

国立環境研究所特別研究報告

Report of Special Research from the National Institute for Environmental Studies, Japan

SR - 93 - 2010

貧酸素水塊の形成機構と生物への影響評価
に関する研究
(特別研究)

Hypoxia generation and its impact on benthic biota

平成 19 ~ 21 年度

FY2007 ~ 2009

NIES



独立行政法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

<http://www.nies.go.jp/>

貧酸素水塊の形成機構と生物への影響評価
に関する研究
(特別研究)

Hypoxia generation and its impact on benthic biota

平成 19 ~ 21 年度

FY2007 ~ 2009

特別研究「貧酸素水塊の形成機構と生物への影響評価に関する研究」

(期間 平成 19 ～ 21 年度)

課題代表者：牧 秀明

執 筆 者：中村泰男、東 博紀、牧 秀明

編 者：牧 秀明

序

本報告書は、平成19～21年度の三年間に渡って実施されてきた特別研究「貧酸素水塊の形成機構と生物への影響評価に関する研究」の成果をとりまとめたものです。

沿岸海域における貧酸素水塊の発生は世界各地で起こっており、特に人口密集地や経済活動が活発な都市近郊の沿岸部に集中して見られますが、英語では生物が生息出来ない「死の水域」“dead zone”と呼ばれており、このような海域が400以上存在するとされています。

我が国でも総量規制対象水域であり大都市に隣接する東京湾、伊勢・三河湾、大阪湾は夏季に大規模な貧酸素水塊に見舞われていますが、その他、北海道のサロマ湖、能取湖、網走湖、噴火湾、京都府の舞鶴湾、久美浜湾、島根県の中海、九州の大村湾、有明海の一部など、必ずしも近辺に大都市が存在しない全国各地の閉鎖性の強い海域においても貧酸素水塊が顕在化しており、魚介類等、水生生物の生息場悪化や青潮発生などを引き起こしています。

貧酸素水塊発生の主な要因として（1）底泥による溶存酸素消費、（2）水塊中の有機物の分解に伴う溶存酸素消費、（3）成層強化による鉛直混合阻害による表層からの溶存酸素供給の低下が挙げられますが、（1）については性状の異なる底泥や季節ごとに系統的に測定された時空間別データが無く、（2）については、陸起源のもの、内部生産に由来する植物プランクトンの生産した有機物等を分別してその分解性を評価したデータが乏しいことから、水質再現のための3次元流動・生態系モデル・シミュレーションにおいても、それぞれの過程の詳細な構造化が出来なかったのが実状です。

また、貧酸素水塊発生に引き続いて底質環境が悪化することにより、最も影響を受ける大型の底生動物であり水産的にも重要な二枚貝の実現場における生残や育成に関する知見も乏しく、これらの水生生物保護のための指針に資する情報が必要であると考えられます。

一方行政的にも、水質環境基準生活環境項目では海域における溶存酸素の基準値が定められていますが、特に底層の溶存酸素を対象にしたものではなく、貧酸素水塊を管理する仕組みになっていないのが現状です。

このような背景のもとに、本研究においては東京湾を調査研究の対象水域とし、（1）プランクトン由来の有機物と陸起源の有機物による貧酸素水塊形成への寄与の定量化、（2）底泥の酸素消費速度の時空間分布特性の把握、（3）貧酸素による底生生物生息環境への影響評価、（4）流動・生態系モデルに基づく貧酸素水塊形成過程の解析について主に遂行してきました。

その結果、1）陸起源のものより内部生産（植物プランクトン）に由来する粒子態の有機物の分解性が高いこと、2）底泥の酸素消費速度は底生生物の現存量より泥温と硫化物含量に大きく依存すること、3）典型的な劣悪環境である運河部における二枚貝の貧酸素水塊に対する耐性は種毎に大きく異なっていること、4）3次元流動・生態系モデル・シミュレーションにおいて、浮遊系の有機物について易分解性・難分解性と区別し、さらに底泥の酸素消費速度の実測値を適用することにより水質再現精度が上昇すること、を明らかにしました。

これらの成果は、今後、総量規制や底質改善による底層の溶存酸素確保のための施策効果の定量的評価等に活用され、今後の閉鎖性海域における水環境管理に有効な知見を提供するものと考えています。

平成22年9月

独立行政法人 国立環境研究所
理事長 大垣 眞一郎

目 次

1 研究の目的と経緯	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の構成	1
2 研究の成果	3
2.1 閉鎖性海域における易分解性・難分解性の有機炭素の評価	3
2.1.1 はじめに	3
2.1.2 対象水域と試験方法	3
2.1.3 結果と考察	3
2.1.4 まとめ	7
2.2 (補遺) 東京湾奥部における底泥への有機物沈降(堆積)フラックスの測定	8
2.2.1 はじめに	8
2.2.2 調査地点と方法	8
2.2.3 結果と考察	8
2.3 底質の酸素消費速度の時空間分布特性の把握	11
2.3.1 はじめに	11
2.3.2 対象水域と試験方法	11
2.3.3 結果と考察	14
2.3.4 まとめ	15
2.4 水塊の貧酸素化に伴う底生生物生息環境への影響評価	17
2.4.1 貧酸素状態が二枚貝類の生残に及ぼす影響(室内飼育実験)	17
2.4.2 貧酸素水がしばしば侵入する東京湾の干潟における二枚貝類の生残と成長	18
2.5 陸起源負荷の貧酸素発生への寄与を定量的に表す3次元流動・水質・生態系モデルの開発	23
2.5.1 はじめに	23
2.5.2 流動・水質・生態系モデル	23
2.5.3 解析結果と考察	26
2.5.4 まとめ	28
2.6 まとめと今後の展望	29
[資料]	
I 研究の組織と研究課題の構成	33
1 研究の組織	33
2 研究課題と担当者	33
II 研究成果発表一覧	34
1 誌上発表	34
2 口頭発表	35

1 研究の目的と経緯

1.1 研究の背景と目的

東京湾、大阪湾、伊勢・三河湾など巨大都市に隣接する閉鎖性海域では、総量規制により有機汚濁や栄養塩の流入負荷削減が進められているが、依然として水質環境基準の達成率は改善されておらず、富栄養化が顕在化している。この状況を受け、近年それぞれの湾において再生推進委員会等が設立され、水質目標が設定されつつある。

現在、総量規制や湾再生推進委員会での最大の議論は現行のCODで代表される環境基準及びそれによる規制の在り方である。環境省では、第7次総量規制の検討に先立ち、この議論に本格的に取り組み始めた。上記の閉鎖性海域では、富栄養化の結果として起こる貧酸素水塊の形成が大きな問題になっている。大規模な貧酸素水塊は青潮の発生や海洋生物の大量死滅をもたらし、水産資源の減少のみならず、親水の間としての水辺の快適さを著しく損ねる。

こうした中、閉鎖性海域の各再生推進委員会でも、水質の目標として溶存酸素(DO)の回復を第一に掲げている。しかし、現行の水質環境基準(生活環境項目)では、表層のDOが項目としてあるものの、貧酸素水塊が形成される底層におけるDOについては特に設定されておらず、今後、海域毎の底生生物相への影響を考慮した新たな基準策定が待望されている。一方、富栄養化により貧酸素水塊が形成される過程や、どの位の期間、DOがどの程度低下すると底生生物に壊滅的な影響が出るか等の定量的な情報が不足しており、底層DO低下防止のための排水規制に係わる十分な科学的根拠を与えるに至っていない。

例えば、総量規制で対象項目となる有機汚濁や窒素・リンの削減がどの程度貧酸素水塊の減少に効果的であるかについては、水質モデル・シミュレーションで検討されているが、底質-水柱間の物質循環の過程が定量的に把握されていないために、使用されるモデルの信頼性は充分とは言えない。また、合流式下水道の越流水や、通常、活性汚泥で高度処理されている放流水に含まれる有機物の海域における分解特性(易・難分解有機物の分別・評価)については充分には明らかにされていない。

そこで、本研究の第一の目的は、貧酸素水塊が形成さ

れる過程を定量的に解明することにより、貧酸素水塊規模の縮小化への道筋をつけることである。第二の目的は、貧酸素水塊の生物への影響を評価することで、各種生物が安定的に個体群を維持するための酸素濃度の指標を明らかにすることである。

本研究では、新たな指標体系の策定にむけた基礎的な知見を得ることを目指す。具体的には、1) プランクトン起源の有機物と陸起源有機物の分解に伴う溶存酸素消費、2) 東京湾底質の酸素消費速度の空間および季節変動、3) 干潟の二枚貝等の底生生物への貧酸素の影響、4) 流動場・生態系モデルによる貧酸素水塊形成過程の再現について検討を行う。

1.2 研究の構成

サブテーマ1(本報告書2.1) プランクトン由来の有機物と陸起源の有機物による貧酸素水塊形成への寄与の定量化

(図1中の関連する過程・要素:①、②、④、⑤、⑦、⑨)

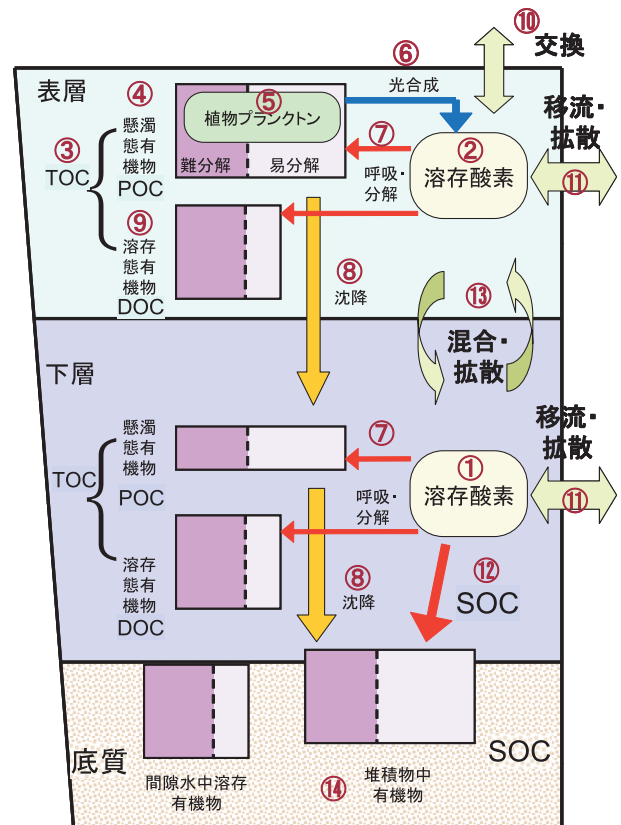


図1 海域における貧酸素水塊発生に関わる各過程

東京湾で卓越する植物プランクトン由来の有機物の分解試験を実施し、その分解特性（易・難分解有機物の分別、言い換えれば酸素消費特性）の評価を行う。

さらに、下水処理水・未処理水の流入の影響を強く受ける運河部等の非植物プランクトン性有機物の分解特性も併せて評価し、これらの由来の異なる懸濁態有機炭素(POC)の性状(クロロフィル a、炭素安定同位体比等)との関連性について調べるとともに、貧酸素水塊形成に対する寄与を見積もる。

サブテーマ2(本報告書2.3) 底質の酸素消費速度の時空間分布特性の把握

(図1中の関連する過程・要素:①、⑧、⑫、⑭)

閉鎖性水域における貧酸素水塊発生的一大要因である底質における酸素消費能を把握するために、貧酸素水塊発生が著しい東京湾湾奥内の水深や底質の異なる典型的な地点において、その酸素消費速度を季節毎に測定する。そして、各底質の粒度組成、強熱減量(有機物含量)や硫化物含量、それに底生動物現存量との関連性について解析を行う。

サブテーマ3(本報告書2.4) 貧酸素による底生生物生息環境への影響評価

(図1中の関連する過程・要素:①、⑧、⑫、⑭)

東京湾に生息する水生生物について、生残・成長・再生産に及ぼす貧酸素の影響を評価する。特に、水質浄化の hot spot である浅場・干潟の多様な二枚貝類に対する貧酸素水塊の影響の評価を行なう。具体的には、貧酸素水の侵入を頻繁に受ける干潟において、DO・水温・塩分の連続モニターを行なうとともに、二枚貝類の消長を追跡する。さらに、対象とする二枚貝の現場飼育実験・室内実験をおこない、生残への貧酸素の影響を明らかにする。

実際には、東京湾の砂質干潟に生息する(あるいはしていた)二枚貝類(アサリ・シオフキ・ホンビノスガイ・

ハマグリ)への貧酸素水塊侵入の影響を評価する。すなわち1)それぞれの二枚貝の貧酸素(<0.5mg/L)耐性を室内飼育実験系(20℃)で解析し、また、2)東京湾大井干潟(砂が多い地点と、泥・有機物の多い地点の2地点)において、上述の二枚貝のケージ飼育実験を行い、貝類の生残・成長と環境変動(貧酸素水の侵入など)の関係を明らかにする。

これらの実験を通じ、水塊の貧酸素化が二枚貝群集におよぼす影響を解析する。

サブテーマ4(本報告書2.5) 流動・生態系モデルに基づく貧酸素水塊形成過程の解析

(図1中の関連する過程・要素:①~⑭全て)

サブテーマ1・2で得られた結果を考慮した内湾の流動・水質・生態系モデルの開発を行う。それを用いて2007・2008年の東京湾の再現計算を実施し、本モデルの水質の再現精度・妥当性・有用性を検討する。さらに、陸域からの汚濁負荷物質(有機炭素、窒素・リン)、河川水・下水由来DOの流入量の変化が貧酸素水塊におよぼす影響を数値シミュレーションにより評価を行う。

(補遺:本報告書2.2) 東京湾奥部における底質への有機物フラックスの測定

(図1中の関連する過程・要素:①、④、⑤、⑦、⑧、⑫、⑭)

富栄養化した閉鎖性海域においては、様々な由来を持つ懸濁態有機物が海底に沈降・供給されるのに伴い底層で酸素が消費され、貧酸素水塊が発生する一大要因となっている。本項で東京湾において、植物プランクトンの増殖が活発な夏季に沈降粒子捕集装置(セディメントトラップ)を設置し、沈降粒子フラックスを求める。さらに、沈降粒子の分解特性を検討する。

