

(ノート) 有害プランクトン検出センサーを用いた *Karenia mikimotoi* 探索

中島吉洋

Searching of *Karenia mikimotoi* using HAI sensor

YOSHIHIRO NAKAJIMA

長崎県では有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* による赤潮が 1978 年から 2021 年までの 44 年間で 147 件発生している。<sup>1)</sup> そのうち 51 件で漁業被害が出ており、その対策は本県の水産業において大きな課題である。近年では、伊万里湾や九十九島において本種による赤潮が頻発しており、平成 29 年度に約 6.1 億円、<sup>2)</sup> 30 年度に約 5,580 万円、<sup>3)</sup> 31 年度には約 5,690 万円の被害をもたらしている。<sup>4)</sup>

*K. mikimotoi* による被害が甚大化する原因の一つに本種に特有の鉛直分布が挙げられる。本種は中層域で増殖期を迎える<sup>5-9)</sup>ため、海上からは目視での赤潮の発見が困難である。中層域で高密度化したものが曇天や雨天時に表層付近に突然浮上してくるため、餌止めや生簀の移動、粘土散布といった被害軽減策が遅れてしまうことで被害が大きくなる。早期の赤潮発見は漁業被害を軽減するうえで重要であり、モニタリングの正確性が求められる。特に粘土散布は、初期発生時（本県の赤潮発信基準は注意報が 100 cells/mL、警報が 500 cells/mL）に行うことで効果が大きいことが知られている。<sup>10)</sup>

JFE アドバンテック社製の有害プランクトン検出センサー（以後、HAI センサーと称す）は蛍光を測定し、蛍光波長 670 nm と 690 nm の蛍光強度の比から導出される FSI (Fluorescence spectral Shift Index = 690 nm 蛍光値/670 nm 蛍光値) を示す機器である。<sup>11)</sup> FSI はプランクトン種によって違いがあり、*K. mikimotoi* は他種に比べて高い値を示すことが確認されている。JFE アドバンテック社の公

表値では、*K. mikimotoi* は細胞密度が 50 cells/mL 以上で FSI が 1.95 以上を示す（閾値）とされている。HAI センサーを用いることで、目視での発見が困難な *K. mikimotoi* の増殖初期細胞を迅速・簡易的に検出できることが期待される。しかし、プランクトン組成の違いなど、海域によって FSI の検出閾値の設定が必要である（例えば大分県では検出閾値を FSI = 1.9 で運用）。本機器を用いた手法を確立するため、室内実験及び令和 3 年度の現場調査でデータを取得し、長崎県海域における閾値の設定を試みた。室内実験では *K. mikimotoi* の培養株に加え、競合種である珪藻類 (*Chaetoceros socialis*)、*K. mikimotoi* と増殖適水温・塩分が近似している渦鞭毛藻類で *K. mikimotoi* との混合赤潮を形成したことがある *Prorocentrum dentatum* (= *Prorocentrum shikokuense*)<sup>12)</sup> の培養株を用いた。

## 材料と方法

室内実験 1 ろ過海水、水産試験場前海水における *K. mikimotoi* 培養株単独での FSI 測定

測定用の容器に水産試験場前棧橋にて採取したろ過海水（孔径 0.7  $\mu\text{m}$  でろ過）または生海水を満たし、予備培養した *K. mikimotoi* (10-500 cells/mL の 17 段階または 10-200 cells/mL の 12 段階に調整) を添加し、HAI センサーで FSI を測定した。FSI は 10 秒間測定し、その平均値を用いた。なお、予備培養は水温 23°C、光強度 80  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、14 時間明、10 時間暗の明暗サイクルの条件下で行った。

## 室内実験 2 ろ過海水における珪藻類培養株単独及び *P. dentatum* 培養株単独での FSI 測定

測定用の容器にろ過海水（孔径 0.7  $\mu\text{m}$  でろ過）を満たし、予備培養した *C. socialis* (20-2,560 cells/mL の 9 段階に調整) を添加し、FSI を測定した。同様に、ろ過海水に予備培養した *P. dentatum* (10-1,710 cells/mL の 9 段階に調整) を添加し、FSI を測定した。

