

沿岸域における有害赤潮の出現動態  
および海底耕耘を活用した有害赤潮発生予防に関する研究  
(修士論文中間発表)

【はじめに】

西日本沿岸域では、渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* や *Cochlodinium polykrikoides*, ラフィド藻 *Chattonella* spp. や *Heterosigma akashiwo* による有害赤潮が頻発し、養殖魚介類を中心に大量斃死を招いている。北海道函館湾においても、2015年10月に北日本初記録となる *K. mikimotoi* 赤潮の発生ならびにスルメイカやシロサケの斃死などの漁業被害が報告された。また最近では、北海道余市沿岸域で *K. mikimotoi* をはじめとする有害赤潮藻類が検出されていることから、対馬暖流による有害赤潮藻類の北方への分布拡大が示唆されている。こうした有害赤潮の発生に対する実用的な解決策は、粘土散布を除き乏しいのが現状である。そこで近年、生物学的防除策として海底耕耘が提案されている。これは、現場の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巻き上げ、発芽・増殖させ、水柱の栄養塩消費を通じて有害赤潮藻類の増殖を未然に防ぐという手法である。

本研究では、北海道函館湾における *K. mikimotoi* の出現動態を明らかにするとともに、対馬暖流の分岐海流に当たる津軽暖流域における有害赤潮藻類の水平分布について調査した。また、広島県福山市沿岸域において、実際に *Chattonella* 赤潮の発生直前に海底耕耘を実施し、発生予防における有効性について検討した。また、現場海水を用いたボトル培養実験も同時に行い、巻き上げられた珪藻の有効性を検証した。

【材料と方法】

1. 北海道函館湾における *K. mikimotoi* の出現動態

調査は函館市国際水産・海洋総合センター岸壁 (Stn. HKK) において、2015年5月28日-2017年10月19日の期間、月1-3回の頻度で採水および環境要因の測定を行った。ただし、*K. mikimotoi* の出現を確認した場合は、消滅まで原則毎週1回の調査を行った。また、2016年5-10月の間、毎月1回エクスマンバージ採泥器による採泥を行った。海水試料はバケツおよびバンドーン採水器を用いて表層、5, 9 m (海底上1 m) 層の各層から採取し、直ちに水温を計測した。塩分は後日、実験室で測定した。得られた海水試料は、植物プランクトンの同定と計数ならびに栄養塩と *Chl. a* の測定に用いた。堆積物試料は MPN 法により、発芽・復活の可能な珪藻類休眠期細胞密度を推定した。

2. 津軽暖流域における有害赤潮藻類の水平分布

調査は2016年9月26-27日にかけて、津軽暖流域24定点において採水および環境要因の測定を行った。また、7定点にてスミスマッキンタイヤ採泥器により、堆積物試料を得た。海水試料はバケツおよびニスキンボトルを用いて表層、5, 10 m の3層から採取した。得られた海水試料は、直接検鏡と赤潮原因プランクトン検出キット1, 2 [1; *K. mikimotoi*, 2; *Chattonella* spp.] (LAMP 法) に供した。直接検鏡用試料として、海水試料500 mLを約10 mLまで濃縮したものを用意した。検出キットには、海水試料1 LをGF/Fフィルターを用いて濾過し、フィルター上に捕集したものをDNA抽出に用いた。ただし、1サンプルにつきフィルター1/4を使用した。堆積物試料は MPN 法により珪藻類休眠期細胞密度を推定した。

3. 海底耕耘を活用した *Chattonella* 赤潮の発生予防の試み

調査は広島県福山市鞆の浦沖にて2016年7月7-15日、および8月1-9日の期間、-1 (耕耘直前)、0 (耕耘直後)、2 または 3, 7 日目に採水および水理環境の測定を行った。また、-1 日目にはエクスマンバージ採泥器による採泥を行った。実験区は Stn. A (耕耘非実施区域)、および Stn. B (耕耘実施区域) の2定点を設け (共に水深約5 m)、耕耘は7月7日、8月1日の調査後および7月8日、8月2日の調査前の合計2回を各実験の際に実施した。海水試料はポリバケツおよびバンドーン採水器を用い、表層、2, 4 m 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、栄養塩および *Chl. a* の測定を行った。海底堆積物試料は MPN 法により珪藻類休眠期細胞の組成と密度を推定した。

4. 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

実験は2016年7月8-22日、および8月1-15日の間、各々約2週間実施した。海水試料は海底耕耘実施直後の Stn. B の2 m 層より採取した。条件としては、*C. antiqua* の添加濃度、1/100強度の改変 SWM-3 培地添加、および動物プランクトンの除去 (100  $\mu$ m) について有無の組み合わせで、7月の培養実験では6つの実験区を設けた (表1)。8月の実験では、耕耘実施前の海水試料を加えた8つの実験区を設けた (表2)。各ボトルはインキュベータ内にて温度25°C、明暗周期14 h L : 10 h D の条件下で培養した。培養開始0, 2, 4, 6, 10, 13 もしくは14日目に副試料を採取し、植物プランクトンの同定と計数、栄養塩および *Chl. a* の測定に用いた。

表1. 7月のボトル培養で設定した実験区。用いた培地は改変SWM-3。

実験区	現場海水試料	<i>Chattonella antiqua</i> 添加の有無	栄養強化の有無	動物プランクトン除去の有無
A	耕耘後	無添加	無添加	非除去
B	耕耘後	無添加	1/100強度添加	非除去
C	耕耘後	無添加	無添加	除去 (100 μm)
D	耕耘後	200 cells/mL添加	無添加	非除去
E	耕耘後	200 cells/mL添加	1/100強度添加	非除去
F	耕耘後	200 cells/mL添加	無添加	除去 (100 μm)

