

急潮による珪藻類休眠期細胞の発芽と増殖

小泉喜嗣^{*1}・西川 智^{*1}・薬師寺房憲^{*1}・内田卓志^{*2}

Germination of Resting Stage Cells and Growth of Vegetative Cells in Diatoms Caused by *Kyuchō* Events

Yoshitsugu KOIZUMI^{*1}, Satoshi NISHIKAWA^{*1},
Fusanori YAKUSHIJI^{*1} and Takuji UCHIDA^{*2}

Abstract

In order to clarify the mechanism on growth of diatoms induced by *Kyuchō* events, daily observations were undertaken at Shitaba Bay situated in the central part of the Bungo Channel from 1 August to 14 September in 1995. During the investigation, typical *Kyuchō* events (A and B) occurred on 6 August and 16 August, and involved marked changes of water temperature, cell density of diatoms, chlorophyll *a* and nutrient concentrations.

Significant correlations were found between the changes of water temperature and chlorophyll *a* concentrations. After the occurrence of *Kyuchō* A, chlorophyll *a* concentrations, diatom cell density, and nutrient concentrations clearly increased with the abrupt decrease of water temperature. After *Kyuchō* B, the water temperature showed a moderate decrease and the chlorophyll *a* concentrations, diatom cell density, and nutrient concentrations including silicate and nitrite+nitrate remained at low levels.

The densities of diatom resting stage cells ranged from 0.39×10^3 to 1.64×10^4 MPN \cdot g⁻¹ wet sediment at the surface of the bottom sediments (0-3cm) in Shitaba Bay throughout the year. The resting stage cells were mainly composed of *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus* spp., *Thalassiosira* spp. and *Skeletonema costatum*. Results of the laboratory experiments suggested that the resting stage cells require a light intensity of $4.8 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ or more for their active germination. Field observations showed that sufficient light energy for the germination of the resting stage cells occurred at the bottom layer when *Kyuchō* events occurred. At this time, the resting stage cells seemed to have germinated and subsequently, the resultant vegetative cells dominated rapidly utilizing nutrients supplied from outside the bay through the bottom layer water. This event of nutrient supply was closely correlated with the decrease of water temperature after the *Kyuchō* events.

Thus, the population dynamics of diatoms during the summer season in Shitaba Bay are markedly influenced by the *Kyuchō* events and the subsequent intrusions of nutrients-rich cold water from outside the bay. The mechanism of diatom growth induced by *Kyuchō* events in the coastal regions of the Bungo Channel in summer is also discussed.

1997年4月10日受付

1997年6月9日受理

^{*1} 愛媛県水産試験場

Ehime Prefectural Fisheries Experimental Station
Shitaba, Uwajima, Ehime, 798-01, Japan

^{*2} 南西海区水産研究所

Nansei National Fisheries Research Institute
Ohno-cho, Saeki, Hiroshima, 793-04, Japan

1. 緒言

豊後水道東岸の愛媛県海域(通称宇和海)は真珠養殖業並びに魚類養殖業が大規模に営まれており、その生産額は1,000億円を越え、我が国有数の養殖生産基地としての役割を果たしている。この背景には、リアス式海岸に囲まれた数多くの内湾を有する地理的特性の他に、冬季の季節風による吹送流の卓越(武岡,

1990) や夏季の急潮による黒潮起源の暖水塊の侵入 (TAKEOKA and YOSHIMURA, 1988) 等による気象及び海洋学的にも恵まれた海域特性を挙げることができる。

しかし、これまで順調に発展してきた宇和海の養殖業は近年様々な問題に直面している。魚類養殖業では魚病の蔓延等による斃死率の増加 (松岡, 1993), 真珠養殖業においては斃死率の増加や品質の悪化 (真珠新聞社, 1992) が指摘される等、増産体制を維持してきた宇和海の養殖業の将来には暗雲が立ちこめている。中でも1996年に発生したアコヤガイの大量斃死は真珠産業自体の成立さえ危ぶまれる深刻な事態を招きつつあり、愛媛県漁業協同組合連合会のまとめによると、その被害金額は約183億円に達している。この斃死原因については、海域の生産性を越えた養殖量、アコヤガイ自身の弱体化、高水温や餌不足等種々の可能性が指摘されているが、現時点で明確な結論は得られていない。真珠養殖業は海域の生産性に依存した産業であり、アコヤガイの主要な餌となる珪藻類の増減はアコヤガイの成長及び真珠の品質と密接に関連しているものと考えられる。したがって、近年のアコヤガイ斃死率の増加や大量斃死原因の究明のみならず、真珠産業の更なる振興を図る上でも、宇和海における珪藻類の増殖機構を解明することは極めて重要な事項と考えられる。

一般に、海域における植物プランクトンの増殖には物理環境変化が多大な影響を与えることは明らかである。宇和海では、急潮の発生により黒潮起源の高水温の暖水塊が湾内に周期的に侵入し、顕著な海水交換をもたらすこと (小泉, 1991; KAWABATA and SATAKE, 1993) から、急潮はこれまで、真珠養殖業にとって高水温や餌不足等のマイナス面の作用を持つ現象と考えられてきた (武岡, 1990)。ところが、急潮は湾内の植物プランクトンを増殖させる機能を持ち (川端・佐竹, 1992), 夏季の珪藻類増殖機構として重要な役割を果たしていること (小泉・河野, 1994) 等が明らかとなり、最近では寧ろ急潮の持つプラス面の作用が注目されている。

ところで、珪藻類の増殖に関しては、近年その種子としての機能を持つ休眠期細胞 (休眠胞子, 休眠細胞を含む, 以下休眠期細胞) の重要性が指摘され、瀬戸内海における高密度の分布 (矢持, 1989; 今井ほか, 1990) が明らかになるとともに、海域における珪藻類のブルームの起源となっている可能性 (板倉ほか,

1992) も示唆されている。したがって、宇和海における珪藻類増殖機構の詳細を明らかにするためには、急潮の発生に伴う物理・化学環境の変化と休眠期細胞の“種 (タネ)”としての役割を組み合わせる必要がある。

本研究では、宇和海の典型的な養殖漁場である下波湾において、急潮発生前後の珪藻類の消長に着目し、急潮に伴う物理・化学環境の変化と休眠期細胞の発芽条件を含めて詳細に検討した。その結果、急潮の到来で引き起こされる発芽に十分な光の到達によって、底泥に存在する休眠期細胞は速やかに発芽し、その後増殖するための珪藻類の“初期群”として機能している可能性が示唆されたので報告する。

2. 方法

2.1 連続観測

連続観測は下波湾 (Fig. 1) の湾口部に位置する愛媛県水産試験場地先の観測点 (K5; 水深約21m) で、1995年8月1日～同年9月14日の間計45日間実施した。採水層は本湾におけるアコヤガイの養殖垂下層を考慮して3m層とし、毎日定時 (09:00) に透明度を観測するとともに北原式採水器を用いて海水を採取し、海水1ml中の植物プランクトンについて顕微鏡下でSedgwick-Rafter計数スライドを用いて査定、計数した (8月20日のみ欠測)。得られた海水はグラスファイバーフィルター (Whatman GF/F) を用いて濾過し、SUZUKI and ISHIMARU (1990) に従ってクロロフィルa濃度の分析を行った。濾過海水は一旦-30°Cで凍結保存した後、STRICKLAND and PARSONS (1972) に準拠して栄養塩自動分析装置 (TRAACS-800) によりアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$), 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), 硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 磷酸態磷 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 及び溶存態珪素 (Si) の測定を行った。

さらに観測期間中に計17回、クロロフィル鉛直測定装置 (アレック電子 (株) ACL-1151DK) に付属する光量子センサーを用いて表層から底層まで (光量子センサーは観測装置の上部に設置しているため、正確には海底上40cm) 0.1m毎の水中光量子量の測定を行うとともに、水産試験場の屋上で観測を行っている光量子データ (10分インターバル) より日の出から日の入りまでの日平均光量子量を求め、海表面の日平均光量子量を算出した。なお、水中光量子量の鉛直分布観測を行わなかった場合には、以下の方法により海表面の日平均光量子量から海底表面の光量子量を推定し、解

