

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21336

研究課題名（和文）漁業者と共に海を耕す「海底耕耘」の科学的エビデンスに関する研究

研究課題名（英文）Scientific evidence for "ocean bottom plowing" in an aim to fertilize coastal production

研究代表者

小池 一彦 (Koike, Kazuhiko)

広島大学・統合生命科学研究科（生）・教授

研究者番号：30265722

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：瀬戸内海では貧栄養化により植物プランクトンによる基礎生産が低下し、漁業全体の縮小を招いている。本研究で実施した海底耕耘は、栄養豊富な海底付近の海水と、海底泥に含まれる植物プランクトンの休眠期細胞を海表面に巻き上げようとするものである。2021年の6月に広島湾北部で漁船9隻による集中的な海底耕耘を実施したところ、栄養塩の増加、植物プランクトンの光合成活性の上昇、それに引き続く増殖が見られ、海域の肥沃化に効果的であると思われた。その一方、海底耕耘は労力も大きく、継続した効果は期待できない。そこで、海底耕耘同様の効果を継続的に与える「海底水揚水装置」を試作し、カキ肥育に効果的であることを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

瀬戸内海はかつて富栄養化が進行していたが、厳しい排水規制を伴う瀬戸内海環境保全特別措置法が施行され、現在は逆に貧栄養化状態にあるとされる。その結果、食物連鎖の底辺にある植物プランクトンが十分に増殖せず、漁業全体の低迷を招いている。この状況を改善するために、漁業者の自助努力により実施可能な「海底耕耘」が推奨されているが、その効果を科学的に見積もった例はない。本研究では漁業者と連携し、広島湾北部で集中的に耕耘を行った結果、栄養塩の増加と植物プランクトンの増加を認め、海底耕耘が海域の肥沃化に効果的であることを実証した、同様の効果を与える海底水揚水装置を試作し、カキの肥育に効果的であることも確認した。

研究成果の概要（英文）：In the Seto Inland Sea of Japan has experienced oligotrophication which resulting shrinkage of primary production of the food chain and further decrease of the fisheries production. In this study, under an aim to provide nutrient-rich ocean bottom water and bottom sediments which contain phytoplankton seeds, trials of "ocean bottom plowing" by dragging huge plow-like gear by fishermen's boat were done. In the trial of June 2021 at Hiroshima Bay, increases of nutrients and photosynthetic activity of phytoplankton were observed which resulted in phytoplankton growth. Also, a solar-powered bottom water pump was developed, expecting the device would give similar effect of the ocean bottom plowing.

研究分野：水産学

キーワード：瀬戸内海 漁業 貧栄養化 植物プランクトン 牡蠣養殖

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

かつて「宝の海」と呼ばれた瀬戸内海は、この30年で漁獲量は半減し、漁業者は1/3に減った。漁獲量の減少の大きな要因は、1978年に施行された瀬戸内海環境保全特別措置法(瀬戸内法)により栄養塩(窒素やリン)濃度が減少し、基礎生産者である植物プランクトンが増えない「やせた海」になったからである。海の生産力に依存するカキ養殖や海苔養殖も減産が著しい。40年間かけて絞ってきた栄養塩をすぐに増やすことはできない。漁業者とともに「できること」から着手しないと、遠くない将来に瀬戸内海の漁業は崩壊する。

2015年に、広島県福山市の漁業協同組合青年部と研究代表者が、海底環境を改善し、ゴミを除去しようと、ボランティア作業で海底を耕した。これは網をつけないエビ底曳き漁具を漁船で引き回すものである。この時、海底の植物プランクトン(珪藻)休眠期細胞が巻き上がり、それが大增殖した。この効果を知った広島市漁業組合が、植物プランクトン不足により生産量が低下しているカキの養殖海域でも海底耕耘を始めた(2018, 2019年)。その一方、本当に海底耕耘が植物プランクトンの増殖を促し、海域の基礎生産を上げるかについては科学的な調査は行われていない。海底耕耘によって有害プランクトン(赤潮・貝毒種)の休眠胞子が巻き上がり、それらが増殖してしまう可能性も排除できない。漁業者主体の実施とは言え、海底耕耘の効果とリスクを正しく評価する必要がある。また、たとえ海底耕耘が効果を持つとしても、おそらくその効果は一過性のものであろう。推定される海底耕耘の効果(海底泥や栄養に富んだ底層水の巻きあげ)を考えれば、同様の効果を継続して与えることが出来る装置の開発も可能であろう。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では広島湾北部で漁業者と共に海底耕耘を実施し、海底耕耘による底質の変化、水柱への栄養塩の供給効果、植物プランクトンの増殖効果を現場調査をもとに詳細に見積もることを目的とする。また、耕耘前後の海水、または海水に現場底泥を懸濁させて培養を行い、現場では海流があるが故に効果が見積もりにくい、植物プランクトンの増殖効果を室内実験により見積もることも目的とする。

