

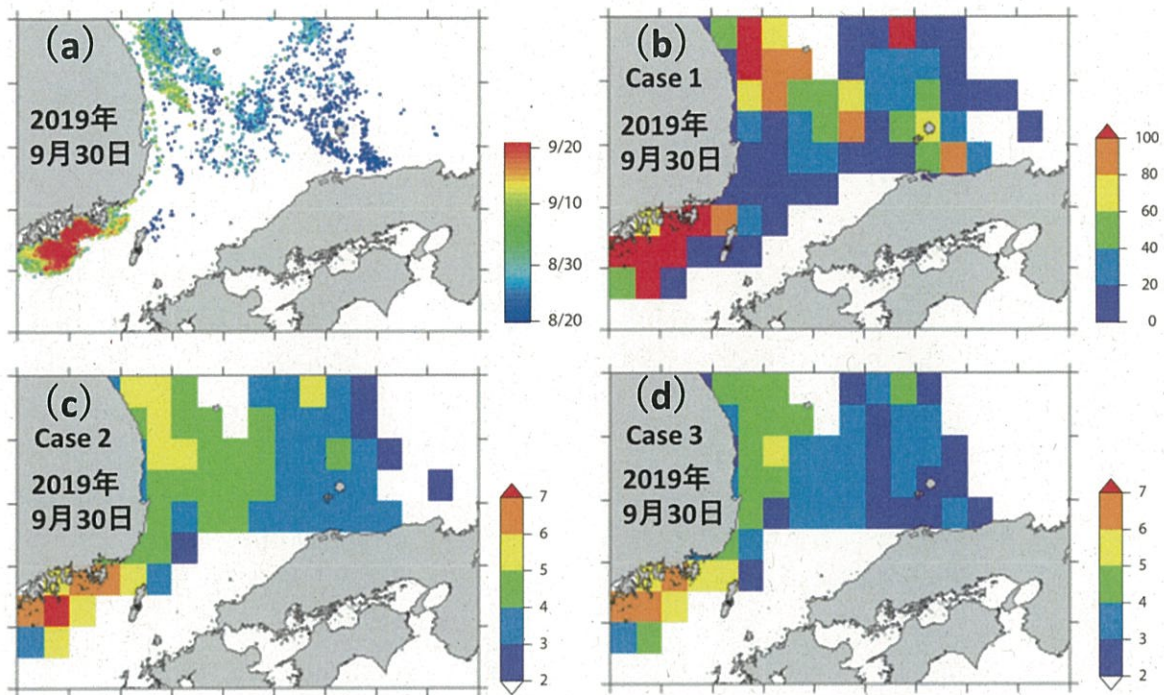


図8 (a) 2019年9月30日時点の粒子分布, (b) Case 1:  $0.5^\circ$  格子ごとの粒子数, (c) Case 2: (b) に粒子投入日の最高細胞密度を与えたケース, (d) Case 3: (c) に減衰率を与えたケース (Case 1 のスケールは粒子数 (個), Case 2 と 3 のスケールは各粒子の細胞密度の和の対数値を表す)

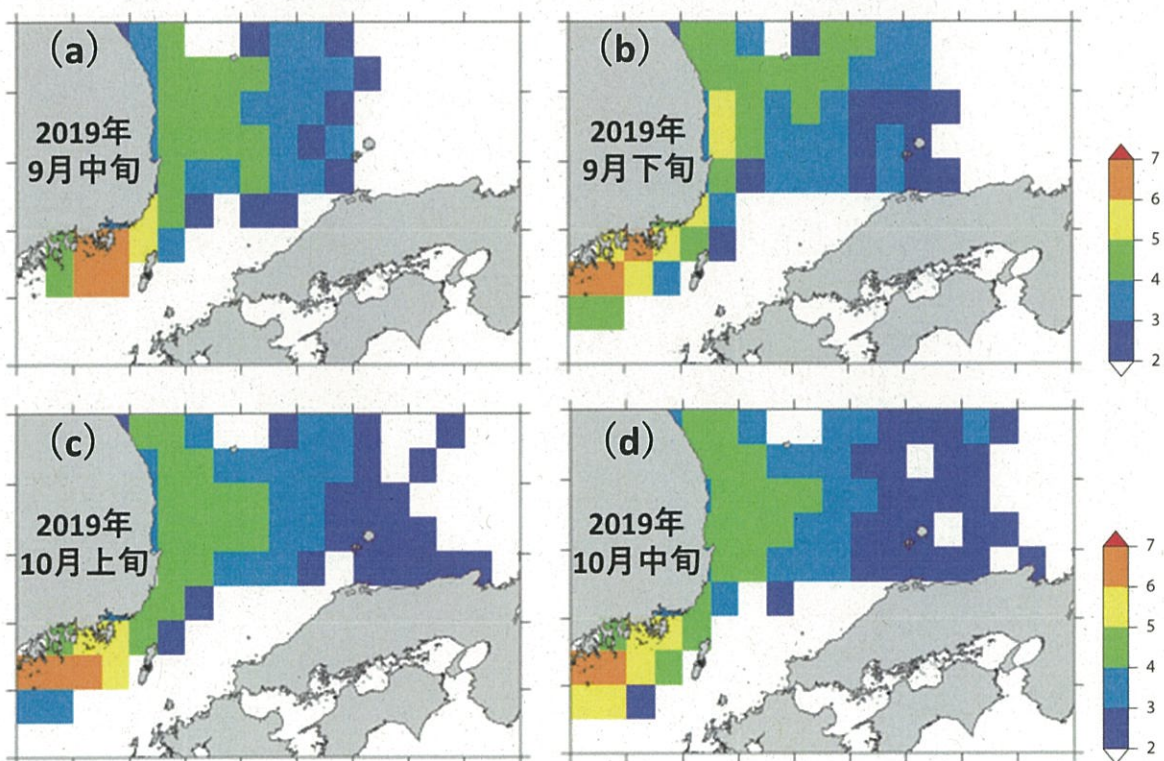


図9 Case 3 による 2019 年 9 月中旬から 10 月中旬にかけての旬ごとの赤潮発生リスク

表1 *Cochlodinium polykrikoides* のリボタイプ検出に用いた LAMP 法プライマー配列

| リボタイプ    | プライマー       | 配列 (5'-3')                                  |
|----------|-------------|---------------------------------------------|
| フィリピンタイプ | CPpLA-F3    | GCGGAGCTGTGCGGATTTG                         |
|          | CPpLA-B3    | CGGTTTCCGAACACCTCCAAA                       |
|          | CPpLA-FIP   | GCTAATCACCAATGACCCCCACGCCTTCAACGAAAGTGAGGGT |
|          | CPpLA-BIP   | GTCCGAGGATAACTGCAAAGGCATCAGCAGCCGAGTGCTAAC  |
|          | CPpLA-LF    | GCGAGAGATGGTTGAAACTTGC                      |
|          | CPpLA-LB    | GTAGCCTGTCTCCGGATGG                         |
| 笠沙型      | CPKLA-F3-2  | GCATTCTCAACGCAAGTGTGAA                      |
|          | CPKLA-B3-2  | ACAGGGCTCGATCGCCA                           |
|          | CPKLA-FIP-2 | TGCAGGTGTCCTCGGTCAC-GTTCTGATCGTTTCTCGCCTAG  |
|          | CPKLA-BIP-2 | AGGCATGGTAGCCCGTCTC-TACCGGACACCTCGGGAAT     |
|          | CPKLA-LF-2  | GACCCCCACGGCAAGAAC                          |
|          | CPKLA-LB-2  | TGTCAGCACTCGGTCGCT                          |