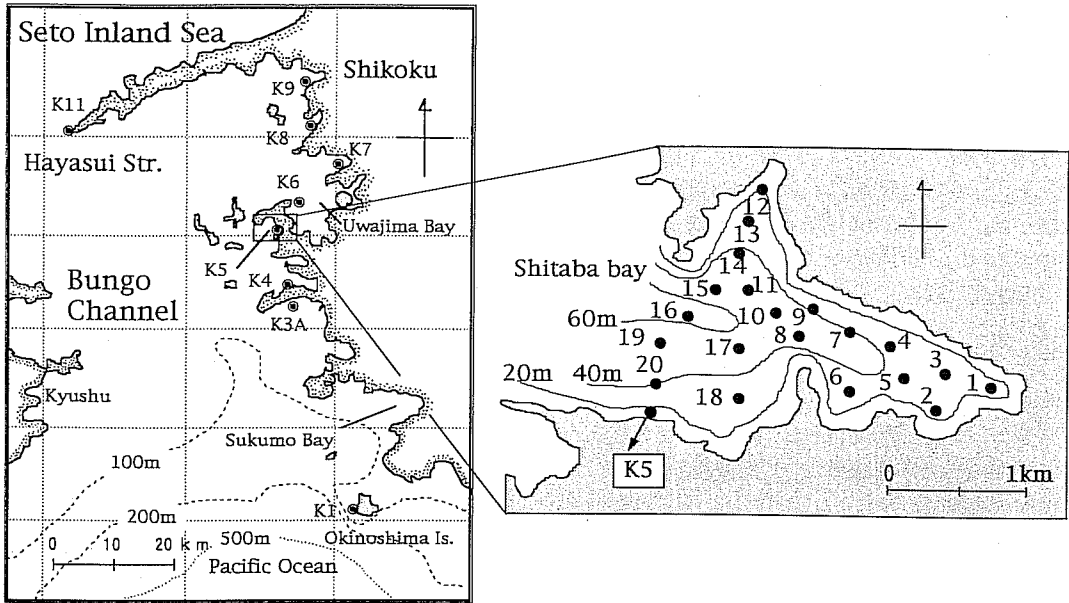


Fig. 1. Location of the monitored stations in the Bungo Channel and Shitaba Bay.

析に使用した。

水中での光の減衰は次式によって表される (有賀・横浜, 1979)。

$$I_d = I_0 \cdot e^{-kd}$$

ここで I_0 は海表面上の光量子量, I_d は水深 d m における光量子量, k は消散係数である。連続観測期間中に実施した17回の水中光量子量の実測値を用いて, 各観測時の消散係数を求めた。さらに, 透明度 D と消散係数 k の間には, 一般に $D \cdot k = \text{一定}$ の関係が期待されることから (有賀・横浜, 1979), 17回の実測値を用いて $D \cdot k = 1.74$ の関係を得, 観測時の透明度から各々の観測日の消散係数を推定した。但し, 本研究では海表面直下 10cm の光量子量を I_0 として消散係数を計算しており, 海表面上の光量子量 I_0 との間で $I_0 = 0.6929 \cdot I_a$ ($r = 0.94$) の関係を得て, 海表面の反射による光の減衰を補正している。以上により, 各観測日の海表面上の日平均光量子量と透明度の値から観測地点 K5 における海底表面 (水深 21m) の日平均光量子量を求めた。なお, 水中光量子量を測定した場合でも, 最深部の光量子量は海底上 40cm の値であるので, 上記と同様に海底表面の光量子量を推定して解析に使用している。また, 本研究では海底直上層における光量子量は急激に減衰しないと仮定した。

水温は宇和海沿岸の 9 観測点 (K1~K11) の 5 m 層

及び K5 の 3 m 層 (Fig.1, right) に設置したメモリー式水温計 (アレック電子 (株) AT-32K) の観測記録 (30分インターバル) から, 日平均水温を求めて解析に使用した。

2.2 休眠期細胞の分布調査

下波湾における珪藻類の休眠期細胞の計数は, 1995年10月2日, 1996年2月28日, 5月2日, 8月28日に内径12mmの小型コーサンプラー ((株) 離合社) を用いて下波湾内の20定点 (Fig.1) より表層泥 (0-3cm) を採取し, 11°C暗黒下に少なくとも2週間程度保存した後, MPN法 (IMAI *et al.*, 1984) を用いて実施した。培養は昼白色蛍光灯による約 $60 \mu E \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$, 14L : 10Dの光条件, 温度22°Cに設定した恒温器で5日間行い, 培養開始6日後に倒立顕微鏡下で栄養細胞出現の有無を確認した。なお, MPN法実施の際に観察される栄養細胞は *Chaetoceros* spp., *Lep-tyocylindrus* spp., *Thalassiosira* spp., *Skeletonema costatum* の4分類群が圧倒的に優占していたので, 本研究ではこれら4分類群を対象として休眠期細胞の計数を実施し, 密度の単位には最確数 (MPN $\cdot g^{-1}$ wet sediment) を用いた。

2.3 休眠期細胞の発芽実験

休眠期細胞の発芽に与える光条件の影響は, 1995年

8月1日に Stn. 13 (Fig. 1) より採取した表層泥を用いて、今井 (1992) 及び IMAI *et al.* (1996) に準じたシリンダー培養 (6 条件) によって実施した。すなわち、表層泥 0.5g を滅菌した改変SWM-III培養液 (伊藤・今井, 1987) の100mlに懸濁させ、100ml 容のメスシリンダー 6 本に収容した後、22°Cの暗黒下に12時間放置した。その後10mlの培養液を加え、昼白色蛍光灯による14L:10Dの光サイクル、22°Cの条件に設定した恒温器に収容した。また、シリンダーの表層は $110 \mu E \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ の光条件とし、シリンダーの側面をアルミホイル等で覆い、シリンダー底面の光条件を $0, 1.3, 4.8, 13.6, 33.8, 52.4 \mu E \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ の 6 条件に調整した。栄養細胞の計数は、シリンダーの表層から採取した10mlの培養液について顕微鏡下で行った。この操作は培養開始翌日より毎日1回、明期の終わりに9日間継続して行い、培養液の採取毎に同量の滅菌培養液を補給した。

3. 結果及び考察

3.1 急潮の発生状況

宇和海沿岸域に設置した観測定点、K1~K11 (Fig. 1) における日平均水温について、急潮の発生時期 (TAKEOKA and YOSHIMURA, 1988) を考慮した5月から10月の間の推移をFig. 2に示した。期間中に急潮と呼ぶべき水温の急変現象は7月20日、8月6日、8月19日、及び9月20日前後の計4回発生した。また、その水温上昇は南部の定点から徐々に北部の定点へ伝播していることが明瞭で、急潮の発生に伴う黒潮起源の暖水塊は宇和海の南部海域から北部海域へと侵入していったことが判る。これらの急潮の内、8月に発生した2度の急潮に伴う水温上昇は数日の間に5°Cを超えるものであり、その影響は三崎半島先端の観測定点 (K11) にまで及んでいたと思われ、1995年に観測された急潮のなかでは最も大規模な急潮と判断される。なお、以下に述べる下波湾における連続観測はこの2回の急潮を含んだ8月1日から9月14日の間に実施している。

3.2 植物プランクトンの推移

下波湾の観測定点K5 (3 m層) における日平均水温及びクロロフィルa濃度の推移をFig. 3に示した。前述したように、急潮は調査期間中に2回発生し、8月6日に発生した急潮 (以下急潮A) では、8月8日に27.4°Cまで水温が上昇し、昇温幅は約5°Cであった。

