

# 2014年夏季に周防灘大分県海域で確認された有害渦鞭毛藻 *Karenia digitata* の出現時の環境特性と魚貝類への影響

岩野英樹

大分県農林水産研究指導センター水産研究部浅海・内水面グループ

## Environmental Characteristics Observed in the Appearance of the Harmful Dinoflagellata *Karenia digitata* Confirmed In Suo-Nada, Oita Prefecture, during the Summer of 2014 and Its Effect on Fishery Product

HIDEKI IWANO

Shallow/Fresh Water Group, Fisheries Research Division  
Oita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center

キーワード：*Karenia digitata*，周防灘，環境特性，*Karenia mikimotoi*，毒性，アサリ

### 結 言

周防灘は、瀬戸内海の西部に位置し、山口県、福岡県、大分県に囲まれている。大分県海域は、その南部にあり、中津市から東方へ国東半島の西端まで続く単調な海岸線は、一般的に緩やかな勾配の海岸地形で広大な干潟となっている。一方、国東半島北部の海岸線は、複雑な入谷式の岩礁帯で干潟はほとんど存在しない。この海域では、小型機船底びき網漁業、刺し網漁業、干潟を利用した採貝漁業・ノリ養殖漁業、マガキ等の二枚貝養殖漁業等が営まれているが、過去に渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* による赤潮が度々発生し<sup>1)~5)</sup>、1979年にはアサリで2億6,000万円を超える漁業被害が<sup>1)</sup>、1985年には周防灘、伊予灘に豊後水道を含めた広範囲の海域で赤潮が発生し、天然魚貝類、定置網・刺し網や畜養・養殖の魚類で7億1千万円を超える漁業被害が<sup>3)</sup>報告されている。近年では、2012年に天然アワビ・サザエで3,800万円を超える漁業被害が報告されている<sup>5)</sup>。

この周防灘において、2014年7月に *K. mikimotoi* に混在して渦鞭毛藻 *Karenia digitata* が初めて確認され、大分県農林水産研究指導センター水産研究部浅海・内水面グループの種苗生産施設において魚貝類の斃死があった。本種は、1995年に佐賀県仮屋湾<sup>6)</sup>、山口県下

関漁港で初めて出現し、強い魚毒性が報告されているが<sup>7)</sup>、本種の赤潮発生時の出現状況や環境特性に関する報告は少ない。今回、本種の出現状況と環境特性について調査を行うとともに、魚貝類への影響について実験を行い、いくつかの知見が得られたので報告する。

### 材料と方法

**赤潮調査** 図1に調査海域と調査定点を示す。2014年4月7日から9月1日までの間に周防灘の Stn.1 から Stn.7 において定期調査を原則として毎月2回実施した。ただし、7月と8月は3回、9月は1回である。

調査期間中に *K. mikimotoi* の赤潮が発生したので、7月25日から8月25日までの間に、岸壁採水による臨時調査を周防灘で14ヶ所、伊予灘で17ヶ所、別府湾で9ヶ所実施したが、その際に *K. digitata* についても計数を行った。

さらに、*K. digitata* の細胞密度が1 cell/mL未満となった8月下旬からは海水を100倍に濃縮して検鏡を行った。100倍濃縮検鏡は、Stn.1, Stn.3, Stn.4が8月20日から翌年の12月2日までの期間に、守江湾が9月25日から翌年の12月24日までの期間に、呉崎が9月12日から翌年の12月28日までの期間に毎月1回以上実施した。ただし、呉崎の2015年5月から8月は、未実

施である。

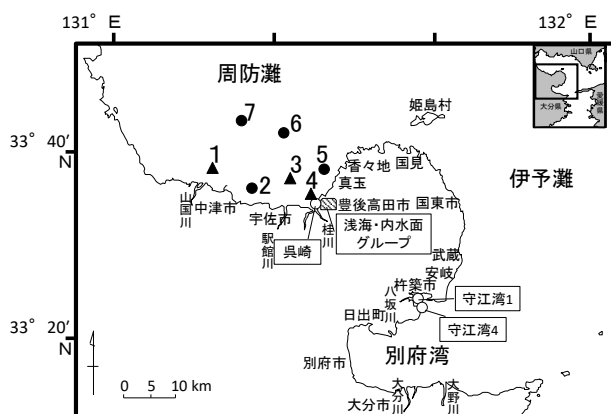


図 1. 大分県北部海域における調査海域と調査定点  
●：定期調査定点，▲：定期調査・濃縮調査定点，  
○：濃縮調査定点

採水は、定期調査の Stn.1 から Stn.5 が 0, 5, 海底上 1 m (以後 B-1 m) の計 3 層を、Stn.6, Stn.7 が 0, 5, 10, B-1 m の計 4 層を、守江湾 1 が 0, 2 m の計 2 層を、守江湾 4 が 0, 3, 5 m の計 3 層 (2015 年 4 月からは 0, 5 m の 2 層) を、リゴ- B 号採水器を用いて行った。呉崎と臨時調査は、リゴ- B 号採水器やバケツ等を用いて主に 0 m 層を採水した。採水した海水は、直ちに実験室に持ち帰り、界線入りスライドグラスを用いて顕微鏡下で計数した。100 倍濃縮検鏡では、500 mL の海水を 10  $\mu$ m メッシュの網地を用いて 5 mL まで濃縮濾過した。

定期調査の観測・分析項目は、水温、塩分、クロロフィル蛍光値、溶存態無機窒素 (DIN)、溶存態無機リン (DIP)、溶存酸素 (DO) である。水温、塩分、クロロフィル蛍光値の観測は、コンパクト CTD (JFE アドバンテック (株) ASTD687) を用いて行った。臨時調査と呉崎、守江湾の調査では、水温、塩分の測定をそれぞれ、デジタル温度計 ((株) 佐藤計量器製作所製)、サリノメーター ((株) 鶴見精機 DIGI-AUTO MODEL3-G) により行った。

海水中の栄養塩類の分析は、 $\text{NH}_4\text{-N}$  がインドフェノール青吸光度法、 $\text{NO}_2\text{-N}$  がナフチルエチレンジアミン吸光度法、 $\text{NO}_3\text{-N}$  が銅カドミウムカラム還元・ナフチルエチレンジアミン吸光度法、 $\text{PO}_4\text{-P}$  がアスコルビン酸還元・モリブデン青吸光度法により行った。溶存酸素 (DO) の測定は、ウィンクラー法により行った。なお、栄養塩分析用の試水は、ガラス繊維ろ紙 (GF/C, Whatman 社製) で濾過した後、分析まで  $-20^\circ\text{C}$  で保存した。2014 年の気象に関する資料は、豊後高田市の地域気象観測所で観測されたアメダスのデータ (大分

地方気象台)<sup>8)</sup>を使用した。

***K. digitata* の形態観察** 形態観察は、*K. digitata* とと思われるプランクトンを、顕微鏡下でマイクロピペットを用いて吸い上げ、別のスライドグラス上に移した後、カバーグラスをかけ、光学顕微鏡下で行った。*K. digitata* と判断された 116 個体について、細胞長と細胞幅を計測した。

**毒性試験** *K. digitata* が魚貝類に及ぼす影響を調べるため、ヒメハゼとアサリへの毒性試験を実施した。

ヒメハゼへの試験に用いた海水は、*K. digitata* と *K. mikimotoi* が混在する 3 種類の海水であり、7 月 25 日から 7 月 28 日の間に浅海・内水面グループの種苗生産施設から採取した。*K. digitata* と *K. mikimotoi* の細胞密度は、7 月 27 日に採取した試験区 1 が 1,800 cells/mL, 300 cells/mL, 7 月 25 日に採取した試験区 2 が 850 cells/mL, 60 cells/mL, 7 月 28 日に採取した試験区 3 が 160 cells/mL, 20 cells/mL である。また 7 月 25 日に、両種のプランクトンが確認されない海水を守江湾から採取し、ガラス繊維ろ紙 (GF/C, Whatman 社製) で濾過した後、対照区 1 として用いた。さらに 7 月 26 日には高田港から、*K. mikimotoi* が 4,000 cells/mL 含まれる海水を採取し、対照区 2 として用いた。試験は採水当日か翌日に行い、500 mL 容、または 1 L 容のビーカーに各海水を 400 mL、または 800 mL 入れ、平均全長 50 mm 程度のヒメハゼを 1 個体ずつ収容した。試験中は弱く通気を行いながら、20 ~ 24 時間後まで観察を行った。

