

第14回環境研究シンポジウム
「レジリエントな社会・国土を創る環境研究」

製鋼スラグと浚渫土を活用した
アマモ場創生技術の評価



産業技術総合研究所

環境管理研究部門

海洋環境動態評価研究グループ

塚崎 あゆみ

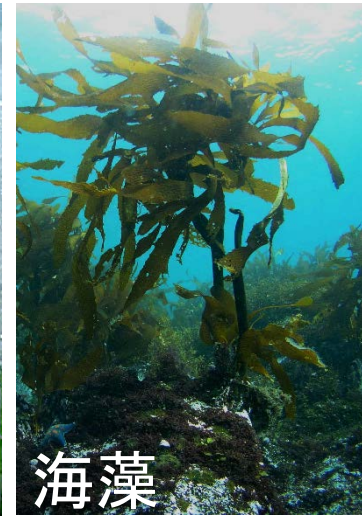
アマモ場とは？

アマモ

沿岸砂泥域(～潮下帯)における主要な一次生産者となる海草

地下茎・根をもつ

日本各地に分布



水質環境

生態系

グリーン(ブルー)
レジリエンス

国土保全

温暖化
緩和

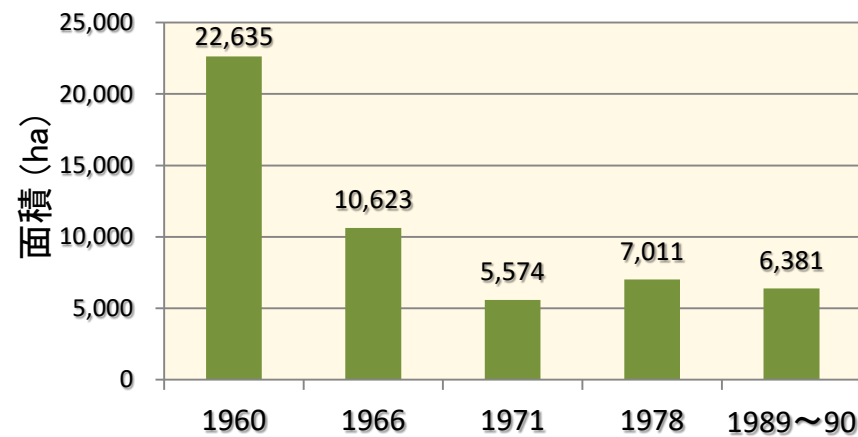
アマモ場

河口・沿岸域の主要な浅場生態系

➡ 多様な生態系サービスの提供

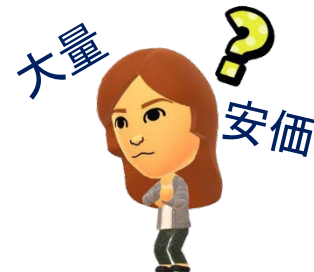
- 水質改善(濁り・富栄養化)
- 生物多様性の保全(海のゆりかご)
- 海岸浸食の低減
- 温室効果ガス(CO₂)の吸収・削減
= Blue Carbon

沿岸海洋環境の悪化



瀬戸内海におけるアマモ場面積の推移

出典：1960、1966、1971年：水産庁南西海区水産研究所調査
1989～1990年：第4回自然環境保全基礎調査（環境省）



産業副産物を有効活用した浅場創生技術の提案

●利用可能な基盤材料＝2つの**産業副産物** 毎年大量に発生

製鋼スラグ

製鋼過程の産業副産物
発生量：年間1,150万t



浚渫土

泊地や航路の建設副産物
発生量：年間2,083万m³



製鋼スラグ × 浚渫土混合土壌に
よるアマモ場生態系創生技術

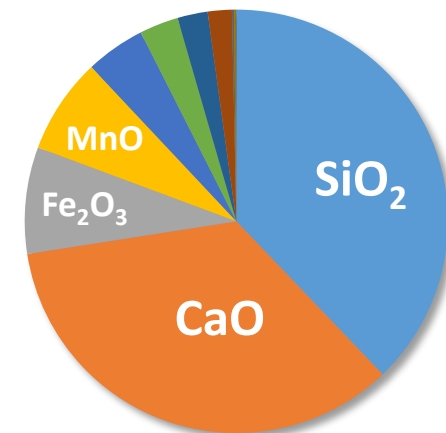
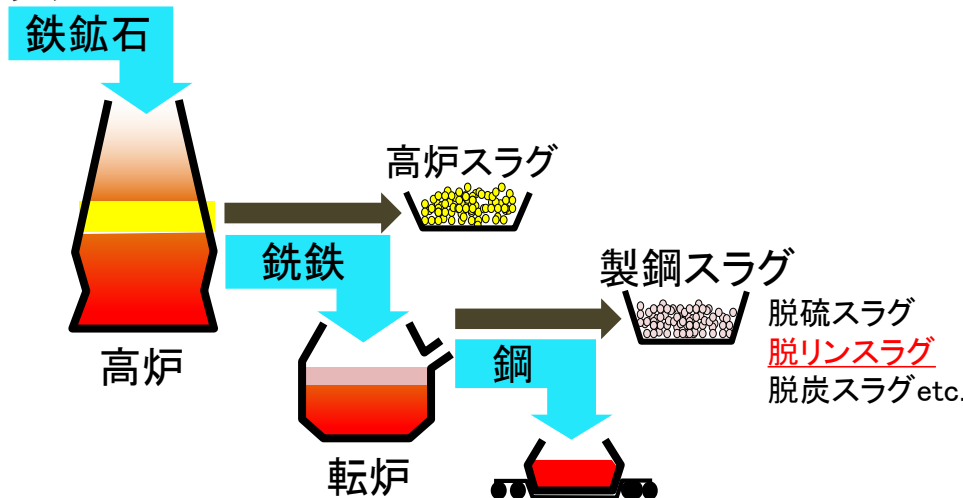
産業副産物の大量活用