表2 *Cochlodinium polykrikoides* の検鏡結果と LAMP 法による検出結果

| 島根県       |              |                                       |               |            |       |    | 山口県       |              |                                       |               |            |       |                                        |
|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------|------------|-------|----|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------|------------|-------|----------------------------------------|
| Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>C. polykrikoides</i><br>(cells/ml) | LAMP法<br>判定結果 | 水温<br>(°C) | 塩分    | 備考 | Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>C. polykrikoides</i><br>(cells/ml) | LAMP法<br>判定結果 | 水温<br>(°C) | 塩分    | 備考                                     |
| 2019/7/30 | SA (0 m)     | ND                                    | -             | 24.28      | 34.01 |    | 2019/8/8  | Y1 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.60      | 33.05 | <i>Cochlodinium</i> 属<br>0.001cells/ml |
| "         | SA (20 m)    | ND                                    | -             | 24.24      | 34.01 |    | "         | Y1 (20 m)    | ND                                    | -             | 24.71      | 33.19 | <i>Cochlodinium</i> 属<br>0.001cells/ml |
| "         | SB (0 m)     | ND                                    | -             | 24.67      | 34.12 |    | "         | Y2 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.10      | 32.90 |                                        |
| "         | SB (20 m)    | ND                                    | -             | 24.68      | 34.14 |    | "         | Y2 (20 m)    | ND                                    | -             | 25.16      | 33.21 |                                        |
| 2019/9/3  | SA (0 m)     | ND                                    | -             | 24.58      | 33.19 |    | "         | Y3 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.10      | 33.11 |                                        |
| "         | SA (20 m)    | ND                                    | -             | 22.39      | 33.10 |    | "         | Y3 (20 m)    | 0.001                                 | -             | 22.34      | 33.16 |                                        |
| "         | SB (0 m)     | ND                                    | -             | 25.66      | 33.11 |    | 2019/9/2  | Y1 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.30      | 32.01 |                                        |
| "         | SB (20 m)    | ND                                    | -             | 25.18      | 33.38 |    | "         | Y1 (20 m)    | ND                                    | -             | 23.76      | 31.94 |                                        |
| 2019/7/22 | S4 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.70      | 32.60 |    | "         | Y2 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.80      | 32.03 |                                        |
| "         | S4 (2 m)     | ND                                    | -             | 23.30      | 34.10 |    | "         | Y2 (20 m)    | ND                                    | -             | 25.36      | 32.16 |                                        |
| "         | S5 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.80      | 33.00 |    | "         | Y3 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.70      | 32.42 |                                        |
| "         | S5 (5 m)     | ND                                    | -             | 23.90      | 33.20 |    | "         | Y3 (20 m)    | ND                                    | -             | 25.29      | 32.68 |                                        |
| 2019/7/23 | S2 (0 m)     | ND                                    | -             | 22.23      | 33.75 |    | 2019/7/12 | Y6 (0 m)     | ND                                    | -             | 22.58      | 33.93 |                                        |
| "         | S2 (5 m)     | ND                                    | -             | 23.65      | 3.79  |    | "         | Y6 (2.5 m)   | ND                                    | -             | 22.53      | 33.96 |                                        |
| "         | S6 (0 m)     | ND                                    | -             | 22.23      | 33.75 |    | "         | Y7 (0 m)     | ND                                    | -             | 23.15      | 33.22 |                                        |
| "         | S6 (5 m)     | ND                                    | -             | 23.65      | 33.79 |    | "         | Y7 (1.3 m)   | ND                                    | -             | 22.99      | 33.66 |                                        |
| 2019/7/24 | S1 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.00      | 33.10 |    | 2019/7/17 | Y4 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.31      | 34.05 |                                        |
| "         | S1 (5 m)     | ND                                    | -             | 24.10      | 33.30 |    | "         | Y4 (2 m)     | ND                                    | -             | 23.35      | 33.97 |                                        |
| "         | S3 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.08      | 28.36 |    | "         | Y5 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.18      | 33.06 |                                        |
| "         | S3 (3 m)     | ND                                    | -             | 24.69      | 31.08 |    | "         | Y5 (2.2 m)   | ND                                    | -             | 23.03      | 33.88 |                                        |
| 2019/8/20 | S4 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.20      | 32.50 |    | 2019/8/8  | Y4 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.06      | 32.91 |                                        |
| "         | S4 (2 m)     | ND                                    | -             | 26.40      | 33.60 |    | "         | Y4 (2.5 m)   | ND                                    | -             | 27.00      | 32.86 |                                        |
| "         | S5 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.30      | 33.30 |    | "         | Y5 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.40      | 33.36 |                                        |
| "         | S5 (5 m)     | ND                                    | -             | 26.10      | 33.80 |    | "         | Y5 (2 m)     | ND                                    | -             | 23.84      | 33.45 |                                        |
| 2019/8/22 | S2 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.34      | 16.20 |    | 2019/8/9  | Y6 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.27      | 33.09 |                                        |
| "         | S2 (5 m)     | ND                                    | -             | 26.01      | 32.88 |    | "         | Y6 (3 m)     | ND                                    | -             | 25.80      | 33.28 |                                        |
| "         | S3 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.47      | 30.13 |    | "         | Y7 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.66      | 32.97 |                                        |
| "         | S3 (3 m)     | ND                                    | -             | 26.50      | 32.25 |    | "         | Y7 (1.9 m)   | ND                                    | -             | 27.30      | 32.94 |                                        |
| "         | S6 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.39      | 33.06 |    | 2019/9/5  | Y4 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.01      | 31.59 |                                        |
| "         | S6 (5 m)     | ND                                    | -             | 26.10      | 33.09 |    | "         | Y4 (2 m)     | ND                                    | -             | 26.90      | 31.53 |                                        |
| 2019/8/23 | S1 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.30      | 28.40 |    | "         | Y5 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.09      | 31.02 |                                        |
| "         | S1 (5 m)     | ND                                    | -             | 26.50      | 33.20 |    | "         | Y5 (2 m)     | ND                                    | -             | 26.99      | 32.3  |                                        |
| 2019/9/17 | S4 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.40      | 33.30 |    | 2019/9/6  | Y6 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.77      | 29.85 |                                        |
| "         | S4 (2 m)     | ND                                    | -             | 26.40      | 33.30 |    | "         | Y6 (2.5 m)   | ND                                    | -             | 26.95      | 31.36 |                                        |
| "         | S5 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.20      | 33.10 |    | "         | Y7 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.44      | 29.78 |                                        |
| "         | S5 (5 m)     | ND                                    | -             | 26.20      | 33.20 |    | "         | Y7 (1.8 m)   | ND                                    | -             | 27.31      | 31.71 |                                        |
| 2019/9/19 | S1 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.10      | 32.40 |    |           |              |                                       |               |            |       |                                        |
| "         | S1 (5 m)     | ND                                    | -             | 26.20      | 32.50 |    |           |              |                                       |               |            |       |                                        |
| "         | S3 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.04      | 33.43 |    |           |              |                                       |               |            |       |                                        |
| "         | S3 (2 m)     | ND                                    | -             | 23.94      | 33.61 |    |           |              |                                       |               |            |       |                                        |
| "         | S6 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.04      | 32.81 |    |           |              |                                       |               |            |       |                                        |
| "         | S6 (5 m)     | ND                                    | -             | 25.05      | 32.81 |    |           |              |                                       |               |            |       |                                        |
| 2019/9/20 | S2 (0 m)     | ND                                    | -             | 20.06      | 18.91 |    |           |              |                                       |               |            |       |                                        |
| "         | S2 (5 m)     | ND                                    | -             | 22.35      | 33.73 |    |           |              |                                       |               |            |       |                                        |