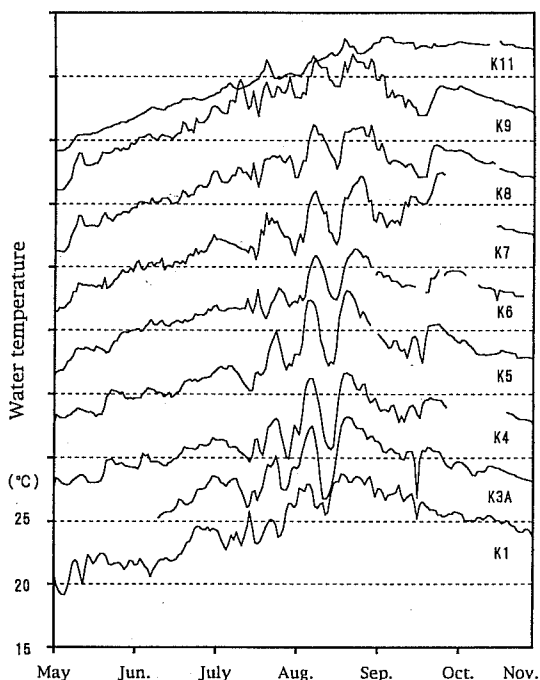


Fig. 2. Water temperature at 5m depth from May to October for stations K1 to K11 (east coast of the Bungo Channel; Fig. 1). The ordinate scale is for Stn. K1 and for subsequent stations the scale is shifted 5°C upward, respectively.

8月16日に発生した急潮 (以下急潮B) では、8月22日に28.0°Cまで水温が上昇し、昇温幅は急潮Aより大きく6°Cを越えていた。急潮Aではその後8月10日から急激に水温が低下し始め、8月16日には21.4°Cとなり、6°Cを越える水温低下が観測された。一方、急潮Bではその後の水温低下が急潮Aと比較して顕著ではなく、9月13日まで徐々に低下していった。急潮後の水温低下も急潮に伴う一連の現象として考える (小泉, 1991) ならば、両者の急潮の最も大きな違いは、急潮後の水温低下が急潮Aでは顕著であり、急潮Bでは緩やかであった点である。

急潮A、Bともに、水温上昇時には一旦クロロフィルa濃度が $1 \mu g \cdot l^{-1}$ 以下まで低下しており、急潮に伴って湾内に侵入した暖水塊は植物プランクトン量の貧弱な海水であったことは明らかである。急潮Aでは水温上昇が緩やかになった8月7日から9日にかけてクロロフィルa濃度の増加が認められたが、水温の低下とともにクロロフィルa濃度は減少した。しかし、8月12日からクロロフィルa濃度は急激に増加し、8

急潮による珪藻類の増殖機構

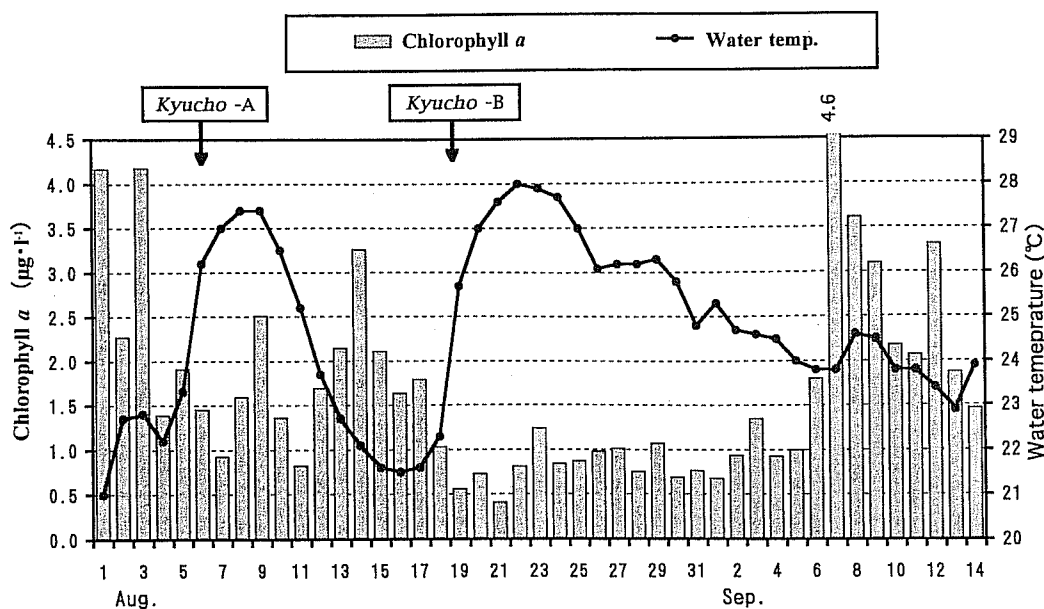


Fig. 3. Changes in water temperature and chlorophyll *a* concentrations at 3m depth at Stn. K5 from 1 August to 14 September in 1995.

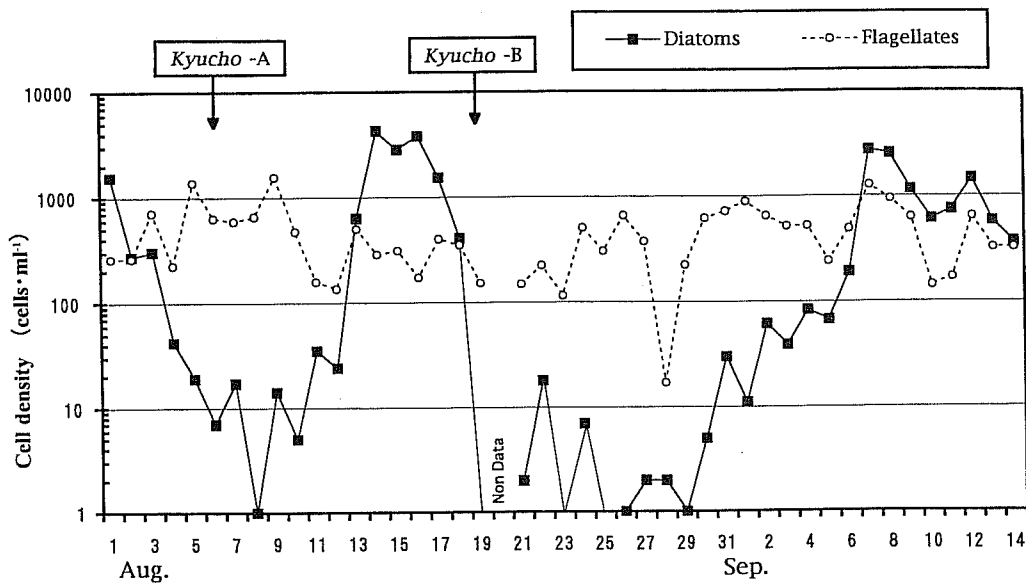


Fig. 4. Changes in cell density of diatoms and flagellates at 3m depth at Stn. K5 from 1 August to 14 September in 1995.

