

2006 年以降の三河湾における赤潮発生状況の急激な変化

中嶋康生・山田 智・戸田有泉・二ノ方圭介

(2013 年 12 月 17 日受付, 2014 年 1 月 10 日受理)

Drastic changes of the red tide occurrence in Mikawa Bay since 2006

NAKASHIMA Yasuo*, YAMADA Satoshi*, TODA Yuzumi*, NINOKATA Keisuke*

Abstract : Red tide occurrence and water quality were monitored at Mikawa Bay during 20 years (1993~2012). Total number of days of red tide occurrence by flagellates have decreased drastically since 2006. So, we compared the red tide occurrence and water quality between 1993~2005 and 2006~2012. Total number of days of red tide occurrence, total phosphorus concentrations and chlorophyll *a* concentrations have decreased from 195.8 days/year to 143.1 days/year, from 48.8 μ g/L to 41.3 μ g/L, and from 18.3 μ g/L to 12.7 μ g/L, respectively. According to the calculation results of the predation pressure of a short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*), the decrease of red tide occurrence and chlorophyll *a* concentrations were caused by the increase in predation pressure of macrobenthos represented by a short-necked clam.

キーワード; 三河湾, 赤潮, 水質, 摂食圧

三河湾は面積 604 km², 平均水深 9.2 m の浅い湾であり, 知多半島, 渥美半島に囲まれ湾口部は狭く海水交換量は少ない。¹⁾ また, 三河湾に流入する一級河川の矢作川, 豊川の年間淡水流入量は三河湾の容積の約 80 % に達する。¹⁾ つまり, 三河湾は閉鎖的で陸域からの流入負荷の影響を受けやすく基礎生産が高い湾であり, 潜在的に赤潮が発生しやすい環境といえる。

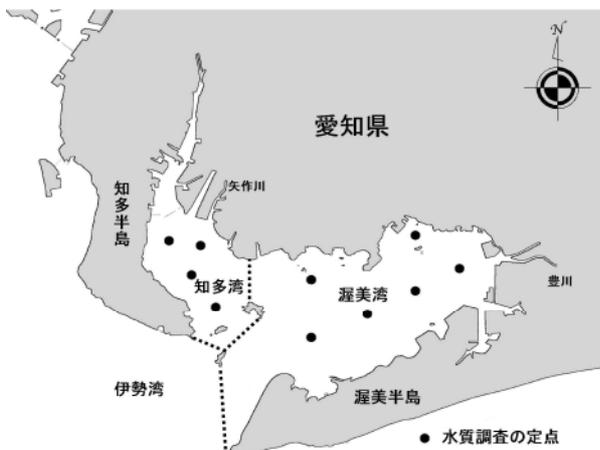


図 1 三河湾(知多湾+渥美湾)の海域区分及び水質調査定点

愛知県水産試験場では, 環境指標や各種施策の基礎資料とするため, 三河湾における赤潮発生状況を調査してきた。この調査は 1978 年から今日まで暦年でとりまとめられてきているが, 1993 年に赤潮発生件数や発生海域の基準が変更されたため, 変更前後での比較は困難である。

そこで, 調査方法が変更された 1993 年以降から 2012 年までの 20 年間について, 三河湾の赤潮発生状況の変化及び水質環境の変化との関連を整理した。特に鞭毛藻類の赤潮発生状況が特異的に変化していたため, この原因について考察を加えたのでここに報告する。

材料及び方法

(1) 赤潮発生状況

赤潮の発生状況には, 資料として 1993 年から 2012 年の愛知県水産試験場による「伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況」²⁾ を用いた。この資料では, 三河湾を北西部の知多湾と東部の渥美湾の 2 つに分けて (図 1) 整理されているが, 本報告では知多湾と渥美湾の数値の和を三河湾の値として整理した。また, この資料²⁾ の赤潮構成プランクトンについて, 種レベルと属レベルで整理されてい

* 愛知県水産試験場 (Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan)