加えて、規模は小さくとも海底耕耘と同じ効果を与える海底水揚水装置を試作し、それを牡蠣筏に設置して、植物プランクトンの増殖効果、養殖カキの成長促進効果を見積もることも目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 現場調査

広島県北部における海底耕耘は2020年は予備的に2021年は多数の漁船を動員して行った。ここでは2021年の調査について主に述べる。2021年5月20日に海底耕耘を予定している草津区と江波区のそれぞれ3地点の合計6地点で、エクマンバージ採泥器により底質を採取し、MPN法により現場底泥中に存在する植物プランクトンの休眠期細胞を定量した。この結果を踏まえ、2021年に草津沖で6月15日~6月17日、江波沖で6月21日、22日の午前8:00から2~3時間程度海底耕耘を行った。この際、ローラー型の耕耘機を使用した。調査は耕耘区および耕耘区外に調査地点を3箇所ずつ設定し、耕耘の前後で行った。草津沖では、6月15日の8:30から耕耘直前調査を行い、6月17日に耕耘直後調査を、6月22日に耕耘5日後の調査を行った。江波沖では、6月21日の6:30から耕耘直前調査を行い、6月22日の10:00から耕耘直後調査を行った。海底泥に対してはORP、強熱減量、硫化物量の測定を実施した。現場水柱に対しては多項目水質計(CTD DS-5, HYDROLAB)を用いて、水深、水温、塩分、光量子量、溶存酸素、クロロフィルa量を鉛直的に測定した。各調査地点の中央点でのみ、バンドン採水器を用いて、採水を行い(水深0m, 1m, 3m, 5m, 10m, 海底の1m上)、オートアナライザー(BLTEC社)による溶存無機態栄養塩濃度の測定を行った。また、採水試料1mL中の植物プランクトンの種組成・細胞数を顕微鏡下でカウントした。パルス変調蛍光光度計(Water-PAM, Walz)を用いて、水深ごとの植物プランクトンの光合成活性( $F_v/F_m$ )を計測した。また、同じ海水試料500mLをメッシュ(目合10 $\mu$ m)で5mLまで濃縮分画し、貝毒原因の*Alexandrium*属および*Dinophysis*属、有害赤潮原因の*Chattonella*属の計数を行った。

海底耕耘による植物プランクトンの増加効果を室内実験により見積もるために、草津沖の水深3mの海水を耕耘直前に採水を行い研究室に持ち帰った。この1.5Lに対して「現地の耕耘直前海水のみ」、「現地の耕耘直前海水に海底泥を添加したもの」、「ろ過した現地の耕耘直前海水に海底泥を添加したもの」の3パターンをそれぞれ3本ずつ用意した。ろ過は孔径0.45 $\mu$ mメンブランフィルターを用いて吸引ろ過を行った。泥は0.3g添加した。これらを6月の現地の環境に準じた条件下(21、明暗周期14hL:10hD、光量子束密度250 $\mu$ mol-photons m<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup>)で培養し、植物プランクトンの種と細胞数の推移を14日間モニタリングした。

## (2) 海底水揚水装置

金属フレーム筐体の上部に合計200Wのソーラーパネルを設置し、チャージングコントローラーを介して12Vバッテリーに充電するシステムを構築した。バッテリーに充電された電力は空気ブロワーに供給され、装置から海底に向かって伸びる揚水ホース（内径75mm）に空気を吹き込むことによって、エアリフト効果を与え海底水を揚水する。試験運転の結果、毎時3トンの揚水効果を誇り、これを広島県東広島市安芸津町の牡蠣養殖筏に設置した。2021年7月末から昼間の運転を継続し、クロロフィルaの増加効果、垂下したカキの肥育効果を調べた。



