創出する手法は餌場機能を強化可能であることが示唆され、保護育成機能強化技術として有益な手法であることが明らかとなった。

9. 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。令和3年度(2021)は、継続調査とともに、収集したデータの解析を進めることで、沿岸構造物における保護育成機能の強化および有効活用技術の有効性を確認出来たことから、これらの技術についてとりまとめ、整備技術の開発を行った。

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彙報, 64(2), pp. 37-44, 2014。
- 4) Komorita, T., Kajihara, R., Tsutsumi, H., Shibanuma, 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、石澤健志、梶原瑠美子、稲葉信晴、松本卓真

【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。

令和元年度(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、元年度(2019)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。

令和3年度(2021)は、魚礁ブロック近傍の粒子状有機炭素(POC)堆積過程を確認し、水理模型実験によって流況の数値解析の精度を高めることにより漁場整備効果の評価手法を構築し、沖合漁場整備手法マニュアルとしてとりまとめた。

キーワード：流況解析、餌料生物、数値解析、沖合漁場整備

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204万t(2020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

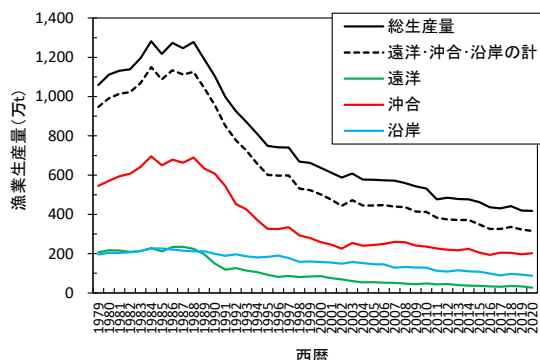


図-1 漁業生産量の推移

いる³⁾。

海中の人工構造物には、魚類の「蛸集効果」「保護育成効果」、さらには魚類の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漁場環境整備に資する技術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及び沖合漁場整備手法の構築

本流況解析では、北海道利尻島沖の人工魚礁⁹⁾や他

の多くの海域に設置されている魚礁ブロック(図-2)を対象の構造物とし、一辺L=3.25mのタイプを選定した。当該魚礁ブロックは非構造格子の構造部材で構成される複雑な形状であるため、海洋構造物に適用される3次元数値流体解析¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾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いオープンソースの3次元数値流体解析モデルであるOpenFOAM¹³⁾を採用した。以下にOpenFOAMを用いた流況解析の結果を示すが、解析手法の詳細については文献¹⁵⁾¹⁶⁾を参照されたい。



図-2 解析対象の魚礁ブロック

2.1 魚礁ブロック単体の流況解析結果(令和元年度(2019))

図-3、4に、魚礁ブロックの流況解析結果のうち、流況が最も発達した計算時間300sec時点での魚礁ブロック近傍の断面水平流速と底面平均流速の分布を示す。流入流速は平成29年の現地観測⁹⁾に基づく0.16m/sの一樣流とし、乱流モデルはLESモデル($\kappa-\epsilon$ モデル)¹⁴⁾を採用した。魚礁ブロックの内部および近傍では流れの遮蔽・擾乱の効果による流速低減や渦流・滞留による流速低減が生じており、その影響はブロック単体でも15m程度以上の範囲に及ぶことが確認された。

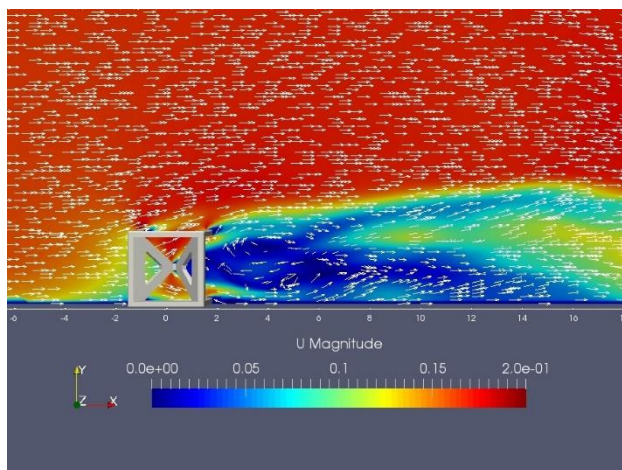


図-3 魚礁ブロックの断面水平流速分布とベクトル

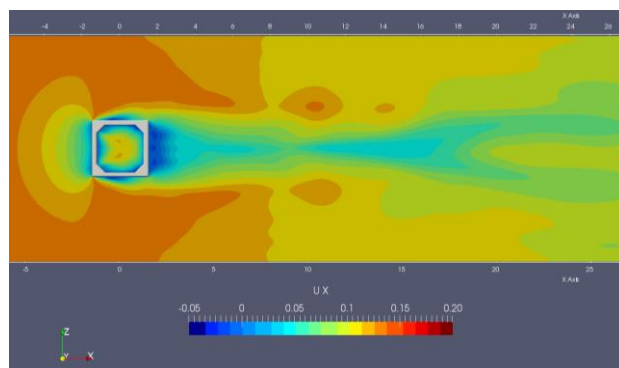


図-4 魚礁ブロックの底面水平流速分布

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ることが推察される。

2.2 ブロック積層構造の流況解析結果(令和2年度(2020))

図-5、6に水平方向・鉛直方向に魚礁ブロックが3個並ぶ積層構造の断面流速分布および平面流速分布を示す。流入流速は前述2.1の単体ブロックと同じ0.16m/sの一樣流とし、ブロックの計算格子設定を大幅に簡略化した上で、乱流モデルはRANSモデル($\kappa-\epsilon$ モデル)¹⁴⁾を採用し、計算負荷の低減を図った。

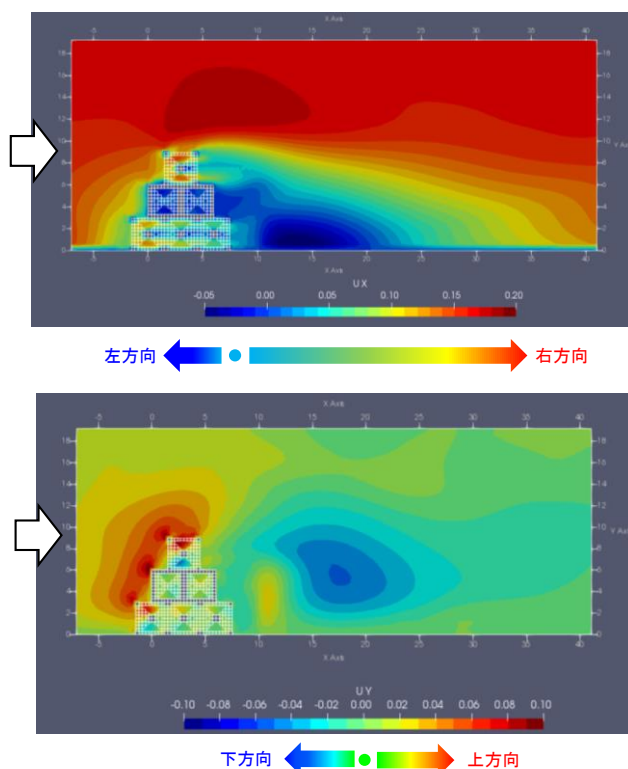


図-5 積層構造の魚礁ブロックの断面流速分布(上: 水平流速分布、下: 鉛直流速分布)

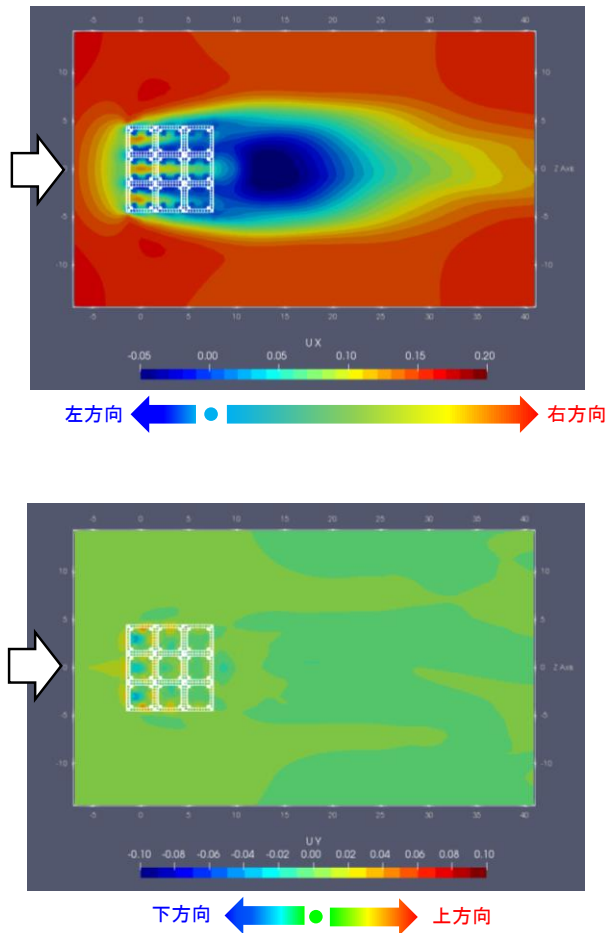


図-6 積層構造の魚礁ブロックの平面流速分布
(上: 水平流速分布、下: 鉛直流速分布)