アサリへの毒性試験は、平均殻長 10 mm のアサリ稚貝をバット (40 × 28 × 6.5 cm) に収容して、種苗生産施設の飼育海水を流水掛け流し条件で換水しながら行った。試験は、7 月 25 日と 7 月 28 日の 2 回行い、アサリの斃死状況と *K. digitata*, *K. mikimotoi* の細胞密度をそれぞれ 62 時間後、129 時間後まで観察した。試験に用いたアサリは、野外調査時に豊前海で採集された天然稚貝で、収容個数は、試験区 1 が 15 個、試験区 2 が 10 個である。なお、ヒメハゼ、アサリの両試験ともに、実験室内の空調を  $25^\circ\text{C}$  に設定して行った。

## 結 果

***K. digitata* の形態的特徴** *K. digitata* の光学顕微鏡写真を図 2, 図 3 に示した。本種の大きさは、細胞長が 15.1 ~ 27.8  $\mu\text{m}$  ( $19.9 \pm 2.5 \mu\text{m}$ ,  $N=116$ ), 細胞幅が 11.7 ~

23.3  $\mu\text{m}$  ( $16.4 \pm 2.3 \mu\text{m}$ ,  $N=116$ ), 長さ/幅が 1.1 ~ 1.4 ( $1.2 \pm 0.1$ ) であった。形態観察の結果, 細胞の形は, 球状または卵円状で, 背腹方向にわずかに扁平され, 下錐の底端中央部が凹入していないこと, 内部構造は,

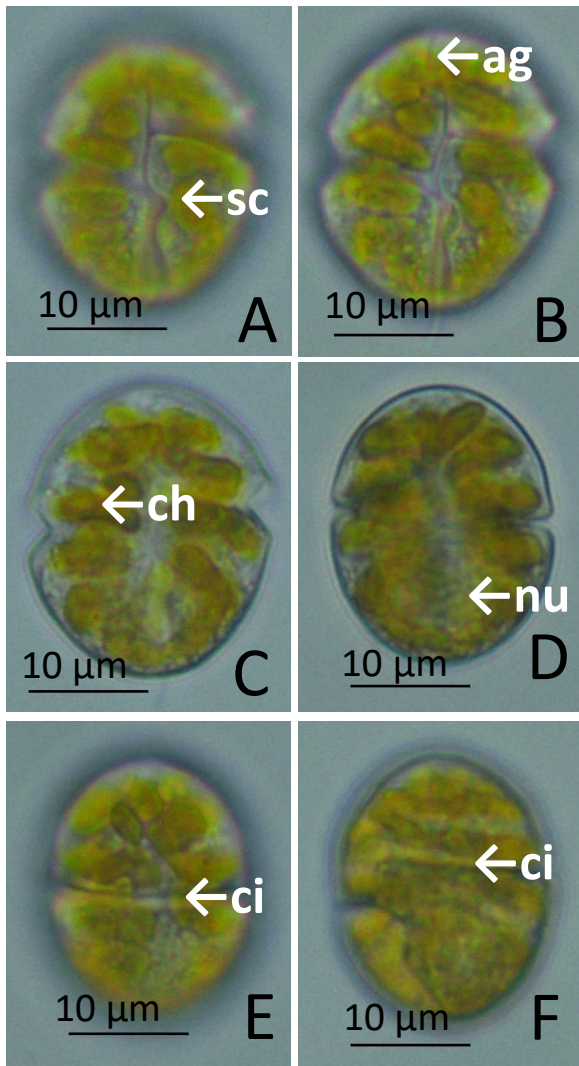


図 2. *Karenia digitata* の光学顕微鏡写真 A ~ C は腹面, D, E は背面, F は左横面。全て 1000 倍で撮影。sc は湾曲した縦溝。ag は直線状の上錐溝。ch は不規則な形をした色素体。nu は下錐の中央部にある核。ci は細胞を一周する横溝。

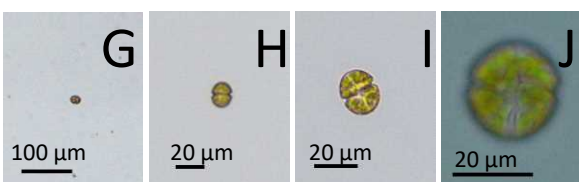


図 3. *Karenia digitata* の光学顕微鏡写真 G は 40 倍, H は 100 倍, I は 200 倍, J は 400 倍で撮影

縦溝が下錐部で左方向に湾曲し, 上錐溝が直線状で, 不定形の色素体を有し, 核が中央部から下錐部の位置にあることなどが観察された。内部構造は, 200 ~ 400 倍以上の高倍率で確認できたが, 通常モニタリング時の顕微鏡倍率である 40 倍では確認できず, 全体的に暗褐色の丸い細胞の形が確認できる程度であった。本種は, 細胞を回転させながら, 直線的に速く前進した。

有害赤潮プランクトン等の出現状況 2014 年 4 月 7 日から 9 月 1 日までの周防灘における *K. digitata*, *K. mikimotoi* および珪藻類の最高密度の推移を図 4 に示した。

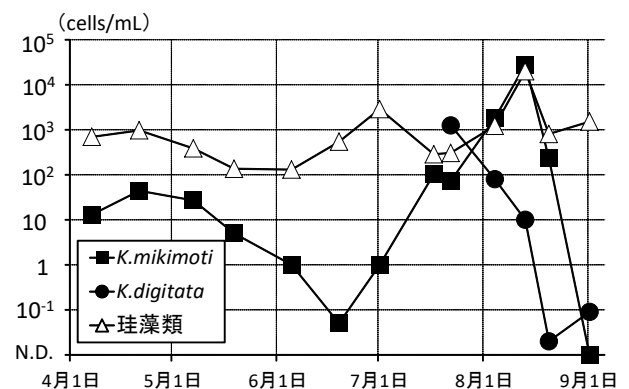


図 4. 周防灘における *Karenia digitata*, *Karenia mikimotoi*, 珪藻類の最高密度の推移 (2014 年 4 月 7 日 ~ 9 月 1 日)

*K. mikimotoi* は, 4 月下旬には 44 cells/mL まで増加したが, 5 月以降減少傾向を示し, 6 月中旬には 1 cell/mL 未満まで低下した。一方この頃から珪藻類は増加傾向を示し, 7 月上旬には *Chaetoceros* spp. を主体に 2,800 cells/mL まで増加したが, 中旬には 280 cells/mL まで減少した。珪藻類がピークに達した 7 月上旬頃から一旦, 1 cell/mL 未満の低密度となっていた *K. mikimotoi* が, 再び増加傾向に転じた。*K. mikimotoi* は, 7 月上旬に Stn.6 の 0 m 層で 1 cell/mL, 7 月中旬に Stn.4 の 5m 層で 103 cells/mL まで増加した。7 月下旬はやや減少して, Stn.1 の B-1 m 層で 73 cells/mL となったが, 8 月上旬に Stn.3 の 4.6 m 層で 1,790 cells/mL まで増加し, 中旬には, Stn.3 の表層で濃い着色がみられ, 27,830 cells/mL の細胞密度が確認された。しかしこの時, 沿岸のほとんどの調査点において, *K. mikimotoi* は 50 cells/mL 以下まで減少しており, *Skeletonema* spp. を主体とした珪藻類が 10,000 cells/mL を超えて優占種となっていた。その後 *K. mikimotoi* は減少を続け, 9 月上旬には 1 cell/mL 未満まで低下した。