+

沿岸環境の修復・創生

**産業副産物を活用した
レジリエントな沿岸環境創生**

製鋼スラグとは？



製鋼スラグの主要元素組成

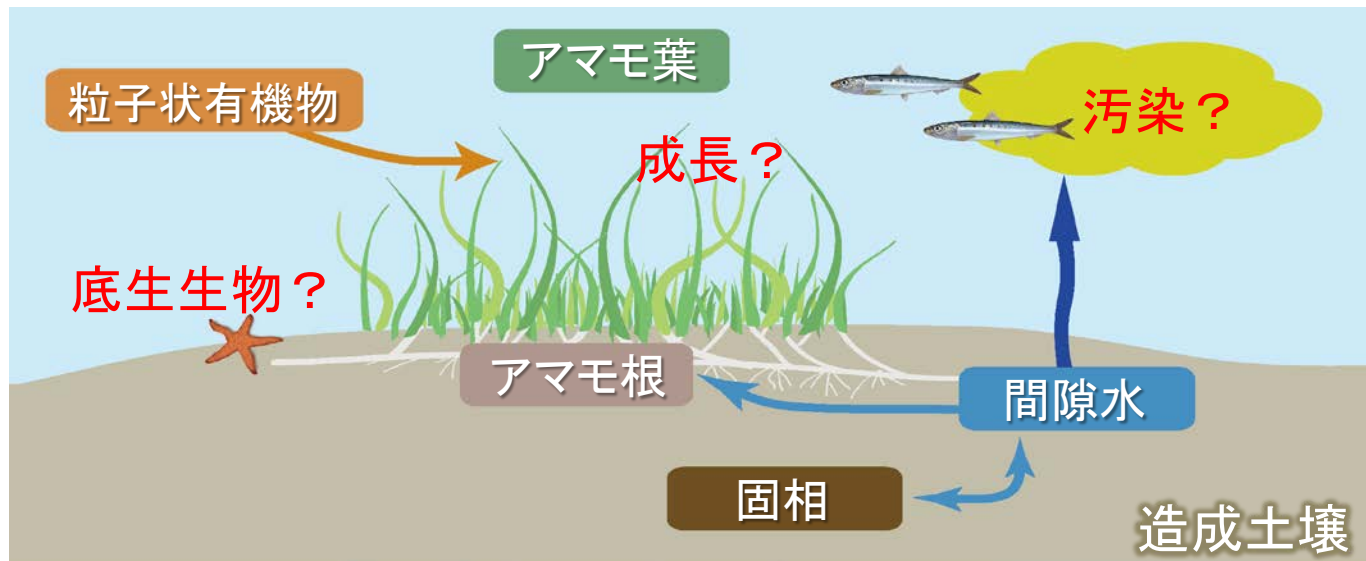
産業副産物を活用したアマモ場創生技術の課題

解決すべき課題

- ✓ 造成土壤の強度
- ✓ アマモの成長
- ✓ 底生生物群集の定着
- ✓ 底質・水質環境の汚染の懸念
- ✓ 造成アマモ場の持続性

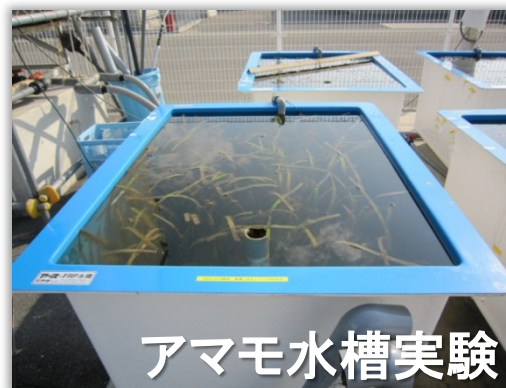
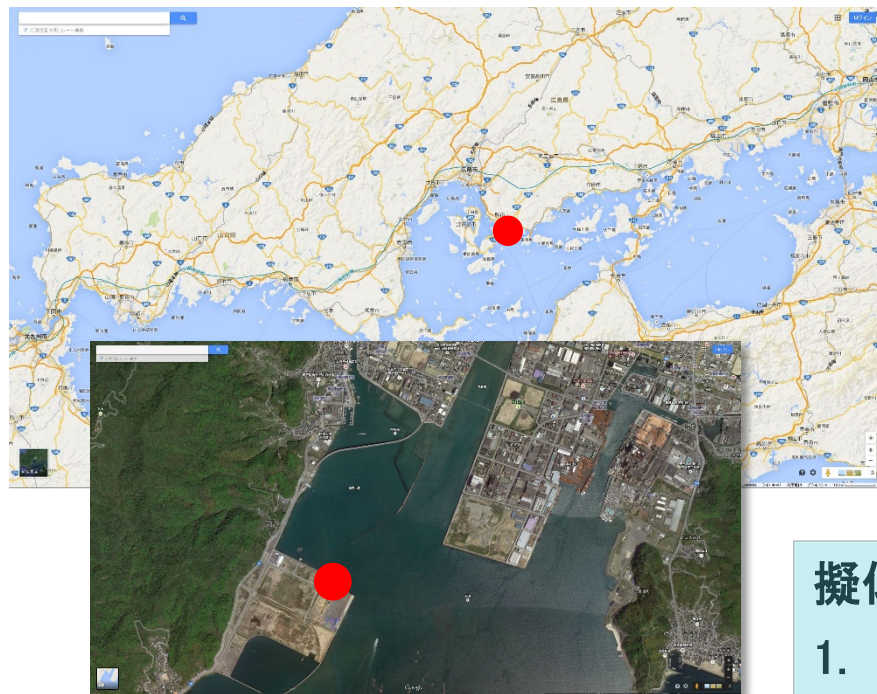


科学的な評価に基づいた
産業副産物の海域利用に対する
社会的受容性の確保



造成アマモ場における物質循環

海水かけ流し水槽を用いた擬似現場実験



産総研阿賀臨海実験場 (広島県 呉市)



