

原著

有明海北東部沿岸域における水質と珪藻類の変化

石橋融子・熊谷博史・田中義人

有明海において魚介類等への被害の原因とされる植物プランクトン及びその増殖に関係する因子について調査した。観察された植物プランクトンのほとんどが珪藻類であり、特に夏季と冬季に多く出現した。冬季は低水温で増殖に好適ではないが、様々な因子の複合影響により多く出現したと考えられた。*Rhizosolenia* spp.の増殖については、実用塩分が主要因子の一つであると考えられた。Siは珪藻類が多く出現する夏季及び冬季に濃度の減少がみられたが、珪藻類増殖の制限因子ではなかった。NO₃-N+NO₂-N及びPO₄-P濃度は夏季から秋季に上昇し冬季に減少した。

[キーワード：有明海、珪藻類、栄養塩類]

1 はじめに

有明海は、日本有数のノリ養殖場であることから、ノリの生育に必要な栄養塩類濃度やノリと競合関係にある植物プランクトンに関する研究等が多くなされている^{1)~3)}。これらの研究結果から、ノリの色落ちの原因は、植物プランクトンの増殖による栄養塩類濃度の低下であることがわかってきた^{4)~5)}。また、夏季にはラフィド藻や渦鞭毛藻等の有害プランクトンの発生による魚介類への被害も報告されている⁴⁾。これらのことから、有明海において植物プランクトンやその増殖に関係する因子を把握することは重要である。

有明海北東部海域は湾奥部に位置し、ノリ養殖が盛んに行われている。ここで観察される主な植物プランクトンと栄養塩類(窒素(N)、リン(P)及びケイ素(Si))の関係については、2010年11月-2013年4月までの結果を取りまとめて報告した⁶⁾。この期間に出現する植物プランクトンに一定の傾向は見られなかったが、限られた期間及び地点においてSiがN及びPよりも制限因子になりうる可能性を示唆した⁶⁾。

一方で、植物プランクトンの増殖は、栄養塩類以外に光量、塩分、水温にも影響を受けることが報告されている^{7)~12)}。そこで、今回、さらに、日照時間、実用塩分及び水温のデータを加え、植物プランクトンの発生との関係について考察したので報告する。

2 方法

2・1 調査地点

調査対象海域は有明海北東部(福岡県沿岸部)である。

福岡県保健環境研究所 (〒818-0135 太宰府市大字向佐野 39)

調査地点を図1に示す。調査地点数は10地点で、一部は10月-3月にノリ養殖用網が設置される区域内に入る。



図1 調査地点 (No.1-10)

2・2 試料採取方法

採水は2011年4月から2015年3月まで毎月1回、大潮または中潮の満潮前後2時間以内に行った。水質測定用試料については表層水を採取した。植物プランクトン調査用試料は、採水と同時にプランクトンネット((株)田中三太郎商店:網地NXX13,目合0.1mm)を用い表層から水深1mまでのプランクトンを採取した。ただし、2012年3月及び10月は植物プランクトンが非常に多かったため、

表層水を使用した。

2・3 測定項目及び測定方法

水質の測定項目は、実用塩分、水温、Si、アンモニア態窒素（NH₄-N）、硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素（NO₃-N+NO₂-N）及びリン酸態リン（PO₄-P）である。実用塩分及び水温は、福岡県の環境基準監視調査において現地地で測定した結果を使用した。Si、NH₄-N、NO₃-N+NO₂-N及びPO₄-P測定用試料は、採水した海水をろ紙（ADVANTEC：DISMIC 25AS045AN）で加圧ろ過したものを使用した。Siはモリブデン青吸光度法¹³⁾、NH₄-Nはインドフェノール青吸光度法¹⁴⁾、NO₃-N+NO₂-Nは銅・カドミウム還元-ナフチルエチレンジアミン吸光度法¹⁴⁾、PO₄-Pはモリブデン青吸光度法¹⁴⁾で測定した。