解析の結果、魚礁ブロック単体の場合と比べ、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。また、計算格子と計算手法(乱流モデル)の改良により演算時間を大幅に短縮(単体モデルで約30日/1ケースから数時間/1ケースに短縮)でき、より複雑な積層構造あるいは平面配置への計算手法の展開を可能とした。

2.3 粒子挙動解析による粒子状有機物質の堆積量の評価の検討(令和3年度(2021))

2.3.1 解析手法

2020年までの解析結果を受けて、2021年では流況解析に粒子挙動解析を組み合わせ、餌料物質である粒子状有機物質(POC等のデトリタス)の沈降から堆積量の評価を行うための手法の構築を行った。ブロック周辺の渦流と滞留域の再現性と計算負荷の両立を図るため、計算格子と乱流モデルのさらなる見直しを進めた。計算格子は図-7に示す非構造格子と構造格子によりブロック構造をできるだけ忠実に再現し、乱流モデル

はRANSモデルのうち $\kappa-\omega$ モデル($\kappa-\varepsilon$ モデルの改良モデル)を採用して渦流の再現性の向上を図った。流入流速は2020年の現地観測¹⁶⁾に基づく0.16m/sの一様流とした。計算領域は図-8(上)に示すとおりである。なお、流況解析の精度を検証するために水理模型実験との比較を行い、計算値と実験値が整合することを確認している¹⁵⁾。沈降粒子挙動解析は、沈降粒子を有機懸濁粒子(有機物と鉱物の擬集体)と仮定し、流況解析に粒子追跡ソルバMPPICFoamを追加することで行った。このソルバでの粒子沈降速度の決定のため、球体粒子の粒径Dは現地観測¹⁶⁾でのセジメントトラップで捕捉された沈降粒子の粒度分布に基づき $D=100\mu\text{m}$ に設定し、粒子密度 ρ は有機物と鉱物の平均的な値として $\rho=1.5\text{g}/\text{cm}^3$ に設定した。この条件での粒子の初期投入面は図-8(下)に示すとおりであり、堆積粒子はブロック後流域に配置した粒子計数面にて計数・評価した。

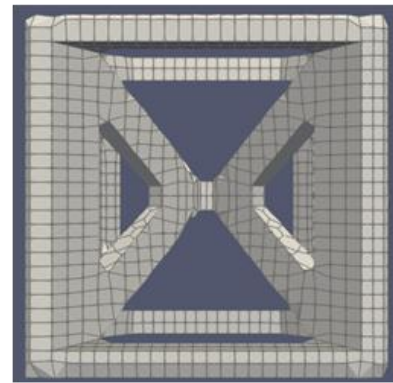


図-7 魚礁ブロックの計算格子

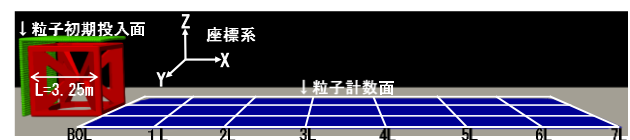
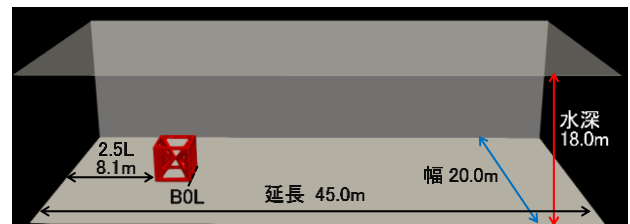


図-8 構造物周辺の流況解析の計算領域(上、実尺)
粒子挙動試算の沈降粒子の投入面と計算面(下、実尺)

2.3.2 解析結果

図-9は、単体の構造物を流速0.1m/sの流体に設置した場合の沈降粒子の挙動を示す。初期投入面の粒子は60秒後には多くが構造物を通過して後流域に入り、

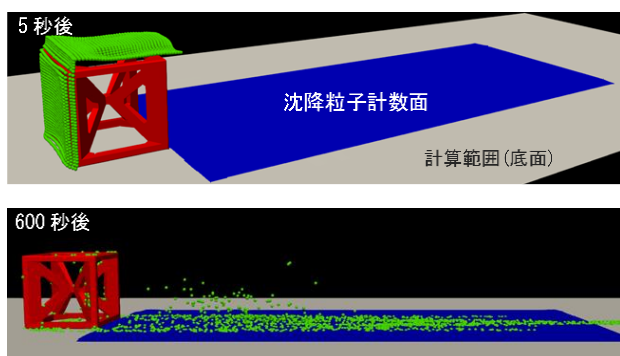


図-9 構造物の後流域の粒子の挙動(側面)

200 秒後には 4L 付近まで到達、600 秒後には投入粒子の殆どが着底することが確認された。

図-10 は、構造物の有無による計数面での沈降粒子の着底状況の平面分布(800 秒後)を示す。構造物が有る場合は、投入粒子全数の 68%が計数面内に着底したが、一方で構造物が無い場合は計数面内への着底は投入粒子全数の 12%に留まった。構造物が有る場合は、構造物の近傍に発生する渦流や後流域に形成される流速低減域の影響により計数面内での着底粒子が多くなったと考えられる。この結果は、実際に現地に設置される魚礁ブロックには水中の粒子(POC 等の餌料物質)を一定範囲の海底面に着底・堆積を促進させる効果があることを示唆している。

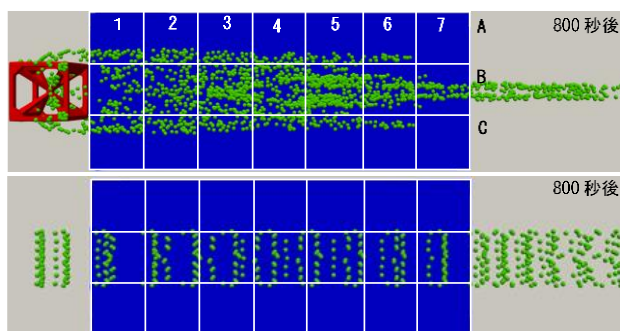


図-10 着底粒子の平面分布: 構造物有り(上)・無し(下)

人工魚礁の餌料培養効果については、構造物近傍で魚類の餌料となる底生生物が増加する事例が報告されている¹⁷⁾。北海道利尻島沖水深 90m の人工魚礁近傍でも、餌料生物(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いる⁹⁾。今回の OpenFOAM による流況解析の結果からも、構造物の設置による流速低減と、それに伴う沈降粒子(餌料物質等)の堆積が利尻島沖人工魚礁で観測された条件下でも発生していることが考えられる。

2.4 沖合漁場整備手法の構築

魚礁ブロック下流側での沈降粒子の挙動とその堆積状況が把握されたことから、沈降粒子を栄養段階において低位のデトリタス粒子に置き換え、生態系モデルのパラメータとして入力することで、人工魚礁の設置による漁場の生産量の評価を行った。

図-11 に、漁場の生産量の評価のための生態系モデルの概念図を示す。生態系モデルは既成の生態系モデル Ecopath with Ecosim¹⁸⁾ を採用した。Ecopath モデルは被食者(餌料生物、餌料物質)と捕食者(魚類)の生物量をパラメータとして入力することで漁場における生産量を評価することができる。被食者のパラメータは既往の現地観測値および前述の数値解析で得られる人工魚礁ブロックによる堆積効果を反映した粒子沈降量、捕食者のパラメータは漁獲統計値を用いることで、一例として利尻島沖海域における漁業生産量を評価した結果を以下に示す。

表-1 に Ecopath モデルで計算された被食者と捕食者のパラメータに基づく生産量の内訳を、図-12 に食物網における栄養段階と被食者・捕食者の関係を示す。生産量に占める被食量と漁獲量の割合の合計(EE)は、デトリタスで最も低く、動物プランクトンで最も高かった(表-2)。また、バイオマスは、栄養段階 I の占める割合が 85.5%、栄養段階 II の占める割合が 11.93%と、この低次 2 段階で全体の 97%を占めた(図-12)。これにより漁場整備効果の評価においては、デトリタスを含む低次生産の影響に配慮する必要があると考えられる。

