



Title	海底耕耘を活用した Chattonella 赤潮制御の試み
Author(s)	今井, 一郎; 各務, 彰記; 小原, 静夏 他
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 67(3), 57-66
Issue Date	2017-12-28
DOI	https://doi.org/10.14943/bull.fish.67.3.57
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/68161
Type	departmental bulletin paper
File Information	bull.fish.67.3.57.pdf



海底耕耘を活用した *Chattonella* 赤潮制御の試み

今井 一郎¹⁾・各務 彰記¹⁾・小原 静夏²⁾・結城 貴志²⁾・
小池 一彦²⁾・萩原 悦子³⁾・小川 憲太³⁾・米山 弘行⁴⁾

(2017 年 8 月 28 日受付, 2017 年 10 月 25 日受理)

Feasibility Studies on Sediment Perturbation as Control Strategies for *Chattonella* Red Tides

Ichiro IMAI¹⁾, Akinori KAKUMU¹⁾, Shizuka OHARA²⁾, Takashi YUKI²⁾,
Kazuhiko KOIKE²⁾, Etsuko HAGIWARA³⁾, Kenta OGAWA³⁾ and Hiroyuki YONEYAMA⁴⁾

Abstract

Diatoms are the most predominant phytoplankton group in the coastal sea and many planktonic diatom species produce resting stage cells in their life cycle to endure unfavorable conditions. These diatom resting stage cells play an important role in initiating the blooms. It is empirically known that diatom cells are sparse in water during the course of red tides of harmful flagellates such as dinoflagellates and raphidophytes. A promising strategy to control the occurrences of red tides by harmful flagellates is to artificially induce diatom blooms just before the development of red tides of harmful flagellates. There usually exist more than 10^5 cells of diatom resting stage cells or more in 1-g bottom sediments of coastal water areas, but they need light for germination and rejuvenation to become planktonic form. Sediment perturbation was carried out to transfer diatom resting stage cells in bottom sediments to euphotic zone and to induce germination and rejuvenation. This trial was made using dragnet fishing boats in coastal sea area of Tomonoura, Fukuyama City, Hiroshima Prefecture, in July 2016. The densities of diatom resting stage cells were 2.8×10^5 g⁻¹ wet sediment at the site (Stn. A, 4 m depth) outside of the dragnet-trawling zone and 1.2×10^5 g⁻¹ wet sediment at the site (Stn. B, 4 m depth) in the trawling zone. The densities of planktonic diatoms increased in the water column at Stn. B just after the trawling, but not at Stn. A, and totally increased thereafter (maximum value of 1,383 cells mL⁻¹). The cell densities of the raphidophyte *Chattonella* spp. decreased at Stns. A and B. The water sample after sediment perturbation was collected at 2 m deep at Stn. B, and incubation experiments were conducted for the bottles in combination with the inoculation of *Chattonella antiqua* (200 cells mL⁻¹) and the strengthening of SWM-3 culture medium (1/100). Diatoms always increased and *Chattonella* cells decreased in all the experimental bottles. The present study demonstrated a possible feasibility of sediment perturbation as a environment-friendly control strategy for *Chattonella* red tides in coastal sea area with artificial induction of phytoplankton flora to diatom dominant communities.

Key words : Diatoms, Resting stage cells, Red tides, *Chattonella*, Bottom sediment, Sediment perturbation, HAB control

緒 言

赤潮とは、水中の微小生物、特に植物プランクトンが増殖し、あるいは集積された結果、海水が着色する現象を指す。植物プランクトンは光合成を行い、海洋の生態系において基礎生産者として生物生産の根幹をなす重要な生物であるが、種によっては有害な赤潮や有毒なブルームを形成し、海洋生物や人に悪影響を及ぼすことがある。わが国沿岸域では西日本を中心に魚介類養殖が盛んなこ

とから、それらの大量斃死を引き起こす有害赤潮が恐れられている。有害赤潮生物の中で、ブリをはじめとした養殖魚類の斃死被害額が断然大きいのはラフィド藻の *Chattonella* (*C. antiqua*, *C. marina*, *C. ovata*) であり、渦鞭毛藻の *Karenia mikimotoi* や *Cochlodinium polykrikoides* が続いてあげられる(今井, 2014, 2017)。とくに *Chattonella* 赤潮は、1972 年夏季に 1,428 万尾もの養殖ハマチを斃死させ約 71 億円にも上る被害を与えており、これを契機とした「播磨灘赤潮訴訟」が提訴されたことはわが国の赤潮の歴史

¹⁾ 北海道大学大学院水産科学研究院海洋生物資源科学部門海洋生物学分野浮遊生物学領域 (E-mail : imai1ro@fish.hokudai.ac.jp)
(Plankton Laboratory, Division of Marine Bioresource and Environmental Science, Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University)
²⁾ 広島大学大学院生物圏科学研究科
(Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University)
³⁾ 広島県農林水産局
(Division of Agriculture, Forestry, and Fisheries, Hiroshima Prefecture)
⁴⁾ 広島県立総合技術研究所水産海洋技術センター
(Hiroshima Prefectural Fisheries Marine Technology Center)

上の有名な事件である。この赤潮によって、1973年に「瀬戸内海環境保全臨時措置法」が制定され、さらに5年後には「瀬戸内海環境保全特別措置法」として恒久法化されたのは特筆に値する。また比較的近年では、八代海において2009、2010年に発生した赤潮により、87億円にも達する養殖魚の斃死被害が起こった。

以上のように、有害赤潮による漁業被害が甚大なことから、被害の軽減と防止を目指して様々な対策が検討された。海域への栄養塩類の負荷を抑制する事によって富栄養化を阻止すれば赤潮の発生頻度を減らせるので、法的な規制と排水の浄化技術の向上が成果をあげている。直接的な防除対策として種々の物理化学的な手法が検討され、試みられたが、コストや規模、生態系への悪影響の観点からほとんどが実用に耐えないのが現状である。粘土散布がほとんど唯一の直接的な対策として、八代海において *C. polykrikoides* 赤潮で緊急事態の際に実施されてきた。現在では様々な工夫の結果、赤潮プランクトンの凝集能力の向上などが見られ、粘土散布は従前よりも期待されるようになってきている(村田, 2017; Seger et al., 2017)。また粘土散布は韓国において *C. polykrikoides* の赤潮に対して日常的に用いられている。しかしながら、一旦有害赤潮が発生すると制御が不可能なことから、消極的な手法であるが緊急対策として餌止めがなされており、養殖魚類の斃死の抑制に貢献している(今井, 2012)。また、生け簀の沈下や大型生け簀の活用も行われている。

以上の様な背景から、有効かつ環境に優しい赤潮対策が大きく期待されており、特に生物的防除が主体になる

と考えられる。増殖速度の観点から、細菌やウイルス等の殺藻微生物を用いた生物的防除が有望であり、研究成果が蓄積されつつある(Imai, 2015; 稲葉ら, 2017; 中山, 2017)。