図1．海底水揚水装置の全景

## 4．研究成果

### (1) 現場調査

重点的に実施した草津区の結果を以下に示す。図2に海底耕耘後のドローン撮影像を示す。しっかりと泥が海表面まで巻き上がっていることが確認できる。MPN法により事前に耕耘区の海底泥に含まれる植物プランクトン群を調べた結果、草津区における珪藻類の休眠期細胞数密度は $50,723 \text{ MPN g}^{-1}$ と推定された。うち *Skeletonema* 属が  $17,000 \text{ MPN g}^{-1}$ , *Chaetoceros* 属が  $16,000 \text{ MPN g}^{-1}$ , *Thalassiosira* 属が  $1,400 \text{ MPN g}^{-1}$  を占めた。珪藻の増殖を抑える二酸化ゲルマニウムを添加し、鞭毛藻類の休眠期細胞を見積もったところ  $318 \text{ MPN g}^{-1}$  となった。うち *Gymnodinium* 属  $100 \text{ MPN g}^{-1}$ , *Gonyaulax polygramma* が  $81 \text{ MPN g}^{-1}$ , *Scropsiella trochoidea* が  $61 \text{ MPN g}^{-1}$ , *Prorocentrum dentatum* が  $18 \text{ MPN g}^{-1}$  となった。*Alexandrium* 等の貝毒原因渦鞭毛藻のシストは確認されなかった。



図2．海底耕耘後のドローン撮影像

図3に草津区海底直上の溶存酸素量、底泥の酸化還元電位、硫化物量、強熱減量を示す。溶存酸素量は耕耘区内において若干上昇した。酸化還元電位は耕耘前の  $25 \pm 51.8 \text{ mV Eh}$  とプラスの値から  $77.3 \pm 26.8 \text{ mV Eh}$  へとさらに上昇し、より良好な値となった。耕耘終了とともに減少傾向が見られ、耕耘5日後には  $50.6 \pm 12.2 \text{ mV Eh}$  となった。図4に耕耘前後の無機栄養塩類、クロロフィルa量、植物プランクトンの活性を示す  $Fv/Fm$  の鉛直分布を示す。耕耘区内の水深0mにおいて、耕耘の直前と直後で三態窒素が大幅に減少した。また、水深10m以深で三態窒素とリン酸態リンの増加が見られた。例えば、三態窒素に関しては、耕耘前に水深10m及び13m付近において、それぞれ  $1.61 \mu\text{mol L}^{-1}$ ,  $5.40 \mu\text{mol L}^{-1}$  だったものが、耕耘後に  $6.47 \mu\text{mol L}^{-1}$ ,  $12.01 \mu\text{mol L}^{-1}$  に増加した。リン酸態リンについても水深10m及び14m付近において、それぞれ  $0.17 \mu\text{mol L}^{-1}$ ,  $0.60 \mu\text{mol L}^{-1}$  だったものが、耕耘後に  $0.66 \mu\text{mol L}^{-1}$ ,  $1.12 \mu\text{mol L}^{-1}$  へと増加した。このような深層の栄養塩の増加は耕耘区外の同水深には見られなかった。クロロフィルa量に関しては、耕耘区において水深0mから6mの平均は耕耘前の  $3.72 \mu\text{g L}^{-1}$  から耕耘直後に  $5.18 \mu\text{g L}^{-1}$  に上昇した。加えて、耕耘5日後には  $7.74 \mu\text{g L}^{-1}$  へと上昇した。 $Fv/Fm$  に関しては、耕耘前に水深0mから6mの平均値  $0.39 \pm 0.04$  だったものが、耕耘直後に  $0.54 \pm 0.04$  に上昇した。このような上昇は耕耘区外では見られなかった。耕耘区内の  $Fv/Fm$  の上昇は5日後まで維持され、その時でも  $0.55 \pm 0.02$  の値を示した。