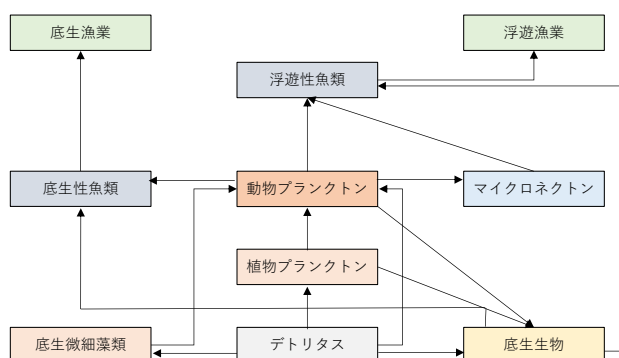


図-11 Ecopath モデルによる漁業活動を含む生態系の模式図

表-1 Ecopath モデルを用いて推定された各機能群の生物特性値

	機能群	Habitat area (fraction)	Biomass in habitat area (t/km)	Production biomass (/year)	Consumption /biomass (/year)	Ecotrophion Efficiency	Production /consumption
		計算領域	現存量 (B)	現存量/生産量 (P/B)	現存量/摂取量 (Q/B)	被食量・漁獲量/生産量 (EE)	生産量/消費量 (P/Q)
1	浮遊性魚	1.000	31.000	1.710	8.210	0.585	0.208
2	底生性魚	1.000	2.000	1.340	5.750	0.746	0.233
3	マイクロネクトン	1.000	72.940	2.560	12.050	0.273	0.212
4	底生生物	1.000	147.200	2.680	8.920	0.088	0.300
5	動物プランクトン	1.000	30.700	46.210	154.000	0.839	0.300
6	植物プランクトン	1.000	329.300	64.210	-	0.185	-
7	底生微細藻類	1.000	19.710	64.210	-	0.581	-
8	デトリタス	1.000	333.400	-	-	0.063	-

4 — 被食捕食の関係: 丸の大きさが現存量(B)を、線の太さが捕食被食によるバイオマスのフローを表す

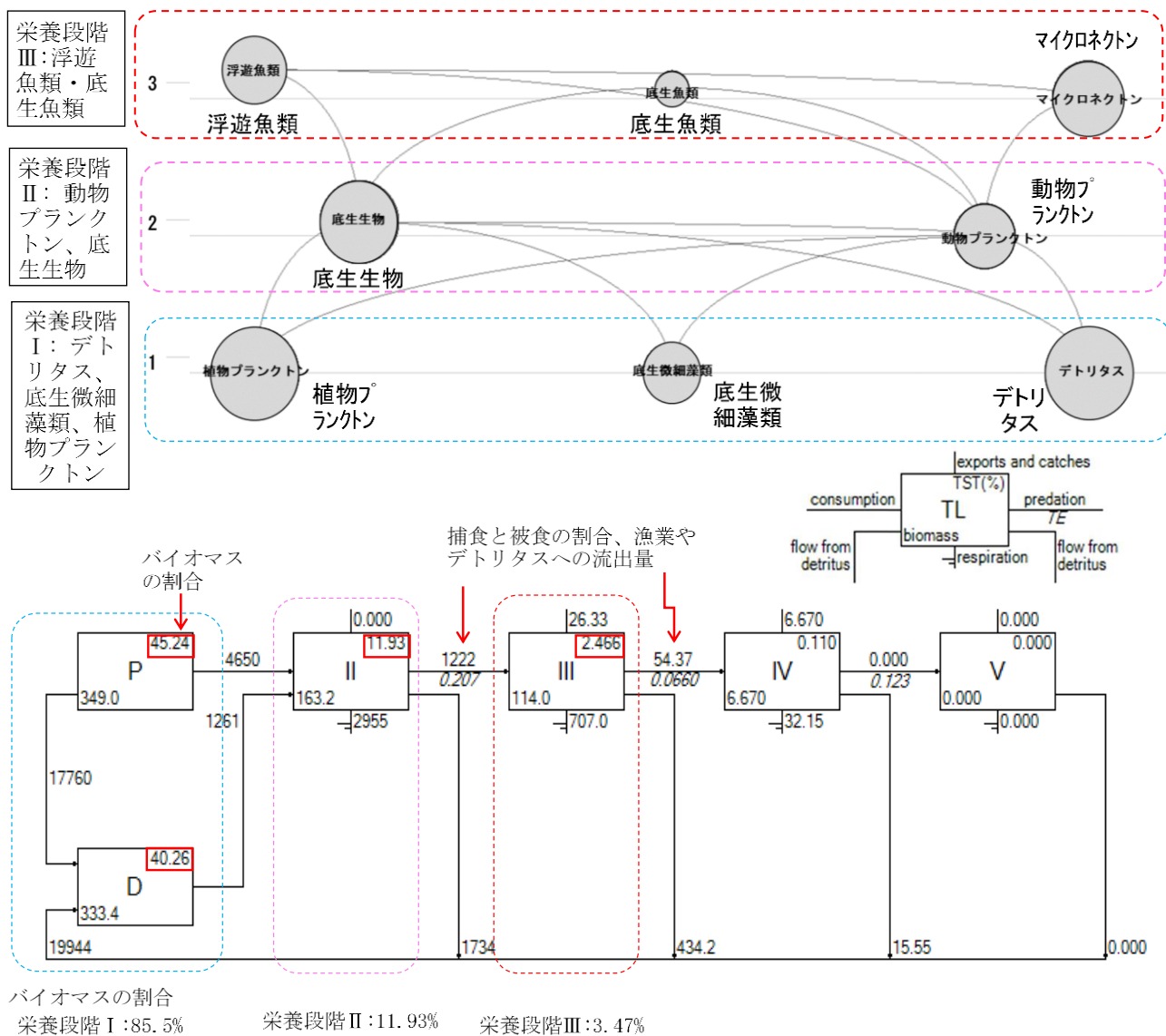


図-12 食物網を構成する栄養段階と捕食被食の関係

次に、表-2、3に同じ入力パラメータで計算した人工魚礁の整備前と整備後の漁業生産量の比較を示す。総生産量 (Sum of consumption) が人工魚礁の整備により約 1.5 倍に増加している。前述のとおり利尻島沖海域では人工魚礁によるデトリタスの堆積効果や餌料培養効果といった低次生産の影響が大きいと考えられることから、低次の餌料の増大の効果が現れていると考えられる。

Parameter	Value	Units
Sum of all consumption	13172.620	t/km ² /year
Sum of all exports	13148.210	t/km ² /year
Sum of all respiratory flows	3951.786	t/km ² /year
Sum of all flows into detritus	15243.130	t/km ² /year
Total system throughput	45515.750	t/km ² /year
Sum of all production	23686.311	t/km ² /year
Mean trophic level of the catch	3.198	
Gross efficiency (catch/net p.p.)	0.002	
Calculated total net primary production	17100.000	t/km ² /year
Total primary production/total respiration	4.327	
Net system production	13148.210	t/km ² /year
Total primary production/total biomass	38.475	
Total biomass/total throughput	0.010	/year
Total biomass (excluding detritus)	444.440	t/km ²
Total catch	27.885	t/km ² /year
Connectance Index	0.265	
System Omnivory Index	0.050	
Total market value	27.885	1
Total shadow value	0.000	1
Total value	27.885	1
Total fixed cost	0.000	1
Total variable cost	22.308	1
Total cost	22.308	1

表-2 Ecopath モデルによる漁場生産量の計算結果 (人工魚礁整備後)

Parameter	Value	Units
Sum of all consumption	8944.702	t/km ² /year
Sum of all exports	11089.690	t/km ² /year
Sum of all respiratory flows	4457.508	t/km ² /year
Sum of all flows into detritus	12216.120	t/km ² /year
Total system throughput	36708.020	t/km ² /year
Sum of all production	18245.449	t/km ² /year
Mean trophic level of the catch	3.198	
Gross efficiency (catch/net p.p.)	0.001	
Calculated total net primary production	15547.200	t/km ² /year
Total primary production/total respiration	3.488	
Net system production	11089.690	t/km ² /year
Total primary production/total biomass	53.206	
Total biomass/total throughput	0.008	/year
Total biomass (excluding detritus)	292.210	t/km ²
Total catch	18.590	t/km ² /year
Connectance Index	0.265	
System Omnivory Index	0.059	
Total market value	18.590	1
Total shadow value	0.000	1
Total value	18.590	1
Total fixed cost	0.000	1
Total variable cost	14.872	1
Total cost	14.872	1

表-3 Ecopath モデルによる漁場生産量の計算結果 (人工魚礁整備前)

以上より、低次生産に大きく影響すると考えられる粒子状有機物質の挙動を数値解析により把握し、これと現地観測データや漁獲統計データによるパラメータを Ecopath モデルに入力して解析する手法により、漁場整備効果の評価を行うことができ、沖合域の漁場整備に貢献することができると考えられる。

4. まとめ

本報告の結果をまとめると以下の通りである。

- ① 3次元数値流体解析モデル OpenFOAM により構造物 (魚礁ブロック) 周辺の粒子挙動解析を行い、低次生産の餌料である粒子状有機物質の堆積量に与える人工魚礁構造物の影響を評価することが出来た。
- ② 数値解析、現地観測データ、漁獲統計データで得られるパラメータを生態系モデル Ecopath モデルに入力・解析することで、人工魚礁の整備前後での漁業生産量を評価することが出来た。これにより、沖合域の漁場整備手法として提案できた。