日照時間は、気象庁の過去の気象データ（大牟田市）を使用した¹⁵⁾。

植物プランクトンはプランクトン計数版（松浪硝子工業（株）：MPC-200）に植物プランクトン調査用試料を入れ微分干渉顕微鏡（オリンパス（株）：BX-63）で同定し細胞数を計測した。同定は属まで行った。

3 結果

本調査で確認された植物プランクトンは20属以上であった。観察された植物プランクトンの全細胞数(10地点の平均値)の経月変化を図2に示す。細胞数が特に多く観察された月は、年度によって異なるが、7月-10月と1月-3月の期間内にあった。

月別日照時間を図3に示す。植物プランクトンが多くみられた月が7月-10月及び1月-3月にあったことから、7月-10月を破線で、1月-3月を実線で囲んだ（以下、図4-図10も同様に示す）。2011年度-2013年度は梅雨期である6月に日照時間が少なく（図3A）、2014年度の8月は冷夏で日照時間が少なかった（図3B）。

調査海域の実用塩分及び水温の経月変化を図4及び図5に示す。2011年度-2013年度は7月に実用塩分が低下していた。これは、採水日が月初めであり、梅雨の期間内であることに起因すると考えられる。特に低下していた2011年7月及び2012年7月は梅雨期の多量の降雨の後で採水しており、流入する河川水で海水が希釈され実用塩分が低下したと考えられる。2014年は8月に低下しているが、採水前に降雨が多かったためであると考えられる。これらの月を除くと実用塩分は25-31 psuでほぼ一定であった。図5より、水温は、夏季は約27℃まで上昇し、冬季は約9℃まで低下した。

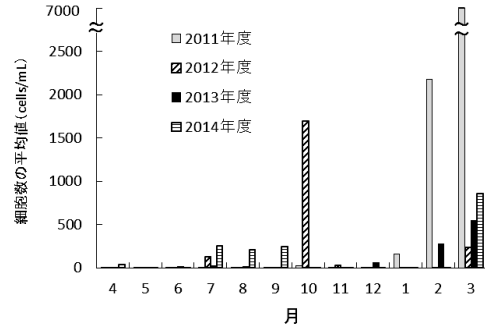


図2 植物プランクトンの全細胞数
(10地点の平均値)

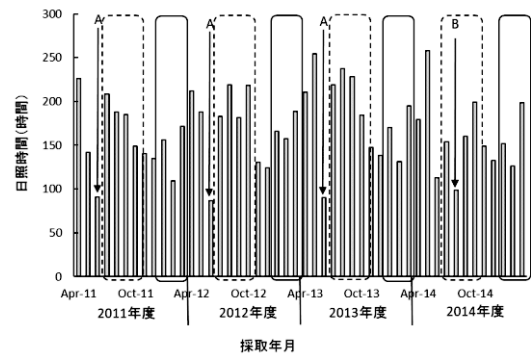


図3 月別日照時間

(A：2011年、2012年及び2013年6月、B：2014年8月)

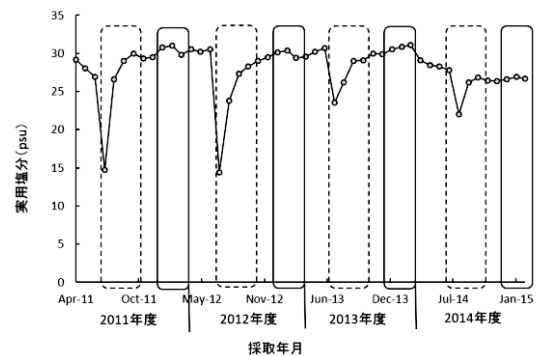


図4 実用塩分 (10地点の平均値)

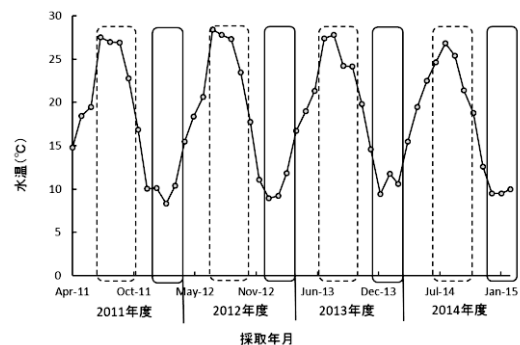


図5 水温 (10地点の平均値)