| 兵庫県        |              |                                       |               |            |       |    |
|------------|--------------|---------------------------------------|---------------|------------|-------|----|
| Date       | 調査場所<br>(水深) | <i>C.polytrichoides</i><br>(cells/ml) | LAMP法<br>判定結果 | 水温<br>(°C) | 塩分    | 備考 |
| 2019.7.30  | H1 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.7       | 33.35 |    |
| "          | H2 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.3       | 33.55 |    |
| "          | H3 (0 m)     | ND                                    | +             | 27.3       | 33.83 |    |
| "          | H4 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.0       | 33.82 |    |
| "          | H5 (0 m)     | ND                                    | +             | 26.0       | 34.09 |    |
| "          | H5 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.9       | 33.96 |    |
| "          | H1 (20 m)    | ND                                    | +             | 24.0       | 33.37 |    |
| "          | H2 (20 m)    | ND                                    | +             | 23.7       | 33.74 |    |
| "          | H3 (20 m)    | ND                                    | -             | 21.4       | 33.95 |    |
| "          | H4 (20 m)    | ND                                    | +             | 23.8       | 34.02 |    |
| "          | H5 (20 m)    | ND                                    | +             | 21.7       | 34.07 |    |
| "          | H6 (20 m)    | ND                                    | -             | 22.5       | 34.18 |    |
| "          | H1 (58 m)    | ND                                    | -             | 20.2       | 34.17 |    |
| "          | H2 (45 m)    | ND                                    | -             | 19.7       | 34.18 |    |
| "          | H3 (45 m)    | ND                                    | -             | 18.9       | 34.32 |    |
| "          | H4 (39 m)    | ND                                    | -             | 18.7       | 34.47 |    |
| "          | H5 (42 m)    | ND                                    | -             | 17.4       | 34.50 |    |
| "          | H6 (47 m)    | ND                                    | -             | 16.5       | 34.53 |    |
| 2019.8.27  | H1 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.3       | 32.85 |    |
| "          | H2 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.0       | 33.16 |    |
| "          | H3 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.9       | 33.73 |    |
| "          | H4 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.1       | 33.77 |    |
| "          | H5 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.3       | 33.40 |    |
| "          | H6 (0 m)     | ND                                    | +             | 26.4       | 33.57 |    |
| "          | H1 (20 m)    | ND                                    | +             | 26.3       | 33.05 |    |
| "          | H2 (20 m)    | ND                                    | -             | 25.9       | 33.19 |    |
| "          | H3 (20 m)    | ND                                    | +             | 24.8       | 33.88 |    |
| "          | H4 (20 m)    | ND                                    | -             | 25.2       | 33.99 |    |
| "          | H5 (20 m)    | ND                                    | -             | 25.6       | 34.00 |    |
| "          | H6 (20 m)    | ND                                    | +             | 25.7       | 33.86 |    |
| "          | H1 (43 m)    | ND                                    | -             | 23.0       | 33.59 |    |
| "          | H2 (39 m)    | ND                                    | -             | 19.3       | 34.24 |    |
| "          | H3 (46 m)    | ND                                    | -             | 18.6       | 34.35 |    |
| "          | H4 (42 m)    | ND                                    | -             | 17.8       | 34.42 |    |
| "          | H5 (39 m)    | ND                                    | -             | 18.4       | 34.30 |    |
| "          | H6 (30 m)    | ND                                    | -             | 19.7       | 34.27 |    |
| 2019.9.26  | H4 (0 m)     | ND                                    | -             | 22.5       | 33.70 |    |
| "          | H5 (0 m)     | ND                                    | -             | 23.0       | 33.57 |    |
| "          | H6 (0 m)     | ND                                    | -             | 23.6       | 33.72 |    |
| "          | H4 (20 m)    | ND                                    | -             | 22.3       | 33.78 |    |
| "          | H5 (20 m)    | ND                                    | -             | 22.9       | 33.66 |    |
| "          | H6 (20 m)    | ND                                    | -             | 23.5       | 33.75 |    |
| 2019.12.7  | H5 (0 m)     | ND                                    | -             | 16.3       | 32.88 |    |
| 2019.1.8   | "            | ND                                    | -             | 12.2       | 32.75 |    |
| 2019.2.1   | "            | ND                                    | -             | 9.5        | 30.71 |    |
| 2019.3.1   | "            | ND                                    | -             | 12.3       | 33.75 |    |
| 2019.4.4   | "            | ND                                    | -             | 14.0       | 34.08 |    |
| 2019.5.9   | "            | ND                                    | -             | 17.6       | 34.21 |    |
| 2019.6.3   | "            | ND                                    | -             | 20.0       | 35.00 |    |
| 2019.7.8   | "            | ND                                    | -             | 22.8       | 34.10 |    |
| 2019.7.31  | "            | ND                                    | -             | 27.8       | 33.21 |    |
| 2019.8.29  | "            | ND                                    | -             | 25.9       | 31.82 |    |
| 2019.9.27  | "            | ND                                    | +             | 23.9       | 33.57 |    |
| 2019.10.31 | "            | ND                                    | -             | 20.6       | 33.07 |    |

※水深20m以上の採水層はクロロフィル蛍光強度変換装置国大城

| 鳥取県       |              |                                       |               |            |       |                               |
|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------|------------|-------|-------------------------------|
| Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>C.polytrichoides</i><br>(cells/ml) | LAMP法<br>判定結果 | 水温<br>(°C) | 塩分    | 備考                            |
| 2019/6/27 | T6 (0 m)     | ND                                    | -             | 21.55      | 34.16 |                               |
| "         | T6 (20 m)    | ND                                    | -             | 18.73      | 34.40 |                               |
| 2019/7/25 | T2 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.21      | 33.77 |                               |
| "         | T2 (20 m)    | ND                                    | -             | 22.81      | 34.29 |                               |
| "         | T3 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.30      | -     |                               |
| "         | T3 (20 m)    | ND                                    | -             | 21.50      | 34.04 |                               |
| "         | T4 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.41      | 33.92 |                               |
| "         | T4 (20 m)    | ND                                    | -             | 22.60      | 33.61 |                               |
| "         | T5 (0 m)     | ND                                    | -             | 24.54      | 33.92 | Cochlodinium属<br>0.01cells/ml |
| "         | T5 (20 m)    | ND                                    | -             | 20.81      | 34.36 |                               |
| 2019/7/26 | T1 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.03      | 33.62 |                               |
| "         | T1 (20 m)    | ND                                    | -             | 21.42      | 34.00 |                               |
| 2019/9/3  | T3 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.50      | 32.97 |                               |
| "         | T3 (20 m)    | ND                                    | -             | 24.50      | 33.64 |                               |
| "         | T4 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.90      | 32.81 |                               |
| "         | T4 (20 m)    | ND                                    | -             | 25.84      | 33.12 |                               |
| "         | T5 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.50      | 33.17 |                               |
| "         | T5 (20 m)    | ND                                    | -             | 23.93      | 33.57 |                               |
| 2019/9/4  | T1 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.40      | 31.68 |                               |
| "         | T1 (20 m)    | ND                                    | -             | 26.23      | 32.96 |                               |
| "         | T2 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.70      | 32.73 |                               |
| "         | T2 (20 m)    | ND                                    | -             | 26.61      | 32.88 |                               |
| 2019/7/18 | T8 (0 m)     | ND                                    | -             | 23.50      | -     |                               |
| "         | T9 (0 m)     | ND                                    | -             | 23.60      | -     |                               |
| "         | T10 (0 m)    | ND                                    | -             | 23.79      | 33.57 |                               |
| "         | T10 (20 m)   | ND                                    | -             | 23.25      | 33.70 |                               |
| "         | T11 (0 m)    | ND                                    | -             | 23.72      | 33.58 |                               |
| "         | T11 (20 m)   | ND                                    | -             | 23.11      | 33.75 |                               |
| 2019/7/25 | T7 (0 m)     | ND                                    | -             | 27.20      | 31.50 |                               |
| 2019/8/20 | T8 (0 m)     | ND                                    | -             | 25.90      | -     |                               |
| "         | T9 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.20      | -     |                               |
| "         | T10 (0 m)    | ND                                    | -             | 26.34      | 33.25 |                               |
| "         | T10 (20 m)   | ND                                    | -             | 25.74      | 33.23 |                               |
| "         | T11 (0 m)    | ND                                    | -             | 26.34      | 32.77 |                               |
| "         | T11 (20 m)   | ND                                    | -             | 25.74      | 33.21 |                               |
| 2019/9/26 | T7 (0 m)     | ND                                    | -             | 26.70      | 33.20 |                               |
| 2019/9/30 | T8 (0 m)     | ND                                    | -             | 23.40      | -     |                               |
| "         | T9 (0 m)     | ND                                    | -             | 23.90      | -     |                               |
| "         | T10 (0 m)    | ND                                    | -             | 23.96      | 33.26 |                               |
| "         | T10 (20 m)   | ND                                    | -             | 23.33      | 33.48 |                               |
| "         | T11 (0 m)    | ND                                    | -             | 23.35      | 33.25 |                               |
| "         | T11 (20 m)   | ND                                    | -             | 22.60      | 33.50 |                               |