この成果を用いて沖合漁場整備手法マニュアルにとりまとめた。本マニュアルは今後の幅広い普及を目指した一層の取り組み等を通し、北方海域の水産資源動態に対応した、生産性の向上に貢献す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/attach/pdf/index-58.pdf(2022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ー令和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ー漁場施設の魚類増殖効果に関する研究 Iー、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) 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.
- 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) 磯部雅彦・高橋重雄・余錫平・榊山勉・藤間功司・川崎浩司・蔣勤・秋山実・大山洋志: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究、海洋開発論文集、第 15 巻、pp.321-326、1999.
- 12) Gang Wang, Rong Wan, XinXin Wang, FenFang Zhao, XiaoZheng Lan, Hui Cheng, WeiYao Tang, QingLong Guan: Study on the influence of cut-opening ratio, cut-opening shape, and cut-opening number on the flow field of a cubic artificial reef, *Ocean Engineering*, 162, pp.341-352, 2018.
- 13) OpenFOAM WEB(2020): <https://www.openfoam.com/>
- 14) 土木研究所プログラム研究報告書、2021.
- 15) 人工魚礁構造物の流況解析における OpenFOAM の適用性、水産工学会学術講演会論文、2022.
- 16) 松本卓真・石澤健志・稲葉信晴・須藤賢哉・的野博行: 北海道利尻島人工魚礁における魚類相と餌料環境、水産工学会学術講演会、2022.
- 17) Xinyuan Yanga, Chenggang Lin, Xiaoyue Song, Min Xu, 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.
- 18) Ecopath with Ecosim WEB:
https://www.google.com/search?q=Ecopath&rlz=1C1TKQJ_jaJP1004JP1005&oq=Ecopath&aqs=chrome..69i57j0i30l8j0i10i30.4754j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8

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）

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なった。

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。

令和3年度(2021)は、新たな調査対象海域(積丹半島東部に位置する漁港)を設定し、引き続き、食害防止礁の効果と生息環境との関係に関する調査を実施した結果、夏場の海水中の酸素濃度の低下が認められ、底質に硫化物が多く検出された場所では放流したとしても数ヶ月以内に稚ナマコは放流場から逸散する事が明らかとなった一方で、食害防止礁内に収容された個体は試験区によっては高い生残率(>90%, 9ヶ月後)を示し、ナマコ総重量に関しても放流時から約12倍(1年後)の増加が確認され、過年度とは異なる海域(漁港)においても本技術の高い効果が明らかとなった。また、これまでの成果を総括し、漁港施設を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増殖機能付加型漁港の整備技術に関してとりまとめた。

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と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

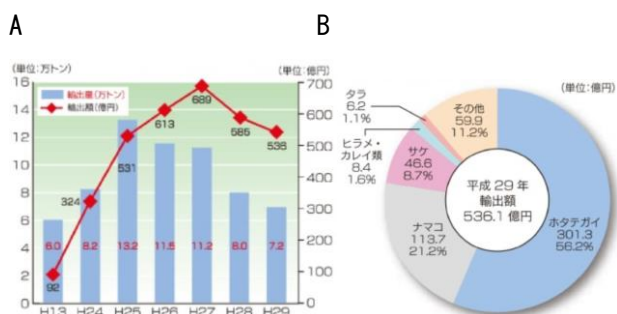


図-1 北海道における水産物輸出量及び金額の推移とその内訳⁴⁾

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。令和3年度(2021)は、新規調査フィールド(古平漁港)における食害防止礁の効果と生息環境との関係に関する調査を実施し、過年度の成果の一般化を目指した取り組みを行った。

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

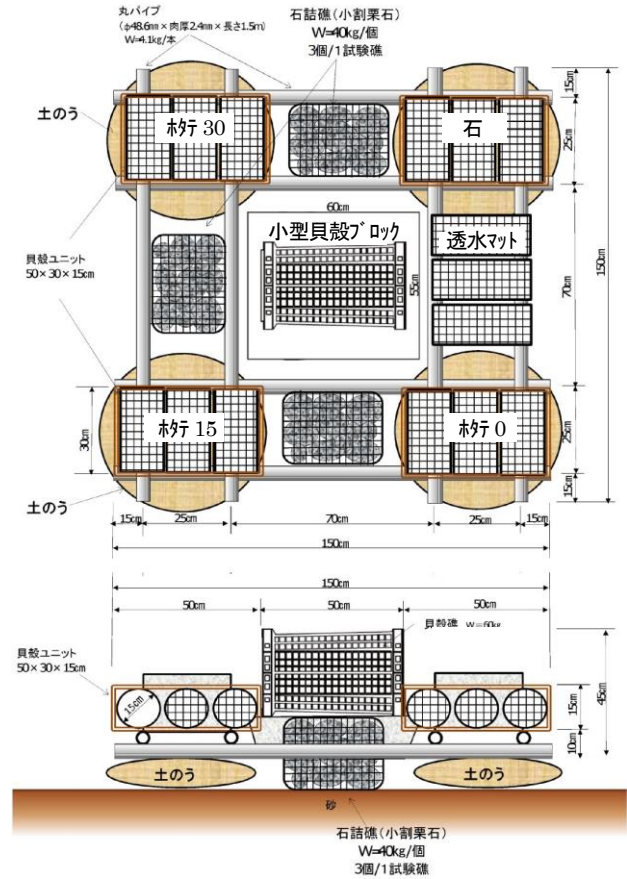
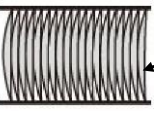
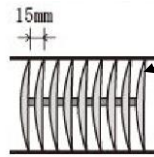
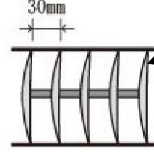




図-3 放流試験礁 (全体)

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)。

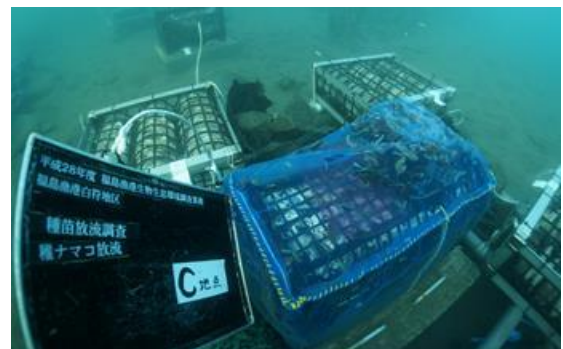


写真-1 放流状況

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ハブラシを用いてよく剥離させた後、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歯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よく洗浄後、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、微生物計数用の固定試料を得た。バイオフィルム及び糞粒試料は、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回ずつ計数を行った。

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地点に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

2.2.8 新規フィールドにおける食害防止礁の効果の検証と生息環境調査

2020年10月に積丹半島東部に位置する漁港(古平漁港)内に食害防止礁を設置し(写真-3)、マナマコ種苗を放流し(100匹区及び200匹区)、1年間追跡調査を実施した。また、礁を設置した地点の底泥を採取し、Chl. *a*(クロロフィル *a*)やTOC(全有機炭素)、硫化物イオンについて分析を行うとともに、多項目水質計による水質に関する長期観測も行った。



写真-3 礁の設置及び調査地点

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長い事が分かる。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長かった事から、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。

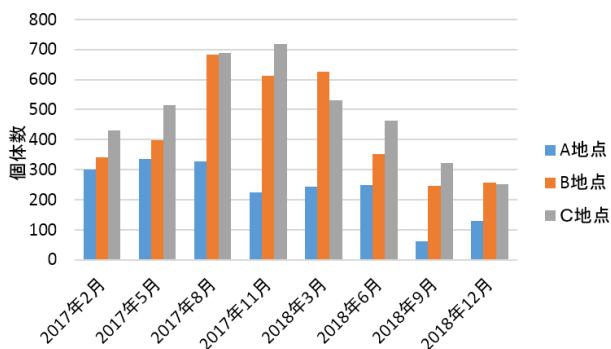


図-4 地点別の生息個体数(5種類のユニットの合計)

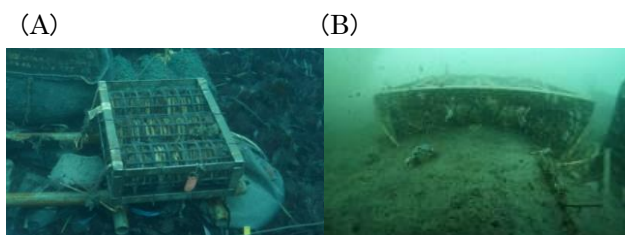


写真-3 A 地点の堆砂状況 (A) 堆砂前、(B) 堆砂後

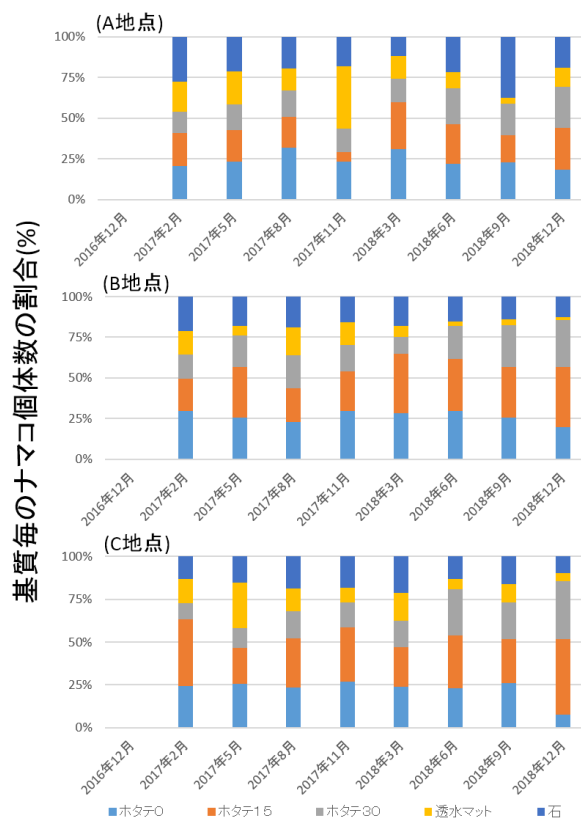


図-5 ナマコ個体数の基質別の割合

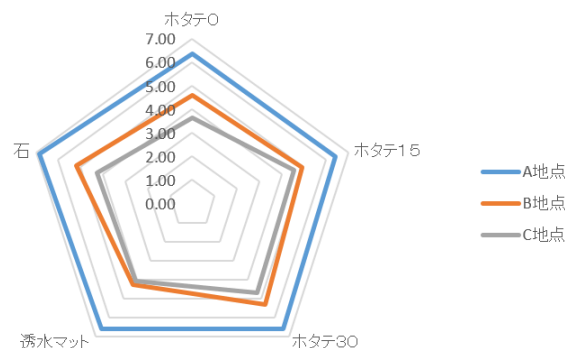


図-6 2 年後の平均標準体長 (cm)

