

東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因

誌名	水産海洋研究
ISSN	09161562
著者名	石井,光廣 長谷川,健一 松山,幸彦
発行元	水産海洋学会
巻/号	72巻1号
掲載ページ	p. 22-29
発行年月	2008年2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



東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因：栄養塩の長期変動 および最近の珪藻赤潮発生

石井光廣^{1†}, 長谷川健一¹, 松山幸彦²

Environmental factors influencing *Porphyra* (Nori) farming in Tokyo Bay: Long-term changes in inorganic nutrients and recent proliferation of diatoms

Mitsuhiro ISHII^{1†}, Ken-ichi HASEGAWA¹ and Yukihiro MATSUYAMA²

Recently, fishery damage in *Porphyra* (Nori) farms due to discoloration has frequently occurred in Tokyo Bay. Diatom blooms cause depletion of the dissolved inorganic phosphorus (DIP) concentration in seawater and subsequently cause the discoloration of *Porphyra*. To clarify environmental factors underlying *Porphyra* degradation, we carried out intensive investigations on long-term changes in the nutrient concentration in *Porphyra* farming grounds, seasonal changes in the vertical distribution of DIP concentration from bottom to surface layer, and occurrences of diatom blooms. Since the 1980s, phosphorus loading to Tokyo Bay has markedly decreased due to administrative efforts to regulate total emissions, and these efforts have probably caused selective reduction of DIP concentration in *Porphyra* farming grounds. During the harvesting period of *Porphyra* (October to April), source of phosphorus for *Porphyra* growth depended on release of DIP from bottom sediments and collapse of the pycnocline since freshwater inflow is lowest. The DIP supply from bottom to surface layer gradually decreases in the late harvesting period. At this time, diatom blooms occur and subsequently reduced the DIP concentration in *Porphyra* farming grounds.

Key words: *Porphyra*, discoloration, DIP, diatoms blooming, Tokyo Bay

はじめに

日本のノリ養殖の歴史は、17世紀末~18世紀初頭頃に東京湾で始まったとされている(宮下, 1970)。現在は有明海や瀬戸内海が主要なノリ養殖漁場として知られているが、東京湾の千葉県沿岸では、千葉北部、盤洲周辺、富津岬周辺の3地区で現在でも盛んにノリ養殖が行われている(Fig. 1)。千葉県漁業協同組合連合会共販資料によれば、2005(平成17)年度のこれら3地区における生産量は、東京湾

生産量の96%にあたる約5億枚で(金額で約50億円)、全国の4%にあたる。

東京湾のノリ養殖はかつて支柱式と浮き流し式が併用されていたが、現在の主漁場である富津地区ではすべて浮き流し式であり、離岸距離数kmの範囲までを漁場として利用している。東京湾の水質環境は昭和40年代をピークに著しい富栄養化が続いている(高田, 1993; 野村, 1995; 松村ほか, 2001など)。浮き流し式養殖は支柱式より沖合域を漁場として利用するため、湾内の栄養塩環境の変動を敏感に受けやすいと考えられる。

ノリの主な生産阻害要因としては、赤腐れ病、白腐れ病などのノリが感染する病気、バリカン症、色落ちなどが知られている。そのうち、感染症については生産管理のシステム化により対策がとられるようになってきている。その一方で、近年、ノリの色落ちによる被害が頻発するようになり、産業的に甚大な被害をもたらしている(小谷ら, 2002)。色落ちしたノリは、市場に出荷されずに廃棄されることが多いため、被害金額の算定は困難であるが、千葉県漁業協同組合連合会の共同販売時の等級で、色落ちと判定された

2007年1月9日受付, 2007年12月6日受理

¹ 千葉県水産総合研究センター 東京湾漁業研究所

Tokyo Bay Fisheries Research Laboratory, Chiba Prefectural Fisheries Research Center, 3091 Kokubo, Futtsu, Chiba 293-0042

² 独立行政法人 水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

Fisheries Research Agency, National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, 2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452

† m.ishi26@ma.pref.chiba.lg.jp

現所属 千葉県水産総合研究センター

Chiba Prefectural Fisheries Research Center, 2492 Chikuracho Hiraiso, Minamiboso, Chiba 295-0024

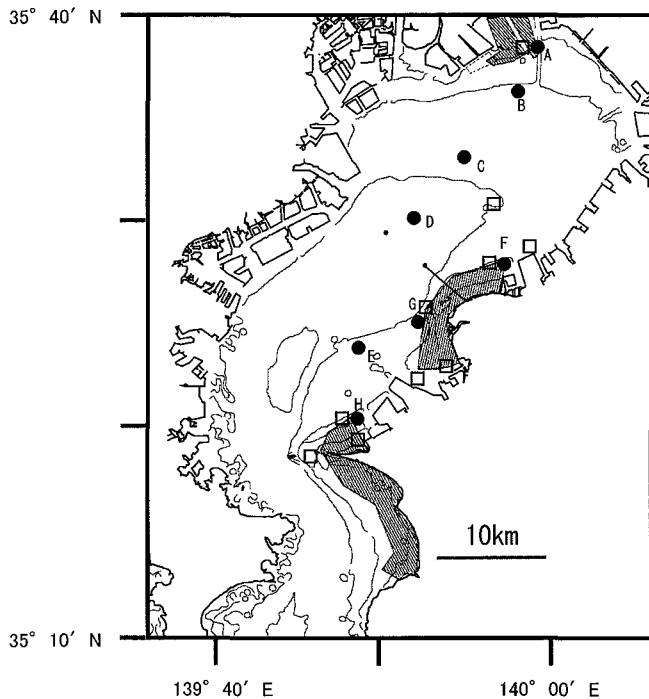


Figure 1. Location of the sampling stations in Tokyo Bay, Japan. Data sets at open square stations were collected from 1977 to 2001 and closed circle stations were collected from 1999 to 2001. Direct observations on a dominant phytoplankton species were carried out at closed circle stations. Shaded areas denote *Porphyra* farming grounds.

