

水質改善

(代表事業者：株式会社イノカ、連携事業者：JFEスチール株式会社)

本事業を通じて
目指す姿

環境改善ソリューションの実装を通じ、「海洋生物多様性の保全および利活用」や、
当社がミッションとして掲げる「海の見える化」を果たし、自然と調和しながら東京湾の価値最大化を目指します。

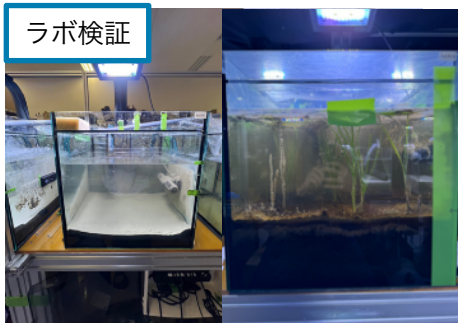
事業概要

- イノカ社が有する環境移送技術を用いて、東京湾の流速/温度/光量/水質等の各種データをもとに環境を再現した実験水槽を立ち上げました。
- 東京湾を再現した実験水槽にてスラグによる底質改善効果を検証しました。水槽内で一定の効果を確認した後、① 中央防波堤エリアの指定水面（半閉鎖域）および ② 東京港野鳥公園という2つの実環境において、スラグがヘドロに与える効果を確認しました。

これまでの取り組みと成果

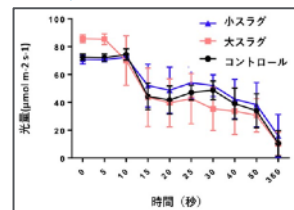
年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
3か年の 取り組み	東京湾で計測したデータをもとに構築した東京湾再現水槽にてスラグによるヘドロの巻上防止効果を検証しました。	同水槽にてヘドロの硫化水素発生抑制及び生態系再生評価を検証するとともに、実環境でのスラグの効果検証をしました。	水槽内のヘドロにスラグを投入した環境でアマモの生育検証を行い、実環境（東京港野鳥公園）においてもスラグ検証を行いました。
これまでの 成果	- 先行研究では特定の検証地点の環境を考慮した実験が実施されていませんが、当社は東京湾の特定水域を再現した実験水槽で現地により近い環境での検証を実施し、ヘドロの有する悪影響に対するスラグの有効性を検証・証明するとともに、ラボでの実証結果をフィールドで再検証する新規性の高い研究アプローチを構築することができました。 【ラボ検証】① ヘドロの巻き上げ防止効果 ② 硫化水素発生抑制効果 ③ スラグ資材の粒径とアマモ生育の関係 ④ ヘドロとの化学反応について、新規性の高い示唆が得られました。 【フィールド検証】① ヘドロ環境における硫黄分の吸着効果（R5 指定水面・R6 野鳥公園） ② 開放系に近い環境（東京港野鳥公園）での予備的な測定による測定プロトコル確立に向けた示唆が得られ、継続的に検証を進める上での調査手法の型を検証することができました。		

ラボ検証



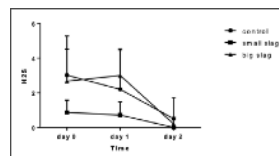
東京湾再現水槽
(写真右は令和6年度に実施した
アマモ生育実験)

小スラグに若干のヘドロ巻き上げ
抑制効果を見出しました
(比較して透過度が高い)



スラグによるヘドロ巻上
防止効果の検証

還元層でスラグが硫化水素を
抑制していることから、
水質改善に有効である可能性を
期待できます。



スラグによる硫化水素の
発生抑制効果の検証

ヘドロに浸けた後の表面から
複数の化合物を確認。
スラグとヘドロの反応が
起きていることを確認しました



XRDを用いて
フィールド設置後の
スラグ表面を成分解析



ラボとフィールドの
フィードバックサイクル
という独自性の高い
アプローチ

フィールド検証



指定水面(半閉鎖域)
でのスラグ設置
(令和5年度)



東京港野鳥公園
でのスラグ設置
(令和6年度)

現状の課題と本事業終了後のアクション

現状の課題

- 東京湾の環境改善に向けて**ヘドロ以外の環境問題に対するソリューションを探索**する必要があります。
- ソリューション探索のためにも、**環境再現技術の精度をより一層向上**させていく必要があります。
- フィールドとラボを横断する検証方法を精緻化すべく、**フィールドでの調査手法を検証**する必要があります。
- 世間一般における、**東京湾の水質問題に対する認知度を高める**必要があります。
- 東京湾の環境改善を行い、どのような未来を目指すか**力強いビジョンが必要です**。

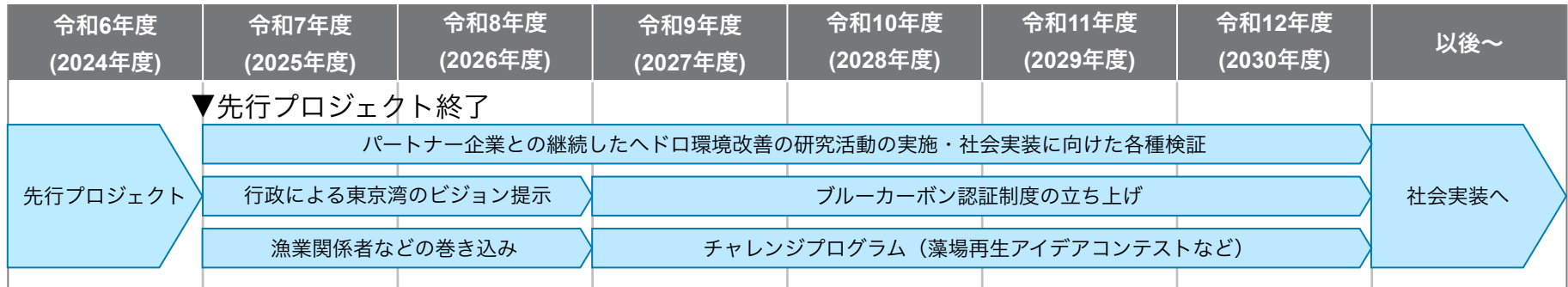


本事業終了後のアクション

- 今回の枠組みを引き継ぐ形で、**東京湾の環境改善に共同で取り組むパートナー**となる企業との協業を進める計画です。
- **多くの環境再現の実験を積む**とともに、より多くのパラメーターを調査・反映し、**再現精度を向上**させます。
- 漁業関係者などを巻き込んだ**東京湾水質改善プロジェクトを立ち上げ**、水質改善と認知度向上に取り組めます。
- **行政より東京湾のビジョンを示すことを促す**と共に、パートナーとなる自治体や企業と活用事例を検討します。