表3 *Karenia mikimotoi* の検鏡結果と LAMP 法による検出結果

| 島根県       |              |                                  |               |            |       |    | 山口県      |              |                                  |               |            |       |    |
|-----------|--------------|----------------------------------|---------------|------------|-------|----|----------|--------------|----------------------------------|---------------|------------|-------|----|
| Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>K.mikimotoi</i><br>(cells/ml) | LAMP法<br>判定結果 | 水温<br>(°C) | 塩分    | 備考 | Date     | 調査場所<br>(水深) | <i>K.mikimotoi</i><br>(cells/ml) | LAMP法<br>判定結果 | 水温<br>(°C) | 塩分    | 備考 |
| 2019/7/30 | SA (0 m)     | ND                               | -             | 24.28      | 34.01 |    | 2019/8/8 | Y1 (0 m)     | ND                               | -             | 27.60      | 33.05 |    |
| "         | SA (20 m)    | ND                               | -             | 24.24      | 34.01 |    | "        | Y1 (20 m)    | ND                               | -             | 24.71      | 33.19 |    |
| "         | SB (0 m)     | ND                               | -             | 24.87      | 34.12 |    | "        | Y2 (0 m)     | ND                               | -             | 27.10      | 32.90 |    |
| "         | SB (20 m)    | ND                               | -             | 24.68      | 34.14 |    | "        | Y2 (20 m)    | 0.001                            | -             | 25.16      | 33.21 |    |
| 2019/9/3  | SA (0 m)     | ND                               | -             | 24.58      | 33.19 |    | "        | Y3 (0 m)     | ND                               | -             | 27.10      | 33.11 |    |
| "         | SA (20 m)    | ND                               | -             | 22.39      | 33.10 |    | "        | Y3 (20 m)    | ND                               | -             | 22.34      | 33.16 |    |
| "         | SB (0 m)     | ND                               | -             | 25.66      | 33.11 |    | 2019/9/2 | Y1 (0 m)     | ND                               | -             | 25.30      | 32.01 |    |
| "         | SB (20 m)    | ND                               | -             | 25.18      | 33.38 |    | "        | Y1 (20 m)    | ND                               | -             | 23.76      | 31.94 |    |
| 2019/7/22 | S4 (0 m)     | ND                               | -             | 24.70      | 32.60 |    | "        | Y2 (0 m)     | ND                               | -             | 25.80      | 32.03 |    |
| "         | S4 (2 m)     | ND                               | -             | 23.30      | 34.10 |    | "        | Y2 (20 m)    | ND                               | -             | 25.36      | 32.16 |    |
| "         | S5 (0 m)     | ND                               | -             | 24.80      | 33.00 |    | "        | Y3 (0 m)     | ND                               | -             | 25.70      | 32.42 |    |
| "         | S5 (5 m)     | ND                               | -             | 23.90      | 33.20 |    | "        | Y3 (20 m)    | ND                               | -             | 25.29      | 32.68 |    |
| 2019/7/23 | S2 (0 m)     | ND                               | -             | 22.23      | 33.75 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S2 (5 m)     | ND                               | -             | 23.65      | 3.79  |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S6 (0 m)     | ND                               | -             | 22.23      | 33.75 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S6 (5 m)     | ND                               | -             | 23.85      | 33.79 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| 2019/7/24 | S1 (0 m)     | ND                               | -             | 24.00      | 33.10 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S1 (5 m)     | ND                               | -             | 24.10      | 33.30 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S3 (0 m)     | ND                               | -             | 25.08      | 28.36 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S3 (3m)      | ND                               | -             | 24.69      | 31.08 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| 2019/8/20 | S4 (0 m)     | ND                               | -             | 26.20      | 32.50 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S4 (2 m)     | ND                               | -             | 26.40      | 33.60 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S5 (0 m)     | ND                               | -             | 26.30      | 33.30 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S5 (5 m)     | ND                               | -             | 26.10      | 33.80 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| 2019/8/22 | S2 (0 m)     | ND                               | -             | 26.34      | 16.20 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S2 (5 m)     | ND                               | -             | 26.01      | 32.89 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S3 (0 m)     | ND                               | -             | 26.47      | 30.13 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S3 (3m)      | ND                               | -             | 26.50      | 32.25 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S6 (0 m)     | ND                               | -             | 26.39      | 33.06 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S6 (5 m)     | ND                               | -             | 26.10      | 33.09 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| 2019/8/23 | S1 (0 m)     | ND                               | -             | 26.30      | 28.40 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S1 (5 m)     | ND                               | -             | 26.50      | 33.20 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| 2019/9/17 | S4 (0 m)     | ND                               | -             | 26.40      | 33.30 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S4 (2 m)     | ND                               | -             | 26.40      | 33.30 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S5 (0 m)     | ND                               | -             | 26.20      | 33.10 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S5 (5 m)     | ND                               | -             | 26.20      | 33.20 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| 2019/9/19 | S1 (0 m)     | ND                               | -             | 26.10      | 32.40 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S1 (5 m)     | ND                               | -             | 26.20      | 32.50 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S3 (0 m)     | ND                               | -             | 24.04      | 33.43 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S3 (2m)      | ND                               | -             | 23.94      | 33.61 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S6 (0 m)     | ND                               | -             | 25.04      | 32.81 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S6 (5 m)     | ND                               | -             | 25.06      | 32.81 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| 2019/9/20 | S2 (0 m)     | ND                               | -             | 20.05      | 18.91 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | S2 (5 m)     | ND                               | -             | 22.35      | 33.73 |    |          |              |                                  |               |            |       |    |

| 兵庫県       |              |                                  |               |            |       |    | 鳥取県       |              |                                  |               |            |       |    |
|-----------|--------------|----------------------------------|---------------|------------|-------|----|-----------|--------------|----------------------------------|---------------|------------|-------|----|
| Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>K.mikimotoi</i><br>(cells/ml) | LAMP法<br>判定結果 | 水温<br>(°C) | 塩分    | 備考 | Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>K.mikimotoi</i><br>(cells/ml) | LAMP法<br>判定結果 | 水温<br>(°C) | 塩分    | 備考 |
| 2019.7.30 | H1 (0 m)     | ND                               | -             | 27.7       | 33.35 |    | 2019/6/27 | T6 (0 m)     | ND                               | -             | 21.55      | 34.16 |    |
| "         | H2 (0 m)     | ND                               | -             | 27.3       | 33.55 |    | "         | T6 (20 m)    | ND                               | -             | 18.73      | 34.40 |    |
| "         | H3 (0 m)     | ND                               | +             | 27.3       | 33.83 |    | 2019/7/25 | T2 (0 m)     | ND                               | -             | 25.21      | 33.77 |    |
| "         | H4 (0 m)     | ND                               | -             | 26.0       | 33.82 |    | "         | T2 (20 m)    | ND                               | -             | 22.81      | 34.29 |    |
| "         | H5 (0 m)     | ND                               | -             | 26.0       | 34.09 |    | "         | T3 (0 m)     | ND                               | -             | 25.30      | -     |    |
| "         | H6 (0 m)     | ND                               | -             | 25.9       | 33.96 |    | "         | T3 (20 m)    | ND                               | -             | 21.50      | 34.04 |    |
| "         | H1 (20 m)    | ND                               | -             | 24.0       | 33.37 |    | "         | T4 (0 m)     | ND                               | -             | 24.41      | 33.92 |    |
| "         | H2 (20 m)    | ND                               | -             | 23.7       | 33.74 |    | "         | T4 (20 m)    | ND                               | -             | 22.60      | 33.81 |    |
| "         | H3 (20 m)    | ND                               | -             | 21.4       | 33.95 |    | "         | T5 (0 m)     | ND                               | +             | 24.54      | 33.92 |    |
| "         | H4 (20 m)    | ND                               | +             | 23.8       | 34.02 |    | "         | T5 (20 m)    | ND                               | -             | 20.81      | 34.36 |    |
| "         | H5 (20 m)    | ND                               | +             | 21.7       | 34.07 |    | 2019/7/26 | T1 (0 m)     | ND                               | -             | 25.03      | 33.62 |    |
| "         | H6 (20 m)    | ND                               | -             | 22.5       | 34.18 |    | "         | T1 (20 m)    | ND                               | -             | 21.42      | 34.00 |    |
| 2019.8.27 | H1 (0 m)     | ND                               | -             | 26.3       | 32.85 |    | 2019/9/3  | T3 (0 m)     | ND                               | -             | 25.50      | 32.97 |    |
| "         | H2 (0 m)     | ND                               | -             | 26.0       | 33.16 |    | "         | T3 (20 m)    | ND                               | -             | 24.50      | 33.64 |    |
| "         | H3 (0 m)     | ND                               | -             | 25.9       | 33.73 |    | "         | T4 (0 m)     | ND                               | -             | 25.90      | 32.81 |    |
| "         | H4 (0 m)     | ND                               | -             | 26.1       | 33.77 |    | "         | T4 (20 m)    | ND                               | -             | 25.84      | 33.12 |    |
| "         | H5 (0 m)     | ND                               | -             | 26.3       | 33.40 |    | "         | T5 (0 m)     | ND                               | -             | 25.50      | 33.17 |    |
| "         | H6 (0 m)     | ND                               | -             | 26.4       | 33.57 |    | "         | T5 (20 m)    | ND                               | -             | 23.93      | 33.57 |    |
| "         | H1 (20 m)    | ND                               | -             | 26.3       | 33.05 |    | 2019/9/4  | T1 (0 m)     | ND                               | -             | 26.40      | 31.68 |    |
| "         | H2 (20 m)    | ND                               | -             | 25.9       | 33.19 |    | "         | T1 (20 m)    | ND                               | -             | 26.23      | 32.96 |    |
| "         | H3 (20 m)    | ND                               | -             | 24.8       | 33.88 |    | "         | T2 (0 m)     | ND                               | +             | 26.70      | 32.73 |    |
| "         | H4 (20 m)    | ND                               | -             | 25.2       | 33.99 |    | "         | T2 (20 m)    | ND                               | +             | 26.61      | 32.88 |    |
| "         | H5 (20 m)    | ND                               | -             | 25.6       | 34.09 |    |           |              |                                  |               |            |       |    |
| "         | H6 (20 m)    | ND                               | -             | 25.7       | 33.86 |    |           |              |                                  |               |            |       |    |