表2. 8月のボトル培養で設定した実験区。用いた培地は改変SWM-3。

実験区	現場海水試料	<i>Chattonella antiqua</i> 添加の有無	栄養強化の有無	動物プランクトン除去の有無
A	耕耘前	無添加	無添加	非除去
B	耕耘前	無添加	1/100強度添加	非除去
C	耕耘前	無添加	無添加	除去 (100 μm)
D	耕耘後	無添加	無添加	非除去
E	耕耘後	無添加	1/100強度添加	非除去
F	耕耘後	無添加	無添加	除去 (100 μm)
G	耕耘後	300 cells/mL添加	1/100強度添加	非除去
H	耕耘後	500 cells/mL添加	1/100強度添加	非除去

### 【結果と考察】

#### 1. 北海道函館湾における *K. mikimotoi* の出現動態

調査期間中、水温は 5–24.5°C、塩分は 29.2–34 の範囲で変動した。海底堆積物中の珪藻類休眠期細胞は  $2.2 \times 10^4$ – $1.3 \times 10^5$  MPN g<sup>-1</sup> wet sediments の範囲で推移した。ただし、9月と10月の堆積物中からは中心目珪藻類が検出されなかった。2015–2017年の連続調査より *K. mikimotoi* は各年秋季に出現が確認され、2015年は赤潮形成 (最大 630 cells mL<sup>-1</sup>; 0 m)、2016年は小規模ブルーム (<35 cells mL<sup>-1</sup>; 5 m)、2017年はブルーム非形成年 (<2 cells mL<sup>-1</sup>; 9 m) となった。また、*K. mikimotoi* の増殖は珪藻類細胞密度 (>10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup>) と水温 (10°C) によって制限されている可能性が示唆された。

#### 2. 津軽暖流域における有害赤潮藻類の水平分布

珪藻類休眠期細胞は  $5.7 \times 10^2$ – $1.4 \times 10^4$  MPN g<sup>-1</sup> wet sediments の範囲で分布しており、比較的水深の浅い定点 (約 20 m) では羽状目珪藻類が優占していた。*Karenia mikimotoi* は直接検鏡にて 5 定点、検出キットにて 2 定点から検出された。*Chattonella* spp. に関してはいずれの試料からも検出されなかった。このことから、有害藻類 *K. mikimotoi* は対馬/津軽暖流により運搬されている、もしくはすでに津軽暖流域に定着している可能性が挙げられた。

#### 3. 海底耕耘を活用した *Chattonella* 赤潮の発生予防の試み

7月の調査期間中、水温は 22.6–25.5°C、塩分は 23.2–31.6 の範囲で変動した。珪藻類休眠期細胞は  $1.2 \times 10^5$ – $2.8 \times 10^5$  MPN g<sup>-1</sup> wet sediments の範囲で分布していた。植物プランクトンの変動を見ると、Stn. B において 0 日目 (耕耘後) に珪藻類が有意に増加し、7 日目には表層で -1 日目 (耕耘前) の約 30 倍 (1380 cells mL<sup>-1</sup>) にまで増加した。一方 *Chattonella* spp. は、-1 日目に最高密度 34 cells mL<sup>-1</sup> 存在していたが、7 日目までに増殖することなく衰退した。以上から、珪藻類の卓越ならびに有害藻類の増殖抑制が実現できた。

8月の調査期間中、水温は 26.4–29.4°C、塩分は 27.5–31.3 の範囲で変動した。珪藻類休眠期細胞は  $5.4 \times 10^4$ – $1.7 \times 10^5$  MPN g<sup>-1</sup> wet sediments の範囲で分布していた。調査開始 0 日目には *Chattonella* 赤潮水塊の流入が認められ、*Chattonella* spp. は 4 日目に最高密度 1140 cells mL<sup>-1</sup> を記録したが、7 日目には検出されなくなった。この時、*Chattonella* spp. を捕食する従属栄養性渦鞭毛藻 *Gyrodinium dominans* が水柱で優占したことから、8月に形成された *Chattonella* 赤潮は *G. dominans* による捕食によって終息したものと推測された。

#### 4. 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

7月の実験期間中、全ての実験区において栄養塩は実験開始 2 日目より減少傾向を示し、4 日目以降 DIN, PO<sub>4</sub>-P とともに低い値で推移した。植物プランクトンの変動を見ると、ほとんどの実験区において、6 日目に珪藻類は 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup> を超え、*Chattonella* spp. は消滅した。これは、珪藻類が栄養塩類を優先的に利用し増殖した結果と考えられた。

8月の実験期間中、全ての実験区において栄養塩は実験開始 2 日目より減少傾向を示したが、6 日目には実験区 G, H において DIN, PO<sub>4</sub>-P が一時的に回復した。*Chattonella* spp. の変動に着目すると、10 日目の実験区 D–F において *C. ovata* が 25–173 cells mL<sup>-1</sup> の範囲で存在した。このことから、*Chattonella* spp. の中でも *C. ovata* は貧栄養環境下でも比較的強い耐性を備えていると考えられた。

### 【今後の予定】

2015–2017年における函館湾のデータを統計解析し、*K. mikimotoi* の出現動態と環境要因について考察を進めていきたいと考えている。

各務彰記