

ノート

伊勢湾の有機物の分解特性に関する研究 (その2)

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

Characteristics of Organic Matter Decomposition in Ise Bay (Part 2)

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

伊勢湾内の底層では毎年夏季を中心に貧酸素水塊が発生しているが、発生面積の減少が見られず、長期化が問題となっている。貧酸素水塊の発生要因として、水中に存在する有機物の分解時の酸素消費が挙げられることから、有機物の分解に着目した調査を行った。

伊良湖水道を挟んだ外海2地点、湾口1地点を選定し、表層水および底層水を用いた生分解試験を行った結果、湾口に存在する易分解性有機物の分解特性時間は表層で9.8日、底層で13.9日であった。また、外海から湾内に向けてTOC約1.0mg/Lの難分解性有機物が湾口で鉛直混合されながら中底層へ流入していることが示唆された。

キーワード：伊勢湾，有機物，生分解，分解特性

はじめに

筆者らは既報²⁾において、伊勢湾内3地点(湾奥、湾央および湾口)の有機物の分解特性調査を行い、以下の知見を得た。

- 1) 生分解試験による化学的酸素要求量(COD)の最終濃度は、表層水で約0.5~1.0mg/L、底層水で約0.5mg/Lであった。全有機炭素(TOC)の最終濃度は表層水、底層水ともに約1.0mg/Lであった。
- 2) 懸濁態有機炭素(POC)は易分解性成分、溶存態有機炭素(DOC)は難分解性成分が中心の組成であった。
- 3) COD/TOCの経時変化から、生分解試験によってTOC中のCODとして評価される有機物の含有率が低下した。
- 4) 湾奥表層における易分解性成分の分解特性時間は、3~7日程度であった。
- 5) 溶存酸素量(DO)の減少は、有機物の酸化分解および硝化の進行によるものと考えられた。
- 6) 溶存態無機窒素濃度(DIN)が生分解試験後、

全試料で増加したことから、有機物の分解に伴って、有機態窒素が無機態窒素へと変化したことが示唆された。なお、DINは、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)およびアンモニア態窒素(NH₄-N)の和である。

本報では、湾口1地点、外海2地点を選定し、表層水および底層水を用いた生分解試験を行い、TOCなどの経時変化から有機物の分解特性について考察することで、既報では得られていない伊勢湾内へと流入する外海水に関して検討し、外海との関連性を考察した。

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B1、B2およびB4の3地点の表層および底層(Bottom-1m)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搭載のニスキン採水器を用い、

* 三重県鈴鹿水産研究室

** 三重県環境生活部大気・水環境課

*** 四日市大学環境情報学部

ポリエチレン製の瓶に入れて冷蔵保存したものを、保健環境研究所で分析した。表層水は、動物性プランクトンを除くために 0.335mm 目合いのプランクトンネットでろ過したものを試料とした。

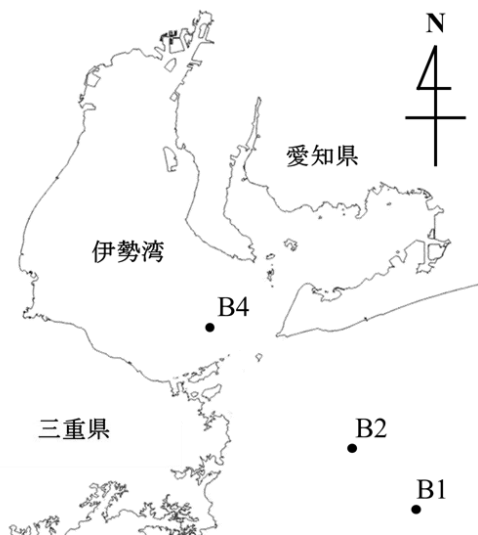


図1 伊勢湾内外における調査地点

表1 調査地点座標

地点番号	世界測地系	
	北緯	東経
B1	34°19.3'	137°17.7'
B2	34°24.4'	137°10.2'
B4	34°36.4'	136°53.0'

表2 採取水深

地点番号	表層(m)	底層(m)
B1	0.5	48.1
B2	0.5	47.8
B4	0.5	28.1

2. 生分解試験調査

2-1. 測定項目

TOC, DOC, POC, COD, 全窒素 (TN), 全リン (TP), NO₂-N, NO₃-N, NH₄-Nおよびリン酸態リン (PO₄-P) を測定項目とした。

