

原 著

伊勢湾における有機物の沈降速度に関する研究

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***

The Study on Sedimentation Velocity of Organic Matter in Ise Bay

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

伊勢湾内で夏季を中心に毎年発生している貧酸素水塊は、成層化によって酸素供給が乏しくなった中底層において、微生物が易分解性有機物を酸素消費しながら分解していくことで発生すると言われている。本研究では、貧酸素水塊の形成に関係する有機物の沈降速度を明らかにし、中層に到達した際の易分解性有機物の残存率を見積もった。

伊勢湾の湾奥から湾央のクロフィル極大層の有機物の沈降速度は、3.2 m/day 以上であることが明らかになった。クロフィル極大層の植物プランクトンは、ほとんどが珪藻類であり、なかでも *Skeletonema costatum* および *Chaetoceros* spp. が多く見られた。また、珪藻類の細胞密度が高いほど、有機物濃度も高かったことから、植物プランクトンの細胞密度が有機物濃度に影響していると推察された。さらに、筆者らが過去に実施した有機物の分解特性試験の結果から、湾奥で約 40~66%、湾口で約 74% の沈降性の易分解性有機物が未分解のまま中層まで沈降すると計算された。このことから、沈降性の易分解性有機物が貧酸素水塊の形成に影響していると考えられた。

キーワード：伊勢湾，貧酸素水塊，有機物，沈降速度

はじめに

伊勢湾の水環境は、高度経済成長期に悪化が進行したが、1979 年から実施している水質総量削減の取り組みの結果、陸域からの汚濁負荷は着実に減少し、伊勢湾内の水質は改善傾向にあり¹⁾、全窒素および全リン濃度は減少してきている²⁾。しかし、有機物汚濁の指標である COD の環境基準達成率は 50% 前後が続き、改善が見られない現状¹⁾もある。

伊勢湾の底層では毎年夏季を中心に貧酸素水塊が発生しており、生物生息環境の悪化につながることから、発生面積の減少や長期化の解消が望まれている。貧酸素水塊が冬季にほとんど発生しないのは、夏季と冬季の成層化の度合いが影響して

いるためである。夏季は鉛直方向で水温差が大きくなりやすいため、密度差も大きくなり、成層化が強まる傾向にある。そのため、鉛直循環が弱まり、酸素が中底層へと供給されにくくなり、貧酸素化が進行すると考えられる³⁾。

また、夏季は、海水中の植物プランクトンの増殖(内部生産)により生産される有機物量の増加も影響していると考えられる。海水中の有機物は、やがて沈降しながら分解されていくが、微生物による分解時に酸素が消費されていく。表層付近で分解が起これば、酸素量が十分であるため貧酸素化への影響は小さいと考えられるが、中層以深まで沈降してなお分解が続く場合、中底層で酸素が消費されるため、貧酸素化への影響は大きいと考

* 三重県水産研究所鈴鹿水産研究室 (現所属・三重県農林水産部水産振興課)

** 三重県環境生活部大気・水環境課 (現所属・三重県松阪地域防災総合事務所環境室)

*** 四日市大学環境情報学部

えられる。

本研究では、伊勢湾内6地点のクロロフィル極大層で採水した試料の有機物の沈降速度試験を行い、未分解の易分解性有機物が中層に到達した際の残存率を見積もることで、貧酸素水塊の形成への影響を考察した。

方法

1. 調査地点、採水日および採水方法

2019年8月6~7日に、図1に示す6地点の鉛直方向の水質をCTD装置(表1)で現地測定し、そのうちE8~E10の3地点においてCTD装置搭載のニスキンX型採水器でクロロフィル極大層の採水を行った。また、8月26日に図2に示す3地点で、JFEアドバンテック株式会社製総合水質センサーAAQ1183-Z57を用いてクロロフィルa濃度を測定した上で、バンドーン採水器を用いてクロロフィル極大層の採水を行った。調査地点の座標(世界測地系)、採取水深およびクロロフィルa濃度を表2に示した。

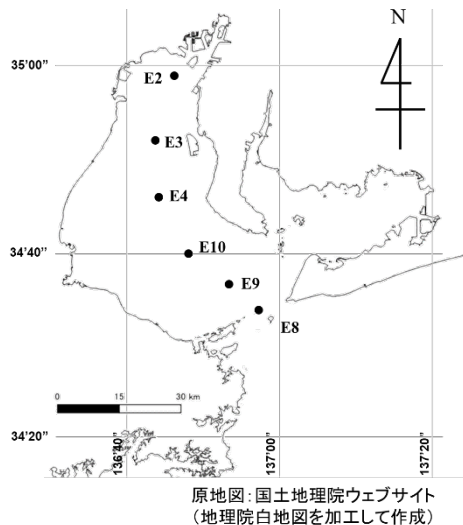


図1 調査地点(8月6~7日)