るものが混在しているため、混在しているものについては属レベルで整理した。

「伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況」²⁾には愛知県水産試験場の調査船による月2回以上の観測結果、関係官公庁からの通報、愛知県内4カ所の農林水産事務所からの報告が含まれている。また、赤潮が発生している場合は、可能な限り現場海水を検鏡し、赤潮構成種と細胞数が確認されている。赤潮かどうかの判定基準は目視によるものが主とされているが、判断が難しいものについては、クロロフィル *a* が 30 $\mu\text{g/L}$ 以上、透明度が 2m 以下、pH が 8.5 以上、溶存酸素飽和度が 120 % 以上、植物プランクトンが小型種なら 10^4 cells/mL 以上、大型種なら 10^3 cells/mL 以上などの観測で得られた結果を総合的に考慮して判断されている。赤潮発生件数は知多湾及び渥美湾で発生した赤潮の件数であり、同一湾内で2カ所以上に分かれて分布する赤潮のうち最優占種が同じもので構成種が類似するものについては1件とみなされ、最優占種が異なる赤潮については別の赤潮とされている。断続的に発生した赤潮は、その中断期間、もしくは無情報期間が7日以内で、かつ最優占種が同じであれば継続している赤潮とみなされている。赤潮発生延べ日数は赤潮の継続日数の和とされている。鞭毛藻類の赤潮は渦鞭毛藻をはじめ、ラフィド藻、クリプト藻、黄金色藻、ユーグレナ藻など、鞭毛を持つ藻類すべてが含まれている。鞭毛藻類と珪藻類が混在した複合赤潮は、鞭毛藻類の赤潮と珪藻類の赤潮のそれぞれに計数されているが、全種類の赤潮としては1つとして計数されている。

(2) 水質環境

三河湾の TN (総窒素)、TP (総リン)、透明度、クロロフィル *a* については、資料として愛知県環境部による「公共用水域水質調査」³⁾の値を用いた。この調査は毎月1

回行われており、本報告に用いた値は1993年から2012年までの20年間で継続的に調査が行われている10定点(図1の黒丸)の表層水の年平均値とした。

(3) 統計処理

調査期間を赤潮の発生状況が大きく異なった1993年から2005年までの期間と2006年から2012年までの期間の2期間に分け、2期間の赤潮発生状況と水質の違いについて Mann-Whitney *U* 検定を用いて統計的に評価した。

結 果

(1) 赤潮発生状況

三河湾における赤潮発生件数及び発生延べ日数の推移を鞭毛藻類、珪藻類及び全種類について図2に示した。

鞭毛藻類をみると赤潮発生延べ日数が2006年以降に急激に減少している。そこで1993年から2005年までの期間(以後、頻発期とする)と2006年から2012年までの期間(以後、減少期とする)の2期間に分けて検定を行った。鞭毛藻類の赤潮発生件数は、頻発期と減少期で有意差はなく、20年間の平均値は10.4件/年であった。鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数は頻発期と減少期で有意($p < 0.05$)に減少しており、その平均値はそれぞれ104.2日/年と50.3日/年であり52%の減少であった。

珪藻類の赤潮発生件数は、頻発期と減少期で有意($p < 0.05$)に増加しており、その平均値はそれぞれ11.8件/年と15.4件/年であり31%の増加であった。珪藻類の赤潮発生延べ日数は頻発期と減少期で有意差はなく、20年間の平均値は121.4日/年であった。

全種類の赤潮発生件数は、頻発期と減少期で有意差はなく、20年間の平均値は22.7件/年であった。全種類の赤潮発生延べ日数は、頻発期と減少期で有意($p < 0.05$)に減少しており、その平均値はそれぞれ195.8日/年と