今後のビジョン

- 今回のプロジェクトでの実績を基に2030年度以降の社会実装を目指し、引き続き取り組んでいきます。



これまでの取り組みと成果に対する有識者からのコメント



環境移送技術という強みをスラグ以外のどのような実証が可能であることを示すことで、企業へのアピールとなると思料する。また、**環境問題に対してどの程度の社会コストが掛かっているか、それに対して貴社の技術をどのように活用できるのかなど示す**ことができるとよい

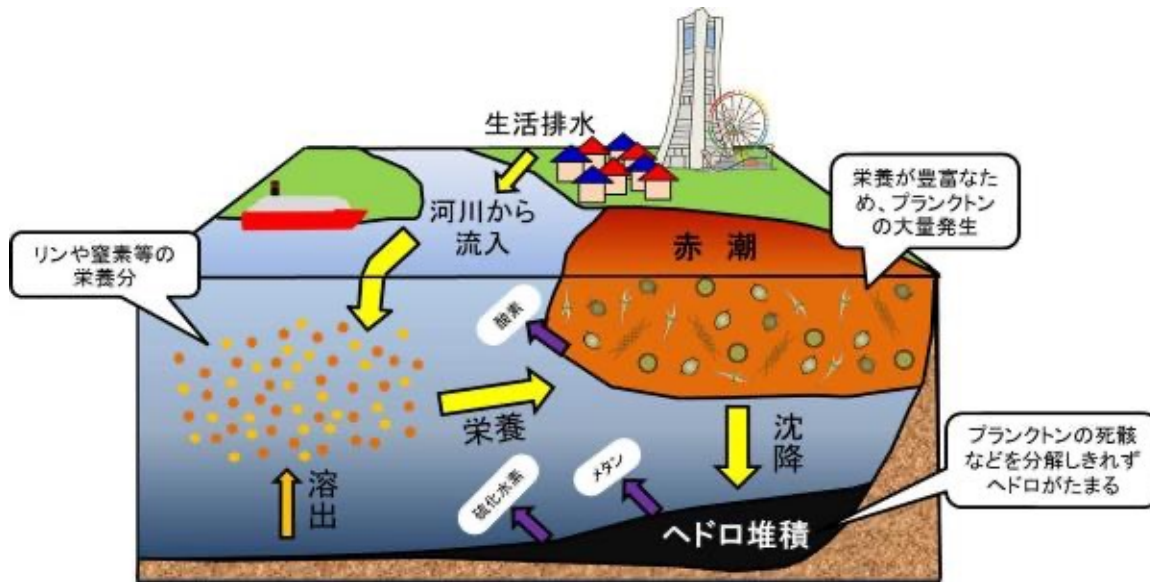


環境移送技術は貴社の有する技術であるが、今回のスラグはJFEスチールの技術であり、このように**複数の技術を組み合わせることであれば他社とアライアンスを組む等、周囲を巻き込んだロードマップも検討**できるとよい。

Appendix

人間活動に伴う陸域からの流入負荷により、ヘドロ堆積が環境悪化を招いている

ヘドロの成り立ち



横浜市 赤潮発生メカニズム (2019年3月14日)

<https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/kankyohozen/kansoku/science/naiyou/umi/akashio.html>

1

- 陸域からの流入負荷（未処理水や農業排水）
- 富栄養化（窒素やリン成分）

2

- プランクトンの大量発生
- 酸欠による遺骸の堆積

3

- 好気性細菌の分解による酸素の大量消費
- 嫌気層の形成（貧酸素水塊）

4

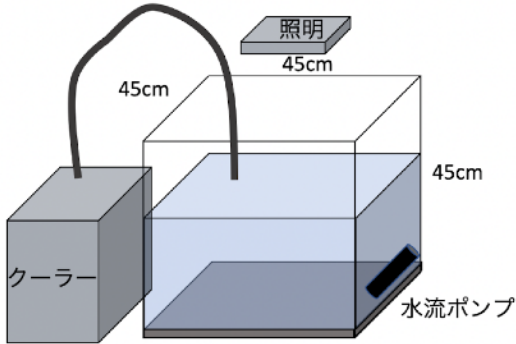
- 嫌気性細菌の分解による硫化水素の発生
- 毒性による海洋生物の斃死

⚠ ヘドロを放置することで生物多様性に悪影響を与える ⚠

東京湾の指定エリアで取得した物理的・化学的データを基にエリア内海底付近の環境再現を行い、その再現度のレビューを実施した

ファクトデータ：東京湾の底質再現

東京湾の底質再現 ～水槽システム～



上記のような水槽システムを構築し実験に使用した。

- 水槽：45×45×45 cm³
- ヘド口：2 L
- 照明：1台
- 人工海水：60 L
- クーラー：1台
- 水流ポンプ：1台

ヘド口場の状態

- 水流がほとんどない（0ではない）
- 貧酸素環境
- 硫化水素の発生

必要なデータ

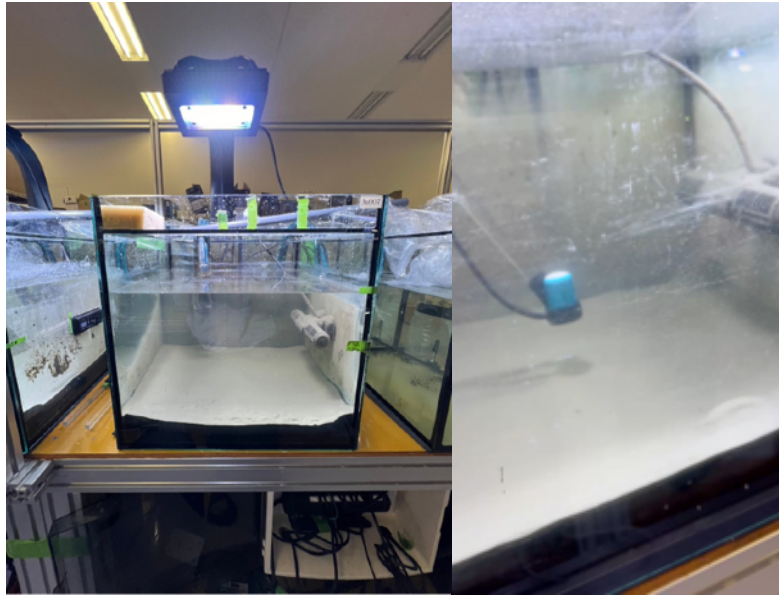
- 流速（水流の再現）
- DO（貧酸素環境の再現）
- 水温（溶存酸素量に関係）
- 塩分濃度（海水域の基礎データ）

