

【公表用資料】 2023 年度苫小牧沖における冬季調査(1～2 月)結果(詳細版)

1. 背景と目的

海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律(昭和 45 年法律第 136 号)では、油、有害液体物質等又は廃棄物の海底下廃棄を原則禁止した上で、例外的に、特定二酸化炭素ガス¹⁾については、許可基準を満たす場合にのみ、環境大臣の許可を受けた上で、海底下廃棄の実施が可能となっている。

2016 年 2 月 22 日に、経済産業省より苫小牧沖における特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄に係る許可の申請書が提出され、当該申請について許可基準を満たしていることが確認されたことから、3 月 31 日に環境大臣の許可処分を行った。このため、2016 年 4 月から苫小牧沖において、経済産業省による苫小牧沖海底下 CCS 実証試験事業が開始され、2019 年 11 月 22 日まで海底下への CO₂ の圧入が実施された。累計 300,110.3t の CO₂ が圧入された。

国内第 1 号の海底下 CCS 事業である苫小牧沖海底下 CCS 実証試験事業について、海洋環境に悪影響を及ぼさないように適正に実施されていることを確保するために、最新の科学的知見に基づくモニタリング技術を活用し、結果を検証していくことにより、海底下 CCS 事業における適正なモニタリング技術及びその適用方法の確立を図ることを目的として、審査当局である環境省は独自に苫小牧沖における海洋調査を実施した。

なお、環境省は、2011 年度から 2015 年度までの 5 年間、「海底下 CCS 実施のための海洋調査事業に係る現地調査(2011～2013 年度)」及び「海底下 CCS 実施のための海洋調査事業に係る苫小牧沖現地調査(2014～2015 年度)」において、経済産業省から海底下 CCS 事業に係る許可申請がされた際の審査に活用することを目的として、苫小牧沖において 2023 年度冬季調査と同様の海洋調査を実施しており、その結果との比較も行った。

2. 調査内容

2. 1 調査海域

調査海域は北海道苫小牧海域における約 10 km×8 km の範囲とし、海水の化学的性状、底質及び海洋生態系の変化を把握できるように調査測点を配置した(図 1)。