表1 CTD装置の詳細

CTD装置機器構成	測定項目
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

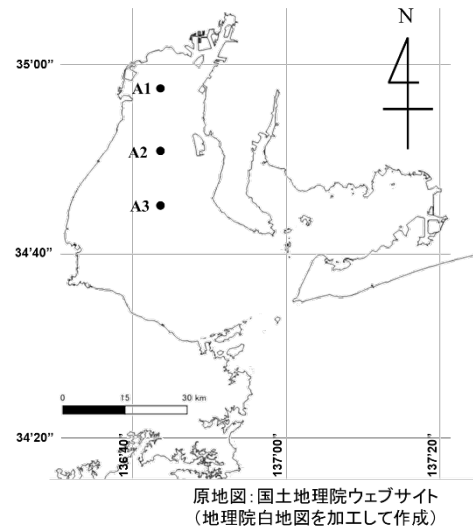


図2 調査地点(8月26日)

地点番号	北緯	東経	採取水深 [m]	クロロフィルa [μg/L]
E2	34°58.93'	136°45.47'	5.4	2.2
E3	34°52.55'	136°43.98'	9.0	1.6
E4	34°46.05'	136°44.01'	12.1	0.8
E8	34°34.60'	136°53.50'	10.9	0.6
E9	34°36.85'	136°53.50'	12.1	0.6
E10	34°40.04'	136°48.97'	14.5	0.4
A1	34°57.22'	136°43.39'	1.0	6.5
A2	34°50.22'	136°43.39'	0.5	4.9
A3	34°42.22'	136°43.39'	0.5	10.7

表2 調査地点、採取水深およびクロロフィルa濃度

2. 伊勢湾内の水質構造調査

2.1 測定項目

E2~E4およびE8~E10の6地点でCTD装置により鉛直方向の水温、塩分、DOおよびクロロフィルa濃度を測定した。また、密度は水温および塩分から算出した。

2.2 コンター図作成方法

CTD装置で測定したデータをもとに、ソフトウェアとしてGsharp Version3.0(日本電子計算株式会社製)を用い、線形補間を行うことによりコンター図を作成した。

3. 有機物の沈降速度試験

3.1 測定項目

A1~A3およびE8~E10の6地点のクロロフィル極大層の全有機炭素(TOC)、溶存態有機炭素(DOC)、懸濁態有機炭素(POC)、CODおよび植物プランクトンの顕鏡を測定項目とした。

3.2 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。

また、各地点で採取した試料1 mLをプランクトン計数板に滴下し、顕微鏡で植物プランクトンの計数および同定を行った。プランクトン計数板には50本の界線があり、そのうち10本の界線内に存在しているプランクトンを計数し、5倍した数値を細胞密度(cells/mL)とした。

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	

3.3 有機物の沈降速度試験の方法

有機物の沈降速度試験には、透明の亚克力パイプ(高さ1000 mm, 外径64 mm, 内径60 mm, 肉厚2 mm)を用い、片側の口に亚克力板を溶接して水が漏れないようにしたもの(写真1)を使用した。

沈降速度試験中に微生物が有機物を分解することおよび亚克力パイプの壁面にプランクトンが付着することを防止するため、殺菌灯(波長253.7 nm付近)を用いて海水試料の紫外線照射を行った。前処理装置には、殺菌灯を取り付けた塩化ビニル製の円筒管(写真2)を用いた。前処理装置の両端に試料の導入と排水が可能なコックが付いたチューブをつなぎ、排水側のコックを閉じて、導入側チューブから円筒管内に試料を満たし、殺菌灯の電源を入れて、数分間放置後に排水側コックを開き、導入側チューブから試料を0.6~0.7 L/minの速さで通水させた。この操作によって排水側チューブから出てきた試料を前処理試料とした。

次に、1試料につき前処理試料を高さ90 cmまで入れた亚克力パイプを3本準備した。亚克力パイプに前処理試料を入れた時点を試験開始とし、静置して3時間後、6時間後、10時間後に亚克力パイプ内の試料を高さ10 cmごとに分画した。なお、亚克力パイプに入れずに残った前処理試料を試験開始時の基準試料とした。

3, 6, 10時間後に亚克力パイプの上部からサイフォンを用いて10 cmずつ静かに試料を分画し、

1本の亚克力パイプから9画分を得た。試料は表層を0 cmとして上から順に、0-10 cm画分、10-20 cm画分…70-80 cm画分、80-90 cm画分とした。なお、最後の1分画(80-90 cm画分)については、底面に溜まった粒子分も可能な限り取り出した。

試験開始時の基準試料および3, 6, 10時間後の分画試料について、TOC, DOCおよびCODの分析を行った。



写真1 有機物の沈降速度試験に使用した亚克力パイプ



写真2 殺菌灯を取り付けた塩化ビニル製円筒管

結果および考察

1. 伊勢湾内の水質構造調査

図3に伊勢湾の鉛直方向の水温、塩分、密度、DOおよびクロロフィルa濃度のコンター図を示した。コンター図は、縦軸を水深、横軸を調査地点とすることで、湾奥(E2)から湾口(E8)にかけての縦断面図を表した。