表4 *Cochlodinium polykrikoides* のリボタイプ別の LAMP 法による検出結果

| 島根県       |              |                                       |                                       |    | 山口県      |              |                                       |                                       |    |
|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----|----------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----|
| Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>C.polykrikoides</i><br>Philippines | <i>C.polykrikoides</i><br>Type-Kasasa | 備考 | Date     | 調査場所<br>(水深) | <i>C.polykrikoides</i><br>Philippines | <i>C.polykrikoides</i><br>Type-Kasasa | 備考 |
| 2019/7/30 | SA (0 m)     | -                                     | -                                     |    | 2019/8/8 | Y1 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | SA (20 m)    | -                                     | -                                     |    | "        | Y1 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | SB (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "        | Y2 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | SB (20m)     | -                                     | -                                     |    | "        | Y2 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| 2019/9/3  | SA (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "        | Y3 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | SA (20 m)    | -                                     | -                                     |    | "        | Y3 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | SB (0 m)     | -                                     | -                                     |    | 2019/9/2 | Y1 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | SB (20m)     | -                                     | -                                     |    | "        | Y1 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
|           |              |                                       |                                       |    | "        | Y2 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
|           |              |                                       |                                       |    | "        | Y2 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
|           |              |                                       |                                       |    | "        | Y3 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
|           |              |                                       |                                       |    | "        | Y3 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |

| 兵庫県       |              |                                       |                                       |    | 鳥取県       |              |                                       |                                       |    |
|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----|
| Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>C.polykrikoides</i><br>Philippines | <i>C.polykrikoides</i><br>Type-Kasasa | 備考 | Date      | 調査場所<br>(水深) | <i>C.polykrikoides</i><br>Philippines | <i>C.polykrikoides</i><br>Type-Kasasa | 備考 |
| 2019.7.30 | H1 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | 2019/6/27 | T6 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H2 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "         | T6 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H3 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | 2019/7/25 | T2 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H4 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "         | T2 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H5 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "         | T3 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H6 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "         | T3 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H1 (20 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T4 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H2 (20 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T4 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H3 (20 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T5 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H4 (20 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T5 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H5 (20 m)    | -                                     | -                                     |    | 2019/7/26 | T1 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H6 (20 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T1 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H1 (58 m)    | -                                     | -                                     |    | 2019/9/3  | T3 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H2 (45 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T3 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H3 (45 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T4 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H4 (39 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T4 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H5 (42 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T5 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H6 (47 m)    | -                                     | -                                     |    | "         | T5 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| 2019.8.27 | H1 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | 2019/9/4  | T1 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H2 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "         | T1 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H3 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "         | T2 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |
| "         | H4 (0 m)     | -                                     | -                                     |    | "         | T2 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |
| "         | H5 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H6 (0 m)     | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H1 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H2 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H3 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H4 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H5 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H6 (20 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H1 (43 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H2 (39 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H3 (46 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H4 (42 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |
| "         | H5 (39 m)    | -                                     | -                                     |    |           |              |                                       |                                       |    |

1) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視および予察技術開発  
オ. 九州北部海域

長崎県総合水産試験場

平江想, 山本佳奈, 山砥稔文

佐賀県玄海水産振興センター

吉田賢二, 牟田圭司, 山口忠則

九州大学総合理工学研究院

山口創一

水産研究・教育機構 中央水産研究所

青木一弘

1 全体計画

(1) 目的

近年, 伊万里湾を中心とする九州北部海域においてカレニア等鞭毛藻による有害赤潮が発生し, 魚介類がへい死する漁業被害が発生していることから, 各機関が連携して広域共同モニタリングを実施することにより, 有害赤潮の監視体制の強化, 発生機構の解明と発生予測技術の開発並びに被害防止技術の開発を行い, 有害赤潮等による漁業被害の防止と健全な海洋生態系の保全に資することを目的とする。

2 平成 31 年度計画及び結果

(1) 目的

全体計画と同じ

(2) 方法

1) 長崎県海域における赤潮モニタリング (長崎県総合水産試験場)

【定点調査】

① 調査定点

伊万里湾内 8 定点。(調査定点 1~8: 図 1 と表 1 参照)

② 調査回数

6 月中旬~8 月下旬にかけて, 原則 1 回/週。合計 11 回。

③調査項目

- ・多項目水質計による鉛直観測 (水温、塩分、クロロフィル蛍光値)
- ・プランクトン検鏡 (0, 5, 10 m およびクロロフィル蛍光極大層)
- ・栄養塩分析 (上記 8 定点の 0, 5, 10, 20 m 層の  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,

SiO<sub>2</sub>-Si, St.1, 4, 7についてはB-1 mを追加)

【定点連続観測】

図1および表1の定点15の養殖筏において実施した。

① テレメーター（水温、塩分、Chl 蛍光、濁度）によるリアルタイムモニタリング

・設置期間：6月～8月（3ヶ月間）

・設置水深：1.5 m 層, 5 m 層

30分毎にデータを取得し、関係機関に自動送信。

2) 佐賀県海域における赤潮モニタリング（佐賀県玄海水産振興センター）

【定点調査】

① 調査定点

伊万里湾内6定点。（調査定点9～14：図1と表1参照）

② 調査回数

6～9月：週1回程度。5月及び10月～3月：月1回程度。

③ 調査項目

（水質）水温、塩分、DO、pH、栄養塩（NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、SiO<sub>2</sub>-Si）  
Chl-a、透明度、水色

（プランクトン）有害赤潮プランクトンの同定・計数

④ 調査層

0, 2.5, 5, (10), B-1 m

（水温、塩分、Chl-a、DOについては鉛直測定を実施）

3) 流動モデルによる流動場の解析（水産研究・教育機構中央水産研究所）

2017年度の*K. mikimotoi* 赤潮発生時に、海流により初期発生域である湾東部から湾西部へ赤潮が輸送されたことが示唆されており（Aoki et al. 2019）、本年度夏季に発生した*K. mikimotoi* 赤潮の動態にも湾内流動が寄与した可能性がある。よって、伊万里湾を計算領域とした流動モデルを用いて、2019年度の流動場の解析を実施した。モデルの詳細についてはAoki et al. (2019) を参照。