擬似現場実験

1. アマモ水槽
2. 柱状コア水槽

試験混合土壌

- ・脱リンスラグ 添加率
(w%: 浚渫土に対して)
92%, 85%, 70%, 25%
- ・対照区: 天然砂

測定項目

生物

- アマモの成長
- 底生動物
- 微生物群集組成

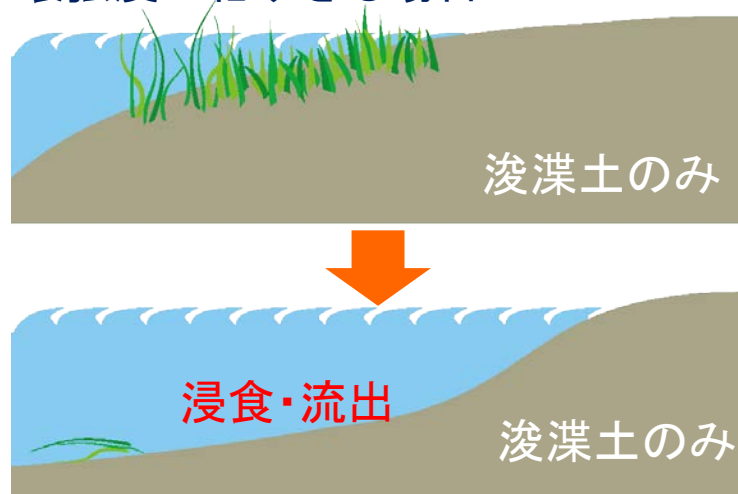
化学・物理分析

- pH、炭酸系
- 土壌強度
- 栄養塩
- 微量元素

← 周辺漁協との情報交換

造成土壌強度に対するスラグ混合の効果

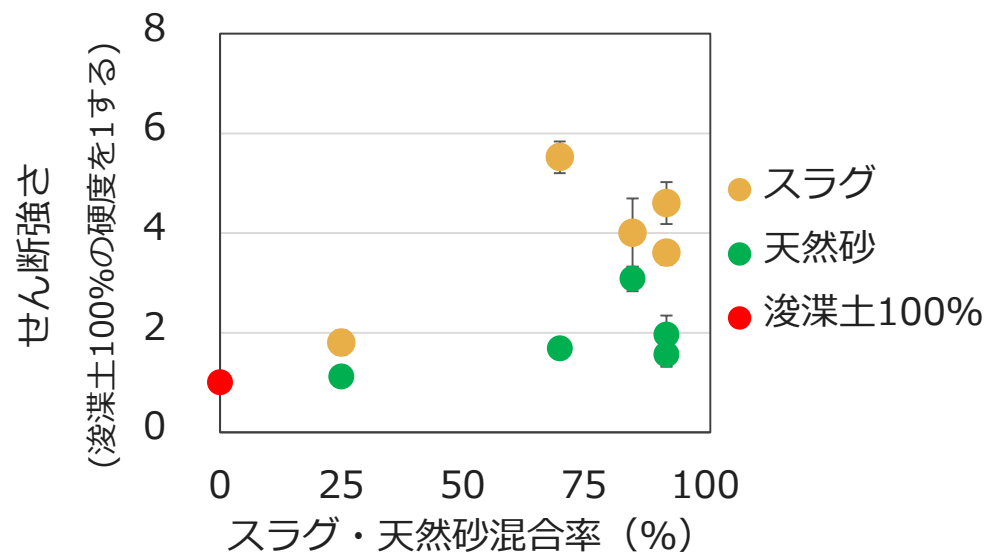
土壌強度が低すぎる場合:



土壌強度が高すぎる場合:

- ・アマモの移植が困難
- ・アマモ根の成長を阻害
- ・埋在性底生生物の移入が困難

アマモ水槽土壌のベーンせん断試験を実施



499日後のアマモ水槽土壌硬度

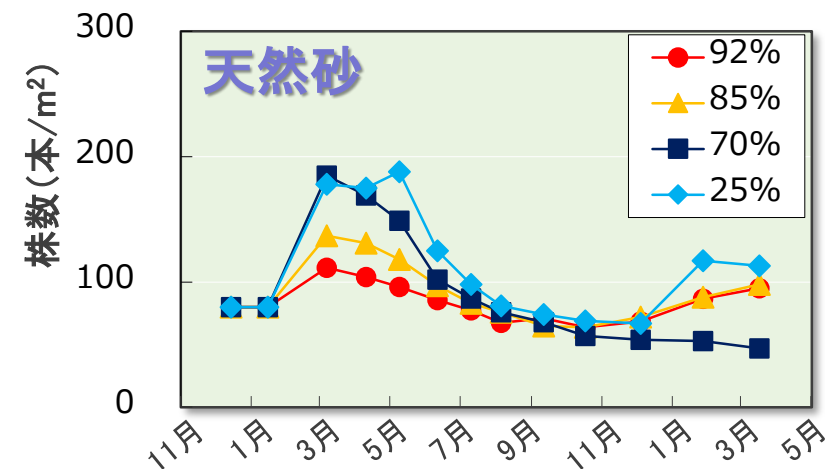
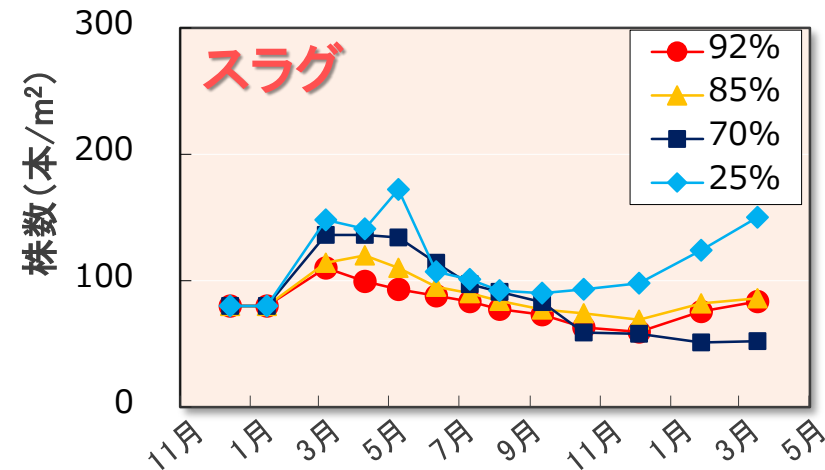
スラグとの混合により土壌強度が向上