## 室内実験 3 *K. mikimotoi* と珪藻類または *P. dentatum* 培養株添加での FSI 測定

測定用の容器に *K. mikimotoi* を 100 cells/mL または 500 cells/mL になるように調整し、それぞれに *C. socialis* (10-2,990 cells/mL の 11 段階または 1-8,000 cells/mL の 11 段階に調整) または *P. dentatum* (10-1,150 cells/mL の 15 段階または 20-1,000 cells/mL の 10 段階に調整) を添加し、FSI を測定した。なお、供試培養株はいずれも長崎県北部海域で分離したクローン株である。

## 現場調査

調査は過去に *K. mikimotoi* の赤潮が多く発生している長崎県北部の伊万里湾東部 (図 1)、伊万里湾中・西部 (図 2)、佐世保湾 (図 3)、九十九島楠泊 (図 4)、南九十九島 (図 5) の 5 海域において、通常の定点採水 (0.5, 5 m 層) に加え、HAI センサーを用いて、クロロフィル蛍光値または FSI のピーク、FSI が 1.9 以上の層 (室内試験の結果より設定) でも採水し、検鏡した。なお、センサーで検出した層で的確に採水するためにセンサー部に採水器 (西村商会, I 型採水器) を併設した (図 6)。採取した海水は室内に持ち帰り、1 mL 中の *K. mikimotoi* を計数した。取得した FSI のデータは 0.1 m ごとの平均値を使用した。

## 結 果

### 室内実験 1

ろ過海水における *K. mikimotoi* の培養株単独での測定結果を図 7 に示す。*K. mikimotoi* 添加前の FSI は理論値 (プランクトン不在) の 1.0 付近であった。本県赤潮注意報基準の 100 cells/mL で FSI

は 2.03 であった。FSI は 100 cells/mL までは細胞密度の増加とともに FSI も同様に上昇したが、それ以上では FSI の上昇は緩やかとなった。

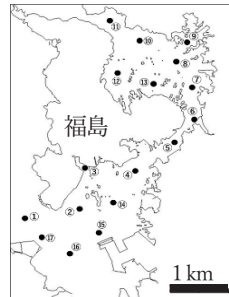


図 1 伊万里湾東部



図 3 佐世保湾

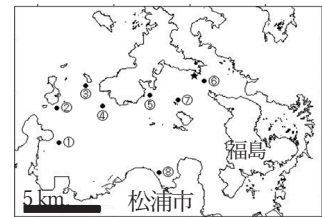


図 2 伊万里湾中・西部



図 4 九十九島楠泊



図 5 南九十九島



図 6 採水器を併設した HAI センサー

赤潮警報基準の 500 cells/mL で FSI は 2.31 であった。水産試験場前の生海水における *K. mikimotoi* の培養株単独区での測定結果を図 8 に示す。測定に使用した海水に *K. mikimotoi* の出現は見られず、小型の動物プランクトン類が 10 inds./mL、小型珪藻類が 9 cells/mL、小型渦鞭毛藻類 (*K. mikimotoi* 以外の種) が 4 cells/mL、*Octactis octonaria* (=珪質鞭毛藻 *Distephanus speculum*) が 1 cell/mL 混在していた。FSI は、*K. mikimotoi* の添加前で 1.68、100 cells/mL では 2.05 であった。*K. mikimotoi* の細胞密度の増加による FSI の上昇は、ろ過海水に比べて緩やかであった。本研究では早期の発見を目的としており、40 cells/mL で FSI = 1.9 を示したことから、メーカー公表値 (*K. mikimotoi*  $\geq$  50 cells/mL