ラフィド藻 *Chattonella* spp. や渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* 等の有害鞭毛藻による赤潮の際には、水中に珪藻類が大変少ないという現象が経験的に知られている(Itakura et al., 1996; 今井, 2012)。一方、沿岸域の海底泥中には膨大な数の珪藻休眠期細胞が眠っており、それらは発芽・復活に光が必要である(Imai et al., 1996)。海底に大量に眠る珪藻休眠期細胞に何らかの方法で光を当て、発芽・復活させた栄養細胞の増殖によって水中の栄養塩を吸収させるという戦略が、植物プランクトンの生活環と生理生態学的研究成果を踏まえ、提案されていた(今井, 1995)。しかし光を海底に広範囲に当てる設備が、開発コストや規模の観点から障壁となっていた。そこで、海底の珪藻休眠期細胞を海底から水中に懸濁させ有光層に持ってくれば、発芽・復活を通じて生じた珪藻の栄養細胞が水中の栄養塩類を消費して卓越増殖し、有害鞭毛藻類の増殖を抑制してくれるものと期待される。そのための具体的方策として、Fig. 1に示した海底耕耘を生物学的赤潮防除技術として提案できる(今井, 2010)。海底耕耘はもともと沿岸域の劣化した漁場を改善するための技術であり(中西, 2002)、全国の沿岸域において普通に実施されている。

本研究では、夏に海底耕耘を実施している広島県福山市の鵜の浦沿岸域において、2016年の夏季に海底耕耘を実際に行い、小規模に発生していた *Chattonella* が減少し、

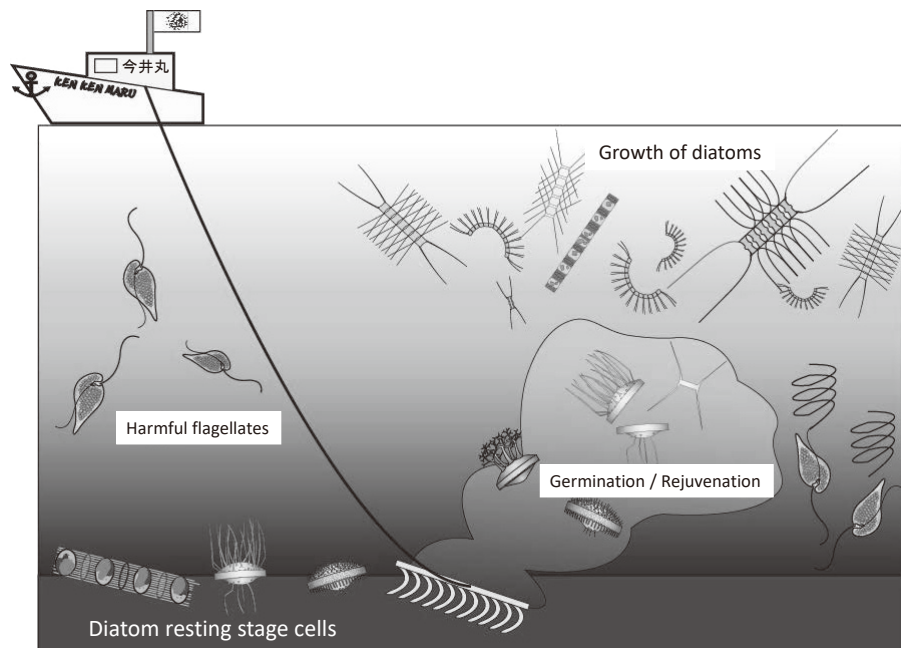


Fig. 1. Schematic representation of sediment perturbation as a control strategy for *Chattonella* red tides in coastal sea. Bottom sediments containing numerous diatom resting stage cells are suspended to euphotic layers by sediment perturbation with submarine tractor or trawling fishing gears, and germinated and/or rejuvenated diatom vegetative cells multiply vigorously and predominate in water columns, resulting in decay of *Chattonella* populations by virtue of nutrient exhaustion.

起こされた珪藻が卓越することを観察した。また、海底耕耘直後の海底泥が懸濁した海水試料を得て栄養塩や *Chattonella* を加えたボトル培養実験を行い、珪藻や *Chattonella* のモニタリングを通じて海底耕耘の効果をシミュレーションした。

材料および方法

海底耕耘は、広島県福山市の鞆の浦沖において2016年7月7日と8日に実施し、7月7-15日の期間、-1(1回目の耕耘直前)、0(2回目の耕耘直後)、3、7日目に採水および水理環境の測定を行った(Fig. 2)。また、-1日目には耕耘直前に採泥を行った。調査定点はStn. A(耕耘非実施区域、水深約5 m)、およびStn. B(耕耘実施区域、水深約5 m)の2定点を設け、海水試料はポリバケツおよびバンドーン採水器を用いて、表層(0 m)、2、4 mの各層から採取した。海底堆積物はエクマンバージ型採泥器で採泥し、表層0-2 cmの試料を実験に用いた。水理環境(水温、塩分、クロロフィル *a* (Chl. *a*) 蛍光値、溶存酸素、光強度)に関しては、CTD(HYDROLAB社製)を用いて測定した。得られた海水試料について、植物プランクトンの同定と計数、および栄養塩類の測定を行った。植物プランクトンは採水当日、非固定の生鮮海水試料1 mLを光学顕微鏡下で観察し、同定と計数を行った。また、海水試料をシリンジフィルター(メッシュサイズ0.45 μm)で濾過した濾液を冷凍保存した後、栄養塩類をオートアナライザーで分析した。なお、今回海底耕耘を実施したのは、小型底引き網の操業禁止区域である。

海底泥試料は不透明なプラスチック容器に密閉して収容し、冷蔵庫内の暗黒条件下で3ヶ月間以上保存した後、終点希釈法によって試料中の発芽/復活が可能な珪藻類休眠期細胞数を計数した(Imai et al., 1984; 今井ら, 1990)。まず、容器内の海底堆積物試料をよく攪拌した後1.0 gの湿泥を滅菌濾過海水に0.1 g mL⁻¹となるように懸濁し(10⁰

懸濁液)、これを改変SWM-3培地(Chen et al., 1969; 今井, 2000)を用いて順次10倍希釈し10⁻⁶まで希釈懸濁液を作成した。その後、組織培養容器(48ウェル, IWAKI社製)を用い、懸濁液について各希釈段階で5ウェル(各ウェルに1 mLずつ)に接種した。温度20°C、光強度約50 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期14 hL: 10 hDの条件で7日間培養した。倒立型落射蛍光顕微鏡(Nikon社製TMD300)を用いて観察を行い、休眠期細胞の発芽あるいは復活を通じて出現、増殖した栄養細胞の同定を行った。栄養細胞が確認されたウェルを陽性とし、各希釈段階における陽性ウェル数の組み合わせを基に、最確数表(伊藤・今井, 1987)を参照して、湿泥1 g中に存在する発芽/復活が可能な珪藻類休眠期細胞の密度(最確数: Most Probable Number, MPN g⁻¹ wet sediment)を求めた。

ボトルを用いた培養試験のための海水試料は、耕耘実施後のSt. Bにおける2 m層より採取したものをを用いた。その後、有害赤潮ラフィド藻 *C. antiqua* の添加濃度および1/100強度の改変SWM-3培地添加の有無で4つの実験区を設定した(Table 1)。温度25°C、光強度約50 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期14 hL: 10 hDの条件下で培養を行い、2、4、6、10、14日目に副試料を採取し、*C. antiqua* および珪藻類の細胞数を数えた。また、無機栄養塩類とクロロフィル *a* の量を測定した。

Table 1. Experimental bottles with the combinations of the inoculation of the red tide raphidophyte *Chattonella antiqua* and the addition of SWM-3 medium.