なお本項は、研究は研究開始時点では東京湾でのセディメントトラップ設置が可能か不明だったためにサブテーマに含めなかったが、港湾管理当局から設置許可がおりたためにサブテーマに準じた扱いをした。

2 研究の成果

2.1 閉鎖性海域における易分解性・難分解性の有機炭素の評価

2.1.1 はじめに

海水中に含まれる有機物には植物プランクトン（およびこれに起源を持つ）粒子の他に、河川水・下水処理水に含まれる様々な粒子状・溶存態有機物が存在する。これら様々な有機物は、細菌による好氣的分解を受けるが、その分解の程度（と分解の際に消費される酸素量）は、おのおの物質によって異なっていると予想される。

本節では東京湾において1) 植物プランクトン由来の有機物が卓越していると考えられる内湾中央域と、2) 河川水・下水処理水が卓越する運河・河口部での海水中の有機物分解の比較を行う。そして、海水中での酸素消費への各有機物成分の寄与を推定する。

2.1.2 対象水域と試験方法

河川由来の有機物が卓越していると思われる地点として、東京湾に流入する代表的な河川である荒川、隅田川、多摩川河口の「河口1～4」、下水処理場や越流水由来の有機物が卓越している地点として「運河1～6」、植物プランクトン（内部生産）由来の有機物が卓越していると思われる「内湾5、6、7、11、22、23、35」（東京都環境局公共用水域常時監視環境基準点に準拠）を選んだ（図2）。

これら地点の表層（一部、下・底層を含む）海水を有機物分解試験に供した。

また、内湾35の海水の内一部は実験室内で照射下で植物プランクトンを増殖させ、濃厚赤潮状態としたものも実験に用いた。

分解試験は、450℃で4時間焼成処理を行った500 mL容ガラス製三角フラスコにそれぞれの試水をろ過をせずに300 mL入れ、アルミ箔で蓋をした後、20℃・暗条件で約70日間振とうした。概ね2週間毎に少量（約15 mL）の採水を行い、ろ過したものの溶存態有機炭素（DOC）の減少を追跡した。振とう終了後、三角フラスコ内に残存している検液全量をろ過し、そのろ紙を懸濁態有機炭素（POC）分析に供した。試験は三連で行い、平均値を求めて評価を行った。

2.1.3 結果と考察

分解試験に供試した各試水の主な水質を表1に示す。運河・河口部における塩分は平均15.8（5～27）であるのに対し、沖合部では平均27.4（14～33）と運河・河口部より10以上高かった。クロロフィル *a* 濃度（Chl *a*）は運河・河口部で平均4.8 μg/L（0.1～28 μg/L）であり、植物プランクトン現存量が少なかった。一方、沖合部の表層水はChl *a* が平均136 μg/L（38.6～459 μg/L）と非常に高かった。沖合部海水試料における全有機炭素（TOC = DOC + POC）中でPOCの占める割合（平均）は、67%（39～88%）、運河・河川部では32%（11～64%）となり、沖合部では豊富な植物プランクトン現存量（Chl *a* 量）を反映してPOCの占める割合が高く、逆に植物プランクトン現存量の少ない運河・河川部ではPOCの占める割合が低かった。

POCの内、植物プランクトン由来のもの全POC中で占める割合を算出すると（POC/Chl *a* 重量濃度比40を仮定）、沖合部で平均56%（9.3～100%）、一方、運河・河口部では平均13%（0.7～45%）となり、内部生産由来のものより陸起源のPOC成分の占める割合が高いことが示された（図4a）。

POCの炭素安定同位体比（ $\delta^{13}C$ ）を比較したところ、

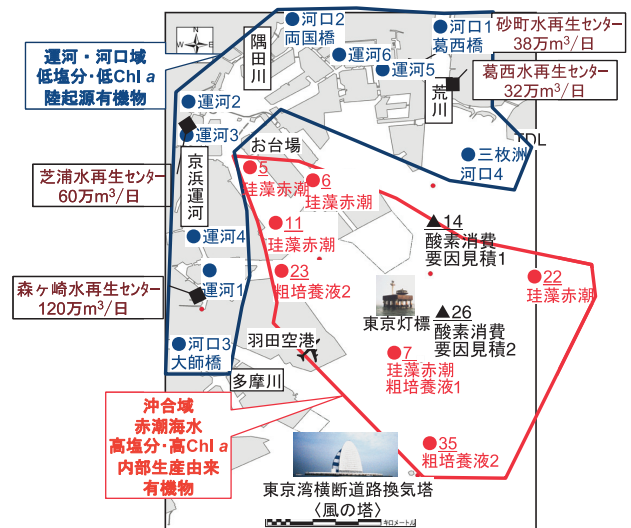


図2 東京湾奥部におけるDOC、POC分解試験に供試した海水試料を採取した地点と、単位面積当たり水柱中の全酸素消費速度に対する水塊中のDOC、POC分解による酸素消費速度の寄与の試算を行った地点

表1 DOC、POC 分解試験に供試した海水試料の主な水質（各試水名称について、冒頭4桁の数字は採水年月を、末尾の「表・下・底」が付いているものは採水位置を示す。例えば“0907内5表”、“0907内5下”はそれぞれ2009年7月に内湾5の表層と下層にて、“0708内11底”は2007年8月に内湾11の底層にて採水したものであることを指す）

運河・河口域	塩分	Chl a (µg/L)	POC (mg/L)	DOC (mg/L)	TOC* (mg/L)	POC/TOC (%)	$\delta^{13}C$ (‰)
河口1	27.1	1.3	0.53	3.90	4.43	11.9	-23.7
河口2	23.9	1.7	0.19	1.97	2.16	8.6	-24.1
河口3	5.8	1.7	0.63	3.20	3.83	16.6	-25.2
河口4	8.0	5.5	2.38	1.37	3.75	63.5	-26.6
0507 運河1	5.0	2.0	2.57	2.36	4.93	52.2	-22.9
0804 運河1	9.0	2.7	3.24	1.85	5.09	63.7	-24.6
運河2	12.0	0.1	0.48	3.85	4.33	11.1	-23.9
運河3	10.0	0.2	0.90	4.13	5.02	17.8	-24.1
0611 運河4	20.0	1.1	0.39	2.11	2.50	15.7	-25.4
0710 運河4	18.0	2.5	0.56	2.12	2.67	20.9	-26.6
0811 運河4	22.0	1.5	0.50	1.24	1.73	28.7	-26.5
運河5	17.0	13.9	1.73	2.33	4.06	42.7	-26.7
運河6	20.5	28.1	2.26	1.88	4.15	54.6	-25.3
0804内23	23.0	4.4	1.48	1.85	3.33	44.4	-22.9
沖合域							
0907内5表	21.3	54.0	3.04	2.44	5.49	55.5	-21.8
0907内5下	28.0	8.4	1.24	1.86	3.10	40.1	-22.8
0708内6	24.0	83.6	4.27	2.84	7.11	60.1	-18.3
0806内11	20.0	193.6	7.73	3.07	10.80	71.6	-22.7
0706内11	23.0	104.5	5.90	3.06	8.96	65.9	-19.5
0708内11底	31.0	4.4	1.08	1.68	2.76	39.2	-23.0
0508内22	25.0	130.0	4.43	2.57	7.00	63.3	-19.2
0806内22	22.0	458.9	15.17	3.74	18.91	80.2	-19.6
0705内25	25.0	38.6	3.14	1.95	5.09	61.7	-19.8
0809内25	14.0	52.8	3.09	1.66	4.75	65.0	-21.3
0907内25	21.5	100.4	4.96	2.42	7.38	67.3	-19.5
粗培養液1	27.0	158.0	10.20	2.75	12.95	78.8	-16.6
粗培養液2	33.0	116.0	17.30	10.3	27.59	62.7	-20.6
<i>Skeletonema</i> 添加		8.7	2.17	2.28	4.45	48.7	
<i>Thalassiosira</i> 添加		54.4	2.68	1.51	4.19	64.0	
ST上1	30.4		6.79	1.25	8.04	84.4	-17.2
ST下1	32.2		5.13	0.70	5.83	88.1	-18.3

*POC+DOC

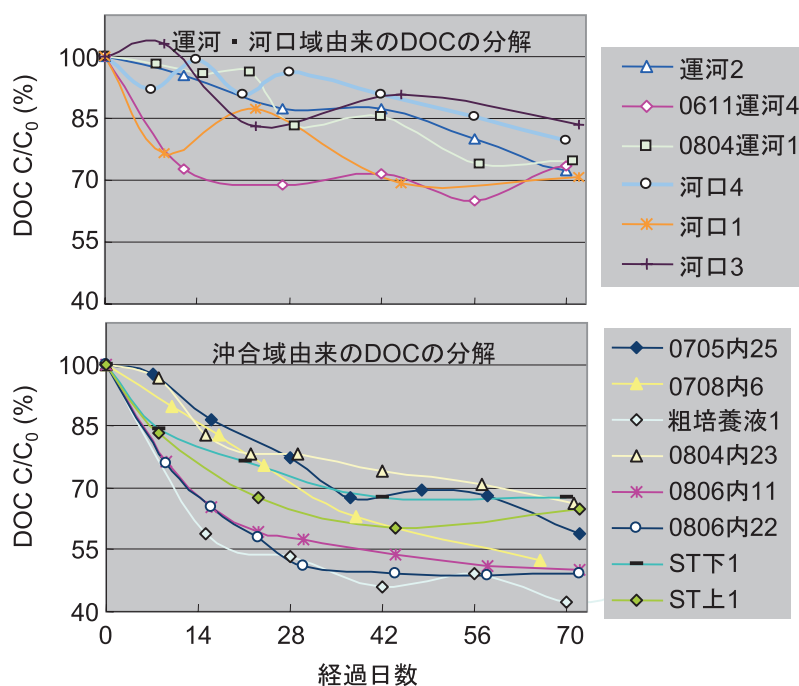


図3 各海水試料中のDOCの分解（各試水名称については表1と同様である）

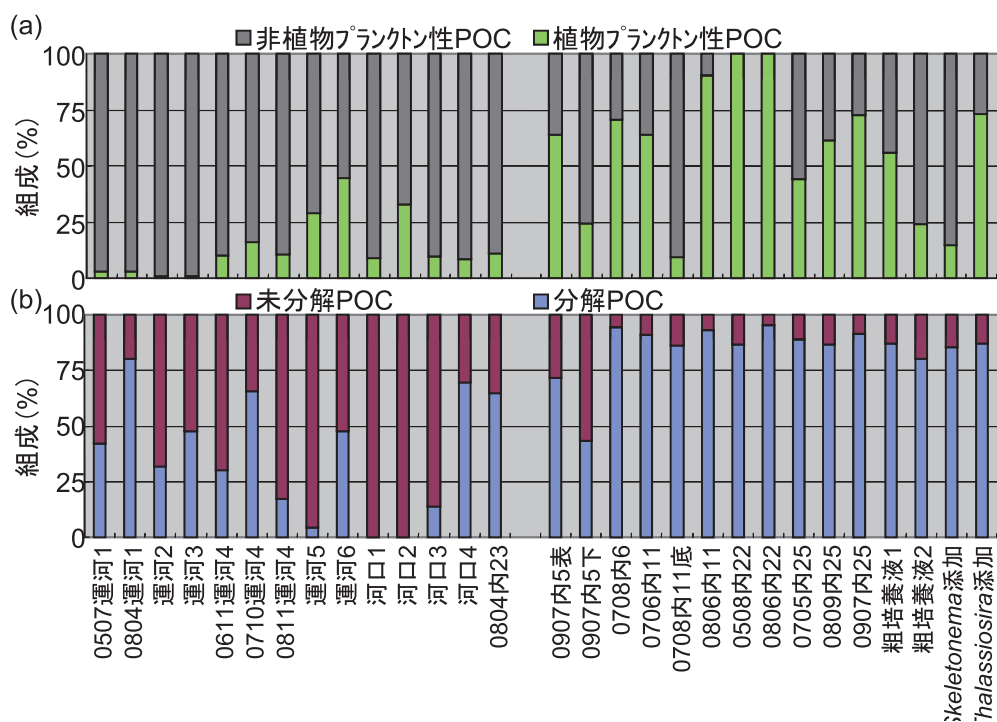


図4 各海水試料中の POC の (a) 植物プランクトン性・非植物プランクトン性それぞれのものの組成と (b) 分解試験後の分解・未分解 POC の割合 (各試水名称は表 1 と同様)

沖合部では平均 - 20 % (- 23.0 ~ - 16.6 %) だったのに対し、運河・河口部では平均 - 24.9 % (- 26.7 ~ - 22.9 %) と沖合部の方が高かった (表 1)。

各試水の有機物分解試験における DOC の時間変化 (初期値 C_0 : 100 % に対する割合) の代表例を図 3 に示す。

沖合部の試水や粗培養液では、試験開始後ほぼ 30 日で 30 ~ 50 % 減少したが、以後、ほとんど減少は見られなかった。運河部の試水では DOC の減少が試験開始後 4 週間程度ではほぼ止まり、減少率も 30 % 前後に止まった。

分解試験終了時における沖合部の海水、および粗培養液中の POC と TOC の減少率は、それぞれ平均 78 % (43 ~ 96 %)、平均 63 % (27 ~ 87 %) であったのに対し、運河・河口部試水の最終減少率は POC で平均 43 % (4.4 ~ 80 %)、TOC で平均 35 % (3.4 ~ 63 %) であり、DOC と同様に運河・河口部試水より沖合部試水中の POC の分解率の方が高かった (図 4 b)。

なお、今回の分解試験では予めろ過した試水の分解試験を行っていないので DOC 濃度の時間変化は、予め海水中に存在していた DOC の分解と POC から派生する DOC 双方を反映している。

TOC 分解量への DOC と POC それぞれの分解の寄与を比較したところ、河口・運河部では POC 分解の寄与

率は平均 47 % (12 ~ 88 %)、DOC 分解のそれは平均 53 % であったのに対し、沖合部では POC 減少率の寄与率は平均 85 % (58 ~ 100 %) となった。

すなわち、河口・運河部では DOC と POC の分解寄与率がほぼ同等であるのに対し、植物プランクトンの占める POC の割合が高い沖合部では POC 分解の寄与率が非常に高いことが示された。

以上のことから、東京湾における有機炭素の分解性は、その起源と性状によって大きく異なり、POC の分解率は、POC への植物プランクトンの寄与と炭素安定同位体比が大きいくほど高いことが認められた (図 5)。