① 海水の化学的性状調査

約 10 km×8 km の範囲の①～⑨の 9 測点において採水分析調査を実施した。

¹⁾ 二酸化炭素濃度が大部分を占めるガスで、政令で定める基準に適合するもの(法第 18 条の 7 第 2 号)。

② 底質調査

海水の化学的性状調査を実施した 9 測点に加え、圧入井終端位置周辺の A、B、C の 3 測点において底質調査を実施した。

③ 海洋生態系把握調査

水中カメラによるメガベントス²⁾ 生息分布調査は、海水の化学的性状調査を実施した 9 測点³⁾ において実施した。

ドレッジによるメガベントス採取調査は、海水の化学的性状調査を実施した 9 測点において実施した。

ウバガイ（ホッキ貝）生息密度等調査は、沿岸部漁場の特別採捕許可範囲内の 2 地点において実施した。

マクロベントス⁴⁾ 及びメイオベントス⁵⁾ 調査は、底質調査測点と同じ 12 測点において実施した。

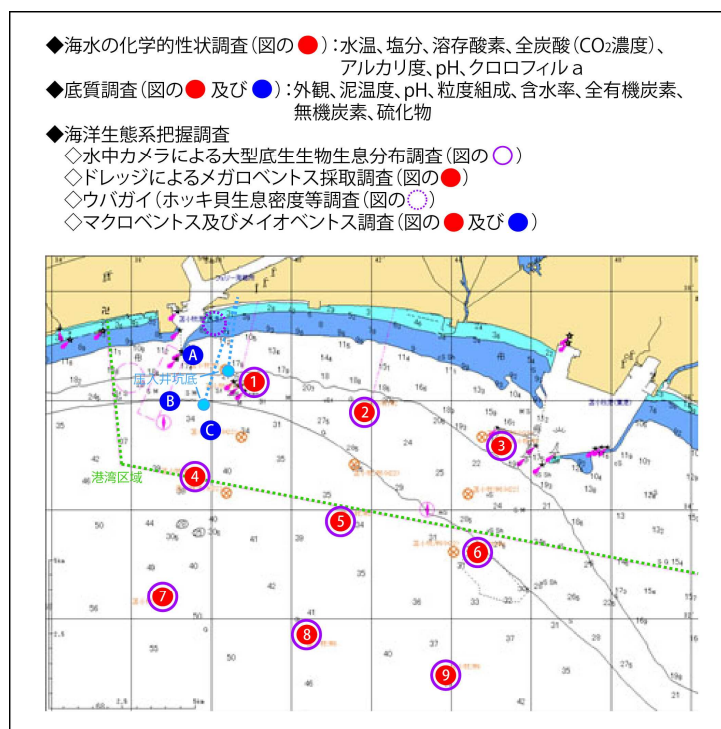


図 1 調査海域及び調査測点

²⁾ 肉眼で把握できるサイズで、ドレッジや트롤等²⁾の底引き網で採取できるような大型の底生生物

³⁾ 2020 年度までは 9 測点を含む 33 測点で実施してきたが、メガベントス生息分布把握の効率性を高めるため、海底環境に係る情報が充実している 9 測点で、調査を実施することとした。

⁴⁾ 目合い 1 mm のふるいに残るサイズの底生生物

⁵⁾ 目合い 1 mm のふるいを通過し、目合い 32 μm のふるいに残るサイズの底生生物

2. 2 調査時期

① 海水の化学的性状調査

海水の化学的性状調査は、2024年2月4日、5日に実施した。

② 底質調査

底質調査は、2024年1月26日、29日、30日に実施した。

③ 海洋生態系把握調査

水中カメラによるメガベントス生息分布調査は、2024年2月8日～12日に実施した。

ドレッジによるメガベントス採取調査は、2024年1月28日に実施した。

ウバガイ（ホッキ貝）生息密度等調査は、2024年1月21日に実施した。

マクロベントス及びメイオベントス調査は、2024年1月26日、29日、30日に実施した。

2. 3 調査項目及び調査方法

2. 3. 1 海水の化学的性状調査

海水中における二酸化炭素（ CO_2 ）の溶解・平衡反応を図2に示す。

海水に溶けた CO_2 の一部は溶存気体として存在し、その存在度は CO_2 分圧（以下、「 $p\text{CO}_2$ 」という。）として算出あるいは計測される。 $p\text{CO}_2$ は海水に溶けた CO_2 が生物等に実質的に作用する CO_2 量の指標とされる。

水和して生じる炭酸（ H_2CO_3 ）は、海水中の過剰な塩基成分（アルカリ度といい、強酸イオンの Cl^- 、 SO_4^{2-} 等に対して過剰に存在する Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等のアルカリ金属及びアルカリ土類金属イオンの総和）に中和されて炭酸水素イオン（ HCO_3^- ）と炭酸イオン（ CO_3^{2-} ）に解離し、これらのイオンが海水に溶けた CO_2 の大部分を占める。また、これらのイオンは水素イオン（ H^+ ）と平衡状態にある。

海水に溶ける CO_2 が増えると $p\text{CO}_2$ が高くなるとともに、全炭酸（ $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ の合計、Dissolved Inorganic Carbon。以下「DIC」という。）が増えることから、平衡状態を保つため（1）式及び（2）式は右向きに、（3）式は左向きに反応が進み、結果として海水中の H^+ が増加することで $\text{pH}^{6)}$ は低下する。