Bottle	<i>Chattonella antiqua</i>	Nutrient addition
A	No addition	No addition
B	No addition	SWM-3, 1/100 strength
C	200 cells mL ⁻¹	No addition
D	200 cells mL ⁻¹	SWM-3, 1/100 strength

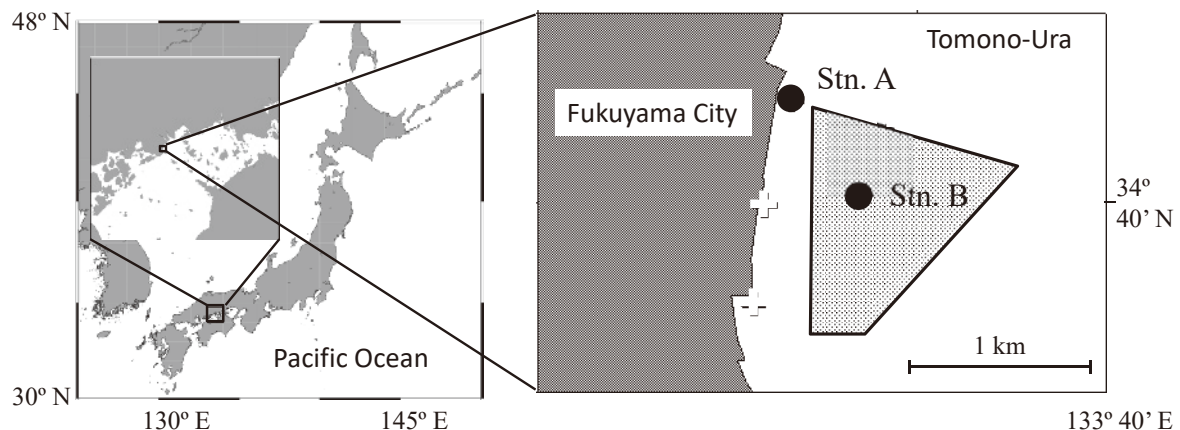


Fig. 2. Zone (dotted area in the right panel) of the sediment perturbation with the drag net trawling by fishing boats at Tomono-Ura, in the Seto Inland Sea.

結果および考察

海底泥中の珪藻類休眠期細胞の分布

海底耕耘非実施区域の Stn. A および耕耘実施区域内の Stn. B の 2 定点において、2016 年 7 月 7 日に得た海底泥中の珪藻類休眠期細胞の分布密度と分類群組成を Table 2 に示した。密度は Stn. A で 2.8×10^5 MPN g^{-1} 湿泥、Stn. B で 1.2×10^5 MPN g^{-1} 湿泥で検出された。本海域の海底泥中には珪藻類休眠期細胞が高密度に存在し、そのうちの約 80% 以上が浮遊性種である中心目で占められていた。また、本調査地点の水深は約 5 m と比較的浅い観測点であることから、*Navicula* 属や *Nitzschia* 属等の底生羽状目珪藻類も比較的多く検出された。採取した海底泥試料は冷暗所に 3 ヶ月程度保存したため、休眠期細胞形成種のみが検出されたと考えられる。しかしながら、*Navicula* 属については休眠期細胞の存在の報告は殆ど知られておらず (McQuoid et al., 2002)、今後は本属の休眠期細胞の解明が必要である。

海底耕耘

海底耕耘は、2016 年 7 月 7 日と 8 日に艀の浦沖で行い、その後 Stn. A (非耕耘区)、Stn. B (耕耘区) の 2 地点で 7 月 15 日まで、海洋環境と赤潮ラフィド藻 *C. antiqua* を含む植物プランクトンのモニタリングを実施した (Fig. 2)。

調査期間中、水温および塩分は 22.6–25.5°C、23.2–31.6

Table 2. Densities and taxonomic list of the diatom resting stage cells enumerated with the extinction dilution method (Imai et al., 1984). Sediment samples were collected on 7 July 2016 just before the start of sediment perturbation with dragnet trawling by fishing boats in the coastal sea of Tomonoura, Hiroshima Prefecture.

Station	Taxa	MPN g^{-1} wet sediments
Stn. A	<i>Chaetoceros</i> spp.	5.8×10^2
	<i>Skeletonema</i> spp.	8.1×10^3
	<i>Thalassiosira</i> spp.	2.4×10^5
	Other centric diatoms	8.3×10^2
	<i>Navicula</i> spp.	1.7×10^3
	<i>Nitzschia</i> spp.	2.4×10^4
	Other pennate diatoms	1.3×10^3
	Total cell density	2.8×10^5
Stn. B	<i>Chaetoceros</i> spp.	1.9×10^3
	<i>Skeletonema</i> spp.	9.2×10^4
	<i>Thalassiosira</i> spp.	2.7×10^3
	Other centric diatoms	2.1×10^3
	<i>Navicula</i> spp.	4.0×10^3
	<i>Nitzschia</i> spp.	1.1×10^4
	Other pennate diatoms	1.9×10^3
	Total cell density	1.2×10^5