逆に言うと、植物プランクトンが余り含まれない (炭素安定同位体比が小さい) 河川水や運河水中の POC は分解され難いことが示された。

以上のことから POC はその植物プランクトンバイオマス由来のものが占める割合が高い (言い換えると陸起源の POC の占める割合が低い) ほど、さらに塩分との関係が示すように河川水や下水処理水等の陸起源の負荷が少ない地点ほど、分解率が高いことが示された。

二酸化炭素の組成から化学量論的に 1 原子の有機炭素が無機化 (完全分解して二酸化炭素になる) する際に 1 分子の酸素を消費すると考え DOC・POC それぞれの分解量から理論的 DO 消費量を算定したところ、運

河・河口域の試水では DOC の分解によるものが平均で 1.93 mg O₂/L (最低 0.17 ~ 4.92 mg O₂/L)、POC の分解によるものが平均 1.93 mg O₂/L (最低 0.20 ~ 6.95 mg O₂/L) であるのに対し、赤潮海水や植物プランクトン粗培養試液からなる沖合域の試水では DOC の分解によるものが平均 2.80 mg O₂/L (最低 0.25 ~ 21.4 mg O₂/L)、POC の分解によるものが平均 12.3 mg O₂/L (最低 1.44 ~ 38.6 mg O₂/L) と見積もられ、沖合域における POC の分解に伴う酸素消費が非常に大きいことが示された。

以上で得られた海水中の有機物の分解速度と、本特別研究とは別途 2006 年に東京湾奥部において測定した POC・DOC 濃度の鉛直分布値から、水塊中の有機物分解に伴う酸素消費速度の推定を試みた。

DOC と POC 分解とそれに伴う DO 消費それぞれの速度との関係式は以下の通りである。

$$\frac{d[DOC, \text{もしくは} POC]}{dt} = k[DOC, \text{もしくは} POC]$$

$$\frac{d[DO]}{dt} = \frac{d(2.67 \times [DOC, \text{もしくは} POC])}{dt}$$

ここに k : 擬似一次反応定数 (/日), t : 時間 (日)

$$\ln \frac{C}{C_0} = -kt$$

ここに C : t における DOC, もしくは POC 濃度 (mg/L)

C_0 : DOC, もしくは POC の初期濃度, $[DO]$: 溶存酸素 (mg/L)

したがって k が求めれば、DOC, POC の分解に伴う酸素消費速度が求められることになる。

2008 年 6 月に内湾 14 と 26 (図 2) 付近で採水した赤潮海水中の DOC 分解試験と、後節 2.2 (補遺) で述べる 2009 年 5 月と 8 月の 2 回に渡って千葉灯標付近に設置した沈降粒子捕捉 (セディメントトラップ) 調査で採取した POC の分解試験の結果から、それぞれ 0.027 / 日 (DOC 分解)、0.079 / 日 (POC 分解) という分解速度 (擬似 1 次反応) 定数を得た (図 6)。2006 年 7 月に内湾 14 (水深 9 m) と内湾 26 (水深 16 m) の 2 測点において各層における POC・DOC それぞれの濃度を測定し、これに上記の分解速度定数を乗じて各深度での酸素消費速度に換算した。そしてこれらより、1 日単位面積 (平米) 当

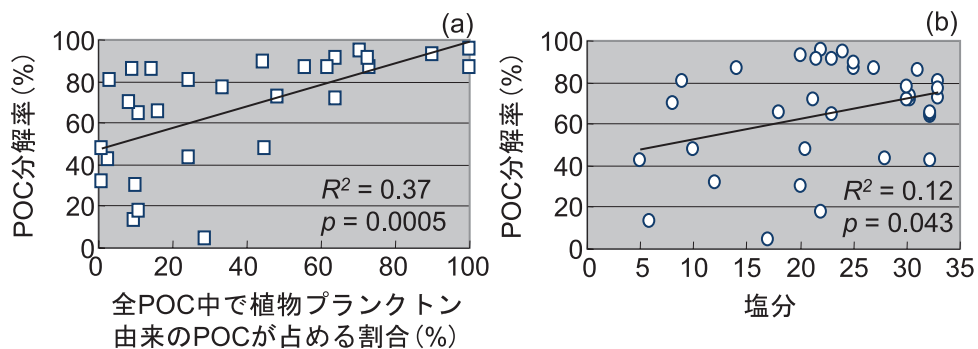


図 5 各海水試料中の POC の分解率と (a) 植物プランクトン性 POC の占める割合、(b) 塩分との関係

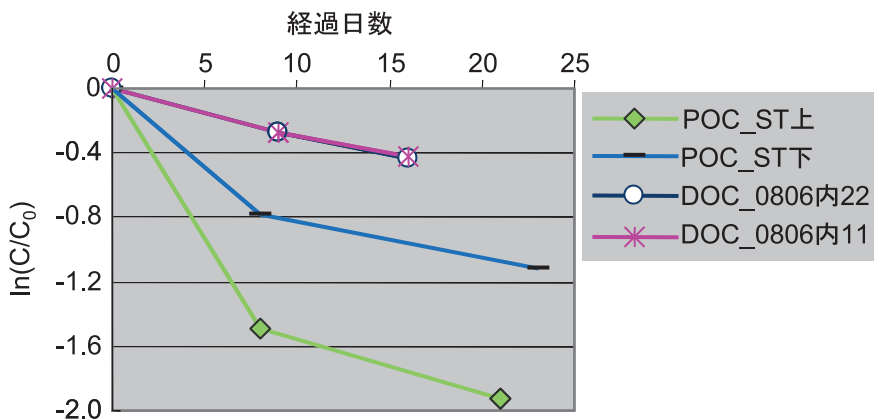


図 6 水塊中の有機物分解に伴う酸素消費速度を推定するための DOC、POC 分解擬似一次反応式を求めるための片対数プロットグラフ

たりの水柱中の酸素消費速度を推定した。

ただしこの時、躍層上部のクロロフィル値のピークが見られ、植物プランクトンの増殖・集積が顕著でDOCが飽和状態になっている層（内湾14では水面から3m、内湾26では水面から4m部分）については、酸素消費速度の計算に含めなかった。

DOC、POC 共にほぼクロロフィルのピークと一致する形で水深1～2m付近で最大となっており、今回酸素消費速度の算定の対象とした躍層下ではDOC、POCは低くなっていた。相対的に沖合部に位置し水深のある内湾26でのクロロフィルとPOCの最大値は内湾14に比べて倍近く高く、全体的にPOC (0.7～4.9 mg/L)の方がDOC (1～2.5 mg/L)を上回っていた。逆に相対的に岸寄りで浅く、クロロフィル濃度が低い内湾14では全体的にDOC (1.9～3.3 mg/L)の方がPOC (0.8～2.4 mg/L)を上回っていた（以上図7）。

以上から有光層下の水柱中での有機物分解に伴う酸素消費速度を求めたところ、内湾14ではDOCとPOC分解によるものは、それぞれ0.88 g-O₂/m²/日、1.46 g-O₂/m²/日となり、内湾26ではDOCとPOC分解によるものは、それぞれ0.92 g-O₂/m²/日、3.72 g-O₂/m²/日と見積もられた。

2.1.4 まとめ

本サブテーマにおいて以下のことが明らかとなった。

- ・様々な由来の有機物を含む海水を供試した分解試験を行った結果、溶存態の有機物（DOC）の減少（分解）率は懸濁態の有機物（POC）のそれより低かった。
- ・東京湾奥部において、内部生産により大量に産生される珪藻を主体とした植物プランクトン細胞に由来する懸濁態有機物（相対的に高いChl a値とδ¹³C値を有するPOC）は相対的に易分解性で速やかに分解されるのに対

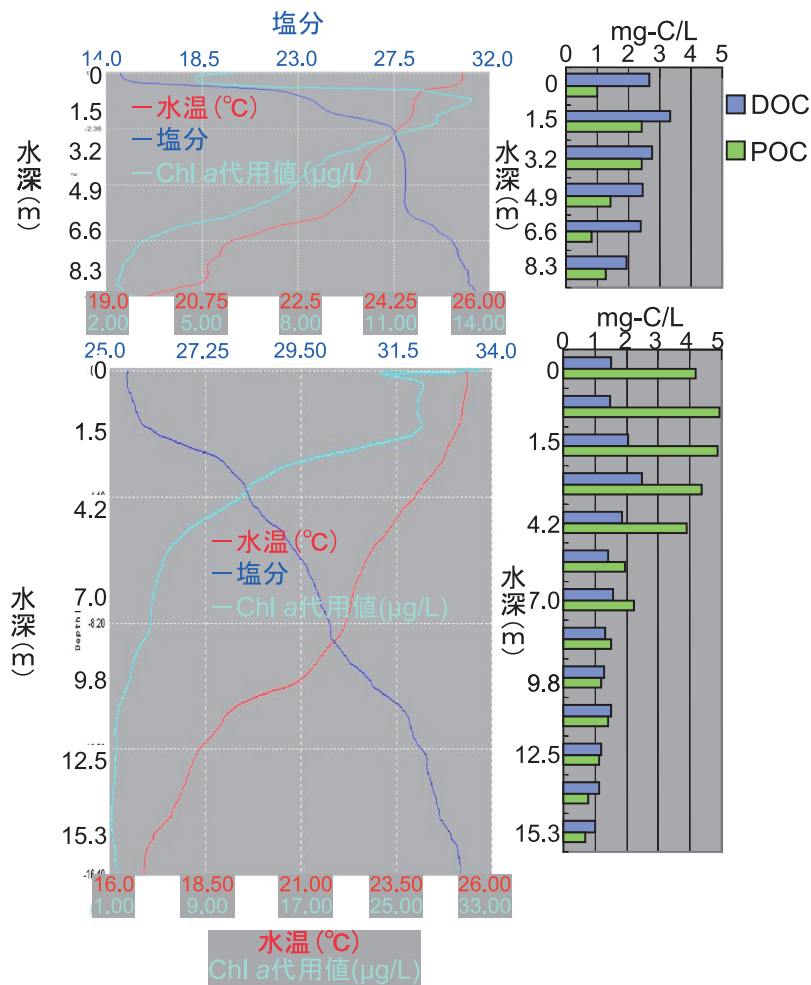


図7 水塊中のDOC、POCの分解による酸素消費速度の試算を行った対象地点における水質の鉛直分布（2006年7月）
 左：水温・塩分・Chl a代用値の鉛直分布（上：内湾14、下：内湾26）、
 右：DOC、POCの鉛直分布（上：内湾14、下：内湾26）

し、運河・河口域に多いと考えられる陸起源の有機物（相対的に低い Chl *a* 値と $\delta^{13}\text{C}$ 値を有する POC）は比較的難分解性であり、東京湾等の都市隣接閉鎖性海域における水柱中における浮遊系の酸素消費の要因として、内部生産により大量に産生される有機物の寄与が大きいことが示された。

2.2 (補遺) 東京湾奥部における底泥への有機物沈降(堆積) フラックスの測定

※本章は、本特別研究提案時には湾内への器材設置・繫留の許可が得られるか未確認だったためにサブテーマとして当初予定していなかった実施項目だが、実施期間中に湾内への器材設置・繫留許可が得られることが判明し、実施に踏み切ったものである。

2.2.1 はじめに

東京湾湾奥部において毎年広範囲に発生する大規模な貧酸素水塊の要因として、植物プランクトンの大発生に伴う沈降粒子の供給が考えられる。その質と量を把握することは、貧酸素水塊発生を定量的に理解するために重要であると考えられる。また、後節 2.3 で述べるように底質での酸素消費測定地点にもなっている千葉灯標付近は有機物沈降フラックスを現場環境との対応で理解する上でも、また、有機物沈降フラックスと底層環境における酸素消費の関係を論じる上でも重要な地点である。

そこで主に植物プランクトンに由来する沈降粒子フラックスを評価するために、初夏と夏期に二回千葉灯標周辺においてセディメントトラップの設置を行い、沈降粒子の組成や室内実験によりその分解性についても解析を行った。

なお、千葉灯標には、多項目水質センサーが設置され、

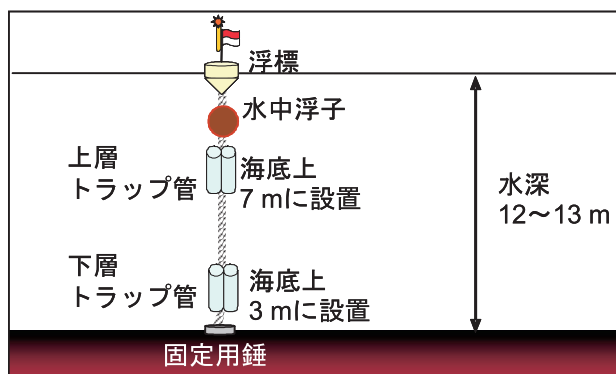


図8 沈降粒子捕集装置（セディメントトラップ）の設置模式図

連続的に水質項目やクロロフィル蛍光強度の鉛直分布が取得され、海上保安庁により「東京湾リアルタイム水質センサーデータ」としてインターネットホームページ <http://www4.kaiho.mlit.go.jp/kaihoweb/index.jsp> を通じて常時公表されている。

2.2.2 調査地点と方法

沈降粒子捕集装置の設置概要を図8に示す。セディメントトラップは、内径 10 cm、長さ 50 cm のアクリル製の円筒を用い、管内に各設置層より採水した海水をガラス繊維フィルター（孔径 0.7 μm 、GFF）でろ過したものを充填した。これを 2 本一組とし、海底より 3 m 上（下層）と 7 m 上（上層）の二層にそれぞれ（計 4 本）設置した。設置方法は、海底に設置した錘に結束したロープに二層分のトラップ管を固定し、ロープの上端部に水中浮体を結束し、鉛直上方向にトラップ管を引っ張り上げるようにした。設置・調査は 2009 年 5 月 24 ~ 27 日と同年 8 月 25 ~ 28 日の二期間に渡って行い、トラップ管には設置現場で採取した底層海水をろ過したものを充填し、設置して 24 時間後に回収した。これを二期間の調査ともそれぞれ三日間連続して行った（計 6 回設置・回収）。トラップ管内の沈降粒子について、Chl *a*、フェオ色素、POC、炭素・窒素安定同位対比、植物プランクトン組成を分析し、Chl *a*、POC に関しては、単位面積（平米）当たり一日における沈降水量（フラックス）を算出した。