一方 *K. digitata* は, *K. mikimotoi* が赤潮を形成してい

く途中の 7 月下旬に、Stn.4 の B-1m 層で 1,250 cells/mL の最高密度となった。その後、減少傾向を示し 8 月中旬には 1 cell/mL 未満まで低下した。なお、*K. digitata* は 7 月中旬に観察されていたが、種同定できず未計数であったため、記録上、初確認は 7 月下旬となった。

2014 年 7 月 22 日から 8 月 20 日までの周防灘における *K. digitata* 細胞密度の推移を図 5 に示した。7 月下旬に Stn.4, Stn.5, Stn.1 の B-1 m 層で確認された *K. digitata*

は、8 月上旬には、分布範囲を広げ、Stn.6 を除く全ての調査点で確認された。分布水深も広がり、0 m 層、中層でも確認される一方で、密度は低下し Stn.5 の 80 cells/mL が最高となった。

2014 年 7 月 22 日から 8 月 11 日までの大分県北部海域における *K. digitata* の水平分布を図 6 に示した。*K. digitata* の細胞密度は、豊後高田市地先の Stn.4 や高田港で高くそれぞれ 1,250 cells/mL, 930 cells/mL であっ

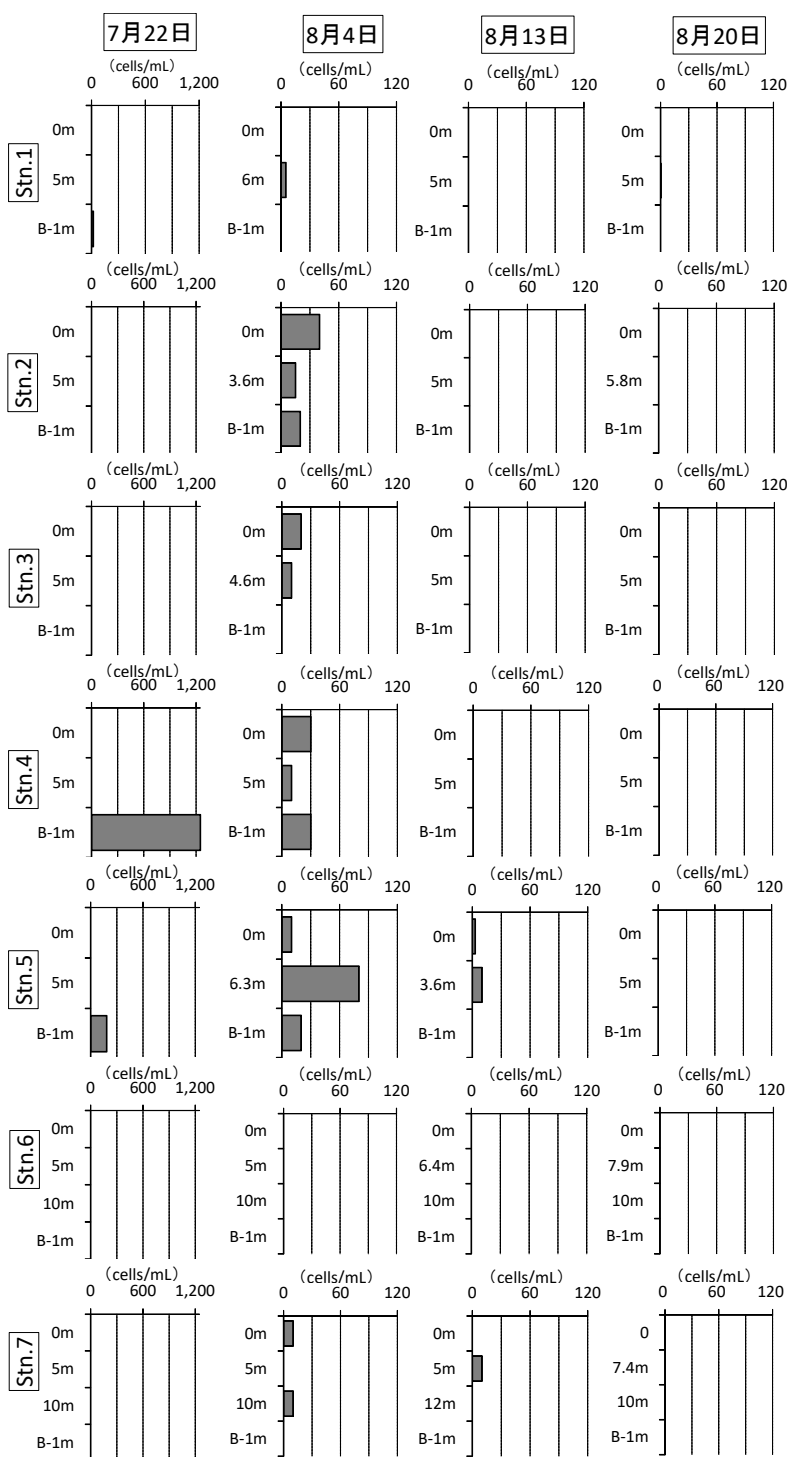


図 5. 周防灘における *Karenia digitata* の細胞密度の推移（2014 年 7 月 22 日～ 8 月 20 日）

た。本種は国東半島沿岸の国東市国見天神，同市国見古江，国東市富来，国東市田深などで 50～200 cells/mL が，別府湾の大分市田ノ浦ビーチでも 10 cells/mL が確認され，周防灘から伊予灘，別府湾へと移流・拡散していった。本種が確認された時には *K. mikimotoi* が混在し，密度は Stn.4 が 23 cells/mL，高田港が 129 cells/mL，天神が 740 cells/mL，古江が 3,200 cells/mL，富来が 3,900 cells/mL，田深が 920 cells/mL，大分市田ノ浦ビーチが 345 cells/mL であった。

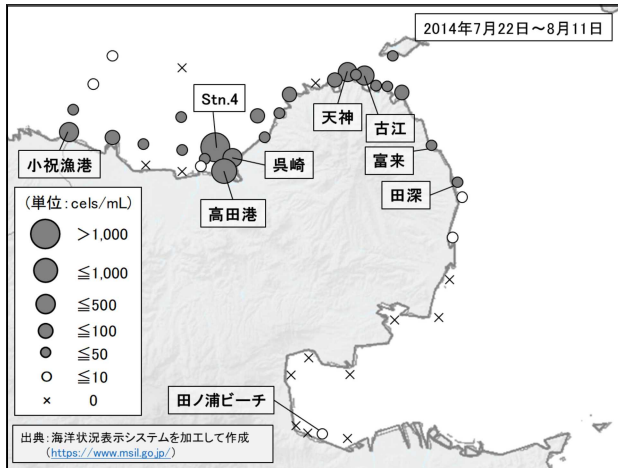


図 6. 大分県北部海域における *Karenia digitata* の水平分布 (2014 年 7 月 22 日～8 月 11 日)

2014 年 7 月 22 日から 2015 年 12 月 28 日までの大分県北部海域 (豊後高田市呉崎，守江湾 1，守江湾 4，周防灘 Stn.1, Stn.3, Stn.4) における *K. digitata* の出現状況を図 7 に示した。2014 年の 7 月下旬から出現した *K. digitata* は，11 月中旬まで断続的に低密度で確認された。その間 10 月下旬に呉崎で，7.00 cells/mL の小さなピークが確認された。*K. digitata* は 2014 年 11 月下旬から翌年の 11 月中旬まで確認されなかったが，2015 年 11 月

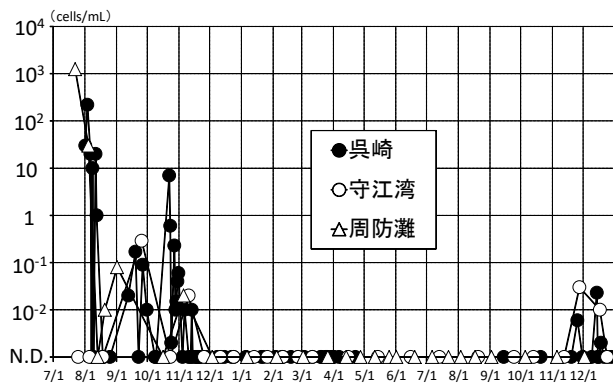


図 7. 大分県北部海域における *Karenia digitata* の出現状況 (2014 年 7 月 22 日～2015 年 12 月 28 日) 2014 年 8 月 20 日からは，100 倍濃縮海水による検鏡計数