月14日には $3 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ を越える値が観測された。一方、急潮Bでは、クロロフィル *a* 濃度は9月5日までの間 $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後で推移し、急潮Aのような急潮後のクロロフィル *a* 濃度の急激な変化は認められなかったが、9月6日から急速に増加して9月7日には $4.6 \mu\text{g} \cdot$

l^{-1} の値が観測された。従って、水温変化と同様、この急潮後のクロロフィル *a* 濃度の変動も、両者の急潮の間で大きく異なっていた。

この間の植物プランクトンの変化を、珪藻類と鞭毛藻類の細胞密度（以下密度）に大別してFig.4に示し

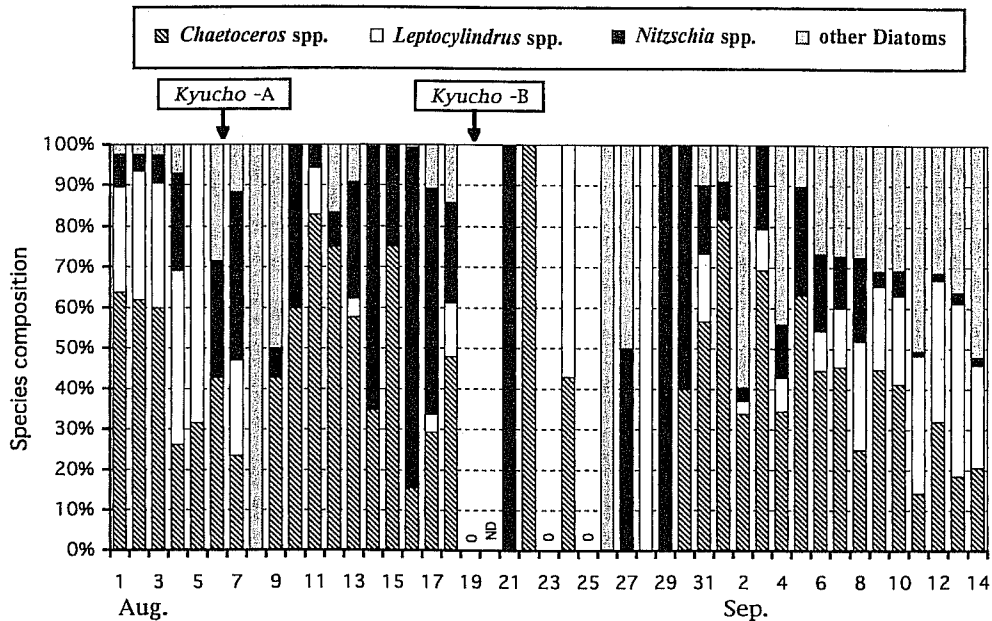


Fig. 5. Changes in diatom species composition at 3m depth at Stn. K5 from 1 August to 14 September in 1995.

た。珪藻類は観測期間中に $1 \text{ cell} \cdot \text{ml}^{-1}$ 以下から $4.30 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ の間で大きく変化した。急潮Aでは8月8日に $1 \text{ cell} \cdot \text{ml}^{-1}$ まで低下した後、急速に増加し、8月14日には $4.30 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ に達した。急潮Bでは発生直後の8月19日には珪藻類は 1 ml レベルでは確認できなくなり、その後も8月29日まで顕著な増殖を示すことなく低い密度で推移した。しかし、8月30日以降、珪藻類は増殖を開始し、9月7日に $2.77 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ に達した。一方、鞭毛藻類は急潮の発生に伴う暖水塊の侵入によって密度はやや低下する傾向はあるものの8月5日、8月9日及び9月7日に $10^3 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ を越える密度が観察されたのを除外すれば、いずれも $10^2 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ レベルで推移し、珪藻類のような顕著な密度変化は認められなかった。珪藻類の密度変化は前述したクロロフィルa濃度の変化 (Fig. 3) とよく一致しており、観測期間中のクロロフィルa濃度の増減は主として珪藻類の密度の変化によるものと考えられた。

観察された珪藻類は *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus* spp., *Nitzschia* spp. *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* spp. 等であり、*Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus* spp., *Nitzschia* spp. の3分類群が優占していた (Fig. 5)。また、急潮Aで珪藻類の密度が増

加傾向に転じた8月9日から11日の間や、急潮Bで密度が増加し始めた8月30日から9月1日の間は (Fig. 4), いずれも *Chaetoceros* spp. が優占していることが特徴であった。

3.3 栄養塩

下波湾 (Fig. 1) の観測地点 K5 (3m層) における栄養塩濃度の推移を Fig. 6 に示した。なお、ここでは示さないが、調査期間中の塩分濃度に大きな変化はなく、栄養塩類の変動は降雨の影響を受けていないと考えられる。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は植物プランクトン量の増加 (Fig. 3, 4) に伴う栄養塩類消費の影響を受けたと思われる8月12日以降や、9月7日以降の値を除いて、急潮に伴う水温変化やクロロフィルa濃度 (Fig. 3) との間で特定の関係が認められなかった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度も9月6日まで変動しつつも斬増傾向を示し、9月7日の植物プランクトン量の急激な増加 (Fig. 3) による栄養塩類消費の影響で著しく低い値が観測された以外は $\text{NH}_4\text{-N}$ と同様、水温変化やクロロフィルa濃度の変化との間に特定の関係を見出すことができなかった。 $\text{NH}_4\text{-N}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$ は湾内で営まれている魚類養殖の影響を強く受けることが推測されるため、このような変

急潮による珪藻類の増殖機構

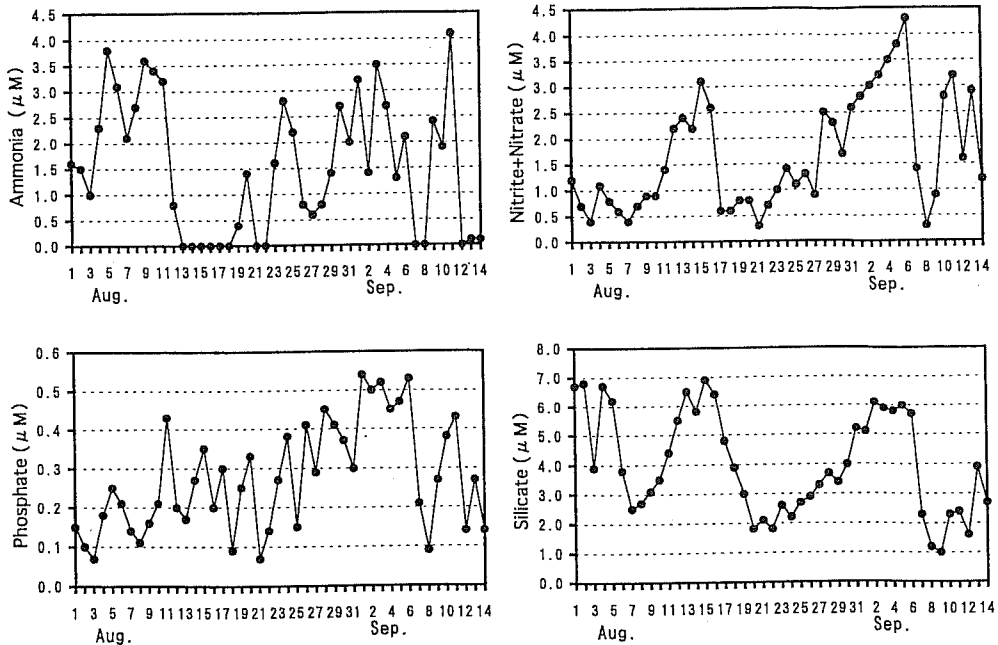


Fig. 6. Changes in nutrient concentrations at 3m depth at Stn. K5 from 1 August to 14 September in 1995.