水温、塩分およびDOの図では、水深5~10 m付近で等値線同士の間隔が狭く、また、水平になっている。密度の図からも、水深10~15 m付近に水

平方方向の等値線が密集している。DO の図からも、DO 濃度が 3 mg/L を下回るような貧酸素水塊の境目も水深 10~15 m 付近であることが読み取れる。そして、クロロフィル a の図でも、湾奥部の水深 0~10 m 付近に極大層が確認され、その下端部は成層の境目と同じ水深 10 m 付近であった。これらのことは、水深 10 m 付近を境目として海水の鉛直混合が阻まれていることを示しており、水深 10

m 以深では貧酸素化が進行しやすい状態であると言える。

2. 有機物の沈降速度試験結果

2.1 植物プランクトンの顕鏡結果

A1~A3およびE8~E10の6地点の植物プランクトンの顕鏡結果(細胞密度)を表4に示した。また、珪藻類の顕鏡結果(細胞密度)を図4および図5に示した。

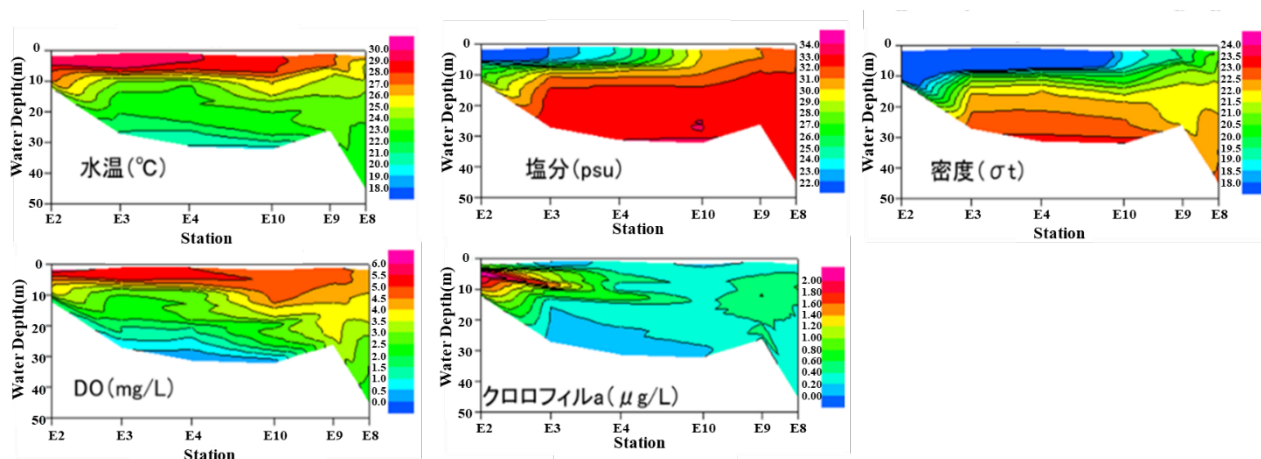


図3 伊勢湾における水質およびクロロフィルa濃度のコンター図

表4 伊勢湾各測定地点における植物プランクトンの顕鏡結果(細胞密度 cells/mL)

	A1極大層 (cells/mL)	A2極大層 (cells/mL)	A3極大層 (cells/mL)	E8極大層 (cells/mL)	E9極大層 (cells/mL)	E10極大層 (cells/mL)
渦鞭毛藻類(合計)	20	30	120	20	5	0
<i>Gymnodinium</i> sp.	20			20	5	
その他		30	120			
珪藻類(合計)	42660	13250	67130	265	735	55
<i>Skeletonema costatum</i>	34870	8990	54820	70	320	
<i>Chaetoceros</i> spp.	5640	2580	8420	90	185	
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	20		370	15	60	20
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	40			15	10	20
<i>Leptocylindrus danicus</i>		40	130	45	125	
<i>Dactyliosolen</i>		70				
<i>Dyctyocha speculum</i>						15
<i>Thalassiosira rotula</i>	1990	1430	2360	30	30	
<i>Rhizosolenia setigera</i>					5	
<i>Skeletonema tropicum</i>	60	100	1010			
<i>Coscinodiscus wailesii</i>	40	40	20			
フライト藻類(合計)	10	0	0	0	0	0
<i>Heterosigma akashiwo</i>	10					

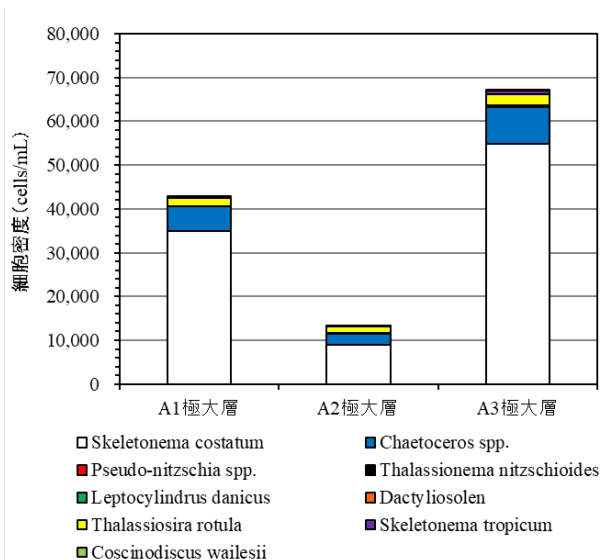


図4 伊勢湾のA1~A3地点の珪藻類の顕鏡結果

A1~A3地点とE8~E10地点は採水日が異なるため単純に比較をすることはできないが、A1~A3地点(湾奥~湾央)の細胞密度は、E8~E10地点(湾口)よりも数十倍~数百倍高く、植物プランクトンの分布に差が見られた。また、いずれの地点も渦鞭毛藻類は少なく、珪藻類が大多数を占めていた。珪藻類の種類では、*Skeletonema costatum*および*Chaetoceros spp.*が多く観察された。