下旬になって 1 cell/mL 未満の低密度で再び確認された。11 月 27 日の守江湾での 0.03 cells/mL が最高密度であった。

**有害赤潮プランクトン出現時の環境** 2014 年の豊後高田市における降水量，日照時間，平均気温の旬別推移を図 8-a，図 8-b，図 8-c に示す。

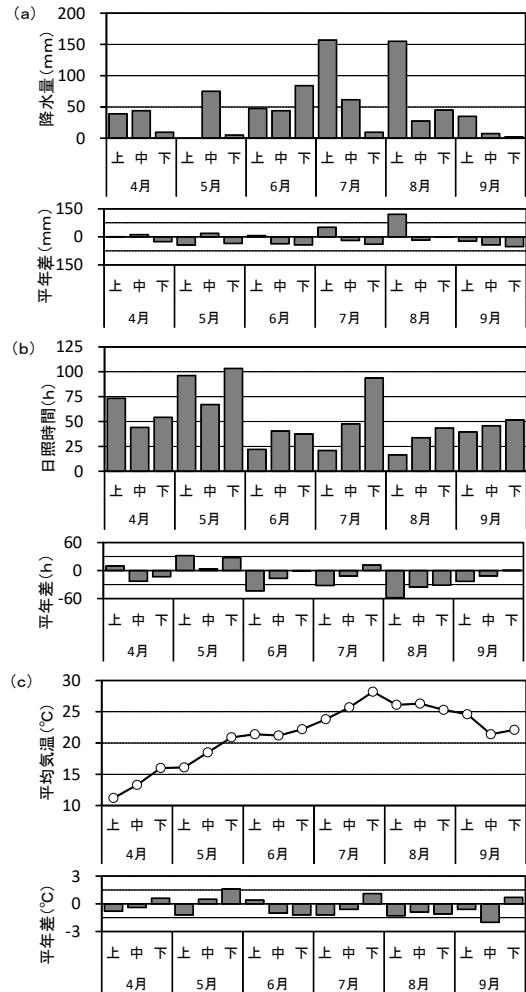


図 8. 大分県豊後高田市における気象の旬別推移 (2014 年 4 月～9 月) (a)降水量，(b)日照時間，(c)平均気温

6 月下旬，7 月上旬および 8 月上旬には，50 mm 前後の日降水量がそれぞれ数日間記録され，7 月上旬と 8 月上旬は，旬降水量が 150 mm を超えた。日照時間は，6 月上旬から 7 月中旬までは，平年に比べ短く，20.9～47.6 時間/旬であった。しかし，7 月下旬の日照時間は，梅雨明け後に晴天が続いた影響で，長くなり 93.7 時間/旬となった。同様に，平均気温も 6 月中旬から 7 月中旬までは，平年に比べ低めの -0.6～-1.2 °C で推移したが，7 月下旬は，平年に比べ 1.1 °C 高めの 28.2 °C とな

った。8 月以降、再び低日照・低気温となり、この傾向は 9 月まで継続した。

*K. digitata* が高密度に確認された Stn.4 における 2014 年 4 月から 9 月までの水温、塩分、クロロフィル蛍光値の推移を図 9-a, 図 9-b, 図 9-c に示す。低日照・低気温の影響で、6 月まではほとんど水温成層の形成は見られず、7 月上旬ごろから緩やかに成層の形成が始まった。7 月下旬には晴天が続いたことにより、強い水温成層が水深 6 m 付近に形成され、表層で 28 °C、底層で 22 °C の水温となっていた。8 月上旬には台風 12 号等の影響を受けて成層は崩壊し、9 月上旬まで 25 ~ 27 °C 台の水温で推移していた。

降雨の影響を受けて、6 月下旬頃から塩分成層の形成が見られ、7 月中旬から 8 月中旬にかけて、表層塩分は 30 以下の 26.68 ~ 28.86 の範囲で推移していた。塩分成層は、特に 7 月下旬に発達しており水深 6 m 付近までが 30 以下の低塩分となっていた。

クロロフィル蛍光値は、7 月中旬に *K. mikimotoi* による極大値が水深 4.9 m で見られ、細胞密度は 103 cells/mL であった。7 月下旬には *K. mikimotoi* に代わって *K. digitata* による極大値が海底上 10 cm でみられ、海底にべったり張り付いている様な反応を示した。この時、*K. mikimotoi* の密度は低下し 23 cells/mL になっていた。8 月中旬は、*Skeletonema* spp. を主体とする珪藻類による極大層が表層から中層にかけて見られた。

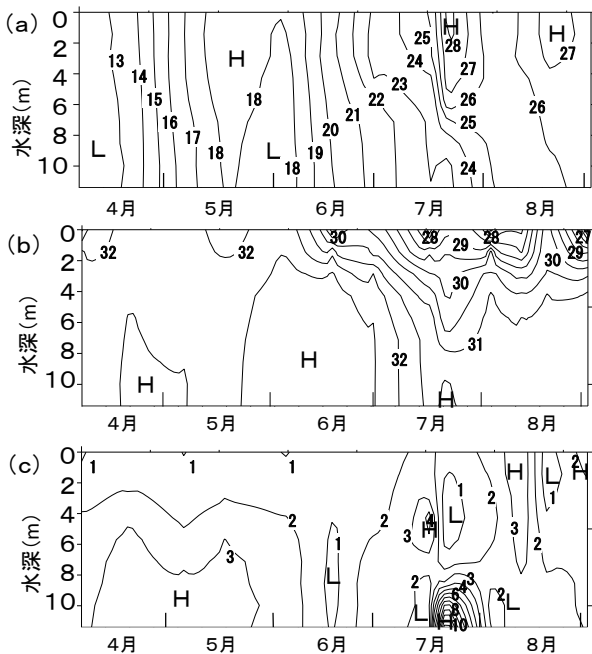


図 9. Stn.4 における水温 (a)、塩分 (b)、クロロフィル蛍光値 (c) の推移 (2014 年 4 月～9 月)

Stn.4 における B-1 m 層の溶存酸素飽和度の推移を図 10 に示す。溶存酸素飽和度は、成層が顕著に発達した 7 月下旬に 71 % の最低値となり、8 月上旬には成層の崩壊により 90 % まで回復した。

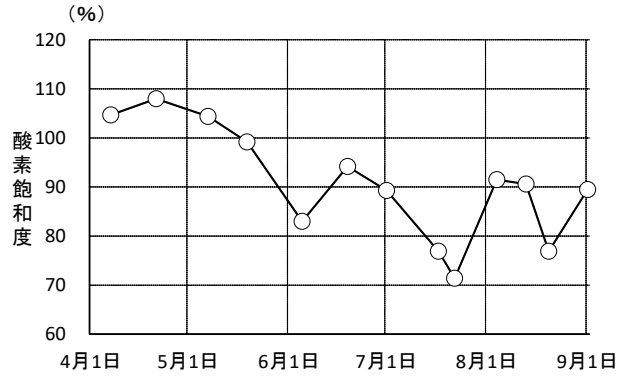


図 10. Stn.4 における B-1m 層の溶存酸素飽和度の推移 (2014 年 4 月～9 月)

Stn.4 における栄養塩の推移のうち DIN を図 11-a, DIP を図 11-b に示す。降雨の影響を受けて、表層の DIN は 6 月中旬から 7 月中旬の間に 2.8 ~ 8.4  $\mu\text{M}$  の高い値で推移したが、7 月下旬には、0.3  $\mu\text{M}$  まで低下した。8 月上旬に降雨の影響を受けて、表層 DIN は 6.6  $\mu\text{M}$  まで再び増加したが、中旬には 0.1  $\mu\text{M}$  まで低下した。表層の DIP は、表層の DIN とほぼ同様の傾向を示したが、8 月の低下が DIN より早い時期に見られていた。