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従い高い傾向が認められている事から、クロロフィ

ル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。

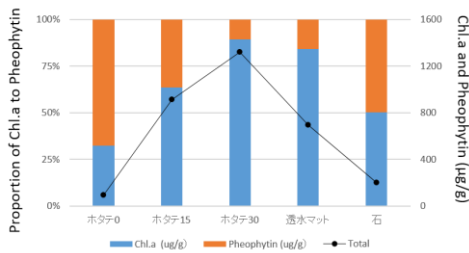


図-7 基質毎のクロロフィル a 及びフェオフィチン量と割合

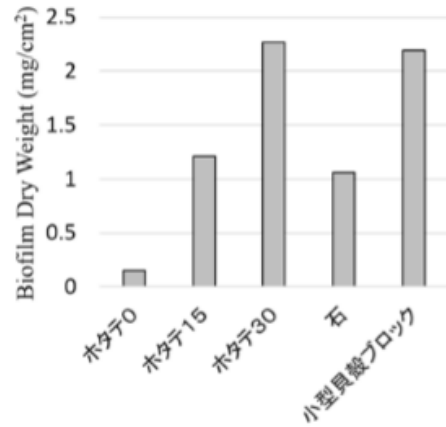


図-8 基質毎のバイオフィルム乾重量(mg/cm²)

3.1.3 バイオフィル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ルム乾重量 (BDW) の分析結果を図-8 に示す。バイオフィルム乾重量 (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。バイオフィル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 1.54×10^4 cells/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、バイオフィルム中の生細胞比率 (=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。

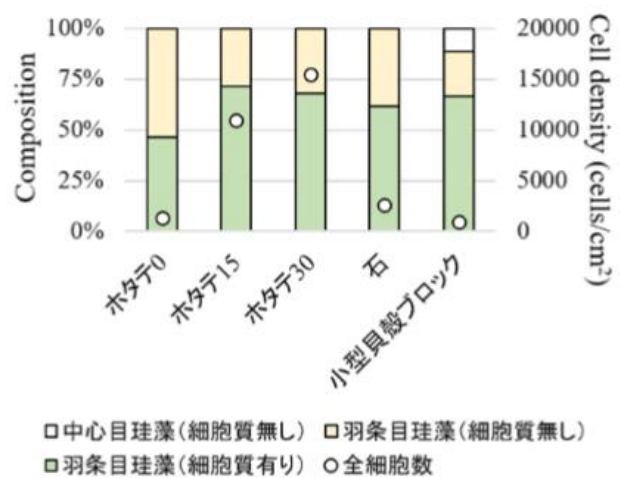


図-9 基質バイオフィルム中の微細藻類密度及び組成

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、バイオフィルム中と一致し、ホタテ30で 2.4×10^4 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。

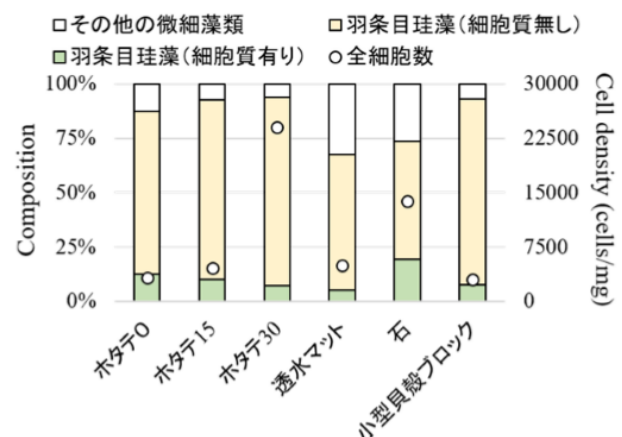


図-10 稚ナマコ糞粒中の微細藻類密度及び組成

以上の結果から、空隙が基質上に形成されるバイオフィル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ル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。

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。

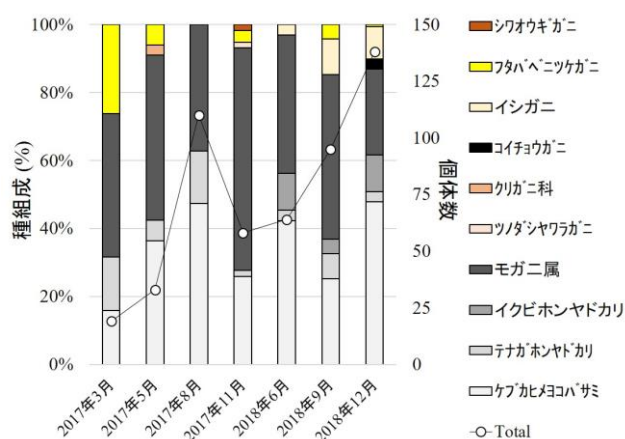


図-11 出現したカニ及びヤドカリ個体数と組成 (St. C)

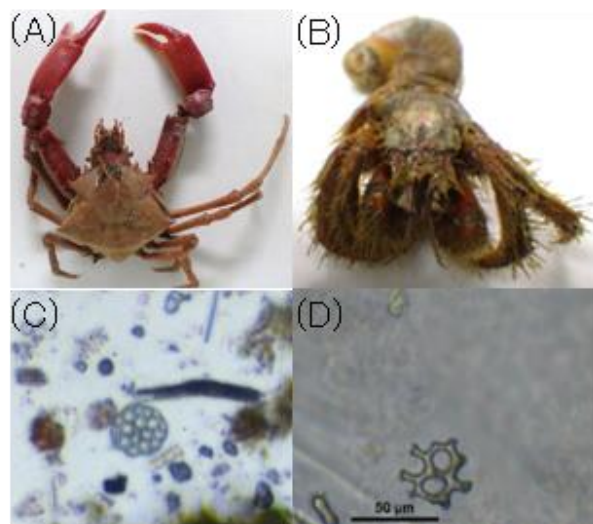


写真-4 オオヨツハモガニ(A)、ケブカヒメヨコバサミ(B)、オオヨツハモガニ胃内容物(C)及びケブカヒメヨコバサミ胃内容物(D)にナマコ骨片が見られる

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、放流後半まで開放区と同程度であったが、夏場以降から、低調であった。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。

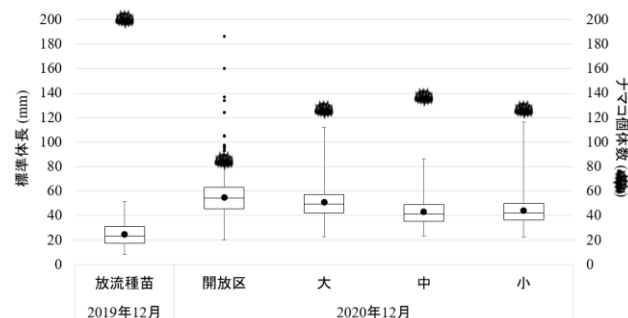


図-12 放流1年後の礁内のナマコ体長及び個体数

3.1.6 食害防止礁の効果の再現性と周辺環境

目合い(中)に初期投入密度100匹とした稚ナマコの1年後の体長、湿重量及び礁内ナマコ総重量を種苗放流時と比較した形で写真-5に示す。1年後の稚ナマコ平均体長は放流時の約2.7倍、湿重量は約16倍、礁内の総重量は約12倍と増加しており、生残率も71%と対象区(16%)と比較して高い水準を維持したことから、これまでとは異なる海域(漁港)、環境においても、当該礁の高い再現性が示された。一方で、礁を設置した場所の底質中の硫化物イオン濃度は0.6mg/g sedimentと港内でも特に高い値を示し、水温については、8月初旬に25℃を超える高水温が確認されている(図-13)。溶存酸素についても7月から9月にかけて散発的に急激な濃度の低下が確認され、9月12日には0.7mg/Lとナマコを含め底生生物が生存可能な濃度の目安として知られる2.9mg/Lを大きく下回る値が確認された(図-13)。実際に7月時点(放流後9ヶ月)で極めて高い生残率(97%)が得られていた実験区でも夏場に大幅に生残率が低下したことから、夏場の高水温、低溶存酸素濃度が稚ナマコの生残に悪影響を及ぼした事が示唆された。