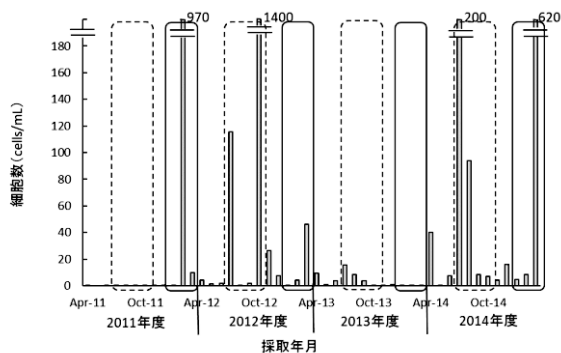


図 6-1 *Skeletonema* spp.

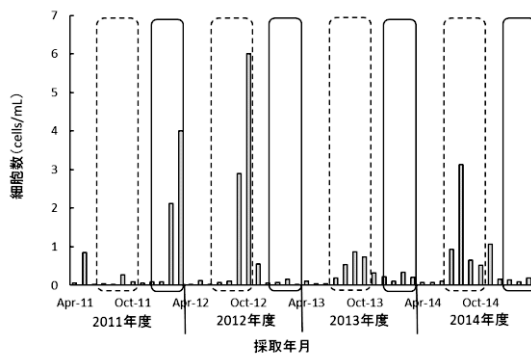


図 6-4 *Coscinodiscus* spp.

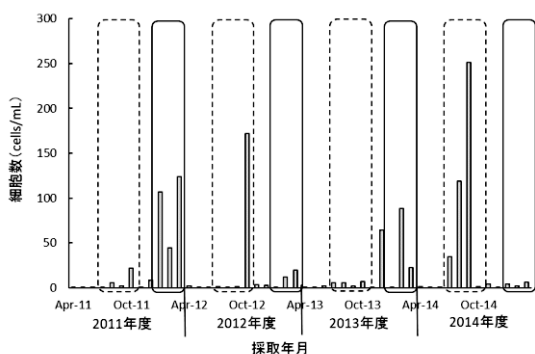


図 6-2 *Chaetoceros* spp.

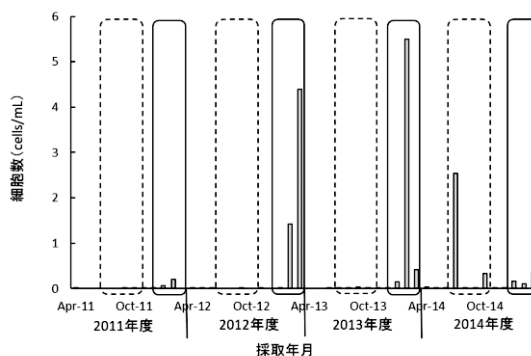


図 6-5 *Rhizosolenia* spp.

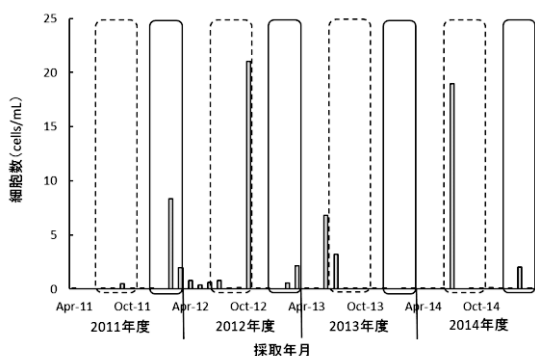


図 6-3 *Nitzschia* spp.

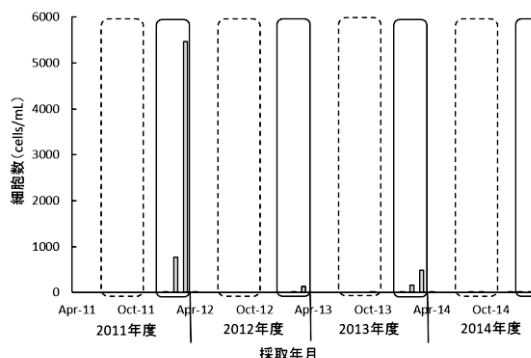


図 6-6 *Eucampia* spp.

