

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04713

研究課題名(和文) 浅海域の貧栄養化解消を目的とした海底耕耘の定量的効果検証

研究課題名(英文) Estimation of the quantitative effect of sea cultivation aimed at disappearance of nutritional insufficiency at shallow water area

研究代表者

柳川 竜一 (Yanagawa, Ryoichi)

香川高等専門学校・建設環境工学科・准教授

研究者番号：70649095

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：実施困難な時期や実施方法で様々な模索を行ったが、現地実験は計6回実施し、耕耘活動による定性的な水質変化を捉えることが出来た。具体的には、中底層水のアンモニア濃度上昇を捉えたが、濃度上昇した水塊が移流・拡散で表層に迄届くに至らなかった。海域規模に対して耕耘範囲・強度が不十分であった事と鉛直混合が十分でない時期での実施が影響したと考えられた。硝酸や亜硝酸塩については溶出の明らかな傾向を捉えるに至っておらず、現地実験による定量的な耕耘効果を明らかにするのは困難と考えられた。一方、底質・水質サンプリングによる室内での強制混合実験の手法開発と実施に着手しており、今後も継続した活動を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物の基礎生産に必要な窒素・リン濃度が枯渇している海域でのノリ養殖事業を実現するため、水中栄養塩濃度の上昇を目的とした海底耕耘は、既存の栄養塩に富んだ底質を利用するという視点がこれまでに無かったこと、また海域生態系の物質循環機能を高める事も期待され、事業化に向けての社会的意義は高いと考えている。一方、本検討内では実施規模の小ささや定量的な効果を把握するに至らず、完了後も活動を継続して実用化に向けた取り組みを進めることとしたい。

研究成果の概要(英文)：Field experiments were conducted a total of six times and qualitative water quality changes due to cultivating activities could be captured. Specifically, an increase in ammonia concentration in the middle and bottom waters was detected, but the water mass with increased concentration did not reach to the surface layer by advection and diffusion. This was considered to be due to the fact that the extent and intensity of cultivating was insufficient for the size of the sea area, and that the cultivating was carried out at a time when vertical mixing was not sufficient. No clear trends in nitrate or nitrite elution could be detected, and it was considered difficult to clarify the quantitative cultivating effect in the field experiments. On the other hand, the development and implementation of an indoor forced-mixing experiment using sediment and water quality sampling has been initiated and will continue to be carried out in the future.

研究分野：沿岸生態系工学

キーワード：海底耕耘 無機態窒素 貧栄養化

### 1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に富栄養化した閉鎖性海域は、度重なる排水規制や高度処理に対応した下水処理場整備の充実によって水中の栄養塩レベルが年々低下傾向にあり、透明度の増加や赤潮発生件数は減少傾向にあるなど水質の清浄化は進んだ。その一方、海藻の生育不良や魚類・甲殻類・貝類の不漁といった我々人間生活にとって水産資源の劣化が顕在化している。農林水産省の漁業・養殖業生産統計年報によると、瀬戸内海区の海面漁業漁獲量は、1980-85年頃の50万トンレベルから年を追う毎に漸減しており、2017年は15万トン程度と、1/3程度まで落ち込んでいる。この原因の一つとして、申請者らは水質の清浄化に伴う栄養塩の不足問題が影響していると考えている。海藻ノリに注目すると、香川県漁連はノリ養殖期にあたる10月～2月に植物の基礎生産に必要な3態窒素(無機態窒素)濃度の調査を継続実施しており、それによると年明け以降は養殖海域で十分な栄養塩濃度を維持できず品質の低下したいわゆる「色落ちしたノリ」が市場に出回る。魚類はプランクトンを捕食することで成長するが、植物プランクトン増殖に必要な無機態栄養塩が枯渇した状態では基礎生産が十分に行われず、赤潮が発生するどころかプランクトン捕食者にとっての餌生物が十分に確保できない。現状は、高次の水生動物成長に歯止めがかかってしまっている(物質循環の停滞、栄養塩の偏り)のが現在の海の状況と言えるのではないだろうか?SDGsの目標14に「海の豊かさを守る」が掲げられている様に、貧栄養化問題の解消による沿岸生態系修復は喫緊の課題であると考えられる。

