

有害珪藻Asteroplanus karianusの有明海佐賀県海域における出現動態と各種環境要因との関係

誌名	日本水産学会誌
ISSN	00215392
著者名	松原,賢 横尾,一成 川村,嘉応
発行元	日本水産学会
巻/号	80巻2号
掲載ページ	p. 222-232
発行年月	2014年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



有害珪藻 *Asteroplanus karianus* の有明海佐賀県海域における 出現動態と各種環境要因との関係

松原 賢,* 横尾一成, 川村嘉広

(2013年9月10日受付, 2013年12月1日受理)

佐賀県有明水産振興センター

The role of environmental factors in the population dynamics of the harmful diatom
Asteroplanus karianus in the Ariake Sea, off Saga Prefecture, Japan

TADASHI MATSUBARA,* KAZUNARI YOKOO AND YOSHIO KAWAMURA

Saga Prefectural Ariake Fisheries Research and Development Center, Ogi, Saga 849-0313, Japan

Asteroplanus karianus is a harmful diatom and a causative organism in the bleaching of cultured nori (*Pyropia*). The relationship between the population dynamics of *A. karianus* and environmental factors was investigated in the Ariake Sea, off Saga Prefecture, Japan. Phytoplankton composition and relevant environmental variables were recorded from December 2007 to March 2012. In addition, the growth and germination of *A. karianus* under high water temperature and low water temperature conditions were studied in the laboratory. The field study indicated that *A. karianus* caused red tides only in winter. Nonetheless, laboratory studies indicated that the growth rate of *A. karianus* was higher under high water temperature conditions than low water temperature conditions. Conversely, the results suggested that the time required for germination of resting stage cells of *A. karianus*, in bottom sediment was shorter under low water temperature conditions.

キーワード: *Asteroplanus karianus*, 有明海, 環境要因, 珪藻, 出現動態

珪藻類は通常、海域の基礎生産者として重要な植物プランクトンである。しかし、ノリ漁期に発生する珪藻赤潮は、海水中の栄養塩類を消費し、養殖ノリの品質低下である「ノリの色落ち」を引き起こして漁業被害を与えるため、Harmful Algal Bloom = HAB (有害有毒藻類ブルーム) の1つとして分類される。¹⁾ HABによる漁業被害を防止するためには対象生物の生態および生理特性を解明し、その発生および衰退時期の予察法を確立することが重要である。日本国内における代表的なノリの色落ち原因珪藻は *Coscinodiscus wailesii*, *Eucampia zodiacus*, *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Thalassiosira* spp. などであり、¹⁾ 有明海を含む各海域でノリの色落ち被害を引き起こしている。これらのうち *C. wailesii* や *E. zodiacus* の生態および生理については瀬戸内海を中心に研究が進められてきた。^{2,3)}

有明海佐賀県海域では近年、珪藻類 *Asteroplanus karianus* がノリ漁期 (概ね10月から3月) に高密度な赤潮を恒常的に形成し、ノリの色落ちを引き起こすように

なった。⁴⁾ *A. karianus* によるノリの色落ち被害はこれまで有明海奥部以外の海域では報告されていない。また、有明海奥部において *A. karianus* は1980年代から出現が確認されているが、細胞密度は *A. karianus* が単独で赤潮を形成する $4,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 未満であることがほとんどであり、 $10,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上の高密度な赤潮を形成するようになったのは2008年以降である。⁴⁾ そのため、*A. karianus* はこれまでノリの色落ち原因珪藻として重要視されておらず、その生態および生理に関する知見は極めて少ない。そこで今回、4年以上にわたる現場調査により、有明海佐賀県海域における *A. karianus* の出現動態ならびに各種水質の周年変動を調べた。また、本調査結果から *A. karianus* は春季から秋季には増加せず、冬季にのみ増加し赤潮を形成することが確認されたため、室内試験により高水温および低水温条件下における *A. karianus* の栄養細胞の増殖特性および休眠期細胞の発芽特性について調べた。そして、現場調査および室内試験より得られた結果と佐賀市の全天日射量の

データを用い、*A. karianus* の出現動態と各種環境要因との関係を解析した。

材料と方法

現場調査 2007年12月から2012年3月にかけて、有明海佐賀県海域における8定点 (Fig. 1) において原則として週に1回、昼間満潮前後2時間の間に調査を行った。採水層は表層および底層 (海底上1 m) とし、表層はポリバケツで、底層は採水器 (離合社, リゴ- B号透明採水器) で採取した。調査項目は *A. karianus*, その他の珪藻類, 鞭毛藻類の細胞密度 (表層のみ), 水温, 塩分, 溶存態無機窒素 (DIN), リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$), ケイ酸態ケイ素 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) とした。植物プランクトンの細胞密度は試水 10~500 μL 中の細胞数をプランクトン計数板 (松浪硝子工業株式会社, MPC-200) や界線スライドグラス (松浪硝子工業株式会社, S6117) を用いて生物顕微鏡 (Nikon 社, ECLIPSE E600) で検鏡した。水温は調査船上で採水後すぐに水銀温度計により測定し, 塩分は試水を実験室に持ち帰った後, 卓上塩分計 (鶴見精機社, Digital Salinometer E-202) を用いて測定した。また, 水温および塩分の値から密度 (σ_t) を大原ら⁵⁾の方法で算出し, 表底層の密度差の $\Delta\sigma_t$ (底層密度から表層密度を引いた値) を求めた。各種栄養塩類はオートアナライザー (BL TEC 社, QuAAtro 2-HR) により測定した。また, 全天日射量のデータは気象庁気象統計情報ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>) の佐賀気象台のものを用いた。

増殖試験

1. 供試生物と培地 試験には2010年4月に有明海佐賀県海域より分離し, ピペット洗浄法により確立した *A. karianus* クローン株を用いた。本株において無菌検査は実施していないが, 継代培養中および試験中にバクテリアの増殖による白濁は確認されなかった。継代培養および試験には塩分30の改変 SWM-3 培地 (Table 1, Yamasaki *et al.*⁶⁾の培地を改変) を70 mL 容浮遊細胞用フラスコ (NUNC 社, NON-TREATED FLASK) に12 mL 加えたものを用いた。継代培養は水温 15°C, 光強度 60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 明暗周期 12L : 12D の条件下で行った。

2. 試験区および増殖速度の算出 試験区は高水温区と低水温区の2区設定した。高水温区および低水温区の水温, 明暗周期はそれぞれ 25°C, 14L : 10D および 10°C, 10L : 14D とし, 光強度はともに 60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした。*A. karianus* の継代培養株は各試験条件下において14日以上馴致培養を行った。そして, 各試験区において対数増殖期にある *A. karianus* 細胞を初期細胞密度が 100 cells mL^{-1} となるように培地に接種した ($n =$

Table 1 Composition of modified SWM-3 medium

Component	Quantity
Modified SWM-3 medium (pH 7.8)	
Seawater up to	1,000 mL
NaNO_3	170 mg
NaH_2PO_4	12 mg
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	56.8 mg
Fe-EDTA	0.84 mg
Na_2SeO_3	0.346 μg
Tris	100 mg
Metal mixture solution ¹	10 mL
Vitamin mixture solution ²	2 mL
¹Metal mixture solution	
Distilled water	1,000 mL
H_3BO_3	6.18 g
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	692.5 mg
ZnCl_2	54.5 mg
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2.38 mg
²Vitamin mixture solution	
Distilled water	1,000 mL
Vitamin B ₁ -HCl	0.25 g
Biotin	0.5 mg
Vitamin B ₁₂	1 mg