一方で、夏場の環境悪化にも関わらず、1年後の生残率が高く維持された事は、当該礁が環境悪化時においても保護・育成の役割を失わずに機能した事を示唆しているが、放流場として選択する場を底質環境よりの

確に判断する事で、効果を一層高めることも可能だろう。

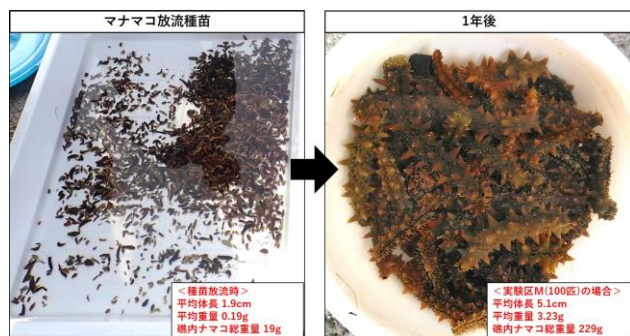


写真-5 種苗放流時（左）と1年後の稚ナマコ

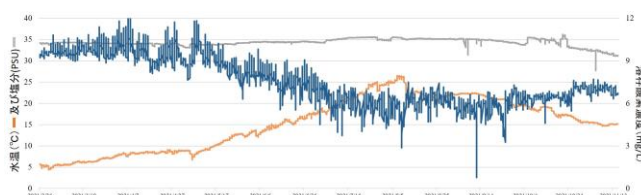


図-13 水温、塩分及び溶存酸素濃度の変化

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)、令和元年度(2019)、令和2年度(2020)及び令和3年度(2021)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ことから、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ル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。
- ・夏場の高水温や溶存酸素濃度の低下などによる生残への悪影響が一部の実験区で示唆されたが、環境条件の異なる新たなフィールドにおいても食害防止礁の高い効果が認められ、当該礁の効果の再現性が示された。

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(2021)年度においては、これまでとは異なる海域、環境下にて本研究を通じて開発を進めてきた放流効果を高める礁の再現性が示された事から、製品化を含め社会実装に向けた成果が得られたと言えるだろう。

本研究を通して得られた成果については、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としてマニュアルにもまとめられ、今後の幅広い普及を目指した一層の取り組み等を通して、漁港の既存ストックの水産生物増養殖場としての有効活用の推進に貢献する事が期待される。

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：北海道マリビジョン21（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/ud49g7000000q5ut.html> (2021年6月24日確認)
- 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> (2021年6月24日確認)
- 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：新目竜一、村山雅昭、巖倉啓子、谷瀬敦、
柏谷和久、野上毅、布川雅典、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（2018）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魚カウンターを開発し、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。令和 3（2021）年は小型魚用魚カウンターを開発して、魚道周辺におけるアユ稚魚の空間的行動を日本ではじめて長期間連続観測を実験的に成功させた。これにより、これまで知られていなかった夜間の遡上数も明らかになった。

キーワード：魚カウンター、サケカウンター、魚類遡上児童計測、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、アユ

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



図-1 厚内漁港位置図(国土地理院電子国土 web site より)

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した。次に令和元（2019）年以降は、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た。

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-2 左）。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（図-2 左）。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（図-1、図-2 右）。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）と猿別川ウライの 2 箇所あり、平成 30（2018）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

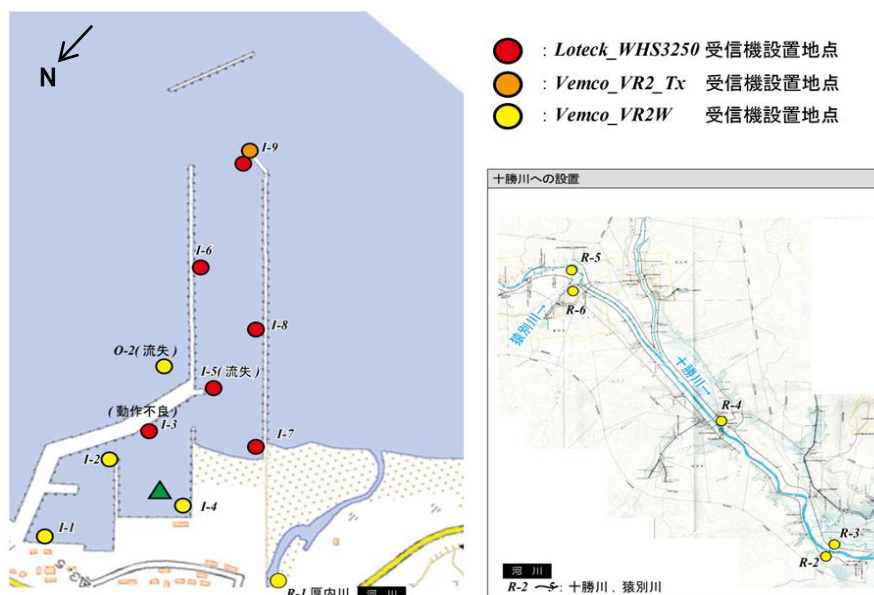


図-2 漁港内および河川での超音波受信機設置位置(国土地理院電子国土 web site を一部使用)。



図-3 漁港外の超音波受信機設置位置

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鮭定置1号周辺で放流した(図-3)。これらの作業は9月20日および21日に行った。

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。

漁港内の超音波受信機は、超音波受信機を陸上構造物にロープで接続した。また、堤防等での擦れ防止のためロープはホースで養生した。海洋の超音波受信機



図-4 超音波受信機設置位置と観測区分(広域図)

は海底から 30~50 cm 離して設置した。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、超音波受信機の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形で設置した。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。

超音波受信器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 700 m、冬期は平均累積積雪深(1981-2010年)が約 3.5 m 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 2.3 m、

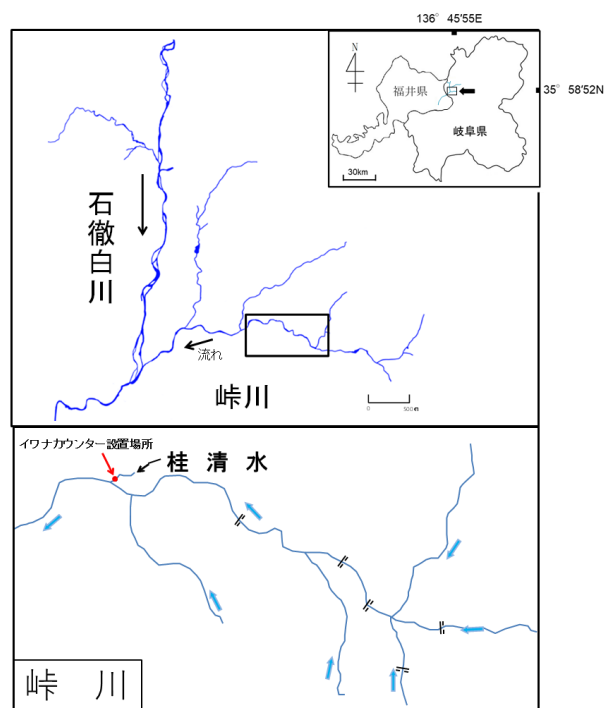


図-6 イワナカウンターの設置場所位置図

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(2.0 m × 0.8 m (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10 cm 間隔で取り付け、両端に5.0 V の電圧を印加した。センサーの信号の読み取りにはFishCountSystem_Anlyzer03(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1000 mV 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。

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

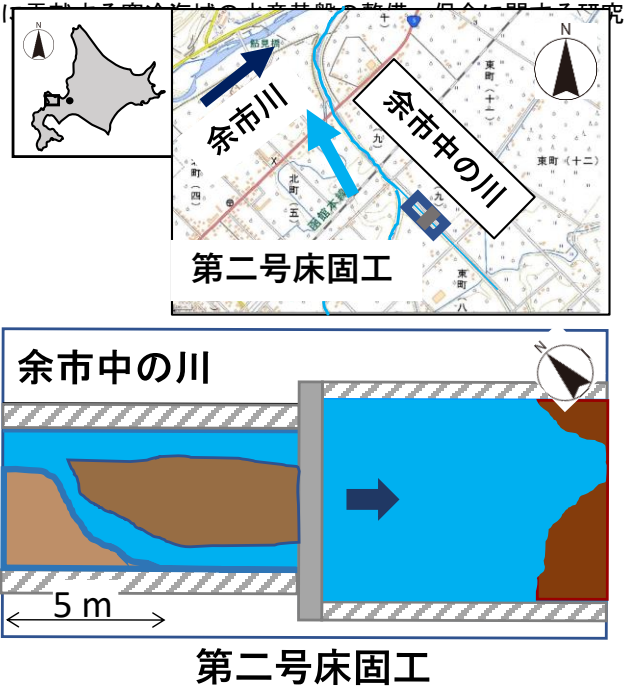


図-7 余市中の川の調査地位置図

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1.35 m(水面比高0.8 m)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0.95 m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用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(2.0 m × 0.8 m (長さ×幅))と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魚類遡上数計測装置（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-8a）。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-8b）。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。