4) 赤潮動態モデルの開発および発生シナリオの検証（九州大学総合理工学研究院）

上記3)のモデルでは流動場のみを解析対象としている。しかし、*K. mikimotoi* は日周鉛直移動をする（平江ら 2019）ことが知られており、赤潮拡大には流動場と鉛直移動が複雑に寄与していると考えられる。よって、流動場の有害赤潮発生への寄与をより高度に検証するために、有限体積法沿岸海洋モデル（FVCOM）および*K. mikimotoi* の日周鉛直移動も

加味した粒子追跡法を用いた赤潮動態モデルの開発を行い、2012年度の赤潮動態を対象として解析および精度検証を実施した。

### (3) 結果及び考察

#### 1) 植物プランクトンの出現状況

2019年度調査期間中の伊万里湾における赤潮発生件数は1件であり、構成種は *K. mikimotoi* であった。長崎県、佐賀県海域ともに、伊万里湾における本種赤潮の発生時期は過去7年間に於いて早期であり（表2）、養殖魚介類への漁業被害も発生した。*K. mikimotoi* の出現状況を臨時調査の結果も含めて以下に示す。

2019年5月27日から8月20日における *K. mikimotoi* の水平分布を図2に示す。また、同期間における海域別（湾西部、湾中部、湾東部、図1）の *K. mikimotoi* の細胞密度の推移を図3に示す。ここで示す細胞密度は、各層およびクロロフィル蛍光値極大層での採水・検鏡で確認された最高値である。*K. mikimotoi* は5月27日に湾東部で初認（2 cells/mL）された。6月11日から6月18日にかけては、*K. mikimotoi* が500 cells/mLを超える地点が湾東部で確認され、赤潮が形成された。その後、7月上旬にかけて湾中部や湾西部も含めて全体的に赤潮が形成された。また、7月9日から8月1日にかけては、湾東部でさらに細胞密度が増加し、1万 cells/mLを超える *K. mikimotoi* の赤潮着色域が確認された。しかし、その後急速に細胞密度が減少し、長崎県海域で8月7日に、佐賀県海域では8月20日に終息した。なお、今期の最高細胞密度は7月19日に鷹島南部で局所的に赤潮着色域が確認された210,500 cells/mLであった。

#### 2) 水質

##### ① 水温（定点連続水温）

Stn.15の水深1.5 m層と5 m層における2019年6月21日から8月20日までの日平均水温を図4に示す。1.5 m層は21.1～28.9 °C、5 m層は20.9～28.5 °Cの範囲で推移した。

##### ② 水温、塩分、DO

湾西部、湾中部、湾東部の代表定点 Stn.1, Stn.7, Stn.10 および Stn.14 における2019年6月11日から8月20日までの表層（0.5 m）および底層（B-1 m）の水温、塩分、DOの推移を図5に示す。表層水温は21.0～30.0 °C、底層水温は20.2～25.2 °C、表層塩分は25.2～34.2、底層塩分は32.9～34.4、表層DOは83.0～229.0 %、底層DOは30.4～92.5 %の範囲で推移した。

##### ③ DIN, PO<sub>4</sub>-P

湾西部、湾中部、湾東部の代表定点 Stn.1, Stn.7, Stn.10 および Stn.14 における2019年6

月 11 日から 8 月 20 日までの表層 (0.5 m) および 10 m 層の DIN の推移を図 6 に示す。表層 DIN は 0.05~24.83  $\mu\text{M}$ , 10 m 層 DIN は 0.08~63.12  $\mu\text{M}$ , 表層  $\text{PO}_4\text{-P}$  は 0.00~0.30  $\mu\text{M}$ , 底層  $\text{PO}_4\text{-P}$  は 0.01~0.32  $\mu\text{M}$  の範囲で推移した。

### 3) *K. mikimotoi* 赤潮と環境要因の関係

#### ① 赤潮の発生～衰退 (湾東部海域)

前述のとおり, 2019 年度の *K. mikimotoi* 赤潮発生は, 2012 年~2019 年の間では早い時期に発生した (表 2)。この環境要因として, 図 7 に示すとおり, 春季の気温が高く推移したことが考えられる。*K. mikimotoi* は, 春から夏にかけての昇温 (16°C 以上) が増殖に影響することが報告されている (本城, 1997)。また, 本年は 2018 年から 2019 年に跨ぐ冬季シード調査において, 遊泳細胞が確認されていた。

湾東部海域における *K. mikimotoi* 赤潮の出現については, 6 月中・下旬の赤潮発生・増殖期, 7 月の高密度赤潮発生期, 8 月上・中旬の赤潮衰退期の 3 期に分けることが出来る。これらの赤潮発生, 増殖, 衰退要因としては, 以下のような気象海象条件等が考えられる。

##### 【6 月中・下旬の赤潮発生・増殖期】

- ・ 表層水温 (St.10,14) は 23~25 °C で推移し, 増殖に好適であった。(図 5 参照)
- ・ 湾東部の表層 DIN (St.14) は, 降雨の影響もあり豊富であった。(図 6 参照)
- ・ 競合種 (珪藻類) の出現量が少なかった。(図 8 参照)

##### 【7 月の高密度赤潮発生期】

- ・ 表層水温 (St.10,14) は 23~29 °C で推移し, 増殖に好適であった。(図 5 参照)
- ・ 湾東部 (St.14) の表層 DIN は, 降雨の影響もあり豊富であった。(図 6 参照)
- ・ 7 月上・中旬は日照時間が少なかった。(図 7 参照)
- ・ 7 月上・中旬は競合種 (珪藻類) の出現量が少なかった。(図 9 参照)

##### 【8 月上・中旬の赤潮衰退期】

- ・ 表層水温 (St.10,14) は 27~30 °C と高水温で推移した。(図 5 参照)
- ・ 8 月上旬は降水量が少なく, 日照時間が多かった。(図 8 参照)

湾中部および西部の *K. mikimotoi* 赤潮の動向については次の②に詳述する。

#### ② 赤潮海域の拡大

図 2, 3 に示された各海域における *K. mikimotoi* 細胞密度の時系列から, 以下のように赤潮海域が拡大したことがわかる。まず, これまでも報告されてきたように, 赤潮の初期発生海域は湾東部である。その後 6 月 19~21 日に湾中部にまで拡大し, 7 月初旬に湾西部にまで拡大した。この 2 度の赤潮拡大機構について解析を行った。

まず 6 月中旬の湾中部への赤潮拡大について解析を行った。6 月 17 日~25 日間の湾西部~湾中部における塩分の鉛直断面図 (図 10) をみると表層塩分が増加しており, 表層塩分

の変動から、湾東部の水塊が湾中部に拡大したことは確認できなかった。一方、6月17日には湾西部 (Stn.1~4) や湾中部の一部 (Stn.5) の下層に分布していた 20~20.5℃の低温水が、6月25日には湾中部 (Stn.5~8) の下層でも確認された。下層の塩分も水温と類似した変化を示しており、高塩分水が湾中部 (Stn.5~8) の下層にまで広がっていた。同日の湾中部の Stn.5 の中層 (深度 10~15 m) に *K. mikimotoi* 赤潮と考えられる高いクロロフィル値が確認された (図 10)。また、同日の湾中部の中下層には比較的高濃度な栄養塩が確認でき、DIN および DIP 共に *K. mikimotoi* 増殖に関わる半飽和定数 (窒素 0.68  $\mu\text{M}$ , リン 0.14  $\mu\text{M}$ , 山口, 1994) を越える濃度にまで増加した (図 11, 12)。同時期には強い北東風が確認でき (図 13)、2017 年の *K. mikimotoi* 赤潮の拡大期 (Aoki et al. 2019) と似た海況の変化であったことが分かった。流動モデルの結果からも同時期に湾中部中層で東向流、表層で西向流が確認できることから (図 14)、北東風に駆動された循環により湾中部下層にまで低温・高塩・高栄養の水塊が移流され、湾東部に分布していた赤潮が表層の西向流により湾中部に移流されたと推察される。これらの結果は、北東風が“赤潮が初期発生域から湾中部まで拡大”と“湾中部に栄養塩を供給”という 2 点で赤潮拡大に寄与した可能性を示した。

