

ノート

## 伊勢湾における貧酸素水塊発生時の植物プランクトン種の特徴について

足立敦子, 巽 正志\*, 齋藤麻衣, 国分秀樹\*\*, 仲野申一\*\*\*, 小林利行\*\*\*\*  
秋永克三, 前川行幸\*\*\*\*\*

### Characteristics of Phytoplankton at Occurrence of Hypoxic Water in Ise Bay

Atsuko ADACHI, Masashi TATSUMI, Mai SAITOH, Hideki KOKUBU,  
Shinichi NAKANO, Toshiyuki KOBAYASHI, Katsumi AKINAGA and Miyuki MAEGAWA

伊勢湾の重要な環境問題のひとつとして、貧酸素水塊の発生が挙げられる。三重県水産研究所が実施している浅海定線観測調査において、貧酸素水塊の直上でクロロフィルa濃度の極大が観測された。この現象は過去の調査でも頻繁にみられていた。そこで、貧酸素水塊発生時に伊勢湾湾央地点の表層水と貧酸素水塊の直上でクロロフィルa濃度の極大が観測された中層水を採水し、植物プランクトン種の同定を行ったところ、表層水では、珪藻が多くみられたのに対し、中層水では、渦鞭毛藻が多かった。渦鞭毛藻は運動性をもつため、生育に適した溶存酸素濃度および栄養塩類を豊富に含む環境に生息し、躍層下層域の物質循環に寄与していると考えられた。

キーワード：伊勢湾，貧酸素水塊，植物プランクトン種，栄養塩類

#### はじめに

伊勢湾（三河湾を除く）は中央部がすり鉢状で幅約20kmの狭い湾口部に島嶼が存在するため、外海との海水交換が少ない特性を持ち、東京湾や瀬戸内海等と同様の閉鎖性の高い海域である<sup>1)</sup>。伊勢湾の海水流動は、北部は時計回りの環流、南部では反時計回りの環流が卓越し、海水が湾内に滞留しやすい環境である<sup>1)</sup>。2009年12月に三重県が行った調査<sup>2)</sup>によると、湾内に海水が留まりやすく、三重県の松阪沖に粘土が堆積していることが報告されている。陸域から流入する汚濁負荷削減に対する取り組みとして、水質総量規制制度を1980年から導入し、水環境の改善を行ってきた。2010年3月に報告された「閉鎖性海域中長期ビジョン」<sup>3)</sup>によると、1980年度から導入された化学的酸素要求量(COD)については、1979年から2004年までに

39%削減され、2002年から実施された全窒素(T-N)、全りん(T-P)については、1999年から2004年までにそれぞれ、10%、29%削減されたと報告されている。陸域からの有機汚濁物質の削減によって高濃度汚濁域は減少しているが、未だに海域の環境基準達成率の低迷が続いている<sup>3)</sup>。閉鎖性海域の環境改善の阻害要因の1つとして貧酸素水塊の発生が挙げられる。底層が貧酸素状態(DO=2mg/L以下)になると水産資源や底生生物に対し悪影響を与える<sup>3)</sup>ほか、底泥からの栄養塩類の再溶出を引き起こし、水環境の改善を阻害する<sup>4)</sup>。三重県水産研究所が実施している浅海定線観測調査の結果<sup>5)</sup>をみると、2009年から2013年の測定結果では、貧酸素水塊がおおよそ6月から10月にかけて湾央を中心に広い範囲で観測されていた。湾央で貧酸素水塊が発生する時、貧酸素水塊の直上付近でクロロフィルa

\* 三重県環境生活部廃棄物監視・指導課

\*\*\* 桑名広域清掃事業組合事務局建設準備室

\*\*\*\*\* 三重大学大学院生物資源学研究所

\*\* 三重県水産研究所鈴鹿水産研究室

\*\*\*\* 三重県環境生活部大気・水環境課

濃度の極大がみられた。植物プランクトンはクロロフィルaを含む葉緑体を持っている。植物プランクトンの増殖により水中の有機物量が増加し、死後デトリタスとして底層に沈降し、細菌による有機物の分解に伴い酸素が消費されるなど、植物プランクトンを介した食物連鎖は海域での物質循環を考える上で重要であるが<sup>6)</sup>、伊勢湾の貧酸素水塊直上に発生する植物プランクトン種の調査例はない。そこで、三重県が実施している伊勢湾再生行動計画事業の一環として、貧酸素水塊直上に発生する植物プランクトン種の特徴を調査し、貧酸素水塊の発生に伴い中層域で観測される植物プランクトンの役割について検討するため調査を行った。