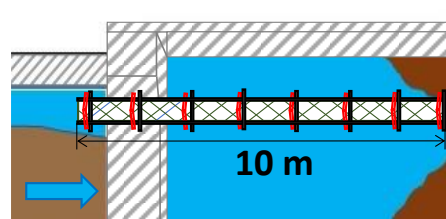
遡上数の計測は布製魚道の上下流に設置されたサケカウンター（センサー電極を30 cm間隔、5.0 V電圧印加）により行い、センサーの信号からの遡上および降下数の読み取りにはFishCountSystem_Analyzer03（田村電子工房、高崎市）を用いた。本研究では閾値を1000 mVに設定して遡上および降下と判別されたものを研究対象とした。計測は2020年9月3日から11月18日まで行った。

3.7 令和3（2021）年度調査地

調査地は那賀川の河口から11 km上流に位置する北岸堰である（図-9）。那賀川は標高1,930 mの剣山系ジロウギユウから南流下した後に西に流れ、多くの支川を合流して那賀川平野を流れたのちに紀伊水道に注ぎ込む。幹川流路長125 km、流域面積874 km²の徳島県南部を代表する一級河川である¹⁴⁾。

那賀川では毎年3月の終わり頃から5月にかけて紀伊水道から多くのアユ稚魚が遡上する。北岸堰には2021年までは小型魚道、大型魚道および扇形魚道の3種類の魚道が右岸からならんで整備されており、そのうち最も右岸に流れているのが小型魚道（幅0.7 m×高さ0.46 m）である。この小型魚道にも毎年多くの天

a) 2019年



b) 2020年

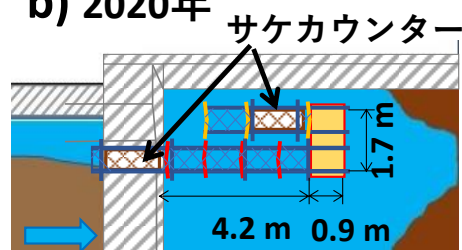


図-8 余市中の川二号床固工における形状可変型布製簡易魚道。2019年に設置された直線型(a)、2020年に設置された折り返し型(b)魚道

然アユ稚魚が遡上しており、また、2021年に使用する小型魚用魚カウンター設置に最適な大きさであったこ

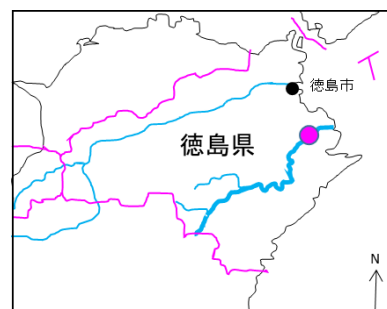


図-9 徳島県那賀川北岸堰位置図(赤丸)

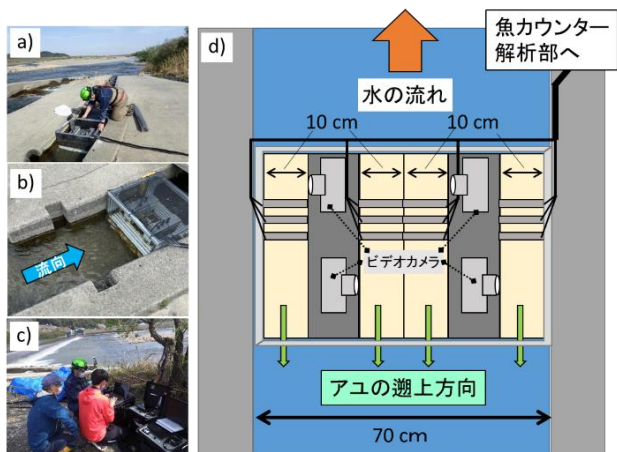


図-10 2021年に徳島県那賀川北岸堰魚道 a)に設置した小型魚用魚カウンターb), d)。4列の魚カウンター誘導水路 d)のカウンター電極から魚カウンター解析部 c)にカウンターケーブルが接続されている

とから、この小型魚道に小型魚用魚カウンターを設置した。

3.8 令和3(2021)年度調査方法

3.8.1 小型魚(アユ稚魚)を対象とした小型魚用魚カウンターの設置

那賀川の小型魚道の最上流部に架台(長さ0.6m×幅0.7m×高さ0.46m)とともに誘導水路(長さ0.3m×幅0.1m×高さ0.1m)を4本設置して、遡上するアユ稚魚を計測した。誘導水路には魚カウンターセンサー電極である2cm幅のアルミ板を3cm間隔で3本取り付けられ、これらの4組の電極からセンサーケーブルを魚カウンター解析部へ接続されている(図-10)。

カウンター解析部は魚類遡上自動計測システムの4チャンネル仕様(TEAFCS-LOGS03-PB04:田村電子工房製、高崎市、以下4ch計測システムと呼ぶ)を用いた。4ch計測システムはソーラー充電器(TEAFCS-SOLLTI:田村電子工房製)と12V100Ahと12V50Ahのリチウム蓄電池を搭載したバッテリーパック(TEAFCS-POWP-LTI01-NM:田村電子工房製)2台で駆動させた。

計測は2021年3月25日から5月13日まで113日間行い、この間に欠測期間が3日間(4月5日から7日)あった。小型魚用魚カウンターでは魚種の判別はできないが、この計測期間中ではアユ以外の魚種がほとんど見られなかった。そこで遡上個体のすべてがアユとした。

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(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

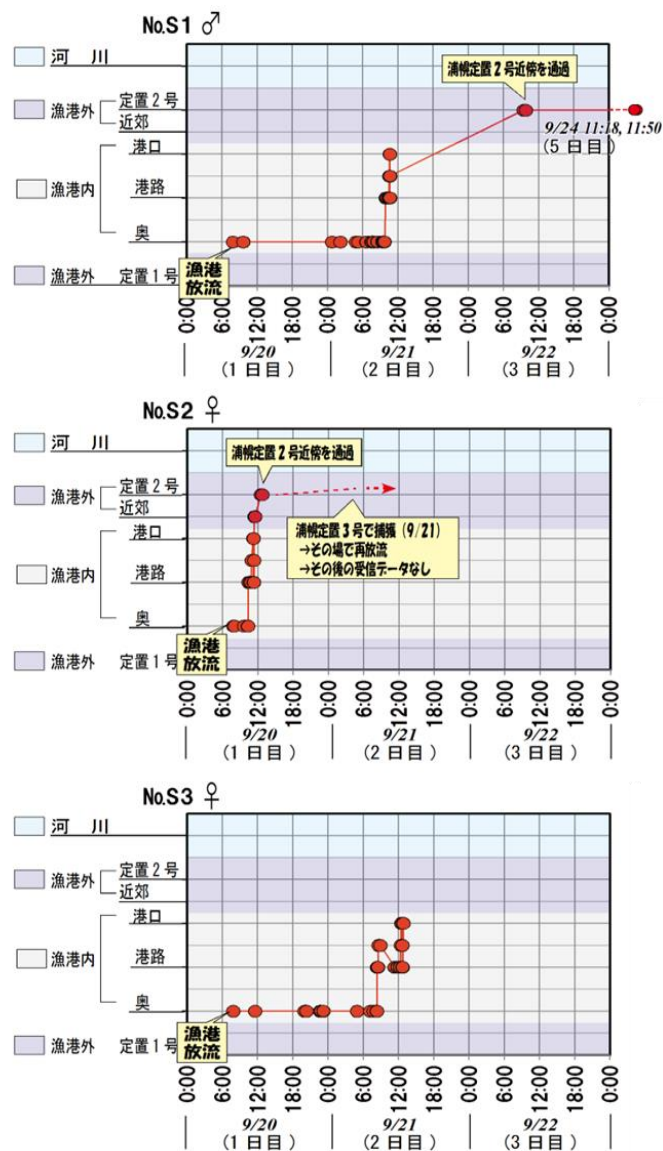


図-11 A個体群の行動

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-11)。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。

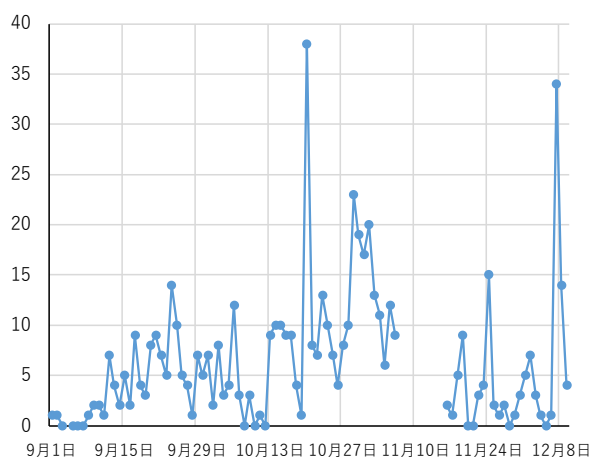


図-12 勇払川のサケ遡上数。データがない部分は
 データ欠損を示す。

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

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
 り返しながらか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

