

沖合域における漁場環境の データ取得技術の研究

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム ○石澤 健志
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム 須藤 賢哉
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム 的野 博行

沖合域は我が国の漁業生産を支える重要な漁場であるが、近年、漁獲量の減少が著しい状況にある。沖合域での漁場整備を行う場合には、現地調査により漁場環境の評価のためデータ取得を行うことが重要であるが、調査には多大な労力・費用を要するなど課題が多い。そこで本論では、沖合域において新たな漁場環境モニタリング手法を用いることによる、漁場環境のデータ取得技術の効率化や適用性について検討したので報告する。

キーワード：沖合域、漁場環境モニタリング、効率化

1. まえがき

現在、日本の漁業生産量は1984年の1,282万トンを一歩に減少しており、2019年には420万トン¹⁾と約33パーセントに低下し、水産資源の回復は急務となっている。このため休漁・禁漁等のソフト的施策の他に、特に漁獲量の約半分を占める沖合漁業の主な操業海域である排他的経済水域において、漁場整備を国直轄で行うことで資源回復・増大する施策が水産庁により進められている²⁾。

沖合域での漁場整備や資源管理を効果的に実施するためには漁場整備効果の適切な評価が必要であり、そのためには漁場環境を正確に把握するための現地調査(漁場環境モニタリング)が重要である。しかしながら、沖合域の現地調査は沿岸域に比べ労力・費用負担が多大であり沖合域での基礎データ収集・蓄積には困難を伴うことから、効率的・効果的なモニタリング手法について検討を行ったのでその概要を報告する。

2. モニタリング手法の検討概要

沖合域の漁場環境モニタリングは、調査対象箇所が陸域から離れていることもあり、調査船の借り上げのほか多くの作業員を要する³⁾などの問題があり観測事例が少なく、沖合域のモニタリング手法は未だに確立されていない。漁場環境モニタリングを継続して実施していくためにはモニタリング作業の効率化を進めていく必要があり、効率化の可能性のある次の手法についてそれぞれ検討を行うこととした。

(1) モニタリング手法の効率化に向けての技術的課題

a) 人工魚礁集魚種の推定

一般的な魚群探知機は、魚群の水深や魚体のおおよその大きさは把握できるが、対象の海域にどのような魚種がどの程度存在しているのかは、漁獲調査等を併せて実施することにより確認する必要がある。そこで、

魚群探知機を搭載した機器及び環境DNA解析の手法を用い、海域に生息する魚種の推定を行った。続いて推定された魚種データを元に、計量魚群探知機を搭載した機器を用い、魚類個体数の計数及び分布水深の判定を行うこととした。

b) 動物プランクトン調査の効率化

沖合域の餌料環境の把握のためには、魚類の餌となる動物プランクトンの調査が必須であるが、動物プランクトンの採取は現在、目合い等の大きさの違う2種類のネットを使用している。そこで、限られた調査時間の中で動物プランクトン採取方法の効率化を図るべく効率的な採取方法を検討することとした。

c) 小型ROVを活用した人工魚礁構造物近傍での採泥

人工魚礁のような構造物が漁場環境に及ぼす影響を把握するためには魚礁近傍の採泥が必要である。現在、大水深域での採泥は調査船上からの垂下型の採泥器による採泥、若しくは当チームで開発した遠隔操作型無人探査機(Remotely Operated Vehicle、以下:ROV)と採泥器を組み合わせた手法⁴⁾による採泥が可能であるが、垂下型の採泥器は目標地点に着底させることが困難であること、またROV機器による調査はその費用が高額となることから、より効率的・経済的な手法を検討することとした。

(2) 現地調査フィールド

モニタリングの調査フィールドとして、北海道利尻島沖合約10km地点の水深90mにある人工魚礁周辺海域を選定し、漁場環境の解明に向けて2017年から継続的に現地調査を実施している。この調査対象の人工魚礁及び測点位置及び構造物配置図を図-1に示す。測点は魚礁の中心から北方向約165mの位置に魚礁区としてA2を、及び対照区としてG2を設定した。