⁶⁾ 水溶液中の水素イオン（ H^+ ）濃度を表す指数。 H^+ が増えると pH は下がる（酸性化する）。

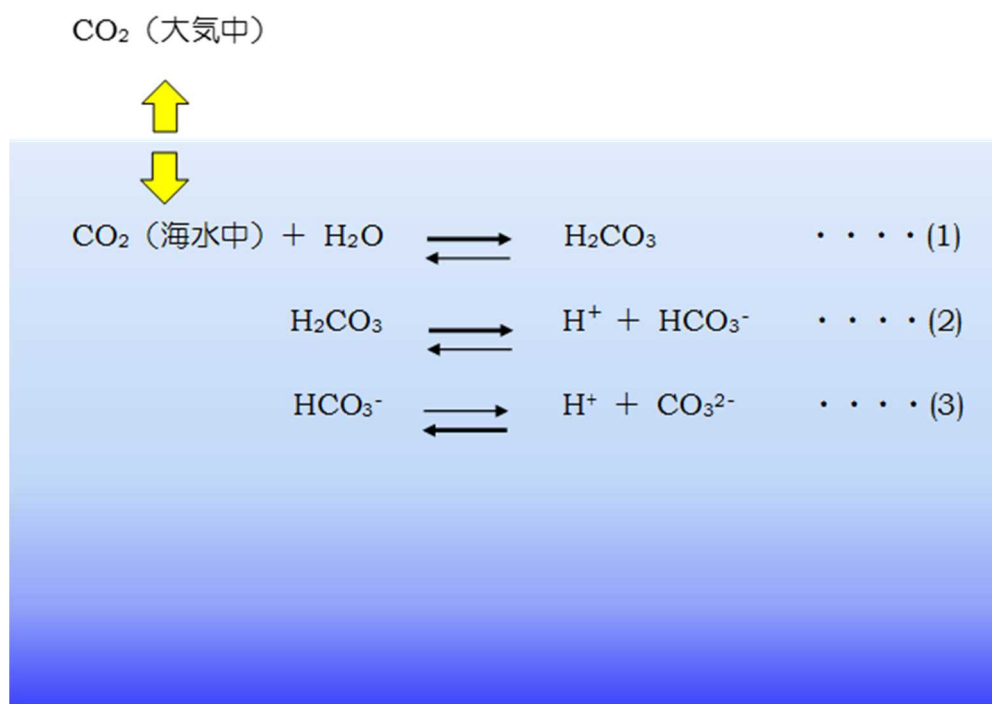


図2 海水中における二酸化炭素の溶解反応

海水の化学的性状調査では、これらの変化を検知するために、DIC、アルカリ度、pH を分析し $p\text{CO}_2$ を算出した。

海水中の CO₂ 濃度は、CO₂ 漏出のような外的な要因だけでなく、例えば、海水の混合度合いや生物の呼吸・光合成などにより著しく変化する。これらの影響を把握するため、塩分、生物活動や有機物分解に関する溶存酸素 (Dissolved Oxygen。以下「DO」という。) 及びクロロフィル *a* 濃度についても分析した。

DIC、アルカリ度、pH、塩分及び DO についてはニスキン採水器を、クロロフィル *a* 濃度についてはバンドーン採水器を用いて、表層 (水深 0.5 m)、上層 (水深 5 m)、下層 (底上 5 m) 及び底層 (底上 2 m) の 4 層において採水した。

DIC 及びアルカリ度の分析は「A Handbook of Methods for the Analysis of Carbon Dioxide Parameters in Sea Water」⁷⁾ に準じて行い、その際、海水標準物質を使って分析の系統的誤差を補正した。 $p\text{CO}_2$ については、DIC、アルカリ度及び塩分の分析値を用い、Lewis & Wallace (1998)⁸⁾ の方法に従い算出した。その他の項目の分析については海洋観測指針 (1999)⁹⁾ に従った。

⁷⁾ A. G. Dickson & C. Goyet, eds. ORNL/CDIAC-74 (1994)

⁸⁾ E. Lewis and D. Wallace. ORNL/CDIAC-105 (1998)

⁹⁾ 気象庁海洋部編 気象業務支援センター刊 (1999)

2014～2015 年度に実施した海底下 CCS 実施のための海洋調査事業等において、海水中における CO_2 と O_2 の量的関係については、呼吸による O_2 消費及び CO_2 生成、光合成による O_2 発生及び CO_2 消費等が支配的である場合、 $p\text{CO}_2$ と DO 飽和度は負の相関関係を示すことがわかった。

前述したように、海水中の CO_2 は漏出が起こらない場合においても、海域での光合成や呼吸（有機物の分解を含む）など生物的な要因によっても大きく変化する。光合成と呼吸は海水中の O_2 の放出と消費を伴うことから、これら生物的な要因による変化分を $p\text{CO}_2$ と DO 飽和度の関係から見積もることが可能であると考えられた。

2011 年度から 2015 年度までの調査^{1 0)} で得られたデータの解析により、調査海域の底層における $p\text{CO}_2$ と DO 飽和度には累乗近似の曲線関係があることが確認された。

ここでは、当該曲線の 95% 予測区間の上限を超過するデータが確認された場合、 CO_2 圧入開始前の過去の傾向から統計的に外れたとみなされることから、漏出を懸念することとした。ただし、統計学的には、漏出が発生していない場合においても、2.5% の確率で上限を超過するデータが確認される可能性がある。