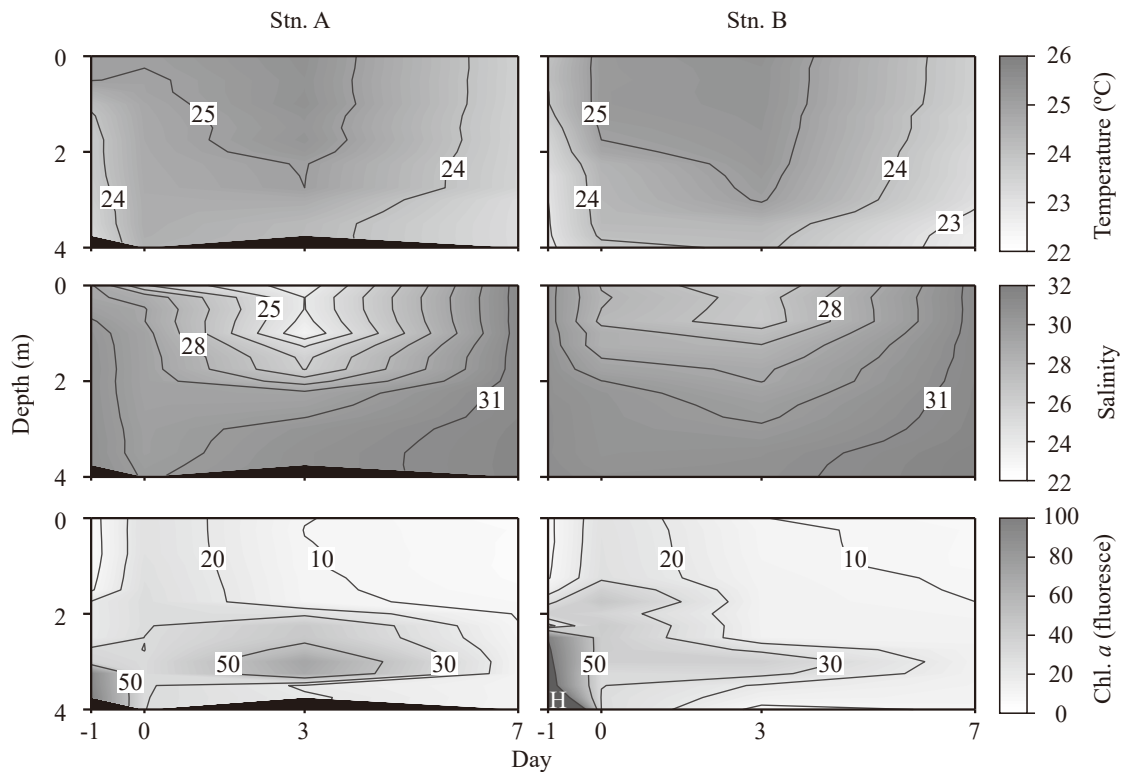


Fig. 3. Temporal changes in water temperature, salinity and chlorophyll a concentration at Stns. A and B in the coastal sea of Tomono-Ura in the Seto Inland Sea, from July 7 (day -1) to July 15 (day 7), 2016.

の範囲で変動し、両地点とも同様の変動の傾向が見られたことから、耕耘による影響はほとんど認められなかった (Fig. 3)。耕耘後3日目に両地点において表層塩分の低下が検出されており、芦田川からの河川水の流入が想定された。Chl. *a* 値は、-1日目(耕耘前)の底層において、Stn. Aで $98.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 、Stn. Bでは $270.3 \mu\text{g L}^{-1}$ の高い値を示していた。これは赤潮渦鞭毛藻 *Prorocentrum dentatum* が高

密度に確認されたためである。海底耕耘の直後(0日目)、Chl. *a* は Stn. A で表層から底層まで $26.3 \sim 30.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 、Stn. B で $26.0 \sim 47.0 \mu\text{g L}^{-1}$ の比較的均一な値を示した。Stn. B の最大値は水深 1.75 m で検出された。この様な結果は、海底付近に集積されていた *P. dentatum* が海底耕耘によって攪拌され分散された結果と考えられる。

溶存酸素と光強度は Fig. 4 に示した。底層の溶存酸素は

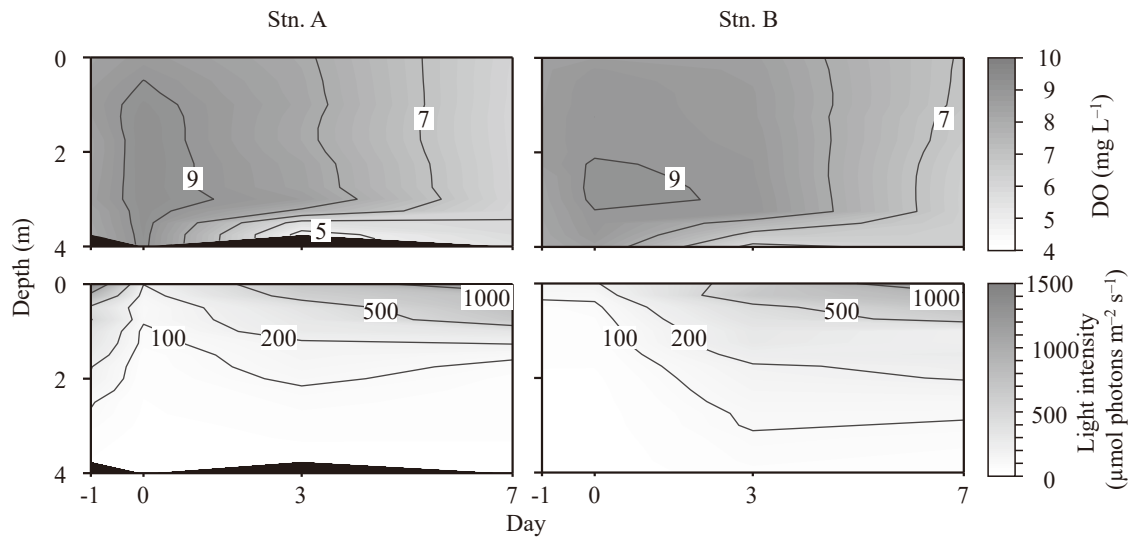


Fig. 4. Temporal changes in dissolved oxygen (DO) and light intensity at Stns. A and B in the coastal sea of Tomono-Ura in the Seto Inland Sea, from July 7 (day -1) to July 15 (day 7), 2016.

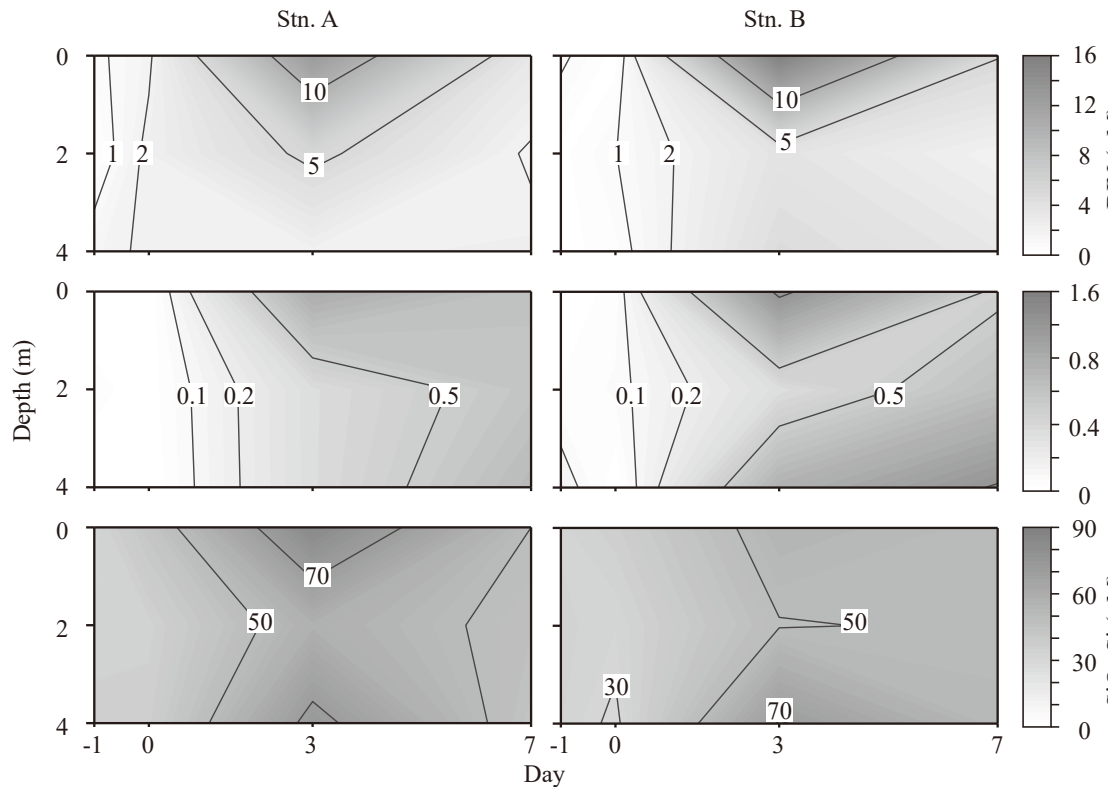


Fig. 5. Temporal changes in inorganic nutrients of DIN ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$), $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_2\text{-Si}$ at Stns. A and B in the coastal sea of Tomono-Ura in the Seto Inland Sea, from July 7 (day -1) to July 15 (day 7), 2016.