浚渫土の1.8~5.5倍

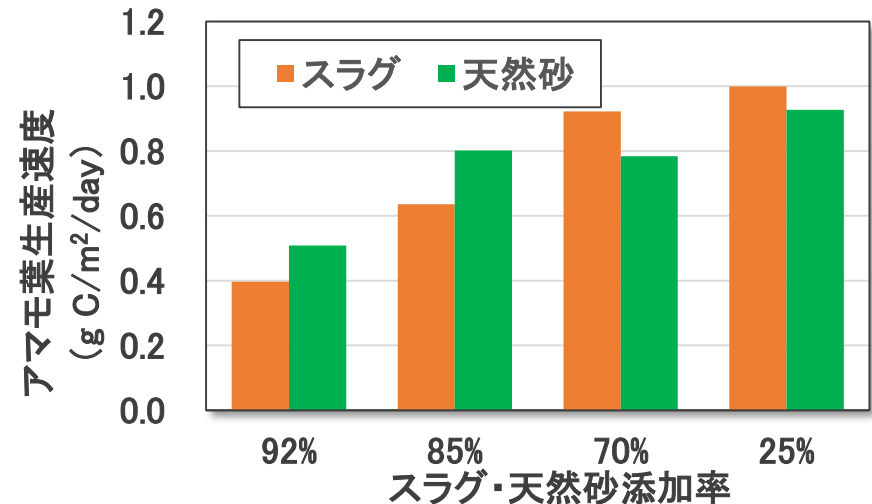
天然砂混合土壌の1.3~3.3倍

スラグの生物影響

スラグでアマモは育つのか？



アマモ株数の経時変化



アマモの一次生産速度

アマモの成長は

- ・浚渫土の混合率に依存
- ・対照区と顕著な差は認められず

スラグ造成土壌においても
アマモは順調に生育

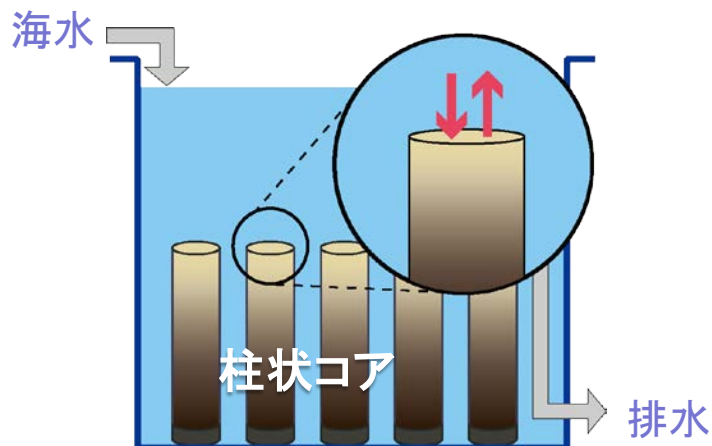


様々な生物の定着を確認

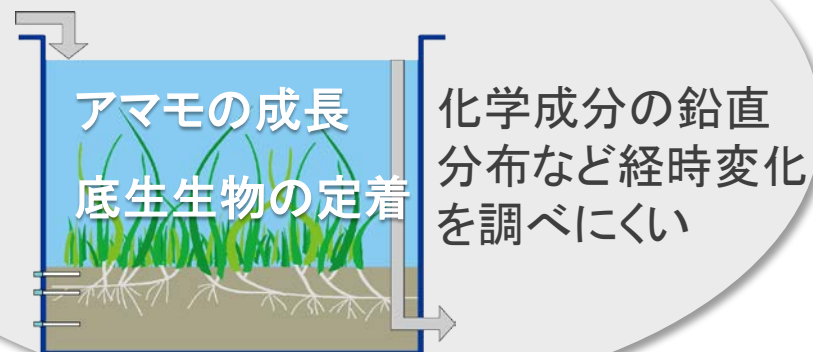
(二枚貝、軟体動物、甲殻類、棘皮動物等)