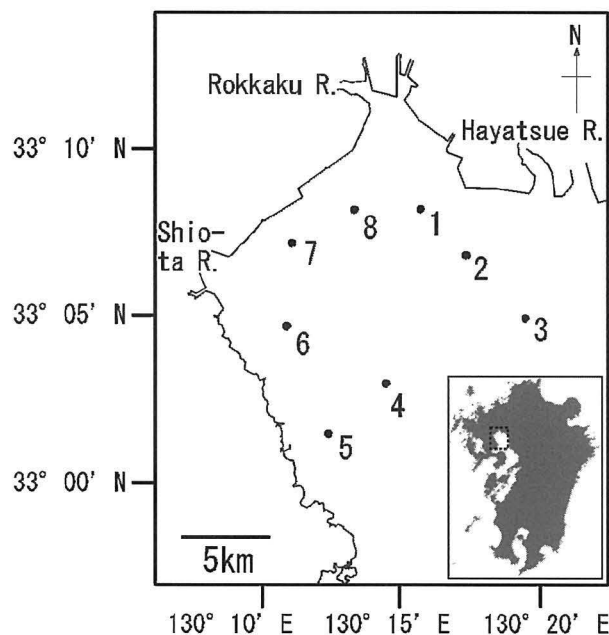


Fig. 1 Sampling locations in the Ariake Sea off Saga Prefecture.

3). 接種後, 1~2 日毎に 0.5 mL を採取して, *A. karianus* の細胞密度を検鏡し, 対数増殖期における最大増殖速度 (divisions day^{-1}) を算出した。

発芽試験

1. 試料と培地 試験には2011年4月に Fig. 1 に示す

St. 6 でコアサンプラー（共和共栄会株式会社, 内径 7.4 cm）により採取した表層 1 cm 深までの底泥を 4°C の暗所で 50 日間保存した試料を用いた。発芽試験には前述の増殖試験と同様の培地とフラスコを用いた。

2. 試験区, 試料の処理, 検鏡 試験区は前述の増殖試験と同様の高水温区と低水温区を設定した。McQuoid⁷⁾の方法を参考に, 各試験区の水温に調整した培地 150 mL に底泥試料をそれぞれ 0.5 g 懸濁し, 超音波洗浄機 (Branson 社, Bransonic 8510J-MT) により 15 秒の超音波処理を行い, 底泥懸濁液を作製した。そして各試験区において懸濁液を 50 mL ずつフラスコに分注し ($n=3$), 10 日間, 毎日 1 回攪拌後に 0.5 mL を採取して, 主要な植物プランクトンの細胞密度を検鏡した。

結 果

現場調査

1. *A. karianus*, その他の珪藻類, 鞭毛藻類の細胞密度 2007 年 12 月から 2012 年 3 月における *A. karianus*, その他の珪藻類, 鞭毛藻類の細胞密度の変動を Fig. 2

に示す。なお, *A. karianus* については各定点の値を, その他の珪藻類および鞭毛藻類に関しては全定点の平均値で示す。調査期間中, *A. karianus* は 7 月から 10 月には全く検出されず, 11 月から 12 月に St. 6~8 で 100 cells mL⁻¹ 未満の低密度で初認され, 12 月下旬から 2 月に同海域を中心に 4,000 cells mL⁻¹ 以上に増加し赤潮を形成するという規則性が確認された。特に, 2009 年以降の赤潮は全て 12 月下旬から 1 月上旬の期間に初認された。赤潮衰退後の 4 月から 6 月においても *A. karianus* は 4~2,670 cells mL⁻¹ の範囲で確認されたが, 再度赤潮を形成することはなかった。St. 2 および St. 3 では *A. karianus* が赤潮を形成することはほとんどなく, St. 2 では 2012 年の 1 月に一度だけ 4,000 cells mL⁻¹ 以上の赤潮状態が確認されたが, St. 3 では赤潮が確認されることはなかった。2008 年 2 月, 2009 年 12 月, 2011 年 1 月, 2011 年 12 月に発生した *A. karianus* 赤潮は, いずれも最高細胞密度が 10,000 cells mL⁻¹ 以上に達する大規模なものであった。その他の珪藻類は毎年 7 月から 8 月に年間で最も高密度になり, 全定点

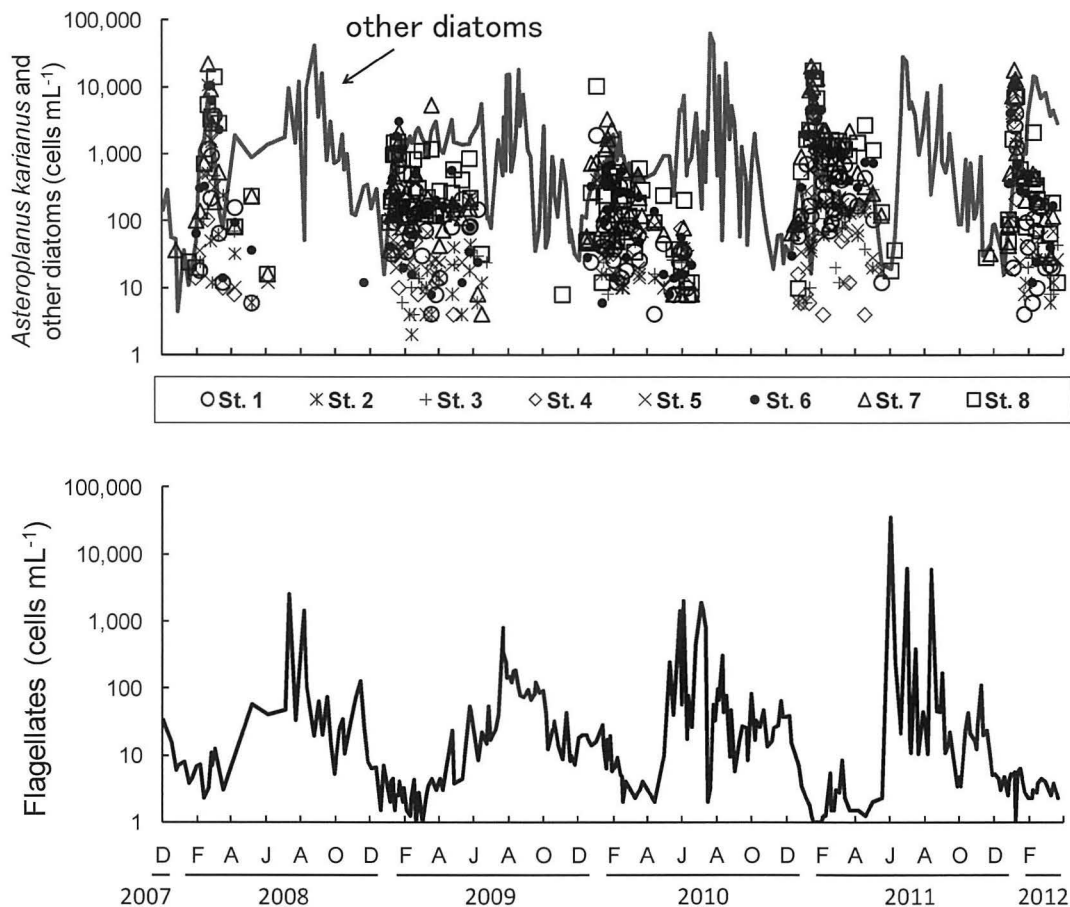


Fig. 2 Seasonal changes in phytoplankton in the surface layer of the Ariake Sea off Saga Prefecture from December 2007 to March 2012. *Asteroplanus karianus* densities at stations 1–8 are shown as symbols. Other diatoms and flagellates were averaged for the eight sampling stations and are shown as a solid line.