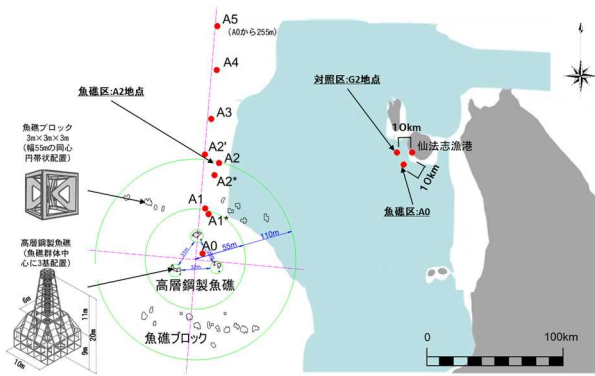


図-1 現地調査位置図(利尻海域)

現地調査期間は、2018年は7月25～28日に採泥、2021年は8月22日に動物プランクトン調査、同年9月15日～10月2日に観測機器設置による定点観測、同年9月27日に環境DNA調査を行った。

3. 調査手法の効率化の検討

(1) 人工魚礁蛸集魚類の推定

人工魚礁蛸集魚類の推定のため、ブイ型の魚群探知機にて魚群の存在する水深帯を把握し、環境DNA解析の手法を用いて観測された魚群の魚種の推定を行った。続いて推定された魚種データを元に、計量魚群探知機を搭載した機器を用い、魚類個体数の計数及び分布水深の判定を行うこととした。

今回使用した魚群情報付き衛星ブイ(魚群探知機を搭載:緑星社製)⁵⁾は、海面上に設置し海底に向けて超音波を送受信することにより、ブイ直下の物体の超音波反射強度と位置情報を記録し、衛星を経由してデータ通信することができる(図-2)。ブイは太陽光発電パネルによる電力で稼働しているため、1度設置すれば故障や係留系が切断しない限り自動でデータを送り続けることが可能である。

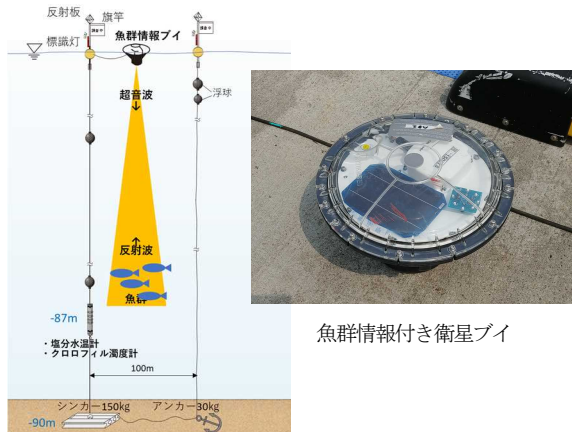


図-2 係留系模式図(左)、魚群情報付き衛星ブイ外観(右)

1) 魚群情報付き衛星ブイの観測データ

① 底層の反射波強度

A2 魚礁区、G2 対照区それぞれの底層付近(水深 65～

85m)の 5m 毎の反射波強度の平均値を、時系列で示したものを図-3 に示す。反射波の強弱に経時的な上下動はあまりないが、常に A2 魚礁区の方が G2 対照区より強い値となっている。この反射波が魚類からのものと仮定すれば、底層においては対照区より魚礁区の方により多くの魚類が集まっていることが確認できた。なお図中の黒破線は、図-5 のグラフとそれぞれ一致している時刻を示している。

② 表層の反射波強度

①と同様に魚群情報付き衛星ブイでの表層付近(水深 10～30m)の、5m 毎の反射波強度の平均値の時系列データを図-4 示す。反射波強度は G2 対照区に対し A2 魚礁区の明確な差は特に見られず、また午後 6 時以降から午前 5 時までの夜間帯に強くなる傾向があった。

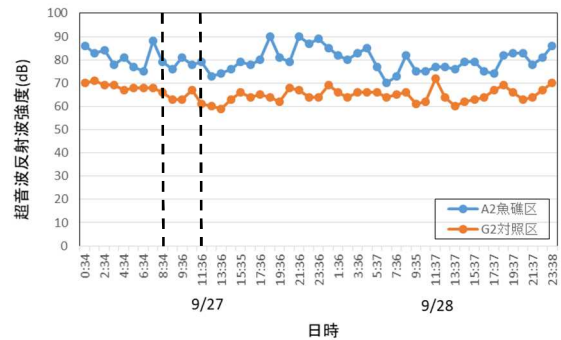


図-3 魚群情報付き衛星ブイで取得した超音波強度のデータ (A2 魚礁区、G2 対照区、水深 65～85m)