2.2 有機物の沈降速度試験結果

TOC, DOC, POCおよびCODの測定結果を表5に示した。

E8~E10地点では、時間経過に伴ったTOC, DOC

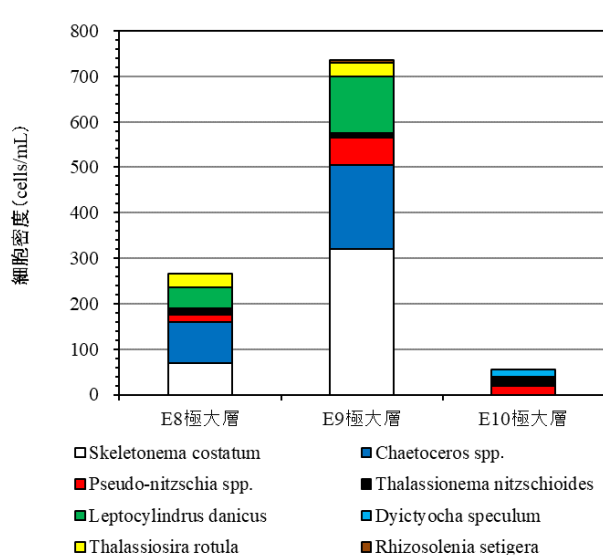


図5 伊勢湾のE8~E10地点の珪藻類の顕鏡結果

およびPOCの沈降は見られなかった。この3地点は、基準試料のTOCが1.1~1.2 mg/Lと低濃度であり、POC成分がほとんど存在していなかった。外海由来の海水中の有機物濃度はTOC≒DOC≒1.0 mg/Lであり、難分解性の有機物が主体である⁴⁾ことを考慮すると、これら試料中に含まれる有機物も難分解性の溶存態の有機物が主体であると考えられ、沈降する成分が少なかったために、時間経過によって有機物成分がほとんど沈降しなかったと推察された。

一方、A1~A3地点においては、E8~E10地点とは異なる結果が得られた。

表5 伊勢湾各測定地点におけるTOC, DOC, POCおよびCODの測定結果

A1	TOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	2.5	2.1	2.2
10-20cm画分	2.5	2.1	2.2
20-30cm画分	2.4	2.1	2.2
30-40cm画分	2.4	2.1	2.1
40-50cm画分	2.5	2.1	2.0
50-60cm画分	2.4	2.1	2.1
60-70cm画分	2.4	2.1	2.1
70-80cm画分	2.3	2.1	2.1
80-90cm画分	2.7	2.5	2.5
基準試料 2.6(mg/L)			

A1	DOC(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.7	1.5	1.7
10-20cm画分	1.7	1.5	1.6
20-30cm画分	1.6	1.6	1.6
30-40cm画分	1.6	1.6	1.6
40-50cm画分	1.6	1.6	1.6
50-60cm画分	1.6	1.7	1.6
60-70cm画分	1.6	1.7	1.6
70-80cm画分	1.6	1.7	1.6
80-90cm画分	1.6	1.7	1.5
基準試料 1.6(mg/L)			

A1	POC(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	0.8	0.6	0.5
10-20cm画分	0.8	0.6	0.6
20-30cm画分	0.8	0.5	0.6
30-40cm画分	0.8	0.5	0.5
40-50cm画分	0.9	0.5	0.4
50-60cm画分	0.8	0.4	0.5
60-70cm画分	0.8	0.4	0.5
70-80cm画分	0.7	0.4	0.5
80-90cm画分	1.1	0.8	1.0
基準試料 1.0(mg/L)			

A1	COD(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	3.6	3.3	3.2
10-20cm画分	3.5	3.1	3.1
20-30cm画分	3.4	3.5	3.2
30-40cm画分	3.2	3.5	3.2
40-50cm画分	3.3	3.3	3.3
50-60cm画分	3.4	3.4	3.4
60-70cm画分	3.3	3.4	3.3
70-80cm画分	3.4	3.4	3.4
80-90cm画分	3.9	4.4	4.2
基準試料 3.5(mg/L)			

表5 (続き)

A2	TOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.8	1.6	1.8
10-20cm画分	1.8	1.7	1.7
20-30cm画分	1.9	1.7	1.7
30-40cm画分	1.9	1.7	1.7
40-50cm画分	1.9	1.7	1.7
50-60cm画分	1.8	1.6	1.7
60-70cm画分	1.8	1.7	1.7
70-80cm画分	1.8	1.7	1.7
80-90cm画分	2.1	2.0	2.0

基準試料 2.0(mg/L)