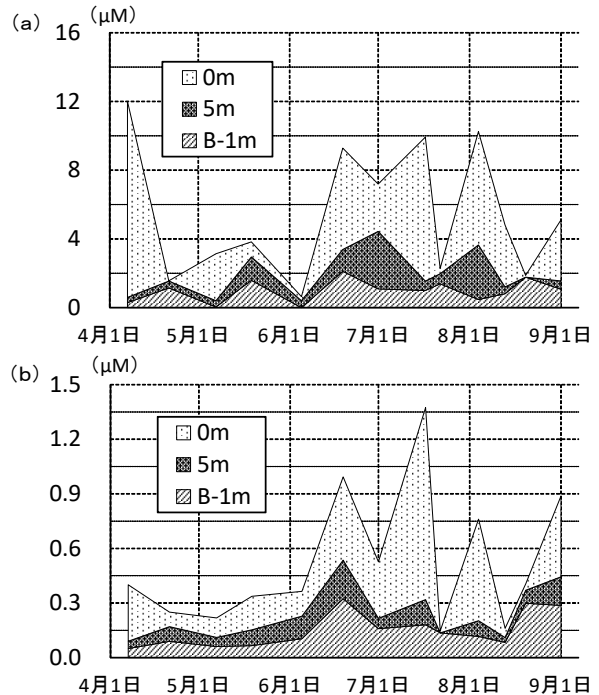


図 11. Stn.4 における栄養塩類の推移 (2014 年 4 月～9 月) (a) DIN, (b) DIP

大分県北部海域で *K. digitata* が出現した時の水温と塩分関係を図 12 に示す。*K. digitata* は、水温が 11.3 ~ 27.8 °C、塩分が 26.83 ~ 32.76 の範囲で観察された。2014 年夏季に最高密度 (1,250 cells/mL) が観察された時の水温、塩分は、22.7 °C、31.57 であった。また、2014 年秋季に最高密度 (7 cells/mL) が観察された時の水温、塩分は、21.1 °C、28.28 であった。

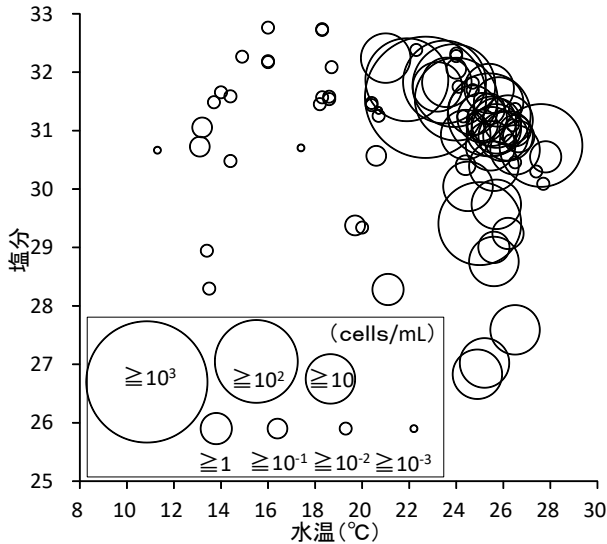


図12. 大分県北部海域で *Karenia digitata* が出現した時の水温、塩分の関係

**浅海・内水面グループ種苗生産施設における魚貝類の斃死状況** 浅海・内水面グループの種苗生産施設は、*K. digitata* が高密度に確認された Stn.4 に近い豊後高田市呉崎地先の水深 6 m 程度の海底付近から取水している。Stn.4 で *K. digitata* が高密度に確認された 3 日後の 7 月 25 日の午前中に、種苗生産中のマナマコと混養していたヒメハゼ (平均全長 50 mm, 約 100 尾)、種苗生産用のアサリ母貝 (平均殻長 30 mm, 約 2,500 個, 18 kg) ・人工生産されたアサリ稚貝 (殻長 10 ~ 20 mm, 約 26,000 個, 20 kg) ・野外調査で採集された天然アサリ (大きさ不明, 数 100 個) および種苗生産用のバカガイ母貝 (平均殻長 70 mm, 数 10 個) の斃死が確認された。アサリは、24 日の夕方時点では異常は見られていなかったが、翌朝午前 8 時 30 分頃に軟体部を露出させ開殻した状態の斃死アサリが多数確認された。しかし、マナマコと混養せずに止水で飼育していたヒメハゼは、斃死を免れた。また、人工生産された稚マナマコは、後日行った計数時に著しく個体数を減少させており、本種の影響による稚マナマコの斃死が疑われた。

飼育海水中の *K. digitata* の細胞密度の推移を図 13 に示した。細胞密度は、斃死が確認された 7 月 25 日の午

前中に 1,000 cells/mL を超え、27 日午前中に最高密度の 2,500 cells/mL となった。この頃には、施設内の水槽でパッチ状になった本種によると思われる着色が見られた。*K. digitata* は、28 日には 200 cells/mL まで急減して、8 月 2 日には 30 cells/mL 以下となった。飼育海水中には、本種に混じって *K. mikimotoi* が確認されたが、最高密度は、7 月 26 日の 160 cells/mL であった。また、*K. digitata* の密度は午後比べて午前の方が高い傾向にあった。

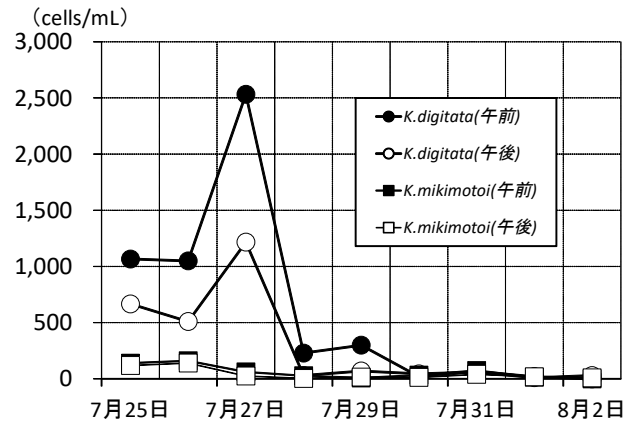


図13. 種苗生産施設飼育海水中の *Karenia digitata* 細胞密度の推移 午前の計数は 6:00 ~ 10:00 の間に、午後の計数は 12:00 ~ 18:00 の間に実施

***K. digitata* が魚貝類に及ぼす影響** *K. digitata* の暴露によるヒメハゼへの影響を表 1 に示した。試験区 1 では、ヒメハゼは、ビーカーに投入した直後から急上昇・急降下の狂奔行動を繰り返し、8 分後には表層をフラフラと遊泳した後、ビーカーの底に沈んだ。14 分後には平衡感覚を失い腹側を上にする様になり、22 分後に大きく口を開け、狂奔行動を 2 回見せた後、25 分後に斃死した。試験区 2 の供試魚は、30 分 ~ 47 分後までの間に腹側を上にする行動や狂奔行動を見せ始め、50 分 ~ 67 分後にそれぞれ斃死した。試験区 3 では、試験開始直後は目立った動きはなくビーカーの底に静かにじっとしていたが、84 分後から小刻みに前後移動を繰り返す動きを見せ始めた。90 分後には表層に上昇する動き、101 分後には口を大きく開ける動きを見せた。その後 120 分後までに、上下移動と小刻みな前後移動を繰り返したが、8 時間後には落ち着いた行動に戻り、24 時間後までに斃死は見られなかった。対照区 1, 対照区 2 は、試験区で見られたような異常行動は見れらず、斃死もなかった。