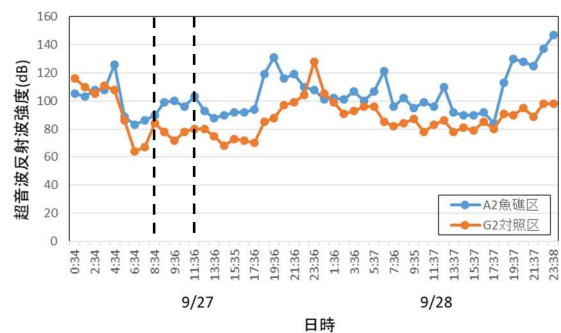


図-4 魚群情報付き衛星ブイで取得した超音波強度のデータ (A2 魚礁区、G2 対照区、水深 10～30m)

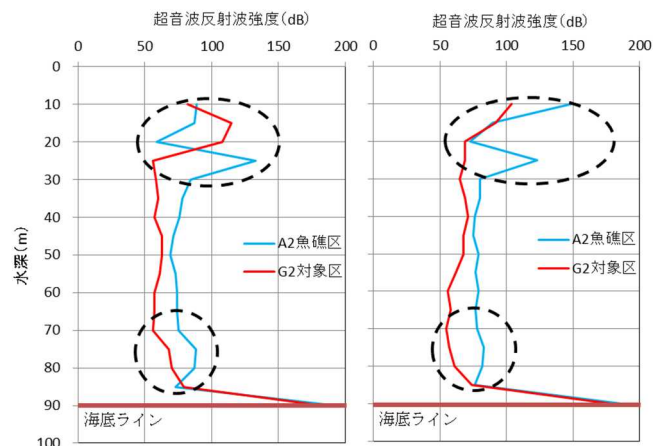


図-5 魚群情報付き衛星ブイの超音波強度の鉛直分布(2021年9月27日、8時34分(左)、11時36分(右))

③反射波強度の鉛直分布

魚群情報付き衛星ブイの A2 魚礁区、G2 対照区の反射波強度鉛直変化を図-5 に示す。A2 魚礁区の表層付近(水深 10~30m)に強い、底層付近(水深 65~85m)にやや強い反射波強度を捉えた(図-5 中の黒丸点線の部分)。

2) 環境 DNA 解析による魚種の推定

魚群情報付き衛星ブイで捉えた魚群の魚種を推定するため、同じ水域の環境 DNA 解析を行った。環境 DNA 解析は現地の採水からその海水中に含まれる生物由来の残存物の DNA を解析することにより、その海域に存在する生物種を推定できる手法である。環境 DNA 解析は、メリットとして現地の採水のみでそこに含まれる生物組織の一部から魚の種類を判別可能であるため、魚類採捕の時間と手間が大きく削減される。また同時に検出できる種類も現在は数百種類⁶⁾まで広まっており、事例も増えている。一方、デメリットとしては、釣りや漁による直接法ではないため偽陽性・偽陰性が発生⁷⁾し、現地採水時や試験室での解析時にはコンタミネーション(他サンプルの混入)の可能性⁶⁾があることがあげられる。

現地調査では、まずどのような魚類がどの程度生息しているかを網羅的に確認するため、A2 魚礁区と G2 対照区のそれぞれ表層(海面下 1m)と、底層(海底面上 1m)より採水したサンプルにより、環境 DNA の網羅的解析(メタバーコーディング、MiFish ユニバーサルプライマー⁷⁾を使用した)を行った。偽陽性・偽陰性の対策として漁獲調査を同時に行いその結果と照合を行った。また、コンタミネーション対策としてブランク水を同時に解析しコンタミネーションが無いことを確認済みである。

網羅的解析の結果、サンプル中にはホッケとカタクチイワシに由来する DNA が多く占めていたことからこの 2 魚種に絞り、次に定量 PCR 解析⁸⁾を実施した(ホッケの種特異的プライマーは当チームにて設計)。

ホッケの定量 PCR 解析結果を図-6 に示す。表層にはホッケの DNA は未検出だが、底層ではホッケの DNA が検出された。また、DNA コピー数は A2 魚礁区の方が G2 対照区より多い結果となった。カタクチイワシの定量 PCR 解析を図-7 に示す。表層(水深 1m)にカタクチイワシの DNA が多く、DNA コピー数はホッケのそれとは逆に G2 対照区の方が A2 魚礁区より多い結果となった。なおカタクチイワシは表層を好む習性を示している⁹⁾と思われる。魚群情報付き衛星ブイの水深別の反射波強度と連携させることで、現場と離れた場所で人工魚礁に蟄集する魚群及び魚種を判定出来る可能性がある。