## 調査方法

### 1. 調査地点

三重県水産研究所が毎月実施している伊勢湾浅海定線調査時に、図1に示す地点(St.10)で採水を行った。St.10は水深約32 m、伊勢湾のすり鉢状の最も深い湾中央付近に位置し、伊勢湾の中でも貧酸素水塊がほぼ毎年発生し、なおかつ長期間継続する地点のひとつである。

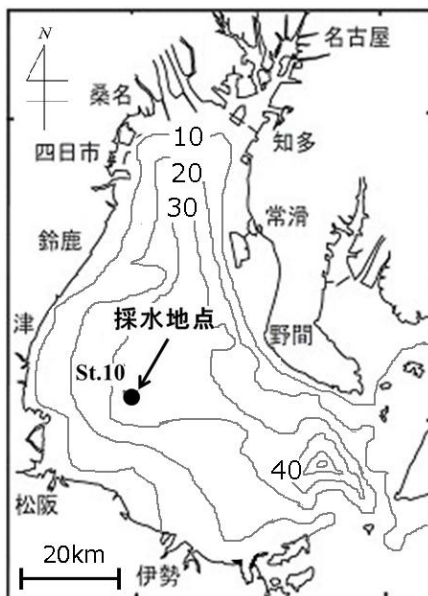


図1 採水地点

### 2. 調査期間

貧酸素水塊が発生していた2013年9月と貧酸素水塊が解消した11月の各月ごとに1回の調査を実施した。

### 3. 採水方法

表層水と中層水の採水水深は次のとおり決定し

た。調査船「あさま」に搭載されている多項目水質測定装置Sea-Bird社製 SBE-911plus CTD諸元によりリアルタイムで観測されるDOおよびクロロフィルa濃度により、水深2m付近に観測されたクロロフィルa濃度の極大地点を表層水とした。また、水深15-20m付近において、貧酸素水塊の直上でクロロフィルa濃度の極大が観測された地点を中層水とした。なお、貧酸素水塊解消期の11月は溶存酸素が底層まで貧酸素状態にならなかったため、9月の採水深度を参考にして中層水の採水を行った。また海底直上50cmを底層水とした。具体的な各月の採水深度は、それぞれ9月は表層2m、中層15m、底層 31.5m、11月は表層2m、中層20m、底層31.5mである。採水はCTD諸元を底層から表層への上昇時にCTD諸元に連結させたニスキン採水器により行った。

