

ノート

伊勢湾の水質構造調査

渡邊 卓弥, 奥山 幸俊, 有富 洋子, 辻 将治*, 大八木 麻希**, 千葉 賢**

Investigation of Distribution of Water Quality in Ise Bay

Takuya WATANABE, Yukitoshi OKUYAMA, Yoko ARITOMI,
Masaharu TSUJI, Maki OYAGI and Satoshi CHIBA

伊勢湾の伊良湖水道を挟んだ湾内から外海にかけて、鉛直方向の水質について調査したところ、伊勢湾内から外海にかけての縦断面の水質構造は、湾央では鉛直混合が弱く密度成層が生じ、底層付近では貧酸素水塊が広がる一方で、伊良湖水道付近では強い鉛直混合により、水質の一様化が生じていた。クロロフィル極大層は湾央から湾口にかけて水深 10m 付近に発生していた。また、光量子と栄養塩濃度のバランスが極大層の発生水深に影響を及ぼしていると考えられた。湾口から外海にかけては渦鞭毛藻類はほとんど存在せず、湾央付近においては、渦鞭毛藻類もある程度確認されたものの、それぞれ珪藻類が大多数を占めていた。

キーワード：伊勢湾，水質構造，植物プランクトン，貧酸素水塊

はじめに

伊勢湾は東西に約 30km、南北に約 70km、平均水深約 20m という、わが国最大の水域面積を持つ内湾であるが、湾口部には島々が存在し、外海との海水交換は幅約 4km という狭い伊良湖水道を介して行われるため、貧酸素水塊が発生しやすい地形となっている¹⁾。

貧酸素水塊は、溶存酸素量 (DO) が低くなった低酸素状態の水塊および水域を指し、夏季を中心に閉鎖性水域などの底層で発達しやすい。底層 DO が低くなると、底層生物は生息できなくなり、還元状態が促進されることで、硫化水素などの有害物質も発生することから、水環境および水産資源に悪影響を及ぼす。貧酸素水塊は、春季に水温成層が形成され、海底付近で冷水塊が発生することに端を発し、水の鉛直循環の弱体化によって底層への酸素供給が断たれることにより始まる。その中で、水中および底質中の有機物が分解されることによって酸素消費が進み、DO の低下した水域が形成されると考えられている²⁾。そこで、本調査では湾内と外海の水の循環に着目し、

伊良湖水道をはさんだ湾央から外海にかけての 6 地点各 4 層の水質データを取得し、伊勢湾内から外海にかけての縦断面の水質構造について考察した。

調査方法

1. 調査地点、採水日および採水方法

2018 年 8 月 2 日および 3 日に、四日市大学が実施した伊勢湾海洋調査実習において、湾央から外海にかけて図 1 に示す調査地点 B1~B6 の 6 地点各 4 層 (表層、中層、底層 (Bottom-1m) およびクロロフィル極大層 (以下、「極大層」という)) の海水を採取した。調査地点の座標を表 1、採取水深を表 2 に示す。

採水には CTD 装置搭載のニスキン採水器を用い、採取試料はポリエチレン製の瓶に入れて冷蔵保存し、8 月 4 日に保健環境研究所および鈴鹿水産研究室に搬入後分析を行った。植物プランクトンの検鏡に用いる試料については試料 900mL に 20% グルタルアルデヒド溶液を 100mL 混合することにより固定した。

* 三重県水産研究所鈴鹿研究室

** 四日市大学環境情報学部

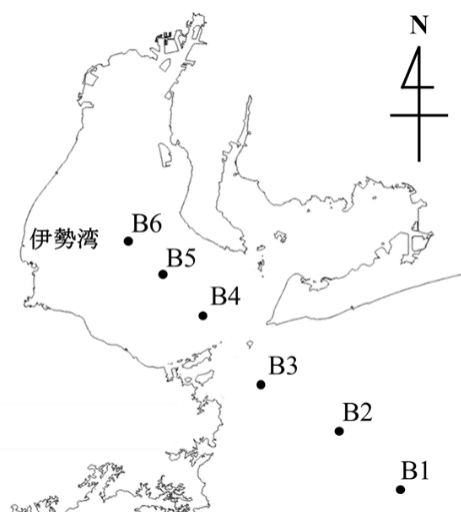


図1 伊勢湾内外における調査地点

表1 調査地点座標

世界測地系		
地点番号	北緯	東経
B1	34°19.3'	137°17.7'
B2	34°24.4'	137°10.2'
B3	34°29.4'	137°03.3'
B4	34°36.4'	136°53.0'
B5	34°40.0'	136°48.0'
B6	34°43.0'	136°45.0'