2-2. 測定方法

各測定項目の水質分析は表3に示す方法で行った。なお、DOCは450℃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。

表3 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. 生分解試験の試験条件

採水地点の環境に近づけるため、表層水は好気的條件、底層水は嫌氣的條件で生分解試験を行った。表層水は2Lガラス瓶に入れ、通気性を保ちながら遮光して恒温槽で振とうした(毎分50回転)。底層水は250mLフラン瓶に入れて密栓し、遮光して恒温槽で静置した。恒温槽の設定温度は採取時の水温を参考に、表層水は3地点とも27.5℃、底層水はB1およびB2で20.0℃、B4で24.0℃とした。生分解試験開始から0, 2, 5, 9, 17および30日目にTOC, DOC, COD, TN, TP, NO₂-N, NO₃-N, NH₄-NおよびPO₄-Pを分析した。表層水は分析日にガラス瓶から必要な試料量だけを抜き取り、底層水は分析日にフラン瓶ごと必要数を取り出して分析に用いた。ガラス瓶、フラン瓶ともに分析日ごとに同一の試料を3本ずつ用意し、その平均値を結果として用いた。

結果および考察

1. 調査地点におけるTOC, DOCおよびCOD濃度の経時的変化

伊勢湾調査地点の表層および底層におけるTOC, DOCおよびCOD濃度の経時的変化を図2に示す。B1およびB2のTOCおよびDOC濃度は、表層、底層とも生分解試験開始時から終了時までにならずに減少するものの、変化量は少なく、両者の濃度にもほとんど差がないことから、TOC成分の大部分が溶存態の難分解性有機物で構成されていたと考えられる。一方、CODに関しては、特に底層において、分解試験開始直後に減少するが、途中から変化しなくなり、TOCおよびDOCとは異なる挙動を示した。TOCおよびDOCが変化し