### 4. 分析項目および方法

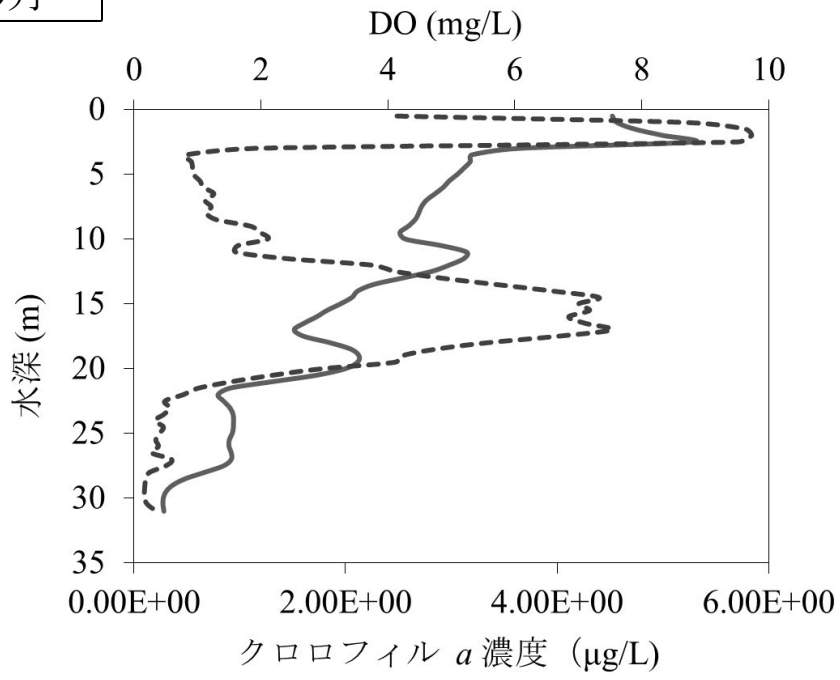
植物プランクトン種の同定については、各採水深度ごとに1.2Lのポリ容器に1L採水後、採水量に対しホルマリンを5%相当(v/v)入れて固定し、検鏡により実施した。DO、クロロフィルa濃度、水温、塩分濃度および密度については、調査船あさまのCTD諸元から得られたデータを使用した。pHはHORIBA製 pHメータ D-51、酸化還元電位(ORP)は東亜ディーケーケー株式会社製 ポータブルORP計 RM-30Pを用いて現場で測定を行った。表層および中層の栄養塩類(NO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P)は分析まで-20°Cで保存し、後日これらを解凍し、GF/Fフィルターでろ過後、ビーエルテック株式会社製 オートアナライザー SWAATにより測定を行った。濁度については、採水当日に三菱化学アナリテック株式会社製 SEP-PT-706D 積分球式濁度計により測定を行った。CODについては、JIS K 0102 (2013) 17に基づき測定を行った。なお、底層の水温とpHおよび栄養塩類は浅海定線調査データ<sup>5)</sup>を使用した。

## 結果および考察

### 1. St. 10における水質の鉛直分布について

図2に9月、11月のSt.10におけるDOとクロロフィルa濃度の鉛直分布を示す。9月は水深20m以深でDOが2mg/L以下に低下し、貧酸素水塊の発生が見られた。クロロフィルa濃度は、水深2mと15m付近の2箇所にて極大がみられた。11月は貧酸素水塊が解消され、クロロフィルa濃度も水深が深くなるにつ

9月



11月

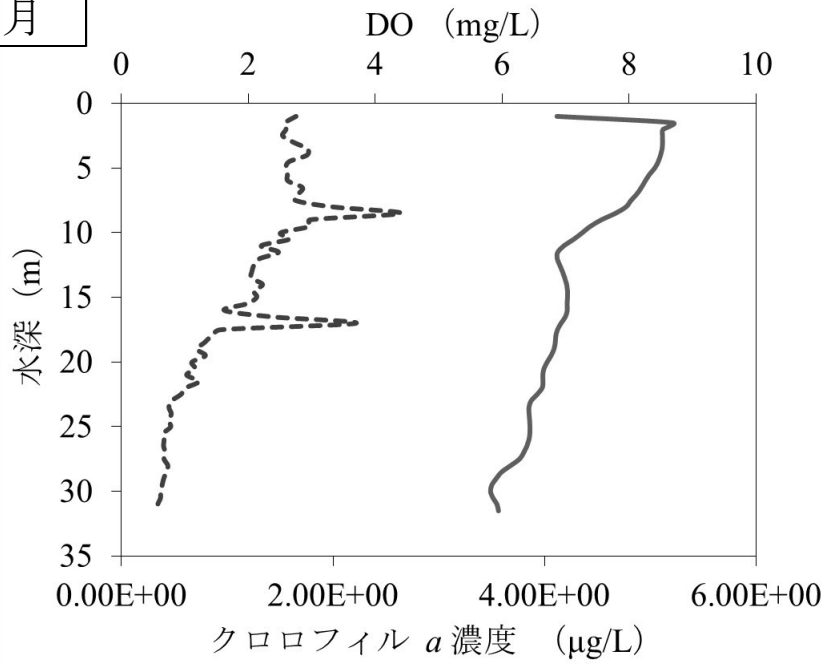


図2 DOおよびクロロフィル*a*濃度の水質鉛直濃度分布  
(実線はDO, 破線はクロロフィル*a*濃度を示す)