ものの量が、多い年で1000万枚を超えることがあると推定される (Fig. 2).

近年ノリの色落ち被害は、東京湾以外の海域でも深刻化している (松岡ら, 2005). 東京湾以外の海域におけるノリの色落ち被害も、主に珪藻類を原因とする赤潮に伴って発生するが、その場合は溶存無機態窒素 (以下 DIN とする) の減少が主原因であるとされている (小谷ら, 2002). 色落ち現象をもたらす DIN 濃度の閾値は、瀬戸内海では $3 \mu\text{M}$ 以下、有明海では $7 \mu\text{M}$ 以下と言われている (渡辺ら, 2004).

昭和40年代の高度経済成長期以降、東京湾の水質総量規制により COD を削減してきたが、さらに平成16年度目標の第5次総量規制からは栄養塩類も規制の対象となった。東京湾は富栄養化が著しいと言われてきたが、栄養塩の総量規制に伴い DIP も減少し、最近ではしばしば湾全域で DIP 濃度が $0.5 \mu\text{M}$ 以下になるような極度な低下がみられるようになってきた。2005年2月を例にみると、1月には DIP 濃度が $1\sim 2 \mu\text{M}$ 分布していたが、1か月後には $0.1 \mu\text{M}$ 以下に低下している (Fig. 3). 東京湾におけるノリの色落ちは、こうした変化が顕著化してきた1990年代以降頻発している。この色落ちの原因を解明するために、ノリ漁場として利用されている沿岸表層の栄養塩環境の長期変動傾

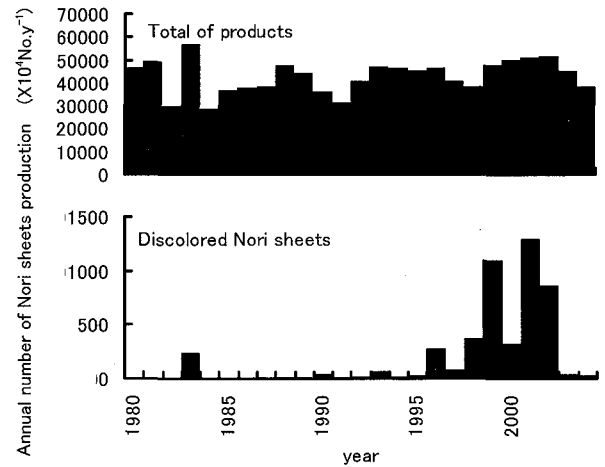


Figure 2. Temporal changes in the annual total number and number of discolored Nori *Porphyra* product sheets cultured in Tokyo Bay.

向、水塊構造の季節変化、さらには色落ち時の珪藻赤潮発生の特徴などについて解析を行う必要がある。しかしながら東京湾で色落ちが発生している時の DIN 濃度は常に $7 \mu\text{M}$ を超えているため、むしろ溶存無機態リン (以下 DIP とする) 不足がノリの色落ちの主要因となる可能性がある。しかし、これまでにリン律速を考慮して解析を試みた資料は見あたらない。従って、東京湾におけるノリの色落ち現象は、瀬戸内海や有明海とは異なる視点で原因を究明する必要がある。

そこで本研究では、ノリ漁中に発生する色落ちと水温、栄養塩濃度などの環境因子の現場調査結果を報告するとともに、色落ちと珪藻赤潮頻度と栄養塩濃度の関連について考察する。

材料と方法

透明度、クロロフィル *a* および栄養塩類濃度の測定

透明度については、水質調査事業の東京湾水質調査で観測した Stn. C の 1990~2004 年のデータを用いた。ノリ漁場における海水のクロロフィル *a* と栄養塩類濃度の測定には、ノリ漁場監視船「七四郎丸」が 1999~2001 年漁期に Stn. G (水深 20m) (Fig. 1) で毎週 1 回採水したサンプルおよび千葉県水産総合研究センター (以後、千葉水総研セ) が同時期に月 2~3 回の頻度でおこなった漁場環境調査の同地点の採水サンプルを用いた (Fig. 1). 調査定点において水温・塩分 (アレック社製 STD), 透明度や水色を測定するとともに、採水器を用いて海水を採水し、実験室まで持ち帰った。

クロロフィル *a* の測定は、試水をガラスフィルター (Whatman 社製 GF/C) で適量ろ過した後、ろ紙をジメチルホルムアミドに 24 時間以上浸漬して色素を抽出した後 (Suzuki and Ishimaru, 1990), 分光光度計 (日本分光社製の