化を示すものと思われる。一方、 $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ 及び Si 濃度は極めて似通った変動を示していた。その濃度変化は水温変化 (Fig. 3) と負の対応関係を示し、水温の上昇によって栄養塩濃度は低下し、水温の下降に伴って増加していた。急潮後の水温低下は湾外起源の低温水の侵入によると考えられるので (小泉, 1991), $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び Si 濃度の増加は高濃度の栄養塩類を含んだ低温水が湾内に侵入した結果と判断される。

ところで、前述のように連続観測期間中に発生した急潮A及び急潮Bでは、その後の珪藻類の増殖に極めて大きな違いが認められている。急潮Aでは急潮後の水温低下が顕著で (Fig. 3), 栄養塩濃度も急速に増加し (Fig. 6), クロロフィルa濃度や珪藻類の密度は急激に増加している (Fig. 3, 4)。一方、急潮Bでは、水温低下が急潮Aと比較して顕著でなく (Fig. 3), 栄養塩濃度の増加も緩やかであり (Fig. 6), クロロフィルa濃度や珪藻類の密度は長期間低いレベルで推移している。急潮後の水温低下に伴う湾外起源の栄養塩類の供給は湾内の珪藻プランクトンの増殖機構の一つとして重要な役割を果たしている (小泉・河野, 1994)。従って、観測された急潮A及び急潮Bに伴う急潮後の水温低下の違い、すなわち栄養塩類供給の違いはクロロフィルa濃度の増加、なかでも珪藻類の増殖に大き

な影響を与えたものと考えられる。つまり、急潮Aの後に観測された珪藻類の急激な増加は低温水の侵入に伴う湾外起源の栄養塩供給機構が順調に機能した結果であり、急潮Bでは、その供給機構が十分機能しなかったためと推測される。このことは、急潮後の珪藻類の増殖はその他の制限要因が無い場合、栄養塩濃度によって制限されている可能性を示唆するものである。

角皆 (1979) によれば噴火湾の珪藻類の制限因子としての溶存態珪素の濃度は $5\text{-}10 \mu\text{M}$ 前後であるという。下波湾も、珪藻類の密度変化と最も顕著な対応関係にある栄養塩類は Si である (小泉・河野, 1994)。本観測においても、珪藻類の密度が増加傾向に転じた時点 (急潮Aでは8月9日～8月11日の間、急潮Bでは8月30日～9月1日の間) で、Si 濃度が増加している (Fig. 6)。従って、下波湾においても噴火湾と同様、珪藻類の増殖に Si が栄養塩類の中で第1制限因子として機能している可能性がある。

3.4 休眠期細胞の水平分布

下波湾における20定点 (Fig. 1) の珪藻類休眠期細胞の水平分布を Fig. 7 に、平均細胞密度及び組成変化を Fig. 8 に示した。下波湾の休眠期細胞密度は1995年10月が $0.39 \times 10^3 \sim 9.23 \times 10^4 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1} \text{ wet sediment}$,

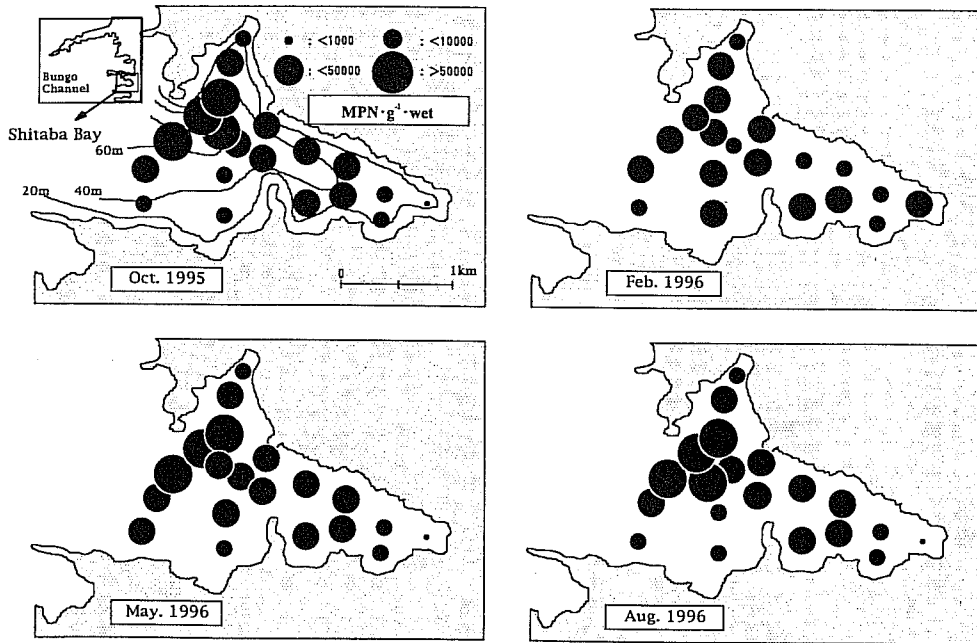


Fig. 7. Density of diatom resting stage cells in bottom sediments at Shitaba Bay enumerated by the extinction dilution method.

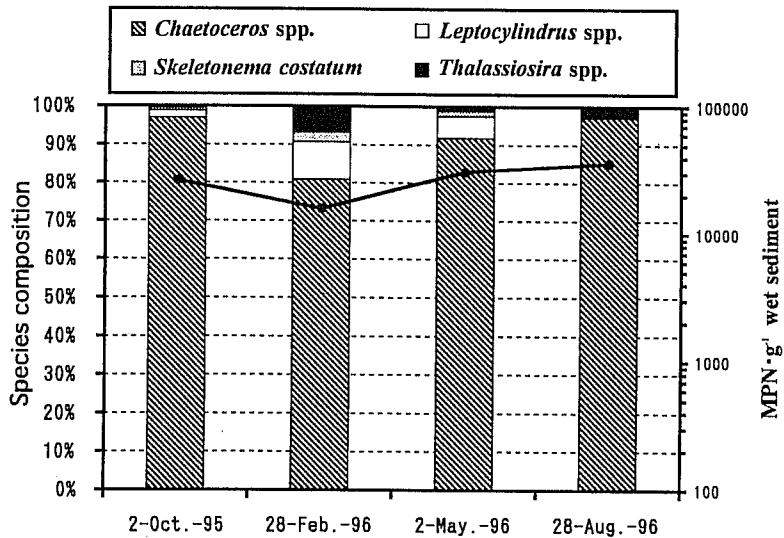


Fig. 8. Species composition and density of diatom resting stage cells. Mean values for the 20 stations (Fig. 1, right) in Shitaba Bay.

1996年2月が $2.50 \times 10^3 \sim 4.45 \times 10^4$ MPN \cdot g $^{-1}$ wet sediment, 同年5月が $0.89 \times 10^3 \sim 9.66 \times 10^4$ MPN \cdot g $^{-1}$ wet sediment, 同年8月が $3.39 \times 10^3 \sim 1.64 \times 10^5$ MPN \cdot g $^{-1}$ wet sedimentの範囲にあった。平均密度はそれぞれ 2.62×10^4 , 1.57×10^4 , 3.10×10^4 , 3.62×10^4 MPN \cdot

g $^{-1}$ wet sedimentであり、冬季にやや密度は低下するものの、周年にわたって 10^4 MPN \cdot g $^{-1}$ wet sedimentを越える密度で存在していた。水平分布の特徴は冬季の結果を除いて、その密度は湾中央部で高く、沿岸部で低い傾向にあった。下波湾における表層泥の

粒度組成は湾中央部で小さいこと(愛媛県水産試験場, 1995)から, 休眠期細胞は冬季を除いて, 湾内底泥の粒度組成に対応した水平分布を呈する傾向にあった。

休眠期細胞の組成比は *Chaetoceros* spp. が 80.9–97.2% (平均91.8%), *Leptocylin-drus* spp. が 0.5–9.8% (平均4.4%), *Skeletonema costatum* が 0.6–2.6% (平均1.3%), *Thalassiosira* spp. が 0.5–6.7% (平均2.5%) であった。特に *Chaetoceros* spp. は冬季に 80.9% とその比率をやや低下させる以外はいずれも 90% を越えており, 下波湾の底泥では *Chaetoceros* spp. の休眠期細胞が周年にわたり, 極めて高い組成比で存在していた。

ところで, 珪藻類の優占種から, 海域の環境条件を区分することが可能とされている(飯塚, 1976; 山田ほか, 1980)。その区分に従えば, 夏季に *Chaetoceros* spp. が優占する下波湾 (Fig. 5) は *Chaetoceros* 型, すなわち貧栄養の外洋的性格の強い湾として分類され, 急潮による黒潮起源の外洋水の影響を受ける下波湾の物理環境条件と良く一致している。さらに, 下波湾底泥中の休眠期細胞は周年を通じて *Chaetoceros* spp. が優占しており (Fig. 9), 海底泥中に存在する休眠期細胞の組成を検討することによってその海域の環境条件を区分できる可能性(板倉・内田, 1995)もある。

