

# 平塚新港へ海の肥料施肥報告書

(海の肥料の開発と海藻育成効果)

(研究期間：2024年11月22日～2025年3月31日)

2025年3月

工学院大学先進工学部環境化学科

金 熙濬 特任教授

株式会社不動テトラ

青田 徹

## 研究要約

本研究では、年間約 2000 万トン発生する下水汚泥からリンを回収し、貧栄養化が進む海域で使える海の肥料を開発した。この肥料は海藻の成長に必要なリン (P) とケイ素 (Si) を供給し、一度の施肥で数ヶ月から数年間効果が持続する。実験室レベルの研究で数グラムから数十グラム規模の肥料を開発し、キログラム単位の製造技術を確立した後、トン規模の肥料を製造。平塚市の新港で施肥し、ワカメの養殖や港周辺の海藻の成長を観察した結果、肥料の有効性を確認した。

最終目標は、海藻の成長による CO<sub>2</sub> の吸収促進と、ワカメや昆布などの海藻類の生産向上を通じて、脱炭素社会の実現と漁村地域の所得向上に貢献すること。今後も実証実験を続け、有効性をさらに検証する予定である。

## 1. 研究の背景

### 1. 1 リンの重要性と枯渇問題

リンは、植物や動物の栄養素としてだけでなく、産業用途においても必要不可欠な元素である。具体的には、農業用化学肥料として植物の開花や結実を促す役割を果たすほか、人体を構成する DNA や骨の主要成分としても重要な働きを担っている。さらに近年では、界面活性剤や金属処理など、多様な産業分野で利用されており、我々の生活に深く結びついている。例えば、人間の骨はリン酸カルシウムで構成されており、細胞内でリンの受け渡しが行われることでエネルギーが生成され、身体を動かすことが可能となっている。また、食糧生産においても、リンは窒素やカリウムと並び、化学肥料の主成分として世界中で広く使用されている。農林水産省によると、世界的な人口増加や食生活の変化に伴う穀物需要の増大を背景に、リンの需要は年々増加している。さらに、バイオ燃料向けの穀物増産や鉱山事故などの要因も重なり合って、リンの供給がひっ迫し、価格高騰を引き起こしている。

国連環境計画（UNEP）は、世界のリン循環が破綻していると指摘している。作物の収量増加を目的として合成肥料が過剰に使用された結果、湖や川、沿岸域の富栄養化が進行している一方で、農家が十分な量のリンを利

用できない地域も存在する。このような状況を踏まえ、UNEP は、リンのリサイクルを推進し、すべての人々に十分な食糧を確保する必要性を強調している。このように、リンの安定供給が困難となっている背景には、需要の急増、供給のひっ迫、環境問題など、複数の要因が絡み合っている。

## 1. 2 海洋における貧栄養化問題と原因

近年、日本各地で「磯焼け」と呼ばれる現象が深刻化している。磯焼けは、浅海の岩礁や転石域において、海藻の群落（藻場）が季節的な消長や経年変化の範囲を超えて著しく衰退または消失し、貧植生状態となる現象です。この現象は、沿岸生態系や漁業に大きな影響を及ぼしている。

磯焼けの発生原因は多岐にわたりますが、主な要因として以下の点が挙げられる。

あ) ウニや食植生魚類の食害：ウニや一部の魚類が海藻を過剰に摂食することで、藻場が回復できなくなることがある。特にウニは、海藻を食べ尽くした後もその場に留まり、新たな海藻の成長を妨げることが問題となっている。

い) 地球温暖化による海水温の上昇；地球温暖化に伴い、海水温が上昇することで、海藻の生育に適した環境が失われることがある。特に、冷た

い水を好む海藻種にとっては、水温上昇が直接的なストレスとなっている。

う) 必須元素の濃度低下；海水中のリン、窒素、ケイ素、鉄などの必須元素の濃度が低下すると、海藻の成長が阻害される。これらの元素は海藻の光合成や成長に不可欠であり、その不足は藻場の衰退を引き起こす。