項目	フィールドデータ	再現データ
水温	9.9–10.2℃ (10.05±1.4%)	9–11 °C (10.05±10.4%)
塩分濃度	31.7psu	33psu
DO (溶存酸素)	8.7–9.2 mg/l (8.95±2.8%)	8.14–10 mg/l (8.95±11.7%)
流速	0.3–2.5 cm/s (1.4±79%)	1–2 cm/s (1.4±42.8%)

粒度の小さなスラグには、ヘドロの巻き上がり抑制効果が期待される

ファクトデータ：ヘドロ巻き上がり抑制実験

実施内容



- 光量は水の濁度に影響されて値を変化させるため、コントロール/大スラグ/小スラグで光量を比較

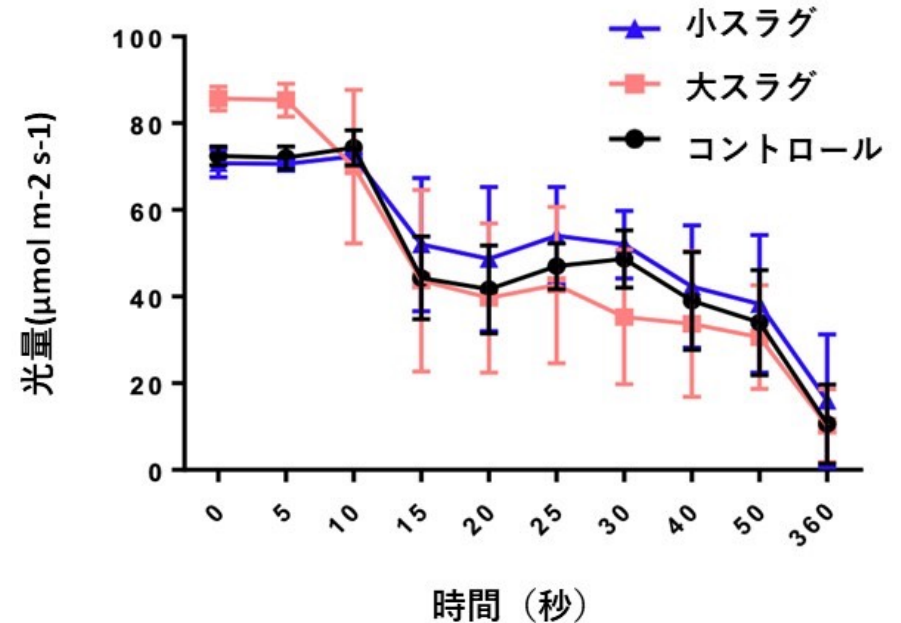
1. コントロール（スラグなし水槽）
2. 大スラグ（マリンストーン）
3. 小スラグ（カルシア改質材）



- 計測に当たっては光量子計（右図）を使用
※Full-Spectrum Quantum Meter
(Apogee instrument MQ-500)