3.5 休眠期細胞の発芽・増殖に及ぼす光条件の影響

休眠期細胞の発芽・増殖に必要な光条件の検討結果を Fig. 9 に示した。なお, 供試泥の休眠期細胞密度は 3.53×10^4 MPN \cdot g⁻¹ wet sediment であった。また, その組成は *Chaetoceros* spp. が 3.50×10^4 , *Leptocylin-drus* spp. が 1.40×10^2 , *Skeletonema costatum* が 1.70×10^2 MPN \cdot g⁻¹ wet sediment であり *Chaetoceros* spp. が休眠期細胞中の 99% を占めていた。さらに, 発芽後に増殖した珪藻類も休眠期細胞の組成と同様に *Chaetoceros* spp. が圧倒的に優占しており, 珪藻類の密度変化はほぼ *Chaetoceros* spp. の密度変化に一致していた。

珪藻類は試験開始後 2 日目に 13.6 及び $33.8 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 区で, 3 日目に 4.8 及び $52.4 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 区で観察され, $13.6 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上の光条件区では 10^4 cells \cdot ml⁻¹ 以上に増殖した。また, $4.8 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上の光条件区では, いずれも珪藻類が鞭毛藻類と比較して一時的ではあるが卓越することが確認された。また, $1.3 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 区では 6 日目に 11 cells \cdot ml⁻¹ が確認された以外には珪藻類の栄養細胞

は観察されず, 暗区では全く認められなかった。これらのことから, 下波湾における珪藻類の休眠期細胞は $1.3 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上の光条件で発芽し浮上がることが可能であると思われた。しかし, $1.3 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 区では上述したように 6 日目にのみ珪藻類の栄養細胞が確認されたに過ぎず, 珪藻類が鞭毛藻類より卓越することはなかった。従って, 珪藻類の休眠期細胞が発芽後に浮上して増殖し, 一時的にせよ鞭毛藻類を上回る密度になるためには, $4.8 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ あるいはそれ以上の光条件が必要と考えられる。これらの結果はこれまで報告されている珪藻類休眠期細胞の発芽・増殖に必要な光条件 (HOLLIBAUGH *et al.*, 1981; 今井, 1991; IMAI *et al.*, 1996; 板倉, 1995) とほぼ同様であった。

ところで, 珪藻類休眠期細胞の発芽は, 光条件以外に水温の影響も考慮する必要がある (HARGRAVES and FRENCH, 1983)。この点に関して, 今井 (1991) は 15°C 以上であれば水温は休眠期細胞の発芽にとって制限要因とはならないことを指摘している。宇和海沿岸域の夏季の底層水温が 15°C を下回る可能性は低いので, 水温を制限要因として考慮する必要はないと考えられる。

なお, 鞭毛藻類は暗区を含む全ての光条件区で 10^3 cells \cdot ml⁻¹ を越える遊泳細胞が確認され, その多くは査定困難な微小鞭毛藻類であった。今井 (1994) は鞭毛藻類の *Chattonella* 属や *Heterosigma akashiwo* 等のシストの発芽に光は殆ど不必要であると報告している。

3.6 光量子量の変化

海表面の光量子量及び観測定点 K5 における透明度の推移を Fig. 10 (A) に, 海底表面の日平均光量子量の日変化を Fig. 10 (B) に示した。

期間中の透明度は $4.5 \sim 14.5\text{m}$ (平均 9.1m) の間で推移し, 急潮 A と急潮 B の発生に伴う暖水塊の侵入によって, それぞれ 8 月 11 日に 13.5m , 8 月 19 日に 14.5m にまで回復した。急潮 A の後にはクロロフィル *a* 濃度の増加 (Fig. 3) とともに透明度は急速に低下し, 8 月 13 日には 4.5m となった。急潮 B の後にはクロロフィル *a* 濃度の急激な増加が認められなかったため (Fig. 3), 透明度も長期間に渡って 10m を越える値で推移したが, 9 月 6 日以降のクロロフィル *a* 濃度の増加によって 9 月 8 日には 6.0m まで低下した。海表面上の光量子量は $340 \sim 1437 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ (平均 $1052 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)

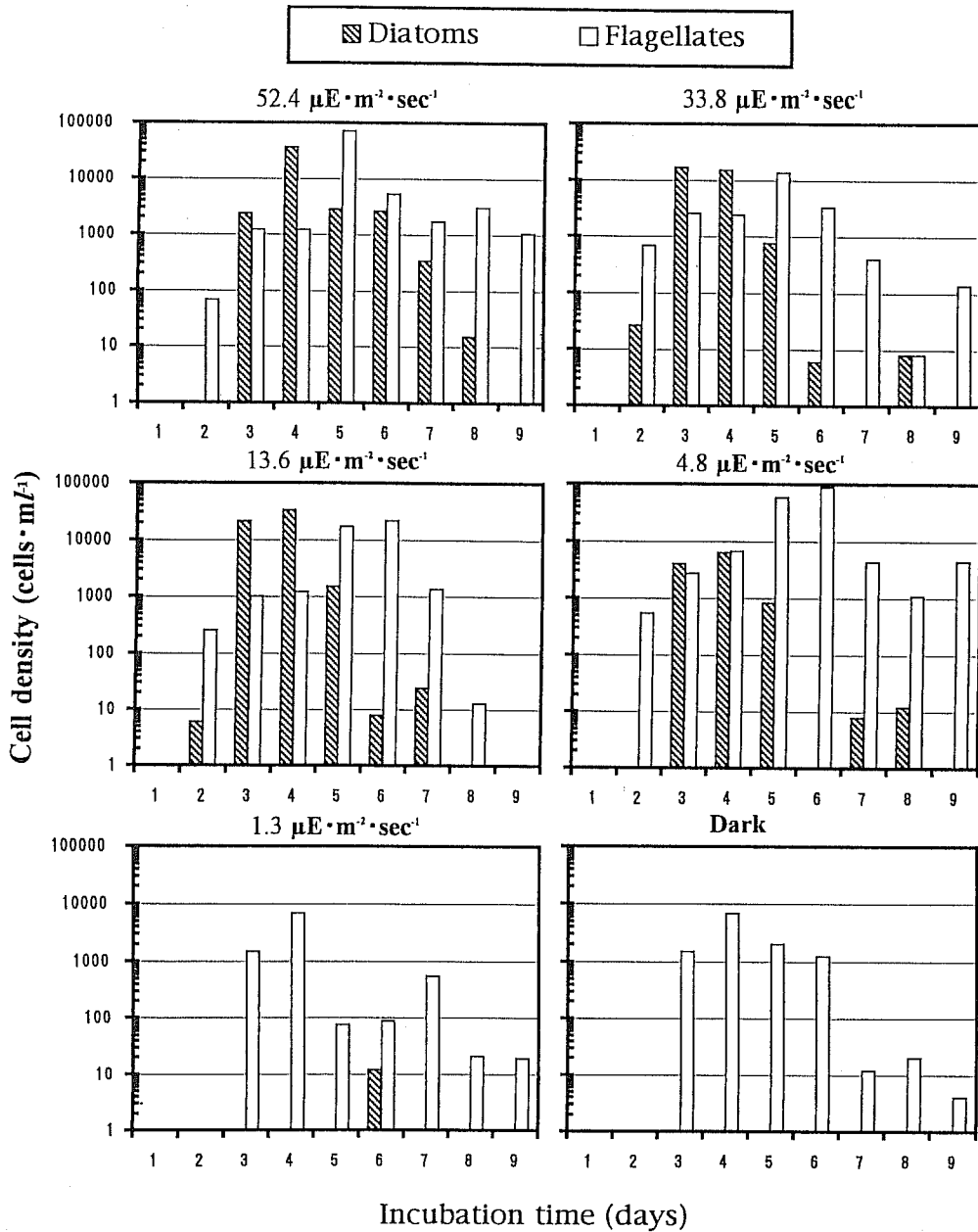


Fig. 9. Changes in the abundance of vegetative cells of diatoms and flagellates germinated and ascended from bottom sediments to the surface layer in cylindrical culture vessels. The sediments placed at the bottom of vessels were cultured under different conditions after the method by IMAI *et al.* (1996). The sediments were collected at Stn. 13 in Shitaba Bay (see Fig. 1)

sec⁻¹) の間で推移し、観測日の天候による影響を受けているものと思われた。また、海底表面の日平均光量子量は0.2~69.9 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ (平均17.7 $\mu\text{E} \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$) で推移し、海表面上の光量子量と透明度の変動によって海底表面の光条件は観測日ごとに大きく変化していた。特に、急潮A直後の8月11日には