表2 各調査地点における採取水深

地点番号	表層(m)	中層(m)	底層(m)	極大層(m)
B1	0.5	27.7	48.1	8.6
B2	0.5	18.1	47.8	7.4
B3	0.5	8.3	17.7	5.8
B4	0.5	7.2	28.1	7.2
B5	0.5	8.7	32.8	8.7
B6	0.5	11.2	35.3	5.3

2. 水質構造調査

2-1. 測定項目

水温, 塩分, DO, クロロフィル a, 光量子量, 全有機炭素 (TOC), 溶存態有機炭素 (DOC), 懸濁態有機炭素 (POC), 化学的酸素要求量 (COD), 全窒素 (TN), 全リン (TP), 亜硝酸態窒素 (NO₂-N), 硝酸態窒素 (NO₃-N), アンモニア態窒素 (NH₄-N), リン酸態リン (PO₄-P), 植物プランクトンの細胞数および植物プランクトンの同定を測定項目とした。

2-2. 測定方法

水温, 塩分, DO, クロロフィル a および光量子量は採水現場において調査船搭載の CTD 装置で

測定を行った。CTD 装置の詳細については, 表 3 に示す。TOC, DOC, COD, TN, TP, NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N および PO₄-P の水質分析は表 4 に示す方法で行った。なお, DOC は 450°C で 2 時間焼成した GF/C ろ紙でろ過したろ液を用いて分析し, POC は, TOC から DOC を差し引いた値として求めた。また, 植物プランクトンは, 固定した試料から 1mL を採取し, プランクトン計数板に滴下し, 顕微鏡でプランクトンを種類ごとに計数した。

表3 CTD装置の詳細

CTD装置機器構成	測定項目	備考
水中ユニット モデルSBE-25	水温 電気伝導度(塩分)	
DOセンサー モデルSBE-43	DO	
海底高度計 PSA-916D	水深	
蛍光光度センサー Seapoint	クロロフィルa	
水中光量子センサー QSP-2300	光量子(水中)	400-700nmで均等量レスポンス 700nm以上400nm以下で急激に減衰
空中光量子センサー QSR-2200	光量子(水面)	400-700nmで均等量レスポンス 700nm以上400nm以下で急激に減衰

表4 水質分析方法

分析項目	分析方法	使用機器
TOC	JIS K0102 22.2	島津製作所製
DOC	JIS K0102 22.2	全有機炭素計TOC-V
COD	JIS K0102 17	
TN	JIS K0102 45.6	
TP	JIS K0102 46.3.4	
NO ₂ -N	JIS K0102 43.1.3	BLTEC社製
NO ₃ -N	JIS K0102 43.2.6	連続流れ分析装置
NH ₄ -N	JIS K0102 42.6	SWAAT型
PO ₄ -P	JIS K0102 46.1.4	

2-3. コンター図作成方法

水温, 塩分, DO, クロロフィル a, TN, NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, 溶存態無機窒素 (DIN), TP, PO₄-P, TN/TP, TOC, DOC, POC および COD のコンター図は, ソフトウェアとして Gsharp (日本電子計算株式会社) を用い, 線形補間を行うことにより測定した。なお, DIN は, NO₂-N, NO₃-N および NH₄-N の和として表した。

結果および考察

1. 調査地点における水質

1-1. 水温, 塩分および DO

図 2 に水温, 塩分, DO, クロロフィル a, TN, NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, DIN, TP, PO₄-P, TN/TP,