*K. digitata* の暴露によるアサリ生残の結果を図 14, 図 15 に示した。試験区 1 では、*K. digitata* の密度が



表 1. *Karenia digitata* の暴露によるヒメハゼへの影響

区分	細胞密度 (cells/mL)		経過時間															
	<i>K. digitata</i>	<i>K. mikimotoi</i>	10分	20分	30分	40分	50分	60分	70分	80分	90分	110分	120分	8時間	12時間	20時間		
試験区1	1,800	300	○	○	◎													
試験区2	850	60	-	-	-	-	○	○	◎									
試験区3	160	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-		
対照区1	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
対照区2	0	4,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

—：異常行動無し，○：異常行動有り，◎斃死

2,500 cells/mL となった 36 時間後からアサリの斃死が始まった。その後、密度は 2,000 cells/mL, 1,200 cells/mL, 200 cells/mL と減少していったが、生残率は、36 時間後に 73%，42 時間後に 33%，48 時間後に 7% と低下して、62 時間後に全てのアサリが斃死した。試験区 2 では、*K. digitata* は、300～10 cells/mL の範囲で推移し、アサリの斃死は無かった。

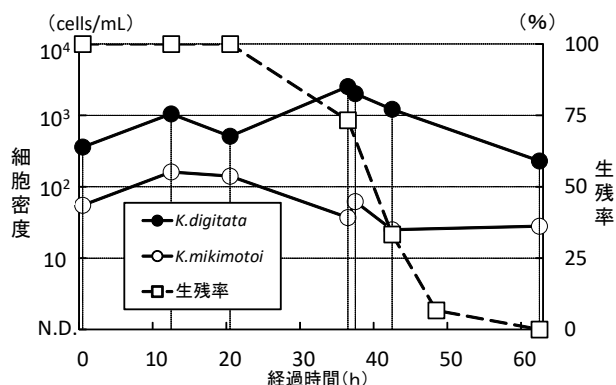


図 14. *Karenia digitata* の暴露によるアサリの生残 (試験区 1)

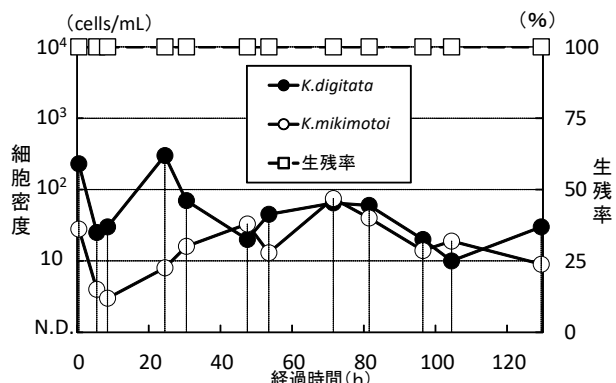


図 15. *Karenia digitata* の暴露によるアサリの生残 (試験区 2)

## 考 察

***K. digitata* の形態観察** 形態観察の結果、細胞の外形は、球状または卵円状で、背腹方向にわずかに扁平され、下錐の底端中央部は凹入しないこと、細胞の内部構造は、縦溝が下錐部で左方向に湾曲し、上錐溝が直線状で、核が中央部から下錐部の位置にあり、不定形の色素体を有すこと、細胞の大きさは、細胞長が  $19.9 \pm 2.5 \mu\text{m}$ 、細胞幅が  $16.4 \pm 2.3 \mu\text{m}$ 、長さ/幅が  $1.2 \pm 0.1$  であること等の形態的特徴が観察され、原種記載の報告<sup>9)</sup>と一致したことから *K. digitata* と判断された。

ところで、*K. digitata* は小型で確実に同定できる形態学的特徴が乏しいプランクトン<sup>10)</sup>と言われており、通常のモニタリング時の顕微鏡倍率である 40 倍では、先述の内部構造は確認できず、全体的に暗褐色をした丸い細胞の外形と細胞を回転させながら直線的に速く前進する遊泳運動が確認できる程度である。本種は、増殖初期の低密度時に、形態観察によりモニタリングを行うことが難しいプランクトンである。

***K. digitata* の出現特性** 我が国における *K. digitata* 赤潮の発生状況を表 2 に示す。本種による赤潮は、1995～2015 年の 21 年間で 17 件の発生があり、頻度は高くないが、過去に発生履歴のある山口県<sup>11)\*1\*2</sup>、徳島県<sup>15)16)\*3</sup>、広島県<sup>18)19)\*4</sup>、熊本県<sup>13)14)</sup>などの同じ海域で局所的に発生を繰り返している。また近年 (2012～2015 年) の発生件数は、4 年間で 9 件と増加傾向にあり、新たな発生が大分県<sup>20)</sup>や愛媛県<sup>5)</sup>などで見られ、今後の動向が注目される。発生時期は、年間を通じて初夏の 6 月から 7 月頃と秋季の 10 月から 11 月頃の 2 回である。

今回、周防灘で本種が最高密度を示した時の水温は、2014 年夏季が 22.7℃、秋季が 21.1℃であった。過去に他の海域で赤潮を形成した時の水温と比較してみると、1995 年の山口県下関漁港では 20.8～23.5℃<sup>7)</sup>、1996 年の徳島県紀伊水道沿岸では 23℃前後<sup>6)</sup>であり、過去の事例の範囲内であった。これらの情報から、本種は 21～23℃程度の水温で赤潮を形成する傾向が窺われた。

ところで、*K. mikimotoi* は遊泳細胞の形態で越冬し、それが翌年の赤潮のシードポピュレーションになる<sup>21)</sup>と考えられており、これまでに周防灘でも冬季に本種の越冬細胞が確認されている<sup>22)23)</sup>。今回 *K. digitata* は、水温が 11.3～27.8℃の範囲で観察され、10℃を下回る冬季では確認できなかった。本種は、休眠期細胞の



存在が報告されていないことから、どのような越冬様式で赤潮のシードポピュレーションとしての個体群を維持しているのか興味深い。

表 2. 我が国における *Karenia digitata* 赤潮の発生状況

海域	県	発生年	発生月	終息月	海域区分	場所	最高密度 (cells/mL)	漁業被害	被害魚種	参考資料	
九州	山口県	1995	6月	7月	九州北部	下関漁港周辺	12,850	有り	魚類	11)	
		2013	5月	6月		下関市、萩市、阿武町	54,400	有り	魚類	*1	
		2015	6月	6月		下関市、阿武町	28,500	無し	—	*2	
	佐賀県	1995	6月	6月	九州北部	佐賀湾	270	有り	魚類	6)	
		2012	11月	11月		平戸市(海香湾、古江湾)	5,800	有り	魚類	12)	
	長崎県	2012	11月	11月	九州北部	九十九島、佐世保市(鹿野町～橋泊～船越)	2,250	無し	—	12)	
	熊本県	1996	6月	6月	九州西部	八代海(本渡市、種浦湾～戸北部、津奈木町)	47,000	有り	魚類	13)	
		2013	6月	6月		八代海、種浦湾(天草市新和町横島～水俣市)	5,000	無し	—	14)	
	徳島県	徳島県	1996	7月	7月	紀伊水道	大碓崎東方、徳島港～小松島港、淡島地先、掃治	9,500	有り	魚類	15)
			2003	11月	11月		播磨灘	鳴門市北灘町	240	無し	—
2015		7月	7月	紀伊水道	小松島湾、徳島市～阿南市(横湾除く)	485	有り	魚類	*3		
香川県		2001	7月	7月	播磨灘	引田町地先	790	有り	魚類	17)	
瀬戸内海		1997	11月	11月	福山市～沼隈郡内海町	15,000	有り	魚類、ノリ	18)		
広島県	2005	9月	10月	尾瀬	福山市沿岸部	2,960	無し	—	19)		
	2015	10月	11月	尾瀬	福山市	370	無し	—	44)		
	大分県	2014	7月	8月	周防灘	豊後高田市地先	1,250	有り	魚類、二枚貝	20)	
愛媛県	2015	6月	6月	豊後水道	宇和島(八幡浜市)	不明	無し	—	*5		