一方、かつて富栄養化した海域の海底付近には高濃度の有機物や栄養塩が蓄積されており、なかでも窪地のような水塊移動が制限される場所では環境悪化が危惧され埋戻しなどが進められている。現在の瀬戸内海は、貧栄養化した水塊と富栄養化した海底土砂(底泥)が隣り合わせとなっている。この不均衡状態を解消する手段として、申請者らは「海底耕耘」に注目している。海底耕耘とは、一般的には干潟のような浅場の底質を鍬などで掻き乱すことで底質をより好気的な状態に変化させたり海底ゴミを除去する行為で、日本各地で実証実験が行われている。その一方、今回申請者らが提案する「海底耕耘」は、数～十数メートルの水深を有する海域の底質を攪乱する行為を示しており、底質環境を改善するとともに、底質中の間隙水および土粒子に吸着している栄養塩を強制的に水中に回帰させ、基礎生産者への栄養素供給および基礎生産の向上を狙った試みである。実験フィールドとして提案する志度湾は半閉鎖性地形で比較的浅い内湾であり、海底耕耘の効果を明らかにするのは適していると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで底質のみを対象に定性的に評価された海底耕耘の効果を「水中貧栄養化問題の解消」という観点から定量的に評価・検証することである。本研究は、地元自治体や漁協と情報交換を交えながら連携しつつ、実際のノリ養殖海域を対象とするため、以下に示す様に学術的独自性に加え、実際の現場で適用可能になるなど社会貢献にも資する。

これまで干潟域(潮間帯)にてのみ検討され評価が定性的であった海底耕耘による環境改変効果を、潮下帯へ拡張し且つ栄養塩を指標に定量的に評価できる。

地元自治体や漁協との連携による実スケールでの検討により、室内実験では得られない経時的な環境変化を明確にしたり新たな知見(例えば、底生動物の新規加入の確認、底泥の植物プランクトン休眠細胞の再活性化等)が得られる可能性がある。

海底耕耘の有用性を示すことができれば、数値モデルとの併用により海底耕耘の影響範囲の解明や栄養塩濃度を高めたい領域の設定といった効率的な運用方針を、具体的に検討・提案することに繋がる。

### 3. 研究の方法

本研究では、海底耕耘が貧栄養化した海域での栄養塩濃度上昇に寄与し基礎生産の向上に繋がるのかを定量的に検証したい。そのために、香川県志度湾海域の底質に溶存態の栄養塩(窒素・リン)がどの程度含まれているのか、海底耕耘に伴い土粒子や土粒子吸着栄養塩はどの空間範囲にまで拡散するのか、巻き上げられた土粒子と土粒子から脱着した栄養塩との拡散範囲の違いはどの程度か、志度湾での海底耕耘の効果を実測ならびに空間的に把握できるか、からなる4つの主な目標を設定し、現地調査・室内実験及び数値モデルによる検討を行う。

項目①では、定期的な水質・底質調査を行い、志度湾の環境特性を明らかにする。数値モデル構築に必要な基礎情報の収集も行う。項目②・③では、強制的に底質を掻き乱した状況を室内スケールで再現し、静置による自然溶出状況とは異なる溶出挙動を実験的に明らかにする。項目④では、自作した耕耘機を用いて漁船引きによる海底耕耘を複数回実施し、耕耘地域を含む周辺海域の濁度・水温・塩分・酸素濃度・pHの鉛直プロファイル取得および採水分析による栄養塩濃度の時系列変化を把握する。土粒子と土粒子から脱着した栄養塩の拡散範囲の差異については、潮の流れ方向に複数の調査地点を設け、採水試料の分析から水平方向・鉛直方向の拡がりの大きさを把握する。並行して、現地で得られた資料の空間展開を目的に志度湾の詳細数値流動モデルを構築し、貧栄養化解消をより効果的とするための耕耘場所選定や実施時期・期間を提案す