Table 2 Monthly average cell density (cells mL⁻¹) of *Asteroplanus karianus*, other diatoms and flagellates in the surface layer of stations 2 and 3 (low red tide of *Asteroplanus karianus* occurrence area) and stations 6-8 (high red tide of *Asteroplanus karianus* occurrence area)

Sampling station	Organism	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2	<i>Asteroplanus karianus</i>	411	46	67	40	14	4	0	0	0	0	0	5
	Other diatoms	332	898	736	654	521	4,096	6,642	5,685	636	325	52	57
	Flagellates	6	3	2	4	19	169	158	230	20	25	13	10
3	<i>Asteroplanus karianus</i>	215	29	44	36	70	6	0	0	0	0	0	6
	Other diatoms	305	782	773	883	1,360	1,169	12,877	6,550	1,986	353	74	92
	Flagellates	6	4	4	4	11	116	537	56	28	14	27	14
6	<i>Asteroplanus karianus</i>	2,468	1,173	361	260	96	4	0	0	0	0	1	213
	Other diatoms	1,255	6,543	1,901	1,775	1,915	2,869	10,737	6,402	2,294	944	195	151
	Flagellates	5	4	4	18	76	709	1,346	1,261	21	42	62	11
7	<i>Asteroplanus karianus</i>	3,363	1,547	638	170	108	7	0	0	0	0	2	102
	Other diatoms	1,293	7,454	1,875	1,062	999	3,843	7,324	7,806	2,101	573	154	108
	Flagellates	5	2	2	5	39	13,993	1,053	285	81	57	69	8
8	<i>Asteroplanus karianus</i>	2,600	869	1,300	645	307	20	0	0	0	0	2	44
	Other diatoms	427	5,598	1,262	1,402	1,408	2,696	8,634	8,083	2,038	390	115	41
	Flagellates	3	1	2	0	76	1,456	309	685	26	23	25	8

平均値で 10,000 cells mL⁻¹ 以上となることもあった。なお、7 月から 8 月の優占種は *Skeletonema* spp. であった (種組成データは未記載)。鞭毛藻類は年によって異なるが、5 月から 8 月の期間に高密度になった。Table 2 に *A. karianus* が頻繁に赤潮を形成する St. 6~8 と、ほとんど形成しない St. 2 および St. 3 における *A. karianus*, その他の珪藻類, 鞭毛藻類の細胞密度の調査期間における月平均値を示す。その他の珪藻類は 7 月から 8 月は全ての定点で高密度になる傾向が確認されたが、1 月から 4 月は St. 6~8 で St. 2 および St. 3 よりも高密度になる傾向が確認された。鞭毛藻類は 6 月から 8 月に St. 6~8 で高密度になる傾向が確認された。

2. 水温, 塩分, 表底層の密度差 調査期間中の水温, 塩分の全定点平均値の変動を Fig. 3 に示す。水温の全定点平均値は表層および底層でそれぞれ 6.3~32.1°C および 6.3~29.3°C の範囲で変動した。表層水温は 7 月から 8 月に年間で最も高くなり, 全定点平均値で 30°C を超えることもあった。また, 同時期に表底層の水温差が大きくなる傾向が確認された。塩分の全定点平均値は表層および底層でそれぞれ 5.4~31.2 および 13.6~31.5 の範囲で変動した。表層塩分は梅雨時期にあたる 6 月から 7 月に年間で最も低くなり, 全定点平均値で 10 以下に低下することもあった。また, 同時期に表底層の塩分差が大きくなる傾向が確認された。*A. karianus* が赤潮状態 (4,000 cells mL⁻¹ 以上) で確認された各定点における表層の水温および塩分の値を Fig. 4 に示す。*A. karianus* 赤潮時の水温および塩分はそれぞれ 4.9~15.4°C および 27.1~31.1 であった。8°C 以下でも

A. karianus は 10,000 cells mL⁻¹ 以上の高密度で確認された。表底層の密度差の全定点平均値の変動を Fig. 5 に示す。密度差の全定点平均値は 0.0~11.1 の範囲で変動した。ごくまれに密度差が負の値を示すことがあったが, それらは 0.0 として示した。密度差は表底層の水温差および塩分差が大きくなる 6 月から 8 月に大きくなる傾向が確認され, 全定点平均値で 10 を超えることもあった。Table 3 に St. 2, 3, 6, 7, 8 における表層の水温および塩分, ならびに表底層の密度差の調査期間における月平均値を示す。*A. karianus* が頻繁に赤潮を形成する St. 6~8 の表層水温は 11 月から 2 月までは St. 2 および St. 3 よりも低く, 4 月から 9 月は高い傾向が確認された。表層塩分および表底層の密度差については St. 6~8 に共通する傾向は確認されなかった。

3. 各種栄養塩類 調査期間中の DIN, PO₄-P, SiO₂-Si の全定点平均値の変動を Fig. 6 に示す。DIN の全定点平均値は表層および底層でそれぞれ 0.2~58.9 μM および 0.6~39.1 μM の範囲で変動した。DIN は表底層ともに 6 月から 7 月の塩分低下時にスパイク状のピークが確認されるが 8 月にかけて急激に減少し, その後 10 月にかけて回復するが, *A. karianus* が増加する 12 月下旬から 1 月上旬にかけて再び急激に減少するという傾向が確認された。PO₄-P の全定点平均値は表層および底層でそれぞれ 0.0~2.8 μM および 0.0~2.7 μM の範囲で変動した。また, SiO₂-Si の全定点平均値は表層および底層でそれぞれ 3.9~226.2 μM および 3.7~154.9 μM の範囲で変動した。PO₄-P および SiO₂-Si の変動は類似しており, DIN 同様に 6 月から 7 月の塩分低下時

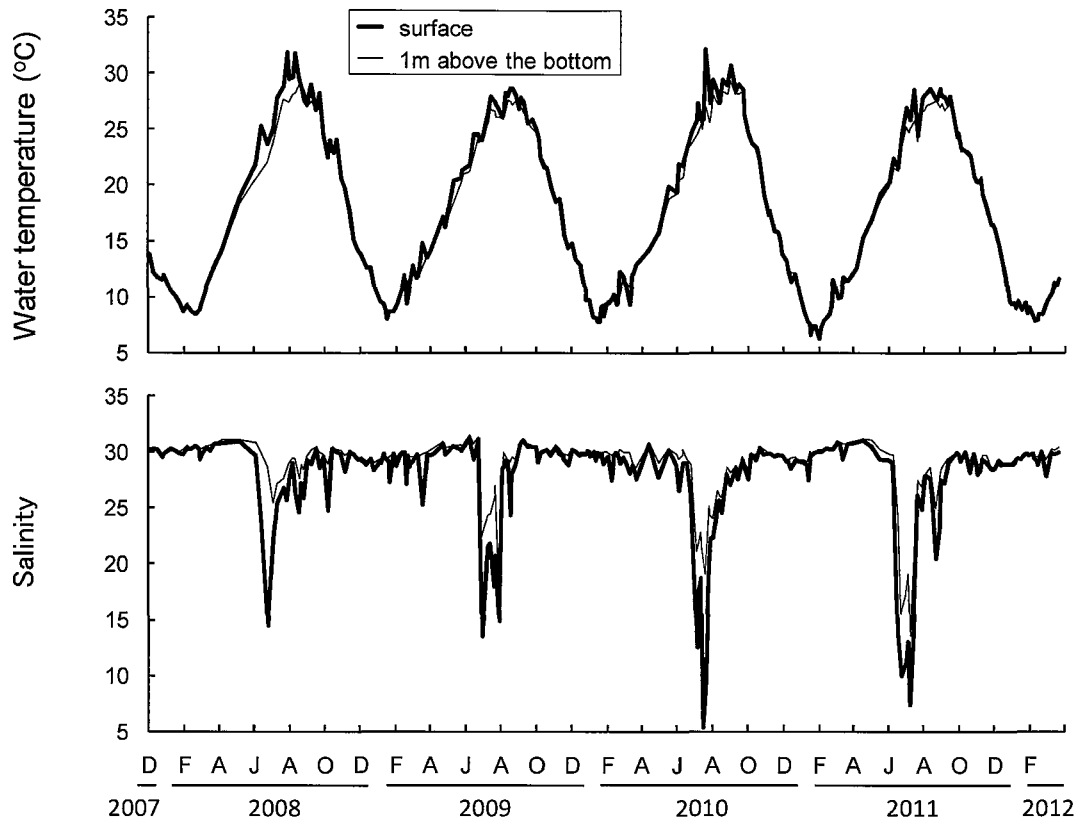


Fig. 3 Seasonal changes in water temperature and salinity in the Ariake Sea off Saga Prefecture from December 2007 to March 2012. Data were averaged for the eight sampling stations.