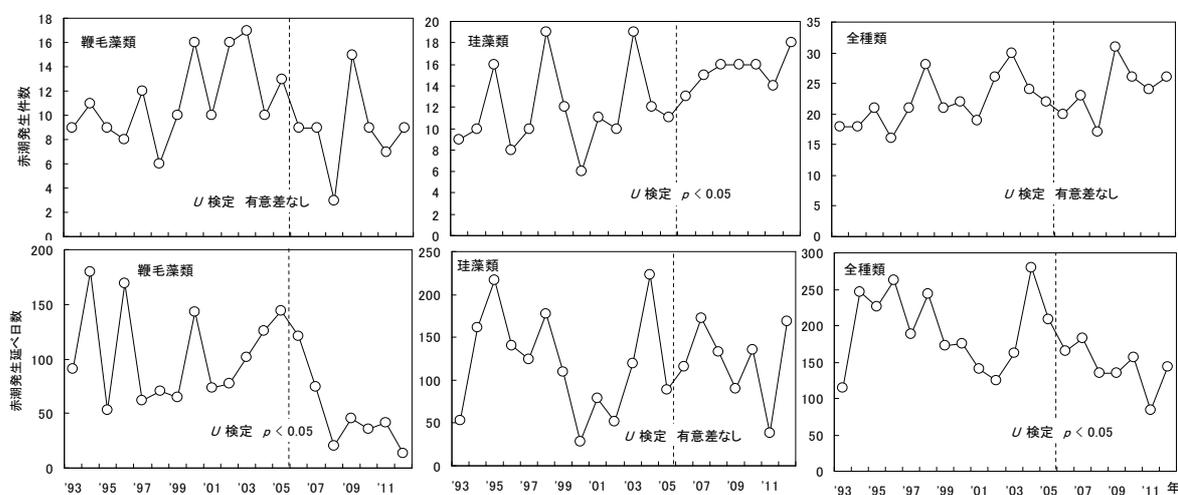


図2 三河湾における赤潮発生件数及び赤潮発生延べ日数の変化

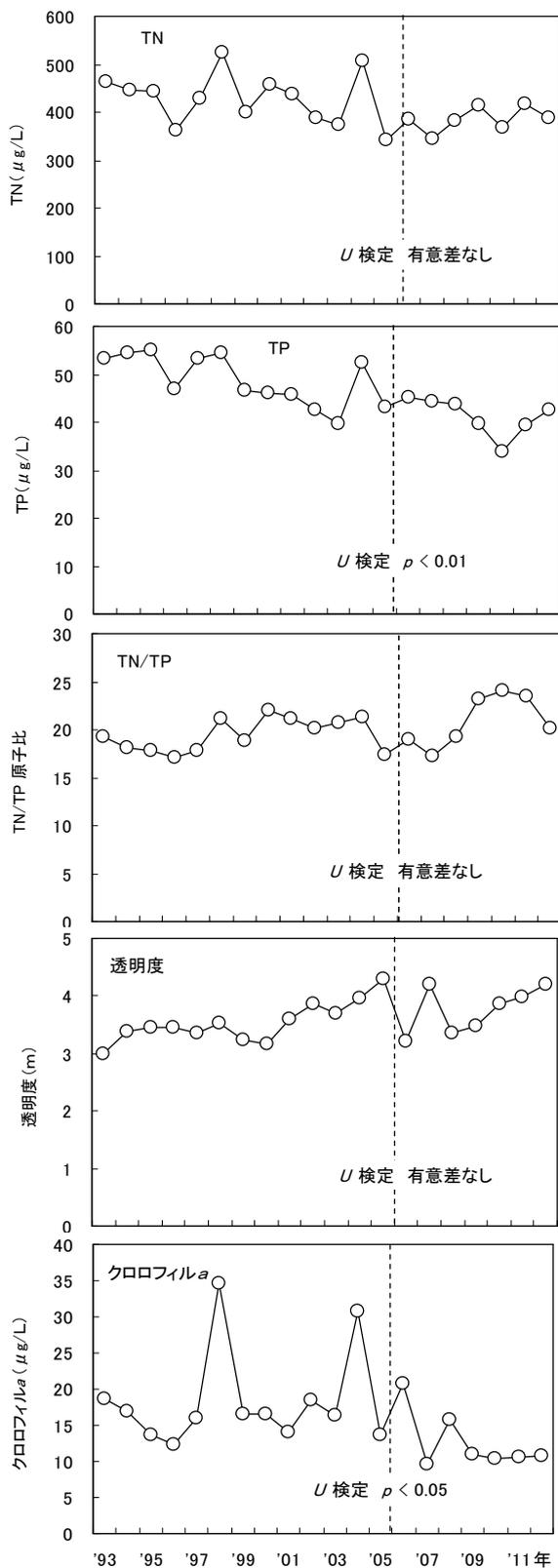


図3 三河湾における水質環境の変化

143.1 日/年であり 27 %の減少であった。

(2) 水質環境

「公共用水域水質調査」³⁾による TN, TP, TN/TP, 透明度, クロロフィル *a* の推移を図 3 に示した。

TN は頻発期と減少期で有意差はなく, 20 年間の平均値は 414.0 $\mu\text{g/L}$ であった。

TP は頻発期と減少期で有意 ($p < 0.01$) に減少しており, その平均値はそれぞれ 48.8 $\mu\text{g/L}$ と 41.3 $\mu\text{g/L}$ であり 15 %の減少であった。