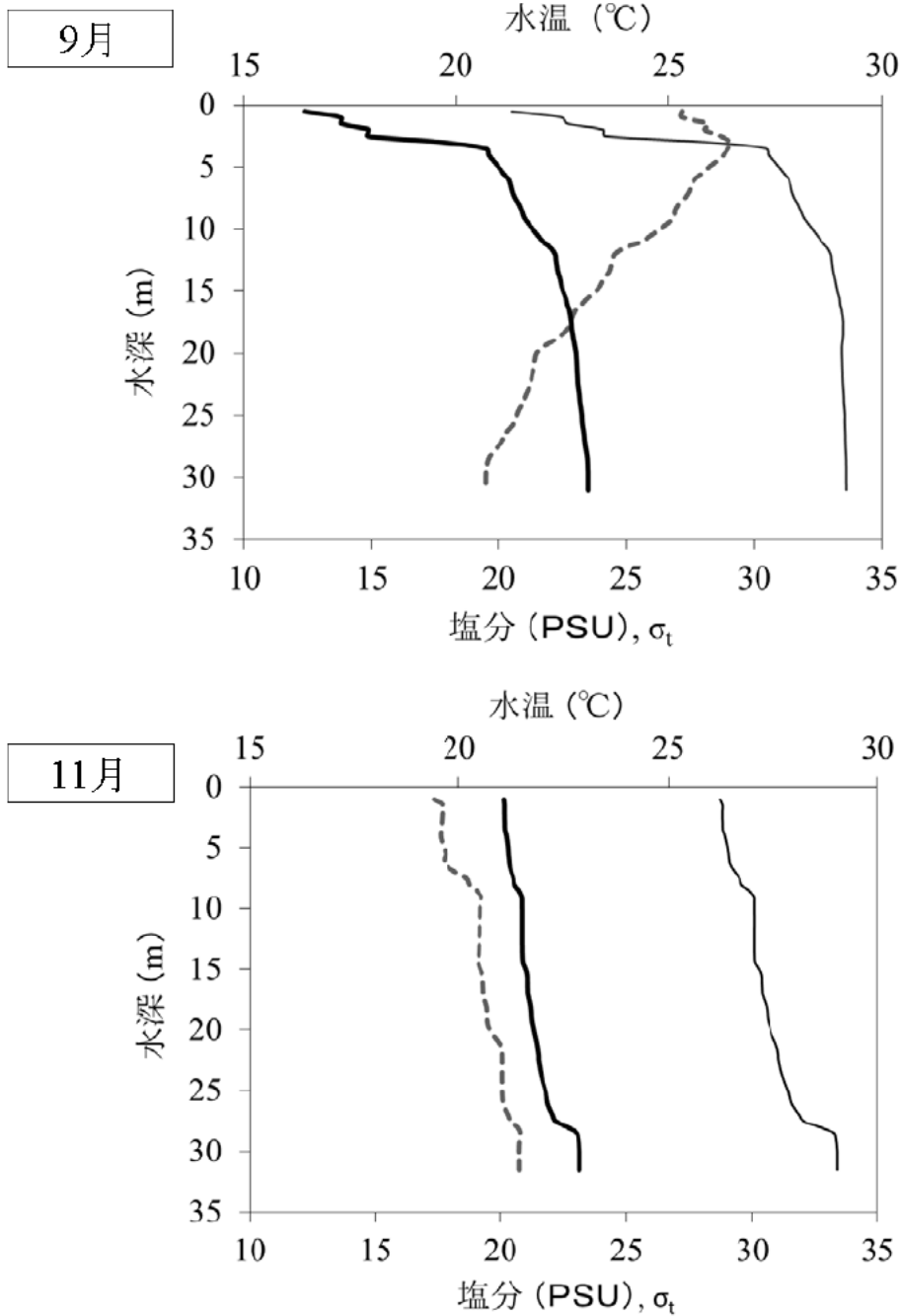


図3 水温，塩分および $\sigma_t$ の水質鉛直分布  
(太い実線は $\sigma_t$ ，細い実線は塩分濃度，破線は水温を示す)