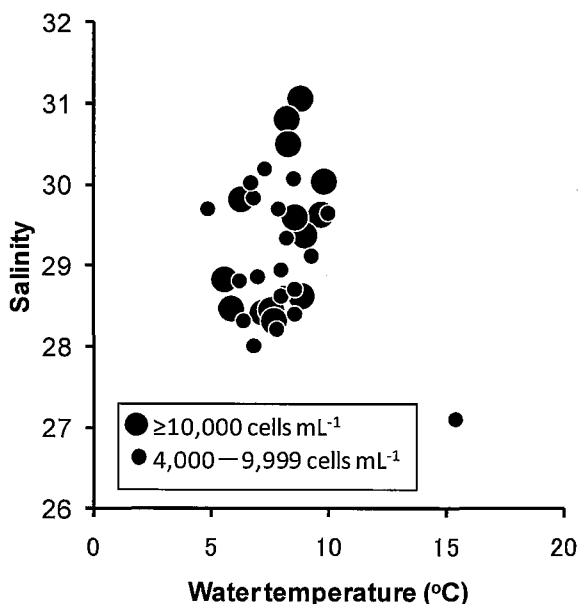


Fig. 4 Relationship between water temperature and salinity during the occurrence of an *Asteroplanus karianus* red tide ($\geq 4,000$ cells mL^{-1}).

にスパイク状のピークが確認されるが DIN とは異なり 8月に著しく減少することなく、12月下旬から1月上旬にかけて減少するという傾向が確認された。Table 4に St. 2, 3, 6, 7, 8における表層の DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の調査期間における月平均値を示す。 *A. karianus* が頻繁に赤潮を形成する St. 6~8の表層の DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は10月から11月に St. 2および St. 3よりも高い傾向が確認された。しかし、St. 2および St. 3の DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の月平均値もそれぞれ $14.3\sim 17.2\ \mu\text{M}$, $1.4\sim 1.7\ \mu\text{M}$, $62.5\sim 76.4\ \mu\text{M}$ と低くはなかった。

4. 佐賀市の全天日射量 調査期間中の佐賀市の全天日射量の変動を Fig. 7に示す。全天日射量は $0.0\sim 31.3\ \text{MJ m}^{-2}$ の範囲で変動した。5月から7月の期間で年間でも高くなり、 *A. karianus* が増加した12月から2月は年間でも最も低くなる傾向が確認された。

増殖試験 高水温区 (25°C , 14L : 10D) および低水温区 (10°C , 10L : 14D) における *A. karianus* の増殖試験の結果を Fig. 8に示す。高水温区および低水温区における最大増殖速度はそれぞれ $2.0\ \text{divisions day}^{-1}$ および $0.8\ \text{divisions day}^{-1}$ であり、高水温区の方が低水温区よりも最大増殖速度が高かった。

発芽試験 高水温区および低水温区における発芽試験

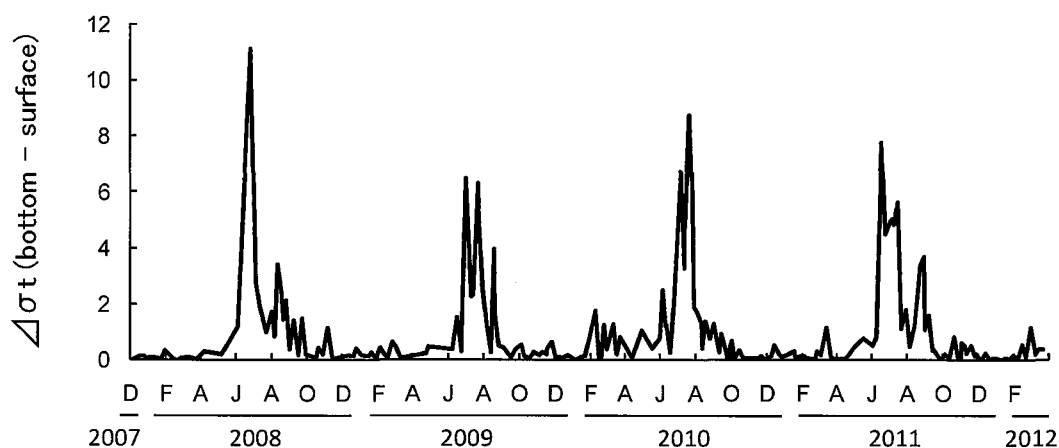


Fig. 5 Seasonal changes in density difference $\Delta\sigma_t$ between the bottom (1 m above the bottom) and surface layers in the Ariake Sea off Saga Prefecture from December 2007 to March 2012. Data were averaged for the eight sampling stations.

Table 3 Monthly average values of water temperature and salinity in the surface layer and density difference $\Delta\sigma_t$ between the bottom (1 m above the bottom) and surface layers at stations 2 and 3 (low red tide of *Asteroplanus karianus* occurrence area) and stations 6-8 (high red tide of *Asteroplanus karianus* occurrence area)

Sampling station	Parameter	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2	Water temperature	9.1	9.5	11.6	14.7	18.9	22.7	27.0	28.3	27.0	22.8	17.4	12.6
	Salinity	29.5	29.5	29.3	30.0	30.4	23.8	16.4	26.4	29.3	29.6	29.9	29.6
	$\Delta\sigma_t$	0.1	0.3	0.3	0.5	0.3	3.7	4.1	1.8	0.6	0.4	0.1	0.1
3	Water temperature	9.2	9.7	11.7	14.9	19.5	22.6	27.1	28.0	27.0	22.7	17.4	12.5
	Salinity	29.0	29.2	28.8	29.7	29.2	26.7	19.6	27.2	28.9	28.7	29.4	29.2
	$\Delta\sigma_t$	0.3	0.6	0.8	0.5	1.0	1.6	2.6	1.1	0.7	0.9	0.4	0.3
6	Water temperature	8.2	9.2	11.7	15.2	19.9	23.5	27.5	29.1	27.5	22.4	16.5	11.6
	Salinity	29.5	29.5	29.1	30.3	30.3	25.2	18.1	26.3	29.2	29.3	29.1	29.3
	$\Delta\sigma_t$	0.1	0.4	0.3	0.2	0.4	3.3	4.3	1.8	0.4	0.3	0.2	0.1
7	Water temperature	8.0	9.3	11.6	15.3	20.1	23.7	27.7	29.0	27.4	22.6	16.4	11.5
	Salinity	29.2	29.2	28.7	30.1	30.0	24.2	16.6	26.2	29.2	29.3	28.8	29.1
	$\Delta\sigma_t$	0.1	0.4	0.3	0.2	0.4	2.6	3.0	1.2	0.4	0.2	0.3	0.0
8	Water temperature	7.7	9.2	11.6	15.4	20.8	23.3	27.6	28.8	27.5	22.3	16.1	11.2
	Salinity	28.5	28.6	28.5	29.4	29.5	24.7	17.2	26.5	28.8	28.5	28.3	28.3
	$\Delta\sigma_t$	0.1	0.4	0.2	0.2	0.5	1.8	2.3	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1