で FSI  $\geq 1.95$ ) よりも低密度での発見を可能とするため、FSI = 1.9 を検出閾値として設定した。

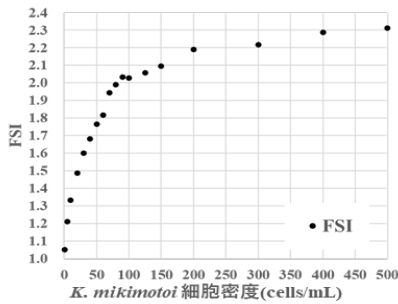


図7 ろ過海水での *K. mikimotoi* FSI 測定結果

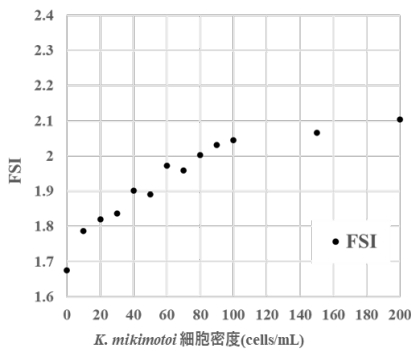


図8 水産試験場前生海水での *K. mikimotoi* FSI 測定結果

### 室内実験2

ろ過海水における *C. socialis* の培養株単独での測定結果を図9に示す。細胞密度が 640 cells/mL までは FSI が上昇したが、それ以上では FSI の上昇は緩やかになり、1.6 付近で横ばいとなった。*P. dentatum* の培養株単独での結果を図10に示す。細胞密度が 320 cells/mL までは FSI は上昇したが、それ以上では 1.6 付近で横ばいとなった。

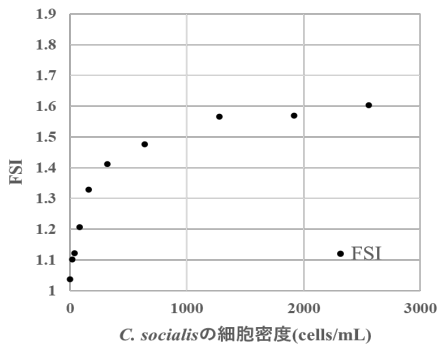


図9 ろ過海水での *C. socialis* 培養株単独 FSI 測定結果

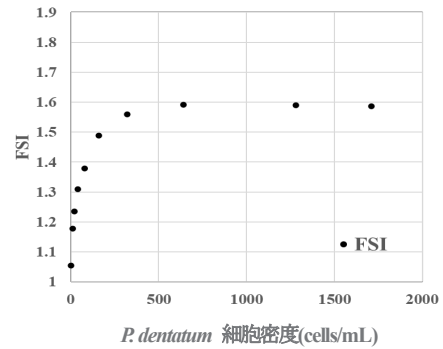


図10 ろ過海水での *P. dentatum* 培養株単独 FSI 測定結果

### 室内実験3

*K. mikimotoi* 100 cells/mL に *C. socialis* を添加した測定結果を図11に示す。FSI が 1.9 を下回ったのは、*C. socialis* が 1,280 cells/mL 以上であった。*K. mikimotoi* 500 cells/mL に *C. socialis* を添加した測定結果を図12に示す。*C. socialis* の細胞密度が 8,000 cells/mL 以下の全てで、FSI は閾値の 1.9 を上回った。*K. mikimotoi* 100 cells/mL に *P. dentatum* を添加した測定結果を図13に示す。FSI が 1.9 を下回ったのは、*P. dentatum* が 230 cells/mL 以上であった。*K. mikimotoi* 500 cells/mL に *P. dentatum* を添加した測定結果を図14に示す。FSI が 1.9 を下回ったのは *P. dentatum* が 400 cells/mL 以上であった。