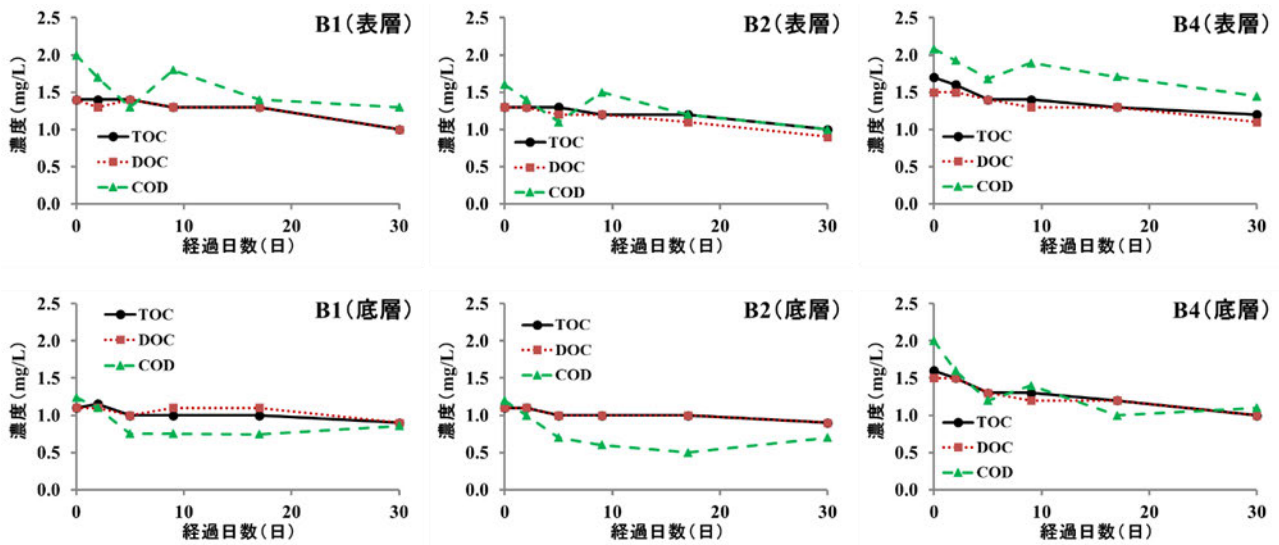


図2 伊勢湾調査地点の表層および底層における TOC, DOC および COD 濃度の経時的変化

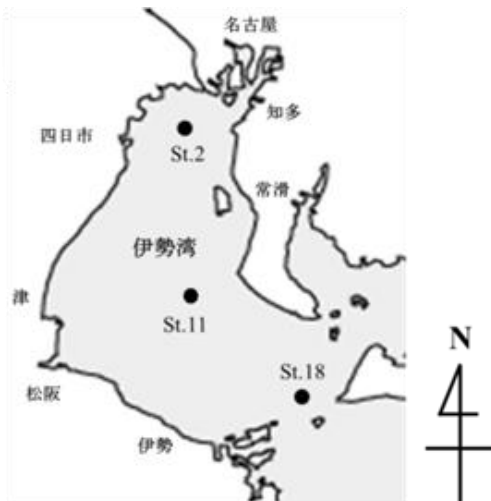


図3 2017年度伊勢湾内調査地点図

表4 2017年度調査地点座標

地点番号	世界測地系	
	北緯	東経
St.2	34°57.0'	136°44.0'
St.11	34°43.1'	136°44.6'
St.18	34°35.2'	136°56.7'

ないにも関わらず、COD が減少するこの現象に関しては、2017年度の湾内底層の生分解試験調査²⁾や播磨灘³⁾においても確認されている。これは、時間経過とともに、酸化分解によって難分解性有機物の分子鎖が部分的に切断されていったことが原因と推察される。酸化分解できる部位が減少すると COD としては減少するものの、無機化する

までには至っていないことから、TOC としては変化しない結果となった可能性が考えられる。なお、最終的に COD は、外海 (B1 および B2) 表層で約 1.0~1.5mg/L、底層で約 0.5mg/L となり、湾口 (B4) は表層で 1.5mg/L、底層で約 1.0mg/L となった。TOC は B4 (表層) を除いて、約 1.0mg/L となった。2017 年度の湾内 3 か所の調査地点については図3に、調査地点の座標については表4に示した。

2. 調査地点における COD/TOC の経時的変化

COD/TOC の経時的変化を図4に示す。生分解試験開始5日後までは3地点の表層および底層全てにおいて単調に減少したが、その後は、地点や採水層によって異なる挙動を示した。調査地点は

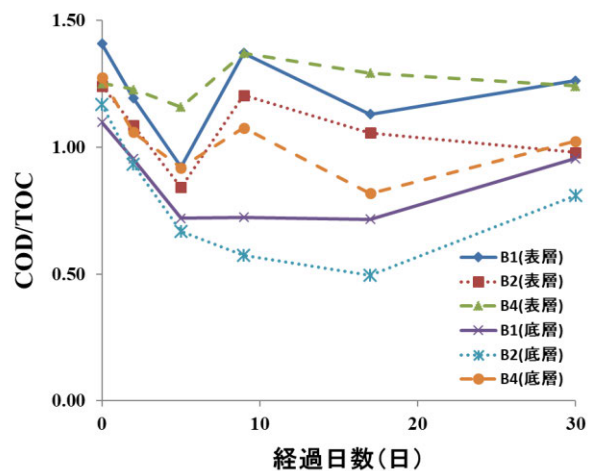


図4 調査地点の表層および底層における COD/TOC の経時的変化

異なるが、湾内の試料である 2017 年度の COD/TOC の経時変化の結果²⁾では主に単調減少、もしくは減少後に横ばいになっていく現象が確認されていた。今回の試料は陸域由来の COD 源が少ないと考えられることから、TOC が変化しないにも関わらず COD が減少する現象が 2017 年度試料で顕著に表れたのは、陸域由来の分解性の COD の割合が外海よりも高いことが理由であると推察された。

3. 有機物の分解特性時間

図 2 に示す TOC の経時変化を見ると、B1 および B2 と比較して B4 は、生分解試験開始時と終了時で差があることから、分解性の TOC が存在していることを示している。そこで、0, 2, 5, 9 および 17 日目の TOC から 30 日目の TOC を差し引くことで、各分析日時点における分解性 TOC を求め、0 日目の分解性 TOC に対する各分析日時点での分解性 TOC の割合を算出した結果を図 5 に示す。また、指数近似による回帰直線から分解特性時間を計算した。なお、この特性時間は、その時間が経過するごとに分解性 TOC が $1/e$ 倍となる時間を意味する。