Water temperature: °C

の結果を Fig. 9 に示す。試験中に出現した主要な植物プランクトンは *A. karianus*, *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Thalassiosira* spp. であった。高水温区における発芽試験の結果, *A. karianus* は試験開始 5 日目から増加したが, *Skeletonema* spp. は 2 日目から増加した。*Chaetoceros* spp. および *Thalassiosira* spp. はそれぞれ 5 日目および 3 日目から増加した。また, 試験終了時の細胞密度は *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *A. karianus*, *Thalassiosira* spp. の順に高く, 特に *Skeletonema* spp. は 19,200 cells mL⁻¹ に達し, 優占状態であった。*A. karianus* の最高細胞密度は 1,450 cells mL⁻¹ にとどまった。低水温区における発芽試験の結果, *A.*

karianus は試験開始 2 日目から増加した。一方, 高水温区では 2 日目から増加した *Skeletonema* spp. は低水温区では 5 日目から増加した。また, *Chaetoceros* spp. は試験期間中ほとんど増加しなかった。*Thalassiosira* spp. は高水温区と同様に 3 日目に増加した。試験終了時の細胞密度は *A. karianus* が 17,650 cells mL⁻¹ に達する優占状態となり, 高水温区において優占状態となった *Skeletonema* spp. は 1,657 cells mL⁻¹ にとどまった。

考 察

4 年以上にわたる現場調査の結果, *A. karianus* は 7 月から 10 月には検出されず, 11 月から 12 月に低密度

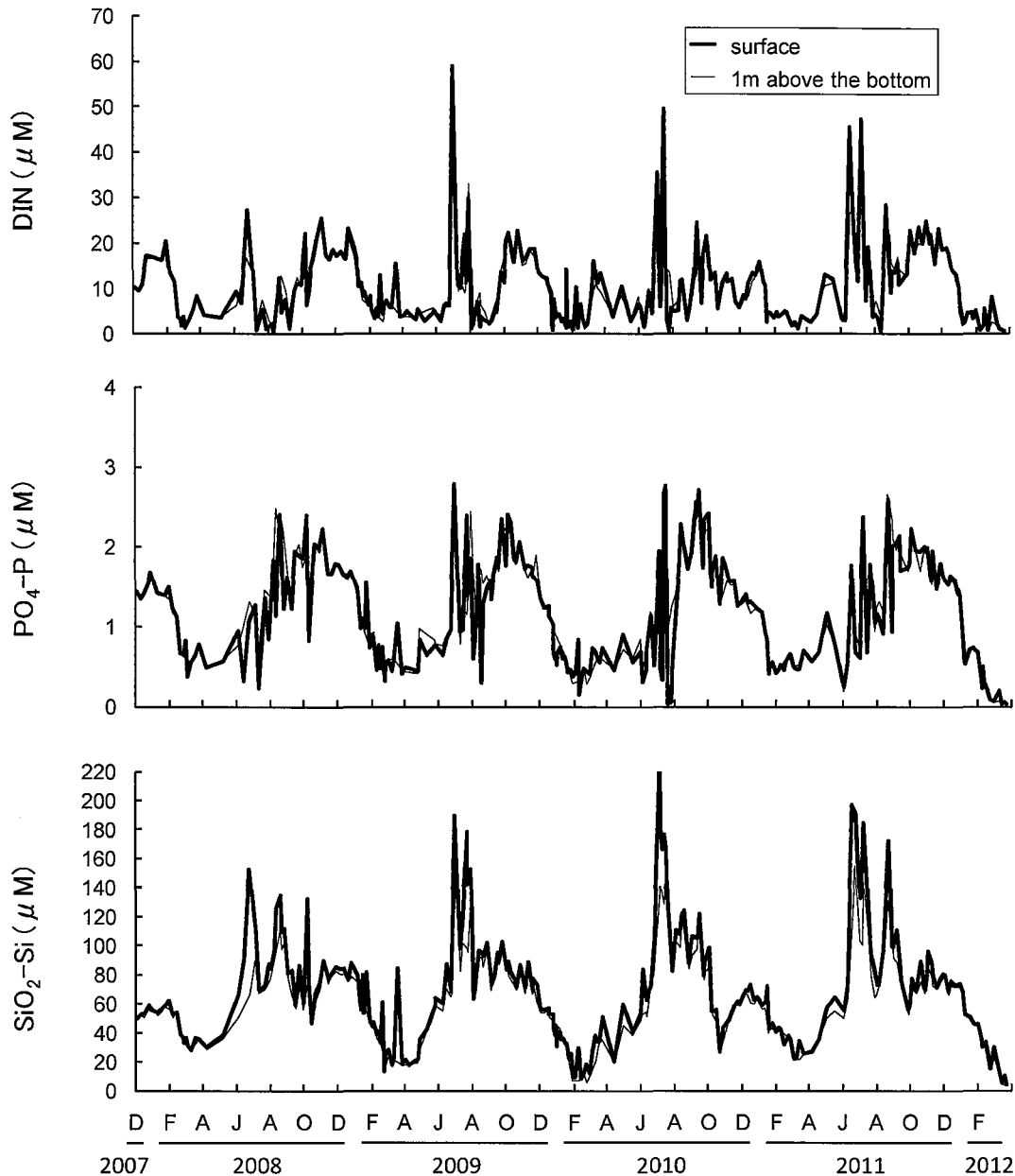


Fig. 6 Seasonal changes in DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_2\text{-Si}$ in the Ariake Sea off Saga Prefecture from December 2007 to March 2012. Data were averaged for the eight sampling stations.

で初認され, 12月下旬以降に増加し赤潮を形成するという傾向が確認された (Fig. 2)。

A. karianus の赤潮形成時期は水温が概して $5\sim 10^\circ\text{C}$ であり, 年間で最も水温が低下する時期であった (Figs. 3, 4)。増殖試験の結果, *A. karianus* の増殖速度は高水温区 ($2.0 \text{ divisions day}^{-1}$) の方が低水温区 ($0.8 \text{ divisions day}^{-1}$) よりも高かったことから (Fig. 8), 有明海における *A. karianus* の出現時期は本種の至適増殖水温と一致しなかった。なお, *A. karianus* は 30°C では増殖できないことが確認されている (山口ら, 未発表) ことから, 水温が 30°C 以上となる時期には *A. karianus*

は高水温による増殖抑制を受けた可能性がある。また, 紫加田らの報告⁸⁾ から, 八代海産の *Skeletonema costatum* および *Thalassiosira* sp. 等の 10°C (塩分 28) における増殖速度は $1.0 \text{ divisions day}^{-1}$ 程度であることが読み取られ, *A. karianus* が低水温条件下で特に増殖速度が高い種であるとはいえない。発芽試験の結果, 高水温区では最終的に *Skeletonema* spp. が優占したが低水温区では *A. karianus* が優占するという, 現場における優占種の出現動態と類似した結果が得られた (Figs. 2, 9)。各試験区における *A. karianus* の動態をみると, 高水温区では増殖開始に時間を要したため, 他種, 特に