A2	POC(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	0.4	0.2	0.4
10-20cm画分	0.4	0.3	0.3
20-30cm画分	0.4	0.3	0.3
30-40cm画分	0.5	0.3	0.3
40-50cm画分	0.5	0.3	0.3
50-60cm画分	0.4	0.2	0.3
60-70cm画分	0.4	0.4	0.3
70-80cm画分	0.4	0.4	0.3
80-90cm画分	0.7	0.7	0.5

基準試料 0.6(mg/L)

A3	TOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	2.4	2.1	2.1
10-20cm画分	2.2	2.2	2.2
20-30cm画分	2.2	2.2	2.1
30-40cm画分	2.3	2.1	2.1
40-50cm画分	2.1	2.2	2.1
50-60cm画分	2.1	2.2	2.4
60-70cm画分	2.1	2.3	2.1
70-80cm画分	2.4	2.2	2.3
80-90cm画分	2.7	3.0	3.3

基準試料 2.8(mg/L)

A3	POC(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	0.7	0.5	0.5
10-20cm画分	0.4	0.6	0.6
20-30cm画分	0.5	0.5	0.5
30-40cm画分	0.6	0.5	0.4
40-50cm画分	0.4	0.5	0.5
50-60cm画分	0.4	0.6	0.8
60-70cm画分	0.4	0.6	0.4
70-80cm画分	0.7	0.6	0.6
80-90cm画分	1.0	1.4	1.6

基準試料 0.7(mg/L)

E8	TOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.2	1.1	1.3
10-20cm画分	1.2	1.1	1.2
20-30cm画分	1.2	1.1	1.1
30-40cm画分	1.2	1.1	1.2
40-50cm画分	1.2	1.1	1.2
50-60cm画分	1.1	1.1	1.2
60-70cm画分	1.2	1.1	1.3
70-80cm画分	1.2	1.1	1.2
80-90cm画分	1.2	1.2	1.3

基準試料 1.1(mg/L)

E8	POC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	<0.1	<0.1	0.1
10-20cm画分	0.1	<0.1	0.1
20-30cm画分	0.1	<0.1	<0.1
30-40cm画分	0.1	<0.1	0.1
40-50cm画分	0.1	<0.1	0.1
50-60cm画分	<0.1	<0.1	0.1
60-70cm画分	0.1	<0.1	0.2
70-80cm画分	0.1	<0.1	0.1
80-90cm画分	<0.1	0.1	0.2

基準試料 <0.1(mg/L)

A2	DOC(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.4	1.4	1.4
10-20cm画分	1.4	1.4	1.4
20-30cm画分	1.5	1.4	1.4
30-40cm画分	1.4	1.4	1.4
40-50cm画分	1.4	1.4	1.4
50-60cm画分	1.4	1.4	1.4
60-70cm画分	1.4	1.3	1.4
70-80cm画分	1.4	1.3	1.4
80-90cm画分	1.4	1.3	1.5

基準試料 1.4(mg/L)

A2	COD(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	3.0	2.9	2.9
10-20cm画分	3.0	2.9	2.8
20-30cm画分	3.0	3.0	3.0
30-40cm画分	3.1	3.0	3.0
40-50cm画分	3.1	2.9	3.0
50-60cm画分	3.1	3.1	3.0
60-70cm画分	3.1	3.0	3.0
70-80cm画分	3.0	3.0	3.0
80-90cm画分	4.2	4.5	4.7

基準試料 2.9(mg/L)

A3	DOC(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.7	1.6	1.6
10-20cm画分	1.8	1.6	1.6
20-30cm画分	1.7	1.7	1.6
30-40cm画分	1.7	1.6	1.7
40-50cm画分	1.7	1.7	1.6
50-60cm画分	1.7	1.6	1.6
60-70cm画分	1.7	1.7	1.7
70-80cm画分	1.7	1.6	1.7
80-90cm画分	1.7	1.6	1.7

基準試料 1.7(mg/L)

A3	COD(mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	4.7	4.4	4.1
10-20cm画分	4.5	4.4	4.0
20-30cm画分	4.3	4.0	3.8
30-40cm画分	4.7	4.3	4.2
40-50cm画分	4.7	4.4	4.3
50-60cm画分	4.7	4.5	3.8
60-70cm画分	4.8	4.3	4.2
70-80cm画分	4.7	4.6	4.2
80-90cm画分	6.5	6.0	6.1

基準試料 5.6(mg/L)

E8	DOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.2	1.2	1.2
10-20cm画分	1.1	1.2	1.1
20-30cm画分	1.1	1.2	1.1
30-40cm画分	1.1	1.1	1.1
40-50cm画分	1.1	1.1	1.1
50-60cm画分	1.1	1.1	1.1
60-70cm画分	1.1	1.1	1.1
70-80cm画分	1.1	1.2	1.1
80-90cm画分	1.2	1.1	1.1

基準試料 1.1(mg/L)

E8	COD (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.7	1.6	1.5
10-20cm画分	1.7	1.5	1.6
20-30cm画分	1.5	1.4	1.6
30-40cm画分	1.6	1.6	1.6
40-50cm画分	1.6	1.5	1.7
50-60cm画分	1.7	1.5	1.7
60-70cm画分	1.7	1.6	1.6
70-80cm画分	1.5	1.6	1.7
80-90cm画分	2.0	1.8	2.0