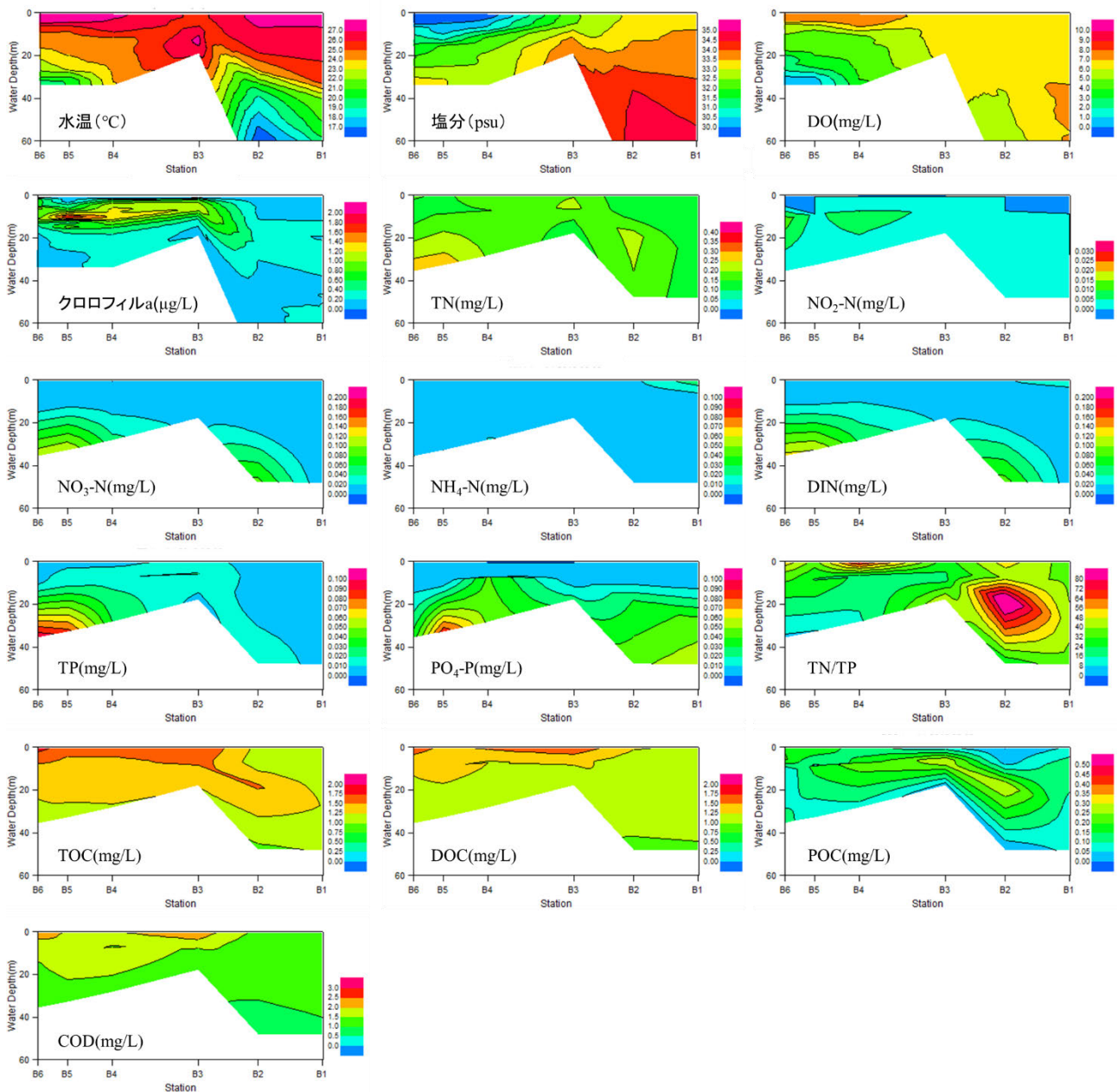


図2 各調査地点における水温，塩分，DO，クロロフィル a，TN，NO₂-N，NO₃-N，NH₄-N，DIN，TP，PO₄-P，TN/TP，TOC，DOC，POC および COD のコンター図

TOC，DOC，POC および COD のコンター図を示す。コンター図は，縦軸を水深，横軸を調査地点とすることで，湾央（B6）から外海（B1）にかけての縦断面図を表した。

水温，塩分および DO を見ると，伊良湖水道をまたぐ B3 から B4 にかけて等値線が垂直方向を向いており，これは鉛直混合が強いことを示している。一方で，湾央付近の B5 から B6 にかけては，等値線が水平方向を向いていることから，鉛直混合が弱く，成層化することで，貧酸素化していた