れ減少し，9月と比較して中層域に大きなクロロフィル極大は観測されなかった．図3に9月，11月の鉛直方向における水温，塩分および密度 ( $\sigma_t$ ) の変動を示す． $\sigma_t$  は水温と塩分パラメータにより算出されており，沿岸域では，塩分パラメータの寄与が大きい<sup>7)</sup>．9月は海面付近の塩分濃度が低く，水深5m付近で塩分濃度が大きく増加していた．これは，2013年9月4日に到来した台風17号に伴う雨

水による陸域からの河川水流入量増加の影響により，表層付近は塩分濃度が低くなったと考えられる．水深5m付近で $\sigma_t$ 値が大きく変化することから水深5m付近に密度躍層が形成されており，この層を境に上層と下層では，物質循環の鈍化が推測された．一方，11月は上層から下層にかけて水温と塩分濃度の鉛直的な差はほとんどなく，混合層が発達したと考えられた．

## 2. 表層および中層の栄養塩濃度の分布について

図4に9月、11月の表層、中層および底層の栄養塩濃度を示す。9月の貧酸素水塊発生期には、底層から中層にかけて溶存態無機リン(DIP)が高濃度であったのに対し、11月の貧酸素水塊解消期には、鉛直方向におけるDIPの濃度変化がほぼみられなかった。本測定結果は既報の研究結果<sup>8)</sup>と一致していた。また、溶存態無機窒素(DIN)濃度についてもDIPと同様に9月の底層で高い傾向がみられ、リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)やアンモニア性窒素(NH<sub>4</sub>-N)の底泥からの溶出が確認された。DINについて、硝酸態窒素および亜硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N)とNH<sub>4</sub>-Nの形態別窒素量を図5に示す。9月は成層構造が形成されているため、表層は陸域流入由来の栄養塩類が多いと考えられる。

9月の中層の形態別窒素量をみるとNO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N共に底層より低い値となっていた。この理由として、生物が生息可能な酸素量がある中層域で底層から溶出したDINが消費されていることが推察された。図4のDIN/DIP比をみると9月の中層および底層は11月と比較して低い値を示した。東京湾でも夏季のDIN/DIP比が低い値であることが報告されており<sup>9)</sup>、低い要因として貧酸素水塊発生時は底泥からの溶出によってDIPが増加すること、脱窒能を有するバクテリアにより脱窒が促進されDINが減少することが挙げられている。実際、2012年に伊勢湾の細菌叢を調査した結果では、9月のSt.10の底層で*Alkalilimnicola* spp. を始めとした脱窒菌の存在割合が高いことが確認された<sup>10)</sup>。