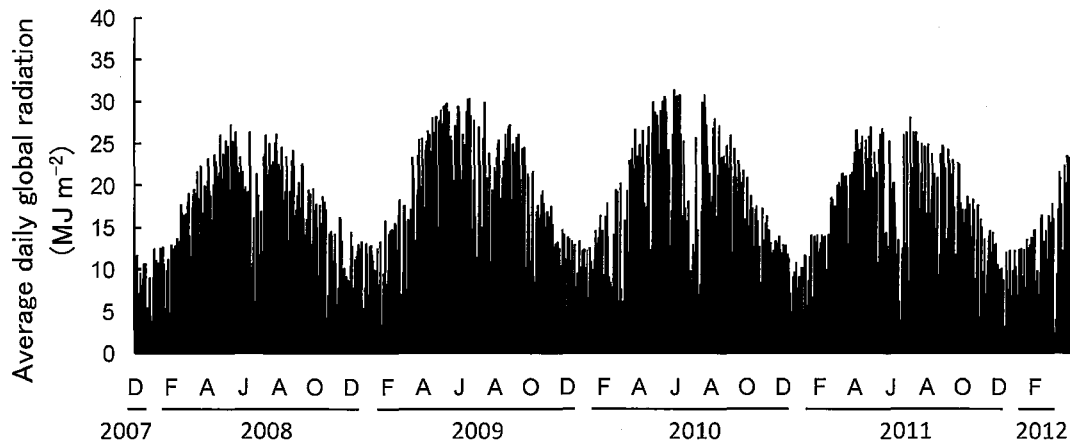


Fig. 7 Seasonal changes in average daily global radiation in Saga City from December 2007 to March 2012.

Table 4 Monthly average concentrations (μM) of DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_2\text{-Si}$ in the surface layer of stations 2 and 3 (low red tide of *Asteroplanus karianus* occurrence area) and stations 6–8 (high red tide of *Asteroplanus karianus* occurrence area)

Sampling station	Parameter	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2	DIN	10.6	4.5	6.5	5.5	7.3	18.0	24.0	10.5	11.6	15.5	14.3	13.3
	$\text{PO}_4\text{-P}$	0.9	0.6	0.5	0.6	0.7	1.0	1.5	1.7	1.9	1.6	1.4	1.3
	$\text{SiO}_2\text{-Si}$	53.7	36.7	34.2	32.7	47.2	110.9	156.2	105.3	82.1	65.2	62.5	62.1
3	DIN	9.9	5.7	7.7	5.8	9.8	12.4	12.0	7.4	11.6	17.2	14.7	13.8
	$\text{PO}_4\text{-P}$	1.0	0.5	0.5	0.6	0.9	0.9	0.8	1.3	1.9	1.7	1.4	1.3
	$\text{SiO}_2\text{-Si}$	62.2	45.3	42.2	39.1	61.0	87.2	113.4	91.1	86.3	76.4	67.5	67.8
6	DIN	5.0	3.1	5.0	4.0	4.1	11.3	12.2	4.0	8.8	17.1	18.4	11.8
	$\text{PO}_4\text{-P}$	0.6	0.4	0.4	0.6	0.7	0.9	1.1	1.6	2.0	2.0	1.9	1.4
	$\text{SiO}_2\text{-Si}$	42.5	21.1	19.8	26.9	54.2	101.8	129.5	108.1	92.9	81.1	85.1	68.0
7	DIN	6.7	6.0	8.0	4.4	7.0	13.9	20.0	5.7	10.3	19.6	19.4	13.1
	$\text{PO}_4\text{-P}$	0.7	0.6	0.5	0.7	0.9	1.1	2.0	1.7	2.2	2.3	2.0	1.5
	$\text{SiO}_2\text{-Si}$	49.3	28.9	24.1	29.7	58.9	108.7	147.0	108.0	93.0	82.9	84.9	70.3
8	DIN	11.1	8.2	9.4	7.4	8.9	14.9	19.0	7.6	15.1	25.3	22.3	19.2
	$\text{PO}_4\text{-P}$	1.2	0.9	0.9	0.9	1.1	1.0	1.6	1.9	2.7	2.8	2.2	1.8
	$\text{SiO}_2\text{-Si}$	64.0	42.4	34.4	41.0	64.0	103.5	143.2	106.7	102.2	90.8	89.6	78.6

Skeletonema spp. が先行して高密度となり優占できなかったが、低水温区では他種よりも増殖開始が早かったため他種に先行して優占できたと考えられた。このことから、底泥中における *A. karianus* の休眠期細胞が発芽に要する時間は高水温条件下よりも低水温条件下で短いことが示唆され、この発芽特性が冬季における *A. karianus* の赤潮形成に寄与していると考えられた。Fig. 9 に示すように、両試験区において、試験開始1日目の *A. karianus* の細胞密度は *Skeletonema* spp. よりも高かった。このことから、本試験に用いた底泥中の *A. karianus* の休眠期細胞密度は *Skeletonema* spp. よりも高かったことが分かる。我々は、*Skeletonema* spp. の休眠期細胞密度が *A. karianus* の2倍程度である底泥試料を用いた同様の発芽試験も実施した。その結果、本試験と同

様に、*A. karianus* の休眠期細胞が発芽に要する時間は低水温条件下で短いことが示唆され、試験終了時には *A. karianus* が優占した。しかし、*Skeletonema* spp. の休眠期細胞が多かったことが影響し、試験終了時の *A. karianus* と *Skeletonema* spp. との細胞密度の差は本試験の結果よりも小さかった（松原ら、未発表）。以上のことから、*A. karianus* の休眠期細胞が発芽に要する時間は、底泥中の他の珪藻類の休眠期細胞の多寡には影響を受けないことが示唆された。しかし、他の珪藻類の休眠期細胞密度が *A. karianus* に比べ著しく高い条件では、低水温条件下でも *A. karianus* は優占できない可能性が考えられた。今回の試験系は *A. karianus* の休眠期細胞の他に他生物や底泥が介在するものであった。今後、休眠期細胞を底泥から分離した単藻培養試験等を実

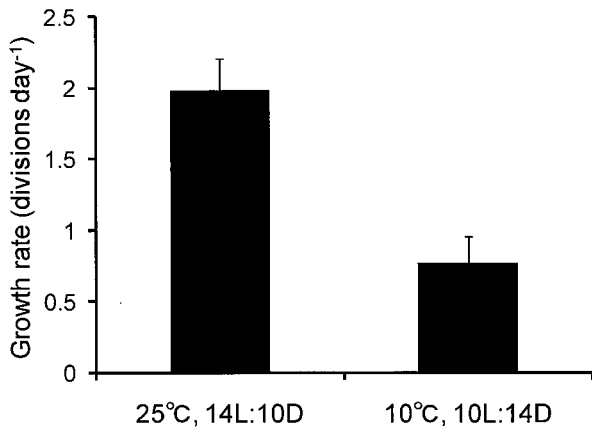


Fig. 8 Growth rate of *Asteroplanus karianus* in the laboratory under high water temperature (25°C, 14L : 10D) and low water temperature (10°C, 10L : 14D) conditions.