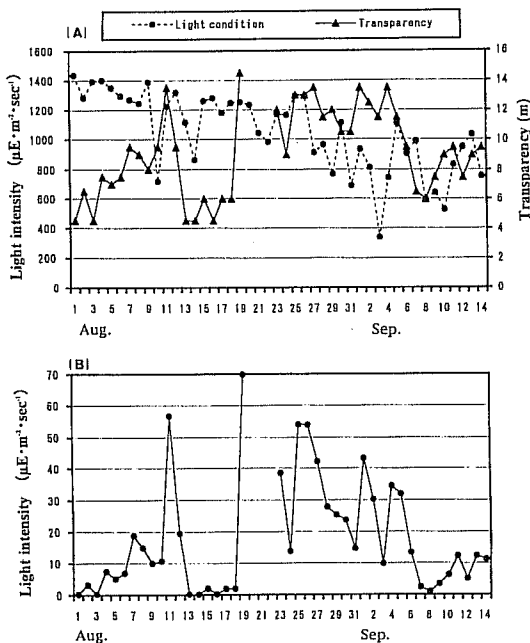


Fig. 10. Changes in light intensity of the sea surface and transparency (upper pannel), and light intensity of the bottom layer (lower pannel) at Stn. K5 from 1 August to 14 September in 1995.

56.7 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$, 急潮B直後の8月19日には69.9 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ の光量子が海底表面に到達したものと推定された。これは、透明度の増加に伴う消散係数の低下によるもので、急潮の発生によって湾内に侵入した黒潮起源の暖水塊がプランクトン量の貧弱且つ透明な海水であったことを示している。更に、前述した透明度の変動と同様、クロロフィルaや珪藻類の密度が増加した場合 (Fig. 3, 4), 海底表面にはごくわずかな光が到達するに過ぎなかった。

さて、前節で明らかになったように、休眠期細胞の活発な発芽と増殖に必要な光条件は4.8 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ あるいはそれ以上と考えられる (Fig. 9)。期間中の海底表面の光量子量の推移を見ると (Fig. 10 (B)), 急潮Aによって海底表面には休眠期細胞が発芽し、高密度に増殖するために必要な光条件が満たされたことが判る。急潮Aの場合に、急潮後に *Chaetoceros* spp. を主体とする珪藻類が増殖し (Fig. 4, 5), 下波湾の休眠期細胞の組成も *Chaetoceros* spp. が優占していること (Fig. 8) から、休眠期細胞の発芽と発芽した細胞が増殖の“初期群”としての役割を果たして

いる可能性は十分考えられる。一方、急潮Bでは海底表面の光量子量は急潮Aよりも高い値で長期間推移しており、増殖の“初期群”としての細胞の供給は急潮Aよりも多かったものと推測されるが、珪藻類は栄養塩濃度が回復するまで増殖しなかった (Fig. 4, 6)。従って、急潮後の珪藻類の増殖には、休眠期細胞の発芽と栄養塩類の供給という2つの機構が併行して生じる必要があるものと考えられる。

ところで、下波湾底泥中の珪藻類休眠期細胞は湾中央部 (水深40~60m) に高密度に分布しており (Fig. 7), 珪藻類の“種場”は沿岸部よりは寧ろ中央部にあると推測される。下波湾では急潮発生時に20m以上の透明度が観測されることもあるので、8月1日に観測された海表面上の光量子量1437 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ と透明度20mを用いて、海底表面に到達する光量子量の推定を試みた。計算された値は50m層で12.9 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$, 60m層で5.4 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ となり、観測地点K5のような沿岸部のみならず、湾中央部においても急潮の発生によって海底表面上に発芽に十分な光量子量が到達するものと推測される。従って、急潮の規模や侵入する暖水塊の透明度に左右されることはあるにせよ、湾中央部の高密度に分布している休眠期細胞についても、珪藻類増殖の“初期群”としての役割を果たす可能性は十分考えられる。

一方、急潮後の珪藻類増殖の“初期群”としては底泥の休眠期細胞以外の可能性も考慮すべきと思われる。例えば、急潮発生以前に湾内で増殖していた栄養細胞が急潮後も持ち越されている可能性や湾内に侵入する水塊 (暖水塊及び低温水を含む) が栄養細胞を供給している可能性である。更に、急潮による底泥の攪拌 (川端・佐竹, 1992) は底泥の巻き上がりによる休眠期細胞の発芽を促進しているとも考えられる。残念ながら、本研究ではこれらの点に関する検討は行っておらず、また珪藻類休眠期細胞と湾内で増殖する珪藻類との関係についても属レベルでの解析に留まっている。今後はこれらの点に関するより詳細な検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、宇和海における珪藻類の消長と急潮に伴う物理・化学環境の変化との関係を休眠期細胞の発芽に必要な光条件及び増殖に必要な栄養塩類供給機構の面から検討した。

観測期間中に2回の大規模な急潮 (急潮A, 急潮B)

が発生し (Fig. 2), 両者の急潮では, 急潮後の水温低下やクロロフィル *a* 濃度並びに珪藻類の密度変化パターンが大きく異なっていた (Fig. 3, 4, 5)。急潮後の水温低下と $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ 濃度及び Si 濃度の上昇との間には対応関係が認められ (Fig. 3, Fig. 6), 急潮後の湾外起源の栄養塩類に富む低温水が底層より湾内に供給されることによって湾内の栄養塩濃度が増加するものと思われた。急潮 A, B 両者の急潮後の珪藻類の密度変化の違い (Fig. 4) は, 急潮後に湾外より供給される栄養塩濃度の違いによるものと思われた。

一方, 下波湾の底泥には周年を通じて *Chaetoceros* spp. を主体とした珪藻類休眠期細胞が高密度に存在していた (Fig. 7, 8)。珪藻類休眠期細胞の発芽に与える光条件の影響を検討したところ, 発芽に必要な光条件は $1.3 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上であり, その後の十分な増殖のためには $4.8 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ あるいはそれ以上の光条件が必要と思われた (Fig. 9)。連続観測期間中の海底表面の光量子量の推移から, 急潮に伴う暖水塊の侵入によって透明度が増加し, 海底表面には休眠期細胞が発芽し, 増殖するために必要な光条件が満たされることが判った (Fig. 10)。すなわち, 急潮による透明度の高い暖水塊が湾内へ侵入することにより, 海底表面の光量子量が増加し, 湾内底泥に高密度に存在する休眠期細胞は速やかに発芽, 浮上して, 急潮後の珪藻類増殖の“初期群”としての役割を果たしている可能性が示唆された。また, 急潮後の珪藻類の増殖は湾外起源の栄養塩類の供給に依存しており, 休眠期細胞から発芽した珪藻類の“初期群”(栄養細胞群)が急潮後の低温水の侵入に伴って湾内に供給される栄養塩類を利用して速やかに増殖するものと思われた。