TN/TP は頻発期と減少期で有意差はなく, 20 年間の平均値は 20.0 であった。

透明度は頻発期と減少期で有意差はなく, 20 年間の平均値は 3.6 m であった。

クロロフィル *a* は頻発期と減少期で有意 ($p < 0.05$) に減少しており, その平均値はそれぞれ 18.3 $\mu\text{g/L}$ と 12.7 $\mu\text{g/L}$ であり 31 %の減少であった。

考 察

(1) 赤潮発生状況の変化

1993 年から 2012 年の 20 年間について, 三河湾における赤潮発生状況と水質環境の変化を整理したところ, 鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数が 2006 年以降に大きく減少しているのがきわめて特徴的であった。そのため, 頻発期 (1993~2005 年) と減少期 (2006~2012 年) の 2 期間に分け Mann-Whitney *U* 検定を行った。その結果, 統計的に有意であったものは, 鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数の減少 ($p < 0.05$), 珪藻類の赤潮発生件数の増加 ($p < 0.05$), 全種類の赤潮発生延べ日数の減少 ($p < 0.05$), TP の減少 ($p < 0.01$), クロロフィル *a* の減少 ($p < 0.05$) であった (図 2, 3)。

鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数の減少, 珪藻類の赤潮発生件数の増加, 全種類の赤潮発生延べ日数の減少など赤潮発生状況の変化は複雑だが, 赤潮の目安となっているクロロフィル *a* が有意に減少していることから, 近年の三河湾における赤潮発生状況は改善傾向にあると判断される。

(2) 赤潮の減少要因

赤潮の発生に関与する要因については, 植物プランクトンの生産に必要な栄養塩類の供給と植物プランクトンに対する摂食圧の 2 つが考えられる。栄養塩類の TN については有意差がなく, TP については有意差が認められたため要因の 1 つとして考えられる。摂食圧については, 動物プランクトン, マイワシ等の魚類, 二枚貝類等のマクロベントスが考えられる。⁴⁻⁶⁾ 赤潮になりうるような高い植物プランクトンの生産があっても, それを摂食す

る動物プランクトン、マイワシ等の魚類、二枚貝類等のマクロベントスが存在していれば赤潮にならないとされている。⁶⁾動物プランクトンやマイワシ等の魚類が2005年頃に大きく変動したという情報は得ていないため、二枚貝類等のマクロベントスによる摂食圧が赤潮の発生に関与する要因であると考えられる。

愛知県におけるアサリの漁獲量^{7, 8)}の推移を図4に示した。2006年から2008年にかけて漁獲量が大きく増加し、その後も高い状態を維持している。頻発期と減少期(2011年まで)での漁獲量の平均値は、それぞれ11,130トンと16,003トンであり44%の増加である($p < 0.01$)。漁獲量の増加は以下の2つによるものである。1つは三河湾東部に位置する六条潟から湾内各地へのアサリ稚貝の移植放流量が2002年以前の年間約1,000トンから2003年以後の年間約3000トンへと3倍に増加⁹⁾していること。2つは1998年から2004年にかけて三河湾で計620haの干潟・浅場造成事業が行われ、¹⁰⁾アサリを含むマクロベントスの生息域が急速に拡大したことである。

主要なマクロベントスであるアサリの摂食圧を評価するためには、その資源量とろ過水量を求める必要がある。三河湾において、アサリ漁獲量から資源量を推定した報告¹¹⁾によると漁獲量は資源量の約30%であるとされている。したがって、頻発期の平均漁獲量は11,130トンであることから資源量は37,101トンと計算される。減少期の平均漁獲量は16,003トンであることから資源量は53,343トンと計算される。アサリ資源量からアサリのろ過水量を求めるため、次の2つの方法で計算を行った。1つはアサリ1個体あたりのろ過速度から求める方法、もう1つはアサリ軟体部含有窒素量あたりのろ過速度から求める方法である。