観察された植物プランクトンは、珪藻類が多く、主なものは、*Skeletonema* spp.、*Chaetoceros* spp.、*Nitzschia* spp.、*Coscinodiscus* spp.、*Rhizosolenia* spp.、及び*Eucampia* spp.であった。これらの珪藻類は、有明海のみならず、瀬戸内海や東京湾等でもよくみられる種類である¹⁶⁾⁻²⁰⁾。調査海域における主な珪藻類の出現細胞数(10地点の平均値)の経月変化を図6-1-図6-6に示す。また、調査海域のSi、NH₄-N、NO₃-N+NO₂-N及びPO₄-P濃度(10地点の平均値)の経月変化を図7-図10に示す。

図2に示す植物プランクトンの細胞数が特に多かったのは、2011年2月、3月及び2012年10月であり、主に観察された珪藻類は、図6-1-図6-6より*Skeletonema* spp.、*Chaetoceros* spp. 及び*Eucampia* spp.で、全細胞数のほとんどを占めてい

た。*Skeletonema* spp.や*Coscinodiscus* spp.等、一年中見られた種類もあったが、どの種類も特に多く出現した月は、破線または実線で囲んだ時期に集中していた。

図7より、Siは植物プランクトンが多く出現する7月-10月及び1月-3月で減少傾向を示し、それ以外の月では上昇傾向を示していた。

図8より、NH₄-Nは2012年11月及び2013年8月に高い値となっているが、ともに1地点のみ非常に高い値を示したことによる。その原因は、2012年11月は事業場排水等の影響が考えられるが、2013年8月は不明である。佐賀県沿岸ではNH₄-N濃度は秋季に高いと報告がある^{21),22)}が、福岡県沿岸における今回の調査ではNH₄-N濃度に一定の傾向は見られなかった。

図9及び図10から、NO₃-N+NO₂-N及びPO₄-P濃度は、1月-3月（冬季）に減少傾向を示し、7月-10月（夏季及び秋季）に上昇傾向を示した。

4 考察

有明海では、2000年に珪藻類の大増殖によってノリの色落ち被害が発生した原因の一つとして11月-12月における長い日照時間があげられている⁵⁾。本調査期間における冬季の日照時間は極端に長い月はなく、特に、度々赤潮でノリ色落ちの原因とされる大型珪藻の *Eucampia* spp. の出現数の多かった2011年度冬季についても日照時間に特徴はなかった。今回、日照時間は、珪藻類が多く発生した主な要因ではないと考えられる。

珪藻類が増殖した時期（破線及び実線で囲んだ時期）にSiが減少した時期が一致することから、有明海北東部では珪藻類の増殖とともにSi濃度が減少すると考えられる。ところで、Siの珪藻類増殖制限濃度は0.84-2.6 μg/L程度とされている²⁴⁾。図7より最も低濃度（0.23 mg/L）でも増殖制限濃度より高く、川口ら²⁴⁾の報告と同様、Siは有明海北東部では珪藻類の増殖制限因子ではないと考えられる。