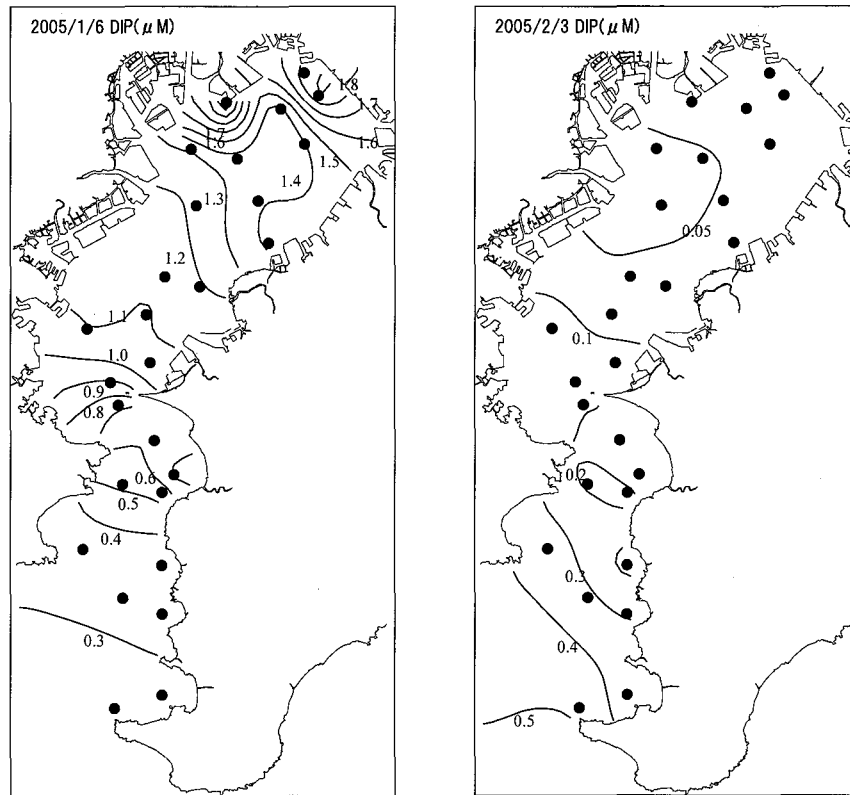


Figure 3. Horizontal distributions of the DIP concentration in the surface water of Tokyo Bay, 6 January 2005 and 3 February 2005.

V-550) により, 750, 663, 630 nm における吸光度を測定し, SCORE/UNESCO 法で算出した。

DIN 濃度と DIP 濃度の測定は, 試水をアドバンテック社製の $0.45 \mu\text{m}$ フィルターで減圧ろ過し, 常法に従い自動化化学分析装置 (Traacs800, プランルーベ社製) で分析した。

東京湾における DIP 濃度の季節変化は, 1995~2004 年に実施された東京湾水質調査で得られた DIP 濃度の月別平均値を用いた。このうち東京湾中央部の Stn. D (Fig. 1) のデータについては表層と底層の DIP 濃度の月別変化を示した。また東京湾の南北に位置する 5 調査点 (Fig. 1 の Stn. A, B, C, D, E) の表層, 水深 5 m, 10 m, 20 m, および海底から 1 m 上の水深 (B+1 m) の DIP 濃度の値から, 縦断面分布を推定し, その表層と中底層の DIP 濃度の平均と東京湾の海底地形から推定した表層と中底層の水体積から, 簡易的に表層 (水深 5 m 以浅) と中底層 (5 m 以深) の DIP 総量を求めた。また長期的な DIN 濃度と DIP 濃度をみるために, Stn. C における 1970 年から 2005 年の DIN 濃度, DIP 濃度, DIN:DIP 比の 36 ヶ月移動平均値を表した。

プランクトンの同定

現場海域で出現していたプランクトンの観察には, 千葉水総研セが月 2~3 回おこなう漁場環境調査の主要調査点 (Stn. A; 7 m, B; 11 m, C; 18 m, D; 26 m, E; 18 m, F; 11 m, G; 20

m, H; 15 m) の採水サンプルを用いた (Fig. 1)。サンプルを適宜濃縮し, 顕微鏡下で優占種を検鏡した。200 ml の海水試料をガラスフィルター (Whatman 社製, GF/C) を装着したろ過器に投入し, フィルター上のプランクトン試料を重力下で適宜濃縮し, この濃縮水の一部を顕微鏡下で検鏡した。

色落ち乾のりの判定

ノリの色落ち枚数は, 千葉県漁連乾のり共販において, 色が浅いとされた乾のりの等級が A 印のもの数とした。共販は通常 12 月までは 10 日に 1 回, 1 月以降は 2 週間に 1 回行われるが, その共販に出荷された乾のりは共販日の 2 日~14 日前に摘採されたものである。共販日から色落ちが発生した期間を推定するため, 漁獲日から共販日までの平均的な期間である 7 日間を共販日から遡った日を色落ちしたノリの漁獲日とみなして集計した。

珪藻赤潮の発生件数推定

東京湾における行政上の赤潮判定基準は, 東京湾岸自治体環境保全会議 (2005) 『色がオリーブ色~茶色, 透明度が 1.5 m 以下, クロロフィル a が SCORE/UNESCO 法で $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 溶存酸素飽和度が 150% 以上, pH が 8.5 以上など』とされている。しかし, この判定基準を満たさなくても生物の増殖や濃縮による水の着色現象である赤潮は存

在することから、Han *et al.* (1992) や野村 (1998) はクロロフィル a 濃度を基準に東京湾の赤潮基準を定義した。

本研究においても、冬季の赤潮には先の行政上の基準が必ずしも当てはまらない場合があった。また、特にこの時期に対象となるのは珪藻主体の赤潮である。そこで、冬季の赤潮は、通常の東京湾の「赤潮」と区別して「珪藻赤潮」として扱うことにした。すなわち、1999~2001年については、ノリ漁期中である10月~翌年4月の期間に、透明度3 m以下でpH 8.4以上の両条件を満たした時を「珪藻赤潮」と定義した。過去の珪藻赤潮の発生件数は、1977年12月~2002年2月にノリ漁場監視船「七四郎丸」が10調査点 (Fig. 1) で毎日実施した水質調査結果のなかから、12~2月の期間で上述した珪藻赤潮の判定基準を満たしたものに基いて算定した。

なお「珪藻赤潮」期間中の実際の構成プランクトン種については、1999年から2001年漁期は顕微鏡下で直接優占種を検鏡し、そのほとんどが珪藻類で構成されていることを確認している。それ以前の期間については、顕微鏡において直接確認した記録がないが、発生時期や水温から推定してほとんどの場合が珪藻類であったと考えられる。