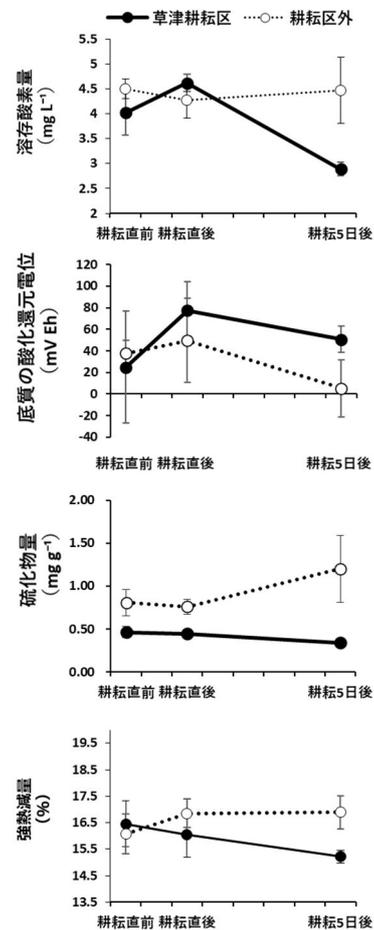


図3．耕耘後の底質の状態変化

以上の様に、耕耘の効果によると思われるクロロフィル a 量の増加が見られた。そこで、このクロロフィル a 量増加をもたらした植物プランクトンの分類群組成について図 5 に示した。主に 3 m と 5 m で珪藻類がそれぞれ 70 cells mL<sup>-1</sup>, 29 cells mL<sup>-1</sup> であるのに対し鞭毛藻類がそれぞれ 3 m で 57 cells mL<sup>-1</sup>, 63 cells mL<sup>-1</sup> と比較的多くを占めたが、耕耘直後には水深 5 m を除いてほぼ珪藻類で占められた。特にクロロフィル a 量が上昇した水深 0 m, 1 m, 3 m はいずれも 90% 以上が