**磯焼けが発生すると、以下のような影響が生じる。**

あ) 磯根資源の減少；藻場は魚介類の重要な生息場所であり、その衰退は磯根資源（沿岸に生息する魚介類）の減少を招く。

い) 漁獲量の減少；藻場が消失すると、魚介類の生育環境が悪化し、漁獲量が減少する。これにより、沿岸漁業に大きな打撃を与える。

う) 生態系のバランスの崩壊；藻場は沿岸生態系の基盤であり、その消失は食物連鎖や生物多様性に深刻な影響を及ぼす。

磯焼けからの回復には長い年月を要する。回復期間は、各海域の地形や海洋学的特性、生物の種組成、沿岸の利用・開発の歴史や現状などによって異なる。例えば、ウニの過剰摂食が原因の場合、ウニの密度を適切に管理することで回復が可能ですが、地球温暖化や海水の栄養塩不足が原因

の場合、根本的な環境改善が求められるため、回復にはさらに長い時間がかかることが予想される。

磯焼け対策としては、以下のような取り組みが行われている。

あ) ウニの除去や密度管理；ウニの過剰摂食が原因の場合、ウニを除去して、密度を管理することで藻場の回復を待つ。

い) 栄養塩の供給：海水中の栄養塩濃度が低下している場合、人工的に栄養塩を供給する。

え) 水温上昇への適応海藻種選定：地球温暖化による水温上昇に対応するため、耐温性の高い海藻種の導入や、新しい生態系の構築する。

磯焼けは、沿岸生態系や漁業にとって深刻な問題であり、その解決には科学的なアプローチと地域社会の協力が不可欠である。

### 1. 3 研究の目標

年間約 2000 万トン発生する下水汚泥を有効に利用する方法として、下水汚泥を燃焼（焼却）バイオマスエネルギーとして利用し、その際に発生する約 30 万トンの汚泥焼却灰から重金属を除去しながらリンを回収して、貧栄養化されている海で肥料として利用する海の肥料を開発する。

## 2. 海の肥料の製造と溶出評価

リン回収後の残渣と回収リンに添加剤を添加して、海の肥料を製造した。条件によってリンの溶解率を制御できることが確認された。リン溶出実験は、海の肥料を人工海水で溶出実験を行った。Fig.7 から Fig.10 まで、各条件におけるリン溶出濃度と溶出率の経時変化を示す。細かい実験条件の説明は省略する。

Fig.7 で示す Case1 は高濃度のリンを放出する目的で開発された海の肥料であり、海の平均リン濃度が 20~100ppb であることを考えると、高濃度の溶出量 (800ppm) は 8000~40000 倍も高い。低濃度の溶出量の場合 (100ppm) でも 1000~5000 倍である。一方、Fig.9 で示す Case2 は低濃度のリンを放出する目的で開発された海の肥料であり、海の平均リン濃度が 20~100ppb であることを考えると、高濃度の溶出量 (10ppm) は 100~500 倍も高い。低濃度の溶出量の場合 (2ppm) では 20~100 倍である。海の肥料の使用場所や条件、目的に応じてリン溶出濃度を調節する必要があるため、海の肥料の製造条件を変更することで、その要望に応えることができる。

## 3. 海の肥料の実装実験実施計画

平塚新港において、2024 年 12 月から「海の肥料」の実装実験が行われることになった。本実験では、工学院大学の金が開発した「海の肥料」を使用し、株式会社不動テトラの海洋環境への適用技術を活用して、環境との共生効果を検証

することを目的とした。この目的のため、平塚新港でフィールド実験を実施した。

### 3. 1 使用資機材

小石と海の肥料  
を7:3の比率で網  
に入れ、Fig.1に示  
すような「肥料セッ  
ト」を作成し、設置



Fig.1 海の肥料イメージ

場所に沈める。この (参考：<https://www.kyowa-inc.co.jp/products/542/>)