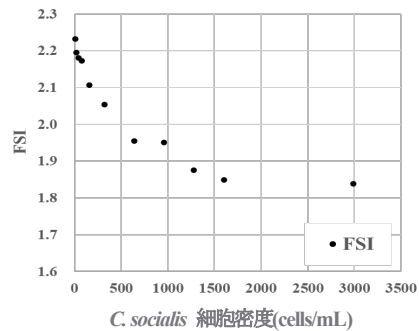


図11 *K. mikimotoi* 100 cells/mL に *C. socialis* を添加した FSI 測定結果

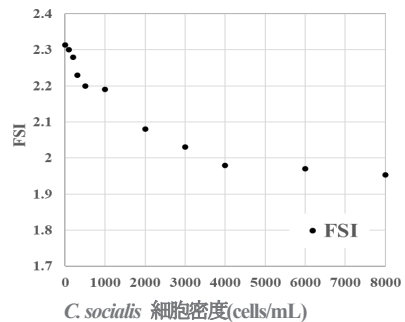


図12 *K. mikimotoi* 500 cells/mL に *C. socialis* を添加した FSI 測定結果

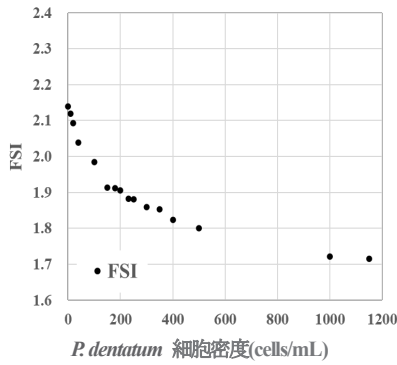


図13 *K. mikimotoi* 100 cells/mL に *P. dentatum* を添加した FSI 測定結果

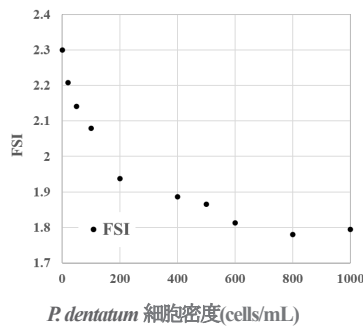


図14 *K. mikimotoi* 500 cells/mL に *P. dentatum* を添加した FSI 測定結果

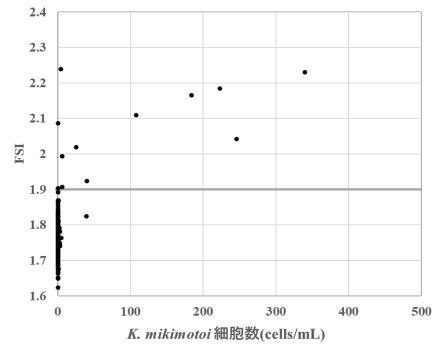


図15 伊万里湾東部における FSI データ

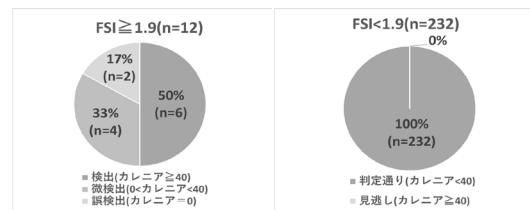


図16 伊万里湾東部における FSI 評価

### 伊万里湾中・西部

伊万里湾中・西部における *K. mikimotoi* の細胞密度と FSI を図 17 に示す (n = 503)。FSI が 1.9 以上となった 69 サンプルのうち「検出」は 22 サンプル, 「微検出」は 35 サンプル, 「誤検出」は 12 サンプルとなった。*K. mikimotoi* 検出率は 83% (57/69) であった。FSI が 1.9 を下回った 434 サンプルのうち 99.8%にあたる 433 サンプルは「判定通り」, 1 サンプルのみ「見逃し」となった (図 18)。

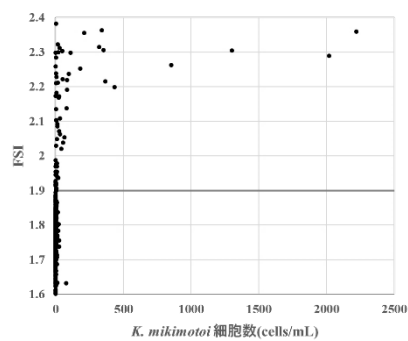


図17 伊万里湾中・西部における FSI データ

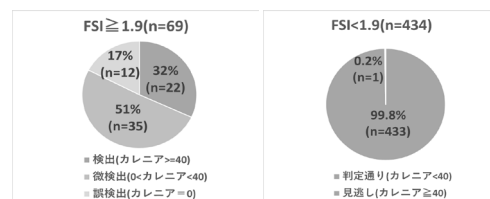


図18 伊万里湾中・西部における FSI 評価

### 現場調査

現場海域における HAI センサーによる *K. mikimotoi* の検出の評価として, 室内実験 1 の結果から, FSI が 1.9 以上の場合に *K. mikimotoi*  $\geq 40$  cells/mL を「検出」,  $0 \text{ cell/mL} < K. mikimotoi < 40 \text{ cells/mL}$  を「微検出」,  $K. mikimotoi = 0 \text{ cell/mL}$  を「誤検出」とし, 「検出」と「微検出」を合わせたものを *K. mikimotoi* 検出率とした。また, FSI が 1.9 未満の場合に *K. mikimotoi*  $< 40 \text{ cells/mL}$  を「判定通り」,  $K. mikimotoi \geq 40 \text{ cells/mL}$  を「見逃し」として各海域について評価した結果を以下に示す。