施することにより, *A. karianus* の発芽特性を精密に調べる必要がある。本試験の結果, 低水温区のように優占できなかったものの, *A. karianus* は高水温区においても発芽し, 1,000 cells mL⁻¹ 程度まで増加した。水温が 30°C 以上となる時期には, *A. karianus* の休眠期細胞の発芽は栄養細胞の増殖と同様に抑制される可能性があるが, ほぼ周年の水温条件下で発芽および増殖が可能であると考えられた。しかし, *A. karianus* は 7 月から 10 月には全く検出されず, 11 月も低密度であった (Fig. 2)。このことから, 高水温に加え, 他の要因が 7 月から 11 月に *A. karianus* の増加を抑制していることが考えられた。

Shikata *et al.*⁹⁾ は室内試験において, 急激な塩分低下は多くの珪藻類を死滅させることを報告している。*A. karianus* および塩分の変動をみると, 毎年 6 月下旬から 7 月上旬にかけて表層塩分が著しく低下しており, その後 *A. karianus* は確認されなくなった (Figs. 2, 3)。また, *C. wailesii* や *E. zodiacus* は沈降速度が大きいため,¹⁰⁾ 夏季の成層形成期には細胞を表層 (有光層) に保持できないために増加できず, 細胞が表層へ輸送される機会が増える秋季から冬季の鉛直混合期にのみ増加可能であることが播磨灘において報告されている。^{2,3)} 表底層の密度差の変動をみると, 塩分低下後の 6 月下旬から 8 月は密度差が年間で最も大きくなる時期であり (Fig. 5), 強固な成層が形成されていたことがうかがえた。6 月下旬から 7 月上旬の著しい塩分低下により *A. karianus* は減耗し, 引き続き訪れる成層形成期には休眠期細胞由来の栄養細胞が表層に維持されず沈降するため, 7 月から 8 月にはほとんど増加できないのかもしれない。この仮説を検証するために, 今後, *A. karianus* の沈降速度について調べる必要がある。また, 底層にお

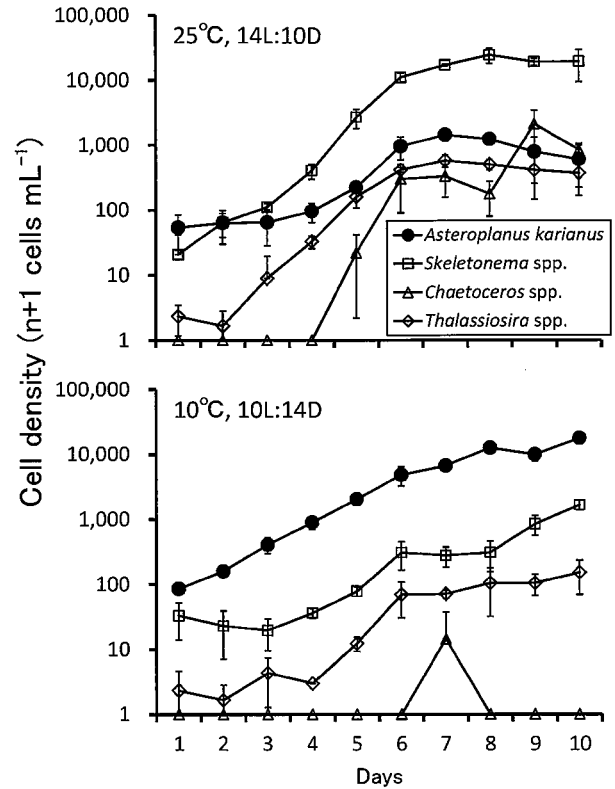


Fig. 9 Growth curves of the four dominant diatoms incubated under high water temperature (25°C, 14L : 10D) and low water temperature (10°C, 10L : 14D) conditions. Sediment used in cultures was collected from the Ariake Sea off Saga Prefecture during April 2011.

る栄養細胞の動態を周年にわたり詳細に調査する必要がある。

近年, 有明海灣奥部において, 成層形成期には貧酸素水塊が毎年のように形成される。^{11,12)} 海底の貧酸素化, それに伴い発生する硫化物は *Scrippsiella* spp. や *Alexandrium* spp. などの鞭毛藻類の発芽を抑制するが, *Skeletonema* spp. や *Chaetoceros* spp. といった珪藻類の休眠期細胞の発芽は抑制しないことが報告されている。¹³⁾ しかし, 貧酸素および硫化物に対する耐性は種ごとに異なる可能性がある。成層形成期に *A. karianus* が不在となる原因を解明するためには, *A. karianus* の休眠期細胞の貧酸素耐性等について調べることも重要であると考えられた。

上記の物理, 化学的要因のほか, 植物プランクトン種間における相互作用 (栄養競争やアレロパシー等) といった生物的要因も植物プランクトンの組成変化に大きな影響を与える可能性がある。¹⁴⁾ 例えば, *S. costatum* が産生する物質は *Ditylum brightwellii* や *Asterionellopsis gracialis* 等, 他の珪藻類の増殖を阻害することが報告されている。¹⁵⁾ 成層形成期の 7 月から 8 月は *Skeletonema* spp. を主体とする珪藻類が高密度化していた。また,

鞭毛藻類が高密度化することもあった。それらが *A. karianus* の増殖を抑制した可能性もあり、今後検討が必要である。

9月から5月は表底層の密度差は小さかった (Fig. 5)。特に、9月から2月までは水温低下期であり (Fig. 3)、鉛直混合が活発な時期であったことがうかがえた。この鉛直混合期のうち、*A. karianus* は9月から11月には増加せず、12月下旬から2月、特に2009年以降は12月下旬から1月上旬という限られた期間にのみ増加した (Fig. 2)。珪藻類の動態は全天日射量の変動に大きな影響を受けることが報告されている。¹⁶⁻¹⁸⁾ 12月下旬から1月上旬は年間で最も全天日射量が低下する時期であり (Fig. 7)、一般に珪藻類の増殖に不適な時期と考えられるが、この時期に赤潮を形成する *A. karianus* は低日射条件下で増殖可能な種であるといえる。しかし、そのような種が、より日射量が高く、なおかつ各種栄養塩も十分に存在していた9月から11月 (Figs. 6, 7) に増加しなかった理由は、今回の調査結果からは不明であり、今後の課題である。

A. karianus が増加した12月下旬以降、各種栄養塩類の濃度が急激に減少した。この原因は *A. karianus* による消費であると考えられ、さらに、この栄養塩の低下が *A. karianus* の赤潮の衰退につながったと推察された。しかし、*A. karianus* の栄養塩利用特性については現在のところ全く知見が無く、今後研究を進める必要がある。

A. karianus は St. 6~8 で頻繁に赤潮を形成したが、St. 2 および St. 3 ではほとんど赤潮を形成しなかった。Table 2 に示すように、St. 2 および St. 3 では珪藻類が低密度である1月から4月においても、St. 6~8 では *A. karianus* のみでなくその他の珪藻類も比較的高密度である傾向が確認された。この要因の1つとして、St. 6~8 の海域の流速が St. 2 および St. 3 の海域よりも遅く、¹⁹⁾ 珪藻類が物理的に拡散されにくいことが考えられた。St. 6~8 と St. 2 および St. 3 の水質を比較すると、11月から1月の表層水温が St. 6~8 で 1°C 程度低い傾向があった (Table 3)。なお、この期間は鉛直混合期であり、底層水温に関しても同様の傾向であった (データ未記載)。このことは、発芽に要する時間が低水温条件下で短い *A. karianus* が St. 6~8 の海域で優占しやすい要因の1つかもしれない。我々は、2010年以降、10月から3月の期間に St. 6 よりもさらに河口付近の海域で *A. karianus* の細胞密度の動態を調査している。その結果、河口付近の海域で *A. karianus* は St. 6 よりも高密度になることが確認された (松原ら、未発表)。Fig. 1 に示すように、有明海奥部には複数の河川が流入している。*A. karianus* が St. 6~8 で増加しやすい要因の解明、ひいては *A. karianus* の赤潮発生機構の解明には、各河口域において水質および休眠期細胞密度を調査する

ことが重要であると考えられた。

有明海奥部は日本最大の干満差が生じる海域であり、植物プランクトンの動態は潮汐の影響を強く受けることが報告されている。^{20,21)} 今回は、潮汐データを含めた議論はしていない。しかし、我々は、St. 6 の海域の表層水温が 10°C 以下となった後の初めての大潮期に続く小潮期に *A. karianus* が赤潮を形成する傾向を確認している (松原ら、未発表)。その理由については現段階では不明であるが、*A. karianus* の赤潮形成に低水温と潮汐が複合して関与していることが考えられ、今後検討する必要がある。