ような形状のセットは、海洋や河川で多くの採用実績がある製品である。以下の  
特長を持つ。

1. 生物に多様な生息環境を提供できる。
2. 今回の実験では中詰め材には小石を使用することで漁業関連方への馴染みやすい環境を作る。

### 3. 2 海の肥料の製造

使用してるリンは汚泥灰から回収して製造したもので、国の肥料検定を受けている（生第89750号）。このリン成分と粘土（A市産）を使用して海洋用の肥料を製造した。



形状は四角型土管であり、Fig.2～5 に示す。形状は海水との面積を増やすことと、空洞で魚などの生き物の住み家を提供することを目的にした。



Fig.2 「海の肥料」全景

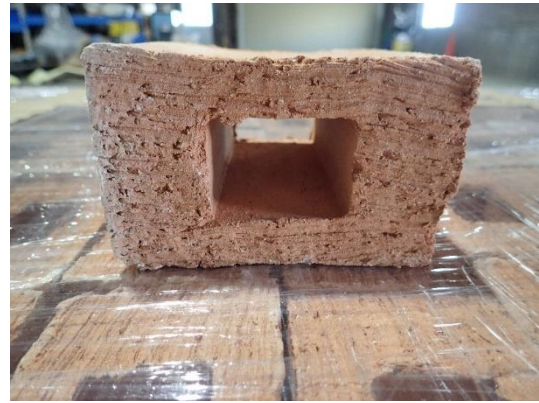


Fig.3 「海の肥料」正面（貫通孔）

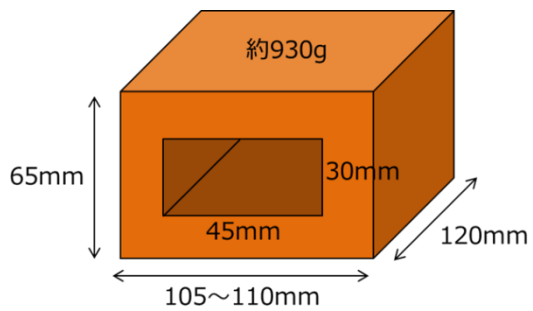


Fig. 4 「海の肥料」形状寸法



Fig.5 「海の肥料」荷姿

### 3. 3 事前調査

平塚新港事前調査場所実海域試験の実施場所を選定するために事前調査を実施した。

外洋からの波浪の影響を受けにくい場所であり、また平塚市漁業協同組合か

らの助言を参考として、平塚新港の調査場所①、②、③の3箇所を候補地として選定した。

- ・ 調査箇所①：岸壁と浮棧橋との間：西側岸壁を中心に実験場所 B の反対側
- ・ 調査箇所②：西側岸壁の一角：実験場所 B
- ・ 調査箇所③：東側岸壁の一角：実験場所 A

### 3. 4 調査結果

2024年11月15日（水）に実施した。天候は曇り。各調査箇所の状況を Fig. 6～11 に示す。

底質は、調査箇所①が泥質、②と③は泥質に加え一部に砂・石・岩が散見された。太陽光の入射状況は、当日の天候が曇りである影響もあり、①が最も薄暗く、②と③は同程度であるが、南向きの②が好条件であると思われた。

海藻類は、季節的に着生が少ない時期ではあるが、大型海藻は着生が確認できなかった。海底の捨石上にはウミウチワと思われる枯死後の断片が確認された。また、岸壁に海藻に対する食害の主犯であるウニ類（ムラサキウニなど）の生息が確認された。



Fig.6 調査箇所①状況



Fig.7 調査箇所①状況



Fig.8 調査箇所②状況



Fig.9 調査箇所②状況



Fig.10 調査箇所③状況



Fig.11 調査箇所③状況

#### 4. 海の肥料の設置

事前調査の結果を基に、各種海藻類の生態や成育環境に配慮し、「海の肥料」による海藻類への生長促進効果と海洋環境への適用性の確認を目的として本実験を計画する。各種実験で使用する資機材や海藻類の内容や設置方法については、本実海域実験に関係する平塚市漁業協同組合（作業船舶への配慮等）、平塚市農水産課（護岸維持管理メンテナンスの作業範囲外）および平塚市産業振興課に確認いただき、了解を得た後に確定事項とする。