### 伊万里湾東部

伊万里湾東部における *K. mikimotoi* の細胞密度と FSI を図 15 に示す (n = 244)。FSI が 1.9 以上となった 12 サンプルのうち「検出」は 6 サンプル, 「微検出」は 4 サンプル, 「誤検出」は 2 サンプルとなった。*K. mikimotoi* 検出率は 83% (10/12) であった。FSI が 1.9 を下回った 232 サンプルはすべて「判定通り」となった (図 16)。



### 佐世保湾

佐世保湾における *K. mikimotoi* の細胞密度と FSI を図 19 に示す (n=230)。FSI が 1.9 以上となった 40 サンプルのうち「検出」は 25 サンプル、「微検出」は 12 サンプル、「誤検出」は 3 サンプルとなった。*K. mikimotoi* 検出率は 92% (37/40) であった。FSI が 1.9 を下回った 190 サンプルのうち、95% にあたる 182 サンプルは「判定通り」、8 サンプルは「見逃し」となった (図 20)。

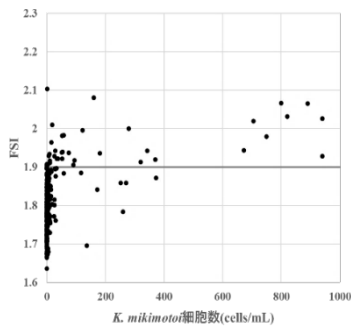


図 19 佐世保湾における FSI データ

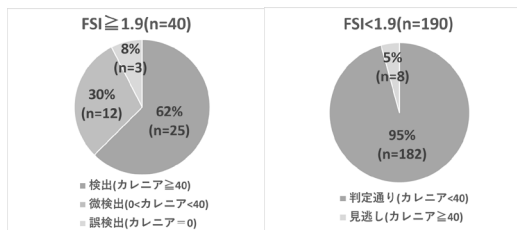


図 20 佐世保における FSI 評価

### 南九十九島

南九十九島における *K. mikimotoi* の細胞密度と FSI を図 21 に示す (n=46)。FSI が 1.9 以上となった 18 サンプルのうち「検出」は 15 サンプル、「微検出」は 2 サンプル、「誤検出」は 1 サンプルとなった。*K. mikimotoi* 検出率は 94% (17/18) であった。FSI が 1.9 を下回った 28 サンプルのうち 79%にあたる 22 サンプルは「判定通り」、6 サンプルは「見逃し」となった (図 22)。

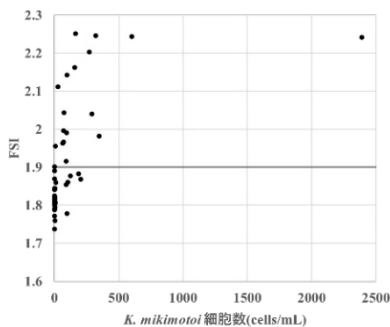


図 21 南九十九島 楠泊における FSI データ

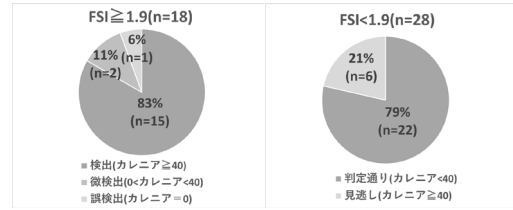


図 22 南九十九島 楠泊における FSI 評価

### 南九十九島

南九十九島における *K. mikimotoi* の細胞密度と FSI を図 23 に示す (n=145)。FSI が 1.9 以上となった 54 サンプルのうち「検出」は 30 サンプル、「微検出」は 15 サンプル、「誤検出」は 9 サンプルとなった。*K. mikimotoi* 検出率は 83% (45/54) であった。FSI が 1.9 を下回った 91 サンプルのうち 96%にあたる 87 サンプルは「判定通り」、4 サンプルは「見逃し」となった (図 24)。