るための数値試行実験にも取り組む。それらを取り纏め、海底耕耘が貧栄養化した海域での環境改善に寄与するのか定量的に検証する。

#### 4. 研究成果

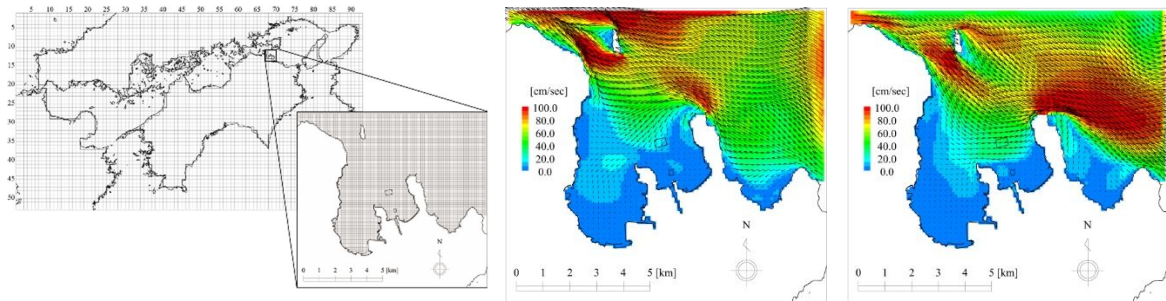
##### 2020 年度実施事項

新型コロナウイルス拡大に伴う活動制限のため、現地調査に関わる全ての活動（水質・底質の現況調査、室内実験実施のためのサンプリング活動）は停止状態である。

現地での活動が制限されるなか、海底耕耘を行うための鉄製耕耘桁を製作した。桁の寸法は1500mm（長軸）×700mm（短軸）×500mm（高さ）を有しており、底質を引っ掻く鍬部分が斜めに出ている。重量は約50kgあり、桁両端をロープでつなぎ海に沈め船で引っ張ることを想定している。現地調査が出来る状況となり次第、関係者間と連携して実験を行う予定である。

瀬戸内海の水質情報については、自治体オープンデータ収集しデータベース化を図った。観測生データの収集が困難な項目については、関係自治体・省庁からも協力を頂いた。

志度湾の詳細数値モデル構築に向け、瀬戸内海全域及び備讃瀬戸領域の流動再現計算を実施した。豊富な観測データが収集できた2010年以降を対象に、大領域（瀬戸内海全域、空間解像度5km）および中領域（備讃瀬戸領域、空間解像度500m）の2領域ネスティング計算モデルを構築し、境界条件には気圧変動を考慮した天文潮、FRA-JCOPE 水温塩分と気象再解析値の利用、ならびに1級河川流量の実測値を適用した。潮位変動は高潮発生時においても高い再現性が得られた一方、内湾域にて実際よりも塩分濃度が高い傾向が得られた。瀬戸内海への淡水流入は1級河川以外にも多くの地点で発生しており、それら影響を加味しないと塩分濃度の鉛直分布を定量的に再現することが困難であることが確認できた。2021年度以降も継続して精度向上に向けたモデル構築を進める予定である。