##### 5. 1 設置場所

### (1) 実験場所 A

護岸から 2m 以上離して実験区域を設定する (Fig. 12)。

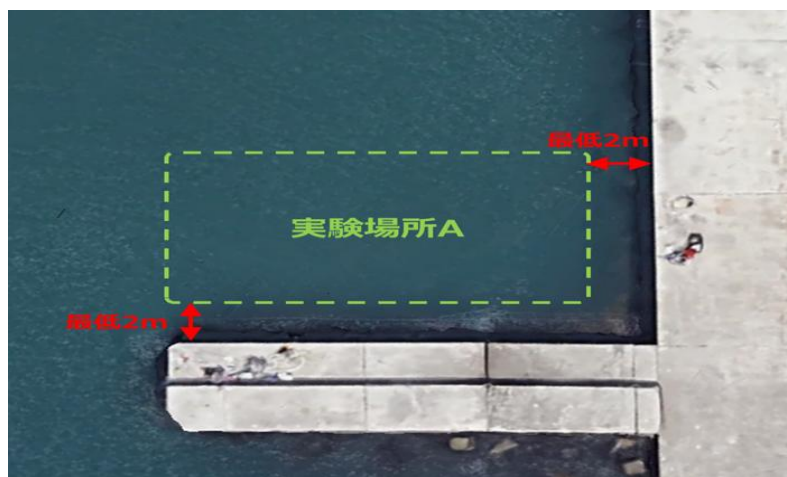


Fig. 12 実験場所 A

### (2) 実験場所 B

実験場所 A と同様に護岸から 2m 以上離して実験区域を B-1 として設定する (Fig. 13)。また、平塚市漁協が実施中の海藻 (カジメ) 育成施設が設置されており、この施設を利用した実験区域を B-2 とする。

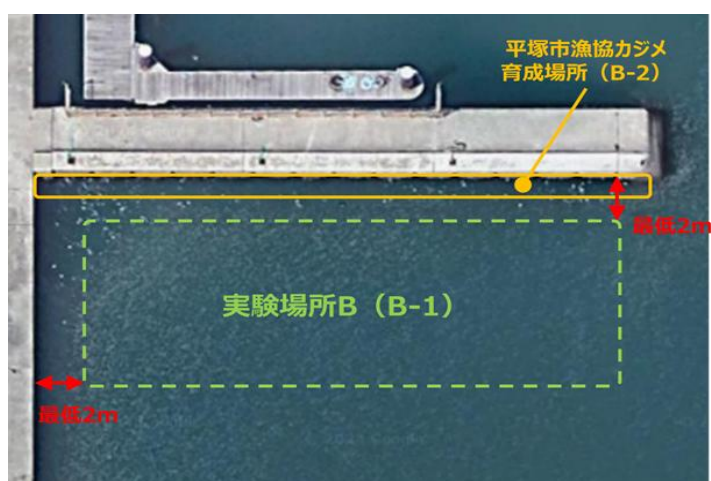


Fig. 13 実験場所 B

## 5. 2 海藻の付着・成長用の土台（試験体）

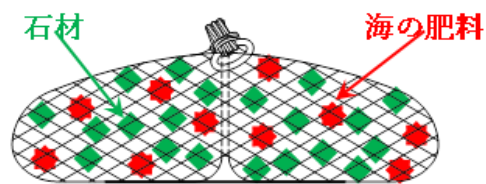
網袋に「海の肥料」と石材を詰めて「試験体」として使用する（Fig.14）。

網袋は、キョーワ株式会社の製品であるフィルターユニットの 50kg 用特注品であり、目合は 25mm である。

石材は、網袋の目合から出ない寸法として粒径 5cm～20cm 程度を予定する。

現地では作業員の人力により運搬や設置など取り扱う予定であるため、「試験体」の重量を 30kg 未満/袋にする予定である。

「試験体」における「海の肥料」と「石材」の割合は 3:7 とする予定である。



海藻の付着・成長土台（石材+海の肥料：約 50kg 用、目合 25mm）

Fig. 14 海の肥料入り試験体

1. 肥料と石材の比率は 3:7 とする。
2. 重さは約 30kg とする。

## 5. 3 海藻種類の選定および準備

事前調査にて大型海藻類の着生およびその痕跡が確認されなかったことから、それらの天然加入による着生が期待できない。

そこで、平塚市漁協からカジメ、ワカメ、アカモク、コンブ種苗の入手の可能

性があるとの助言をいただき、これらの海藻類を使用した実験を検討する。

#### 5. 4 平塚新港における「海の肥料」設置（施肥）

「海の肥料」を使用し、環境との共生効果を検証することを目的として、神奈川県平塚市の平塚新港（Fig.15）を実施場所とし、実海域に海の肥料をせっちすることにした。天気の関係で2週間程度遅れて2025年1月22日、23日に海の肥料の見地設置実験（潜水作業員3名、陸作業員1名）を実施した。