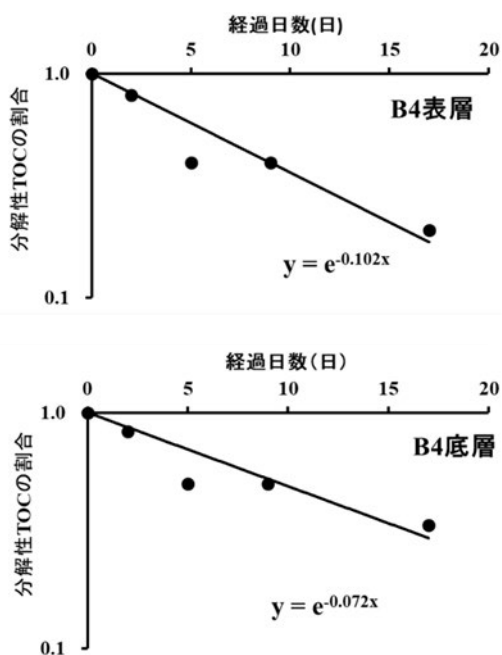


図 5 調査地点 B4 の表層および底層における分解性有機物の分解特性時間

その結果、有機物の分解特性時間は B4 地点表層で 9.8 日、底層で 13.9 日であることがわかった。2017 年度の湾奥 (St.2) 表層水の生分解試験結果によると、有機物の分解特性時間は 3~7 日程度で

あることから、湾奥よりも湾口の方が分解特性時間が長く、有機物の分解性が低いことが示唆された。

また、2017 年度および今回の生分解試験の結果、湾奥 (St.2)、湾中 (St.11)、湾口 (St.18 および B4) および外海 (B1 および B2) の表層及び底層のほぼすべてにおいて、TOC が約 1.0mg/L に収束していくデータが得られている。このことは、外海から湾内に向けて TOC 約 1.0mg/L の難分解性有機物が湾口で鉛直混合されながら中底層へ流入し、湾内を循環していることを示唆している。これらの結果から、この難分解性有機物を含んだ外海由来の海水がエスチュアリー循環によって湾奥まで運ばれながら湾奥表層で上昇し^{1),4)}、ここに湾内で基礎生産された有機物が上乘せされ、分解・沈降を伴いながら湾口・外洋へと輸送されることで有機物が循環している構図が推定できる。図 6 に難分解性有機物の循環構造を示す。なお、図中の B1, B2 および B4 は調査地点、数値は TOC 濃度 (単位は mg/L)、矢印 (←) の向きは水の流れの方向を表す。

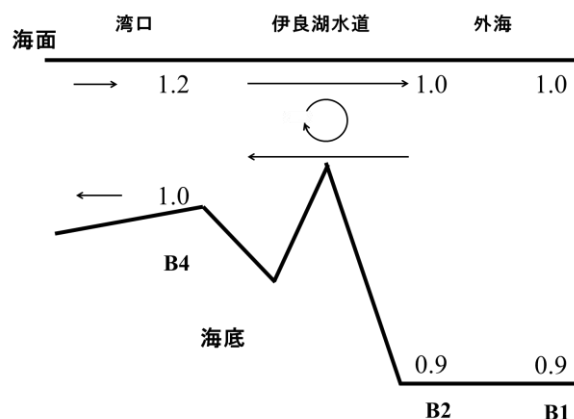


図 6 伊勢湾における難分解性有機物の循環構造 (伊勢湾縦断面)

4. 調査地点における TN, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, TP および PO₄-P 濃度の経時変化

TN, NO₃-N, NO₂-N および NH₄-N 各濃度の経時変化を図 7 に、TP および PO₄-P 両濃度の経時変化を図 8 に示す。なお、B4 底層の 30 日目の TN に関しては欠測となった。3 地点すべてにおいて NH₄-N 濃度の増加が確認されたが、NO₂-N および NO₃-N 濃度は増加しなかった。有機物は、まず微生物による分解によって NH₄-N が遊離し、その