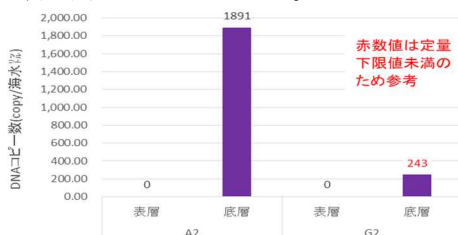


図-6 ホッケの定量 PCR 解析結果

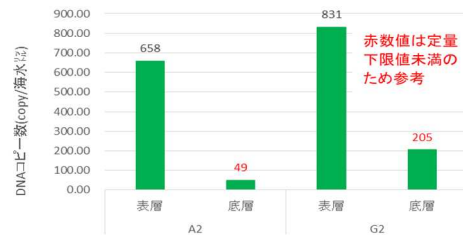


図-7 カタクチイワシの定量 PCR 解析結果

3) 高解像度計量魚群探知機搭載ブイによる魚種の判定

魚群情報付き衛星ブイで魚群反応を確認でき、環境 DNA 解析により魚群の魚種が推定できたが、その魚群を形成する魚の魚種・匹数及び魚体長まで判別するまでには至っていない。そこで、魚群反応と魚種の関連をより詳細に把握可能な高解像度計量魚群探知機搭載ブイ(Magic Buoy: AquaFusion 社製)¹⁰⁾を使用し本海域における魚群計測への適用性を検討した。Magic Buoy は従来の魚探と比較して送受波器からの超音波の送受信回数を多くできる技術(Gold code 法¹¹⁾:特許)により、魚体を個体毎に判別できる特徴をもつ。これによって、魚体長や尾数までを解析可能な計量魚群探知機である。これを A2 魚礁区、G2 対照区それぞれの水深 88m 地点に、送受波部を海面側へ向けて設置した(図-8)。

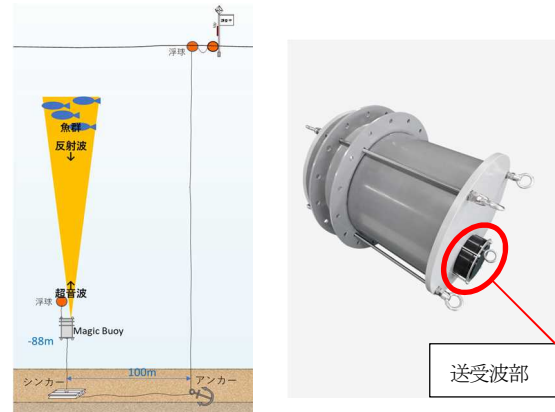


図-8 係留系模式図(左)、Magic Buoy 外観(右)

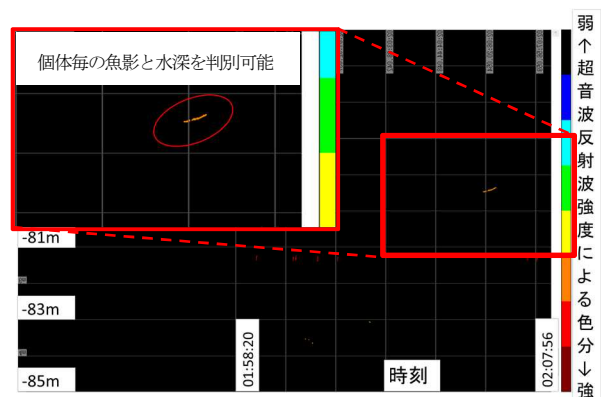


図-9 Magic Buoy で得られた魚影データ(G2 対照区、ホッケと推定)

表-1 Magic Buoy データの解析結果 (G2 対照区、ホッケと推定)

魚体長範囲(cm)	尾数	水深(m)	尾数
1~10	0	0~78	0
10~20	6	78~83	7
20~30	1	83~88	0
30~	0	計	7
計	7		