分解試験は 2.1 で述べた方法に従い、トラップ管底に溜まった沈降粒子を適当量のろ過海水に懸濁させた試水 300 mL を 500 mL 容三角フラスコに分注し、20 $^{\circ}\text{C}$ 暗条件にて約 70 日間往復振とうしながら経時的に一部を採水して、POC を測定しその減少具合を調べた。

2.2.3 結果と考察

図9に千葉灯標に設置されている水質センサーにより取得された沈降粒子捕集装置設置期間中の水質鉛直分布データを示した。

セディメントトラップを設置した5月と8月の二期間とも水温（5月：底層 16.7 $^{\circ}\text{C}$ ~ 表層 20 $^{\circ}\text{C}$ 、8月：底層 22.3 $^{\circ}\text{C}$ ~ 表層 27.1 $^{\circ}\text{C}$ ）・塩分（5月：表層 29.5 ~ 底層 33.2、8月：表層 22.6 ~ 底層 34.4）の分布から成層の形成が明確に見られた。Chl *a* 濃度は、8月時より5月時の方が高く保たれていた。

5月調査時のトラップ管内に捕捉された植物プランクトンでは珪藻の *Skeletonema costatum* や渦鞭毛藻の *Gymnodinium* sp. が卓越していた。

8月調査時には *Skeletonema costatum* の他に *Thalassiosira* spp. (珪藻) が優占していた (図 10)。

沈降粒子束の平均有機炭素量は、5月には上層トラップで $1.04 \text{ g-C/m}^2/\text{日}$ ($0.68 \sim 1.19 \text{ g-C/m}^2/\text{日}$)、下層トラップで $0.98 \text{ g-C/m}^2/\text{日}$ ($0.76 \sim 1.2 \text{ g-C/m}^2/\text{日}$)、

8月には上層トラップで $0.73 \text{ g-C/m}^2/\text{日}$ ($0.40 \sim 1.07 \text{ g-C/m}^2/\text{日}$)、下層で $0.94 \text{ g-C/m}^2/\text{日}$ となり ($0.54 \sim 1.95 \text{ g-C/m}^2/\text{日}$) となり、上層・下層トラップ共に8月調査時の方が5月調査時よりも低かった (図 11)。これは8月の方が5月より水柱中の Chl *a* 濃度が低かったことを反映していると思われる。

沈降粒子の炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は、5月には上層トラップで $-18.6 \sim -16.4 \%$ 、下層トラップで

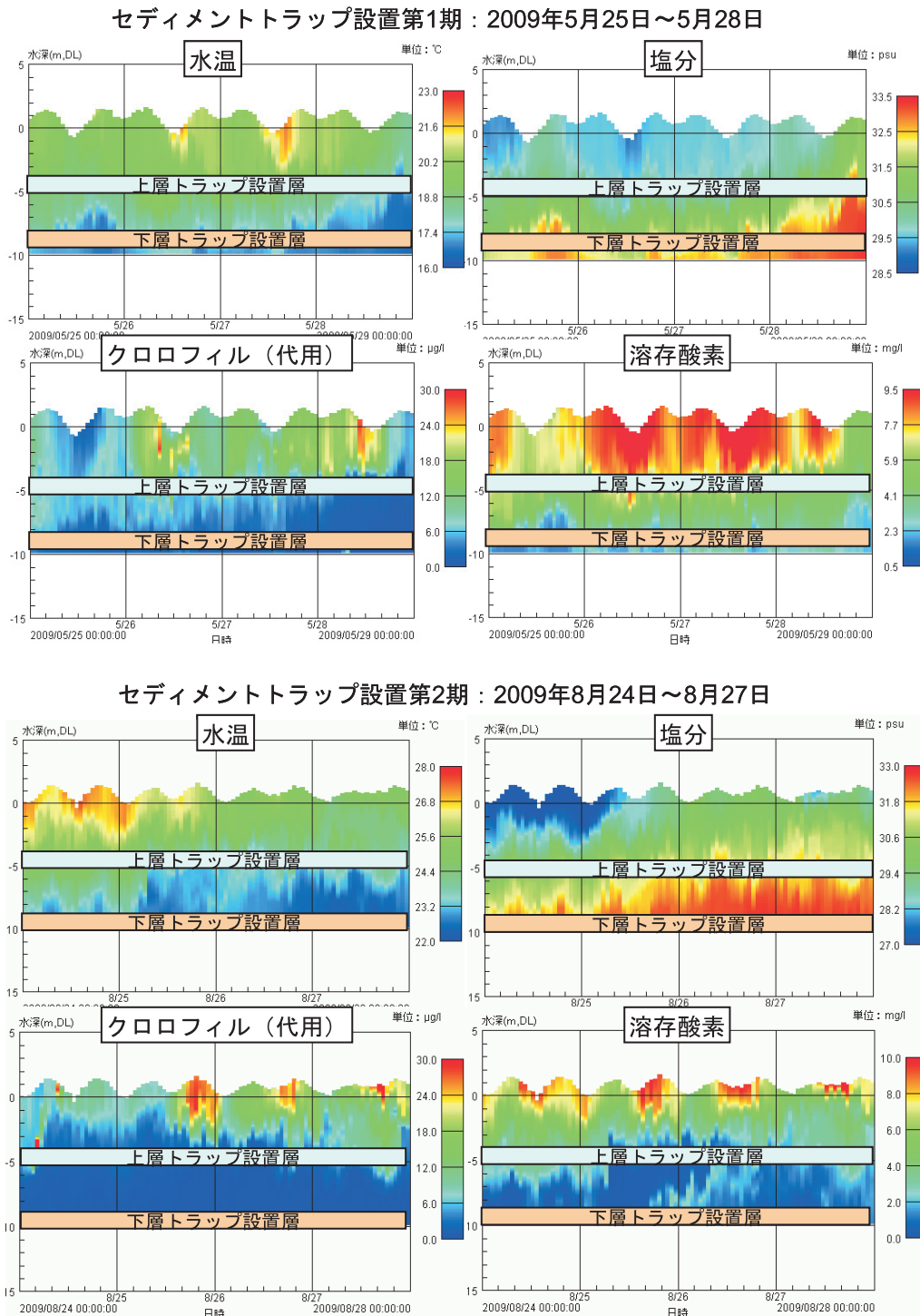


図 9 セディメントトラップ設置期間中の千葉灯標付近における水温・塩分・水質鉛直分布

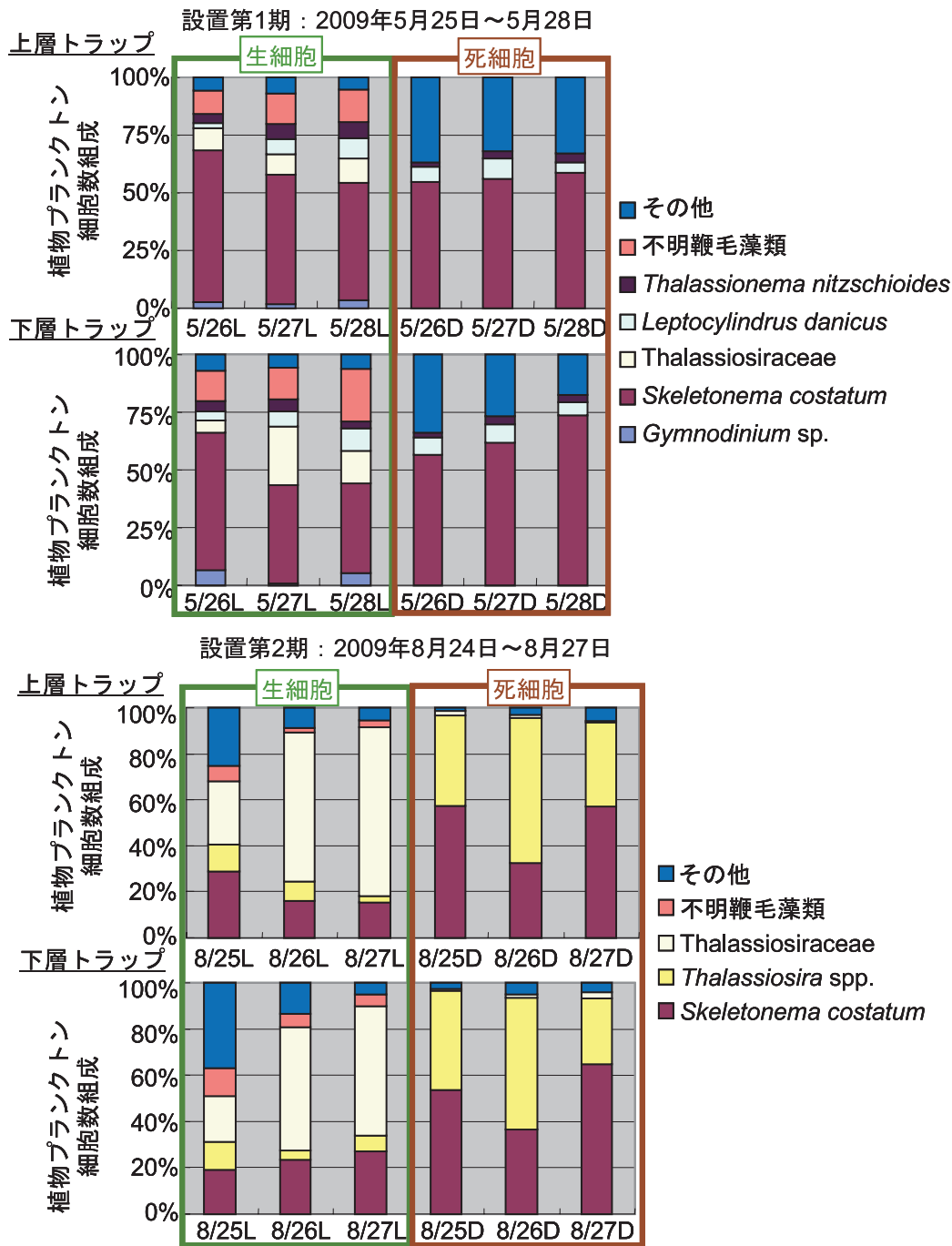


図10 トラップ管内に捕集された主要植物プランクトン組成

— 18.8～— 16.9%、8月には上層トラップで— 18.1～— 16.4%、下層トラップで— 17.9～— 17.1%となり、時期的にも上下層トラップ間でも差は無かった (図11)。

沈降粒子の分解試験を行ったところ、POCの最終分解率は5月と8月共に上層トラップで72～74%、下層トラップで64～67%となり、上層トラップの方が高かった (図12)。

また、Chl *a* に対するフェオ色素 (Chl *a* 分解産物) の重量濃度の比率を算定したところ、5月時には上層トラップでは11.6～20.7%、下層トラップでは20.5～

23.8%、8月時には上層トラップでは16.5～27%、下層トラップでは23.7～29.6%と上層トラップより下層トラップで高くなっていた (図13)。これらのことは植物プランクトンが沈降していく際に、動物プランクトンによる捕食と消化、細菌による分解を受けることを示しているものと考えられた。

以上の結果から、沈降粒子が食物連鎖や移流拡散による系外除去を受けないことと下層トラップ内のPOCが底泥上に全て沈降すると仮定し、上記の分解試験で得られた分解率を乗じたPOC全てが好氣的に二酸化炭素に

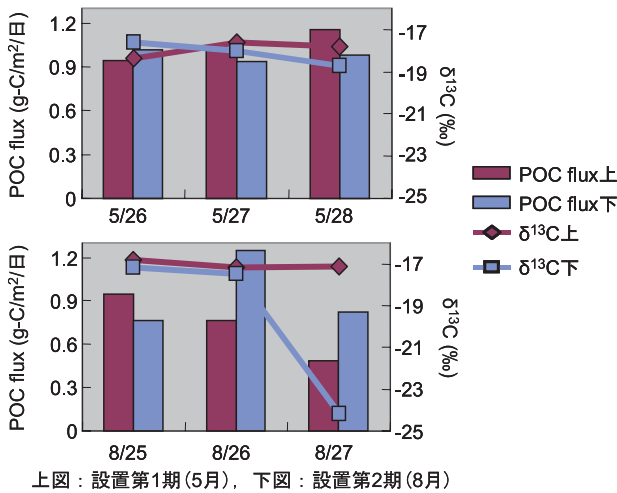


図11 トラップ管内のPOC沈降量とPOCの炭素安定同位体比

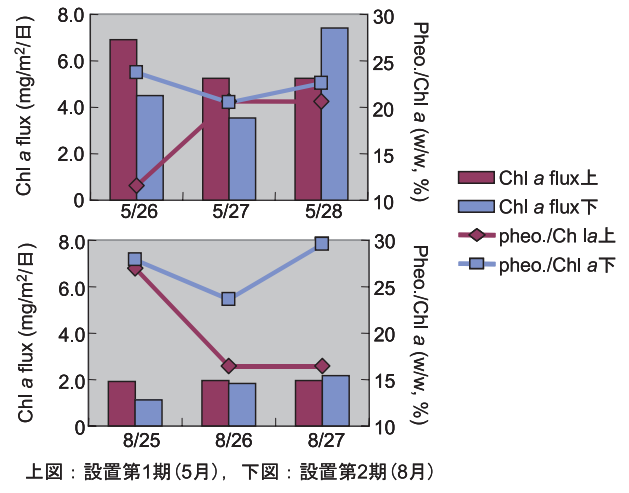


図13 トラップ管内のChl a沈降量とフェオ色素(pheo.)沈降量の割合

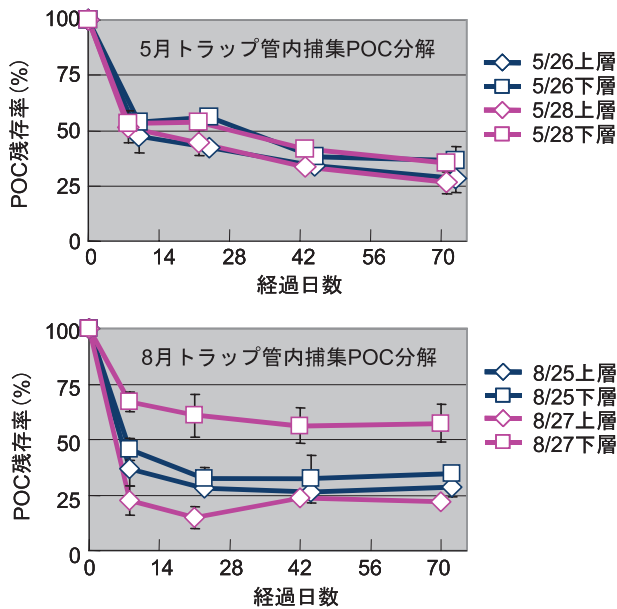


図12 トラップ管内に捕捉されたPOCの分解試験結果

まで分解(無機化)されるとした時の理論的酸素消費速度は5月時には約 $1.7 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{日}$ 、8月時には約 $0.94 \sim 1.3 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{日}$ とそれぞれ算定され、これらの値は次節2.3で述べる千葉灯標周辺地点での底泥の酸素消費速度と同等の範囲であった。