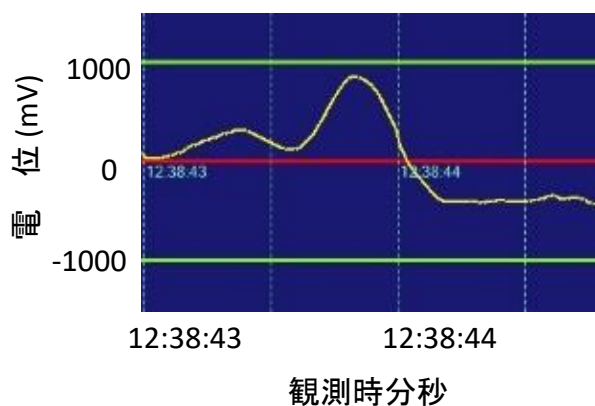


図-13 サケカウンターによる判定外に判定された波形(2019年12月7日)



図-14 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。青矢印は流向を示す。

(猿別川)で捕獲されたものは2個体だった。

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(2019)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-12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

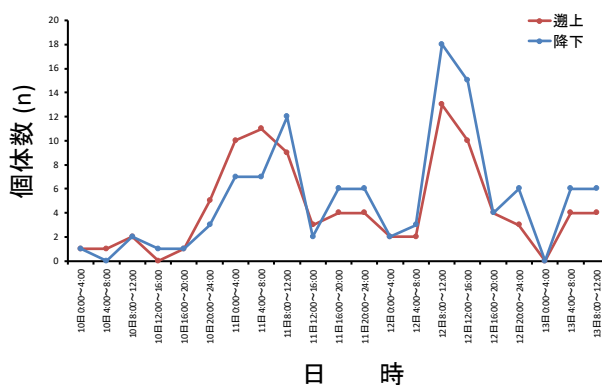


図-15 2019年11月10~13日のピーク時の4時間ごとのイワナ遡上数と降下数

定外に分類された波形が3個体分あった。

2019年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個体中午前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、誤判定の割合は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-13)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-14)。

ここでの波形(図-13)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-14)。そのため、十分な体長があったにもかかわらず、センサーを通ったときに1000 mVの電位に達さ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。

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

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 (cm/s)	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

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%が認められた。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-15)。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用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、水路長および高さは同様でそれぞれ 80 cm、200 cm および 50 cm だった。しかし、流速はそれぞれの魚道の誘導水路で異なりウトナイ堰魚道の平均値が 87.5 cm/s、階段式魚道の 143.0 cm/s であり、ウトナイ堰魚道水路の流速が小さい。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

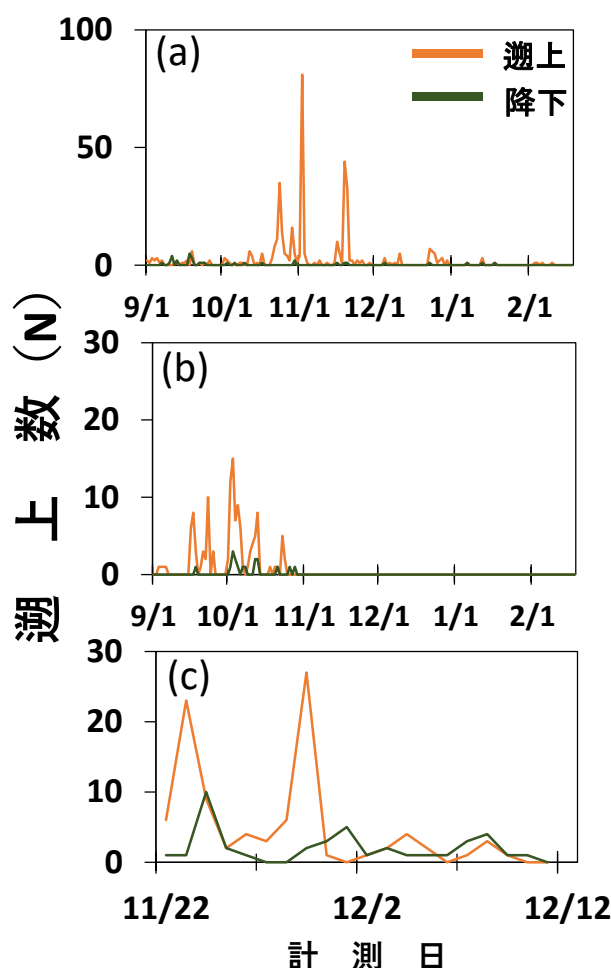


図-16 勇払川ウトナイ堰魚道(a)、トキサタ堰魚道(b)および十勝川千代田新水路階段式魚道(c)におけるシロサケ遡上及び降下数

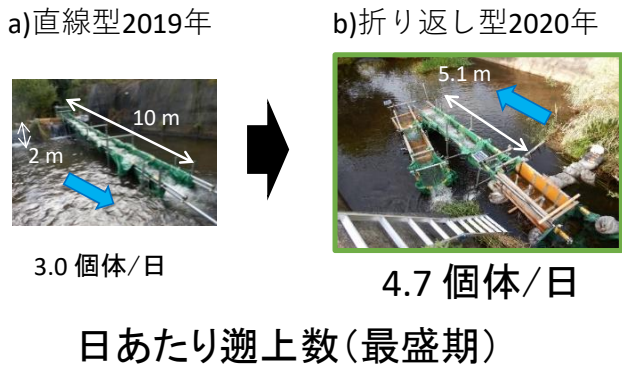


図-17 余市中の川における形状の異なる布製魚道のサケ科魚類の日当たり遡上数。(a)直線型魚道(2019年)(b)折り返し型魚道(2020年)

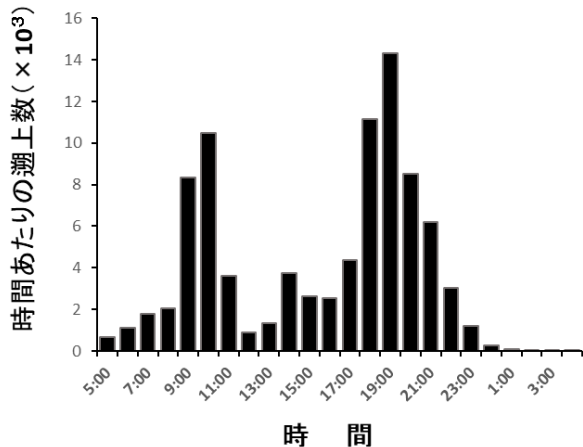


図-18 2021年4月14日の那賀川北岸堰魚道における時間当たりのアユ遡上数。日の出(午前6時頃)前や日没(午後6時頃)後にもアユの遡上は行われている

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-16)、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

余市中の川第2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-17)。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-17)。

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り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 令和3(2021)年の結果と考察

7.1 小型魚用魚カウンターによるアユ稚魚遡上数

2021年の計測期間(3月から5月まで)中で131万個体を超えるアユ稚魚の遡上確認された。計測期間中の遡上のピークは2021年4月2日、14日および5月9日の3回みられた。21年に行われた昼夜における長時間連続計測によって、時間毎の遡上数も明らかになった。一日あたりの遡上数が最も多かった2021年4月14日では、午前10時と午後7時に遡上数のピークが見られ、午前中の遡上数のピークから日中12時頃は減少し、その後夕方に向けて増加して真夜中にはほとんど遡上していない。しかし、日の出(午前6時頃)前や日没(午後6時頃)後の暗い時間にも遡上する個体が多く観察された(図-18)。遡上数の多い他の日にも同様の傾向が認められた。

我が国ではアユは水産上重要な種であり、遊漁の対象としても重視されているため、多くの河川でアユ稚魚の遡上数調査が行われてきた。これまで従来のトラップを用いたアユの遡上数調査は昼間に行われることが多く、夜間にはあまり行われていなかった。しかし、2021年の那賀川での結果から、日没後や早朝日の出前にも遡上が行われていることが明らかになり、今

後はトラップによる調査では夜間の調査も考慮すべきであると考えられた。

このようにアユ稚魚を対象とした小型魚用魚カウンターやイワナを対象とした中型魚用魚カウンター（イワナカウンター）、さらにはシロサケを対象とした大型魚用魚カウンター（サケカウンター）は、すべて寒冷地で使用することを想定して開発されている。このため、北海道に生息する多くの種類の親魚や稚魚の行動数の計測が可能である。さらにはこの魚カウンターを魚道等に設置することにより、寒冷地における河川構造物の魚類遡上効果等を評価することができるようになり、構造物の改良等の整備に必要な基礎データの蓄積が期待される。

8 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）年度は、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、サケカウンター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、中型水産有用種のイワナカウンターの開発を行った。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）年度は流速、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。

令和 3（2021）年度は昼夜の小型魚遡上数を長時間連続計測できる技術をわが国で初めて構築し、これにより、小型魚用魚道周辺における空間的行動を把握する実験を行い、数百万個体を超えるアユ稚魚遡上数を計測することができた。

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、吉榎岳志、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
- 11) 国土交通省 那賀川水系河川整備計画（変更）
<http://www.skr.mlit.go.jp/nakagawa/seibikeikaku/r1henkou/henkou.html>、2022 年 3 月確認、2015.