

海底耕耘による珪藻類休眠期細胞を活用した有害赤潮の発生防除に関する研究

【はじめに】

わが国における有害赤潮は西日本の沿岸域を中心に多く発生し、養殖魚介類を大量斃死させ、甚大な漁業被害を引き起こしている。瀬戸内海では、ほぼ毎年赤潮による漁業被害が生じており、有効な赤潮対策が焦眉の急となっている。これまでに様々な直接的対策が提案されてきたが、コストや環境への悪影響といった問題から殆ど実用化には至っていない。そこで近年、環境に優しく、コストの小さい赤潮防除法として、海底耕耘が提案されている。これは、海底泥中に豊富に存在する珪藻類休眠期細胞を有光層に捲き上げて発芽させ、生じた栄養細胞の増殖により水柱の栄養塩の消費を通じて有害赤潮鞭毛藻類の増殖を未然に防ぐという手法である。

本研究では、海底耕耘を赤潮発生前に行い、実用化に向けたさらなるデータの集積を目指した。また、海底耕耘を行う前後の現場海水を用いた培養実験や、海底泥を投入したメソコズム実験等を通して、赤潮防除に向けた珪藻類休眠期細胞の活用の有効性について検討を加えた。

【材料と方法】

1. 海底耕耘を活用した *Chattonella* 赤潮の発生予防の試み

広島県福山市鞆の浦沿岸において、2017年6月26-29日および7月24-28日の期間、0(耕耘前)、1(耕耘直後)、3または4日目に採水及び水理環境の測定を行った。また、耕耘前の0日目には、エクマンバージ採泥器による採泥を行った。耕耘区に Stn. A、耕耘区外に Stn. B を設定し(共に水深約3-5 m)、耕耘は、6月26日と7月24日の調査後及び、6月27日と7月25日の調査直前の合計2回を各実験の際に実施した。海水試料はポリバケツとバンドン採水器を用い、各実験区の定点(水深約3-5 m)において表層、2 m、4 m の各3層から、水深4 m 以上の場合は bottom を追加し、各4層から採取した。得られた海水試料は植物プランクトンの同定と計数に供し、試水を濾過して栄養塩の測定に用いた。植物プランクトンの同定と計数は、Stn. A(耕耘区内)でのみ行った。海底堆積物試料は MPN 法により珪藻類休眠期細胞の分類群組成を調べ密度を推定した。

2. 海底耕耘前後の現場海水を用いた培養実験による珪藻類と *Chattonella* の競合試験

実験は2017年6月26日-7月3日、7月24日-8月1日の間、各々約1週間実施した。現場海水試料は海底耕耘実施直前、及び直後の耕耘区内の2 m 層より採取し、それぞれボトル1)、2)とした。それぞれの試料は3本立てとし、インキュベータ内にて温度25°C、光強度200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期14 h L:10 h Dの条件下で培養した。培養開始から約3日間は毎日、その後は隔日で副試料を採取し、植物プランクトンの同定と計数、栄養塩の測定に供した。

3. メソコズムを用いた海底耕耘の効果の検証

調査は、広島県福山市田尻港において、2017年7月24-31日の期間、0(メソコズム設置直前)、1、4、7日目に採水及び水理環境の測定を行った。7月24日に深さ2.5 m、直径1 mのメソコズムを棧橋(水深約4 m)に設置し、同日耕耘区内にて採取した海底泥を、海水中の泥濃度として0.1 g L^{-1} となるように2.5 kg投入散布した。メソコズム内を stn. X、メソコズム外を Stn. Y と設定した。海水試料はポリバケツとバンドン採水器を用い、表層から1 m ごとの各層から採取した。得られた海水試料は植物プランクトンの同定と計数に供し、濾過処理した試水で栄養塩の測定を行った。

【結果】

1. 海底耕耘を活用した *Chattonella* 赤潮の発生予防の試み

6月の調査期間中、水温は20.6-24.6°C、塩分は30.3-33.2の範囲で変動した。3日目に St. A の0 m と2 m 層における $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 濃度は大幅に低下していた。また0日目と3日目の Si:N 比を比較すると、2 m と4 m で減少していた。珪藻類休眠期細胞は0日目の Stn. A で $1.68 \times 10^5\text{-}3.00 \times 10^5$ MPN g^{-1} 湿泥の範囲で検出された。植物プランクトンの変動を見ると、珪藻類は0日目に $1590\text{-}2160$ cells mL^{-1} 存在していたが、3日目には約2倍の $3620\text{-}3980$ cells mL^{-1} まで増加した。優占していたのは中心目珪藻類の *Chaetoceros* 属と *Skeletonema* 属である。一方赤潮ラフィド藻 *Chattonella* 属は0日目に最大 91 cells mL^{-1} (2 m) 存在していたが、3日目には $0\text{-}2$ cells mL^{-1} にまで急激に減少した。

7月の調査期間中、水温は25.4-27.6°C、塩分は30.8-32.4の範囲で変動した。各栄養塩は珪藻類の増殖に十分な濃度であった。珪藻類休眠期細胞は Stn. A で $6.15 \times 10^4\text{-}1.19 \times 10^5$ MPN g^{-1} 湿泥の範囲で分布していた。珪藻類は4日目の表層において