実験結果

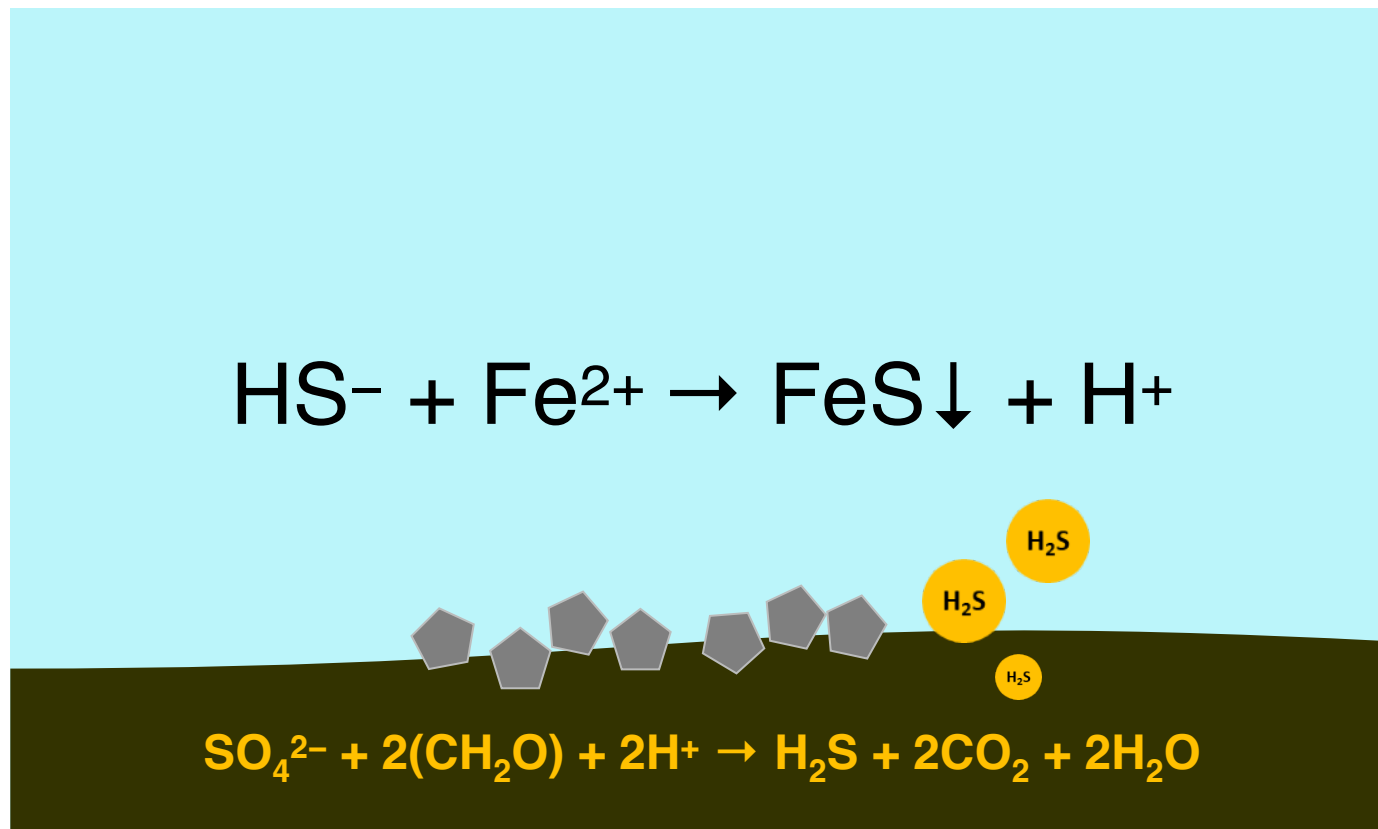


光量子計を用いて光透過度（≒濁度）を計測したところ、小スラグ区はコントロール区と比較して透過度が高かった

小スラグに若干の巻き上がり抑制効果が見られた

スラグ中の鉄成分が硫黄成分と結合することで、硫化水素を抑制する

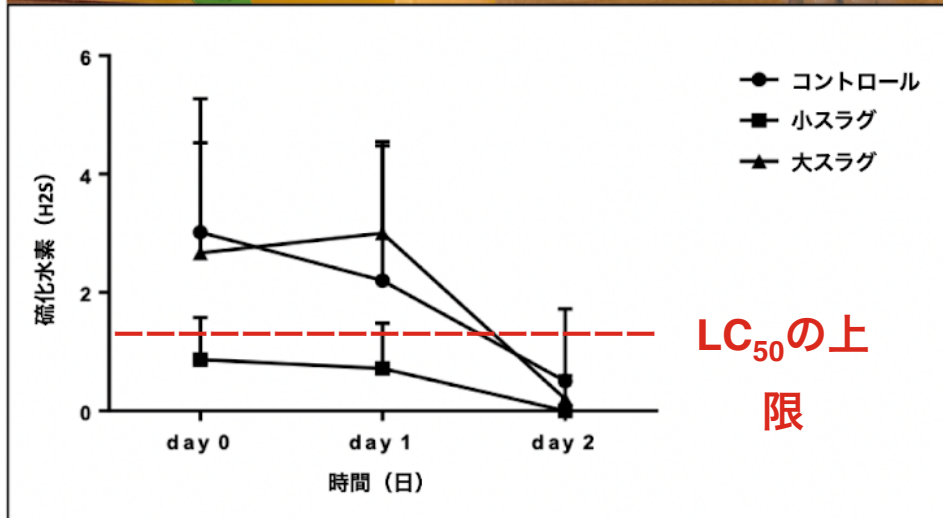
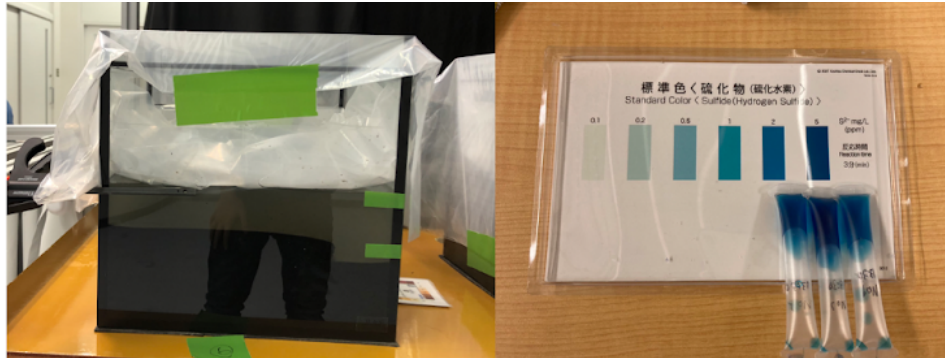
ファクトデータ：硫化水素抑制のメカニズム



スラグから溶出したFe成分が硫化物を吸着する

実験水槽に東京湾内のヘドロ場を再現し、還元層内におけるスラグの硫化水素吸着効果を検証した結果、スラグには水質改善効果が期待できることが分かった（再現水槽内）

ファクトデータ：スラグの硫化水素吸着効果



- 実験中、硫化水素の臭気が確認されたため、どの実験区においても最終的には蒸発により硫化水素濃度が低下したと思われる
- コントロールはヘドロ堆積場の環境再現で、スラグを投入していない

ある調査では、魚類に対する1時間後の半数致死量 (LC₅₀) が $0.046 \leq \text{H}_2\text{S} \leq 1.719 \text{ mg/l}$ であったことが報告されている

Fung and Bewick (1980)

結果

小スラグ添加区では、硫化水素の発生がコントロール区と比較して約2分の1にまで抑制されていることが分かった

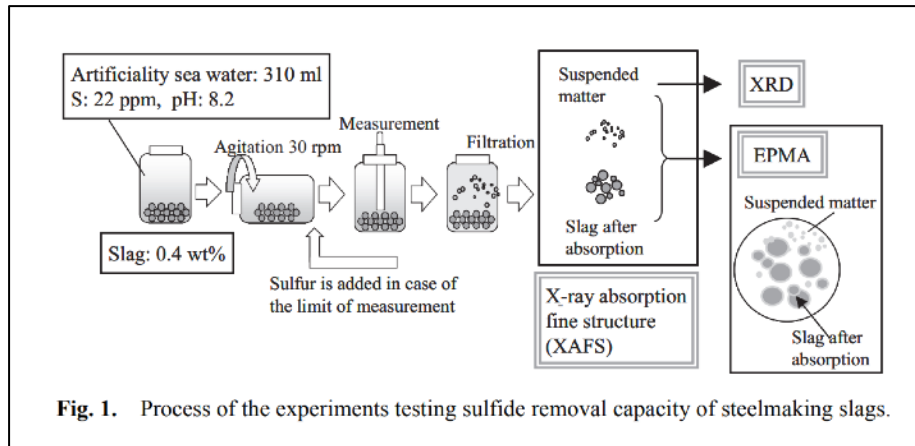
示唆

- 還元層でスラグが硫化水素を抑制している
- 水質改善に有効である可能性あり

実験水槽に東京湾内のヘドロ場を再現し、還元層内におけるスラグの硫化水素吸着効果を検証した結果、スラグには水質改善効果が期待できることが分かった

ファクトデータ：スラグの硫化水素吸着効果

先行研究



Hayashi, A., Watanabe, T., Kaneko, R., Takano, A., Takahashi, K., Miyata, Y., ... & Ariyama, T. (2013). Decrease of sulfide in enclosed coastal sea by using steelmaking slag. *ISIJ international*, 53(10), 1894-1901.