2013年山口県は *K. digitata* (類似種)、2013年熊本県は *Karenia* sp.として報告されている。

また、周防灘で本種が出現した時の塩分は、おおむね 31 前後を中心としており、1996年に徳島県紀伊水道沿岸で出現した時の塩分 31.8 ~ 32.2<sup>6)</sup>と同様であったが、塩分 26.83 までの低塩分側でも出現しており、本種の塩分耐性はこれまでの報告よりも広いと考えられる。

2014年に *K. mikimotoi* 赤潮が発生した時の環境状況を見ると、6月下旬から7月上旬のまとまった降雨により塩分成層が形成され、表層の DIN, DIP が高く推移している。7月上旬には、*Chaetoceros* spp.を主体とした珪藻類のピークがみられ、降雨によってもたらされた栄養塩類を利用して珪藻類が増殖したことが窺われる。7月中・下旬頃には表層の栄養塩類の減少とともに珪藻類が減少し、*K. mikimotoi* が増加傾向となった。*K. mikimotoi* は、8月上旬には中層で、8月中旬には表層でピークがみられた。しかし、8月中旬には、ほとんどの沿岸調査点において、*K. mikimotoi* 赤潮は衰退傾向にあり、*Skeletonema* spp.を主体とした珪藻類の増加

が見られた。

同年の *K. digitata* の発生については、7月中旬に Stn.4 で未計数ながら出現を確認しているが、増殖初期の動態は把握出来ていない。*K. mikimotoi* が周防灘で赤潮を形成していく途中の7月下旬から8月上旬に、*K. digitata* は、Stn.4において *K. mikimotoi* と対照的な増減を見せている。*K. mikimotoi* が 103 cells/mL から 23cells/mLに減少した7月下旬には、*K. digitata* は 1,250 cells/mLのピークに達し、*K. digitata* が 30 cells/mLに減少した8月上旬には、*K. mikimotoi* が 110 cell/mLまで再び増加している。また、*K. mikimotoi* は日周鉛直移動を行う<sup>24)</sup>ことが知られているが、種苗生産施設の海水中の *K. digitata* の密度が午後に比べて午前中の方が高い傾向にあったことから、夜間に高密度の海水を引き込んでいるものと思われ、本種についても日周鉛直移動を行っていることが推察される。

*K. digitata* と *K. mikimotoi* の細胞密度が対照的な増減を見せた7月下旬の Stn.4 の海況は、梅雨明け後の晴天が続いたことにより、強い水温成層が形成され、水温は表層が 28℃まで上昇し、底層は 22℃となり、表層の栄養塩類は枯渇状態となっていた。8月上旬には、台風 12 号などの影響を受けて水温成層は崩壊し、25℃台の水温が観測され、表層の栄養塩類は DIN で 6.6 μM, DIP で 0.56 μM に回復していた。

ところで *K. mikimotoi* の最大増殖速度を与える水温と塩分の組み合わせは、25℃、塩分 25 であり、本種が 25℃という高い最適温度を有することは、夏季に他の藻類と共存しながら次第に生息場を独占できる重要な要因の一つと考えられている<sup>25)</sup>。一方、*K. digitata* の増殖最適水温は知られていないが、先述のとおり本種の赤潮が 21 ~ 23℃の水温で形成されている<sup>6)7)</sup>こと、長崎県での本種の出現が 17 ~ 23℃で見られている<sup>26)</sup>ことから、*K. mikimotoi* の増殖最適水温である 25℃より低い可能性がある。

\*1 山口県水産研究センター外海研究部 (2013). 平成 25 年度水産業関係研究開発推進会議漁場環境保全関係研究開発推進特別部会赤潮・貝毒部会資料.

\*2 山口県水産研究センター外海研究部 (2015). 平成 27 年度水産業関係研究開発推進会議漁場環境保全関係研究開発推進特別部会赤潮・貝毒部会資料.

\*3 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課 (2015). 平成 27 年度水産業関係研究開発推進会議漁場環境保全関係研究開発推進特別部会赤潮・貝毒部会資料.

\*4 広島県立総合技術研究所水産海洋技術センター (2015). 平成 27 年度水産業関係研究開発推進会議漁場環境保全関係研究開発推進特別部会赤潮・貝毒部会資料.

\*5 愛媛県農林水産研究所水産研究センター (2015). 平成 27 年度水産業関係研究開発推進会議漁場環境保全関係研究開発推進特別部会赤潮・貝毒部会資料.

*K. mikimotoi* が赤潮を形成する途中の 7 月下旬には、成層が発達し安定的な水塊構造と *K. digitata* の増殖適水温と思われる 22 ~ 23 °C 台の環境が形成されていた。この環境下で、*K. digitata* は、*K. mikimotoi* と底層の栄養塩類をめぐる競合の結果、局所的に狭い範囲の Stn.4 で *K. mikimotoi* より先にピークに達したものと推察された。本種は、その後、周防灘に拡散した後、密度を低下させながら伊予灘、別府湾へと移流・拡散していった。水温成層が崩壊して 25 °C 以上の水温となった 8 月上旬以降は、*K. mikimotoi* が *K. digitata* よりも増殖に有利となり、活発に増殖して赤潮を形成していったものと思われる。

*K. mikimotoi* と他の渦鞭毛藻との競合については、*Cochlodinium polykrikoides* との競合についての報告がある<sup>27)</sup>。それによると 7 月末から 8 月上旬の 10 日程度の期間に、*K. mikimotoi*、*C. polykrikoides* の順に赤潮が発生しており、発生時の現場水温である 25.3 °C、27.8 °C と培養実験で得られた最適水温がそれぞれ良く一致したことから、これら 2 種の消長に水温変動が大きく関与した可能性が高いとされている。

***K. digitata* の魚貝類への影響** *K. digitata* のヒメハゼへの暴露試験の結果、*K. digitata* の密度が 1,800 cells/mL の試験区 1 では 30 分程度で、850 cells/mL の試験区 2 では 1 時間程度でヒメハゼの斃死がみられた。一方、160 cells/mL の試験区 3 では試験開始 90 分後頃から異常行動が見られ始めたが 24 時間後までに斃死は無かった。斃死がみられた試験区 1、試験区 2 では *K. mikimotoi* がそれぞれ 300 cells/mL、60 cells/mL 含まれていたが、*K. mikimotoi* の密度が 4,000 cells/mL の対照区 2 で斃死が見られていないことから、試験区 1、2 の斃死は、*K. digitata* の影響が大きいものと思われる。松山他<sup>28)</sup>が行ったアミメハギを用いた *K. digitata* の暴露試験では、本種の強い魚毒性が示され、アミメハギに対して細胞密度が 200 ~ 900 cells/mL 付近に閾値があると報告されており、今回の試験結果からも同様の傾向が窺われた。本種の毒性については、海水が変色する前の細胞密度 (1,383 cells/mL) で魚類の行動に異常が見られ、魚類への強い毒性が指摘されている<sup>7)</sup>。

*K. digitata* のアサリへの暴露試験の結果、試験区 1 では、*K. digitata* の密度が 500 cells/mL から 2,500 cells/mL に上昇した 36 時間後に斃死が見られ始め、最終的に 62 時間後に斃死率 100 % となった。試験区 2 では、*K. digitata* の密度が 10 ~ 300 cells/mL の範囲で変動したが、アサリの斃死は見られなかった。