と推察することができた。

1-2. クロロフィル a

B3 から B5 にかけて水深約 10m にクロロフィル a の極大層が見られ，その下端部は B2 中層付近（水深約 20m）まで達しており，湾外（B3）から湾央（B6）にかけての中層で基礎生産が活発な様子が確認された。

1-3. TN，NO₂-N，NO₃-N，NH₄-N，DIN，TP，PO₄-P 各濃度および TN/TP

TN および TP は，いずれも湾内である B5 およ

び B6 地点の底層でやや高い濃度を示した。NO₃-N は、湾内外の表層で濃度は 0 に近く、底層に近づく程高い濃度を示した。NO₂-N は、全層でほとんど一様であり、NO₃-N と比べて濃度は低かった。NH₄-N は B1 から B6 地点の全層において、ほとんど濃度が 0 であった。PO₄-P は、湾内外の 10m 以浅では濃度は 0 に近く、底層に近づく程高い濃度を示し、B5 で最大であった。

湾口部 (B3 および B4) では、表層を通じて湾内水が流出し、中底層を通じて外海水が流入する³⁾ため、PO₄-P の濃度分布によれば、外海から湾内へ約 0.01mgP/L 程度のリンの流入が推定できる。

伊勢湾の平均交換水量は 7 億 m³/day⁴⁾であることから、リンの流入量は約 7tonP/day となる。伊勢湾への陸域負荷量は約 8.2tonP/day⁵⁾であることから、陸域負荷と同程度のリンが外海から流入していることが判明した。

1-4. TN/TP 比

TN/TP 比は、海水面に近いほど大きくなる傾向が見られた。植物プランクトンの体組成を表すレッドフィールド比はおよそ N:P=16:1⁶⁾であり、TN/TP 比が 16 以下では窒素制限、16 以上ではリン制限として、窒素またはリン濃度によって植物プランクトンの生育に制限がかかる。今回の調査結果から、B3 から B6 にかけての中層付近において TN/TP 比が 16 程度の適度な比率の栄養塩環境であることがわかった。

1-5. TOC, DOC, POC および COD

TOC は湾口 (B3) 表層から湾央 (B6) 表層にかけてと、外海 (B2) 中層で高かった。DOC は湾内外でほとんど一様であったが、湾央 (B6) 表層および湾口部 (B3 および B4) 表層でやや高く、POC に関しては B2 から B3 中層で高くなる結果となった。COD については、湾口 (B3 および B4) 表層および湾内 (B6) 表層でやや高く、外海 (B1) から湾内 (B4 から B6) 中底層の広い範囲において約 1.0mg/L であることがわかった。

2. 植物プランクトンの分布

2-1. 光量子量とクロロフィル a 濃度の関係

光量子の鉛直分布を図 3 に、クロロフィル a 濃度の鉛直分布を図 4 に示した。なお、図 3 では、水面の光量子量を 1 として正規化したものを示している。ここで、B4 のクロロフィル a 濃度の極大が中層の水深 10m 付近に存在している点に着目すると、図 2 の DIN および PO₄-P にも示すように、表層では栄養塩類が枯渇しており、またリン制限

が強い状態であるために基礎生産を効率的に行えないことがわかる。しかし水深 10m になると、B4 では光量子量が表層の 10% 程度まで減少するものの (図 3)、栄養塩類が獲得しやすく、適度な TN/TP 比となっている (図 2) ことから、表層よりも植物プランクトンが増殖しやすい条件になっていた可能性が考えられる。