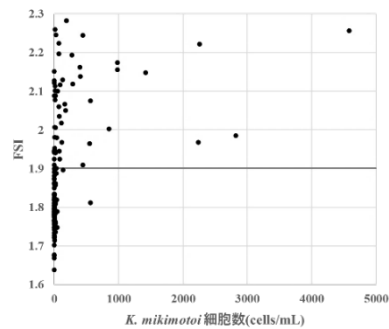


図 23 南九十九島における FSI データ

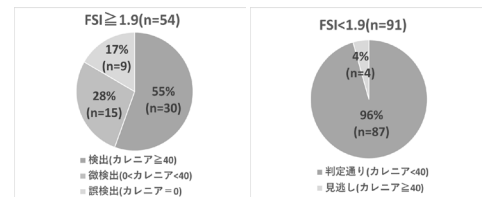


図 24 南九十九島における FSI 評価

## 考 察

FSI は前述のように 2 つの蛍光波長の比から算出される値であり、試水中に懸濁物や動物プランクトンなどが存在すると値は上昇する。珪藻類、渦鞭毛藻類及びラフィド藻類がほとんど見られなかった水産試験場前の生海水では、*K. mikimotoi* 添加前の FSI は 1.68 であり、ろ過海水 (FSI は 1.0 付近) よりも高かった。このことから、海域ご

との閾値の設定が必要であることがわかる。生海水、ろ過海水ともに、本県の赤潮注意報基準値である *K. mikimotoi* が 100 cells/mL で FSI は 2.0 以上と閾値の 1.9 を超えた。競合種を加えた実験では、*K. mikimotoi* 赤潮注意基準の 100 cells/mL に対して珪藻類は 1,280 cells/mL, *P. dentatum* は 230 cells/mL で FSI が 1.9 を下回った。*K. mikimotoi* 赤潮警報基準の 500 cells/mL では、珪藻類は 8,000 cells/mL と高密度でも FSI が 1.9 以上だった一方で、*P. dentatum* が 400 cells/mL 以上存在すると FSI は 1.9 を下回った。珪藻類及び *P. dentatum* 培養株単独実験では両者ともに FSI が 1.6 付近に収束していたが、珪藻類の FSI が 1.6 付近となるのは *P. dentatum* のおよそ 2 倍の 640 cells/mL が必要であった。このことから、*P. dentatum* は珪藻類に比べ FSI を引き下げる効果が高いことが示された。*K. mikimotoi* が 500 cells/mL と多く存在していても *P. dentatum* が同程度 (400 cells/mL) あるいはそれ以上の密度で混在すると FSI が 1.9 を下回ることが示された。つまり、*K. mikimotoi* が優占する場合には検出できる可能性が高い一方で、他種 (今回は *P. dentatum*) が優占する場合には検出できない可能性があることも明らかとなった。現場調査では、どの海域においても FSI が 1.9 以上かつ *K. mikimotoi* > 0 cell/mL の *K. mikimotoi* 検出率は 80% を超えていた。FSI が 1.9 以上かつ *K. mikimotoi* = 0 cell/mL の「誤検出」はどの海域でも確認され、FSI が 1.9 未満かつ *K. mikimotoi*  $\geq$  40 cells/mL の「見逃し」は伊万里湾 東部以外の 4 海域で確認された。これらには 2 つの原因が考えられる。1 つ目は大雨後の濁水による環境要因である。8 月半ばの大雨後の調査では *K. mikimotoi* が確認されなかったが、FSI が 1.9 を超えた事例が複数確認された。これは水深 3.5 m までの浅い層でのみ確認されていたことから、大雨によって流入した泥等の懸濁物や河川由来の植物プランクトンが影響し、FSI の上昇を招いたと考えられる。2 つ目は採水時の揺れや潮流等による要因である。南九十九島では HAI センサーと採水器が別々に使用された場合があり、FSI の高値が検出された層をピンポイント