0 日目 (25 cells mL^{-1}) の約 70 倍 ($1680 \text{ cells mL}^{-1}$) まで増加した。表層 0 m では中心目珪藻類の *Chaetoceros* 属, *Skeletonema* 属が優占して出現した。鞭毛藻の *Chattonella* 属は 0 日目に $5\text{-}12 \text{ cells mL}^{-1}$ と比較的低密度に分布していたが, 4 日目にはさらに $0\text{-}2 \text{ cells mL}^{-1}$ にまで減少した。

2. 海底耕耘後の現場海水を用いた培養実験による珪藻類と *Chattonella* の競合試験
6 月の実験期間中, ボトル 1) と 2) において, DIN, $\text{SiO}_2\text{-Si}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ はおおよそ類似した挙動を示し, 各栄養塩濃度は実験開始後から徐々に減少した。実験 1 日目から両ボトルで $\text{SiO}_2\text{-Si}$ による増殖の制限が確認された。植物プランクトンの変動を見ると, ボトル 1), 2) の両方において, 実験期間を通して珪藻類は *Chattonella* 属よりも優占していたが, 1 日目以降, 徐々に減少した。*Chattonella* 属は両ボトル内で減少し, 特にボトル 2) においては増殖することなく減少を続け, 最終的に検出されなくなった。ボトル中の植物プランクトンの種組成を見ると, 中心目珪藻類が全珪藻類の 6 割を占めていた。

7 月の実験期間中, 両ボトル中の DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は概ね緩やかに減少し, いずれにおいても珪藻類の増殖に十分な濃度が存在していた。珪藻類の細胞数は, ボトル 1) では実験開始 5 日目には 0 日目の約 40 倍 ($2520 \text{ cells mL}^{-1}$), ボトル 2) では 6 日目に 1 日目の約 11 倍 ($726 \text{ cells mL}^{-1}$) まで増殖した。実験期間中, 珪藻類は *Chattonella* 属よりも常に優占していた。中心目珪藻 *Skeletonema* 属から, 羽状目珪藻 *Nitzschia longissima* への優占種の遷移が観察された。ボトル 2) において, 1 日目から 2 日目に最大増殖速度以上の細胞数の増加が観察された。*Chattonella* 属は両ボトル内で減少し, 特にボトル 2) においては培養開始から増殖することなく減少を続け, 最終的に検出されなくなった。

3. メソコズムを用いた海底耕耘の効果の検証

実験期間中, 水温は $25.6\text{-}30.4^\circ\text{C}$, 塩分は $30.0\text{-}32.3$ の範囲の値を示した。植物プランクトンは, Stn. X の全層において, 珪藻類が実験開始 7 日目に 0 日目の約 10 倍に増殖し, 表層で最大密度 $2160 \text{ cells mL}^{-1}$ 検出された。一方, メソコズムの外の Stn. Y では, 実験開始 7 日目に珪藻類細胞密度は非常に小さい値を示し, 一方で *Chattonella* 属は 2 m 層で $833 \text{ cells mL}^{-1}$ まで増殖していた。

【考察】

実験区の堆積物中には, 中心目珪藻類の休眠期細胞が豊富に存在していた。また, 6 月, 7 月の両実験期間中, 現場の水理環境は珪藻類の増殖に適したものと判断された。本実験区は水深が浅いため, 海底付近までの光環境は珪藻類休眠期細胞の発芽に適していた。6 月の各層では耕耘後に濁度が上昇し, 耕耘後から 3 日目までに珪藻類の有意な増殖が確認されたことから, 耕耘によって珪藻類休眠期細胞が巻き上げられ, 発芽した栄養細胞が, 増殖したと考えられる。珪藻類の増殖と栄養塩の挙動は一致しており, 珪藻類が優占して栄養塩を吸収したことにより有害鞭毛藻類 *Chattonella* 属の増殖が抑制されたと判断された。また, *Chattonella* 属が $10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ オーダーの密度で存在する場合も, 海底耕耘は有効であることが示された。対して 7 月の海底耕耘では, 耕耘後も 6 月の耕耘時のような濁度の上昇は見られなかったことから, 珪藻類休眠期細胞の発芽・増殖に時間を要した。しかし, *Chaetoceros* 属と *Skeletonema* 属の細胞密度の増加量がこれらの属の一般的な増殖速度から計算される増加量を上回っていた。したがって, 耕耘によって水柱に休眠期細胞が海底から供給され, 発芽・増殖した結果, *Chattonella* 属の増殖は抑制されたと考えられる。

6 月のボトル培養実験では, 実験開始時から珪酸塩制限が確認されたため海底耕耘の効果は評価困難であった。しかし 7 月のボトル培養実験においては, 珪藻類の増殖によって *Chattonella* の増殖が抑制されたと考えられる結果が得られた。また, 6 月, 7 月の両方で, 耕耘後の海水のボトル培養実験の結果, DIN は増殖に十分な濃度であったにもかかわらず, 有害鞭毛藻類の増殖は観察されなかったことから, 海底耕耘による有害藻類の増殖促進という影響はないことが示唆された。

メソコズム実験においては, 内側の Stn. X で外側の Stn. Y と比較して *Chattonella* の増殖が抑えられており, これは珪藻類休眠期細胞を豊富に含む海底泥を散布したことにより, 珪藻類が水柱で優占したためと考えられる。

以上から, 有害藻類による赤潮の防除対策として, 珪藻類休眠期細胞が豊富に存在する海域での海底耕耘は有効であることが示唆された。また, 有害赤潮防除に有効な耕耘のタイミングについての基礎的情報を得ることができた。今後は海底耕耘の実用化と技術のメニュー化に向けて更なるデータを蓄積し, 手法のマニュアル化を目指す必要がある。