結果

栄養塩濃度、クロロフィル a 濃度、植物プランクトンの出現種とノリの色落ち枚数の経時変化

1999~2002年の11~3月の東京湾盤洲海域におけるクロロフィル a 濃度、DIN濃度、DIP濃度、乾ノリの色落ち枚数の変化をFig. 4に示した。

養殖サビノリ葉体の窒素とリンの含有量は、それぞれ乾燥重量mgあたり平均 $8.6 \pm$ 標準偏差 $0.8 \mu\text{g-at}$ 、 $0.32 \pm 0.01 \mu\text{g-at}$ であり (川口ら, 2003)、リンに対する窒素の比は26:1になる。ノリが健全に生育するためには、現場海域において窒素とリンの存在比が必要と仮定し、Fig. 4ではDIN濃度とDIP濃度の目盛りの比を26:1で表示した。DIN濃度とDIP濃度の変動をみることによって、窒素とリンのどちらがノリの生育を制限したかが推定できる。

1999年漁期は、12月中旬にクロロフィル a 濃度が若干上昇し、DIN濃度とDIP濃度が一旦減少したが、11月から翌年1月までは明確な珪藻赤潮は認められなかった。2月7日に珪藻 *Melosira* sp.と *Eucampia zodiacus* を主体とする珪藻赤潮が観察され (クロロフィル a 濃度: $12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)、その後2月中はクロロフィル a 濃度が $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 程度に増加し、*E. zodiacus* の珪藻赤潮が継続した。このときDIN濃度は $10 \mu\text{M}$ 、DIP濃度は $0.4 \mu\text{M}$ 前後といずれも低濃度となったが、その後DIN濃度は $20 \sim 30 \mu\text{M}$ に上昇した。しかしながら、DIP濃度は概ね $0.5 \mu\text{M}$ 以下で経過した。3月8日には *E. zodiacus* は減少傾向でクロロフィル a 濃度も $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下に低下するが、3月21日にはクロロフィル a 濃度が再び $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ に増加して赤潮は継続した (この時

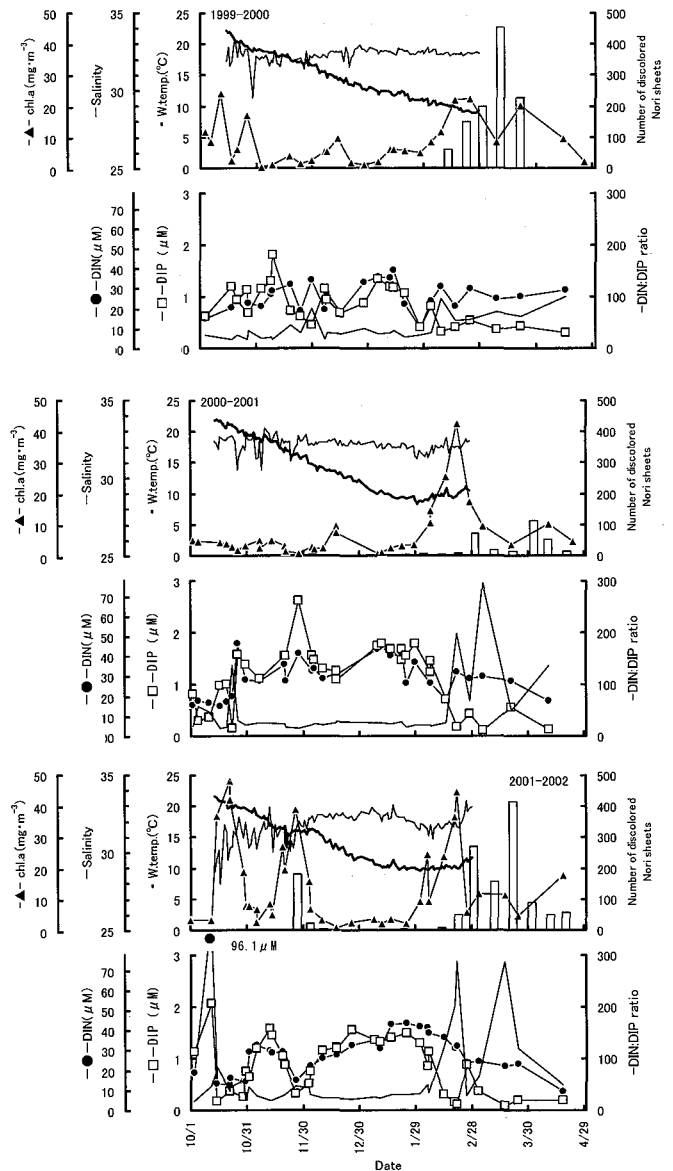


Figure 4. Temporal changes in surface concentration of chlorophyll a (closed triangles), water temperature (bold line), salinity (thin line), dissolved inorganic nitrogen (closed circles; DIN), dissolved inorganic phosphorus (opened squares; DIP), and DIN:DIP ratio (thin line) observed at Stn. G from 1999 to 2001, and in the number of discolored Nori sheets (open bars) due to discoloration was estimated from official record of an auction market held bimonthly.

の優占プランクトン種の検鏡は欠測)。2月上旬から4月上旬までDIP濃度は $0.5 \mu\text{M}$ 以下と低いまま推移した。4月14日には北部で珪藻の *Skeletonema costatum*, *Rhizosolenia fragilissima* による赤潮が形成されていた。ノリの色落ちは、珪藻赤潮が見られはじめた2月初旬から始まり、3月中旬に最も多くなり (453万枚)、珪藻赤潮の発生時期とこれに伴って海水のDIP濃度が $0.5 \mu\text{M}$ 以下と低い時期に一致し

た. この年度の色落ち枚数は計1,099万枚であった (Fig. 4).