まず、1個体あたりのろ過速度からろ過水量を求める。上記の資源量推定時¹¹⁾のアサリの平均サイズは殻長24mm、殻付き湿重量3.8gだったので、頻発期の個体数は $9,763 \times 10^6$ 個体、減少期は $14,037 \times 10^6$ 個体と計算される。三河湾の年平均水温 17.6°C ³⁾で殻長24mmのアサ

リは8.0L/日の海水をろ過する¹²⁾とされているので、頻発期のろ過速度は $0.078 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$ 、減少期は $0.112 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$ と計算される。これらの値から三河湾の海水の全量($5.54 \times 10^9 \text{ m}^3$)¹⁾をろ過するのに要する日数を求めると、頻発期で71日、減少期で50日と計算され30%の短縮となる。

次にアサリ軟体部含有窒素量あたりのろ過速度からろ過水量を求めてみる。三河湾の干潟での現場測定において、アサリのろ過速度を測定した報告¹³⁾によると軟体部含有窒素量あたりのろ過速度は33.5L/gN/hとされている。この値とアサリ殻付き湿重量の窒素含量(0.0045gN/g wet)¹⁴⁾からろ過速度を求めると0.15L/g wet/hと計算され、殻付きアサリ1gは3.6L/日(0.15L/g wet/h \times 24h)の海水をろ過することになる。この値と先に求めた資源量からろ過速度を求めると頻発期と減少期でそれぞれ $0.134 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$ と $0.192 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$ と計算される。これらの値から三河湾の海水の全量($5.54 \times 10^9 \text{ m}^3$)¹⁾をろ過するのに要する日数を求めると頻発期で42日、減少期で29日であり31%の短縮となる。なお、個体数から求めたろ過速度(頻発期 $0.078 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$ 、減少期 $0.112 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$)よりも軟体部含有窒素量から求めたろ過速度(頻発期 $0.134 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$ 、減少期 $0.192 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$)が1.7倍高いが、これは、前者が年平均水温(17.6°C)でのろ過速度であり、後者が9月(24.1°C)でのろ過速度であることに起因している。

三河湾の赤潮が減少した要因として、摂食圧について考察した。アサリの摂食圧の増加率(30~31%)は全種類の赤潮発生延べ日数の減少率(27%)やクロロフィルaの減少率(31%)とよく一致したものとなった。赤潮の減少に関与するものとしてTPの減少も要因の1つとして考えられたが、その減少率は15%とかなり小さなものとなっている。また、TPのグラフ(図3)は単調な減少であるのに対し、アサリの漁獲量のグラフ(図4)は2007年以降に急激な増加を示している。この2つのグラフの形状からも三河湾の赤潮が2006年以降に急激に改善した要因として、アサリ等の二枚貝類による摂食圧の増加が最も強く示唆された。

鈴木ら¹⁰⁾は三河湾の赤潮を減少させるためには、陸域からの流入負荷削減よりも摂食圧の増加が効果的であると指摘している。本報告でもTPの減少よりも摂食圧の増加により三河湾の赤潮発生延べ日数及びクロロフィルaが急激に減少することが示唆された。したがって、赤潮やそれに起因する貧酸素水塊を抑制するためには、アサリ稚貝の移植放流や干潟・浅場造成でアサリを始めとするマクロベントスの摂食圧を増加させることが効果的



図4 愛知県のアサリ漁獲量の変化

な施策ではないかと考えられた。

(3) 鞭毛藻類と珪藻類の赤潮発生状況の相違要因

次に鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数の減少と珪藻類の赤潮発生件数の増加について考察する。