左図：数値流動モデル瀬戸内海全域と志度湾の計算メッシュ図

中図：志度湾の下げ潮時流速分布

右図：志度湾の上げ潮時流速分布

##### 2021 年度実施事項

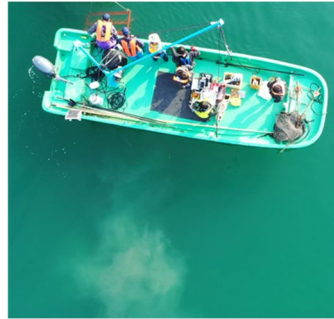
新型コロナウイルス拡大に伴う活動制限のため、室内実験活動は停止状態である。

R2 年度に製作した鉄製耕耘桁を用いて耕耘実験を実施した。現地実験は夏季（8月、白方海岸地先）と冬季（12月、穴子海岸地先）で、どちらもさぬき市志度湾に属している。耕耘前後に表層および底層水を採取後、室内にて無機態栄養塩（アンモニア、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、全窒素、全リン）を分析した。水中の濁り等については、多項目水質計を用いて水温、電気伝導度、クロロフィルa濃度、濁度、DOを水深帯別で計測した。現地底質はコアサンプラーまたはエクマンバージ採泥器で取得した。

2回実施した調査場所や水深条件、実施時期、実施方法が異なったことより、調査結果も一部異なる傾向が確認された。8月調査時は耕耘後に表層栄養塩濃度の上昇が確認されたが、12月時は一部海域に留まった。この理由として、白方海岸は閉鎖性が高く且つ水深が浅かった事に加え、ゴムボートをアンカーで固定して手動で小型の桁を用いた事が挙げられる。12月の調査では、運用した2隻の漁船を耕耘桁曳航船と調査船に分け、耕耘桁曳航船に沿う形で水質を採取したため、耕耘による影響を受けた水塊を捉えきれなかった可能性が考えられる。濁りはどちらの調査でも発生しており、12月調査時はドローンを用いて耕耘桁曳航船の経路に沿って濁りが発生している様子を上空から確認することが出来た。

課題として、耕耘によりかき混ぜられた水塊を確実に捉えるための効率的なUAV利用方法の検討や、栄養塩の質変化・濃度上昇の定量的効果を室内実験により明らかにする必要がある。

情報公開に関する活動について、11月27日に白方海岸にて底質の環境改善を目的とした耕耘活動を地元住民らと実施した。本活動は香川県のローカルテレビ「ケーブルメディア四国」にて取り上げられ、研究対象海域の現状について多くの市民の関心が得られた。



左図：穴子海岸地先での実験実施に向けて製作した耕耘桁を輸送  
 中図：UAV により捉えた濁り水塊の拡がり状況  
 右図：GPS ロガーによる観測船・耕耘船の移動軌跡

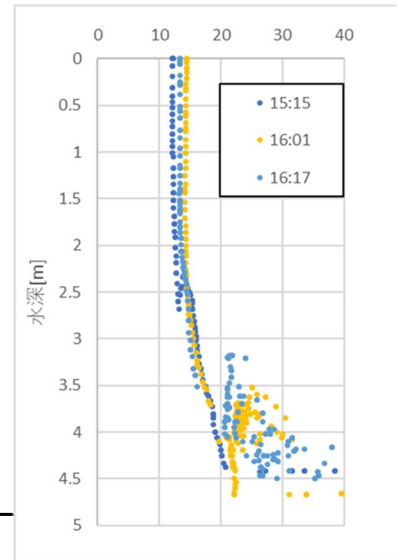
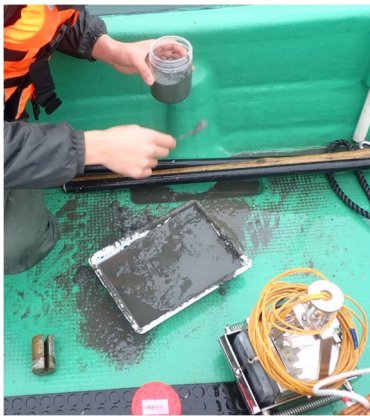
### 2022 年度実施事項

昨年度よりも野外活動に取組める機会が増え、室内実験に供する現地サンプリングを開始した。それに伴う室内実験も開始したが、間隙水採取や栄養塩分析の手法構築について発現した新たな課題も発生している。