基準試料 1.6(mg/L)

表 5 (続き)

E9	TOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.2	1.1	1.3
10-20cm画分	1.1	1.1	1.2
20-30cm画分	1.2	1.1	1.2
30-40cm画分	1.2	1.1	1.2
40-50cm画分	1.1	1.1	1.2
50-60cm画分	1.2	1.1	1.2
60-70cm画分	1.2	1.2	1.3
70-80cm画分	1.2	1.1	1.3
80-90cm画分	1.2	1.3	1.3
基準試料 1.2(mg/L)			

E9	POC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	0.1	<0.1	0.1
10-20cm画分	<0.1	<0.1	0.1
20-30cm画分	<0.1	<0.1	0.1
30-40cm画分	0.1	<0.1	0.1
40-50cm画分	<0.1	<0.1	0.2
50-60cm画分	0.1	<0.1	0.2
60-70cm画分	0.1	0.1	0.2
70-80cm画分	0.1	<0.1	0.2
80-90cm画分	0.1	0.2	0.2
基準試料 0.1(mg/L)			

E10	TOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.2	1.2	1.1
10-20cm画分	1.2	1.2	1.1
20-30cm画分	1.2	1.1	1.1
30-40cm画分	1.2	1.2	1.1
40-50cm画分	1.1	1.2	1.1
50-60cm画分	1.2	1.2	1.2
60-70cm画分	1.1	1.2	1.2
70-80cm画分	1.2	1.2	1.2
80-90cm画分	1.1	1.2	1.2
基準試料 1.1(mg/L)			

E10	POC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	0.1	<0.1	<0.1
10-20cm画分	0.1	<0.1	<0.1
20-30cm画分	0.1	<0.1	0.1
30-40cm画分	0.1	<0.1	<0.1
40-50cm画分	<0.1	<0.1	0.1
50-60cm画分	0.1	<0.1	0.2
60-70cm画分	<0.1	<0.1	0.2
70-80cm画分	0.1	0.1	0.1
80-90cm画分	<0.1	0.1	0.1
基準試料 <0.1(mg/L)			

E9	DOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.1	1.2	1.2
10-20cm画分	1.1	1.1	1.1
20-30cm画分	1.2	1.1	1.1
30-40cm画分	1.1	1.2	1.1
40-50cm画分	1.1	1.1	1.0
50-60cm画分	1.1	1.2	1.0
60-70cm画分	1.1	1.1	1.1
70-80cm画分	1.1	1.1	1.1
80-90cm画分	1.1	1.1	1.1
基準試料 1.1(mg/L)			

E9	COD (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.5	1.5	1.6
10-20cm画分	1.5	1.6	1.6
20-30cm画分	1.5	1.5	1.6
30-40cm画分	1.5	1.7	1.6
40-50cm画分	1.6	1.6	1.6
50-60cm画分	1.7	1.7	1.5
60-70cm画分	1.7	1.7	1.7
70-80cm画分	1.6	1.7	1.7
80-90cm画分	1.8	1.9	1.9
基準試料 1.7(mg/L)			

E10	DOC (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.1	1.2	1.1
10-20cm画分	1.1	1.3	1.1
20-30cm画分	1.1	1.3	1.0
30-40cm画分	1.1	1.3	1.1
40-50cm画分	1.1	1.2	1.0
50-60cm画分	1.1	1.2	1.0
60-70cm画分	1.1	1.2	1.0
70-80cm画分	1.1	1.1	1.1
80-90cm画分	1.1	1.1	1.1
基準試料 1.1(mg/L)			

E10	COD (mg/L)		
	3時間後	6時間後	10時間後
0-10cm画分	1.5	1.5	1.7
10-20cm画分	1.6	1.6	1.6
20-30cm画分	1.4	1.5	1.6
30-40cm画分	1.4	1.6	1.7
40-50cm画分	1.5	1.6	1.6
50-60cm画分	1.4	1.7	1.6
60-70cm画分	1.5	1.7	1.7
70-80cm画分	1.5	1.7	1.7
80-90cm画分	1.6	1.9	1.9
基準試料 1.6(mg/L)			

A1地点のTOCを見ると、3時間後の80-90 cm画分の濃度が最も高かった(2.7 mg/L)。6時間後と10時間後も80-90 cm画分の濃度が最も高かったが、それに加えて、それより上の画分はほぼすべて同程度の濃度(2.0~2.2 mg/L)で一定となったことから、この間に沈降は起こっておらず、6時間で沈降しきったと考えられた。これは、0-10 cm画分のTOCが6時間で80-90 cm画分にまで沈降したと考えられることから、約80 cm/6h、すなわち、3.2 m/day以上で沈降したことになる。

CODも3時間後を見ると、80-90 cm画分が最も濃度が高く(3.9 mg/L)、6時間後においては更に高濃度(4.4 mg/L)となった。そして、TOCと同様に6時間後と10時間後の各画分の濃度に差が見ら