また、調査海域の水塊構造を把握することを目的として、多項目水質センサを用いた水温、塩分等の鉛直観測を行った。

2. 3. 2 底質調査

底泥の状況を把握するための基本項目として、泥色、泥臭及び泥温を測定し、粒度組成及び含水率を分析した。

底泥の間隙水に CO_2 が溶けると pH が下がることが予想されることから、採取した底質試料の pH を船上で測定した。また、炭酸カルシウムの指標として無機炭素を、有機物に係る項目として有機炭素及び全窒素を、さらに硫化物を併せて分析した。分析については底質調査方法^{1 1)} に従った。

スミス・マッキンタイヤ型採泥器を用い、調査測点 1、A、B 及び C については 4 回、それ以外の調査測点については 1 回、底質を採取した。

^{1 0)} 2011～2015 年度に実施した海底下 CCS 実施のための海洋調査事業

^{1 1)} 環境省水・大気環境局（2001 年 3 月）

2. 3. 3 海洋生態系把握調査

海洋生態系の状況を把握するため、底生生物（メガベントス、マクロベントス、メイオベントス）の分布状況を調査した。

（1）水中カメラによるメガベントス生息分布調査

万が一、圧入された CO₂ が漏出した場合、分布状況が変化する可能性があるメガベントスの生息分布状況を観察し、また海底面から気泡が発生すると考えられるため、海底面の状況についても併せて観察した。（図 3）。遠隔操作無人探査機（Remotely Operated Vehicle。以下「ROV」という。）に搭載した水中カメラにより、1 測点あたり 0.8 m（水中カメラの画像の横幅）×200 m（ROV の調査距離）の範囲の海底を撮影した。

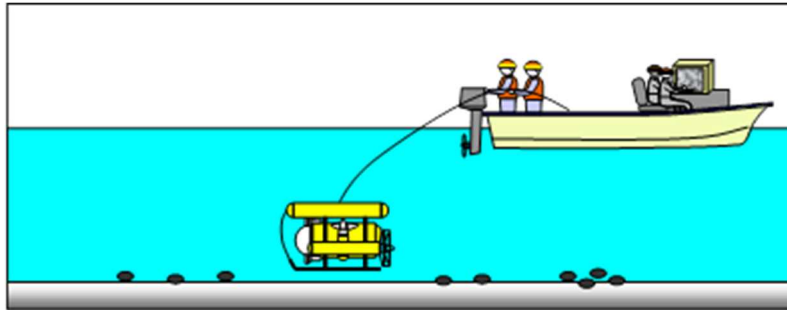


図 3 水中カメラによるメガベントス生息分布調査（模式図）

（2）ドレッジによるメガベントス採取調査

水中カメラによる目視観察では、生物種を正確には把握できないことから、ドレッジによるメガベントス採取調査を行った。

開口 0.5 m、内袋目合い 5 mm の簡易ドレッジを用いてメガベントスを採取し、分類・同定して、分類群ごとの個体数及び湿重量を計測した（図 4）。

簡易ドレッジの曳網距離及び面積については図表集 表-5 に示す。

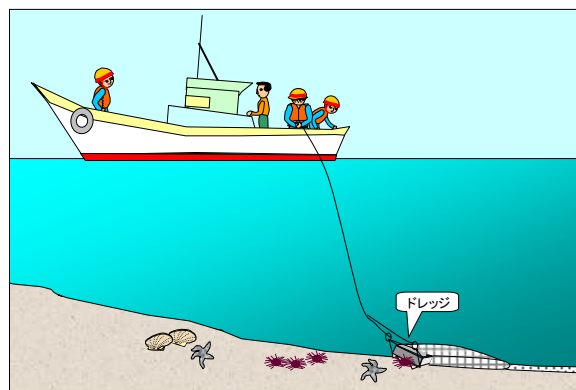


図 4 簡易ドレッジによるメガベントス採取調査（模式図）

(3) ウバガイ（ホッキ貝）生息密度等調査

メガベントスの中でもウバガイ（ホッキ貝）は苫小牧地域における水産重要種であることから、特別採捕許可範囲内で桁網を2回曳網し、ウバガイの生息密度等を調査した。

底質の pH 低下の影響が比較的大きいと考えられる炭酸カルシウムの殻を持つ生物であるため、採取したウバガイの個体重量に対する貝殻重量の割合、貝殻の厚さ等を計測した。