水中栄養塩増加の定量的効果を明らかにする為、現地海水-底質を採取した。サンプリングは9月に2回、11・12月にそれぞれ1回の計4回実施し、室内実験に供した。砂質と泥質の乱れない潮下帯柱状海底土砂を複数回採取し、室内にて現地海水と表層泥とを強制混合させ土粒子が沈降した状態での水中 DIN を測定した。混合源となる底質中の間隙水については、遠心分離機で間隙水と底質とを分離した後、上澄みの間隙水中 DIN を分析した。一方、底質性状を把握するため、粒度組成や IL (2%程度)・ORP (-250~+150mv)・T-S (0~0.7mg/g-dry) の測定も実施した。混合前後での DIN は、定性的には実験後に上昇したケースもあったが調査日毎にばらつきが多く、現時点では定量的な結果は得られていない。採水方法や間隙水の抽出方法にも改善の余地があるため、R05 年度も実施頻度を増やして検討を継続する。

過年度から引き続き実施している現地での耕耘実験は、11月と1月の計2回、昨年度と同じ海域にて実施した。前年度との変更点は、目印用ブイを設置して船による耕耘範囲を指定し、観測船にて耕耘効果が明確になるよう調整を図った。耕耘桁は前年度から一部改良し、刃先の長さを半分にする代わりに刃先の数を倍に増やしている。耕耘に伴い、底層水中のアンモニアは昨年度から引き続き濃度上昇傾向がみられたが、表層は変化が確認できなかった。

R04 は現地人員確保が不十分で UAV を用いた濁りの観測が出来ていない。R05 に向けて、海底耕耘により巻き上げられた水塊を確実にとらえることが出来るよう、実験範囲の精査や室内実験の精度向上に取り組む予定である。



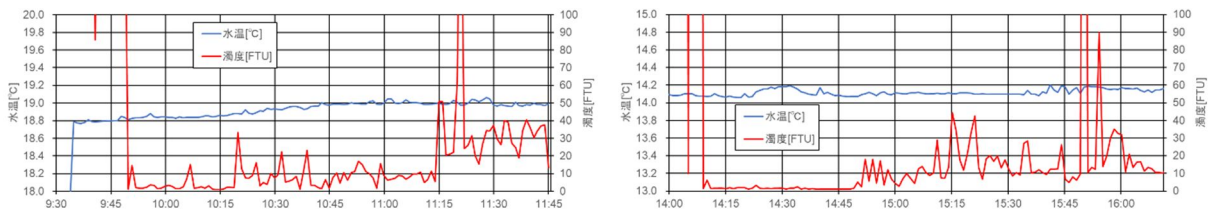
左図：採泥器で採取した底質  
 中図：室内実験向けに採取した乱れない底質コアサンプラー  
 右図：耕耘実験中における濁度の鉛直プロファイル

### 2023 年度実施事項

現地での耕耘実験を継続するとともに、定期的に潮下帯で採取した乱れない底質採取による室内での強制混合実験を開始した。現地耕耘実験は昨年度に引き続き観測船を固定するとともに、2時間にわたる耕耘船による観測船周囲の耕耘を実施した。観測船では15分毎の水質測定による鉛直プロファイル取得と底層域に設置した濁度計の連続観測により、耕耘後の濁り(40FTU程度)の発生や濃度・継続時間を明らかにすることができた。実験実施が11月中旬お

よび 12 月初旬だったこともあり表底層間の密度差は認められず、巻き上げられた水塊は水深 5m 程度の海域において水面下 2.5-3.5m 程度までしか到達しなかった。本プロジェクトにて製作した耕耘桁は対象海域の環境を改変させるには十分な数を確保できていないが、機器観測と UAV による空中からのモニタリングデータを併用することで、底質攪乱効果の水平規模をおおよそ把握する事ができた。耕耘実験に伴う水質の変化としては、底層域にてアンモニアの濃度上昇傾向が昨年度に引き続き確認できたがその濃度は薄く、硝酸や亜硝酸についても明確な濃度変化が確認できていない。