7日目までゆっくりとした減少傾向を示した。底層の光強度は、Stn. A で $13\sim32.3\ \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、Stn. B では $8.3\sim58.0\ \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の値を示した。珪藻類休眠期細胞の発芽および同栄養細胞の生存と増殖の可能な範囲内にあった。

栄養塩類 (DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$) に関しては Fig. 5 に変動を示した。Stn. A において DIN は $0.2\sim12.8$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は検出限界以下 $-0.8\ \mu\text{M}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は $32.2\sim83.8\ \mu\text{M}$ の範囲であった。Stn. B では、DIN は $0.1\sim15.9$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は検出限界以下 $-1.0\ \mu\text{M}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は $28.8\sim70.8\ \mu\text{M}$ の値の範囲で変動した。耕耘

3日目に表層で栄養塩濃度が上昇し、特に DIN で顕著であった。これは降雨の後の芦田川からの河川水の影響と考えられた。

海底耕耘後の表層 (0 m)、中層 (2 m)、ならびに底層 (4 m) における両地点での植物プランクトンの動態を Fig. 6 に示した。非耕耘区の St. A では、珪藻類が $61\sim376\ \text{cells mL}^{-1}$ 、*Chattonella* が $0\sim30\ \text{cells mL}^{-1}$ の細胞密度で推移した。耕耘を行った St. B では珪藻類が $48\sim1,383\ \text{cells mL}^{-1}$ 、*Chattonella* は $0\sim34\ \text{cells mL}^{-1}$ の細胞密度の範囲であった。珪藻類の挙動を見ると、耕耘を行わなかった Stn. A では耕耘の前後

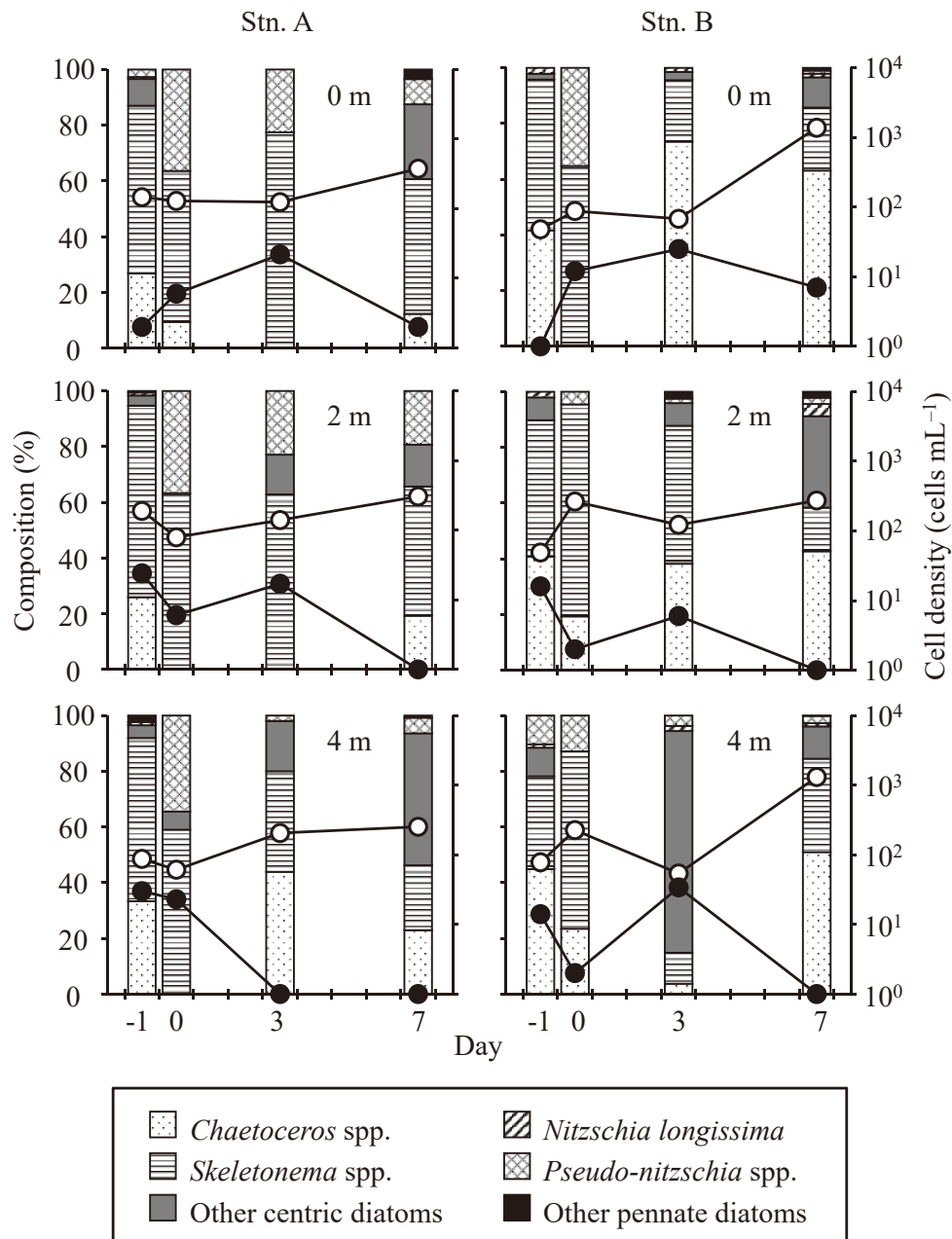


Fig. 6. Changes in cell densities of *Chattonella* (●) and diatoms (○) and taxa composition histograms of diatoms at three depths (0 m, 2 m and 4 m) at Stns. A and B in the coastal sea of Tomono-Ura in the Seto Inland Sea, from July 7 (day -1) to July 15 (day 7), 2016.