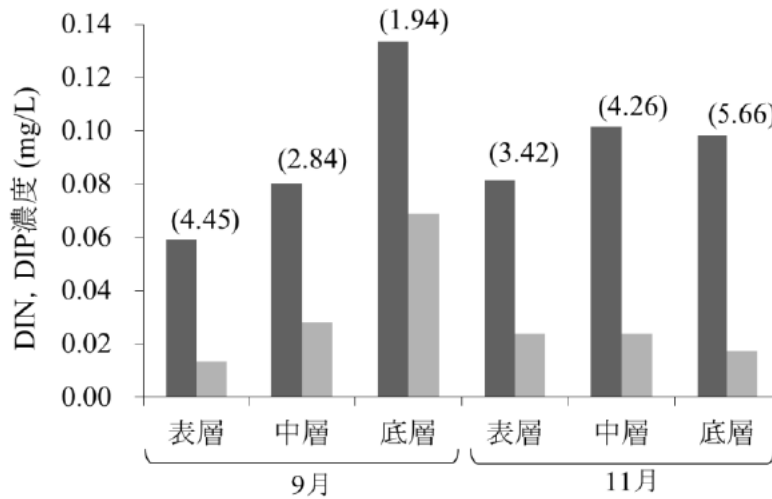


図4 DINおよびDIP濃度分布

■ DIN (mg/L) , ■ DIP (mg/L) , ( ) 内はDIN/DIP比

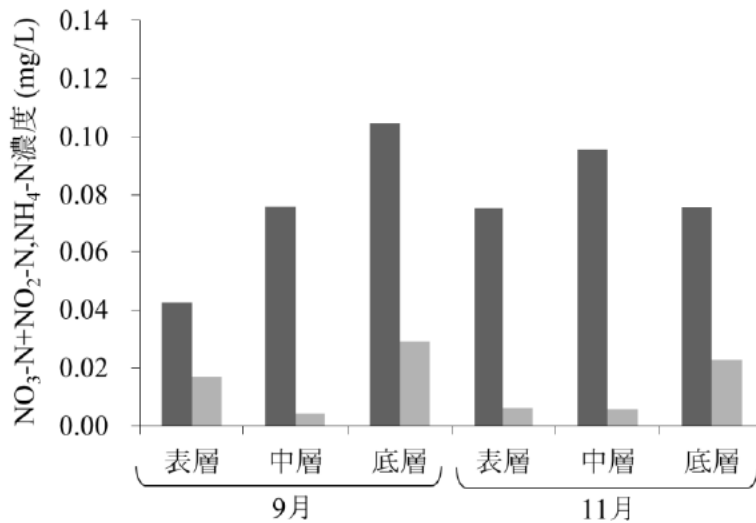


図5 NO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-NおよびNH<sub>4</sub>-N濃度分布

■ NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N (mg/L) , ■ NH<sub>4</sub>-N (mg/L)

### 3. その他の生物・化学的調査項目について

その他の理化学的調査結果一覧を表1に示す。pHについては、9月と11月および表層と中層で大きな違いはみられなかった。ORPについても大きな違いは見られず、プラスの値であることから中層付近までは還元的な環境にはなっていないことがわかった。濁度は貧酸素の有無に関係なくいずれの月も表層が高い値を示した。11月の表層より9月の中層の値が高いことは、図2の9月と11月のクロロフィルa濃度の違いと一致していた。CODについては、表層と中層での大きな違いはなかった。9月と11月を比較すると、9月のCOD値が高いことから、貧酸素水塊発生期に有機汚濁量が多いことがわかった。東京湾内におけるCODの月変化を調査した研究結果<sup>11)</sup>では、夏季にCOD濃度が上昇する要因として、植物プランクトンの増殖による二次汚濁の影響が強いと報告されている。次項で示すとおり、今回の植物プランクトンの測定結果も9月と11月を比較すると、9月の植物プランクトン数がより多く検出されたため、9月のCOD値が11月より高い理由として東京湾と同様の理由であると考えられた。

### 4. 植物プランクトン種の分布について

9月および11月の表層と中層において同定された植物プランクトン組成を表2に示す。貧酸素水塊発生期の9月は表層に珪藻が多くみられたのに対し、中層では渦鞭毛藻が多かった。解消期の11月

は表層、中層ともに珪藻が多く、鉛直方向による違いはなかった。各地点で多く見られたプランクトン種上位3種は9月の表層では珪藻の *Skeletonema costatum* (図6a.)、*Pseudo-nitzschia* spp., *Thalassiosira* spp. が多く見られた。9月の中層は渦鞭毛藻の *Ceratium fusus* (図6b.)、珪藻の *Thalassiosira* spp. および *S. costatum* が出現していた。11月は表層と中層で出現順位は前後するものの、珪藻の *Thalassionema nitzschioides* (図6c.) や *S. costatum*、ハプト藻の一種がみられた。表層の優占種である珪藻 *S. costatum* は比較的高温で低塩分の海域に出現する種であるのに対し、中層の優占種である渦鞭毛藻 *C. fusus* は比較的低温で高塩分の海域に出現する種であり、また栄養塩類に関しては *S. costatum* に比べ *C. fusus* の方が DIN, DIP ともに高い濃度水域に出現することが報告されている<sup>12)</sup>。渦鞭毛藻は珪藻に比べ、運動性が高いことから生存可能なDOがあり、かつ栄養塩類が豊富に存在する貧酸素水塊直上に存在していたと今回の調査から推測された。中層で多く見られた渦鞭毛藻は、栄養塩類を吸収し、炭素固定を行うほか、動物プランクトンや原生動物による捕食や、死亡して懸濁態有機物になるなど下層での物質循環に寄与している可能性が推測された。今回中層で渦鞭毛藻が多くみられた一方で、中層の DIN/DIP 比が低いことから、底層から中層域にかけての生物・化学的な物質循環について更なる調査が必要であると考えられる。