2.3 底質の酸素消費速度の時空間分布特性の把握

2.3.1 はじめに

総量規制対象となっている海域では、COD、窒素・リンといった水質項目については減少(改善)傾向にあるものの、底層における貧酸素水塊は解消していない。貧酸素水塊を発生させる大きな要因の一つとして底質による酸素消費(SOC)が挙げられる。すなわち、植物



図14 東京湾奥部におけるSOC速度測定調査地点

ランクトン等の有機物粒子が沈降し、これが底質で細菌により酸化的に分解されるというものである。

しかしながら、SOCが貧酸素水塊形成にどの程度寄与しているのかよく分かっていないのが実状である。

そこで本節では、東京湾奥部でのSOC速度を測定し、貧酸素水塊形成への底質環境の寄与を評価する。

2.3.2 対象水域と試験方法

水深、底質の粒度組成、底生生物の生息状態、貧酸素水塊の発生規模と期間、硫化物含量や強熱減量が異なる

東京湾奥部に4調査点を設定した(図14)。なお平成19年度は三番瀬、三枚洲、東京灯標付近の3地点で調査を行い、千葉灯標付近では行わなかった。平成20～21年度は上記の4地点で調査を行った。

それぞれの調査点の概要を表2に記す。現場調査・採泥は、季節間の変化を調べるために平成19年度は2007年の6月、9月、12月、2008年2月、平成20年度は2008年の5月、8月、11月、2009年1月、平成21年度は2009年6月、7月、9月の計11回実施した。

底質試料の酸素消費速度測定法方法は、参考文献¹⁾に従った。採泥は、潜水士により内径50mm×長さ250mmの亚克力製採泥管に、底質部が一定の深さ(約100～120mm)になるように採取し、採泥後、海底で直ちに採泥管の両端にゴム栓をはめ込んで直上水とともに船上に運び込んだ。採取した底質試料は実験室内に搬入してから泥を巻き上げないように直上水を静かに吸い出し、海底上約0.5m付近の海水(ろ過し、DOが低い

場合には曝気した)を、泥を巻き上げないように静かに柱状泥上端部に重層させた。柱状採泥試料は、現場の泥温に保った水浴中に浸し、小型DOセンサーと鉛直回転攪拌子を備え付けたゴム栓を海水との間に空隙が出来ないように採泥管上端部にはめ込んだ(図15左下)。この後、泥を巻き上げない程度に攪拌子を回転させて泥上の海水が常に均一になるようにしながら、2～4時間掛けて10秒おきにDOの変化をモニターした(以上図15)。

そしてDOの減少速度から底質界面での酸素消費速度を求めた。試験は2～3連で行った。また、底質を含まないろ過海水のみの系をコントロールとして用いた。酸素消費速度と併せて、柱状泥試料の粒度組成、全硫化物含量、酸揮発性硫化物(AVS)、強熱減量、大型の底生生物の現存量の分析を行った。また、各調査点における水温、塩分、DOの鉛直分布を測定した。

表2 東京湾奥部におけるSOC速度測定調査地点概要

調査点	緯度	経度	水深	粒度組成/酸化・還元状態
千葉灯標付近	35° 34' 00"	140° 02' 60"	12～13m	シルト～粘土質 / 還元的
三番瀬	35° 39' 07"	139° 58' 71"	1.5～2m	砂質 / 酸化的
三枚洲	35° 36' 80"	139° 51' 80"	5～6m	細砂～シルト質 / 還元的
東京灯標付近	35° 34' 00"	139° 51' 10"	15～16m	シルト～粘土質 / 還元的

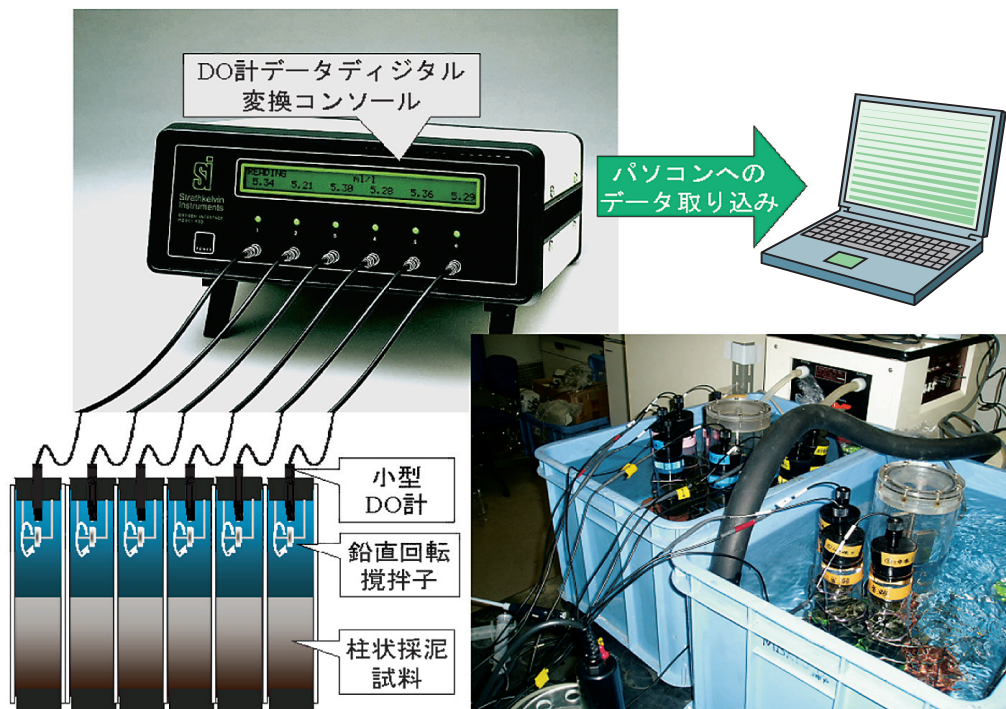


図15 多検体柱状採泥試料酸素消費速度測定システム

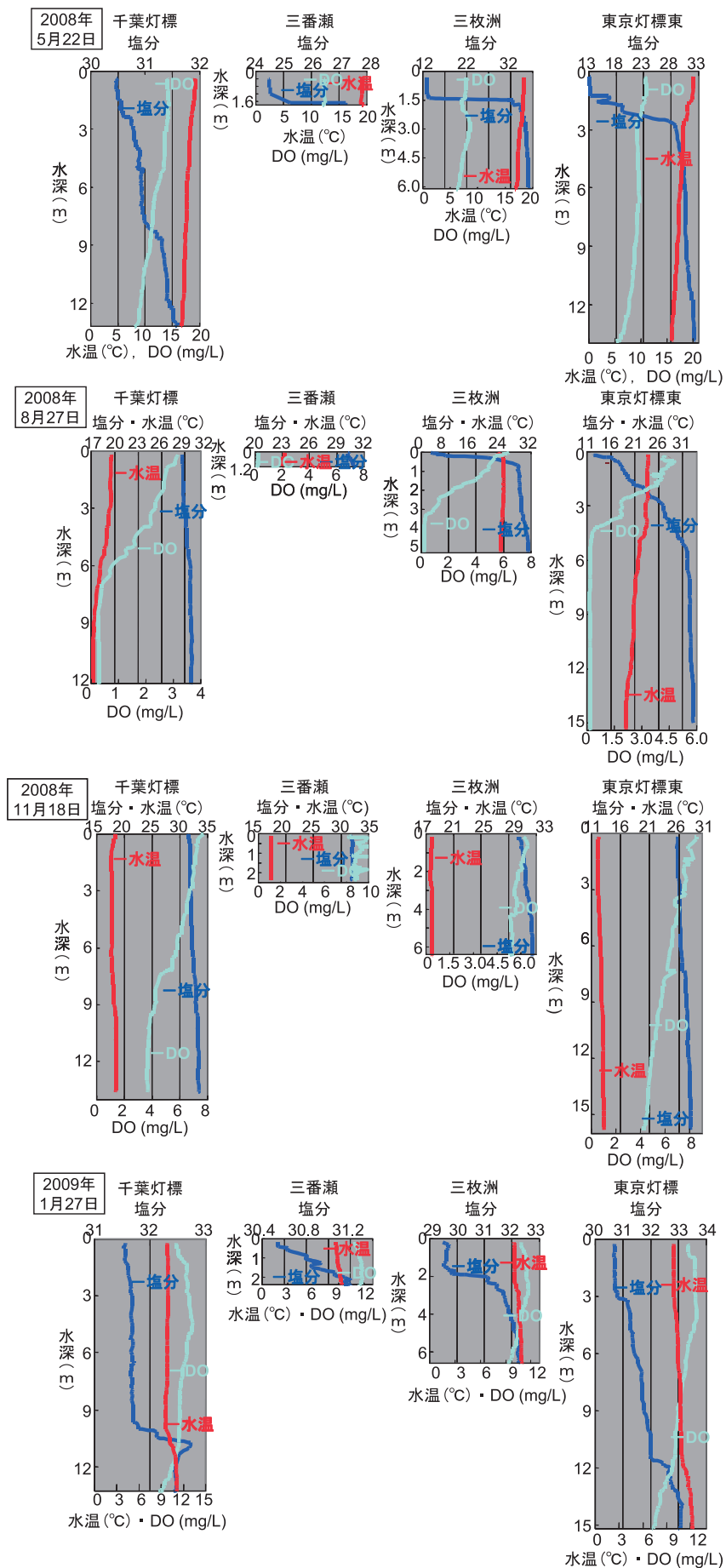


図 16 SOC 速度測定地点における水質の鉛直分布

2.3.3 結果と考察

図 16 に各調査地点における 2008 年度調査時の塩分、水温、DO の鉛直分布例を示す。各年度とも 5～9 月には成層が発達し、底層 DO の低下が認められた。4 地点の調査点の中で最も深い東京灯標では 6 月時点で底層 DO が 4 mg/L を下回っていたが、逆に最も浅い三番瀬では、2007 年 9 月と 2008 年 8 月以外には貧酸素水塊に見舞われなかった（※ 2008 年 8 月時に全層の DO が 1 mg/L 以下だったのは丁度調査時に青潮に見舞われたことによる）。特に成層の強まる 7～9 月夏季には、三枚洲、千葉灯標付近、東京灯標付近の底層 DO は 2 mg/L 以下となり、特に水深が 10 m を越える千葉灯標と東京灯標付近ではしばしば 1 mg/L を下回っており、貧酸素状態となっている層が厚い状態に見舞われていた。

泥温は夏季には水深が 10 m より深い千葉灯標と東京灯標付近（20.1～21.4℃）が浅い三番瀬や三枚洲（23.2～24.4℃）より 2～3℃ 低く、逆に冬季は千葉灯標と東京灯標付近の方（9.4～12.2℃）が三番瀬や三枚洲（7.2～10.9℃）より 1～2℃ 高かった（図 18）。千葉灯標と東京灯標付近の底質はシルト・粘土分が多く占め（表 3）、強熱減量も季節に関係なく概ね 10% を越えていた。さらに強い還元状態にあるため全硫化物・AVS で示される硫化物含量も高く、特に東京灯標付近では概ね 2 mg S/g 乾重近い含有量を保っており、2008 年の 2 月と 5 月以外に強熱減量と同様に秋季～冬季にかけてもその減少は見られなかった（図 18）。一方、三番瀬や三枚洲の底質は粒度組成も千葉灯標、東京灯標付近 2 地点より粗く、細砂分の占める組成比が高かった（表 3）。

強熱減量も硫化物含量も千葉灯標、東京灯標付近 2 地点より低く、強熱減量は概ね 5% 以下に保たれ、三番瀬では硫化物はしばしば定量限界以下であった（図 18）。

底生生物の現存量については、大型の底生動物（マクロベントス）の湿重量は千葉灯標（平均 1.0 g/cm²

[最小 0～最大 3.7 g/cm²]) と東京灯標付近（平均 1.8 g/cm² [0～9.1 g/cm²]) では三番瀬（平均 6.8 g/cm² [0.1～35.1 g/cm²]) や三枚洲（平均 7.4 g/cm² [0.9～30.5 g/cm²]) より概ね低く、特に東京灯標付近において夏季に生きている個体が全く見られなくなることが繰り返し起こった（全調査回数 11 回の内 5 回）。三番瀬や三枚洲では夏季でも大型の底生動物が見られなくなことはなかった。メイオベントス（※ 2008 年 5 月から計数）の個体数は最も浅い三番瀬が全調査期間中最も高かったが（平均 855 個体/cm² [438～1345 個体/cm²])、全調査点とも総じて 5 月に現存量が高くなり 7～8 月に低下するという変動が見られた。興味深いことに大型の底生動物の現存量は千葉灯標付近に比べて三枚洲の方が高かったのにも拘わらず、メイオベントスの現存量はその逆（千葉灯標：平均 504 個体/cm² [181～1135 個体/cm²])、三枚洲：平均 316 個体/cm² [172～854 個体/cm²]) であった（図 18）。

以上のことから水深が相対的に深く、夏季前後に直上水の DO が枯渇しがちになり、底質もシルト・泥分が多く、硫化物含量も高い東京灯標、千葉灯標付近では、大型の底生生物の生息条件としては、三枚洲、三番瀬より劣悪であることが示された。