次に、7月初旬の湾西部への赤潮拡大について解析を行う。赤潮が湾西部にまで拡大した時 (7月2日) の、塩分の鉛直断面図 (図 10) を見ると、表層塩分が 33 以下にまで低下していた。湾西部に比べ、湾中部の方がより塩分が低いことから、主要河川 (有田川・伊万里川) が流入する湾奥の水塊が湾中部・湾西部にまで移流したと考えられる。その駆動要因には、直前の 6 月末にまとまった降雨 (図 6) による、河口循環流の強化が挙げられる。7月2日のクロロフィル a 鉛直断面図をみると、その前 (6月25日) と比して、ピークが中層から亜表層の方へシフトしており、赤潮の水平移流に表層流が寄与したと考えても妥当であると判断した。よって、7月初旬の湾西部への赤潮拡大要因としては、まとまった降雨により強化された河口循環流により表層水が赤潮を伴って、東から西へ移流したことが考えられる。

6月12日~7月9日の期間、湾西部 (Stn.1-2) で DIN および DIP 濃度が共に半飽和定数を越え、特に下層で高濃度だった。DIN の内訳をみるとアンモニア態窒素が主体になっていることもあり、この高栄養塩水は外洋下層水ではなく、湾内部における再生産により生じた可能性がある。本年度湾中部・湾西部に出現した 7月2日の低塩水には高濃度の栄養塩は含まれていなかったことに加えて、過去には湾西部で *K. mikimotoi* 赤潮が地場発生したことが報告されている (長崎県, 2018) ことから、湾西部下層の栄養塩動態を把握することも重要であると考えられる。

#### 4) 長崎県海域における被害状況と対策

本年度の夏季長崎県海域における伊万里湾の *K. mikimotoi* 赤潮は、発生期間が 6月11日から 8月7日までの約 2 ヶ月間継続し、かつ最高細胞密度 210,500 cells/mL を記録するなど、

当湾では過去最大規模であった。7月にクロマグロやトラフグ等がへい死し、被害金額は合計 5,687 万円であった（8 月 22 日松浦市発表）。7 月上旬は湾西部の星鹿地先でクロマグロとヒラマサ、7 月中～下旬は湾中部の鷹島南部でトラフグとクエ、湾西部の星鹿地先でクロマグロやカンパチ等がへい死した。

7 月上旬は前述のとおり、湾西部への赤潮の移流が確認されており、7 月 4 日午後の星鹿地先における粘土散布対応時には、漁場近辺でクロロフィル蛍光値が 100 を超える水塊や着色域を自主監視体制が確認した。2017 年度の事例（長崎県, 2018）においても湾西部への移流時に被害が生じており、今回も同様のケースであったことが分かった。

7 月下旬においては、鷹島南部漁場 St.15 の亜表層（1.5 m）のクロロフィル蛍光値が高く推移しており（図 15）、現場観測においても 7 月 19 日に最高細胞密度が記録され、その周辺でも数万 cells/mL 程度の水塊が確認された。気象条件としては、降水および南風が卓越しており（図 6, 13）、鷹島南部に集積しやすい条件下にあったことが考えられる。また、St.15 の筏上の光量子束密度は当時  $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  程度と低く推移していた。*K. mikimotoi* は、日中に弱光層に集積する特性を有し（平江ら, 2019 など）、高密度化時（山砥ら, 2016 など）に表層に集積しやすくなることが報告されており、当時表層に濃密な赤潮を形成しやすい条件であったことが考えられる。他方で、窒素欠乏状態でも表層に集積することが報告されているが（Yuasa et al., 2018）、DIN の欠乏は顕著でなかった（図 12）。このような条件に加え、現場のトラフグ養殖網は 5 m と浅く、高密度の *K. mikimotoi* に接触する機会が多かったことが被害につながったと推察される。一方で、7 月上旬は被害がなく、中層（5 m, 7.5 m）のクロロフィル蛍光値が高い傾向にあり、トラフグ被害への表層赤潮顕在化の影響が裏付けられる。

対策においては、ガイドライン（長崎県, 2018）の方針に基づき今年度も実施した。6 月中旬には福島南部、7 月中には鷹島南部と星鹿地先で粘土散布を実施した。6 月中旬は、すでに広範囲化しており、より初期の段階での対応が求められることが分かった。赤潮の拡大後は、漁場周辺で状況に応じて AAQ による探索と中層散布機（自主監視体制製作）を併用した手法等を漁業者主体で実施した（図 16）。聞き取りでは、粘土散布後に着色域や細胞密度が一時的に減少する傾向があるとのことであり、引き続き有効な対策について模索していきたい。

#### 5) 赤潮動態モデルを用いた移流型赤潮の発生シナリオの検証

FVCOM と粒子追跡法を用いた赤潮動態モデルを開発し、2012 年に発生した赤潮の動態を再現することができた。すなわち、2012 年に鷹島南部海域で養殖魚の斃死を招いた *K. mikimotoi* 赤潮は福島東部海域からの移流によるものであると結論された。その輸送要因として大量降水に起因する低密度水の南風による輸送と、風が止んだことによる西方向への密度流の発達が挙げられた。さらには、この流れに潮汐による下げ潮が重なり、強い西向き

流れが駆動された。これらの要因が重なり合ったことで福島北部海域から鷹島南部海域への赤潮水塊の大規模移流が発生したと推察された。今後は本モデルをベースとした赤潮予報モデルの確立を目指していきたいと考えている。

#### 引用文献

- Aoki, K., H. Kuroda, T. Setou, M. Okazaki, T. Yamatogi, N. Ishida, S. Hirae, K. Yoshida & Y. Mitoya. Exceptional red-tide of fish-killing dinoflagellate *Karenia mikimotoi* promoted by typhoon-induced upwelling. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 2019; **219**:14-23.
- 長崎県, 伊万里湾赤潮対策ガイドライン, 2018.
- 平江 想, 山砥稔文, 石田直也, 平野慶二, 小池一彦, 青木一弘. 長崎県九十九島海域楠泊地先における有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* のメソコスム内での日周鉛直移動について. 日本プランクトン学会報 2019 ; **66**: 1-10.
- 山砥稔文・石田直也・平江想・杉原志貴・鎌田正幸・西山嘉乃・青木一弘. 2012 年伊万里湾で発生した有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* 赤潮の環境特性と養殖トラフグの大量斃死. 藻類 2016 ; **64**: 94-101.
- Yuasa K, Shikata T, Kuwahara K, Nishiyama Y. Adverse effects of strong light and nitrogen deficiency on cell viability, photosynthesis, and motility of the red-tide dinoflagellate *Karenia mikimotoi*. *Phycologia*. 2018; **57**: 525-533.