Magic Buoy で得られた魚影データをホッケと仮定して解析したデータ (2021 年 9 月 27 日、G2 対照区) の結果及び魚影・魚体長と判断出来るデータを図-9 及び表-1 に示す。水深の深い底層に魚群が集まっていることが確認でき、Magic Buoy のデータ解析による平均魚体長 $19 \pm 0.66\text{cm}$ 及び前述 2) の環境 DNA 解析結果と合わせるとこの魚影はホッケ (稚魚 $\approx 20\text{cm}$ 、成魚 $\approx 29.5\text{cm}$)¹²⁾ であることが推定された。同様に、表層の魚影をカタクチワシと仮定して解析したデータ (2021 年 9 月 27 日、G2 対照区) の結果を図-10 及び表-2 に示す。尾数・魚体長とその水深が判別可能で表層付近に魚群があることが確認された。平均魚体長 $13 \pm 4.66\text{cm}$ 及び前述 2) の環境 DNA 解析結果と合わせるとこの魚影はカタクチワシ (稚魚 $\approx 4.5\text{cm}$ 、成魚 $\approx 12.5 \sim 15.5\text{cm}$)¹²⁾ であることが推定された。

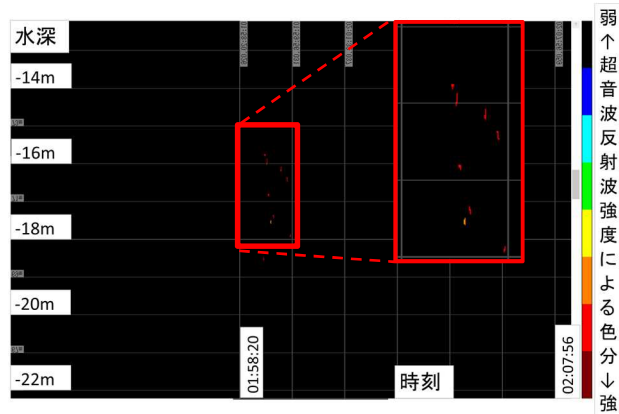


図-10 Magic Buoy で得られた魚影データ (G2 対照区、カタクチワシと推定)

表-2 Magic Buoy データの解析結果 (G2 対照区、カタクチワシと推定)

魚体長範囲(cm)	尾数	水深(m)	尾数
1~6	0	0~3	0
6~7	2	3~8	1
7~8	5	8~13	22
8~9	3	13~18	8
9~10	1	18~23	1
10~20	21	23~88	0
20~	0	計	32
計	32		

以上の検討の結果、漁獲調査によらずとも集まる魚類の魚種・匹数・魚体長及び生息水深の判別ができ、漁場環境モニタリングの効率化につながる可能性が示された。技術的課題としては、送受波器から発する超音波は片側 5° の照射角だが、同じ魚群を 2 度計測し密度を評価している場合もあり実際の魚の密度に比べて過大評価している可能性がある。これは魚群密度計測において一般的な課題として残っている。また、対象となるホッケは鰹

(うきぶくろ) を持たない無鰹魚のため、送受波器から発する超音波の反射強度が、有鰹魚であるカタクチワシの 10 分の 1 程度¹³⁾ であり魚影として捉えにくい。このような無鰹魚についての超音波反射特性に関する知見が少ないため、今後はホッケの反射波強度の調査データを蓄積していく必要がある。

(2) 動物プランクトン調査の効率化

人工魚礁周辺海域の餌料環境の把握のため、魚類の餌料となる動物プランクトンの調査が必要となる。

動物プランクトンの採取には、ノルパックネット NORPAC: North Pacific Standard Net (北太平洋標準ネット) 又は、北原式定量ネットを使用するのが一般的である (ネットの諸元は表-3)。ノルパックネットは最も一般的に用いられており体サイズ $500\text{--}600\mu\text{m}$ 程度¹⁴⁾ の動物プランクトンを採取でき、北原式定量ネットはより浅海域における、体サイズの小さい動物プランクトン採取に使われている (ネットの外観は図-11)。

表-3 プランクトンネットの諸元

名称	ノルパックネット	北原式定量ネット
口径	45cm	22.5cm
側長	180cm	80cm
目合い	0.335mm	0.100mm

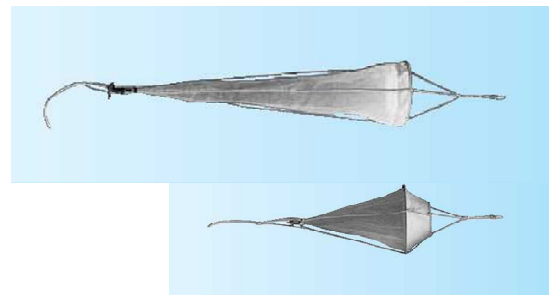


図-11 ノルパックネット(上)、北原式定量ネット(下)