表1 9月および11月における各測定項目結果

測定項目	9月			11月		
	表層	中層	底層	表層	中層	底層
採水深度 (m)	2.0	15.0	31.5	2.0	20.0	31.5
水温 (°C)	26	24	21	20	21	21
pH	8.2	7.9	7.9	8.1	8.0	8.1
ORP (mV)	124	120	-	115	115	-
濁度 (度)	6.00	2.27	-	1.12	0.40	-
COD (mg/L)	2.2	2.1	-	1.5	1.3	-



表2 9月および11月における植物プランクトン組成

プランクトン組成	9月		11月	
	表層	中層	表層	中層
クリプト藻綱	17,600	960	12,800	160
渦鞭毛藻綱	4,800	310,160	12,480	1,440
黄金色藻綱	3,360	960	240	0
珪藻綱	6,487,200	40,800	120,960	63,040
ハプト藻綱	0	0	24,000	15,600
ユーグレナ藻綱	0	0	960	0
プラシノ藻綱	0	0	4,800	0
微小鞭毛藻綱	8,000	240	4,800	1,200
合計	6,520,960	353,120	181,040	81,440

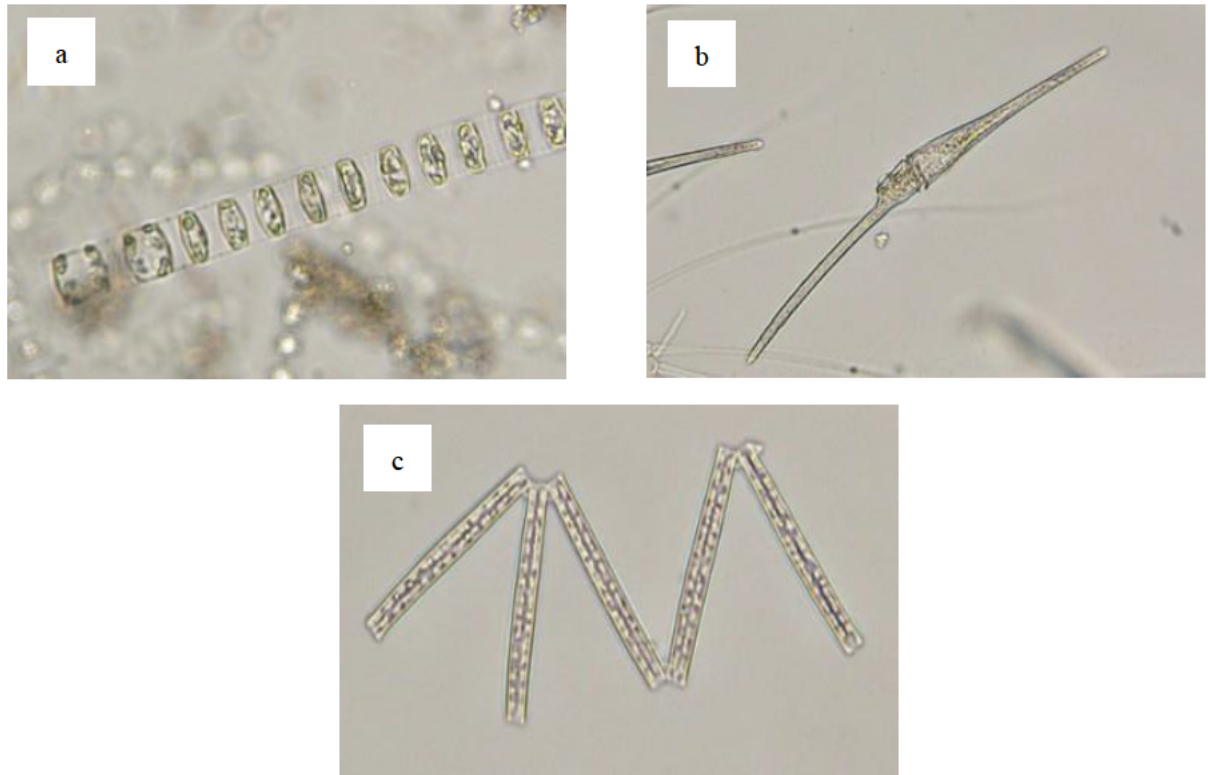


図6 伊勢湾湾央付近(St.10)に出現した主要植物プランクトン種  
(a. *Skeletonema costatum*, b. *Ceratium fusus*, c. *Thalassionema nitzschioides*)

## まとめ

伊勢湾湾央部に位置するSt.10では、貧酸素水塊発生期に貧酸素水塊直上にクロロフィル $a$ 濃度の極大が観測された。中層クロロフィル $a$ 極大の植物プランクトン種を調査したところ、表層とは異なる渦鞭毛藻*C. fusus*が多くみられた。渦鞭毛藻は運動性をもつ植物プランクトンであるため、自らの生育環境に適したDO、栄養塩類が存在する貧酸素水塊直上で多くみられ、下層での物質循環に寄与していると推測された。

## 謝辞

本研究は三重県水産研究所調査船あさまの協力により実施しました。ここに記して謝意を表します。

## 文献

- 1) 伊勢湾再生推進会議(2014)：伊勢湾再生行動計画(第1回見直し版)，[http://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/sai\\_ise/pdf/koudou\\_1.pdf](http://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/sai_ise/pdf/koudou_1.pdf)