(4) マクロベントス及びメイオベントス調査

底質の pH 低下の影響が比較的大きいと考えられるマクロベントス及びメイオベントスについて調査を行った。

スミス・マッキンタイヤ型採泥器を用いて採泥し、マクロベントスは2回分の試料を合わせた全量を、また、メイオベントスは採泥試料表面から深さ 3 cm までを採取試料として、それぞれ分類・同定し、分類群ごとに個体数を計数した。

なお、調査測点 1、A、B 及び C は4回の採泥を行っていることから、マクロベントス及びメイオベントスも4回分の採泥試料について分類同定及び分類群ごとの個体数計数を行った。

3. 調査結果

調査結果は、以下のとおりである。

3. 1 海水の化学的性状調査結果

調査実施時の海況は、図表集 表-1 に示すとおりであった。

水温は 3.90～6.43 °C（図表集 図-2）、塩分は 33.13～33.59（図表集 表-2）、アルカリ度は 2,248～2,257 $\mu\text{mol/kg}$ （図表集 図-8 及び表-2）、DIC は 2,045～2,120 $\mu\text{mol/kg}$ （図表集 図-10 及び表-2）、pH は 7.85～8.02（図表集 図-12 及び表-2）、 $p\text{CO}_2$ （計算値）は 244～436 μatm （図表集 図-14 及び表-2）、DO は 281～355 $\mu\text{mol/kg}$ （図表集 表-2）、DO 飽和度（計算値）は 92～110 %（図表集 図-16）、クロロフィル *a* 濃度は 0.4～7.7 $\mu\text{g/L}$ （図表集 図-18 及び表-2）の範囲であった。

水塊構造の特徴は、水温、塩分ともに調査測点 6 を除き、表層から底層にかけておおむね一様な分布を示した（図表集 図-2 及び 4）。海水の化学的性状では、DIC、pH、 $p\text{CO}_2$ 及び DO 飽和度は、いずれも調査測点 6 を除き、表層から底層にかけて概ね一様な分布傾向を示した。クロロフィル *a* 濃度は調査測点 2 及び 6 では表層から底層にかけて概ね一様な分布（やや高い値）傾向を、調査測点 1 及び 3 では表層から底層にかけて高い値を示した。また、調査測点 4、5、7、8 及び 9 では表層から底層にかけて概ね一様な分布（低い値）傾向を示した（図表集 図-10、図-12、図-14、図-16 及び図-18）。

過年度冬季調査結果と比較すると、調査測点 4 の上層、調査測点 5 の下層以外の $p\text{CO}_2$ 、調査測点 1 の下層、調査測点 3 の下層及び底層、調査測点 6 の表層及び上層の DO 飽和度、調査測点 3 の底層のクロロフィル *a* 濃度が過年度の最大値より高かった。また、調査測点 1 の上層から底層、調査測点 6 の表層及び上層の DIC、調査測点 1 の下層及び底層、調査測点 6 の表層及び底層の $p\text{CO}_2$ 、調査測点 1 の下層の pH、調査測点 5 の全層、調査測点 8 の表層及び上層の DO 飽和度が過年度の最小値より低かった。それ以外の調査測点及び項目については、大きな変化はみられなかった。

2011 年度から 2015 年度までの海水の化学的性状調査及び 2023 年度冬季調査で得られた $p\text{CO}_2$ と DO 飽和度の関係は図 5 のとおりである。調査結果は、95%予測区間の上限を超過するデータ、すなわち CO_2 漏出を懸念させるデータはみられなかった。