でさほど変動は認められなかったが、耕耘を実施した Stn. B においては 0 日目 (耕耘直後) に有意に増加していた。特に、2 m 層で 78 cells mL⁻¹ から 226 cells mL⁻¹、4 m の底層で 49 cells mL⁻¹ が 5 倍強の 264 cells mL⁻¹ へと有意に増加した。海底耕耘によって水中に珪藻類の栄養細胞 (休眠期細胞の速やかな発芽・復活) が 10² cells mL⁻¹ のオーダーの密度で供給されたと考えられる。そのことにより *Chattonella* が 10⁰-10² cells mL⁻¹ 存在していても、その増殖が抑制されたと言えよう。

その後、芦田川からの栄養塩類の供給があり (3 日目)、7 日目には表層で耕耘前 (-1 日目) の約 30 倍にまで珪藻類は増加した。一方 *Chattonella* は、耕耘前 (-1 日目) に中底層で 14-30 cells mL⁻¹ の密度で存在していたが、7 日目までに増殖することなく珪藻の増殖に伴って衰退した。全体的に見るならば、今回の海底耕耘によって珪藻類の卓越が認められ、明らかに *Chattonella* の増殖が抑制される結果となった。

ボトル培養実験

海底泥中の休眠期細胞が発芽・復活して発生した珪藻と *Chattonella* の競合試験を、ボトル培養実験を用いて行った。試料は海底耕耘実施直後の St. B における 2 m 層より採取して用いた。ボトル内の栄養塩類の変動を見ると、実験区毎に若干のばらつきはあるものの、試験開始 2-4 日目にかけて急激な濃度の減少が認められた (Fig. 7)。特に窒素とリンで枯渇が著しい。

植物プランクトン量の指標である Chl. *a* 濃度を見ると、SWM-3 培養液を 1/100 強度 (N で 20 μM, P で 1 μM) で添加したボトル中では 2 日目に増加しており、栄養塩の添加効果が認められた (Fig. 8)。その後、14 日目まで減少傾向を示した。栄養塩を添加しなかったボトル中では、Chl. *a* 量の増加は認められず減少した。

各ボトル中での *Chattonella* および植物プランクトンの

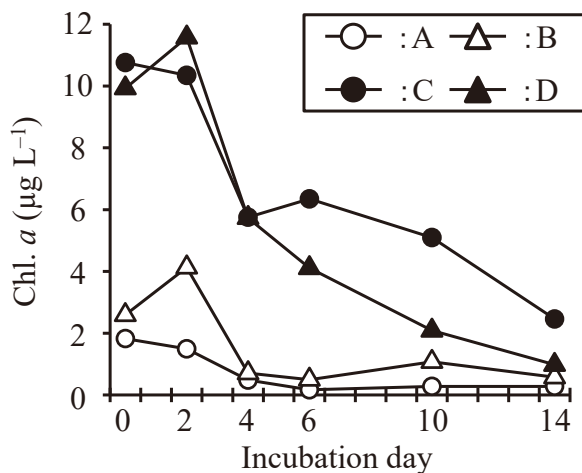


Fig. 7. Changes in chlorophyll *a* in the experimental bottles during the bottle experiment. See Table 1 for the explanation of the bottles A-D.

挙動 (細胞数および分類群組成) を Fig. 9 に示した。 *Chattonella* は増殖することなく一方的に減少し始め、早いものでは 4 日目あるいは 6 日目までに消滅した。 *C. antiqua* を加えただけのものでも 14 日目までに死滅した。特に

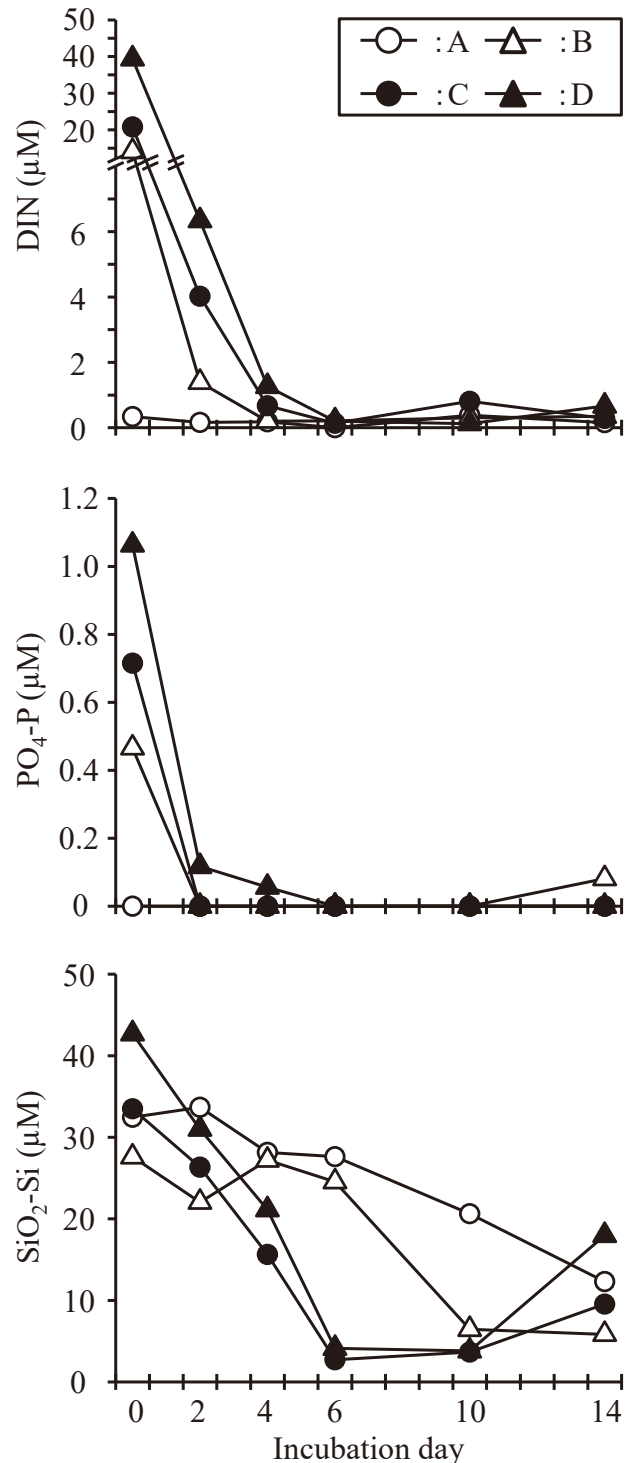


Fig. 8. Changes in inorganic nutrients of DIN (NO₃-N + NO₂-N + NH₄-N), PO₄-P and SiO₂-Si in the experimental bottles during the bottle experiment. See Table 1 for the explanation of the bottles A-D.