SOC 速度測定結果例を図 17 に示した。調査時期・採泥地点の如何に拘わらず底質直上水内の DO は初期段階（測定開始 10 分間程度）では時間に対して指數的に減少し、しばらくすると直線的な減少に移行した。底質が還元的な状況で生成される硫化物は直上水中の酸素により速やかに酸化されるため、初期段階における DO の急激な減少は、柱状泥試料の上端部表面における硫化物の酸化を反映しているものと推察された。後期の直線的な SOC 速度は、東京灯標（平均 59 mg O₂/m²/hr、11～104 mg O₂/m²/hr [全調査期間])、千葉灯標（平均 67 mg O₂/m²/hr、25～141 mg O₂/m²/hr）三枚洲

表 3 東京湾奥部における SOC 速度測定調査地点の底質の粒度組成

調査点	中砂分	細砂分	シルト分	粘土分
千葉灯標付近	平均：0.1 % (0～0.4 %)	平均：5.7 % (0.8～28 %)	平均：75.5 % (38.4～89.1 %)	平均：15.6 % (9.1～29.3 %)
三番瀬	平均：27.3 % (19.2～34.2 %)	平均：69.2 % (54.6～78.5 %)	平均：1.6 % (0.5～5.8 %)	平均：1.2 % (0.5～2.7 %)
三枚洲	平均：7.7 % (1.2～18 %)	平均：56.4 % (8.5～81.9 %)	平均：21.2 % (2.1～47.3 %)	平均：14.1 % (2.6～40.6 %)
東京灯標付近	平均：0.7 % (0～3.1 %)	平均：3.6 % (0.3～17.6 %)	平均：73.4 % (40.3～87.7 %)	平均：21.4 % (11.7～37.3 %)

69 mg O₂ /m² /hr と同程度の値を示した。一方、底質状態が良好な三番瀬（平均 28 mg O₂ /m² /hr、17 ~ 96 mg O₂ /m² /hr）は他の三点に比べて半分以下の値を示した（図 18）。

これらの値は、1996 ~ 1997 年に同じ東京湾の三番瀬 ~ 湾奥部中心部の底質試料を用いて測定された値²⁾と同様の範囲であったが、この時は水深が最も浅く、底質の粒度組成が粗く、強熱減量も硫化物含量も少ない酸化的な性状である三番瀬が最も高い SOC 速度を示し、これは比較的現存量の多い二枚貝等の底生生物の呼吸によるものと推測されていたが、本研究では逆に水深は深くて底生生物の現存量が少なく、粒度組成も三番瀬より低いシルト・粘土質で、強熱減量も硫化物含量も高い還元的な底質環境を持つ三枚洲、千葉灯標、東京灯標付近の方がより高い SOC 速度を示す傾向が見られた。

つまり今回調査を行った地点では、底生生物の呼吸より、底質に含まれる有機物の分解や硫化物の酸化による酸素消費が大きいことが示されていた。

SOC の年間変動では、やはり泥温が高く、貧酸素水塊に覆われて直上水中の DO が枯渇する夏季に、どの地点でも高くなる傾向が見られ、逆に秋季 ~ 冬季は低下していた（図 18）。

また、直上水中 DO が低下していない冬季 ~ 春季には各調査点間の SOC 速度の差は小さくなり、逆に夏季には拡大する傾向にあった。

なお後節 2.5 で述べるように、東京灯標、千葉灯標、三枚洲における SOC 速度の温度依存性はどれも相似していたが、三番瀬のみ大幅に異なった温度依存性を示し、これは他の 3 地点に比べておしなべて低いながらも三番瀬における SOC はその豊富な底生動物の呼吸によるものであると同時に、他の 3 地点における SOC は底生生物の現存量に依存せず、主に底質中の硫化物の化学的酸

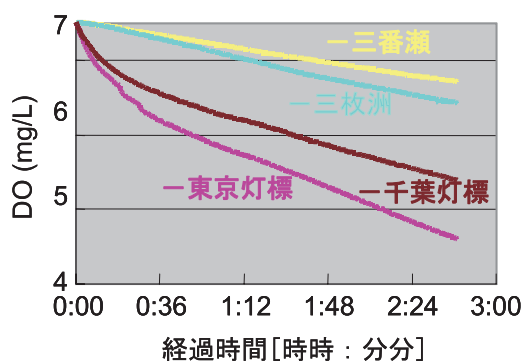


図 17 SOC 速度測定例

化や有機物の微生物分解に依存していることを示すものと思われた。

以上、3 年間 11 回実施してきた SOC 速度（後段の直線的 DO 減少）測定値や底質関連データの重回帰分析を行ったところ、以下のような関係式が得られ、AVS と泥温への依存性が高いことが示された。

$$SOC = 3.98 \times \text{泥温} + 0.76 \times \text{強熱減量} + 6.58 \times \text{AVS} \\ + 0.069 \times \text{大型底生物量} - 31.2 \\ (R^2 = 0.375, p = 0.002)$$

以上、測定された底質の酸素消費（SOC）速度と、2.1 で述べた水塊中の有機物分解に伴う酸素消費速度の試算値と比較して、水柱全体の酸素消費速度に対する各々の寄与を求めると、内湾 14 では SOC によるものが 47 %、DOC の分解によるものが 20 %、POC の分解によるものが 33 % となり、内湾 22 では SOC によるものが 31 %、DOC の分解によるものが 17 %、POC の分解によるものが 52 % となり、沖合にいくにつれ（即ち水深が深くなるほど）SOC の寄与が低くなることが示された（以上図 19）。

2.3.4 まとめ

- ・東京湾奥部の性状の異なる 4 地点における底質酸素消費速度を比較したところ、砂質で酸化状態にあり、硫化物・有機物含量が少なく比較的安定した大型の底生生物現存量を有していた三番瀬よりも、シルト・粘土質で還元状態にあり、硫化物・有機物含量の高い三枚洲や、大型の底生生物現存量が著しく少ない東京灯標、千葉灯標の方が高い値を示した。

- ・底質の酸素消費は、速度の速い指数的に進行する初期と鈍化した直線的に進行する後期の段階に分かれた。

- ・3 年間 4 地点で測定してきた SOC 速度測定値や底質関連の全データの重回帰分析を行ったところ、泥温の寄与が高いことが示された。

- ・単位面積当たりの水柱の全酸素消費速度に対する SOC の寄与を見積もったところ 31 ~ 47 % となり、水深がある地点ほどその割合が小さくなることが示された。

参考文献

- 1) 小池勲夫編（2000）海底境界層における窒素循環の解析手法とその実際（社）産業環境管理協会刊、

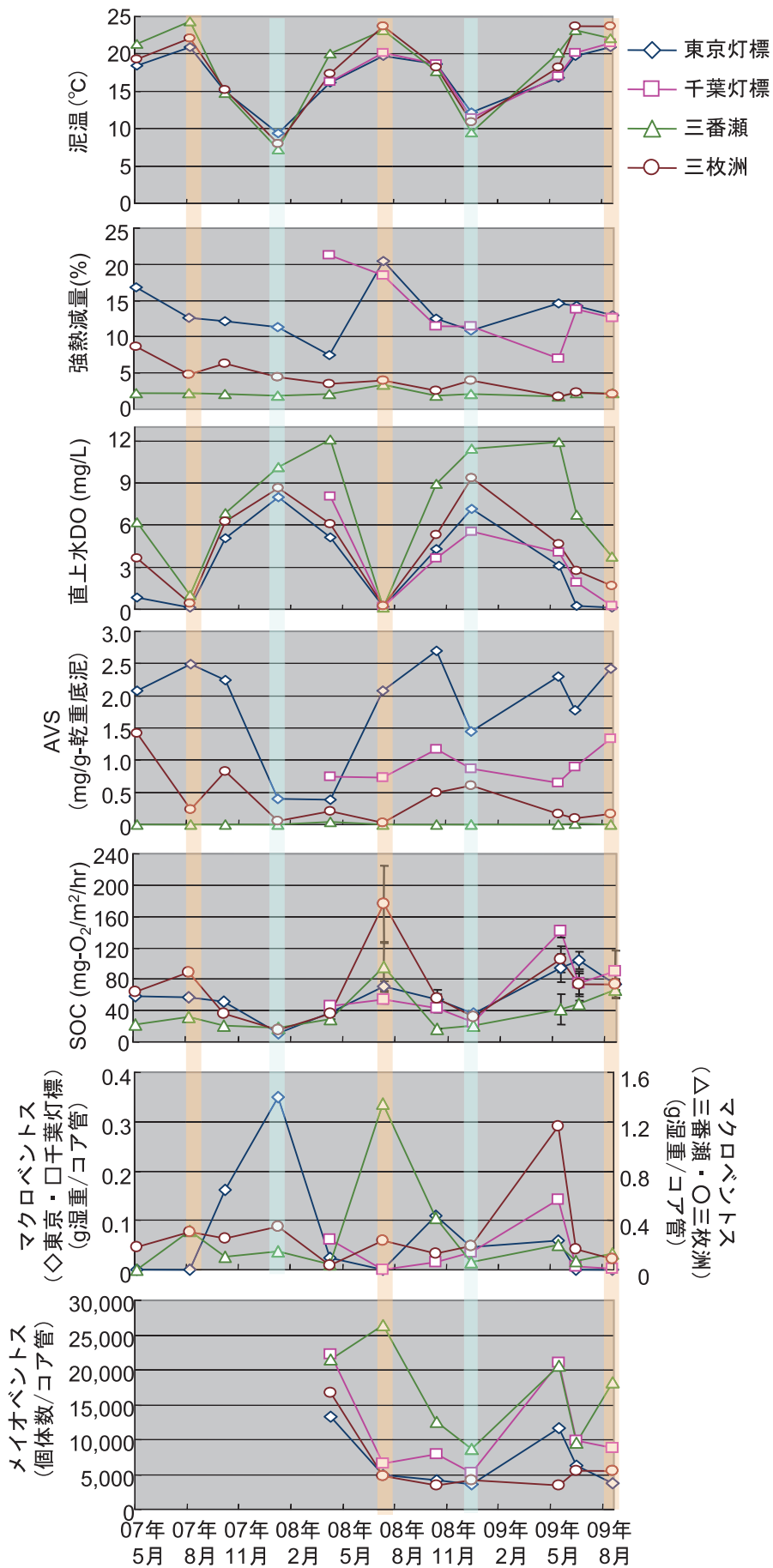


図18 各調査点におけるSOC速度測定値と直上水中DO、泥温、底質、底生生物現存量の季節変化

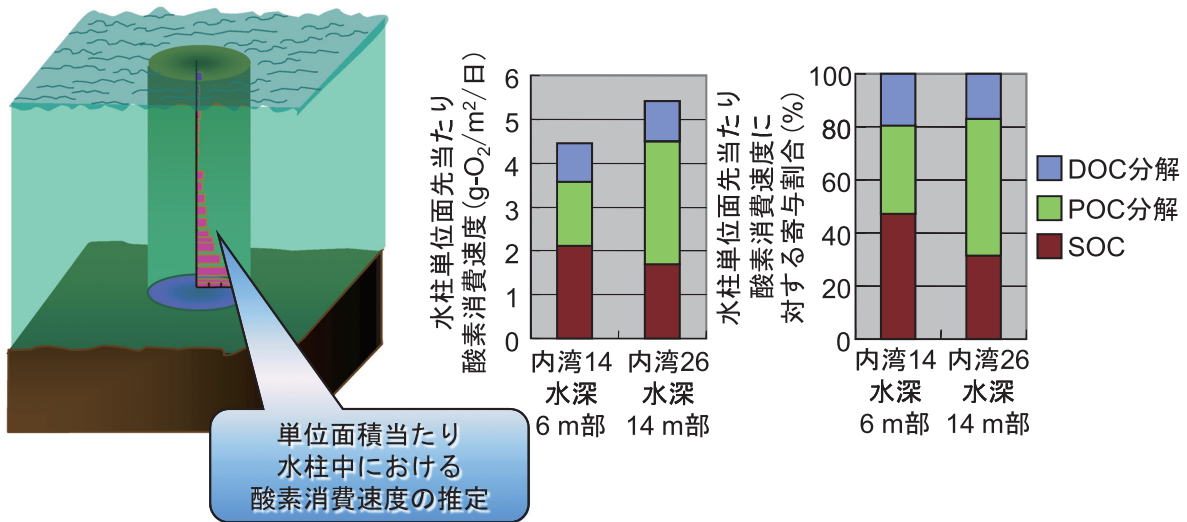


図19 東京湾奥部2地点における単位面積当たりの水柱中全酸素消費速度に対する水塊中のDOC、POCの分解による酸素消費速度とSOC速度(左グラフ)とそれぞれの寄与の見積り例(右グラフ)

85-86 p.

- 2) 木幡邦男編(2000) 海域保全のための浅海域における物質循環と水質浄化に関する研究, 国立環境研究所特別研究報告(SR-32-2000), 13-14 p.