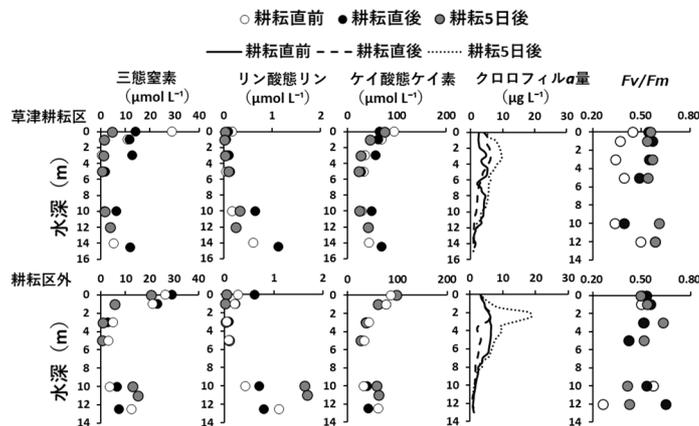


図 4. 耕耘前後の無機栄養塩類, クロロフィル a 量, Fv/Fm の鉛直分布

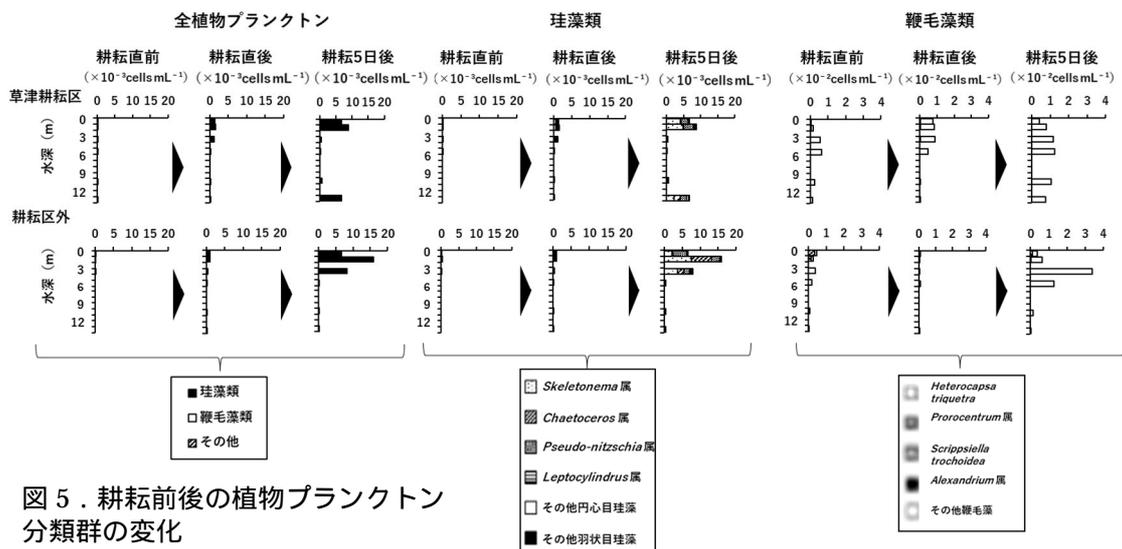


図 5. 耕耘前後の植物プランクトン分類群の変化

珪藻で占められた。耕耘 5 日後も水深 5 m を除き、過半数が珪藻類で占められた。珪藻類の組成は珪藻類の細胞数 1,041 cells mL<sup>-1</sup> に対して, *Skeletonema* 属と *Pseudo-nitzschia* 属が多くを占め, 耕耘 5 日後まで続いた。耕耘前後における渦鞭毛藻類の細胞数は, ほとんど変化がなかった。渦鞭毛藻類は, その多くの種が *Heterocapsa triquetra*, *Prorocentrum* 属, *Scrippsiella trochoidea* であった。*Alexandrium* 属は, 海水を濃縮して検鏡したが, 耕耘前に表層で 40 cells L<sup>-1</sup> 出現していたが, 耕耘後にはいずれの水でも確認できなかった。

図 6 に海底耕耘の直前で採水した水深 3 m の海水を用いた培養実験の結果を示す。泥を添加せず現地海水をそのまま使用した場合において, 珪藻類は主に *Skeletonema* 属と *Pseudo-nitzschia* 属で占められていた。海水をろ過して泥を加えた場合においても *Skeletonema* 属が大多数を占め, *Pseudo-nitzschia* 属も確認できた。しかし, *Pseudo-nitzschia* 属は, 海水をそのまま使用した場合と比較すると, 海水をろ過した場合には, その数は非常に少なかった。このことから, *Pseudo-nitzschia* 属は泥由来ではなく, 水柱由来であると思われる。ろ過海水に泥を添加した場合は, *Skeletonema* 属の

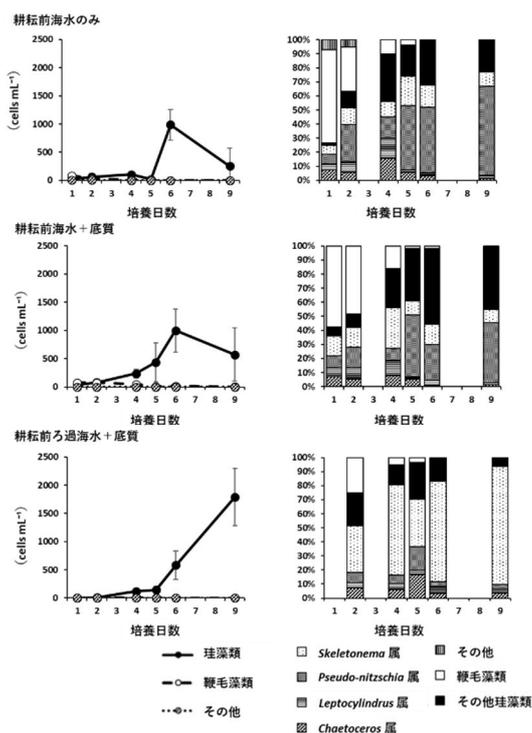


図6. 耕耘前海水と耕耘前海水に底泥を添加したもの、ろ過した耕耘前海水に底泥を添加したものを培養した際の植物プランクトンの細胞数 (左) と種組成 (右)

増加が顕著に見られ、泥由来であることがうかがえる。また、ろ過海水を用いた場合の増加率が高いのは、発芽前に他のプランクトンに栄養塩を利用等の増殖制限をされないからだと考えられた。

## (2) 海底水揚水装置

図7に装置設置筏の概要を示す。図8には牡蠣筏に装置を設置した後、定期的に筏を訪れ、クロロフィルa量を鉛直的に調べた結果を示す。カキ垂下水深として重要な表層で、装置設置区において対照区と比較した際のクロロフィルa量が有意に高くなった。