表 1 伊万里湾における調査定点座標

| 定点番号        | 緯度経度          |                |
|-------------|---------------|----------------|
|             | 北緯            | 東経             |
| 1 (城山下)     | 33°22' 56.64" | 129°41' 22.92" |
| 2 (青島南)     | 33°24' 13.68" | 129°41' 18.24" |
| 3 (魚固島南)    | 33°25' 04.08" | 129°42' 32.04" |
| 4 (船唐津沖)    | 33°24' 18.36" | 129°43' 15.24" |
| 5 (浦下沖)     | 33°24' 42.12" | 129°45' 15.48" |
| 6 (初崎沖)     | 33°25' 13.80" | 129°47' 35.52" |
| 7 (山島東)     | 33°24' 31.32" | 129°46' 27.48" |
| 8 (今福沖)     | 33°21' 51.12" | 129°45' 40.32" |
| 9 (晴気)      | 33°26' 03.00" | 129°48' 16.80" |
| 10 (阿漕)     | 33°24' 34.80" | 129°49' 55.80" |
| 11 (大浦浜)    | 33°23' 47.40" | 129°51' 24.60" |
| 12 (波多津)    | 33°22' 38.40" | 129°51' 49.20" |
| 13 (福島南)    | 33°21' 03.60" | 129°50' 00.60" |
| 14 (伊万里港入口) | 33°20' 21.60" | 129°48' 26.40" |
| 15 (南ヶ崎)    | 33°25' 26.40" | 129°47' 09.24" |

表 2 伊万里湾におけるカレニア赤潮の発生期間

| 年   | 長崎県海域 |   |      | 佐賀県海域 |   |      |
|-----|-------|---|------|-------|---|------|
|     | 発生日   | ～ | 終息日  | 発生日   | ～ | 終息日  |
| H24 | 7/16  | ～ | 8/1  | 6/25  | ～ | 8/8  |
| 25  | 7/24  | ～ | 8/2  | 7/26  | ～ | 8/12 |
| 26  | 7/23  | ～ | 8/26 | 7/11  | ～ | 8/31 |
| 27  | 8/11  | ～ | 8/28 | 8/11  | ～ | 11/1 |
| 29  | 7/13  | ～ | 8/25 | 7/12  | ～ | 9/5  |
| 30  | 6/6   | ～ | 8/3  | 6/12  | ～ | 9/11 |
| R元  | 6/11  | ～ | 8/7  | 6/11  | ～ | 8/20 |

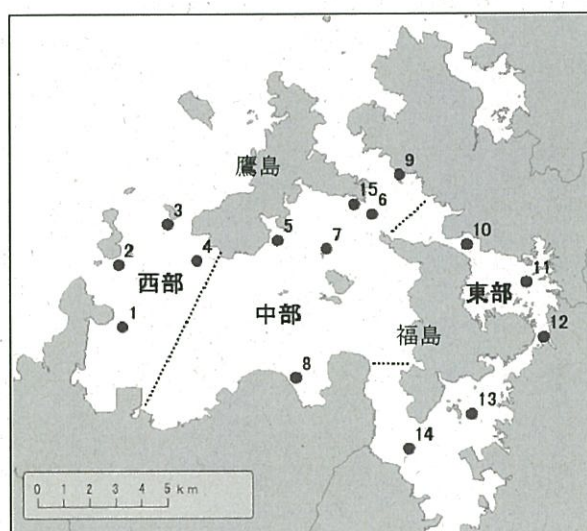


図 1 伊万里湾における調査定点 (※St.15 は連続観測定点)

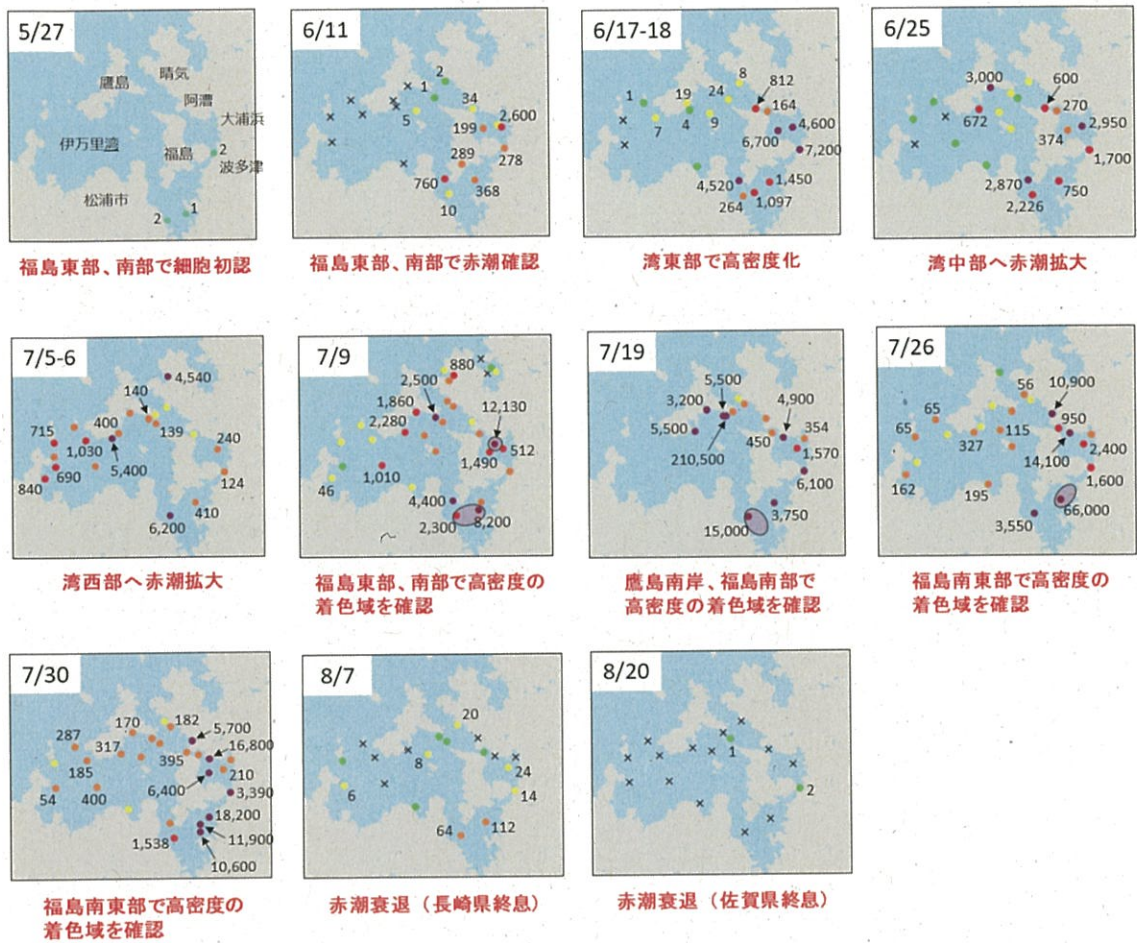


図2 伊万里湾における *K. mikimotoi* の水平分布

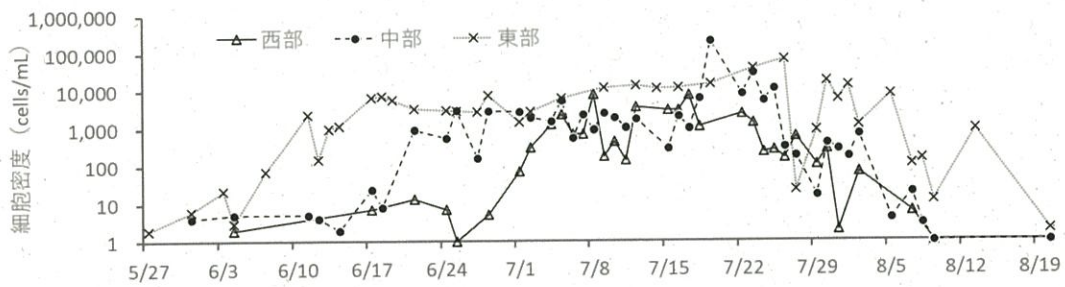


図3 海域別の *K. mikimotoi* 最高細胞密度の推移

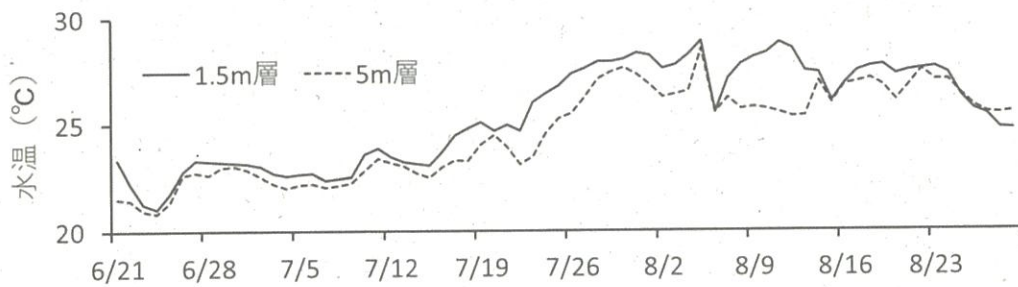


図4 Stn.15 における水温の推移