柱状コア実験

土壌内部および土壌表面－海水間の
物質循環を詳細に把握



アマモ水槽実験の場合

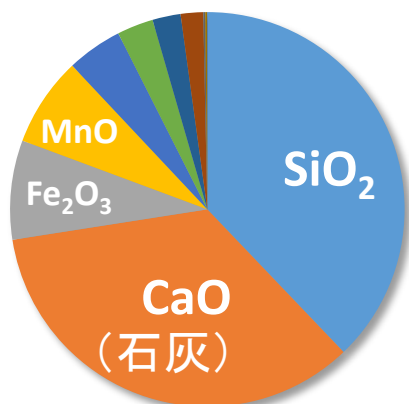
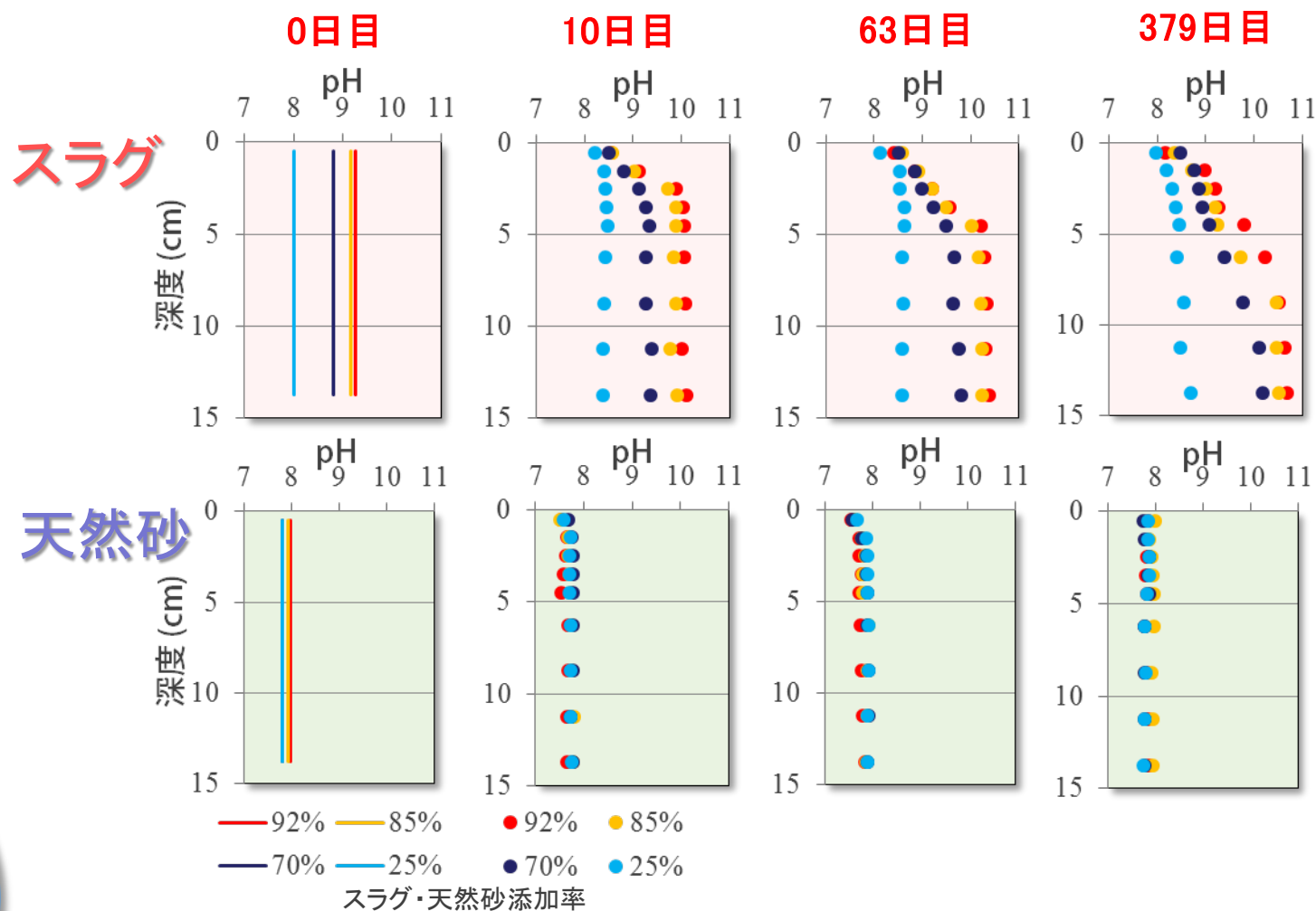
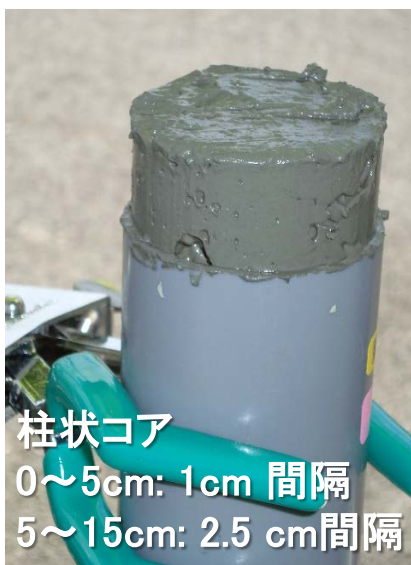


0～5 cm : 1 cm間隔でコアカット
5～17.5 cm : 2.5 cm間隔でコアカット

- | | |
|------|-------------|
| 水槽海水 | ・水温 |
| 間隙水 | ・酸化還元電位 |
| 固相 | ・pH |
| | ・全炭酸 |
| | ・アルカリ度 |
| | ・金属元素 |
| | ・有機炭素、窒素、リン |
| | ・栄養塩 |
| | ・微生物群集組成 |

鉛直分布および経時変化

底質の化学環境 土壌pHの経時変化



- スラグの主成分 (石灰) が溶出し高アルカリ化
- 表層では海水への拡散により速やかに緩和

スラグの主要元素組成

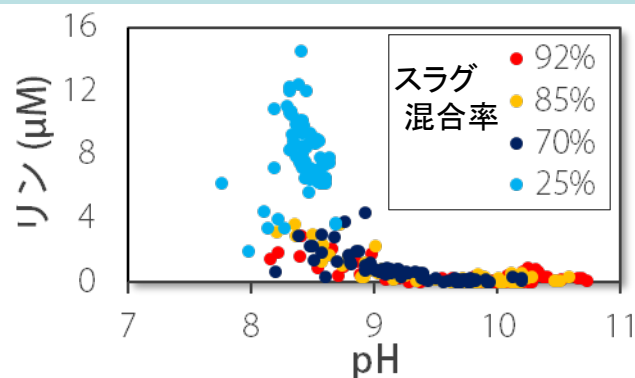
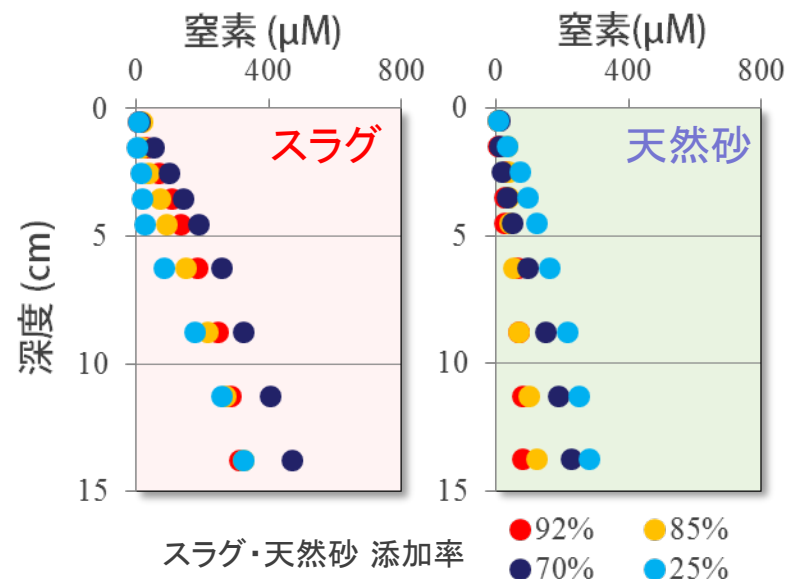
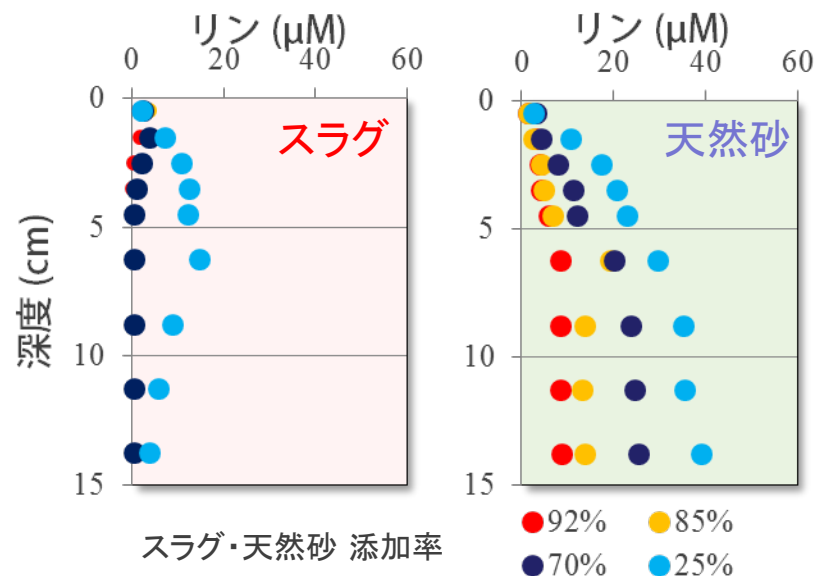
アマモ根 = 2, 3 cm深 アマモの成長阻害はみられず。