#### 5. 5 海の肥料の施肥と結果

計画を一部変更し、海藻種苗は、計画したアカモク、ワカメにカジメを加え、3種類の海藻を使用した。中層ロープは上記の全3種を、海の肥料への直接取付はアカモクとカジメを用いた。

土嚢および試験体は、岸壁から4m程度の距離を離れた範囲に設置することとし、それらの間隔を約2mとした。

#### 実験場所 A

試験体および海藻種苗などの設置後の状況を Fig.15~25 に示す。



Fig. 15 実験場所 A の水面状況



Fig. 16 中層ロープ (ワカメ)

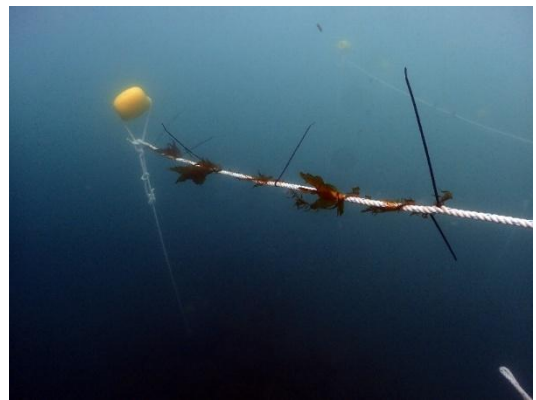


Fig. 17 中層ロープ (ワカメ)

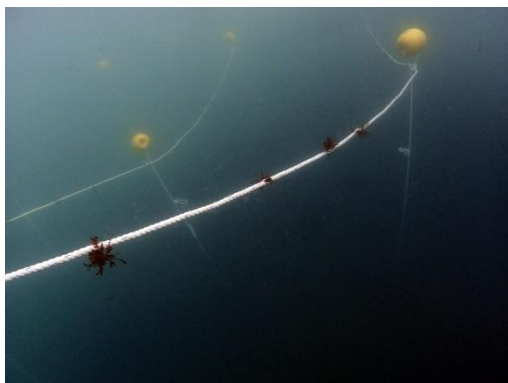


Fig. 18 中層ロープ (アカモク)

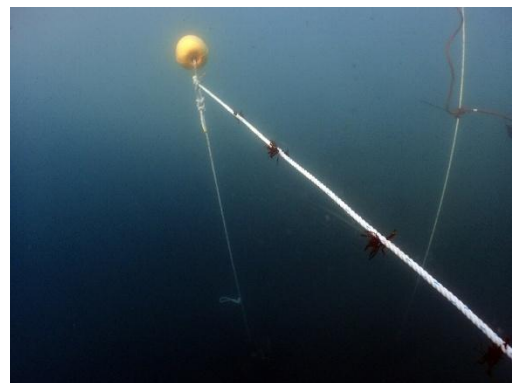


Fig. 19 中層ロープ (アカモク)



Fig. 20 中層ロープ (カジメ)



Fig. 21 中層ロープ (カジメ)



Fig. 22 試験体へ直接取付 (アカモク)



Fig. 23 試験体へ直接取付 (アカモク)



Fig. 24 試験体へ直接取付 (カジメ)



Fig. 25 試験体へ直接取付 (カジメ)

(1) 実験場所 B

試験体および海藻種苗などの設置後の状況を Fig. 26～38 に示す。





Fig. 26 実験場所 B の水面状況



Fig. 27 中層ロープ (ワカメ)

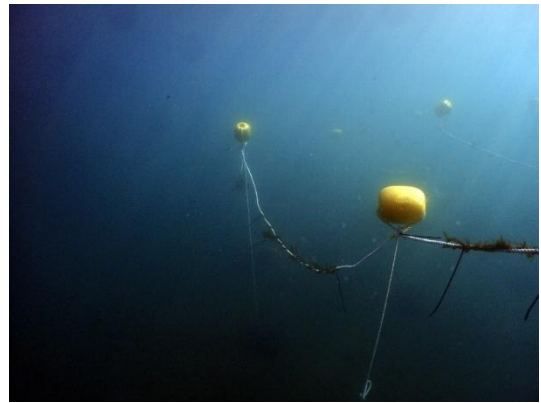


Fig. 28 中層ロープ (ワカメ)