2000年漁期は, 9月27日に珪藻の *Nitzschia pungens*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Thalassiosira* sp., *Cylindrotheca closterium* による赤潮が発生していたが, 10月以降1月までは珪藻赤潮の発生はなく, DIN濃度およびDIP濃度のいずれも高い濃度を維持していた. 2月初旬からクロロフィル *a* 濃度が急激に増加し, 明瞭な珪藻赤潮が発生した. この時の優占種は *Rhizosolenia setigera* であった. 2月20日にはクロロフィル *a* 濃度が最大の $43 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ と濃厚な赤潮となったが, 3月6日にはほぼ終息した. 珪藻赤潮発生に伴い, 2月中旬以降DIN濃度およびDIP濃度のいずれも減少したが, DIN濃度については, 2月中旬以降は回復した. DIP濃度についてはその後も低濃度で推移し, 3月まで $0.5 \mu\text{M}$ 以下の状況が続き, 最低は $0.1 \mu\text{M}$ であった. 一方, DIN濃度は大きな変動を示さず, $30 \mu\text{M}$ 前後で推移した. *R. setigera* 主体の珪藻赤潮はDIP濃度の減少に伴いその後解消していった. 4月10日は渦鞭毛藻 *Ceratium fusus*, *C. furca* と珪藻 *S. costatum* の混合赤潮が発生していた. ノリの色落ちは, *R. setigera* の珪藻赤潮が解消しつつある3月はじめに73万枚発生したほか, 4月上旬にこの年最高の112万枚発生したが, 色落ち発生が漁期後半であったためにこの年度の色落ち枚数は計314万枚と前年よりも少なかった (Fig. 4).

2001年漁期は, 10月中旬以降, 珪藻の *Chaetoceros* sp. による濃厚な赤潮が見られ, クロロフィル *a* 濃度が $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ まで増加したが, 11月8日にはこの赤潮は消滅した. 11月19日には珪藻の *Ditylum brightwellii* と *S. costatum* 主体の小規模な赤潮が発生したが, 12月3日にはほぼ解消した. 11月下旬の珪藻赤潮によりDIN濃度とDIP濃度のいずれも顕著に低下した. 1月7日から2月4日にかけて赤潮は発生せず, DIN濃度とDIP濃度のいずれも高く推移していた. この期間は珪藻 *S. costatum*, *Chaetoceros* sp., *R. setigera*, *Navicula britannica* の4種が出現し, 徐々にプランクトンの増加がみられた. 2月中旬に *S. costatum*, *Chaetoceros* sp., *R. setigera* による珪藻赤潮となり, 2月20日にはクロロフィル *a* 濃度が最高 $44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ と高い値になった. これに伴いDIP濃度が急激に減少し, 2月25日には一旦赤潮が解消した. その後3月は珪藻の *Chaetoceros* spp. が主体で, クロロフィル *a* 濃度が $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 程度の状況が継続し, DIP濃度は $0.1 \sim 0.2 \mu\text{M}$ の低調なまま推移した. ノリの色落ちは, 漁期前半の11月末に179万枚, 2月後半頃からふたたび増加し3月下旬にこの年最高の413万枚となり, 4月末まで継続した. この年度の色落ち枚数は計1,303万枚であった (Fig. 4).

最近のDIP濃度の月変化

近年の東京湾中央部における表層と底層のDIP濃度, 表層と底層の水温差と東京湾におけるDIP総量 (表層と中底層)

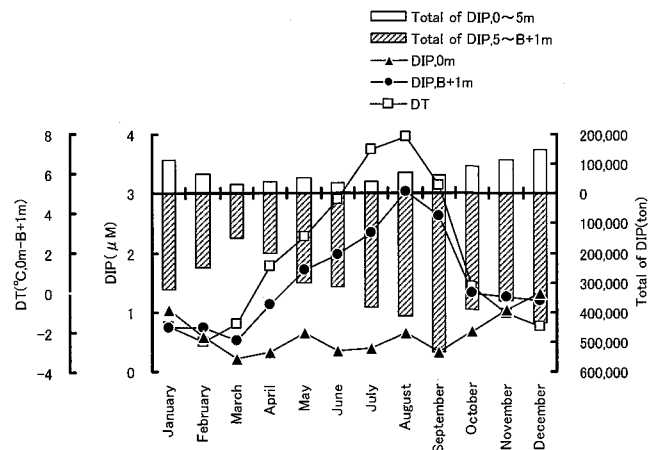


Figure 5. Seasonal patterns of the DIP concentration at Stn. D, total DIP amount estimated from the section data (Stn. A, B, C, D, and E) and differences of water temperature between 0m and Bottom+1m (DT) in Tokyo Bay. The figure was expressed by the mean value calculated from 1995 to 2004 data sets.

の月別変化を Fig. 5 に示す. DIPの総量は3月に最低 (18.1万トン), 9月に最高 (59.7万トン) を示した. 年間平均の中底層DIP総量は33.8万トン, 表層は7.2万トンとなり, 表層は中底層の21%に相当した. 表層と底層の水温差は, 2月に最低の -2.5°C を示した後, 4月に正に転じ (1.3°C), 最高の8月 (7.9°C) まで上昇した. 9月以降減少し, 10月には急激に減少していることから, 大きく鉛直混合したことが推察される. 総量の季節変動は, 最低の3月以降増加し, 水温差が最高であった8月の翌月に最大となり, 中底層の変動を反映した. 中底層では10月以降減少傾向になるが, 表層では12月まで増加した (146,479トン). 1月以降表層・中底層とも3月まで減少した. 表層と底層のDIP濃度の月別変化は, 鉛直混合が起こる冬季は表層と底層の差がないが3月以降上下の水温差が大きくなり, 成層が形成される時期になると, 底層のDIP濃度が増加し8月に最大となった. その間表層は少ない状況で推移した. 9月以降鉛直混合が始まる頃になると底層のDIP濃度は減少し, それに伴い表層のDIP濃度が増加した.