れないことから、6時間で沈降するCOD成分は沈降しきったと考えられ、CODも3.2 m/day以上で沈降したことになる。

DOCは試験開始時から10時間後までの各画分の濃度を見てもほぼ一定(1.5~1.7 mg/L)であることから、時間経過とともに沈降する成分はほとんど存在していなかったと考えられた。

A2地点でもTOCは、3時間後、6時間後および10時間後にA1地点と同様の挙動を示していたことから、3.2 m/day以上の速度で沈降していると考えられた。DOCも試験開始時から10時間にかけて各画分で大きな濃度差が見られなかったことから、沈降した有機物成分はPOCが主体であったと推察された。CODについては、各時間の画分ごとの

差から速度を推察することは困難であった。

A3地点でも、3時間後の80-90 cm画分を除く各画分のTOCは、2.1~2.4 mg/Lであり、試験開始時(基準試料)の濃度(2.8 mg/L)よりも低いことから沈降していたことがわかった。しかし、3時間後、6時間後および10時間後の濃度の差から速度を求めることは困難であった。DOCはA1およびA2地点と同様に10時間後まで濃度差がほとんど見られず(約1.6~1.7 mg/L)、沈降していないと考えられた。CODは試験開始時(基準試料)の濃度(5.6 mg/L)と比較して3時間後の各画分濃度が10-0 cm画分以外は低かったことから、沈降していたと考えられた。また、3時間後と6時間後の10 cmより上の画分の濃度を比較すると、6時間後の方が低いことから、3時間から6時間にかけて沈降しており、同様に、6時間後と10時間後の濃度から、この間も沈降し続けていることが示唆された。

以上より、A1およびA2地点のクロロフィル極大層のTOCは3.2 m/day以上の速度で沈降することが明らかとなった。A3地点に関しては推定が困難であったが、珪藻類の種類を見ると、*Skeletonema costatum*および*Chaetoceros spp.*が多く存在しており、A1およびA2地点と種の組成が大きく変わらないことから、同様のTOC沈降速度である可能性が考えられた。

なお、DOCの沈降は確認されなかった。

6地点の珪藻類の細胞密度と有機物濃度の関係は、細胞密度が高いほど、有機物濃度も高くなっていたことから、植物プランクトンの細胞密度が有機物濃度に影響していると推察された。このことから、伊勢湾内で夏季に沈降する有機物成分は、植物プランクトンが主体であり、今回明らかとなった速度は植物プランクトンの沈降速度と考えられる。ただし、この調査においては、紫外線照射による前処理を施しているため、植物プランクトンの死骸や代謝物(デトリタス)の沈降速度を表しており、微生物の生存状況が実際の湾内の状況とは異なることに留意すべきである。

植物プランクトンの沈降速度は、細胞のステージによって差があり、増殖段階や休眠状態の細胞よりも、死細胞や凝集細胞の方が速いことが知られている⁵⁾。また、大きい細胞サイズの植物プランクトンの方が速く沈降することも知られており、優占する植物プランクトンの種類によって沈降速度に差が生じる可能性もある。しかし、今回の調査で多く確認された*Skeletonema costatum*お

よび*Chaetoceros spp.*は、夏季に伊勢湾内で発生する赤潮等の原因プランクトンとして知られる⁶⁾ように、一般的な種類であることから、夏季の通常時の結果としてみなしてよいと考える。

図3のDOのコンター図からもわかるように、水深10 m以深で貧酸素水塊が広がっていることから、有機物の沈降速度を3.2 m/dayとすると、表層から水深10 mまでは約3日で到達することになる。伊勢湾における有機物の分解特性試験の結果^{4,7)}によると、湾奥および湾口表層水の易分解性有機物の分解特性時間(その時間が経過するごとに着目する濃度が1/e倍となる時間)はそれぞれ3.2~7.3日、9.8日程度であることから、3日後の水深10 m到達時点での未分解の易分解性有機物は湾奥で約40~66%、湾口で約74%残存していると計算でき、貧酸素化に影響していると考えられた。加えて、伊勢湾においては、クロロフィル極大層が中層に発生することが知られている^{8,9)}。中層にクロロフィル極大層が発生した場合、易分解性有機物が中底層に到達するまでの所要時間が表層で発生した場合よりも短いため、未分解の易分解性有機物がより多く中底層に供給されることで、さらに貧酸素化しやすい環境となっている可能性が考えられた。

ただし、3.3の方法には湾内流の影響は考慮されておらず、実際には水平方向の流れによって沈降速度は緩和される可能性には留意すべきである。

結 語

伊勢湾内の水質構造調査を行ったところ、水深約10 mに躍層が確認された。また、10 m以深においては貧酸素水塊が広がっていた。クロロフィル極大層は、湾奥部の水深0~10 m付近に確認され、その下端部は躍層の境目と同じ水深10 m付近であり、主に表層に確認されたが、中層に発生した地点もあった。植物プランクトンの顕鏡の結果、*Skeletonema costatum* および *Chaetoceros spp.*が多く見られたが、伊勢湾によく見られる種であったことから、伊勢湾の夏季の通常時の状態を調査することができたと考えられた。