で採水できていなかった可能性がある。採水器をセンサーに取り付け (図 6)、一人で測定と採水を行うことで問題は軽減すると考えられる。いずれにしても、FSI が 1.9 未満かつ *K. mikimotoi* < 40 cells/mL の「判定通り」は全海域で 98% (956/975) と高い精度を示した。また、FSI が 1.9 未満かつ *K. mikimotoi*  $\geq$  40 cells/mL の「見逃し」は全海域で 19 サンプルあったが、細胞密度が 500 cells/mL 以上 (本県の *K. mikimotoi* 赤潮警戒基準) だったのは、1 サンプルのみであった。この層のクロロフィルの値は低く、FSI も閾値を下回っていたが、同地点ではクロロフィルの値が高く、FSI が閾値を超えていた層があり、*K. mikimotoi* が 980 cells/mL 確認された。これは前述した採水器と HAI センサーが別に使用されたため、他の層を採水した可能性が高いと考えられる。

以上のことから、長崎県海域では採水器と一体化させた HAI センサーを用い、FSI が 1.9 以上の層を採水することで、*K. mikimotoi* の出現を低密度から検出することができ、初期増殖を的確に捕捉する可能性が高いといえる。それによって、餌止めや生簀の移動、粘土散布などの赤潮対策を早期に行うことを可能にし、被害軽減につながることを期待される。

## 文 献

- 1) 九州海域の赤潮 (1978-2021). 水産庁九州漁業調整事務所, 福岡. 1979-2022.
- 2) 長崎県総合水産試験場.平成 29 年度有害赤潮プランクトン等総合対策事業報告書-I.長崎県下における赤潮の発生状況, 長崎県総合水産試験場, 長崎. 2018.
- 3) 長崎県総合水産試験場.平成 30 年度有害赤潮プランクトン等総合対策事業報告書-I.長崎県下における赤潮の発生状況, 長崎県総合水産試験場, 長崎. 2019.
- 4) 長崎県総合水産試験場.令和元年度有害赤潮プランクトン等総合対策事業報告書-I.長崎県下における赤潮の発生状況, 長崎県総合水産試験場,

- 長崎. 2020.
- 5) 飯塚昭二, 入江春彦. 1965年夏季大村湾赤潮時の海況とその被害-2: 後期赤潮とその生物学的特徴について. 長崎大学水産学部研究報告. 1966 21:67-101.
  - 6) Honjo T, Yamamoto S, Nakamura O, Yamaguchi M. Toxic Marine Phytoplankton In: Graneli E, Sundstrom B, Edler L, Anderson DM (eds). Elsevier, New York. 1990; 165-170.
  - 7) 竹内照文, 小久保友義, 辻泰俊, 本城凡夫. 田辺湾における *Gymnodinium mikimotoi* の群生長と流況による赤潮分布域の変化. 日本水産学会誌 1995 ; **61** : 494-498.
  - 8) 竹内照文, 小久保友義, 内田卓志. 田辺湾における *Gymnodinium mikimotoi* の増殖域の環境特性と本種赤潮の発生環境. 日本水産学会誌. 1997 ; **63** : 184-193.
  - 9) Uchida T, Toda S, Nakamura O, Abo K. Initial site of *Gymnodinium mikimotoi* blooms in relation to the seawater exchange rate in Gokasho Bay, Japan. Plankton Biol Ecol .1998. **45(2)**: 129-137.
  - 10) 鹿児島県水産技術開発センター. 改良型粘土を用いた赤潮被害防止マニュアル. 鹿児島県水産技術開発センター. 2018 (2022/1/11 アクセス) <https://suigi.jp/akashio/newHP/2018/> (最終版) 散布マニュアル-2.pdf
  - 11) JFE アドバンテック (株) 製品カタログ (2022/1/11 アクセス) [https://www.jfe-advantech.co.jp/assets/img/products/ocean-haisensor/\\_33-34ahi-cad.pdf](https://www.jfe-advantech.co.jp/assets/img/products/ocean-haisensor/_33-34ahi-cad.pdf)
  - 12) 長崎県総合水産試験場. 平成 24 年度有害赤潮プランクトン等総合対策事業報告書-I. 長崎県下における赤潮の発生状況, 長崎県総合水産試験場, 長崎. 2013.