珪藻赤潮発生

1977~2001年の11調査点における12月~翌年2月の月別の延べ珪藻赤潮発生推定件数を Fig. 6 に示す. 1970年代には珪藻赤潮の発生はほとんどなく, 1980年代には年間50件以下で推移した. 1990年には各月に珪藻赤潮が発生し, 年間の発生件数は150件を超えて最多年となった. 1990年代には珪藻赤潮が頻発し, 従来, 発生頻度の低かった1月にも発生した. 2001年漁期には12月にも発生した.

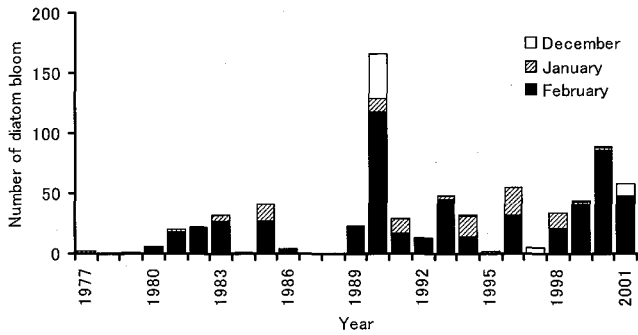


Figure 6. Temporal changes in the cumulated number of diatom blooms estimated during the *Porphyra* farming period (from December to February) at the 10 stations in the surveyed area. The diatom bloom was defined from seawater conditions in which the pH value in the surface layer exceeded 8.4 and the transparency was less than 3 m).

考察

東京湾の DIN : DIP 比の長期的傾向

東京湾における1979年以降5年ごとの窒素・リンの負荷量の変化（中央環境審議会，2005）をみると，1979年が窒素364トン/日，リン41.2トン/日であったが，その後減少し，1999年は窒素254トン/日で，対1979年比が70%，リン21.1トン/日で51%とリンの削減率が窒素に比して顕著に大きいことがわかる。他海域のリンの対1979年比は伊勢湾62%，瀬戸内海64%であり，東京湾は最も高い削減率となっている。

負荷量の変化と共に，東京湾では，1960年代をピークにDIN濃度とDIP濃度は概ね減少傾向にある。とくにDIP濃度の減少はDIN濃度に比べて著しい。その結果，経年的にNP比が上昇していることが報告されている（野村，1995，1998など）。千葉水総研セによる東京湾水質調査結果においても，1970年代後半以降表層のDIP濃度はDIN濃度より減少率が高く，海水中のDIP:DIN比は上昇傾向にある（Fig. 7）。このことは，呉ら（2005）が指摘した大阪湾湾奥や広島湾沿岸で起こっているDIN:DIP比の増加と同様の現象である。窒素とリンの削減が結果的にDIN:DIP比の減少に繋がっていると考えられる。

東京湾におけるノリの色落ちと栄養塩量の関係

これまでDIN濃度が高い海域でも $7\mu\text{M}$ を下回ると，ノリの色落ち現象が発生するといわれてきた。実際，有明海や瀬戸内海のノリ漁場における色落ちはDINの不足によることが報告されている（松岡ら，2005；渡辺ら，2004）。ところが，東京湾で今回の観測したすべての年度のノリ漁期中，DIN濃度が $7\mu\text{M}$ を下回ることにはなかった。漁期前半の晩秋にはクロロフィルa濃度の増加時にDIN濃度とDIP濃度が同時に低下する減少が認められたが，年明けの1月下旬に認められるクロロフィルa濃度の増加後には，DIN濃度はほとんど変化せず，DIP濃度が減少して， $0.5\mu\text{M}$ 以

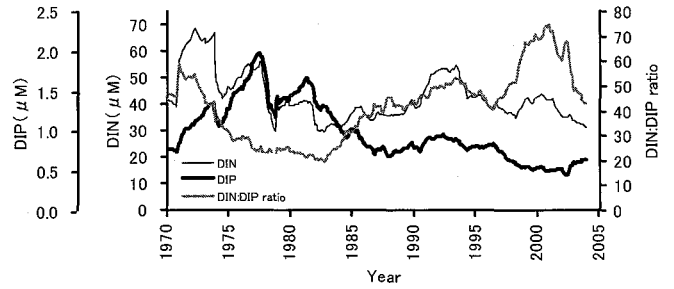


Figure 7. Long-term variations in concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), and DIN : DIP ratio at Stn. C (0 m).

下となった。いずれの年度も，色落ちしたノリは海水中のDIP濃度が $0.5\mu\text{M}$ 以下になると増加した（Fig. 4）。

ノリ葉体の窒素とリンの比率は，26:1とされ（川口ら，2003），植物プランクトンの代表的な窒素とリンの比率であるレッドフィールド比16:1（Redfield *et al.* 1963）を上回る。このことは，植物プランクトンよりもノリ葉体の方がより窒素制限を受けやすいことを示している。色落ちが発生した時期，DIP濃度は $0.5\mu\text{M}$ 以下であり，周年を通じて最も低い濃度を示していた。そしてDINとDIPの元素比はササビノリの窒素とリンの比率である26:1（川口ら 2003）を上回っていた。したがって，近年東京湾で発生したノリの色落ちは，DINではなくDIPの不足によるものと考えられ，DIN不足が原因となっている有明海や瀬戸内海のノリ漁場とは異なると推察される。

1990年代以降のノリの色落ち被害の顕著化の要因

東京湾のDIP濃度はリン洗剤規制以後，総量規制によって長期的に減少してきている。特に2~4月の冬季には，DIP濃度が低い水準で推移すると共に，この時期に発生する珪藻赤潮によってDIPが消費されることで，結果としてノリの色落ちが発生していると考えられる。冬季の珪藻赤潮の頻発化には，1) 冬季水温の上昇，2) 冬季の透明度の上昇，3) DIP濃度の低下と植物プランクトン種遷移という3つの要因が想定される。