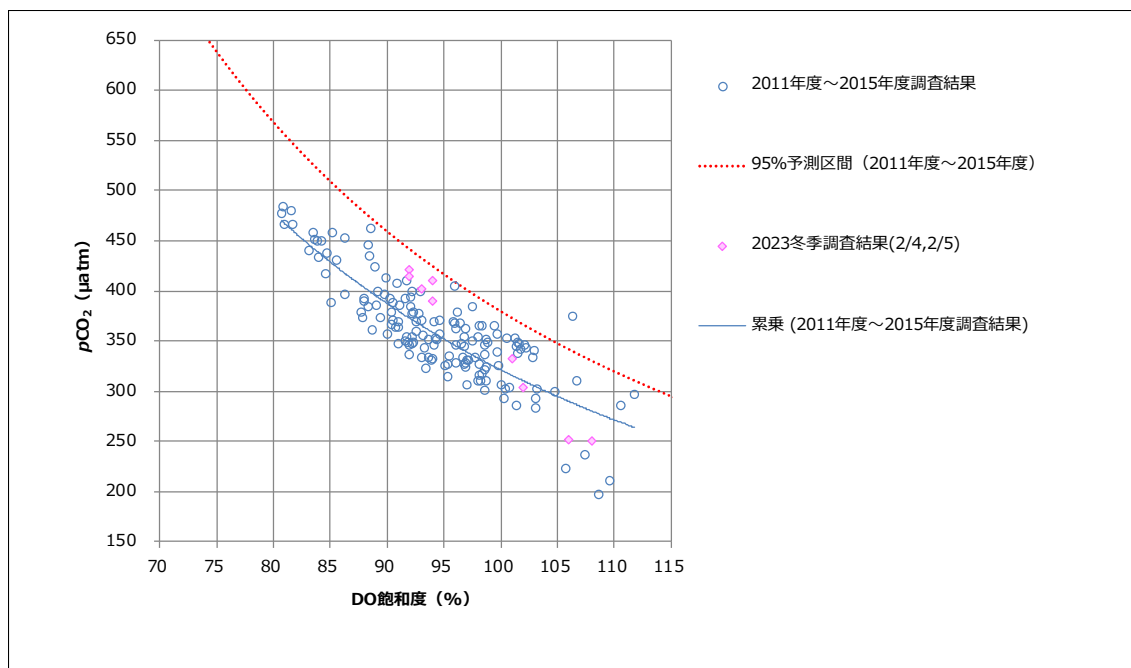


図5 $p\text{CO}_2$ と DO 飽和度との関係

3. 2 底質調査結果

底質調査結果を図表集 表-3 に、粒度組成の経年変化を図表集 図-19 に示す。

pH（標準）は 7.32～8.06、含水率は 21.6～30.7 %、有機炭素は 0.7～8.2 mg/g-dry、無機炭素は定量下限値未満～0.5 mg/g-dry、全窒素は 0.18～1.01 mg/g-dry の範囲であった。硫化物は調査測点 3、5 及び C で検出され、0.1～0.3 mg/g-dry の範囲であった。

万が一 CO_2 が漏出した場合に値が低下すると考えられる pH 及び無機炭素については、調査測点 4 の pH で過年度冬季調査結果の最小値を若干下回る値を示した。それ以外の調査測点及び項目は過年度冬季調査結果と比較して、大きな変化はみられなかった。

3. 3 海洋生態系把握調査結果

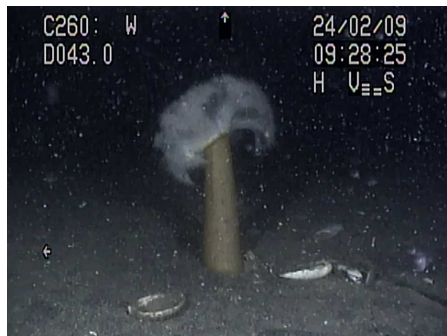
(1) 水中カメラによるメガベントス生息分布調査結果

水中カメラによるメガベントス生息分布調査結果を図表集 図-20～図-24 に示す。

観察された代表的なメガベントスは、刺胞動物門ではヒダベリイソギンチャク、イソギンチャク目、軟体動物門ではエゾボラ、腹足綱の一種、節足動物門ではヤドカリ亜目（ヤドカリの仲間）、棘皮動物門ではスナヒトデ、ニッポンヒトデ、キンコ、脊索動物門ではカジカ科の一種、カレイ目の一種であった。これらの写真を以下に示す。

過年度冬季調査結果^{1 2)}と比較すると、大きな変化はみられなかった。

^{1 2)} 2020 年度までの調査における 33 測点のうち、今回調査を実施した 9 測点の調査結果。



ヒダベリイソギンチャク



イソギンチャク目の一種



エゾボラ



腹足綱の一種



ヤドカリ亜目の一種



スナヒトデ



ニッポンヒトデ



キンコ



カジカ科の一種



カレイ目の一種

(2) ドレッジによるメガベントス採取調査結果

ドレッジによるメガベントス採取調査結果を図表集 表-5 に、個体数の経年変化を図表集 図-25 に、湿重量組成を図表集 図-26 に示す。

メガベントスの出現個体数は、多毛綱（ゴカイの仲間）のみが出現した環形動物門、二枚貝綱（二枚貝の仲間）が多数を占めた軟体動物門、軟甲綱（エビ・カニ・ヨコエビ等の仲間）が多数を占めた節足動物門の順に多かった。