底質の化学環境 土壌間隙水の栄養塩濃度(379日後)

間隙水中のリン・窒素 = アマモの生育に不可欠な栄養塩

- リン スラグ表層：天然砂と同程度
スラグ深層：天然砂より1-2桁低濃度

- 窒素 $\text{NH}_4 \gg \text{NO}_2, \text{NO}_3$
スラグ > 天然砂 ← 微生物による代謝



2~379日後のスラグコア間隙水の
リン vs pHプロット

高アルカリ化 (深層)

⇒リン濃度の著しい低下

考えられるリンの除去プロセス

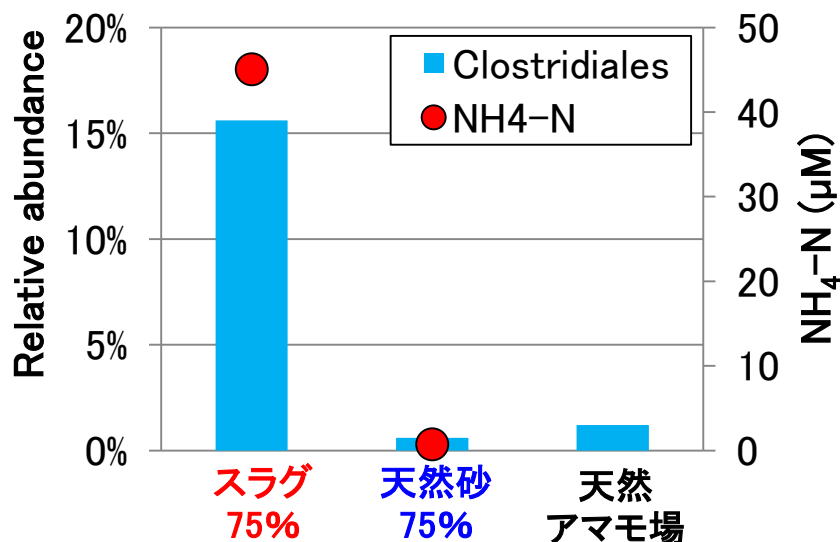
- ・ ヒドロキシアパタイト (HAP) の生成
- ・ ストラバイト (MAP) の生成
- ・ ブルサイト $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ への吸着