2.4 水塊の貧酸素化に伴う底生生物生息環境への影響評価

本節では「水塊の貧酸素化が底生生物に及ぼす影響」を検討する。ただし、さまざまな制約から、対象とするフィールドと生物を、東京湾の砂質干潟とそこに特徴的な二枚貝類(アサリ・シオフキ・ホンビノスガイ・ハマグリ)に絞る。

本サブテーマの目標は、「貧酸素水塊が二枚貝の生残・成長に及ぼす影響を知ることで、干潟を好ましい状態に保つ(復活させる)ための目途をつける」という点にある。ここで、「好ましい」干潟とはどのようなものであるかについて言及しておく。都市域に隣接する干潟が「好ましい」状態にあるための条件として、二枚貝などの底生生物により水質の浄化が活発に行われている点が第一に挙げられる。これに加え、どんな種類の生き物が干潟に生息しているのかという点も干潟の「好ましさ」を左右する重要な条件である。すなわち、東京湾の砂質干潟とそこに生息する埋在性の二枚貝を例にとるなら、外来種のホンビノスガイや殆ど食用にならないシオフキが卓越する干潟よりも、古代から生息し、我々が好んで食してきたアサリやハマグリが卓越する干潟の方が、「好ましい」状態にあると考える。そして、こうした生物種の

観点を含んだ「好ましい」干潟の維持(復活)が本サブテーマの最終目標である。

こうした目標のもと、本サブテーマでは以下の二点について実験を行った。すなわち、(1) 貧酸素状態が二枚貝類の生残に及ぼす影響を室内実験室で予備的に解析した(2.4.1)。(2) 貧酸素水が頻繁に侵入する東京湾の砂質干潟において、二枚貝の生残・成長が貝の種類および底質によってどの程度異なっているのかを、現場ケージ実験により明らかにした(2.4.2)。

2.4.1 貧酸素状態が二枚貝類の生残に及ぼす影響(室内飼育実験)

(A) あらまし: 飼育容器に二枚貝を投入し通気飼育を数日行う。その後、容器への空気の流れを遮断し、同時に、容器中のDOを連続測定する。貝の呼吸により海水が貧酸素状態に達した状態で貝の飼育を継続し、その生残を評価した。

(B) 実験の概略: 2リットル容の亚克力製飼育容器を用意し、底に3cm程度の砂を敷き、上部はろ過海水で満たす。これに殻長約20mmの二枚貝を10個体程度投入し、通気飼育を行う。その後、容器への空気の流れを遮断し、DOが0.5mg/L以下に低下してから7日間、飼育を継続した。容器は7個用意し、そのうち2個の容器にはアサリ(東京湾産)各10個体を投入し、別の2容器にはハマグリ(有明海産)各10個体を投入した。さらに、1容器にはホンビノス1個体、サルボウ5個体、ヤマトシジミ3個体、カガミガイ1個体を混合して投入

した。また、アサリとハマグリについては、二つの容器を用いて通気飼育を行い対照としたが、その他の貝については十分な個体数を確保できなかったため、対照なしで実験を行った。飼育は20℃の恒温室で行い、飼育全期間中にわたり餌は投入しなかった。

(C) 何がわかったのか? : 空気遮断後2日以内でDOは0.5 mg/L以下に低下し、これ以降も貧酸素状態は継続した。こうした中、貧酸素状態に曝された二枚貝は、砂から半分身を乗り出すような個体も見受けられたが、大部分は砂に潜ったままであった。また、水管も伸長するものとしなないものが認められたが、種による明瞭な差は認められなかった。貧酸素状態に達してから7日後、全ての個体を飼育容器の砂の上に横たえて通気を再開すると、殆どの個体は2時間以内に砂に潜り、1日後には全個体が潜った。したがって、1週間程度の貧酸素状態では、貝は殆どダメージを受けないものと考えられた。ただし、今回の実験は20℃という比較的低温で行ったものであり、夏場の高温状態における貧酸素状態への対応などさらに実験を詰めてゆく必要がある。

2.4.2 貧酸素水がしばしば侵入する東京湾の干潟における二枚貝類の生残と成長

(A) あらまし : 東京湾・京浜運河に面した大井ふ頭中央海浜公園内の砂質人工干潟 (以下、大井人工干潟と呼

ぶ : 図20) を実験フィールドとして選んだ。この干潟にケージ (図21) を設置し、この中にアサリ・シオフキ・ホンビノス・ハマグリを同時に囲い込んで4~8週間飼育し、飼育期間中のそれぞれの貝の生残と成長を求めた。ケージの設置位置は泥分の少ない地点 (1.1%、St. P) と比較的高い地点 (6.1%、St. Q) であり、二つの地点の地盤高は等しい (大潮低潮線上0.7 m)。ケージ飼育と併行し、ケージ設置位置での地温と、潮下帯 (低潮線下0.8 m; St. M; 図20) での水温・塩分・DOを連続測定した。こうしたケージ実験を2006年7月から2007年10月まで都合9回おこなった。そして、貧酸素水の侵入に伴い、生残・成長が貝の種類や底質 (ケージ設置場所) によってどの程度異なるのかを検討した。なお、実験法・結果の詳細については原著を参照されたい。

(B) ケージ実験の概略 : 縦・横40 cm、高さ20 cm、網目5 mmのケージ (上部は取り外せるようになっている) を干潟 (St. PとSt. Q) に埋設する (図22)。

一つのケージに殻長15~20 mm程度のアサリ、シオフキ、ホンビノス、ハマグリをそれぞれ10~20個ずつ投入する (一つのケージに4種の貝が共存している)。投入時、貝は個体識別のために番号付けしておいた。また、ケージに投入する貝以外に、20個体前後の貝を用いて「肥満度」を求めておく。肥満度は殻の「体積」 (= 殻長×殻高×殻幅) あたりの身の乾燥重量である。ケ-

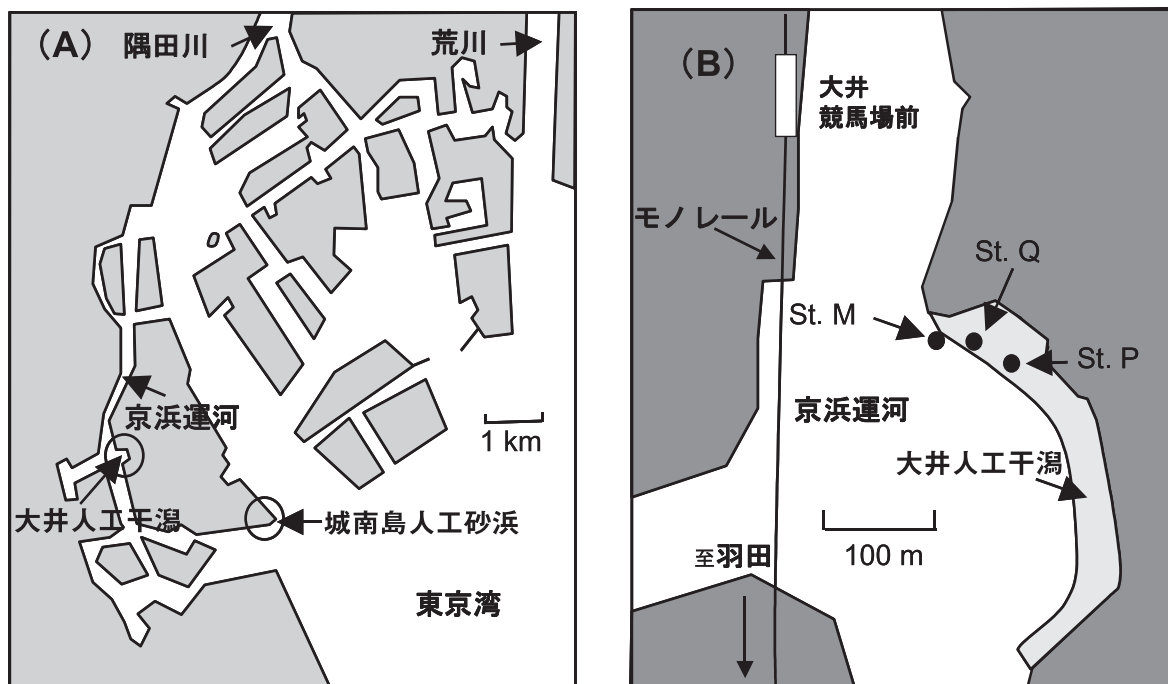


図20 ケージ実験現場略図 : St. P, St. Q: ケージ設置場所、St. M: センサー設置位置

ジに投入した個体のサイズ（殻長、殻高、殻幅）を測定し、肥満度と掛け合わせることで「飼育開始時の各個体の身の乾燥重量」を推定することが出来る。

干潟に埋めたケージは約2週間ごとに掘り起こし、貝の生死を確認した後、各個体のサイズを測定する。その後貝をケージに戻し、干潟に埋設し直した。そして飼育を6～8週間継続する。飼育が完了した時点で、生き残った貝のサイズを測定した後、身の乾燥重量を測定する。

こうして得られたデータから生残率と成長速度を以下のように計算した。

生残率：投入個体数に対する生残個体数の割合

殻体積ベースの成長速度：殻体積の増加速度から計算

身の乾燥重量ベースでの成長速度：飼育開始時の身の重さの推定値（＝体積×肥満度）と飼育終了時の身の重さ（実測値）から推定。一日あたり身の重さがどのくらい増加するかで評価した。

ケージ実験は2006年に3回（7月、8月、10月開始）、2007年に6回（3、4、5、6、7、8月開始）行った。なお、2006年に開始した実験では、ケージはSt. Pのみに

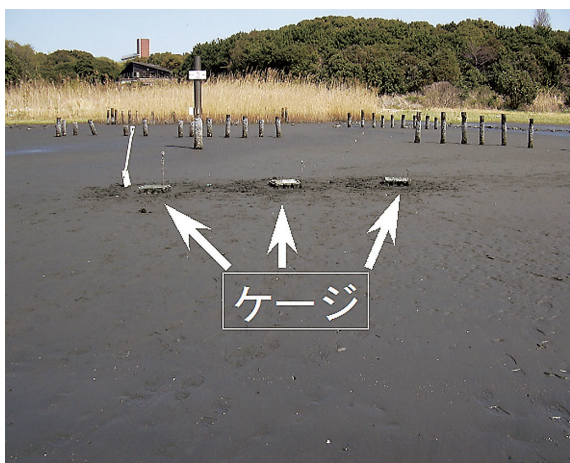


図21 大井人工干潟でのケージ設置状況



図22 ケージの写真。貝を投入しているところ

設置した。実験に使用したハマグリ以外の二枚貝は東京湾城南島人工砂浜（図20（A））由来、ハマグリは有明海・白川干潟由来である。なお、有明海のハマグリ群集は、中国・韓国に起源を持つシナハマグリに置き換わっている可能性（形態分類に基づく）が示唆されているが、DNA塩基配列に基づく分子同定によれば、白川干潟のハマグリは調べた約200個体のいずれも本来のハマグリと同定された。

(C) なにがわかったのか？

i) 環境の変動：水温・地温・塩分・DOの季節変化を図23に示す。水温は2007年8月に特に高く、30℃超の日が約2週間続いた。塩分は通常20～30の範囲にあるが、大雨の後には10を下回ることもあった。DOは2006、07年とも夏から初秋にかけて低く、とくに2007年は7月後半から9月中旬にかけて2mg/L以下の貧酸素状態が継続した。京浜運河表層（干潟前面）のChl a濃度は3.8～33.4μg/L（平均9.8μg/L）の範囲にあった。

水温・塩分・DO測定用のセンサーはケージ設置場所より1.5m低い位置にある。したがって、センサー部分が貧酸素状態であってもケージには十分な酸素が供給されている可能性がある。この可能性を検証するために、2009年8月下旬から9月中旬にかけて、センサー設置位置とケージ位置での水温・塩分・DOの比較を行った。その結果、好天が続く運河の海水が強く成層している際には、センサー位置が貧酸素状態にあってもケージには十分な酸素が供給されていた。一方、気温が低下し、強風が吹き荒れる状況ではセンサー部と同様、ケージ内のDOは低下し、干潟に貧酸素水が侵入していることが明らかとなった。この結果を2007年のデータに適用すると、好天と高温が続いた8月中～下旬はセンサー部で貧酸素状態になるものの、ケージ部分への貧酸素水の侵入は限定的であったと考えられる。一方、9月上～中旬は、台風による強風と気温の低下によりケージの部分への貧酸素水の侵入が頻繁に生じたことが推測された。

ii) 二枚貝の生残：二枚貝類の生残率の季節変化を図24に表す。ホンビノスガイの生残率はSt. Pで著しく高かった（いずれの実験でも飼育終了時点で95%以上）。しかし、St. Qでは8月末から9月にかけて斃死が起り、St. Qでの死亡率はSt. Pに比べ有意に高かった（Fisherの正確確率検定、 $p < 0.05$ ）。また、アサリ、シオフキの斃死は主として初夏から初秋に起き、泥分の多いSt. Qでの死亡率はSt. Pより高かった。ハマグリが生残率

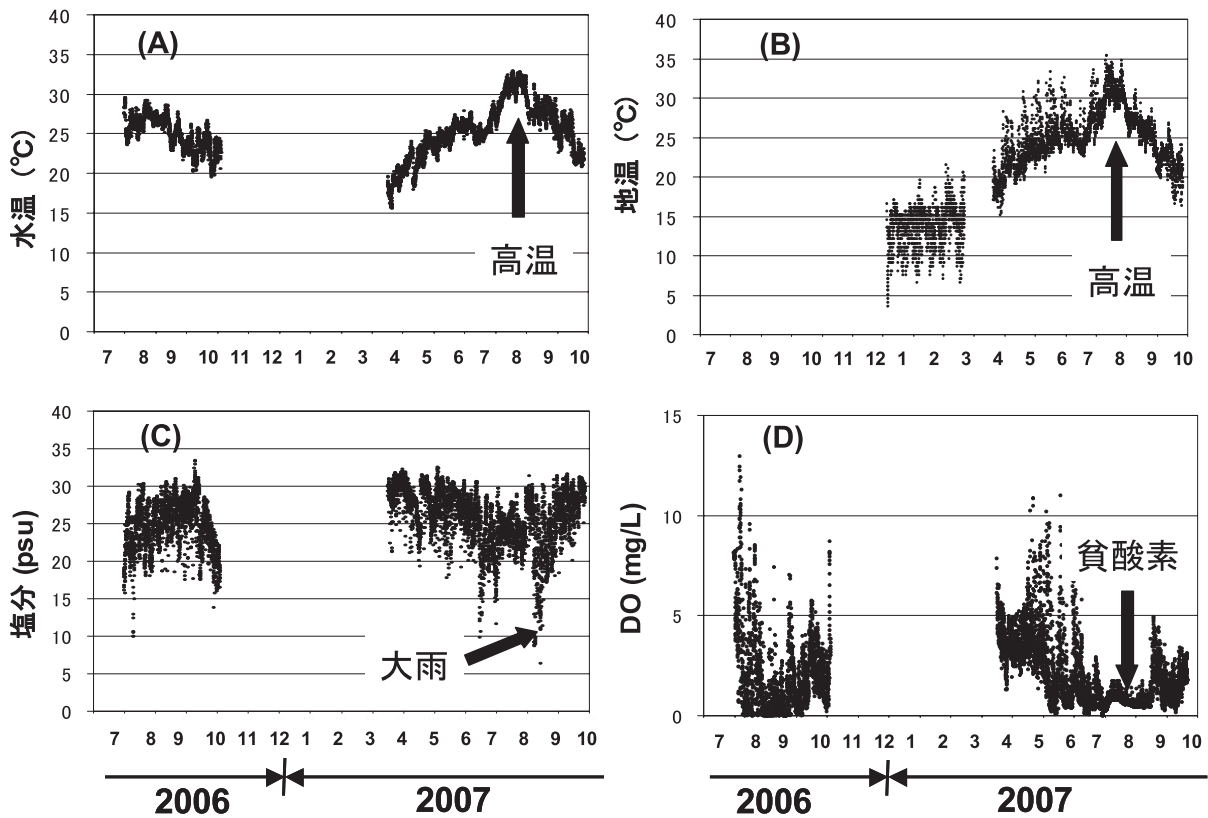


図 23 大井人工干潟におけるケージ実験期間中の水温、塩分、DO の季節変化

はホンビノスと同様の変化を示し、St. P における高生存率と、St. Q における初秋の斃死が認められた。

iii) 二枚貝の成長：ホンビノスガイの貝殻の体積をベースとした成長速度 (G_v) は 0.3 ~ 2.8 % / 日の範囲にあり、水温の上がりきらない初夏に最大値を示し、真夏には低下した。したがって G_v と水温の間には有意な相関は認められなかった ($p > 0.1$)。また、St. P の G_v は St. Q に比べ有意に高い値 (Wilcoxon 符号順位検定; $p < 0.01$) を示した。なお、 G_v が 2.8 % / 日の成長速度は、殻長が 1 週間で約 1 mm 増加することに対応する。アサリ、シオフキガイについても G_v 値は時として 2 % / 日を超える場合があるが、生存率が低下する際 (高水温期) には成長速度も低下する傾向があるために、水温と G_v の相関は認められなかった ($p > 0.1$)。ハマグリ成長速度 (G_v) は 0.2 ~ 2.4 % / 日の範囲にあり、冬季に低く、8 月に最大値を示した。St. Q でハマグリが死亡した 2007 年 8 月 29 日から 9 月 14 日の間には、St. P においても G_v が著しく低下した。2007 年 8 月 29 日以降のデータを除くと、 G_v は水温と有意な正の相関を示した (St. P で $r^2 = 0.49$, $p < 0.01$, St. Q で $r^2 = 0.60$, $p < 0.01$)。さらに、St. P と St. Q の間で G_v の値に有意な差は認められなかった ($p > 0.1$)。一方、2007 年 8 月 29