出現個体数の上位3種は、キララガイ、*Ophiura* 属（クモヒトデの仲間）、ホソトゲカンザシゴカイであった。



キララガイ

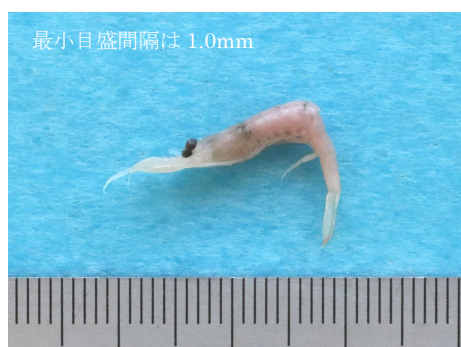


Ophiura 属の一種



ホソトゲカンザシゴカイ

底質の pH 低下の影響を受けやすいと考えられる炭酸カルシウムの殻等を持つもので出現個体数が多かったメガベントスはキララガイ、*Ophiura* 属（クモヒトデの仲間）、モエビ科であった。



モエビ科の一種

過年度冬季調査結果と比較すると、個体数（生息密度）では、調査測点 8 で過年度冬季調査結果の 95%信頼区間（平均値 $\pm 2\sigma$ （標準偏差））を下回っていた。それ以外の調査測点は前記区間の範囲に収まっており、個体数に大きな変化はみられなかった。

各分類群の組成については、調査測点 1、3 及び 4 では刺胞動物門がみられなかった。調査測点 8 では棘皮動物門の割合が顕著に減少した。それ以外の調査測点では、各分類群の組成に大きな変化はみられなかった。なお、各分類群の組成に変動が見られた調査測点については、今後も継続して変動の傾向を把握する必要がある。

（３）ウバガイ（ホッキ貝）生息密度等調査結果

ウバガイ（ホッキ貝）生息密度等調査結果を図表集 表-6 及び図-27 に示す。

1 回目の曳網では、生息密度は 543 個体/100m²、湿重量は 189.2 kg-wet/100m²、2 回目の曳網では、生息密度は 578 個体/100m²、湿重量は 200.0 kg-wet/100m²であった。また、個体重量に対する貝殻重量の割合は、1 回目の曳網では 66 %で、2 回目の曳網では 67 %であった。

過年度冬季調査結果と比較すると、生息密度（1、2 回目とも）、貝殻重量及び軟体部湿重量では、それぞれの過年度冬季調査結果の 95%信頼区間（平均値 $\pm 2\sigma$ （標準偏差））の範囲に収まっており、大きな変化はみられなかった。また、個体重量に対する貝殻重量の割合も大きな変化はみられなかった。

（４）マクロベントス及びメイオベントス調査結果

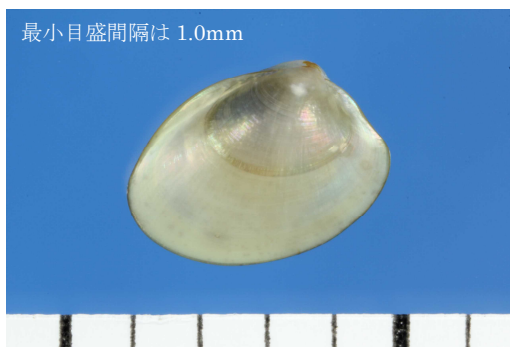
マクロベントス及びメイオベントスの個体数（生息密度）の経年変化を図表集 図-28 及び図-29 に示す。

マクロベントスは、多毛綱（ゴカイの仲間）、二枚貝綱（二枚貝の仲間）、軟甲綱（エビ・

カニ・ヨコエビ等の仲間)の順に出現個体数が多く、優占種^{1 3)}はカタマガリギボシイソメ、クルミガイ、*Clymenella* 属 (ゴカイの仲間) であった。



カタマガリギボシイソメ



クルミガイ



Clymenella 属の一種

底質の pH 低下の影響を受けやすいと考えられる炭酸カルシウムの殻等を持つもので、出現個体数が多かったマクロベントスはクルミガイ、キタスガメ、フクロスガメであった。