これらのことから, 流入河川が少なく, 夏季の降水量が少ない宇和海の沿岸域においては, アコヤガイの主要な餌となる珪藻類の増殖は, 急潮の発生とその後の低温水の侵入という 2 つの機構が効果的に機能することによって維持されているものと思われた。また, 急潮の発生及び低温水の侵入を急潮という一連の現象として考える (小泉, 1991) ならば, 急潮は宇和海における夏季珪藻類の一連の増殖機構の中で最も重要な役割を果たす物理現象であると言える。

ところで近年, 宇和海における急潮の発生は減少傾向にある (武岡, 私信)。急潮の発生頻度の減少は本研究で明らかになった珪藻類の増殖機構が沿岸域において十分機能していないことを示唆するものであり, 近年のアコヤガイの斃死率の増加 (真珠新聞社,

1992) や 1996 年の大量斃死に急潮の発生状況が関わっている可能性は十分考えられる。また, 1994 年に宇和海湾周辺で長期間発生し, 多大な漁業被害を与えた *Gonyaulax polygramma* 赤潮においても, その発生原因の一つに急潮の非発生が指摘されており (小泉ほか, 1996), 急潮が宇和海沿岸の養殖漁業にとって欠くことのできない極めて重要な物理現象であることを, これまで以上に強く認識すべきであろう。今後はこのような視点に基づいて, 宇和海の養殖業が抱える諸問題に取り組む必要がある。

謝 辞

本稿を取りまとめるに当たり, 東京大学海洋研究所杉本隆成博士に適切な指摘を賜り, 深く感謝します。また, 本研究を遂行する際に, 主として物理的視点から様々なご指導を頂いた愛媛大学工学部武岡英隆博士, 並びに沖の島 (K1) の水温観測値の使用を快諾して頂いた愛媛大学工学部秋山秀樹博士 (現弓削船舶高専) に対し謝意を表します。

九州大学農学部本城凡夫博士には, 本研究を実施する際の基礎となる種々の植物プランクトン増殖機構に関する研究例を教示して頂き, 厚く御礼申し上げます。

調査に際し, 様々な便宜を図って頂いた愛媛県水産試験場開発室の澤田茂樹開発室長 (現中予水産試験場増殖室長) 及び分析試料の前処理を行って頂いた, 同泉元千代喜, 浅井早美, 村田妙子さんに深く感謝致します。

引用文献

- 有賀祐勝・横浜康継 (1979) 西沢一俊・千原光雄編, 藻類研究法, 第 1 版, 共立出版, 東京, 436-441.
- 愛媛県水産試験場 (1995) 平成 6 年度魚類養殖対策調査委託事業報告書. (社) 全国かん水養魚協会, 神戸, 93-133.
- HARGRAVES, P.E. and F.W. FRENCH (1983) Diatom resting spores: significance and strategies. In: Survival Strategies of the Algae, ed. G.A. FRYXELL, Cambridge Univ. Press, 49-68.
- HOLLIBAUGH, J.T., D.L.R. SEIBERT and W.H. THOMAS (1981) Observations on the survival and germination of resting spores of three *Chaetoceros* (Bacillariophyceae) species. *J. Phycol.* 17, 1-9.
- 飯塚昭二 (1976) 大村湾における汚染の進行と赤潮プランクトンの変遷. *日本プランクトン学会報*, 23, 31-43.
- 今井一郎 (1991) 珪藻類休眠細胞の休眠および発芽と環境要因 - II -. 有害赤潮の生態学的防御による被害防除技術の開発に関する研究, 平成 2 年度研究報告書, 南海海区水産研究所, 31-41.

- 今井一郎 (1992) 珪藻類休眠細胞の休眠および発芽と環境要因-Ⅲ-, 有害赤潮の生態学的防御による被害防除技術の開発に関する研究, 平成3年度研究報告書, 南西海区水産研究所, 35-45.
- 今井一郎 (1994) 珪藻類休眠期細胞と赤潮鞭毛藻シストの生理生態学的特徴. 有害赤潮の生態学的防御による被害防除技術の開発に関する研究, 5ヶ年の研究報告書, 南西海区水産研究所, 35-51.
- 今井一郎・板倉 茂・伊藤克彦 (1990) 播磨灘および北部広島湾の海底泥中における珪藻類の休眠細胞の分布. 沿岸海洋研究ノート, 28, 75-84.
- IMAI, I., S. ITAKURA, M. YAMAGUCHI and T. HONJO (1996) Selective germination of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) cysts in bottom sediments under low light conditions: A possible mechanism of red tide initiation, *In* Harmful and Toxic Algal Blooms, eds. T., YASUMOTO Y. OSHIMA and Y. FUKUYO, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO 1996.
- IMAI, I., K. ITOH and M. ANRAKU (1984) Extinction dilution method for enumeration of dormant cells of red tide organisms in marine sediments, *Bull. Plankton Soc. Japan*, 31, 123-124.
- 板倉 茂 (1995) 浮遊珪藻類休眠期細胞の生態戦略. 月刊海洋, 27, 575-581.
- 板倉 茂・今井一郎・伊藤克彦 (1992) 海底泥中から見出された珪藻 *Skeletonema costatum* 休眠細胞の形態と復活過程. 日本プランクトン学会報, 38, 135-145.
- 板倉 茂・内田卓志 (1995) 英虞湾海底泥中における珪藻類休眠期細胞の分布密度と優占種. 渦鞭毛藻・ラフィド藻等新型赤潮の発生機構と予測技術の開発に関する研究, 平成6年度研究報告書, 南西海区水産研究所, 13-17.
- 伊藤克彦・今井一郎 (1987) ラフィド藻. 赤潮生物研究指針, 日本水産資源保護協会編, 秀和, 東京, 122-130.
- 川端善一郎・佐竹宗徳 (1992) 急潮による湾内の物理構造・栄養塩・植物プランクトンの変化. 沿岸海洋研究ノート, 30, 27-36.
- KAWABATA, Z. and M. SATAKE (1993) Water Movement in a Bay Caused by the *Kyuchō*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 59, 1305-1308.
- 小泉喜嗣 (1991) 急潮時における下波湾の海水交換過程. 沿岸海洋研究ノート, 29, 82-89.
- 小泉喜嗣, 河野芳巳 (1994) 夏季の下波湾の珪藻プランクトン増殖機構に対する急潮の影響. 沿岸海洋研究ノート, 32, 81-89.
- 小泉喜嗣・河野慈敬・松山紀彦・内田卓志・本城凡夫 (1996) 1994年宇和島湾周辺で発生した *Gonyaulax polygramma* 赤潮の環境特性と魚介類の大量斃死. 日本水産学会誌, 62, 217-224.
- 松岡 学 (1993) 愛媛県における海産魚養殖の歴史と現状. 水産増殖, 41(2), 265-271.
- 真珠新聞社 (1992) 真珠ビジネス, 17, 61.
- STRICKLAND, J.D.H. and T.R. PARSONS (1972) A practical handbook of sea water analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 167 (second edition), 310pp.
- SUZUKI, R. and T. ISHIMARU (1990) An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N,N-dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 44, 6-16.
- 武岡英隆 (1990) 養殖漁場としての宇和海の物理環境, 水産海洋研究, 54, 9-18.
- TAKEOKA H. and T. YOSHIMURA (1988) The *Kyuchō* in Uwajima Bay, *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 44, 6-16.
- 角皆静男 (1979) 植物プランクトン組成を決定する第1因子としての溶存ケイ素. 北大水産報, 30(4), 314-322.
- 山田真知子・鶴田新生・吉田陽一 (1980) 植物プランクトンの富栄養階級表. 日本水産学会誌, 46, 1435-1438.
- 矢持 進 (1989) 大阪湾における *Skeletonema costatum* と *Heterosigma akashiwo* の底生期細胞の分布について, 日本プランクトン学会報, 36, 47-51.