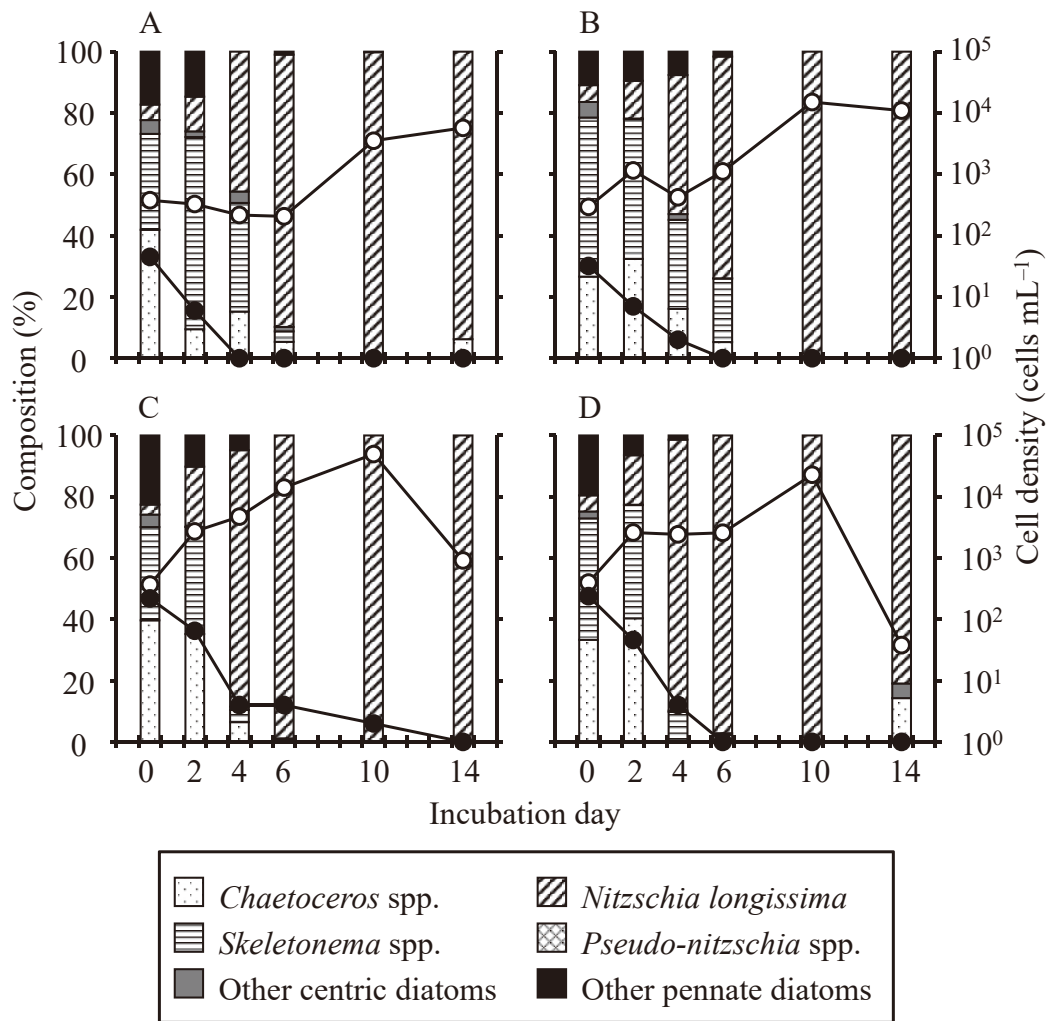


Fig. 9. Changes in cell densities of *Chattonella* (●) and diatoms (○) and taxa composition histograms of diatoms in the experimental bottles during the bottle experiment. See Table 1 for the explanation of the bottles A-D.

Chattonella が低密度に存在していた実験区 A と B において早く消滅する傾向があった。一方、珪藻類は順調に増殖して概ね 10^4 細胞 mL^{-1} の密度にまで達したが、これにより *Chattonella* は駆逐されたと考えられる。なお最終的に優占化した珪藻は、今回の実験では羽状目珪藻の *Nitzschia longissima* であった。

大分県佐伯市沖松浦漁港で得た海底泥をボトルに入れ、泥濃度を 0.1 g L^{-1} とし、沿岸の海にボトルを吊り下げた場合 (0 m, 5 m, 9 m)、休眠期細胞から発芽して生じた珪藻類が増殖して *C. antiqua* や *K. mikimotoi* は抑制される事が示されている (Imai et al., 2017)。以上から、本研究の成果と併せ、珪藻休眠期細胞を高密度に含有する海底泥が海底耕耘によって巻き上げられて発生した海水中の植物プランクトン群集において、休眠期細胞の発芽を通じて発生した珪藻類が増殖して卓越する事は、普遍的あるいは大変頻度の高い現象と考えられる。これは海底耕耘後の現場の水における植物プランクトン群集の推移の結果を矛盾なく説明している。しかしながら、栄養塩や光条

件についても海底耕耘の事例毎にデータを蓄積し、珪藻類が圧倒的に優占し易い環境条件を明確にして行く事が重要であろう。

珪藻ブルームの発生と休眠期細胞

沿岸域の海底泥中には、主たる浮遊珪藻の中心目珪藻類の休眠期細胞が豊富に存在する (今井ら, 1990, 2015; Itakura et al., 1997; McQuoid et al., 2002)。これは浮遊珪藻類がブルームを形成した後、栄養塩の枯渇などが引き金となって大量の休眠期細胞を作り海底へと沈降していった結果である (Smetacek, 1985)。これら海底の休眠期細胞は水柱のブルームの発生源となっている (Garrison, 1981; McQuoid and Godhe, 2004)。低気圧による荒天の影響で海底泥が再懸濁し、それによってブルームが発生することが知られている (Takahashi et al., 1977)。また、底曳き網などの漁業活動によっても海底泥の再懸濁は起こる (Pilskaln et al., 1998)。かつて広島湾においてはナマコ漁の解禁が 11 月 1 日であり、一斉に底引き網の操業がなされ、

水深 20 m 程度の場所では水深 10 m くらいから下は再懸濁された海底泥で強く濁っていた。そして 1 週間を経ずに珪藻の大ブルームが発生していた。すなわち、海底泥中に存在する浮遊珪藻の休眠期細胞が有光層の浮遊珪藻のブルームの発生源になっており、通常は荒天などの自然現象によって海底から有光層に海底泥と共に持ち上げられ、ブルームのための Seed population になっていると想定される。底引き網漁業の盛んな海域においても、珪藻類のブルームが頻繁に起こっているであろうことは容易に想像できよう。本研究により、現場で海底耕耘によって実際に珪藻の細胞数が増え、後に浮遊珪藻のブルームが発生し、有害赤潮ラフィド藻が制御されたと考えられる。またボトル実験によってもそれは支持された。また、有害鞭毛藻は動物プランクトンに忌避されるが、珪藻類は良い餌になるので、珪藻類のブルームを頻繁に人為的に発生させることは、単に有害赤潮の被害の未然予防にとどまらず、健全な食物連鎖の駆動を促進することから漁業生産に貢献する可能性があると考えられる。

今後の展望

鰯の浦沖の海底堆積物中には発芽可能な珪藻類休眠期細胞が豊富に存在しており、これらを海底耕耘によって巻き上げることにより、珪藻類の卓越ならびに有害赤潮鞭毛藻類の増殖を抑制できたことから、赤潮発生初期過程の海域において海底耕耘を行う事は赤潮の発生抑制に対して効果的であると考えられた。また、より効率的に海底泥を攪拌懸濁させて有光層にまで巻き上げ持ち上げるような、器具や運用技術の改善と工夫が必要となるが、これは解決可能と想定される。以上から、今後も様々な条件下においてデータ取得を積み重ね、再現性を確認し、耕耘開始のタイミングや規模、天候との関係、現場の栄養塩環境との関係等について調査・研究を行う事により、海底耕耘の技法をメニュー化して将来的に赤潮制御の実用化が期待される。この場合、現場の有害プランクトンや珪藻類等のモニタリングが基本となる。