ノルパックネットはその目合いの大きさから、サイズの小さいコペポダイト幼生等が編み目からすり抜けてしまうことがある¹⁴⁾。北原式定量ネットは開口部、側長、編み目合いが小さいため、沖合域では深い水深から曳網すると、ろ水率が低下 (網目が詰まる) して動物プランクトンを効率的に捉えられないが小さいサイズのコペポダイト幼生を捉えられる。

動物プランクトン採取において、調査船上で片方のネットを回収した後にもう一方のネット採取を行っており非効率な作業となっている。ノルパックネットと北原式定量ネットを同時に垂下させようとすると、曳網ロープ同士が絡まるなどの危険性がある。そこで動物プランクトン採取の効率化を図るため、北原式定量ネットの目合い (0.100mm) の網をノルパックネットの (口径 45cm、側長 180cm) に適用した改造ノルパックネットを新たに製作し、実海域で前述の 2 つのプランクトンネットとともに使用し比較した。

北原・ノルパック・改造ノルパックの各ネットで採取し

た動物プランクトンの個体数と種類数を表-4 に示す。どのネットでも概ね A2 魚礁区の個体数が G2 対照区より多くの動物プランクトンが検出できた。図-12 に A2 魚礁区、図-13 に G2 対照区の動物プランクトン種数の重複率を示した。種数は水深 0~90m の全層での比較とし、各プランクトンの種毎の個体数の重み付けは考慮していない。北原+ノルパックネットと、改造ノルパックネットとの動物プランクトン種類の重複率は、A2 魚礁区で 77%、G2 対照区で 76%が一致した。また、ネットの目合いの問題点であるろ水率も低下することなく、網目が詰まることは無かった。

改造ノルパックネットの採取結果による A2 魚礁区と G2 対照区の動物プランクトンの個体数を水深帯毎に図-14 に示す。人工魚礁の設置水深に近い水深 60m~90m において、A2 魚礁区のほうが G2 対照区より個体数も種類数もそれぞれ多い結果となった。人工魚礁周辺は餌料生物にとって好適な生息場を提供しているという既往研究結果⁴⁾と一致する。改造ノルパックネットを使用することによって、北原ネットとノルパックネットで水深帯毎に 2 回行っていた採取作業回数が 1 回で済み、調査時間が短縮され作業の効率化を図ることが可能になる。

表-4 採取した動物プランクトンの個体数と種類数

A2魚礁区				北原			NORPAC			改造NORPAC		
水深(m)	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
合計(個体/m3)	8966.5	4496	5449.9	249.5	85.2	483.2	9488	5736	855.6			
種類数	19	18	20	13	14	16	14	27	28			

G2対照区				北原			NORPAC			改造NORPAC		
水深(m)	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
合計(個体/m3)	6677.9	7956	4941.4	13.3	66.4	202.4	6679	2714	75.6			
種類数	26	19	19	9	10	16	21	23	13			

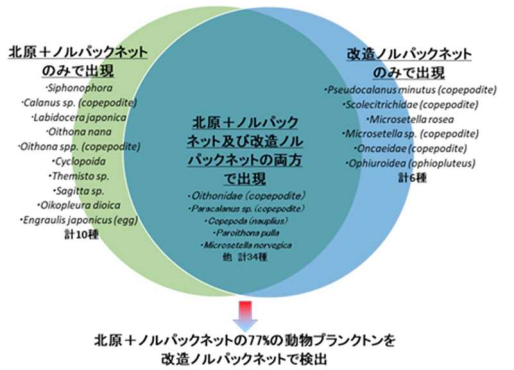


図-12 各プランクトンネットでの採取結果(A2)

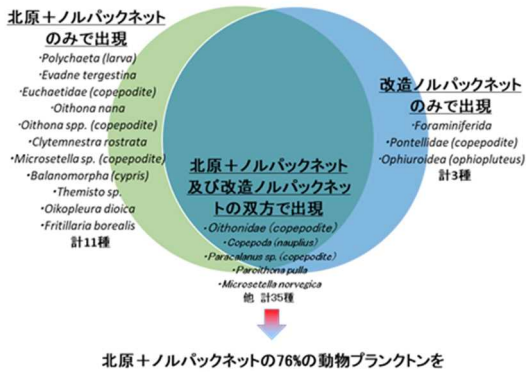


図-13 各プランクトンネットでの採取結果(G2)