1) 冬季水温の上昇

ノリの色落ち現象が顕著化し始めた1990年代に，DIP濃度の変化とともに最も変化が明瞭な海象は冬季水温の上昇である（安藤ら，2003；八木ら，2004）。千葉水総研セが実施している水質調査の結果によれば，秋~冬季の水温は，50年間で2~2.5°C上昇している（東京湾水質調査事業観測結果，未発表）。水温は植物プランクトンの増殖に影響を与える環境要因の1つであり，冬季の水温上昇により，珪藻の増殖速度自体が増加することが考えられる。ノリの色落ちとの関連が指摘されている *E. zodiacus* や *Rhizosolenia* 属は比較的高い水温帯に適応した珪藻類である（西川，2002；佐々木・鬼頭，2003）。冬季水温のわずかな上昇はこれらの珪藻類の増殖速度を高める効果があると考えられ

る。ただし冬季の水温は1~2°Cと非常に小さな幅で上昇しているため、これがどの程度現場の珪藻類の増殖速度を押し上げるかについては十分に検討する必要がある。

また冬季水温の上昇は鉛直混合の低下も引き起こしていると考えられる。遊泳力を持たない珪藻は冬季の海面冷却に伴って発生する対流と北方成分の風による強い鉛直混合期間（ノリ漁期に相当）には、光条件に恵まれた表層付近に留まることができずに下層に運ばれ、有光層以深では光合成活性が低下して増殖が抑制されると考えられる（松山, 2003）。従って、冬季の水温上昇は海面冷却能の低下とそれに伴う鉛直混合の低下を意味している。鉛直混合が弱まり成層化すると、珪藻類は有光層に留まる時間が増加し、それだけ高い光合成活性を維持することが可能であろう（野村・吉田, 1997）。

2) 冬季の透明度の上昇

近年の東京湾では冬季に珪藻類赤潮の発生が顕著化しているが、赤潮の発生は突発的であり、それ以外の期間は透明度が高い状態がしばしば観察されるようになってきている（Fig. 8）。この冬季の透明度の上昇も珪藻赤潮を以下の2つの要因で誘発していると考えられる。1つめは、補償深度が深くなり、植物プランクトンの増殖できる空間が広がることである。このことは冬季水温の上昇による鉛直混合の低下とともに、冬季の珪藻赤潮発生に相乗的に作用している可能性がある。2つめは、底層に到達する光量が増し、底泥中の珪藻類休眠細胞の発芽が促進されることである。この点については実際に珪藻休眠細胞の動態を把握する必要があるが、一般に珪藻の休眠細胞は海底泥中に湿重量1gあたり $10^4 \sim 10^5$ cellsで分布し、時化などの海底のかく乱により光照射を受けるとすみやかに発芽するとされ、発芽率は照射される光量が増すことにより高まる（板倉, 2000; 山口ら, 2003）。

3) DIP濃度の低下と植物プランクトン種遷移

Eucampia zodiacus と *Rhizosolenia imbricata* の急激な増殖時の栄養塩取り込みにより、ノリの生長が阻害され、色落ち

が発生することが指摘されている（佐々木・鬼頭, 2003）。*E. zodiacus* は、無機態のリンがないときには有機態のリンが利用でき（西川・堀, 2004）、水温が7°C以上で増殖が可能であることや、珪藻の中でも高い比増殖速度も示すことが知られている（西川, 2002）。また、*R. imbricata* は高塩分・低栄養の外洋に適した種とされる（佐々木・鬼頭, 2003）。本研究で赤潮を形成した *R. setigera* も、やはり *R. imbricata* と同属であり、形態的に非常に類似している。両種が類似の栄養塩要求性を示すと仮定すれば、2001年漁期の *R. setigera* 赤潮発生期間がノリの色落ち期間に一致したことは、本種がリン濃度の低下を促進したことを推測させる。

いずれにしても、これらの種とノリの栄養塩競合を実験的に明らかにする必要があるが、*E. zodiacus* と *R. imbricata* の出現状況を本研究に照らすと、1999年漁期には1~2月に *E. zodiacus* が、2001年漁期には2月中旬から *R. setigera* が比較的長い赤潮を形成した時に色落ちノリの枚数が多く、2000年漁期のように *R. setigera* の赤潮が2月の短期間で消失したときにはノリの色落ち枚数は少なかった。これらの種は窒素が制限要因とされるノリ漁場において知られている種であるが、本研究における現場観測は、リン濃度の低下する時期においても卓越する可能性を示している。

東京湾においては、ノリ漁期はじめの時期は秋季の鉛直混合の始まる時期に当たり、ノリ養殖の行なわれている表層近くまで、底層のDIPが補給される。この時期には *S. costatum*, *Chaetoceros* 属が頻繁に赤潮を形成するが、DIP濃度はノリの生長を阻害するまでには低下しないため、色落ちは顕著でない。しかし、DIP濃度が低下したノリ漁期後半に、後期発生種である *E. zodiacus* や *R. setigera* を主体とする赤潮が発生すると、低下しつつあるDIP濃度の減少をさらに加速させると考えられる。そのため、競合するノリにDIPが行き渡らなくなるために、これらの赤潮が長期化した場合には大規模な色落ちが発生するものと推測される。

感染症などの対策と異なり、冬季の水温・透明度上昇、あるいはDIP濃度の長期的な減少傾向のいずれもノリ養殖業者の活動範囲では制御不能な環境項目であり、抜本的な対策を実施することは困難である。東京湾は現在も夏季を中心に赤潮や貧酸素水塊が引き続き発生しているため、湾全体の水質環境の改善策を進めていく必要がある。その一方で、1990年代以降の冬季の表層では、富栄養ではなく、DIP濃度の低下による栄養塩が不足する環境が毎年出現してノリ養殖業に被害をもたらしている現状を認識する必要がある。著しいリン制限環境の出現により、窮地に陥るノリ漁業者をみると、一律的な窒素、リンの削減に固執するのではなく、削減目標を春~夏季に大きく、冬季は少なくするなどのきめ細かな排出負荷の人為的コントロールが必要な時代に入っていると見えよう。