表層、水柱

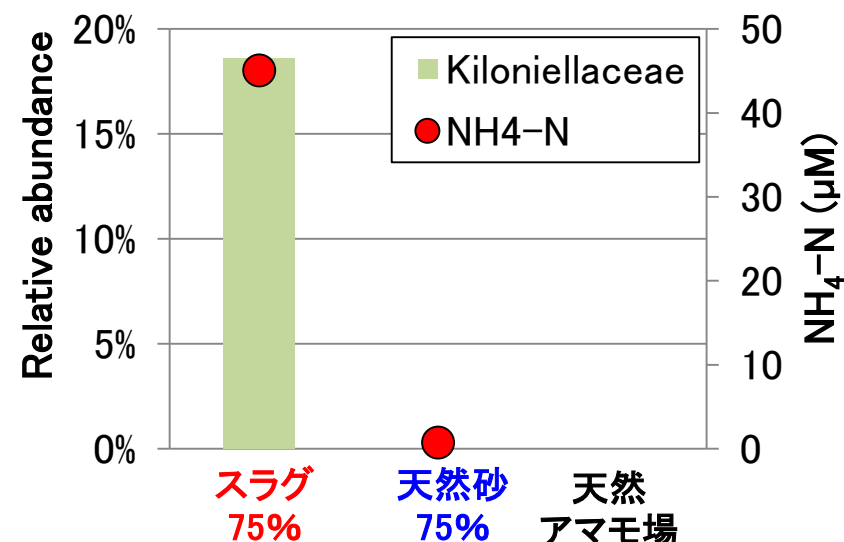
⇒アマモへのリン供給

細菌群集による窒素循環への影響:メタゲノム解析

Firmicutes_Clostridia_Clostridiales クロストリジウム目



Proteobacteria_Alphaproteobacteria_Kiloniellales キロニエラ目



メタゲノム解析結果

細菌群集組成が変化

Clostridiales = 嫌氣的分解
⇒ 有機物(タンパク質など) → NH₃

Kiloniellales = 硝酸還元活性
⇒ 有機物 + NO₃ → CO₂ + NH₃



間隙水の化学分析結果

NH₄-N(アンモニア)増加

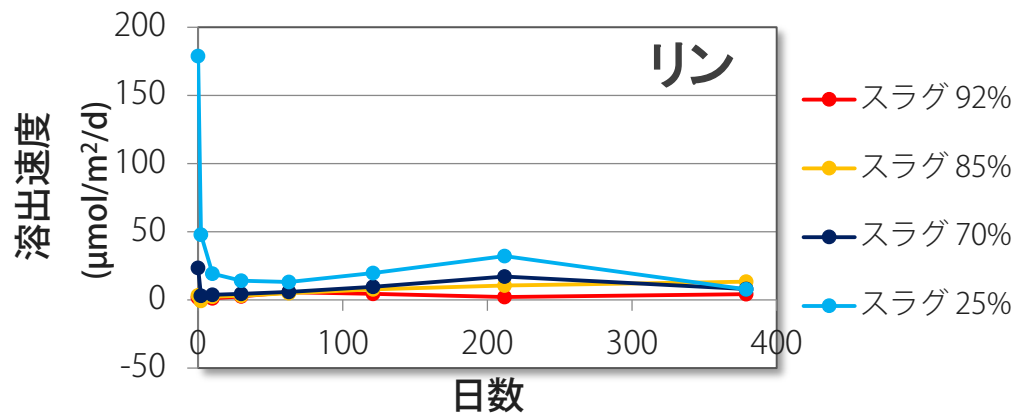
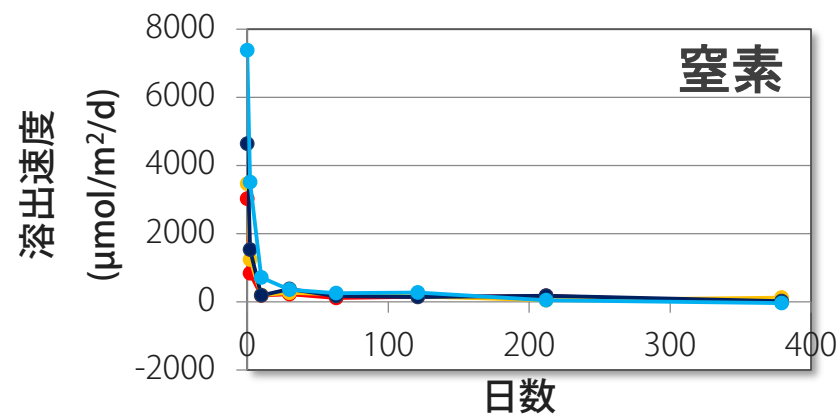
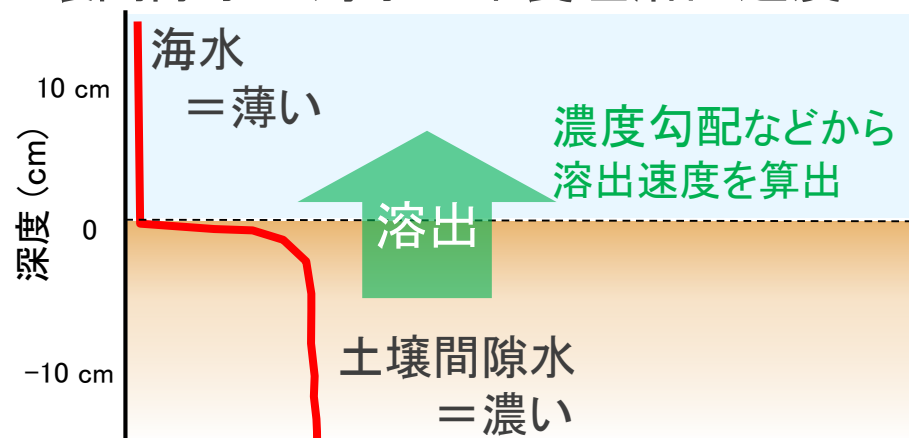
細菌群集の代謝による物質フローの変化