前述したように、*A. karianus* は2008年以降に高密度な赤潮を形成するようになった。大阪湾、²²⁾ 播磨灘、²³⁾ 洞海湾^{24,25)} など、各海域で植物プランクトン組成の変化と栄養塩環境 (TN/TP 比など) の変化の関係が解析されている。有明海佐賀県海域では、DIP が長期的増加傾向にあり、²⁶⁾ DIN/DIP 比は低下傾向を示している。有明海奥部以外の海域における *A. karianus* の研究例がないため、他海域との比較により *A. karianus* の高密度化に好適な環境要因を抽出することは出来ない。しかし、上記の栄養塩環境の変化により、2008年以降に *A. karianus* が高密度化するようになった可能性はある。*A. karianus* の生態および生理特性を解明するために、有明海佐賀県海域の環境が2008年以降と2007年以前とでどのように異なるのかを解析することも今後の重要な課題である。

文 献

- 1) 今井一郎. 「シャットネラ赤潮の生物学」生物研究社、東京. 2012.
- 2) 長井 敏. 播磨灘における有害大型珪藻 *Coscinodiscus wailesii* の大量発生機構とその予知. 「有害・有毒赤潮の発生と予知・防除」(石田祐三郎, 本城凡夫, 福代康夫, 今井一郎編) 日本水産資源保護協会、東京. 2000; 71-100.
- 3) 西川哲也. 養殖ノリ色落ち原因珪藻 *Eucampia zodiacus* の大量発生機構に関する生理生態学的研究. 博士論文, 北海道大学, 北海道. 2010.
- 4) 松原 賢. 有明海佐賀県海域におけるノリ漁期の植物プランクトン. 「豊饒の海・有明海の現状と課題」(大嶋雄治編) 恒星社厚生閣、東京. 2012; 9-24.
- 5) 大原 治, 岩滝光儀, 田中昭彦, 石坂丞二, 山砥稔文, 松岡数充. 長崎県形上湾の植物プランクトン種組成と赤潮形成種の増殖環境 (2004-2006). 日本プランクトン学会報 2008; 55: 93-106.
- 6) Yamasaki Y, Nagasoe S, Matsubara T, Shikata T, Shimasaki Y, Oshima Y, Honjo T. Allelopathic interactions between the bacillariophyte *Skeletonema costatum* and the raphidophyte *Heterosigma akashiwo*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2007; 339: 83-92.
- 7) McQuoid MR. Influence of salinity on seasonal germination of resting stages and composition of microplankton on the Swedish west coast. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2005; 289: 151-163.

- 8) 紫加田知幸, 櫻田清成, 城本祐助, 生地 暢, 吉田誠, 大和田紘一. 八代海における植物プランクトンの増殖に与える水温, 塩分および光強度の影響. 日水誌 2010; **76**: 34-45.
- 9) Shikata T, Nagasoe S, Oh SJ, Matsubara T, Yamasaki Y, Shimasaki Y, Oshima Y, Honjo T. Effects of down- and up-shocks from rapid changes of salinity on survival and growth of estuarine phytoplankters. *J. Fac. Agr. Kyushu University*. 2008; **53**: 81-87.
- 10) 小野 哲, 一見和彦, 多田邦尚. ノリ養殖に被害を及ぼす大型珪藻 *Coscinodiscus wailesii* の現存量と沈降速度. 日本海水学会誌 2006; **60**: 253-259.
- 11) 速水祐一. 魚貝類の生息環境としての有明海とその変動特性. 「豊饒の海・有明海の現状と課題」(大嶋雄治編) 恒星社厚生閣, 東京. 2012; 95-106.
- 12) 松原 賢, 首藤俊雄. 有明海佐賀県海域における *Chattonella* 赤潮および貧酸素水塊の動態と各種環境要因との関係 (2009-2011). 佐賀県有明水産振興センター研究報告 (26), 佐賀県有明水産振興センター, 佐賀, 2013; 57-71.
- 13) 門谷 茂. 無(貧)酸素環境下における植物プランクトン群集の応答. 月刊海洋 2005; **37**: 835-841.
- 14) 今井一郎. 有害赤潮の生物学 (20) 赤潮プランクトンの相互関係-1. 海洋と生物 2012; **34**: 160-165.
- 15) Imada N, Kobayashi K, Tahara K, Oshima Y. Production of an autoinhibitor by *Skeletonema costatum* and its effect on the growth of other phytoplankton. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1991; **57**: 2285-2290.
- 16) Hitchcock GL, Smayda TJ. The importance of light in the initiation of the 1972-1973 winter-spring diatom bloom in Narragansett Bay. *Limnol. Oceanogr.* 1977; **22**: 126-131.
- 17) 長副 聡. 渦鞭毛藻 *Gyrodinium instriatum* の赤潮発生機構に関する研究. 博士論文, 九州大学, 福岡. 2006.
- 18) 長副 聡, 島崎洋平, 松原 賢, 紫加田知幸, 山崎康裕, 吉田幸史, 久野勝利, 大嶋雄治, 本城凡夫. 有明海奥部, 塩田川河口海域における物理・化学的要因と植物プランクトンの増殖との関係. 沿岸海洋研究 2009; **46**: 141-151.
- 19) 馬場裕文, 川村嘉広, 山下康夫. ノリ漁場環境とノリ品質からみた漁場の類型化. 佐賀県有明水産試験場研究報告 (12), 佐賀県有明水産試験場, 佐賀. 1990; 75-81.
- 20) 田中勝久, 児玉真史, 熊谷 香, 藤本尚伸. 有明海筑後川河口域における冬季のクロロフィル蛍光と濁度変動. 海の研究 2004; **13**: 163-172.
- 21) Ito Y, Katano T, Fujii N, Koriyama M, Yoshino K, Hayami Y. Decreases in turbidity during neap tides initiate late winter blooms of *Eucampia zodiacus* in a macrotidal embayment. *J. Oceanogr.* 2013; **69**: 467-479.
- 22) 矢持 進. 大阪湾. 「水域の窒素: リン比と水産生物」(吉田陽一編) 恒星社厚生閣, 東京. 1993; 84-95.
- 23) Nishikawa T, Hori Y, Nagai S, Miyahara K, Nakamura Y, Harada K, Tanda M, Manabe T, Tada K. Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35-year period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts* 2010; **33**: 417-427.
- 24) 山田真知子, 徳崎健史. 洞海湾・響灘. 「水域の窒素: リン比と水産生物」(吉田陽一編) 恒星社厚生閣, 東京. 1993; 96-106.
- 25) 山田真知子, 上田直子, 濱田建一郎. 過栄養海域である洞海湾における栄養度の低下とそれに伴う赤潮発生状況の変化. 日水誌 2011; **77**: 647-655.
- 26) 首藤俊雄, 松原 賢, 久野勝利. 有明海の栄養塩環境とノリ養殖. 海洋と生物 2009; **181**: 168-170.

有害珪藻 *Asteroplanus karianus* の有明海佐賀県海域における出現動態と各種環境要因との関係

松原 賢, 横尾一成, 川村嘉応 (佐賀有明水振セ)

ノリの色落ち原因珪藻 *Asteroplanus karianus* の出現動態と環境要因との関係を調べるため, 2007年12月から2012年3月に有明海佐賀県海域で, 植物プランクトン組成および各種環境要因を調査した。また, 高水温および低水温条件下における本種の増殖および発芽特性を室内試験で調べた。その結果, 本種は冬季にのみ赤潮を形成することが確認された。また, 本種の増殖速度は低水温よりも高水温条件下で高いことが確認されたが, 底泥中の休眠期細胞が発芽に要する時間は低水温条件下で短いことが示唆された。 日水誌, 80(2), 222-232 (2014)