図7. 海底水揚水装置の設置の概要。設置箇所は安芸津町三津湾

10月30日に、装置設置区・対照区の両筏より、それぞれ2本ずつ垂下連を収穫し、垂下連1本あたりの牡蠣総重量、個体重量を調べた(図9)。装置に最も近い垂下連(グラフ中装置設置区1)では、魚類による被食のために残存個体数が少なかったが、個体あたりの平均重量(殻付)は他垂下連と比較して有意に高かった。対照区筏の同位置の垂下連(グラフ中、対照区2)と比べ、個体重量は対照区平均の124gから、装置設置区の151gと、20%以上の重量増が認められた。装置設置区筏のほぼ中央部(グラフ中、装置設置区2)では、対照区筏の中央部(グラフ中、対照区1)と比較して個体重量は変わらなかったが、残存個体数が多く、総重量が有意に高かった。

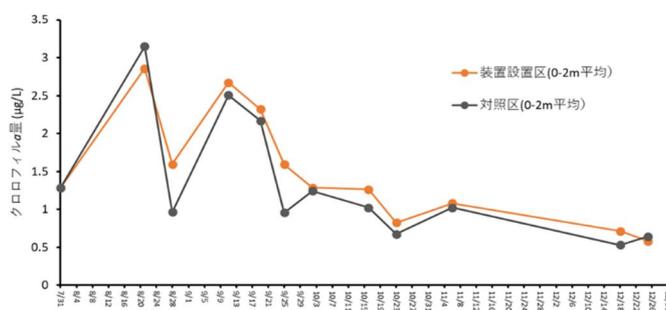


図8. 海底水揚水装置を設置した際のクロロフィルa濃度

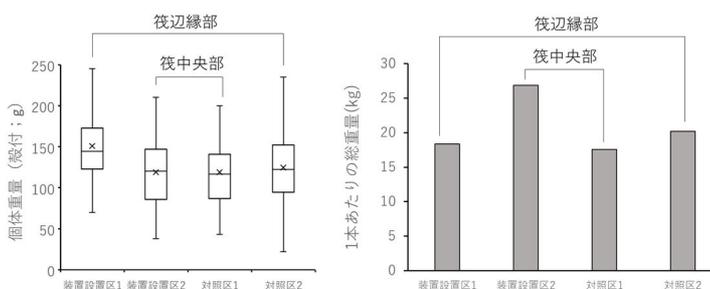


図9. 装置設置区と対照区のカキ個体重量(左)および垂下連一索あたりの総重量(右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大平祐輔、小原静夏、池田俊一朗、古矢健一郎、小池一彦
2. 発表標題 海底耕耘による植物プランクトンの増殖効果：広島湾北部での実証実験
3. 学会等名 日本プランクトン学会・ベントス学会合同大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小原静夏、大平祐輔、矢野諒子、池田俊一朗、古矢健一郎、小池一彦
2. 発表標題 海底耕耘による栄養塩供給効果と珪藻増加効果が海域の基礎生産力に及ぼす影響 - 広島湾北部を事例として -
3. 学会等名 日本プランクトン学会・ベントス学会合同大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小原静夏・梅木雅美・大平 祐輔・佐藤尚史・池田俊一朗・古矢健一郎・小池一彦
2. 発表標題 広島湾北部での海底耕耘における植物プランクトンの量・組成・生産速度への影響
3. 学会等名 2020年度 日本プランクトン学会・ベントス学会合同大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小原静夏・梅木雅美・大平 祐輔・佐藤尚史・池田俊一朗・古矢健一郎・小池一彦
2. 発表標題 広島湾北部での海底耕耘における植物プランクトンの量・組成・生産速度への影響 2018-2020
3. 学会等名 広島市海底耕耘 結果報告会・意見交流会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小原静夏・梅木雅美・大平 祐輔・佐藤尚史・池田俊一朗・古矢健一郎・小池一彦
2. 発表標題 海底耕耘が植物プランクトン量や組成に及ぼす影響～広島湾北部での事例をもとに～
3. 学会等名 令和2年度 漁業環境保全関係研究開発推進会議 赤潮・貝毒部会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuhiko Koike
2. 発表標題 Trial for a sustainable production of the oyster culture at Hiroshima, Japan
3. 学会等名 The coming up disruptive technology in aquaculture and fisheries（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 小池一彦（三本木 至宏、上田 晃弘、杉野 利久、鈴木 卓弥、富山 毅、船戸 耕一編）	4. 発行年 2021年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 256
3. 書名 SDGsに向けた生物生産学入門	

〔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	小原 静夏  (Ohara Shizuka)  (10878276)	広島大学・統合生命科学研究科(生)・助教   (15401)	

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
---------	---------