現地底質採集による室内での強制混合実験は、サンプリングコアからの乱れのない底質の採取に関するノウハウは蓄積することができたが、定量的な結果は得るところまでは至っていない。その理由として、実験室内の気温・水温条件を揃えるのが困難だった事や室内実験前後の採水に伴うコンタミ発生が考えられ、より高精細な結果を得るには実験実施の方法に注意を払う必要がある。室内実験は翌年度も継続して検討を進める予定である。



図．11/16（左）および 12/8（右）実験時における底層水温・濁度の時系列変化

表．耕耘実験における溶存無機態窒素の試験結果（左表：11/16，右表：12/8）

		[mg/L]				
		ビン番号	NH3-N	NO3-N	NO2-N	DIN
表	645		0.00	1.00	0.070	1.070
	985		0.00	0.70	0.051	0.751
	872	0.05	1.00	0.051	1.101	
中	985		0.00	0.60	0.000	0.600
	672		0.01	0.90	0.009	0.919
	508		0.00	1.00	0.033	1.033
底	513		0.01	1.00	0.039	1.049
	553		0.00	1.40	0.008	1.408
	645		0.01	1.40	0.035	1.445
表	645		0.00	0.70	0.039	0.739
	985	0.00	0.80	0.071	0.871	
	872		0.00	1.00	0.021	1.021
中	985		0.00	0.70	0.050	0.750
	672		0.00	0.90	0.048	0.948
	508		0.00	0.80	0.049	0.849
底	513		0.00	0.90	0.049	0.949
	553		0.00	1.00	0.046	1.046
	645		0.00	1.20	0.051	1.251
表	645		0.00	0.70	0.052	0.752
	985	0.00	0.90	0.020	0.920	
	872		0.00	0.80	0.024	0.824
中	985		0.00	0.90	0.055	0.955
	672		0.00	0.70	0.019	0.719
	508		0.00	0.90	0.046	0.946
底	513		0.00	0.90	0.058	0.958
	553		0.00	1.10	0.044	1.144
	645		0.00	2.10	0.055	2.155
表	645		0.00	1.00	0.021	1.021
	985	0.03	0.60	0.017	0.647	
	872		0.00	0.90	0.055	0.955
中	985		0.00	0.70	0.042	0.742
	672		0.00	0.60	0.050	0.650
	508		0.01	0.90	0.018	0.928
底	513		0.00	0.50	0.054	0.554
	553		0.00	0.80	0.046	0.846
	645		0.00	0.80	0.054	0.854
表	645		0.00	0.70	0.013	0.713
	985	0.02	0.80	0.032	0.852	
	872		0.00	1.40	0.038	1.438
中	985		0.00	0.90	0.012	0.912
	672		0.01	0.80	0.040	0.850
	508		0.00	1.20	0.011	1.211
底	513		0.11	0.90	0.027	1.037
	553		0.05	1.40	0.035	1.485
	645		0.06	1.20	0.012	1.272

（表中の矢印は前回サンプリング時から上昇/低下/変化無の判定）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 柳川竜一・三好真千・貫井唯杜・寺内広太佳・南里英寿
2. 発表標題 海底耕耘による貧栄養解消の試みについて
3. 学会等名 2022年度日本沿岸域学会研究討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤陽滋・柳川竜一・平木雄大・宮下太郎
2. 発表標題 水域データベースの作成と活用
3. 学会等名 2020年度土木学会四国支部第26回技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 住田一晃・柳川竜一・近藤陽磁
2. 発表標題 瀬戸内海を対象とした台風通過に伴う流動特性の変化について
3. 学会等名 令和2年自然災害フォーラム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三好 真千  (MIYOSHI MACHI)  (40399168)	徳島文理大学・理工学部・講師    (36102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------