～シンプルな実験系～

人工海水で満たしたポリエチレン製のボトルにスラグと硫化物イオンを投入し、攪拌後にスラグの硫化物イオン吸着効果を検証

イノカでの検証



～より実海域に近い実験系～

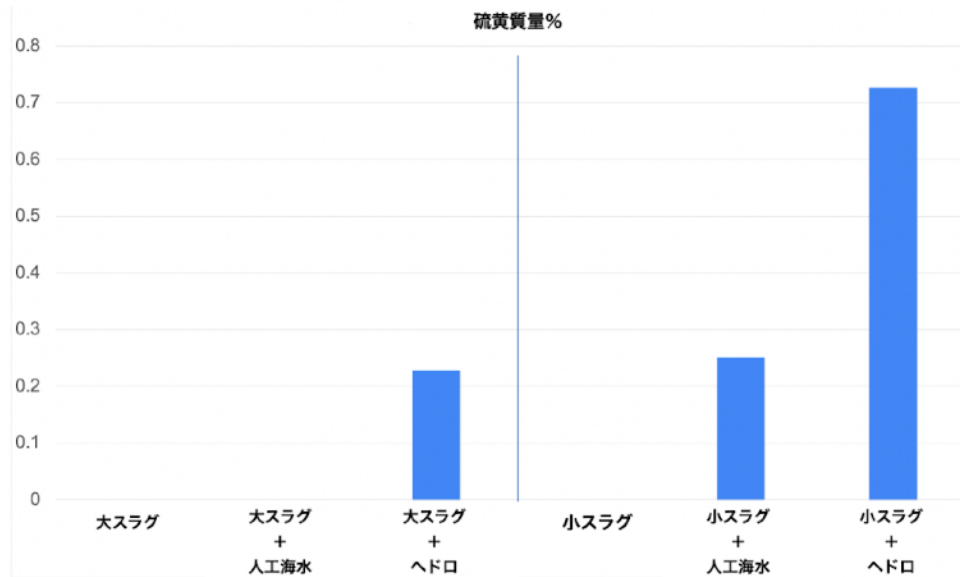
実地から採取したヘドロを用い、閉鎖空間内の一部パラメーターを実地データと同期させた再現水槽でスラグの効果を検証