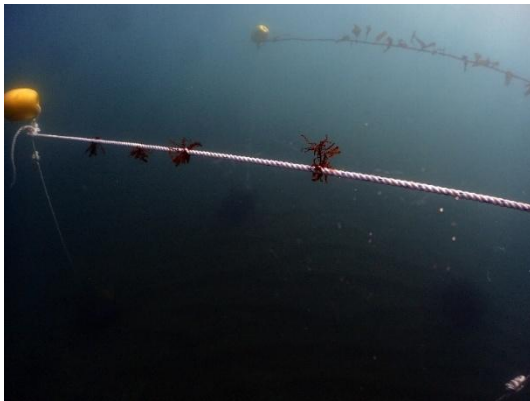


Fig. 29 中層ロープ (アカモク)

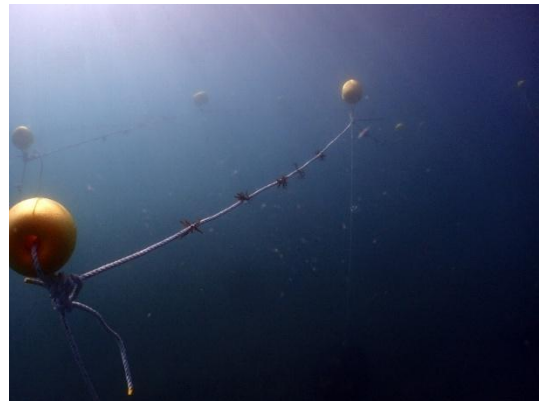


Fig. 30 中層ロープ (アカモク)

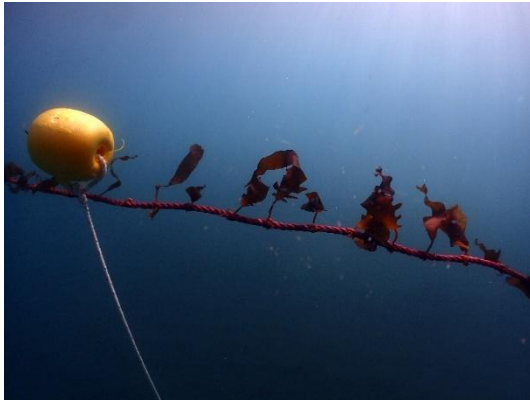


Fig. 31 中層ロープ (カジメ)

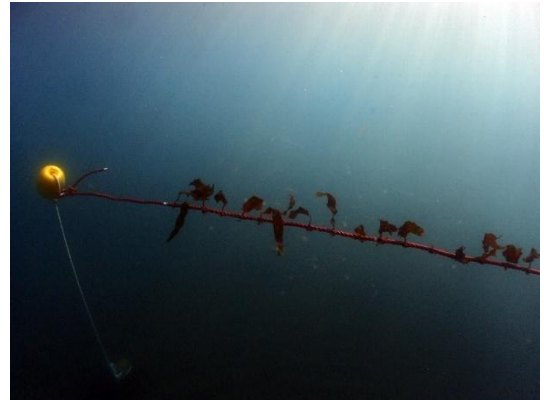


Fig. 32 中層ロープ (カジメ)



Fig. 33 試験体へ直接取付 (アカモク)



Fig. 34 試験体へ直接取付 (アカモク)



Fig. 35 試験体へ直接取付 (カジメ)



Fig. 36 試験体へ直接取付 (カジメ)

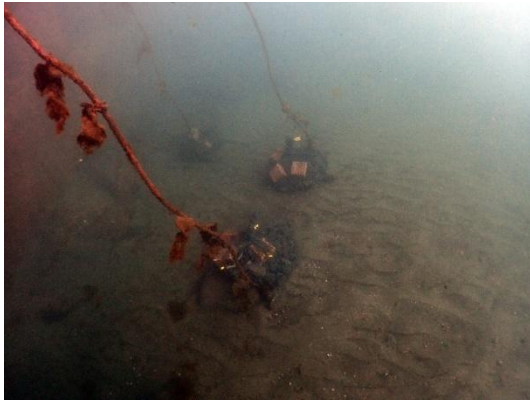


Fig. 37 漁協さん土嚢付近への設置



Fig. 38 漁協さん土嚢付近への設置

## 5. 6 第1回モニタリング調査結果

アカモクやカジメは食漁が食べていることが観察結果分かった。食漁が食べ形跡が見られた。それを Fig.39 に示す。一部食害がないところでは Fig.40 と Fig.41 のように順調な成長が見られた。また、海の肥料を設置した B サイトから流れる海流がぶつかる護岸では今までなかった海藻類の成長がみられた (Fig. 42)。さらに、Fig. 39 や Fig. 43 で見られるように食害がない珪藻類が大量に発生して成長していることも観察された。これらの結果から海の肥料の施肥効果見られたと判断する。