有機物の沈降速度試験の結果、A1 および A2 地点の沈降性 TOC は 3.2 m/day 以上の速度で沈降していた。これは植物プランクトン(*Skeletonema costatum* および *Chaetoceros spp.*等)のデトリタスの沈降速度と捉えることができる。易分解性有機物の分解特性時間を考慮すると、湾奥で約40~66%、

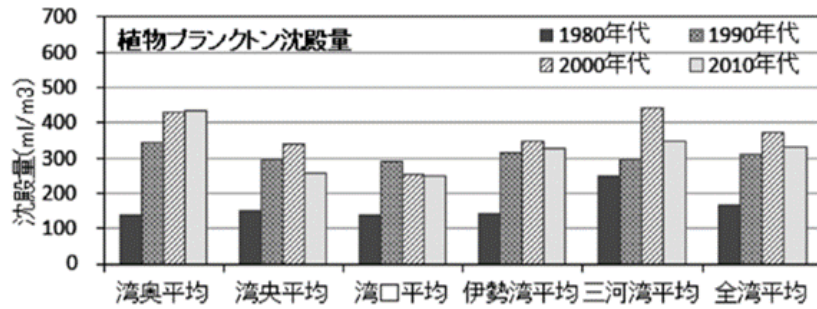


図6 植物プランクトンの沈殿量の区域別平均値の年代推移、表層、暖候期平均（千葉 2019）

湾口で約74%の沈降性の易分解性有機物が未分解のまま水深10m付近(貧酸素水塊の上端)まで沈降すると計算されることから、中底層における貧酸素化に影響していると考えられた。

千葉¹⁰⁾は、富栄養化を脱した伊勢湾においては、栄養塩濃度の低下とTN/TP比の変化に伴って植物プランクトンの小型化が起こっていると推察している。小型化した植物プランクトンは、比増殖速度が速く、低栄養塩条件下においても基礎生産量を維持してきた可能性がある。このことが、窒素およびリンの削減にも関わらずCODが減少せず、貧酸素化につながる有機物源(植物プランクトン)を生み出している可能性がある。

伊勢湾中底層に供給される易分解性有機物量について見ると、伊勢湾広域総合水質調査の植物プランクトン沈殿量の年代推移(図6)¹⁰⁾は、1980年代から2000年代まで増加し、その後横ばいとなっている。この量は植物プランクトンの基礎生産量とそのターンオーバー(回転速度)、そしてプランクトンに対する捕食圧等に関係すると考えられるため、沈殿物、基礎生産量および比増殖速度等の調査が今後必要と思われる。

文献

- 1) 環境省：令和元年度版環境白書。第2部，第4章，第2節，水環境の保全(2019)。
- 2) 谷村 譲紀, 奥山 幸俊, 国分 秀樹, 佐藤 弘之, 小林 利行, 千葉 賢, 大八木 麻希：伊勢湾の水質の変化とその傾向についての考察。三重保環

研年報，**19**，50-54(2017)。

- 3) 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)。
- 4) 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：伊勢湾の有機物の分解特性に関する研究(その2)。三重保環研年報，**21**，88-93(2019)。
- 5) THEODORE J. SMAYDA：THE SUSPENSION AND SINKING OF PHYTOPLANKTON IN THE SEA. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., **8**，353-414(1970)。
- 6) 三重県水産研究所：平成22年三重県沿岸海域に発生した赤潮。
<https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000399037.pdf> (2020年6月25日アクセス)
- 7) 渡邊 卓弥, 谷村 譲紀, 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)。
- 8) 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)。
- 9) 渡邊 卓弥, 奥山 幸俊, 有富 洋子, 辻 将治, 大八木 麻希, 千葉 賢：伊勢湾の水質構造調査。三重保環研年報，**21**，82-87(2019)。
- 10) 千葉 賢：伊勢湾の植物プランクトンの小型化と水質の長期変化の関係について。四日市大学論文集，**32**(1)，139-155(2019)。

The Study on Sedimentation Velocity of Organic Matter in Ise Bay

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

Keywords : Ise bay, poor oxygen water mass, organic matter, sedimentation velocity

Poor oxygen water mass occurs in Ise bay every summer. The reason is considered that microorganisms decompose easily decomposable organic matter while consuming oxygen in the middle to bottom layer where the oxygen supply is poor due to stratification. In this study, the sedimentation velocity of organic matter, which is related to forming poor oxygen water mass, was revealed and the residual rate of easily decomposable organic matter when reaching the middle layer was estimated.

Sedimentation velocity of organic matter in the chlorophyll maximum layer from the inner to the central part of Ise bay was more than 3.2 m/day. Most phytoplankton in the maximum chlorophyll layer were diatoms, and *Skeletonema costatum* and *Chaetoceros* spp. were existed mainly. The higher the cell density of diatoms was, the higher the concentration of organic matter was. It is suggested that the cell density of phytoplankton influences the concentration of organic matter. Furthermore, based on the study of the organic matter decomposition characteristics in the past, it was estimated that about 40 to 66% in the inner part of the bay and about 74% in the mouth of the bay of sedimentable and easily decomposable organic matter settles to the middle layer without being decomposed. Therefore, it is considered that sedimentable and easily decomposable organic matter affects poor oxygen water mass.