キタスガメ



フクロスガメ

過年度冬季調査結果と比較して、個体数 (生息密度) では全調査測点で過年度冬季調

^{1 3)} 総個体数に対して 5%以上を占める種

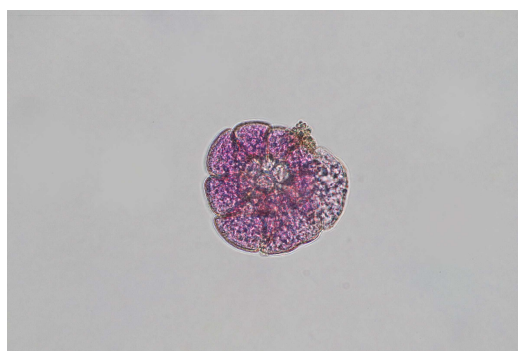
査結果の 95%信頼区間（平均値 $\pm 2\sigma$ （標準偏差））に収まっており、大きな変化はみられなかった。

各分類群の組成については、調査測点 2、4、5、6、8 及び C では刺胞動物門が、調査測点 3、5 及び 6 では棘皮動物門がみられなかった。調査測点 1 では環形動物門の割合が増加し、節足動物門の割合が減少した。それ以外の調査測点では、各分類群の組成に大きな変化はみられなかった。なお、出現がみられなかった炭酸カルシウムの殻等を持つ分類群については注視する必要がある、今後も継続して変動の傾向を把握する必要がある。

メイオベントスは、線形動物門（線虫の仲間）、有孔虫目（有孔虫の仲間）、ノープリウス幼生の順で出現個体数が多く、優占分類群^{1 4)} についても同様であった。



線形動物門の一種



有孔虫目の一種



ノープリウス幼生

底質の pH 低下の影響を受けやすいと考えられる炭酸カルシウムの殻等を持つもので、出現個体数が多かったメイオベントスは、有孔虫目、ノープリウス幼生、ソコミジンコ目であった。

^{1 4)} 総個体数に対して 5%以上を占める分類群



ソコミジンコ目の一種

過年度冬季調査結果と比較して、個体数（生息密度）では調査測点 4 で過年度冬季調査結果の 95%信頼区間（平均値 $\pm 2\sigma$ （標準偏差））を下回り、調査測点 7 及び B で前記区間を上回っていた。調査測点 4 では線形動物門の出現個体数がやや減少し、有孔虫目及び節足動物門の出現個体数がやや増加した。調査測点 7 では環形動物門及び節足動物門の出現個体数がやや減少し、有孔虫目の出現個体数がやや増加した。調査測点 B では有孔虫目の出現個体数が増加した。それ以外の調査測点は前記区間の範囲に収まっており、出現個体数に大きな変化はみられなかった。

各分類群の組成については、調査測点 4 では環形動物門が、調査測点 3 及び 5 では節足動物門がみられなかった。それ以外の調査測点では、各分類群の組成に大きな変化はみられなかった。なお、出現がみられなかった炭酸カルシウムの殻等を持つ分類群については注視する必要がある、今後も継続して変動の傾向を把握する必要がある。

4. まとめ

2023 年度冬季調査で得られた $p\text{CO}_2$ と DO 飽和度の関係については、95%予測区間の上限を超過するデータ、すなわち CO_2 漏出を懸念させるデータはみられなかった。

底質調査では、 CO_2 が漏出した場合に値が低下すると考えられる底質の pH について、過年度冬季調査結果の最小値を 0.02 下回る値（調査測点 4 : pH=7.41）を示したが、無機炭素の低下はみられておらず、過年度冬季調査結果の変動範囲内であった。

炭酸カルシウムの殻等を持つ生物分類群として、調査測点 3、5 及び 6 ではマクロベントスの棘皮動物門がみられず、調査測点 3 及び 5 ではメイオベントスの節足動物門がみられなかったが、これらの調査測点では、過年度も当該分類群がみられないことがあった。一方、前記の各調査測点において、メガベントスでは当該分類群はみられていた。

2023 年度冬季調査において、炭酸カルシウムの殻等を持つ生物分類群がみられなかった結果については、過去に自然変動でみられなかった年もあったことや、冬季調査の全調査測点で CO_2 漏出と関連する $p\text{CO}_2$ の増大は見られなかったことから、自然変動による結果の可能性が高いと考えられるが、今後の変動を注視する必要がある。

担当者等連絡先

部 署 名：環境省 水・大気環境局海洋環境課

T E L：03-5521-9023（直 通）

：課長 水 谷 好 洋

担当者名：課長補佐 堀野上 貴 章（内線：25523）