周辺環境（水質）への影響評価 海水への栄養塩溶出

水質悪化？



土壌間隙水→海水の栄養塩溶出速度

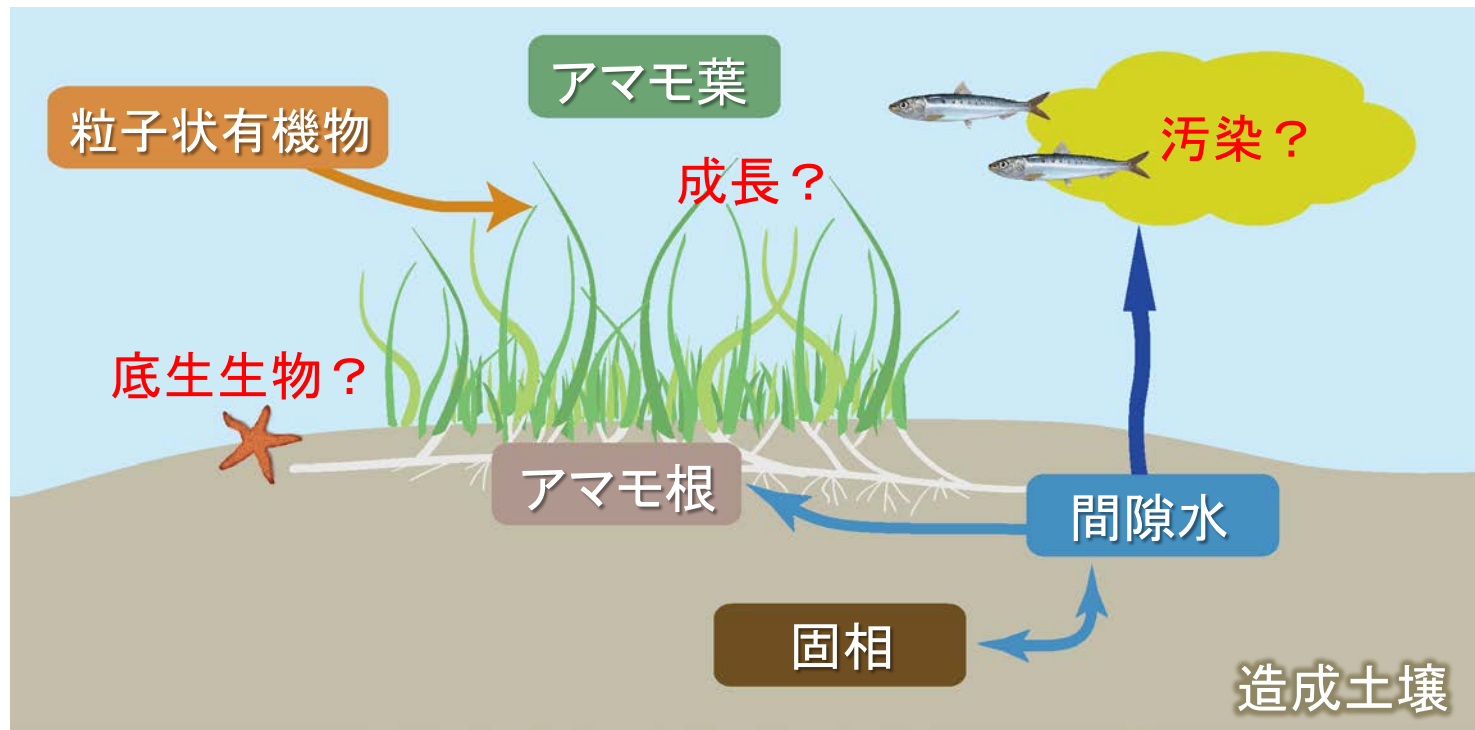


スラグ混合土壌から海水への栄養塩溶出速度の経時変化

- ・天然の沿岸海域で報告されている溶出速度の範囲内
- ・1年以上経過後も混合土壌内には栄養塩の大部分 (窒素97%, リン99%) が残存

⇒ 水質悪化を引き起こすことなく長期的にアマモの生育を支える施肥機能

スラグ造成アマモ場における物質循環



- アマモの成長
- 底生生物群集の定着
- 底質・水質環境の汚染
- 造成アマモ場の持続性

順調に成長
 様々な底生生物が定着
 汚染なし 栄養塩の溶出は天然海域の範囲内
 アマモに対して100年の施肥ポテンシャル

- 粒子状有機物のトラップ
- 土壌強度の向上

栄養塩と炭素を効率的に堆積
 ➡ 造成アマモ場の持続性 + 水質浄化 + CO₂吸収 (Blue Carbon)
 海岸浸食の低減
 ➡ 国土強靱化(被災藻場復興)、島嶼諸国支援

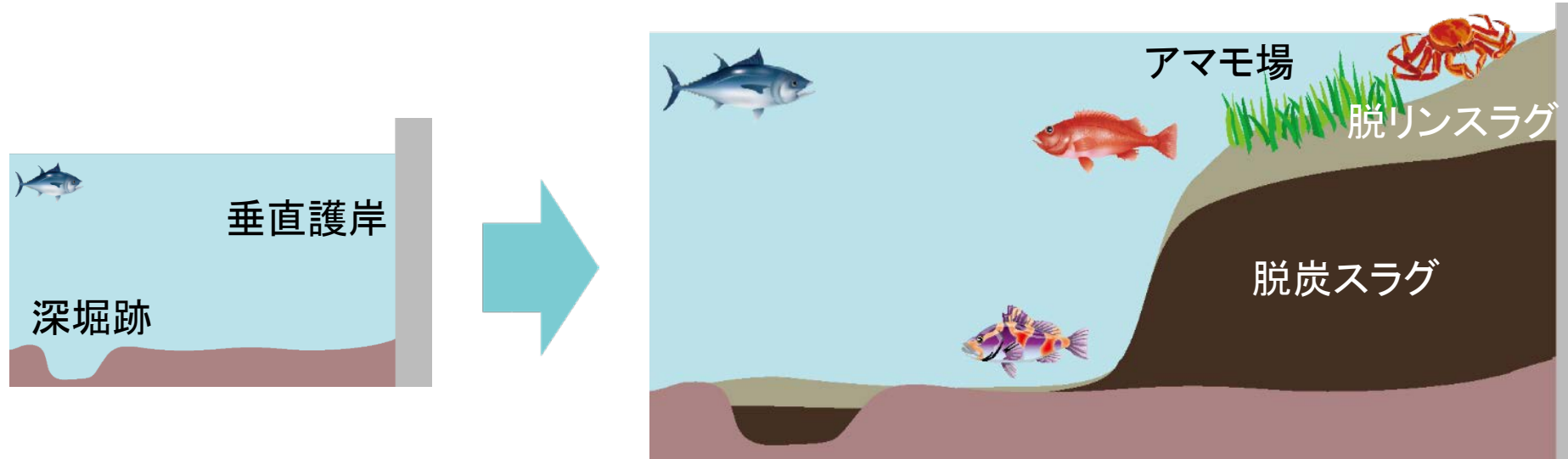
産業副産物を活用した土壌によるアマモ場創生技術の評価をおこなった。

- ・脱リンスラグ×浚渫土 ➡アマモ場造成土壌
順調なアマモの生育
多様な底生生物の定着
底質・水質への汚染なし
高い施肥ポテンシャル 造成アマモ場の持続性に期待
土壌強度向上

- ・脱炭スラグ×浚渫土
高アルカリ化
過度な土壌強度の増加



今後の検討課題： 材料により特性や影響が異なる
⇒ 個別の評価が重要、材料に適した利用法の検討



脱リンスラグ＋浚渫土：**アマモ場造成土壌**

周辺環境への影響が少ない。

アマモへの長期間の施肥効果をもつ。

脱炭スラグ＋浚渫土：**浅場造成基盤土壌**

より大量の需要に対応可能（供給とのバランス）。

浚渫土の軟弱性の改善効果が高い。

ご清聴ありがとうございました