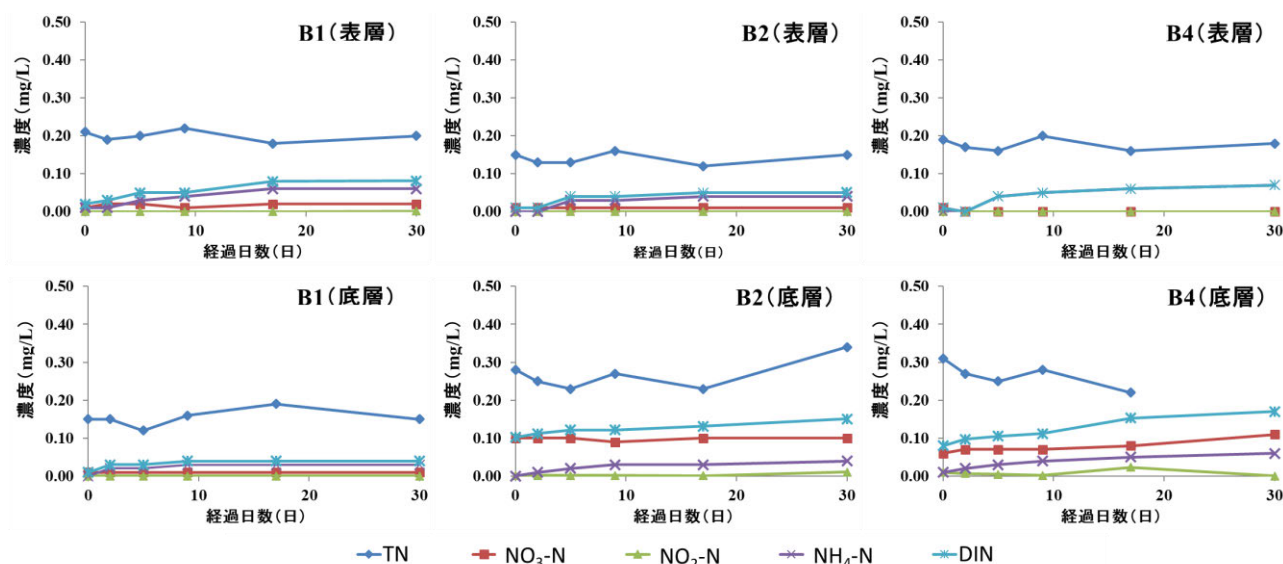


図7 調査地点の表層および底層における TN, NO₃-N, NO₂-N および NH₄-N 濃度の経時的変化

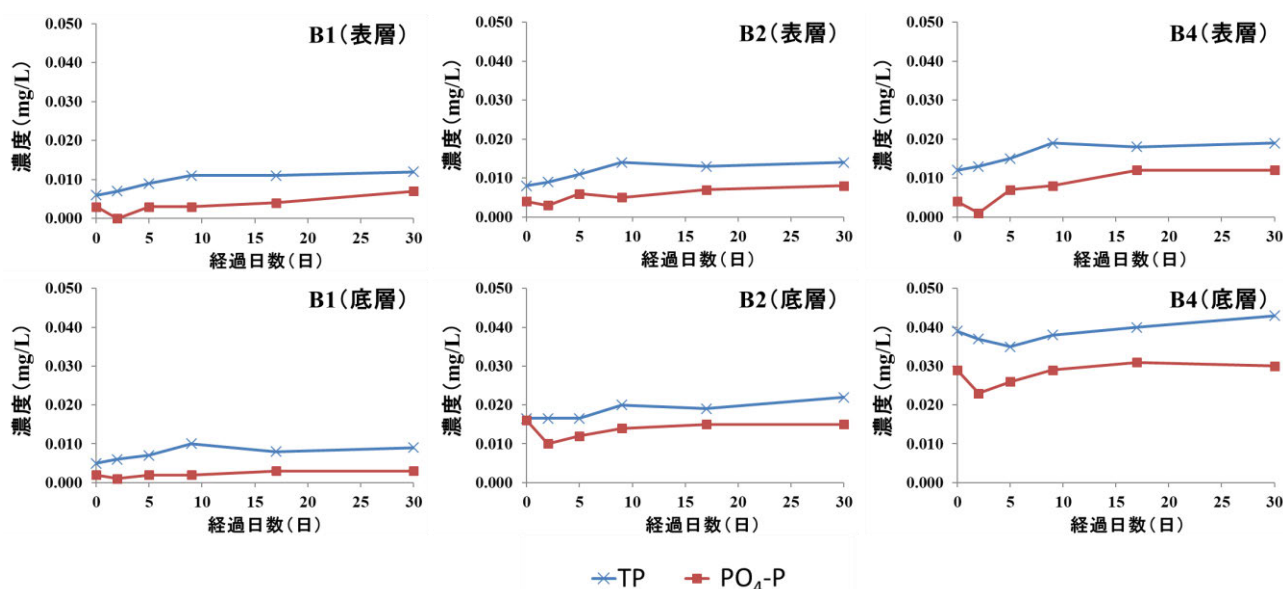


図8 調査地点の表層および底層における TP および PO₄-P 濃度の経時的変化

後硝化細菌による硝化反応によって NO₂-N, NO₃-N へと変化していくとされている⁹⁾が、今回の結果では、NH₄-N 濃度の増加は確認されたものの、硝化の進行は確認されなかった。また、PO₄-P 濃度においてもすべての場合でわずかに増加傾向が見られた。

まとめ

今回の調査によって、有機物の分解特性に関する以下の知見が得られた。

1) 生分解試験の結果、COD の最終濃度は、外海表層で約 1.0~1.5mg/L、底層で約 0.5mg/L となり、湾口表層で約 1.5mg/L、底層で約 1.0mg/L であった。

2) 2017 年度と同様に、POC は易分解性成分、DOC は難分解性成分が中心の構成となっていたことがわかり、最終的な TOC は、湾口表層を除き約 1.0mg/L であった。2017 年度の生分解試験結果において、湾内の難分解性 TOC も約 1.0mg/L となったことから、外海から湾内に向けて TOC 約 1.0mg/L

の難分解性有機物が湾口で鉛直混合されながら中底層へ流入し、湾内を循環していることが示唆された。

3) COD/TOC の経時的変化から、生分解試験開始直後には、単調な減少が確認されたが、5 日目以降は各地点および層によって異なる挙動を示した。

4) 生分解試験の結果、湾口の表層水および底層水の易分解性有機物の分解特性時間はそれぞれ 9.8 日、13.9 日であることが分かった。これは、2017 年度に実施した湾奥表層の生分解試験結果である 3~7 日と比較して長い。すなわち、同量の分解性有機物が存在した場合、湾口よりも湾奥の方が早く分解および酸素消費が進むと考えられた。