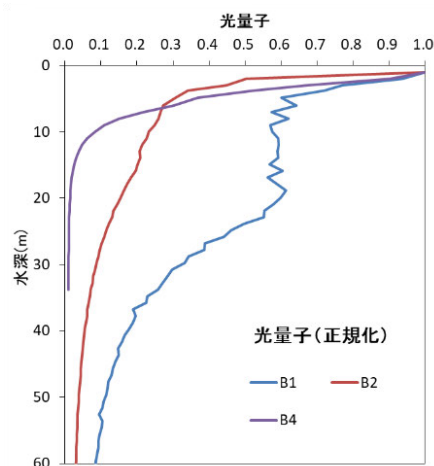


図 3 調査地点 B1, B2 および B4 における光量子の鉛直分布図

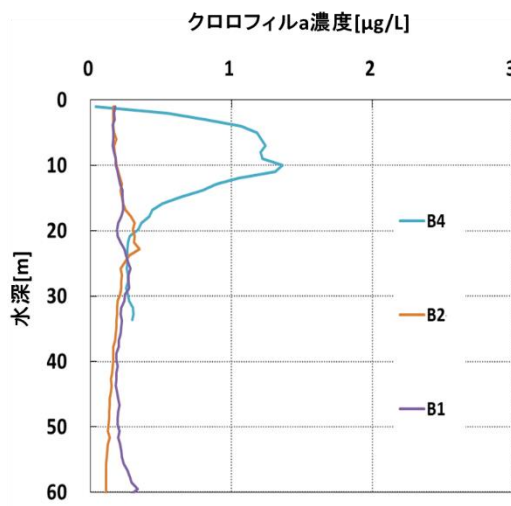


図 4 調査地点 B1, B2 および B4 におけるクロロフィル a 濃度の鉛直分布図

2-2. 植物プランクトンの分布

各調査地点における渦鞭毛藻類および珪藻類の分布を図 5 に示す。B1 表層と中層には珪藻類が見られ、*Chaetoceros* spp. の細胞数が最大であった。また、渦鞭毛藻類は見られなかった。B2 は、表層