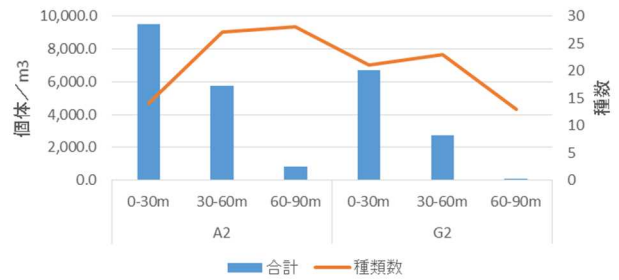


図-14 動物プランクトン出現数・種類(改造ノルパックネット)

(3) 小型 ROV を活用した人工魚礁構造物近傍での採泥

人工魚礁の整備効果を評価するにあたっては漁場環境に及ぼす構造物の影響を把握する必要があり、そのためには人工魚礁近傍の採泥が重要となる。しかし、本海域のような水深 90m における採泥は潜水士による作業は困難¹⁵⁾である。また、調査船上からの垂下による採泥は、垂下した採泥器が海流の影響によりあおられて目標地点に着底させることが困難であるほか、人工魚礁構造物に垂下用ロープが絡まってしまう危険性がある。

そこで、人工魚礁近傍の採泥を行うため ROV(N-Hyper300EXY: 三井造船(株)製、最大潜行能力300m、空中重量 56kg)の下面にエクマンバージ採泥器を固定し、人工構造物近傍の底泥を採取する方法を試みた。ROV が魚礁ブロックに接近後に海底面上 1m 程度から ROV を落下させ、着底時の衝撃力で開口部が閉じる機構とした(図-15)。採泥による底生生物の 1 m²あたりの個体数を図-16 に示す。魚礁区は対照区に比べて底生生物の現存量が高い傾向がみられ、ROV+採泥器による定量採泥が可能であることを確認した。

上記の採泥は 1 地点 1 サンプルのみのため、今後は測定数や調査回数を増やすことが必要となるが、Hyper300

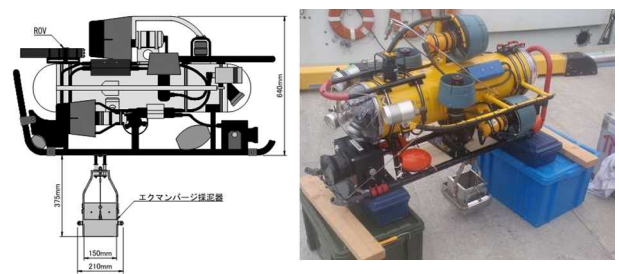
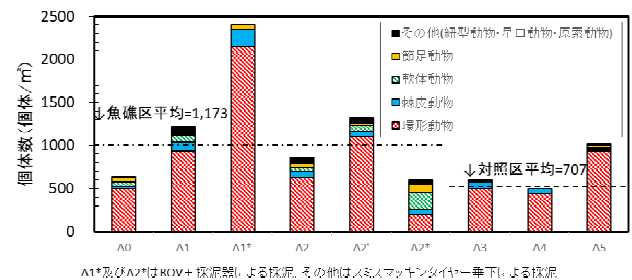


図-15 底面に採泥器を装着した ROV



A1*及びA2はROV+採泥器による採泥。その他はバスマンサンディングナイター単下による採泥

図-16 地点毎の底生生物の個体数

EXY を使用した ROV 採泥は、機器本体の価格が高額であるため調査費用も沿岸域の採泥に比べて高額となり調査回数を増やすことが困難である。そこでより本体価格の安価な小型の ROV (BlueROV2:BlueRobotics 社製)¹⁶⁾を導入することで調査費用の低減を試みた。小型 ROV にエクマンバージ採泥器を組み合わせた手法の実験水槽での動作試験の様子を図-17に、小型 ROV 及び採泥器の諸元を表-5に示す。水中での動作試験では、ROV 本体の着底により採泥器が確実に閉じることを確認した。今後は、実海域にて試験運用を行い経済性と効率化の検証を予定している。小型 ROV+採泥器の適用により、人工魚礁周辺の調査地点を増やし、より多くのデータの蓄積が可能になることが見込まれる。