NO₃-N+NO₂-N及びPO₄-Pは、冬季には植物プランクトンの増殖と養殖ノリの成長の両方に使用される。植物プランクトンの大量発生によりノリに必要なNやP等の栄養塩類が不足しノリの色落ち等の被害が報告されることから、特にこの時期の栄養塩類については多くの研究がなされている^{2), 21)-24)}。川口らは、有明海北部はP制限であると推察している²⁴⁾。本調査では、冬季にPO₄-Pが、春季にNO₃-N+NO₂-Nが検出下限値以下となる年があった。このことから、N制限またはP制限が時期によって異なることが考えられる。植物プランクトン成長等の制限因子については今後の検討課題である。ところで、本調査では、夏季と冬季に珪藻類が多く出現したが、夏季にNO₃-N+NO₂-N及びPO₄-P濃度が低下することはなく、上昇傾向を示した。これは、夏季（特に梅雨期）に筑後川等の河川からの栄養塩類負荷量が増加することに起因すると考えられる²¹⁾。また、河川流量が多くない秋季にもNO₃-N+NO₂-N及びPO₄-P濃度の増加がみられた。佐賀県沿岸の調査によると、夏季-秋季にみられる溶存態無機態窒素（DIN）及び溶存態リン（DP）の増加は底質からの溶出が主な要因であることが報告されている^{21), 22)}。福岡県沿岸は底質調査の実績がなく不明であるが佐賀県沿岸と同様に底質からの溶出による影響があった可能性がある。冬季は、夏季と比較して降雨が少ないため、河川からの栄養塩類負荷量が少ない²³⁾。また、底層DOの低下が認められない²⁵⁾ため、栄養塩類の底質からの溶出も期待できない。このことから、冬季は栄