再現環境という新たな実験系での検証を試みた点において、新規性あり

前頁の検証によってスラグの硫化水素吸着効果が示唆されたが、スラグの表面からも硫黄成分が検出されたため、これはスラグの吸着効果を裏付ける結果となった

ファクトデータ：スラグによる硫黄成分吸着

実験水槽の各種スラグの硫黄の質量%



水中やヘドロ層の硫化水素濃度を測るだけではスラグによる吸着効果を十分に支持できない

スラグの表面組成を調べることによって、よりクリティカルなデータを得ることができる

調査したところ、スラグの表面から通常時よりも多量の硫黄成分を検出した

スラグの硫化水素吸着効果を裏付ける結果となった

室内実験によってスラグの有用性（硫化水素吸着効果）が確認されたため、次のフェーズとして実海域にスラグを設置し、効果の検証を実施した

ファクトデータ：東京湾半閉鎖域へのスラグ設置

2023年11月、東京湾の臨海中央大橋付近（ヘドロ堆積場）に500kgのスラグを設置した

水槽での環境再現

フィールドよりも静的
かつ安定的な環境

スラグの効果の実証

フィールドでも同じ効果
を得られるか検証

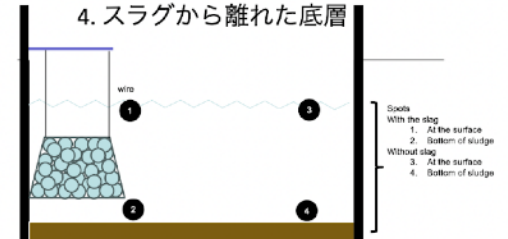
東京湾へのスラグの設置



500 kgの大スラグ（マリンスターン）が鉄の容器に入れられ、東京湾の臨海中央大橋横のエリアに設置された（2023年11月）。

海水は採水器によって採水された（バンドーン採水器Tohken engineering Co., Ltd, 5026-C）。

1. スラグ直上表層
2. スラグ直下底層
3. スラグから離れた表層
4. スラグから離れた底層

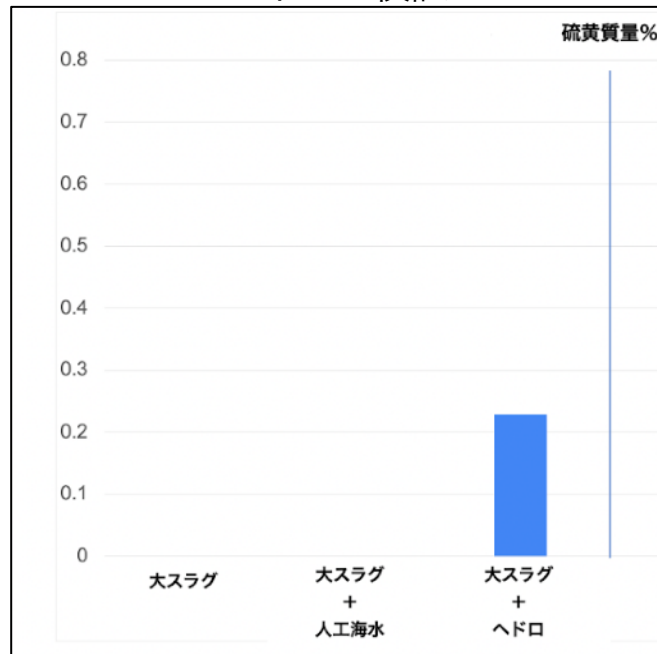


※構造物の耐久性上、500kgが最大投入量であった

実海域における検証では、室内実験と同様にスラグ表面から硫黄成分が検出されたため、指定エリア内でもスラグの効果が発揮される可能性が見えた

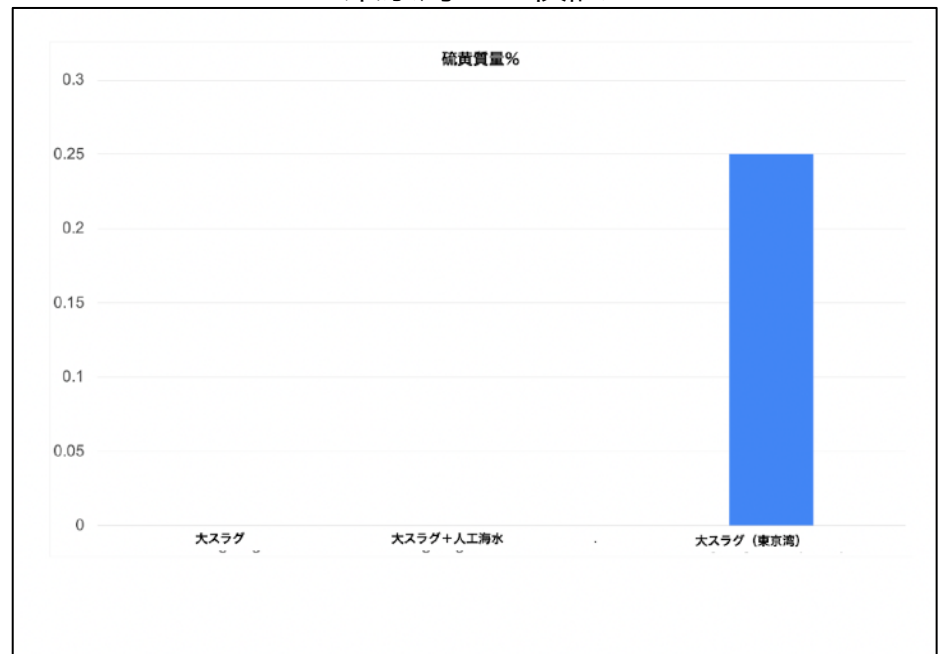
ファクトデータ：東京湾のヘドロ場におけるスラグのはたらき

ラボでの検証



≡

東京湾での検証



- スラグを設置した結果、回収されたスラグの表面から硫黄成分が検出された。
- この結果から、設置されたスラグがヘドロ場の硫黄成分を吸着していることが示唆された。



イノカによる今回の検証は先行検証を見ても前例がなく、再現水槽をもって得られた結果と実海域で得られた結果が一致した。

ラボ実験から閉鎖水域での実証を通じて段階的な確認を積んでいる

これまでの知見とその後

① 東京湾の閉鎖環境を再現するための基礎技術を構築した。
(今後は、より多くのパラメーターをコントロールすることが望まれる。)



② 再現環境内でスラグの硫化水素吸着効果を確認した。
(ヘドロ内でFeSの増加を見出すことができれば、よりクリティカルな根拠となる。)

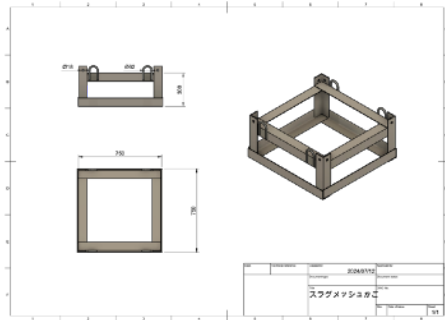


③ 東京湾の閉鎖水域にスラグを設置し、ラボ実験と同様にスラグの効果を確認することができた。

<今後>

イノカが目指すアマモ場造成に適した、**より開放域での実証を行い、**
海洋環境改善に向けた現実的なアプローチ・メソッドを確立させていく

東京湾へのスラグの設置 / 測定



500kgの大型スラグ（海石）を2つの鉄製容器（サイズ：750 x 750 x 300 mmの金属ケージ）に入れ、東京野鳥公園エリアに設置（2024年11月）。

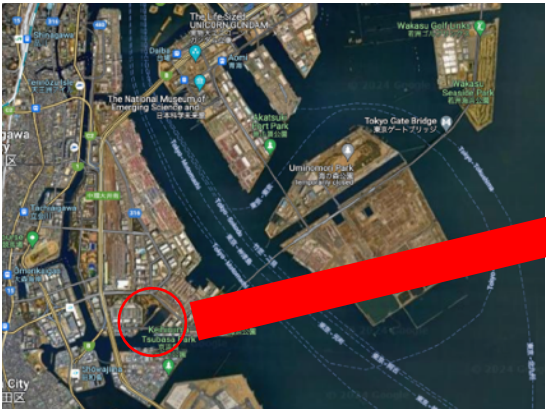
2024年12月には、水質調査もトライアル実施し、フィールド調査のプロトコルを確認した。



電磁流向流速計
X軸, Y軸, 合成流速

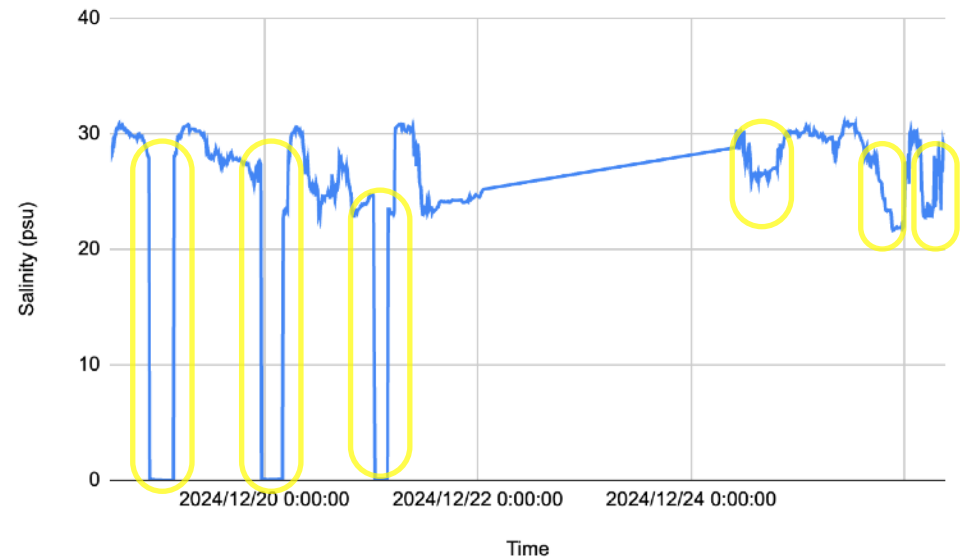


マルチ水質センサー
水温, 塩分濃度, pH, DO, 水深, etc.