Fig. 39 食べられ茎だけ残る個体多い



Fig. 40 食害なかったワカメの成長



Fig. 41 食害なかったワカメの成長長

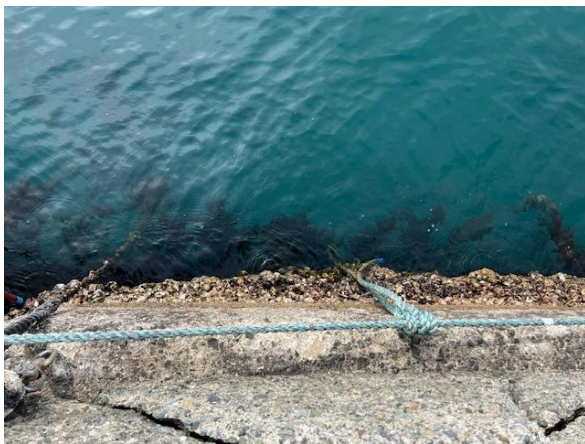


Fig42 護岸 (B-2) での海藻成長 (ワカメ)



Fig. 43 珪藻の成長

## 6. 今後の展望

2年目の実験を継続して行い、生産された海藻を基に以下の取り組みを行います。

1. 生産された海藻からの CO2 固定量の算出
2. 藻場の再建への貢献
3. 海の肥料を用いた藻場の再建時の効果についての説明会の開催

具体的な効果は以下の通りです：

- 海の植林による CO2 削減（ブルーカーボン）
- 海の貧栄養化の解決（海の砂漠化防止）による海の生態環境の改善
- 漁村の所得増大と雇用機会の提供

## 参考：2025年2月22日行った見学会

海の肥料が設置されてる側と、海の肥料が設置されていない側における海藻成長の観察を行った。その結果、海藻に成長差が確実に見られた。2月22日には平塚漁業協同組合の行事に参加して、本事業について市民向けの説明会を行った。まだ、分かりやすい現場 (Fig.44~46) があったので見学を行った。その様子を Fig.47 に示す。

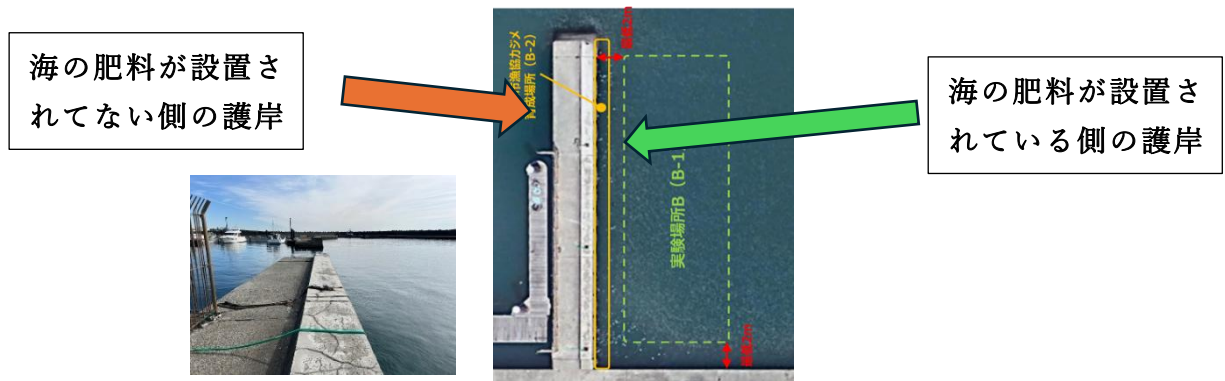


Fig.44 観察護岸



Fig.45 海の肥料が設置されていない護岸側の海藻類



Fig.46 海の肥料が設置されている護岸側の海藻類



Fig.47 見学の様子