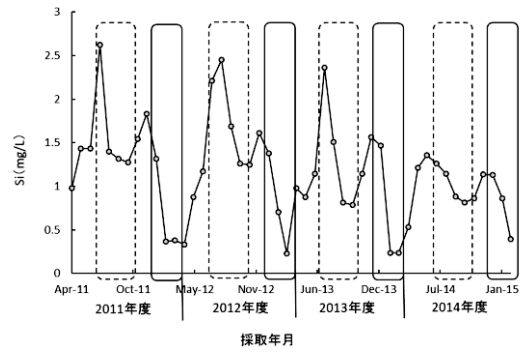


図7 Siの経月変化

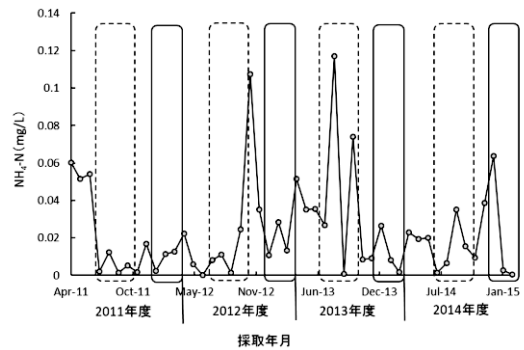


図8 NH₄-Nの経月変化

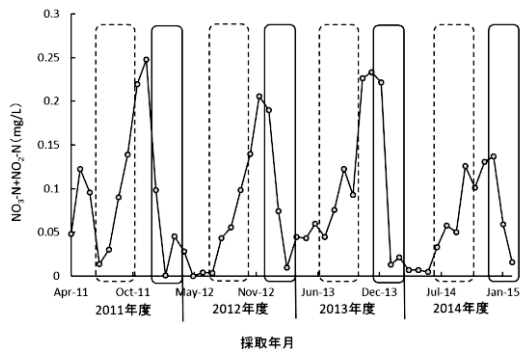


図9 NO₃-N+NO₂-Nの経月変化

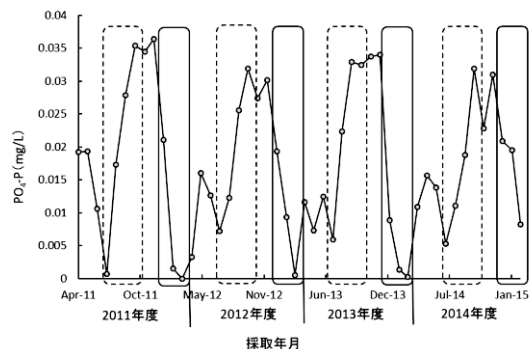


図10 PO₄-Pの経月変化

養塩類の供給が相対的に少ない。加えて、冬季は珪藻類と養殖ノリが栄養塩類を吸収するため、NO₃-N+NO₂-N及びPO₄-P濃度が減少したと考えられる。

図6-1及び図6-2より、*Skeletonema* spp.及び*Chaetoceros* spp.は、夏季及び冬季に増殖した年があった。室内実験に

において *Skeletonema costatum* の最大増殖速度は、水温 25°C、実用塩分 15 psu であり、水温 30°C 以上または実用塩分 5 psu 以下で増殖できず²⁶⁾、また、他の報告では、水温 30°C で増殖できなかったが、塩分については温度依存性があることを指摘しており、水温 25°C で塩分が 20‰以下、20°C で 10‰以下で増殖ができなかった²⁷⁾と報告されている。*Chaetoceros* spp. の最大増殖速度は、水温 30°C、実用塩分 33 psu であり、実用塩分 10 psu 以下で増殖できなかったと報告されている²⁸⁾。また、*Chaetoceros didymum* も *Skeletonema costatum* 同様、水温 30°C 以上で増殖できず、水温 25°C で塩分 20‰以下、20°C で 15‰以下で増殖ができなかった²⁷⁾。本調査では、水温が 30°C 以上になることはなかった。実用塩分については特に 2011 年 7 月及び 2012 年 7 月に低下したが、*Skeletonema* spp. 及び *Chaetoceros* spp. は 2011 年 7 月に 0.45 cells/mL 及び 0.77 cells/mL、2012 年 7 月に 120 cells/mL 及び 1.4 cells/mL 出現しており、特に 2012 年 7 月は *Skeletonema* spp. が多く出現した。本調査における珪藻類の種名が不明であるため室内実験結果と単純に比較はできないが、多く出現した月の水温及び実用塩分は、増殖に最適な条件ではなかったかもしれない。1983 年 -1984 年に八代海で観察された *Skeletonema costatum* について、夏季及び冬季に出現数が増加しており、本調査と同様の傾向であった。その原因として、夏季は陸域からの栄養塩類の供給、冬季は低水温による動物プランクトンの捕食低下によるものと考えられている²⁸⁾。また、佐賀県沿岸でも夏季及び冬季に *Skeletonema* spp. 及び *Chaetoceros* spp. の出現数が増加している²⁹⁾。有明海は潮位差が大きく、上下混合が頻繁に起こり休眠期細胞の巻き上げが起こることから、*Skeletonema* spp. や *Chaetoceros* spp. 等の小型の植物プランクトンが冬季に増殖できたと推察されている³⁰⁾。播磨灘等における *Chaetoceros densus* についても冬季に大繁殖した要因は、河川からの栄養塩類負荷量の増加と滞留、夏季～秋季の台風による海水の攪乱によるものと推察されている³¹⁾。これらのことから、*Skeletonema* spp. や *Chaetoceros* spp. が繁殖した要因は、様々な環境要因が複合的に影響していると考えられる。

図 6-3 より、*Nitzschia* spp. の出現数には一定の傾向はみられなかった。八代海でも出現数に傾向はなく、年中みられたことが報告されている³²⁾。*Nitzschia closterium* を水温 17°C-29°C で培養したところ、23°C が最も早く増殖したと報告がある³³⁾。本調査における *Nitzschia* spp. についても、*Skeletonema* spp. や *Chaetoceros* spp. と同様、観察された時期は、増殖には最適な水温とは限らなかったと考えられる。しかし、低水温であっても増殖は可能であったことから、年中、観察されたと推察される。

播磨灘で観測した *Coscinodiscus wailesii* は、他種と比較

して Si、DIN、溶存態無機態リン (DIP) 及び DIN×DIP が高く、全窒素 (T-N) ×全リン (T-P) : DIN×DIP 比が低い水域に出現する傾向があることが報告されている¹⁷⁾。また、水温が 10°C-25°C の範囲内で高い増殖速度を示すことが知られており、低塩分でも増殖が確認されている¹⁷⁾。5°C -10°C では増殖速度が低下するが、播磨灘でも、水温の低下した冬季-春季に *Coscinodiscus* spp. の出現が多くみられていた¹⁷⁾。図 6-4 より、本調査で *Coscinodiscus* spp. が多く出現した月は、他の珪藻類も多く出現していることから、特に *Coscinodiscus* spp. が出現する条件は不明であった。