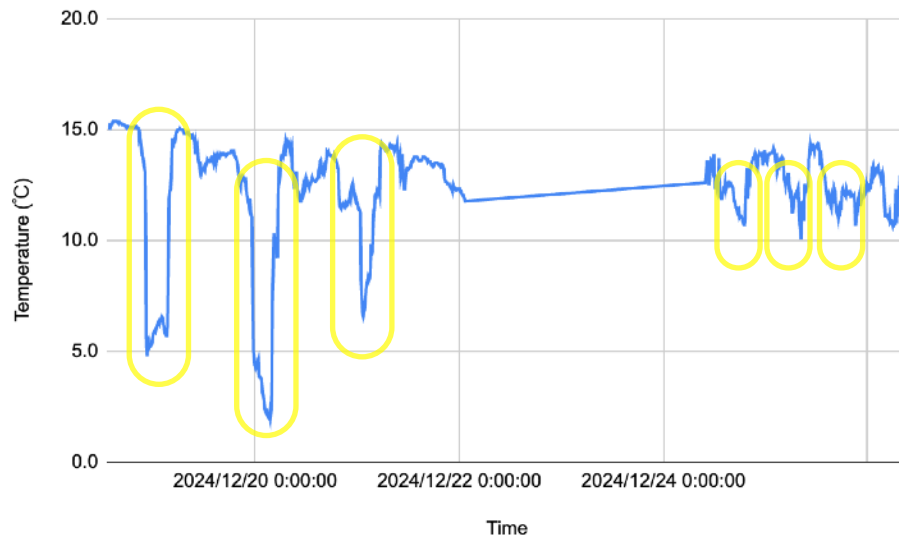


参考：東京港野鳥公園_水質測定データ①

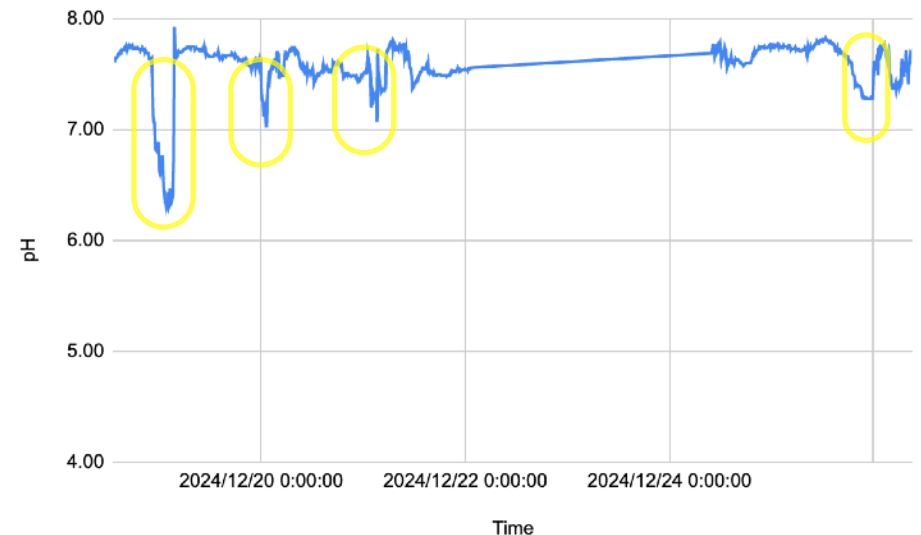
- ・測定場所：東京港野鳥公園 指定海面
- ・測定期間：2024年12月13日 - 24日
- ・測定項目：塩分濃度・水温・pH・流速・水深・溶存酸素
- ・測定の目的：
 - 東京湾フィールド調査において、今回対象とした潮汐の影響を受ける水深の浅い地点において、特定の測定機材の動作や得られるデータがどのようなものかを確認すること。
 - 前回の指定水面に比べ、潮の流れが顕著であるエリアにおいての調査であり、流速・流向などを検証することも目的の一つとした。今後継続して東京湾フィールドの水質測定を実施し、ラボと連携する上での予備実験に位置付けられる
- ・今回の測定の成果：
 - 潮汐による測定データへの影響を把握できた（グラフ中の黄色マーカー部分）
 - ことにより、今後東京湾フィールドでの水質測定を行う上での測定プロトコルを確認することができた。