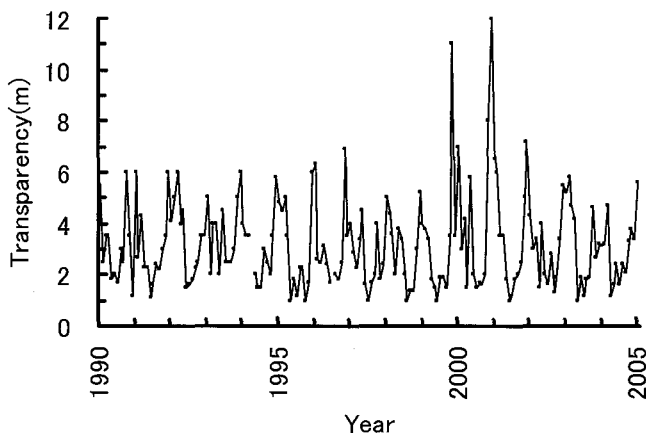


Figure 8. Change in transparency at Stn. C.

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、長期間観測にご協力いただいたノリ漁場監視船「七四郎丸」の鈴木松夫船長をはじめ乗組員の皆様に感謝します。原稿に対して建設的なご指摘を頂いた査読者に深謝します。

引用文献

- 安藤晴夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・山崎正夫 (2003) 東京湾における水温の長期変動傾向について。海の研究, **12**, 407-413.
- 中央環境審議会 (2005) 第6次水質総量規制の在り方について (答申)。2-18.
- Han, M.-S., K. Furuya and T. Nemoto (1992) Species-specific productivity of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae) in the inner part of Tokyo Bay. Mar. Ecol. Prog. Ser., **79**, 267-273.
- 板倉 茂 (2000) 沿岸性浮遊珪藻類の休眠期細胞に関する生理生態学的研究。瀬戸内海区水産研究所研究報告, **2**, 67-130.
- 川口 修・山本民次・橋本俊也 (2003) 養殖スサビノリ (*Porphyra yezoensis*) 葉体の炭素, 窒素, リン含有量。広島大学大学院生物圏科学研究科紀要, **42**, 7-9.
- 小谷正幸・福永 剛・尾田成幸・淵上 哲 (2002) 2000年度ノリ漁期における色落ちの発生状況。福岡水技セ研報, **12**, 117-122.
- 松村 剛・堀本奈穂・許 耀霖・石丸 隆 (2001) 東京湾における栄養塩の動向。La mer, **39**, 19-32.
- 松村 剛・石丸 隆 (2004) 東京湾への淡水流入量と窒素・リンの流入負荷量 (1997, 98年度)。海の研究, **13**, 25-36.
- 松岡 聡・吉松定昭・小野哲・一見和彦・藤原宗弘・本田恵二・多田邦尚 (2005) 備讃瀬戸東部 (香川県沿岸) におけるノリ色落ちと水質環境。沿岸海洋研究, **43**, 77-84.
- 松山幸彦 (2003) 有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* に関する生理生態学的研究—I *H. circularisquama* 赤潮の発生および分布拡大機構に影響する環境要因等の解明。水研センター研報, **7**, 24-105.
- 宮下 章 (1970) 海苔の歴史。全国海苔問屋協同組合連合会, 東京, 1402 pp.
- 西川哲也 (2002) ノリの色落ち原因藻 *Eucampia zodiacus* の増殖に及ぼす水温, 塩分および光強度の影響。日水誌, **68**, 356-361.
- 西川哲也・堀 豊 (2004) ノリの色落ち原因藻 *Eucampia zodiacus* の増殖に及ぼす窒素, リンおよび珪素の影響。日水誌, **70**, 31-38.
- 野村英明 (1995) 東京湾における水域環境構成要素の経年変化。La mer, **33**, 107-118.
- 野村英明・吉田 誠 (1997) 東京湾における近年の植物プランクトンの出現状況。La mer, **35**, 107-121.
- 野村英明 (1998) 1900年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷。海の研究, **7**, 159-178.
- 呉 碩津・松山幸彦・山本民次・中嶋昌紀・高辻英之・藤沢邦康 (2005) 近年の瀬戸内海における有害・有毒渦鞭毛藻の分布拡大とその原因-溶存体有機リンの生態学的重要性。沿岸海洋研究, **43**, 85-95.
- Redfield A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards (1963) The influence of organisms on the composition of sea-water. In, The Sea (M. N. Hill ed.), vol. 2, Inter Science, New York, pp. 26-77.
- 佐々木和之・鬼頭 鈞 (2003) 有明海で発生した珪藻 *Rhizosolenia imbricata* Brightwell の増殖特性。日本プランクトン学会誌, **50**, 79-87.
- Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990) An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N,N-dimethylformamide. Journal of the Oceanographical Society of Japan, **46**, 190-194.
- 高田秀重 (1993) 水質。東京湾—100年の環境変遷 (小倉紀雄編), 恒星社厚生閣, 東京, 39-44.
- 東京湾岸自治体環境保全会議 (2005) 東京湾水質調査報告書 (平成15年度)。
- 渡辺康憲・川村嘉応・半田亮司 (2004) ノリ養殖と栄養塩ダイナミックス。沿岸海洋研究, **42**, 47-54.
- 八木 宏・石田大暁・山口 肇・木内 豪・樋田史郎・石井光廣 (2004) 東京湾及び周辺海域の長期水温変動特性。海岸工学論文集, **51**, 土木学会, 1236-1240.
- 山口峰生・板倉 茂・長井 敏 (2003) 生活史特性からみた珪藻赤潮の発生機構。海苔と海藻, **65**, 18-22.