Rhizosolenia spp. は大型の珪藻類の一種で 2000 年のノリ色落ちの原因種として知られている⁴⁾。*Rhizosolenia* spp. はノリ養殖時期 (冬季) に多くみられ、本調査でも、図 6-5 より、2012 年度及び 2013 年度の冬季に多く出現した。福岡県沿岸の底質を調査したところ *Skeletonema costatum* や *Chaetoceros* spp. の休眠期細胞は出現したが、*Rhizosolenia imbricata* は出現しなかったと報告されている³⁴⁾。*Rhizosolenia imbricata* は外洋に生息し、夏季は低塩分化によって湾内に侵入することができないが、高塩分状態となる秋季以降に湾内に侵入すると考えられているため、冬季に大繁殖することが多いと考えられている⁴⁾。本調査では 2014 年 7 月にも多く出現した。これは、梅雨期に雨が少なく、この時期に実用塩分が例年ほど低下しなかったため、*Rhizosolenia* spp. が湾奥部まで侵入し増殖したと考えられる。

図 6-6 より、*Eucampia* spp. が非常に多く観察されたのは 2011 年度冬季 (2012 年 3 月) であった。*Eucampia* spp. は大型珪藻類で、有明海のみならず、播磨灘でも冬季に多く発生し、*Rhizosolenia* spp. 同様ノリの色落ちの原因となることから多くの研究がなされており¹⁰⁾、³⁵⁾、*Eucampia zodiacus* は、水温が高く照射が強いほど増殖速度が速いことが報告されているが冬季に多く発生する原因は不明であるとされている¹⁰⁾。今回、有明海で冬季に多く観測されている原因についても播磨灘同様不明である。

本調査で確認された主な珪藻類は夏季と冬季に多く確認された。水温及び日照時間を考慮すると、冬季は最適な増殖条件ではないが、潮位差による休眠細胞の巻き上げ³⁰⁾ や動物プランクトンによる捕食の減少²⁸⁾等の環境要因によって多く増殖したと考えられている。さらに貝類のろ過摂食量の減少²⁴⁾、³⁶⁾、浮泥の再懸濁量の減少³⁶⁾等も考えられている。これらのことから、水温や日照時間等は増殖に好適の条件ではないが増殖できない環境ではなく、さらに、今回調査していない他の環境要因の複合的な影響²⁶⁾によって冬季でも多く増殖することができたと考えられる。

5 まとめ

本調査では、月別日照時間は珪藻類の増殖にとって主要な因子ではないと考えられる。実用塩分は、*Rhizosolenia* spp.の増殖にとって重要な因子の一つであると考えられる。

Si は珪藻類の制限因子ではないが、Si 濃度は珪藻類が多く出現する時期に低下したことから、その濃度は珪藻類の増殖に影響を受けると考えられる。NO₃-N+NO₂-N 及び PO₄-P 濃度は、夏季-秋季に増加し冬季に減少した。夏季-秋季は河川からの負荷量の増加と底質からの溶出により濃度が増加した可能性が考えられる。また、冬季は珪藻類とノリによる吸収で減少したと考えられる。