海には様々な生物が共存し生息している。赤潮対策の直接的な技術として最低限クリアすべき基準としては、「実施した赤潮防除策が首尾よく成功した時も、また機能せず失敗した場合でも、現場の海洋生態系に著しい悪影響が及ばない」があげられる。この事を考慮すると、海底耕耘が有効であれば、赤潮防除と漁場改善が同時に達成できることから、究極の環境にやさしい技術となるであろう。

謝 辞

本研究を行うにあたり、海底耕耘を実施して戴いた福山地区漁業青年協議会ならびに鰯の浦漁業協同組合の関係者の皆様に、衷心より御礼を申し上げます。本研究は、水産庁の漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業のうち赤潮・貧酸素水塊対策推進事業の一貫で実施された。

記して感謝の意を表します。

文 献

- Chen, L.C.M., Edelman, T. and McLachlan, J. (1969) *Bonnemaisonia hamifera* Haiot in nature and in culture. *J. Phycol.*, **3**, 211-220.
- Garrison, D.L. (1981) Montrey Bay phytoplankton. II. Resting spore cycles in coastal diatom populations. *J. Plankton Res.*, **3**, 137-156.
- 今井一郎 (1995) 珪藻類を用いたシャットネラ赤潮の生態学的防除の可能性. 月刊海洋, **27**, 603-612.
- 今井一郎 (2000) 赤潮微細藻類の計数と無菌培養法. pp. 85-90, 石田祐三郎・杉田治男 (編), 海洋環境アセスメントのための微生物実験法, 恒星社厚生閣, 東京.
- 今井一郎 (2010) 海底耕耘による赤潮防除の可能性. 海洋と生物, **32**, 378-379.
- 今井一郎 (2012) シャットネラ赤潮の生物学. 生物研究社, 東京, 184p.
- 今井一郎 (2014) 赤潮. pp. 248-256, 水産海洋学会 (編), 水産海洋学入門, 講談社, 東京.
- Imai, I. (2015) Interactions between harmful algae and algicidal and growth-inhibiting bacteria associated with seaweeds and seagrasses. pp. 597-619, Ohtsuka, S., Suzuki, T., Horiguchi, T., Suzuki, N. and Not F. (eds), *Marine Protists*, Springer Japan, Tokyo.
- 今井一郎 (2017) 赤潮原因プランクトンの特徴と実用化が期待される対策. 養殖ビジネス, **54**(3), 3-7.
- Imai, I., Itoh, K. and Anraku, M. (1984) Extinction dilution method for enumeration of dormant cells of red tide organisms in marine sediments. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **31**, 123-124.
- 今井一郎・板倉 茂・伊藤克彦 (1990) 播磨灘および北部広島湾の海底泥中における珪藻類の休眠細胞の分布. 沿岸海洋研究ノート, **28**, 75-84.
- Imai, I., Itakura, S., Yamaguchi, M. and Honjo, T. (1996) Selective germination of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) cysts in bottom sediments under low light conditions: a possible mechanism of red tide initiation. pp. 197-200, Yasumoto, T., Oshima, Y. and Fukuyo, Y. (eds.), *Harmful and Toxic Algal Blooms*, IOC-UNESCO, Paris.
- 今井一郎・石田貴子・板倉 茂・山口峰生 (2015) 播磨灘および大阪湾における海底泥中の珪藻類休眠期細胞の分布と組成. 北大水産彙報, **65**, 31-38.
- Imai, I., Imai, Y., Morita, K., Miyamura, K., Noda, M. and Ishii, K.I. (2017) *In situ* bottle experiments demonstrating feasibility of diatom resting stage cells in sediments to prevent red tides of noxious flagellates. *Proceedings of the JSFS 85th Anniversary-Commemorative International Symposium "Fisheries Science for Future Generations"*, No. 05007.
- Itakura, S., Nagasaki, K., Yamaguchi, M. and Imai, I. (1996) Species succession between *Skeletonema costatum* and *Heterosigma akashiwo* in Hiroshima Bay, Japan, with special reference to the resting stage cells in the bottom sediments. pp. 373-376, Yasumoto, T., Oshima, Y. and Fukuyo, Y. (eds.), *Harmful and Toxic Algal Blooms*, IOC-UNESCO, Paris.
- Itakura, S., Imai, I. and Itoh, K. (1997) "Seed bank" of coastal planktonic diatoms in bottom sediments of Hiroshima Bay, Seto Inland Sea, Japan. *Mar. Biol.*, **128**, 497-508.
- 伊藤克彦・今井一郎 (1987) ラフィド藻. pp. 122-130, 日本水産資源保護協会 (編), 赤潮生物研究指針, 秀和, 東京.
- 稲葉信晴・坂見知子・今井一郎 (2017) アマモ場に生息する微生物による赤潮防除の可能性. 月刊養殖ビジネス,

54 (3), 32-35.

McQuoid, M.R. and Godhe, A. (2004) Recruitment of coastal planktonic diatoms from benthic versus pelagic cells : Variations in bloom development and species composition. *Limnol. Oceanogr.*, **49**, 1123-1133.

McQuoid, M.R., Godhe, A. and Nordberg, K. (2002) Viability of phytoplankton resting stages in the sediments of a coastal Swedish fjord. *Eur. J. Phycol.*, **37**, 191-201.

村田圭助 (2017) 粘土散布による赤潮防除効果のメカニズムと改良粘土の開発. 養殖ビジネス, **54** (3), 17-19.

中西 敬 (2002) 生物生産に係る沿岸の環境修復技術. pp. 60-70, 松田 治・古谷 研・谷口和也・日野明德 (編) 「水産業における水産環境保全と修復機能」水産学シリーズ 132, 恒星社厚生閣, 東京.

中山奈津子 (2017) ウイルスで赤潮の拡大を抑制 : 微生物を含む海底泥を用いた赤潮対策. 月刊養殖ビジネス,

54 (3), 13-16.

Pilskaln, C.Y., Churchill, J.H. and Mayer, L.M. (1998) Resuspension of sediment by bottom trawling in the Gulf of Maine and potential geochemical consequences. *Conservation Biol.*, **12**, 1223-1229.

Seger, A., Park, T.G. and Hallegraeff, G. (2017) Assessment of the efficacy of clay flocculation in Korean fish farm waters : *Cochlodinium* cell removal and mitigation of ichthyotoxicity. *Harmful Algae*, **61**, 46-55.

Smetacek, V. (1985) Role of sinking in diatom life-history cycles : ecological, evolutionary, and geological significance. *Mar. Biol.*, **84**, 239-251.

Takahashi, M., Seibert, D.L. and Thomas, W.H. (1977) Occasional blooms of phytoplankton during the summer in Saanich Inlet, B.C. Canada. *Deep-Sea Res.*, **24**, 775-780.