1993年から2012年までの20年間の赤潮発生延べ日数の合計値が多かった鞭毛藻類の上位3種 (*Prorocentrum* spp., *Noctiluca scintillans*, *Heterosigma akashiwo*) の赤潮発生延べ日数を図5に示した。*N. scintillans* の赤潮発生延べ日数が頻発期と減少期で有意 ($p < 0.01$) に減少しており、その平均値はそれぞれ40.4日/年と13.3日/年であり67%の減少であった。鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数(図2)の減少は、*N. scintillans* の赤潮発生延べ日数の減少が大きく影響している。その他の2種の鞭毛藻類 (*Prorocentrum* spp., *H. akashiwo*) に有意差はないが減少期で延べ日数が大きく減少している傾向に変わりはない。*N. scintillans* の赤潮発生延べ日数が有意に減少した要因は *N. scintillans* の餌不足と *N. scintillans* への摂食圧の増大が考えられる。*N. scintillans* は従属栄養であり、その餌は珪藻・鞭毛藻などの植物プランクトン^{15, 16)}、原生動物やデトライタス¹⁵⁾である。また、富栄養化により著しく増加するとされている。¹⁵⁾ 水質総量削減制度による富栄養化の改善¹⁷⁾と二枚貝類による摂食圧の増加により、*N. scintillans* の餌が減ったことや *N. scintillans* 自身が摂食されたため本種が減少したのではないかと考えられる。

鞭毛藻類には魚介類のへい死や貝毒の原因となる種類が多い。三河湾において麻痺性貝毒の原因となる鞭毛藻類の *Alexandrium* spp. のシストを調査した報告^{18, 19)}によると2002年¹⁸⁾の三河湾におけるシスト数は平均1,831 cysts/cm³であったのに対し、2011年¹⁹⁾は591 cysts/cm³であったとされている。頻発期と減少期でシスト数が3分の1にまで減少していることになる。このことから、三河湾では頻繁に赤潮を構成する鞭毛藻類だけでなく鞭毛藻類全般が急激に減少しているのではな

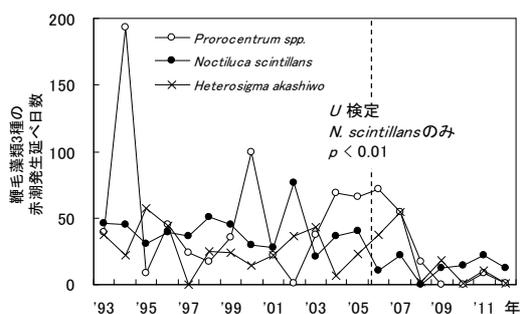


図5 鞭毛藻類の赤潮構成種上位3種類の赤潮発生延べ日数の変化

いかと推察される。

20年間の赤潮発生件数の合計値が多かった珪藻類上位3種 (*Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Eucampia* spp.) の赤潮発生件数を図6に示した。*Skeletonema* spp. の赤潮発生件数は頻発期と減少期で有意 ($p < 0.01$) に増加しており、その平均値はそれぞれ8.1件/年と11.3件/年であり40%の増加であった。珪藻類の赤潮発生件数(図2)の増加は *Skeletonema* spp. の赤潮発生件数の増加が大きく影響している。珪藻類の発生件数が有意に増加し、延べ日数に有意差がないことから珪藻類の赤潮が短期化していると推定される。一般的に珪藻類の増殖速度は鞭毛藻類のそれより速いとされており、²⁰⁾ 珪藻類は栄養塩の供給に伴い速やかに増殖できるが、摂食圧が高い状況下ではすぐに摂食されてしまう。このことが珪藻類赤潮の短期化につながっているように思われるが、今後の詳細なモニタリングによる検証が必要である。

要約

1993年から2012年までの三河湾における赤潮発生状況及び水質環境の変化を調べた。鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数が多かった1993年から2005年までの期間と鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数が少なかった2006年から2012年までの期間について、赤潮発生状況や水質環境を比較した。鞭毛藻類の赤潮発生延べ日数が多かった期間に比べ延べ日数が少なかった期間は、全種類の赤潮発生延べ日数が195.8日/年から143.1日/年に有意に減少し、クロロフィルaも18.3 μg/Lから12.7 μg/Lへと有意に減少していた。この減少要因についてTPの減少と摂食圧の増加の2つが考えられたが、アサリ漁獲量の増加傾向やアサリの摂食圧の計算結果から、赤潮とクロロフィルaの減少は摂食圧の増加が主因であると推察された。