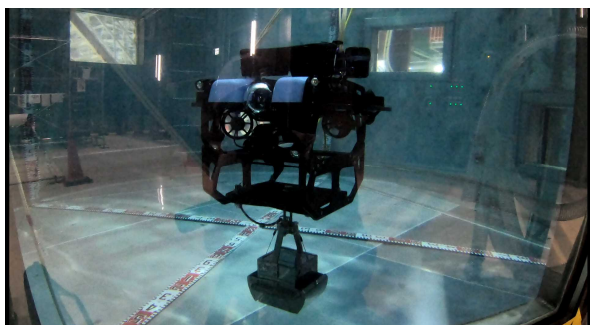


図-17 小型 ROV+採泥器の水槽での模擬採泥試験

表-5 小型 ROV の諸元(左)、エクマンバージ採泥器の諸元(右)

サイズ	46×58×25cm	カメラ対角	上下90°	採取面積	0.02m ²
乾燥重量	14kg	テグサーケーブル直径	0.8cm	空中重量	4.75kg
駆動時間	1-2h(流水)	潜水最大水深	100m		
最大速度	3kt	制御機能	自動深度、方位		

4. おわりに

本研究の現地調査に関する主な結果を以下に示す。

- (1) 魚群情報付き衛星ブイと環境 DNA 解析手法を組み合わせることで人工魚礁に蟄集する魚類の捕捉ができ、本手法が沖合域で適用できることが示された。また、高解像度計量魚群探知機搭載ブイを使用して、漁獲調査等によらなくとも個体毎の魚体長・生息水深を把握でき、漁場環境モニタリングの効率化につながることを示された。
- (2) 改造ノルパックネットを現場海域で適用し、動物プランクトン調査の効率化を図ることが可能となった。
- (3) 小型 ROV を使用した採泥手法を検討し、作業の効率化及び調査費用の低減を試みた。今後はより多くのデータ取得が見込まれる。

今後は、引き続きより効率的なデータ取得が可能な手法を検討しつつ、漁場環境モニタリングを継続して行くこととしたい。

謝辞: 現地調査に当たっては北海道庁、利尻漁業協同組合、日本データサービス(株)の関係各位に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 水産庁(2021):令和元年の水産の動向(水産白書)、pp. 78
- 2) 中村隆・岡貞行・山本竜太郎・柳瀬知之・浅川典敬・中川良文(2008):沖合漁場整備の政策的意義と技術的課題、水産工学 Vol.145No. 1、pp. 67-74
- 3) 水産海洋学会(2014):水産海洋学入門 海洋生物資源の持続的利用(講談社)、pp. 38-70
- 4) 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(2019):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 年度日本水産港学会学術講演会
- 5) 緑星社ホームページ <https://www.ryokuseisha.com/product/marine/buoy/gyotanbuoy.html> (2021 年 12 月 23 日確認)
- 6) (一社)日本環境アセスメント協会広報誌(2019):JEAS NEWS No. 161 WINTER2019、pp. 3、7
- 7) 土居秀幸・近藤倫生(2021):環境 DNA 生態系の真の姿を読み解く、共立出版 pp. 18、137
- 8) M. Miya・Y. Sato・T. Fukunaga・T. Sado・J. Y. Poulsen・K. Sato・T. Miyamoto・S. Yamamoto・H. Ymanaka・H. Araki・M. Kondoh・W. Iwasak(2015):MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes:detection of more than 230 subtropical marine species(ROYAL SOCIETY OPEN SCIENCE)
- 9) 岡村収・尼岡邦夫(1997):山溪カラー名鑑日本の海水魚、(株)山と溪谷社 pp. 93
- 10) AquaFusion 社ホームページ <https://aquafusion.jp/product/magicbuoy> (2021 年 12 月 22 日確認)
- 11) 松尾行雄・笹倉豊善(2020):高速送信周期エコーサウンダー AquaMagic を用いた魚群密度・魚体長の推定アルゴリズムの開発、海洋音響学会講演論文集 19/20
- 12) 水島敏博・鳥澤雅(2003):新 北のさかなたち(北海道新聞社)、pp. 66-69、196-201
- 13) 向井徹・佐野典達・飯田浩二・佐々木成二(1994):東シナ海で漁獲された魚の背方向ターゲットストレングスと鰹との関係、日本水産学会誌 60、pp. 215-222
- 14) 濱齊之・阿部義之・松野孝平・山口篤(2019):4 連ノルパックネットを用いたネット目合いの違いが濾過効率と収集効率に影響に関する研究、北大水産彙報 69(1)、47-56、2019
- 15) 国土交通省港湾局監修(2017):港湾海洋調査安全管理指針、海洋調査協会
- 16) BlueRobotics 社ホームページ <https://bluerobotics.com/> (2022 年 1 月 14 日確認)