ところで、*K. mikimotoi* の培養株を用いたアサリ稚貝への暴露試験によりアサリの生残率やろ水量への影響評価を行った試験によると、密度 10,000 cells/mL、48 時間の暴露条件では、致死性は認められていないものの実験中に水管の萎縮や閉殻、粘液状物質の分泌などの異常行動が認められている。また、25 cells/mL 以上の低密度の暴露では、ろ水量の低下が認められている<sup>29)</sup>。試験区 1 では、*K. mikimotoi* が 25 ~ 160 cells/mL の範囲で確認されており、上述の *K. mikimotoi* のアサリへの生理傷害等の影響も無視できないと思われるが、斃死がみられた試験区 1 の *K. digitata* の密度は、斃死がみられなかった試験区 2 に比べて明らかに高く、斃死は、*K. digitata* の密度が 500 cells/mL から 2,500 cells/mL に急上昇した時点から始まっていることから、試験区 1 で見られたアサリの斃死に *K. digitata* が影響した可能性が強く疑われる。*K. digitata* の水産生物への影響は、これまで魚類、養殖ノリ<sup>18)</sup>で報告があるが、アサリ等の二枚貝については無く、今後、*K. mikimotoi* が混在しない *K. digitata* の培養株等を用いた止水条件下での暴露試験によりアサリへの影響を再確認する必要がある。

*K. digitata* は、細胞が小さく形態的特徴が乏しいプランクトンであり、海水に着色がみられない低密度の段階で魚類に影響が認められ、発生履歴のある海域で繰り返し赤潮が発生する傾向にあることなどから、注意深くモニタリングしていく必要がある。

## 摘 要

- 1) プランクトンの形態観察の結果、細胞の外形や内部構造、大きさが *K. digitata* の原種記載の報告<sup>9)</sup>と一致したことから、今回出現したプランクトンは、*K. digitata* と判断された。
- 2) 本種が出現した時の水温と塩分は、11.3 ~ 27.8 °C、26.83 ~ 32.76 であり、夏季の最高密度時の水温と塩分は、22.7 °C、31.57、秋季の最高密度時の水温と塩分は、21.1 °C、28.28 であった。
- 3) 本種は、*K. mikimotoi* が赤潮を形成する途中の 7 月下旬に、成層が発達した安定的な水塊構造と増殖適水温と思われる 22 ~ 23 °C 台の低水温の環境条件下で、底層の栄養塩をめぐる *K. mikimotoi* との競合の結果、局所的に狭い範囲で先にピークに達し、周防灘から伊予灘、別府湾へと移流・拡散していったものと思われた。
- 4) *K. digitata* のヒメハゼへの強い毒性が確認されるとと

もに、アサリに対する毒性の疑いが強く示唆された。

## 謝 辞

本研究に際して、*K. digitata* の同定に関する有益な情報とご指導を賜ると共に本報告の草稿の御校閲をいただいた国立研究開発法人 水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所主任研究員坂本節子博士に厚くお礼申し上げます。また、本研究を行うにあたり、栄養塩の分析と守江湾での採水にご尽力をいただいた大分県東部振興局野田誠氏、ならびに守江湾での採水にご尽力をいただいた大分県農林水産企画課平川千修氏に感謝いたします。本研究の一部は、平成 26、27 年度漁場環境・生物多様性保全総合対策事業 赤潮・貧酸素水塊対策推進事業「瀬戸内海等での有害赤潮発生機構解明と予察・被害防止等技術開発」の中で行いました。

## 引用文献

- 1) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(1980). 昭和 54 年瀬戸内海の赤潮. 34pp.
- 2) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(1983). 昭和 57 年瀬戸内海の赤潮. p30-31.
- 3) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(1986). 昭和 60 年瀬戸内海の赤潮. 11pp.
- 4) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(2009). 平成 20 年瀬戸内海の赤潮. 9pp.
- 5) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(2013). 平成 24 年瀬戸内海の赤潮. 10pp.
- 6) 南西海区水産研究所赤潮環境部. *Gymnodinium* sp.伊万里型(仮称)に関する資料について. 平成 9 年瀬戸内海の赤潮. 瀬戸内海漁業調整事務所, 兵庫県. 1998, 38-54.
- 7) 馬場俊典, 吉岡貞範, 矢尾宏志, 白木信彦. 1995 年初夏下関漁港内に発生した有害渦鞭毛藻 *Gymnodinium* sp.の赤潮と漁業被害. 山口県内海水産試験場報告 1997 ; 26 : 42-47.
- 8) 大分地方気象台 (2014). 大分県気象月報.
- 9) Zhen B. Yang, Haruyoshi Takayama, Kazumi Matsuoka and I. J. Hodgkiss. *Karenia digitata* sp. nov. (Gymnodiniales, Dinophyceae), a new harmful algal bloom species from coastal waters of west Japan and Hong Kong. *Phycologia*. 2000 ; 39(6) : 463-470.
- 10) 松岡数充. 有害・有毒プランクトンの生態. 「養殖」緑書房, 東京. 2001 ; 8 : 140.
- 11) 水産庁九州漁業調整事務所 (1996). 平成 7 年九州海域の赤潮. 23, 27pp.
- 12) 水産庁九州漁業調整事務所 (2013). 平成 24 年九州海域の赤潮. 37pp.
- 13) 水産庁九州漁業調整事務所 (1997). 平成 8 年九州海域の赤潮. 22, 27pp.
- 14) 水産庁九州漁業調整事務所 (2014). 平成 25 年九州海域の赤潮. 30pp.
- 15) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(1997). 平成 8 年瀬戸内海の赤潮. p6-7.
- 16) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(2004). 平成 15 年瀬戸内海の赤潮. 13pp.
- 17) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(2002). 平成 13 年瀬戸内海の赤潮. 8, 10pp.
- 18) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(1998). 平成 9 年瀬戸内海の赤潮. 6, 10pp.
- 19) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(2006). 平成 17 年瀬戸内海の赤潮. 16pp.
- 20) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所(2015). 平成 26 年瀬戸内海の赤潮. 13pp.
- 21) Tsuneo Honjo, Mineo Yamaguchi, Osamu Nakamura, Shigeya Yamamoto, Akira Ouchi, and Kouichi Ohwada. A Relationship between Winter Water Temperature and the Timing of Summer *Gymnodinium nagasakiense* Red Tide in Gokasho Bay. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1991; 57(9): 1679-1682.
- 22) 寺田和夫, 池内仁, 高山晴義. 冬季の周防灘沿岸で観察された *Gymnodinium nagasakiense*. 日本プランクトン学会報. 1987 ; 34 (2) : 201-203.
- 23) 馬場俊典, 檜山節久, 神菌真人, 江藤拓也, 岩男昂, 樋下雄一, 小泉喜嗣, 高島景, 内田卓志, 本城凡夫. 西部瀬戸内海における赤潮渦鞭毛藻 *Gymnodinium mikimotoi* 遊泳細胞の越冬について. 日本プランクトン学会報 1994 ; 41 (1) : 69-71.
- 24) 小泉喜嗣. 豊後水道東岸域における急潮と植物プランクトンの増殖機構に関する研究. 愛媛県水産試験場研究報告 2002 ; 10 : 1-86.
- 25) 山口峰生. *Gymnodinium nagasakiense* の赤潮発生機構と発生予知に関する生理生態学的研究. 南西海区水産研究所研究報告 1994 ; 27 : 251-394.
- 26) 山砥稔文, 石田直也. 島嶼海域での低密度赤潮による新たな漁業被害の発生. 「有害有毒プランクトンの科学」(今井一郎・山口峰生・松岡数充編) 恒星社厚生閣, 東京. 2016 ; 131-138.

27) 山砥稔文，丸田肇，浦賢二郎．1999 年伊万里湾に出現した *Cochlodinium polykrioides* Margalef の赤潮発生状況と増殖特性．長崎県水産試験場研究報告 2002 ; 28 : 21-26.

28) 松山幸彦，宮本政秀，小田達也．有害渦鞭毛藻 *Karenia digitata* のアミメハギに対する魚毒性発現機構．日本水産学会中国四国支部大会発表資料 2002.

29) 水野健一郎，茅野昌太，野田誠，宮村和良，福田穰，

松山幸彦，永江彬．シャットネラ等魚介類への影響，毒性発現機構の解明②有害プランクトンによる貝類への影響評価．平成 25 年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業赤潮・貧酸素水塊対策推進事業報告書「九州海域での有害赤潮・貧酸素水塊発生機構解明と予察・被害防止等技術開発」．水産庁，東京．2014，16-35.