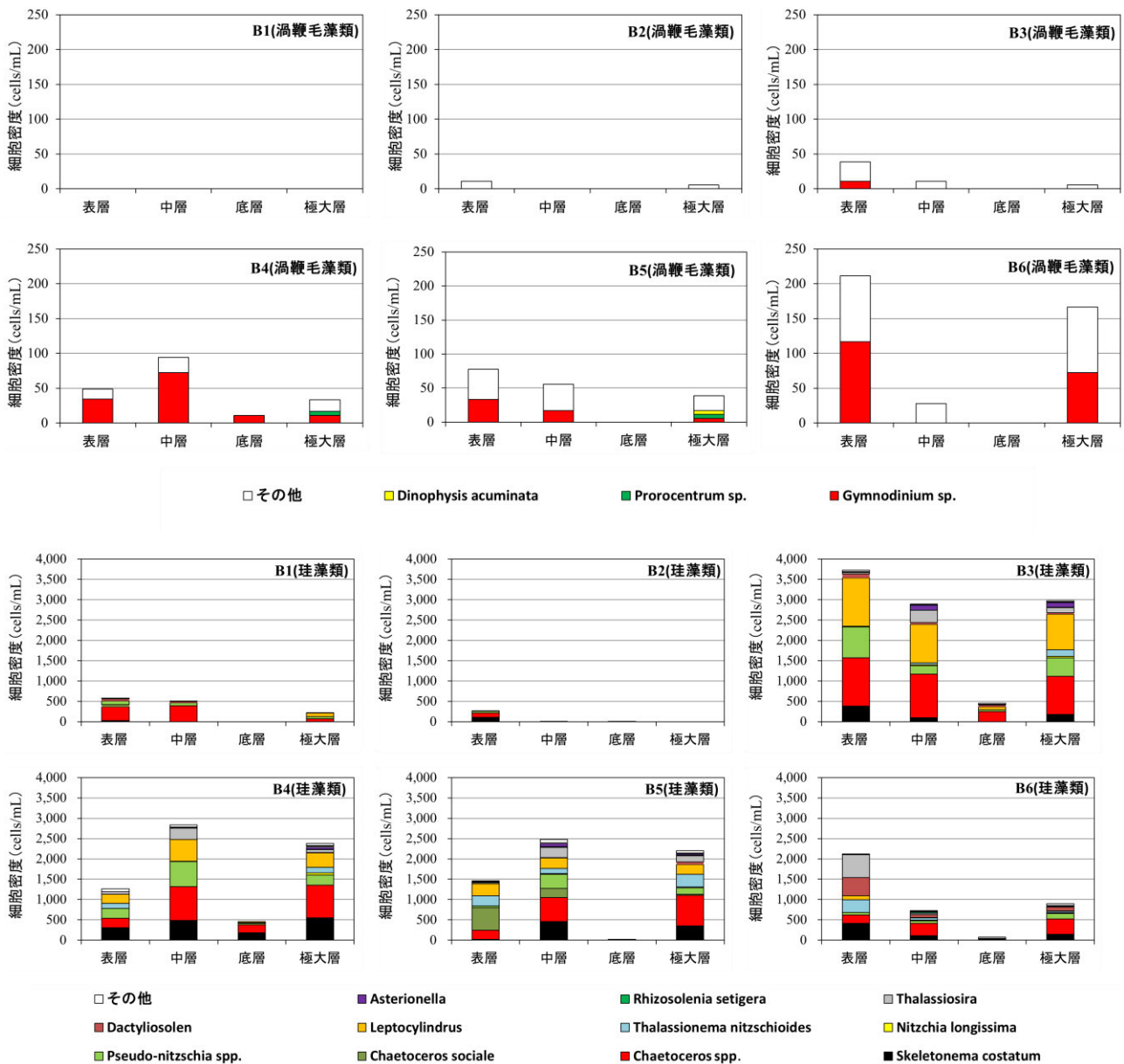


図5 各調査地点における渦鞭毛藻類および珪藻類の分布

において渦鞭毛藻類及び珪藻類が見られたが、出現数が少なく、クロロフィル極大層においては、わずかに渦鞭毛藻類が見られたのみであった。B3およびB4では、渦鞭毛藻類が存在していたものの、圧倒的に珪藻類が多く、*Chaetoceros* spp., *Skeletonema costatum*, *Leptocylindrus*などが各層で優占種となった。B5およびB6においても、渦鞭毛藻類は見られたが、多くは珪藻類であり、*Chaetoceros* spp., *Chaetoceros sociale*, *Thalassiosira*などが優占種であった。

過去の伊勢湾湾央付近の植物プランクトン調査^{7,8)}においては、*Ceratium fusus*などの渦鞭毛藻類が検出されていたが、今回のプランクトン調査

においては、湾央(B6)から湾口(B3)にかけてのクロロフィル極大層の優占種は珪藻類という結果であった。

まとめ

今回の調査によって、伊勢湾内の水質構造に関する以下の知見が得られた。

伊良湖水道をまたぐ調査地点B3からB4において、強い鉛直混合により、水質の一様化が生じていた。湾央に近いB5およびB6地点では鉛直混合が弱く密度成層が生じ、底層付近では貧酸素水塊が広がっていた。陸域負荷(約8.2tonP/day)と同程度のリン(約7tonP/day)が外海から流入していることが判明した。クロロフィル極大層は、B5

から B3 地点の水深 10m 付近に発生していたが、この現象は、水深 10m 以浅では栄養塩類の濃度が低く、光量子量と栄養塩濃度のバランスによって引き起こされていると考えられた。また、植物プランクトンの分布調査結果から、湾口 (B3) から外海 (B1) にかけては渦鞭毛藻類はほとんど存在せず、珪藻類が主体であることがわかった。湾央 (B6) においては、渦鞭毛藻類もある程度確認されたものの、珪藻類が大多数を占めており、*Chaetoceros spp.*等が優占種であることがわかった。

文 献

- 1) 笠井 亮秀, 杉本 亮, 赤嶺 里美 : 内湾域における中層クロロフィル極大の形成機構, 空と海, **82**, 53-60(2007).
- 2) 柳 哲雄 : 貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響, 海の研究, **13**(5), 451-460(2004).
- 3) 笠井 亮秀, 川西 里佳, 藤原 建紀 : 伊勢湾の流動構造と貧酸素水塊, 水産海洋研究, **64**(4), 235-243(2000).
- 4) 千葉 賢 : 2010 年と 2011 年の伊勢湾の水質と流動の再現計算と海水交換特性について, 土木学会 論文集 B2(海岸工学), **69**(2), 1071-1075(2013).
- 5) 三重県 : 平成 30 年版環境白書, 第 2 部, 第 1 章, 水環境の保全(2018).
- 6) 田口 哲 : レッドフィールド比 : 研究の歴史と現状, 今後の展望, 海の研究, **25**(4), 123-132(2016).
- 7) 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 : 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, 三重保環研年報, **16**, 66-73(2014).
- 8) 天野 晴貴, 足立 敦子, 新家 淳治, 国分 秀樹, 竹之内 健介, 小林 利行 : 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および各種環境要因への湾内流の影響について, 三重保環研年報, **17**, 58-73(2015).