謝辞

今回の報告に用いたデータは、過去の多くの水産試験場職員により、地道に積み重ねた資料を用いさせて頂い

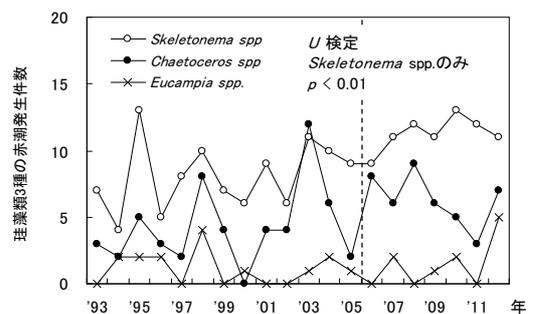


図6 珪藻類の赤潮構成種上位3種の赤潮発生件数の変化

た。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- 1) 西条八束 (1984) 内湾の富栄養化. 内湾の環境科学, 培風館, 東京, 1-37.
- 2) 愛知県水産試験場 (1994~2013) 平成 5~24 年伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況.
- 3) 愛知県環境部 (1994~2013) 平成 5~24 年度公共用水域水質測定結果.
- 4) 青山裕晃・鈴木輝明 (1996) 干潟の水質浄化機能の定量的評価. 愛知県水産試験場研究報告, 3, 17-28.
- 5) 青山裕晃・甲斐正信・鈴木輝明 (1999) 簡易な数値モデルを利用した干潟における有機懸濁物除去速度の算出. 愛知県水産試験場研究報告, 6, 5-12.
- 6) Suzuki T, Ishii K, Imao K, Matsukawa Y (1987) Box model analysis on phytoplankton production and grazing pressure in a eutrophic estuary. J. Oceanographical Soc. Japan, 43, 261-275.
- 7) 愛知県農林水産部水産課 (1994~2001) 漁業の動き.
- 8) 愛知県農林水産部水産課 (2002~2013) 水産業の動き.
- 9) 愛知県水産試験場 (2012) 1-2 愛知県における二枚貝生産の現状とノリ生産及び色落ちに関する現状. ノリ色落ち対策に寄与する二枚貝増殖技術ガイドライン, 独立行政法人水産総合研究センター増養殖研究所, 三重県, 5.
- 10) 鈴木輝明・大橋昭彦・和久光靖 (2011) 内湾の水質環境の現状と課題. 海洋と生物, 33 (2), 117-126.
- 11) 愛知県水産試験場 (2012) 4-2-3 ノリ漁場栄養塩動態モデルの開発-①関連パラメータ: アサリ現存量. ノリ色落ち対策に寄与する二枚貝増殖技術ガイドライン, 独立行政法人水産総合研究センター増養殖研究所, 三重県, 41.
- 12) (独)水産総合研究センター増養殖研究所 (2012) 2-3-1 微細餌料藻類を用いたアサリの植物プランクトンろ過能力・栄養塩添加能力の評価. ノリ色落ち対策に寄与する二枚貝増殖技術ガイドライン, 独立行政法人水産総合研究センター増養殖研究所, 三重県, 17-18.
- 13) 青山裕晃・鈴木輝明 (1997) 干潟上におけるマクロベントス群集による有機懸濁物除去速度の現場測定. 水産海洋研究, 61(3), 265-274.
- 14) 鈴木輝明・青山裕晃・中尾 徹・今尾和正 (2000) マクロベントスによる水質浄化機能を指標とした底質基準試案-三河湾浅海部における事例研究-. 水産海洋研究, 64(2), 85-93.
- 15) 福代康夫・高野秀昭・千原光雄・松岡数充 (1990) 日本の赤潮生物-写真と解説-. 日本水産資源保護協会, 東京, pp407.
- 16) Suzuki T, Yamamoto K, Narasaki T (2013) Predation pressure of *Noctiluca scintillans* on diatoms and thecate dino flagellates off the western coast of Kyushu, Japan. Plankton Benthos Res, 8(4), 186-190.
- 17) 環境省 (2010) 閉鎖性海域中長期ビジョン. 環境省ウェブページ.
- 18) 石川 輝・服部真由子・宮間秀樹・今井一郎 (2007) 伊勢湾および三河湾の海底泥表層における *Alexandrium* 属シストの現存量と分布. 水産海洋研究, 71(3), 183-189.
- 19) 中嶋康生・柘植朝太郎・竹内喜夫 (2012) 有毒プランクトン増殖機構解明試験. 平成 23 年度愛知県水産試験場業務報告, 86.
- 20) 飯塚昭二・上 真一 (1987) 赤潮の生態学的諸問題. 赤潮の科学, 恒星社厚生閣, 東京, 91-148.