塩分濃度



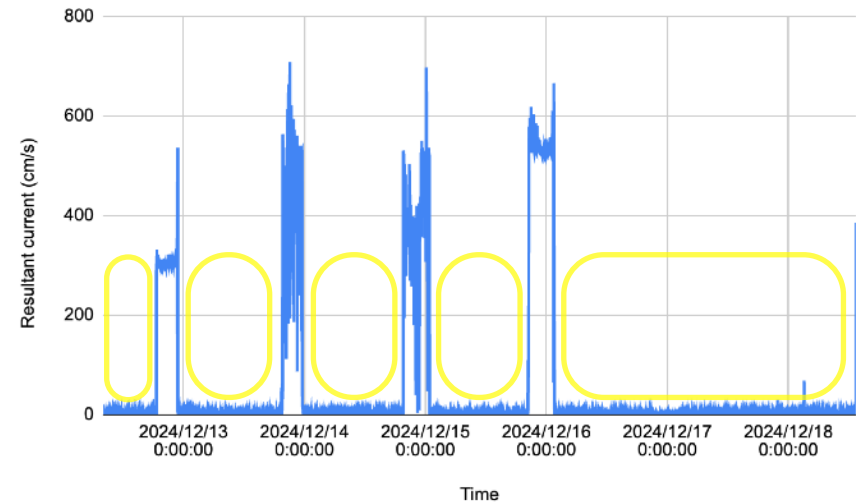
水温



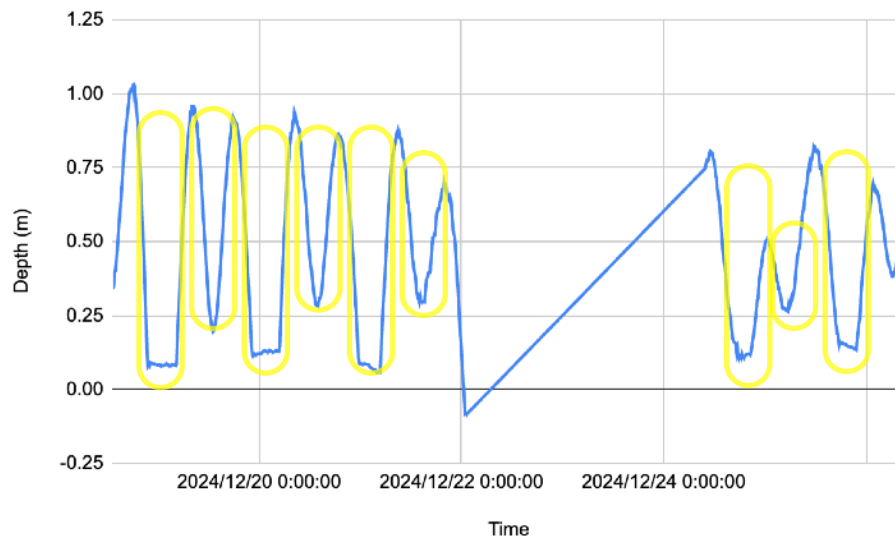
pH

参考：東京港野鳥公園_水質測定データ②

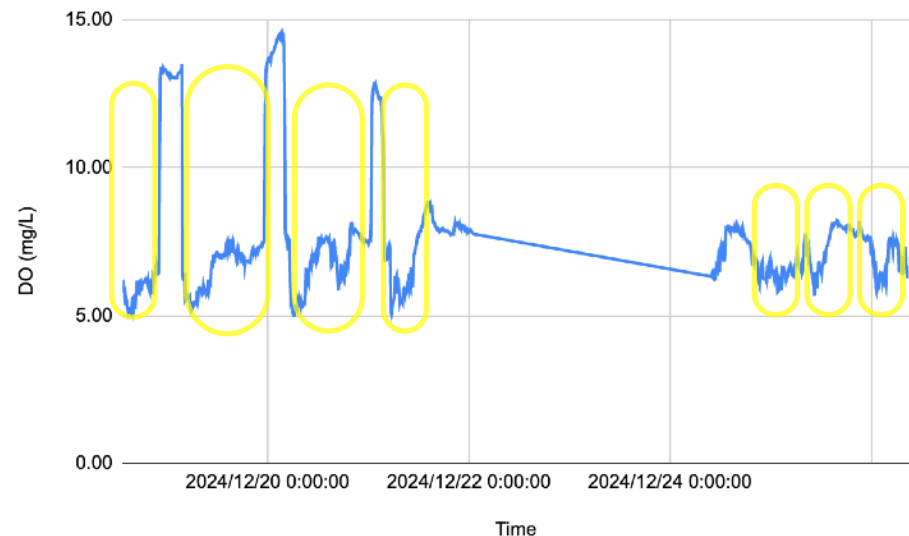
- ・測定場所：東京港野鳥公園 指定海面
- ・測定期間：2024年12月13日 - 24日
- ・測定項目：塩分濃度・水温・pH・流速・水深・溶存酸素
- ・測定の目的：
 - 東京湾フィールド調査において、今回対象とした潮汐の影響を受ける水深の浅い地点において、特定の測定機材の動作や得られるデータがどのようなものかを確認すること。
 - 前回の指定水面に比べ、潮の流れが顕著であるエリアにおいての調査であり、流速・流向などを検証することも目的の一つとした。今後継続して東京湾フィールドの水質測定を実施し、ラボと連携する上での予備実験に位置付けられる
- ・今回の測定の成果：
 - 潮汐による測定データへの影響を把握できた（グラフ中の黄色マーカー部分）
 - ことにより、今後東京湾フィールドでの水質測定を行う上での測定プロトコルを確認することができた。



流速

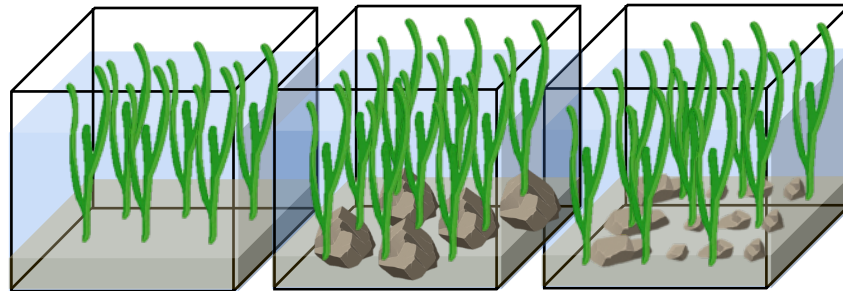


水深



溶存酸素

アマモに対するスラグの効果の対照実験



コントロール
(スラグなし水槽)

大スラグ
(マリンストーン)

小スラグ
(カルシア改質材)



マリンストーン (大)



カルシア改質材 (小)

以下の4つの条件の下で、スラグ4kgを水槽の底面2000 cm²に投入し、比較と検証を行った。

- 対照群 (スラグなしタンク)
- 大スラグ (マリンストーン)
- 小スラグ (カルシア改質材)

各条件について3回の繰り返し実験を行った。

アマモの苗は9本、タンクに設置されました。この実験は、株式会社イノカによって3ヶ月間実施した。

X-ray Diffraction (XRD)を用いたスラグ表面の物質組成の評価



SmartLab Rigaku XRD
machine

X線回折分析（XRD）は、材料の結晶構造、化学組成、物理的特性に関する詳細な情報を提供する非破壊技術。サンプル内の鉱物とその種の存在と量を識別して測定する。XRDは、相の組成と構造の分析にも使用される。さまざまな元素をppm未満のレベルまで分析して定量化する。XRDは、ポリマーの多形性、結晶度、結晶子サイズなど、構造と特性の関係を確認するために必要な構造情報を提供する。

スラグのXRF結果では、スラグの表面に SiO_2 、 CaOSiO_2 、 MgO 、 Fe_2O_3 が見つかった。これらの成分は一般的にスラグ上に存在するものである。

これに加え、不明な成分も多数確認できました。特に、ヘドロに浸漬した後、いくつかの化合物が見つかった。カルシウムシリカ化合物と硫化物に該当しますが、特定はできなかった。



スラグ表面の成分が、ヘドロに含まれる成分と反応していることを示している。