観察された珪藻類は夏季及び冬季に多く出現した。冬季は水温や日照時間等は増殖に最適な条件ではないが、他の因子も含めた複合要因によって増殖したと考えられる。

文献

- 1) 田中勝久ら：海の研究, 13(2), 163-172, 2004.
- 2) 熊谷香, 内藤剛：福岡水海技セ研報, 17, 73-80, 2007.
- 3) 松原賢, 吉田幸史, 首藤俊雄：佐有水研報, 25, 21-35, 2011.
- 4) 有明海・八代海等総合調査評価委員会：有明海・八代海等総合調査評価委員会報告, 147-164, 平成29年3月.
- 5) 小谷正幸ら：福岡県水技セ研報, 12, 117-122, 2002.
- 6) 熊谷博史, 石橋融子, 田中義人：土木学会論文集G (環境), 69(7), III_307-III_313, 2013.
- 7) S. V. Rai & M. Rajashekhar: *J. Algal Biomass Utln.*, 5(4), 55-59, 2014.
- 8) L. S. Goad & N. A. Andresen: *J. Phycol.*, 27, 710-718, 1991.
- 9) N. García *et al.*: *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 40(2), 435-440, 2012.
- 10) T. Nishikawa & M. Yamaguchi: *Harmful Algae*, 5, 141-147, 2006.
- 11) T. C. S. Sigaud & E. Aidar: *Bolm. Inst. oceanogr. S Paulo*, 41(1/2), 95-103, 1993.
- 12) L. Ignatiades & T. J. Smayda: *J. Phycol.*, 6, 332-339, 1970.
- 13) 日本規格協会：JIS K 0101, 44.1.2 モリブデン青吸光度法, JISハンドブック53環境測定Ⅱ水質, 340-341, (財)日本規格協会, 東京, 2001.
- 14) 日本規格協会：JIS K 0102, (財)日本規格協会, 東京, 2013.
- 15) 気象庁：過去の気象データ検索 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>).
- 16) 石井光廣, 長谷川健一, 松山幸彦：水産海洋研究, 72(1), 22-29, 2008.
- 17) 西川哲也ら：日水誌, 66(3), 388-394, 2000.
- 18) S. M. Pednekar *et al.*: *Turk. J. Bot.*, 38, 800-818, 2014.
- 19) 西川哲也, 宮原一隆, 長井敏：日水誌, 66(6), 993-998, 2000.
- 20) 片山幸恵, 江崎恭志, 長本篤：福岡水技セ研報, 12, 67-72, 2002.
- 21) 速水祐一ら：土木学会論文集B2 (海岸工学), B2-15(1), 991-995, 2009.
- 22) 石谷哲寛, 郡山益実, 荒木啓輔：佐賀大農彙, 97, 19-26, 2012.
- 23) 柳哲雄, 阿部良平：海の研究, 14(1), 21-33, 2005.
- 24) 川口修ら：海の研究, 13(2), 173-183, 2004.
- 25) 中嶋雅孝ら：水環境学会誌, 28(5), 339-345, 2005.
- 26) 紫加田知幸ら：日水誌, 76(1), 34-45, 2010.
- 27) 山口峰生：南西水研研報, 27, 251-394, 1994.
- 28) 鶴田新生ら：日水誌, 53(1), 141-144, 1987.
- 29) 松原賢, 吉田幸史, 首藤俊雄：佐有水研報, 25, 21-35, 2011.
- 30) 板倉茂：日水報, 68(1), 99-100, 2002.
- 31) 大山憲一ら：日水報, 74(4), 660-670, 2008.
- 32) 鶴田新生ら：日水誌, 52(11), 1947-1955, 1986.
- 33) R. Yanase: *Tohoku J. Agr. Res.*, 19(1), 75-82, 1968.
- 34) 尾田成幸：福岡水技研報, 13, 119-125, 2003.
- 35) T. Nishikawa *et al.*: *Plankton & Benthos Res.*, 8(4), 166-170, 2013.
- 36) 川口修ら：海の研究, 14(3), 411-427, 2005.

(英文要旨)

Change of water quality and diatoms in coastal waters of the northeastern Ariake Sea

Yuko ISHIBASHI, Hiroshi KUMAGAI and Yoshito TANAKA

Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences,

Mukaizano 39, Dazaifu, Fukuoka 818-0135, Japan

Phytoplankton are assumed to be a cause of damage to fishery products. We investigated factors related to the increase of phytoplankton in the northeastern Ariake Sea. Most phytoplankton were diatoms, and many appeared in summer and winter in particular. Winter, when the water temperature is low, is not a suitable season for an increase of diatoms; however, it is thought that diatoms increased in winter owing to various factors. Practical salinity was found to be one of the major factors involved in the increase of *Rhizosolenia* spp.. Silicon concentrations decreased in summer and winter when diatoms increased, however, Silicon concentrations were decreased in summer and winter, when diatoms increased; however, Silicon was not the limiting factor in the increase of diatoms. $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations were increased in summer and autumn and decreased in winter.

[Key words ; Ariake Sea, diatom, nutrient]