- 2) 三重県，芙蓉海洋開発株式会社(2009)：伊勢湾海底の環境診断緊急雇用創出事業(底質調査)委託業務報告書。
- 3) 閉鎖性海域中長期ビジョン策定に係る懇談会(2010)：閉鎖性海域中長期ビジョン，[http://www.env.go.jp/press/file\\_view.php?serial=15178&hou\\_id=12192](http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=15178&hou_id=12192)
- 4) 笥 茂穂，藤原建紀，(2007)：伊勢湾の栄養塩動態：非保存的変化の季節変動，海の研究，**16**，437-453。
- 5) 三重県水産研究所，浅海定線観測結果，<http://www.mpstpc.pref.mie.lg.jp/SUI/suzuka/senkaiteisen/senkaiindex.htm>
- 6) 内藤了二，澤田 玲，(2011)：伊勢湾再生への取り組み～伊勢湾シミュレーターの開発について～，<http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h23giken/program/kadai/pdf/ippan/ippan3-01.pdf>
- 7) 第2節「海洋構造」，pp. 10-21. 藤原建紀，「沿岸の環境圏」，平野敏行監修，フジ・テクノシステム(1998)。
- 8) 笥 茂穂，藤原建紀，山田浩且，(2005)：海の研究，**14**，527-540。
- 9) 第4章第1節「総論-沿岸生態系における酸素，窒素，炭素およびリンの循環」，pp. 275-281. 佐々木克之，「沿岸の環境圏」，平野敏行監修，フジ・テクノシステム(1998)。
- 10) 異 正志，秋永克三，国分秀樹，坂下輝之，藤田修造，前川行幸，粟冠和郎，(2014)：伊勢湾底質における貧酸素水塊発生時の細菌叢の動態，第48回日本水環境学会年会講演集，145。
- 11) 風間真理，安藤晴夫，(2009)：東京都の内湾域における窒素汚染の実態，地球環境，**15**，171-178。
- 12) 吉田陽一，三嶋義人，佐藤正春，(1998)：東京湾奥域における主要植物プランクトンとDIN:DIP比等との相互関係，Nippon Suisan Gakkaishi，**64**，259-263。