5) この難分解性有機物を含んだ外海由来の海水がエスチュアリー循環によって湾奥まで運ばれながら湾奥表層で上昇し、ここに湾内で基礎生産された有機物が上乘せされ、分解・沈降を伴いながら湾口・外洋へと輸送されることで有機物が循環している構図が推察された。

6) 3 地点全ての表層および底層において、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が増加したことによる DIN の増加が確認され、有機物中の窒素が分解によって無機態窒素へと変化した可能性が考えられる。この現象は、2017 年度にも確認されているが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ へと変化していく硝化反応については確認されなかった。

本調査によって、外海と伊勢湾内のベースとなる有機物量とその循環構造が明らかとなり、また、

湾口と湾奥の分解性有機物の分解特性時間の比較を行うことができた。しかし、貧酸素水塊の原因と考えられる有機物源を突きとめ、発生面積の減少が見られない貧酸素水塊の発生メカニズムの解明を進めるには、有機物量や沈降速度に着目した調査を行うことにより、有機物分解による酸素消費が貧酸素水塊ほどの程度寄与しているかを考察していく必要があると考える。

文 献

- 1) 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).
- 2) 渡邊 卓弥, 谷村 謙紀, 奥山 幸俊, 国分 秀樹, 柘植 亮, 千葉 賢: 伊勢湾における有機物の分解特性に関する研究, 三重保環研年報, **20**, 63-67(2018).
- 3) 仲川 直子, 吉田 光方子, 金澤 良昭, 前川 真徳: 加古川流域起源有機物との比較における播磨灘海域の難分解性有機物に関する特性評価, 兵庫県環境研究センター紀要, **3**, 9-15(2011).
- 4) 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).
- 5) 芳倉 太郎, 西尾 孝之, 福永 勲: 生物学的硝化脱窒法による排水の高度処理, 生活衛生, **43**(2), 49-64(1999).