日以降、St. Q での成長は St. P に比べ貧弱であった。

ホンビノスガイの軟体部乾燥重量ベースでの成長速度 (G_B) は初夏の実験 (図 25 a) で大きな値を示した。また St. P での G_B の 95 % 信頼範囲は常に St. Q での信頼範囲より大きい領域に位置し、砂地である St. P の方が泥分の多い St. Q より速やかな成長を示した。ハマグリの G_B は G_v 同様明瞭な季節変化を示し、高水温の時期に行なった実験で高い値 ($> 2\%$ / 日) を示した (図 25 b)。また、実験 5-8 では St. P と St. Q での G_B の 95 % 信頼範囲は重なっており、底質による成長速度の差は認められなかった。一方アサリ・シオフキの G_B については明瞭な季節的な傾向は認められなかった。

4 ~ 8 週間の通常のケージ実験と併行して、1 個体のハマグリについて、St. P で 15 ヶ月間の連続飼育を行った。投入時 16 mm だった殻長は最終的には 55 mm に達した (図 26)。

iv) ケージ実験の妥当性：大井人工干潟 St. P 近傍の埋在性二枚貝群集は、外来種のホンビノスガイが卓越している。一方、アサリ・シオフキも春には多量に加入するが、夏にはほぼ死滅する。こうした結果はケージ実験から得られた傾向 (ホンビノスの年間を通じての高い生存率とアサリ・シオフキの夏場の高死亡率) と一致してい

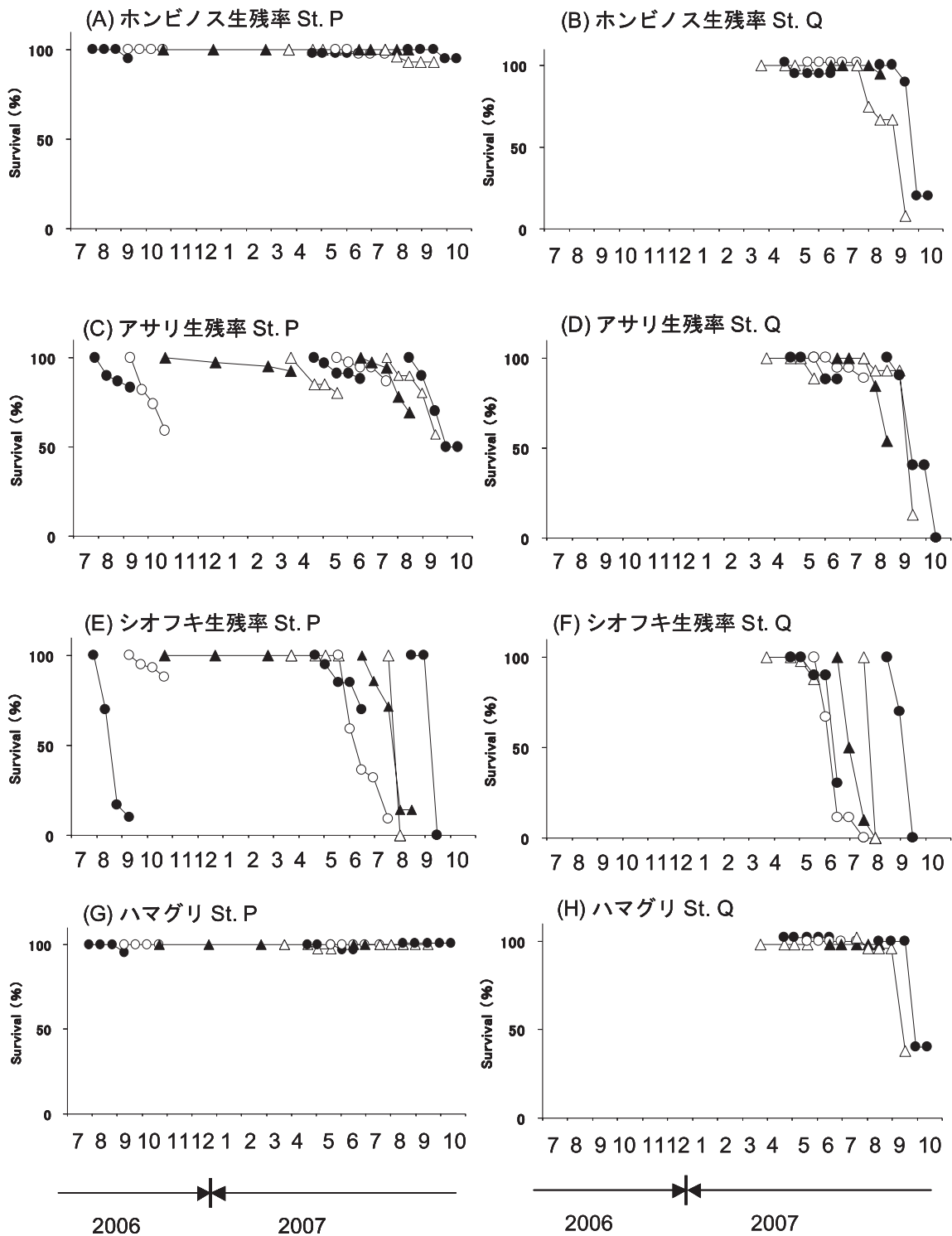


図 24 大井人工干潟におけるケージ実験結果：それぞれの二枚貝の生残率の季節と地点による変化 St. Q は St. P に比べて泥分が多い。図中の●や△などの記号は合計 9 回行ったケージ実験で、隣接する実験結果を区別するために用いている。

る。したがって、ケージ実験は現場の二枚貝群集の状態を評価する上で有効な手法と考えられる。

v) 二枚貝類の死亡率 - 貧酸素水の侵入のみが原因か？：貧酸素水がケージに侵入したと考えられる 2007 年 9 月において、St. P におけるホンビノスガイとハマグリは高い生残率を示した。このことは 2.4.1 で示したような

実験室における高い貧酸素耐性を反映しているのであろう。しかしながら、同時期の St. Q ではホンビノスガイとハマグリは死亡が確認されている。St. P と St. Q は水平距離でわずか 50 m しか離れておらず、地盤高も同レベルに設定してある。したがって、両地点での DO 濃度、水温 / 地温、塩分に著しい差があるとは考えにくく、他

の要因が地点間での生残率の差をもたらしたと考えるのが妥当であろう。St. Q は St. P に比べ泥分が高いだけでなく、有機物量も多い。したがって、St. Q では泥の中が貧酸素化するだけでなく、硫酸還元菌の作用によって、有毒な硫化水素が発生しやすいと考えられ、ホンビノス・

ハマグリ の斃死につながったと考えられる。事実、07年9月時点で St. Q の泥に「異臭」が確認されたが、硫化水素の発生・蓄積を定性的に裏付けるものである。今後、新たな特別研究においては泥中の硫化水素や酸化・還元電位にも目を向け、研究を展開する必要がある。

アサリ・シオフキについては、貧酸素水の侵入がそれほど顕著とは考えられない06年8月の St. P でかなりの斃死が起こっている。これはこれら二枚貝が高水温に弱い成果とも考えられるが、その原因は特定できない。

vi) ハマグリ の生残・成長について：東京湾では、1960年代半ばからの富栄養化の急速な進行と軌を一にしてハマグリ資源の激減が始まった。また、現在の東京湾において、アサリ・シオフキはかなりの量が生息している一方で、ハマグリ の天然群集は殆ど絶滅状態に近い。そして、こうした観察に基づき、汚染に強いアサリ・シオフキが東京湾で生残った一方で、汚染に弱いハマグリは激減・消滅したと一般に信じられてきた。ところが、今回の一連の実験では、こうした考えに反し、貧酸素水が頻繁に押し寄せる京浜運河の干潟において、ハマグリがアサリ・シオフキに比べ高い生残率を示し、しかも速やかな成長を示した。このことは、ハマグリ の劣悪環境に対する耐性が予想以上に強いことを示すとともに、なぜ本種が東京湾から殆ど消え去ったのか？という疑問を提示する。この疑問に答えるのは容易ではないが、われわれはハマグリ の生活史が関係しているのではないかと予想している。つまり、ハマグリ の産卵時期は、貧酸素水や青潮の干潟への侵入時期と一致しているため、干潟への新規加入が抑えられやすく、個体群が急速に減衰した。いっぽう、アサリ・シオフキ・ホンビノスは産卵が長期に渡っているため、加入失敗のリスクが減少し、現在でも充分な個体群を維持しているのではないかと？という仮説である。こうした点も、今後、基礎的研究レベルで明らかにしてゆきたい。

いずれにせよ、東京湾の砂質干潟に生息する（していた）二枚貝の生存率は種によって大きく異なり、貝の種類を考慮しながら干潟の再生を図る場合には、それぞれの種 の特性を把握しておくことが肝要であると考えられる。

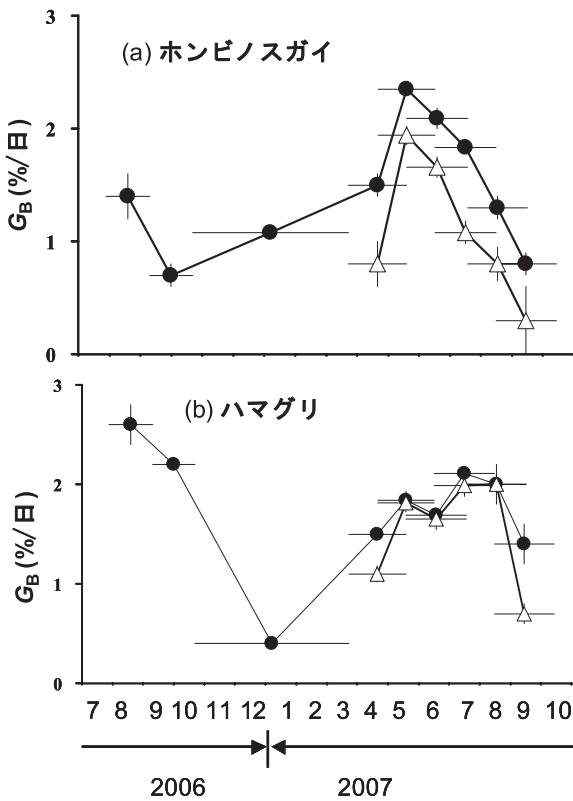


図 25 軟体部乾燥重量ベースでの貝の成長速度 (G_B) の季節変化。各プロット上の横棒は各ケージ実験の期間を示し、縦棒は 95% 信頼限界を示す。アサリ、シオフキについてもデータは求められているが、ホンビノス・ハマグリより値は小さい（表示せず）。

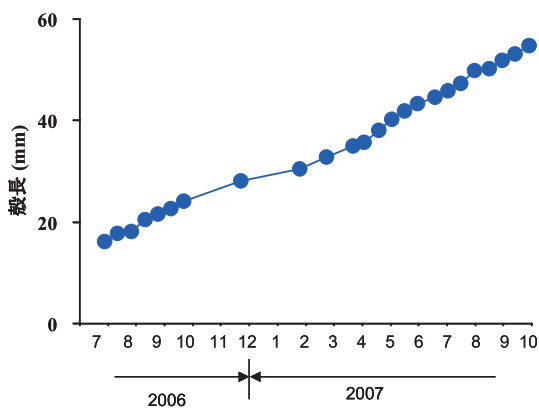


図 26 大井人工干潟でのケージ実験におけるハマグリ連続飼育個体の成長

2.5 陸起源負荷の貧酸素発生への寄与を定量的に表す 3次元流動・水質・生態系モデルの開発

2.5.1 はじめに

閉鎖性海域における健全な水環境・生態系を中長期的に保全・形成するためには、赤潮・貧酸素水塊など富栄養化に由来する現象の発生を抑制することが重要である。流入汚濁負荷の制御や干潟・浅海域の保全は内湾環境の修復に必要不可欠であるが、これら水質環境改善施策・事業を有効に行うためには、その実施効果、とくに水質の変化、底生生物相の応答、及びこれらの持続性・相互作用による更なる波及効果を適切に評価する必要がある。数値モデルはその有力な評価手法の一つであり、我々は陸域からの汚濁負荷流出形態の変化が閉鎖性海域の環境・生態系に及ぼす影響の評価・予測が可能な準3次元流動・水質・生態系モデルの開発に取り組んでいる。本研究では、底泥の酸素消費速度と有機物の分解速度に着目して生態系モデルの高精度化を検討した。

2.5.2 流動・水質・生態系モデル

(1) 流動モデル

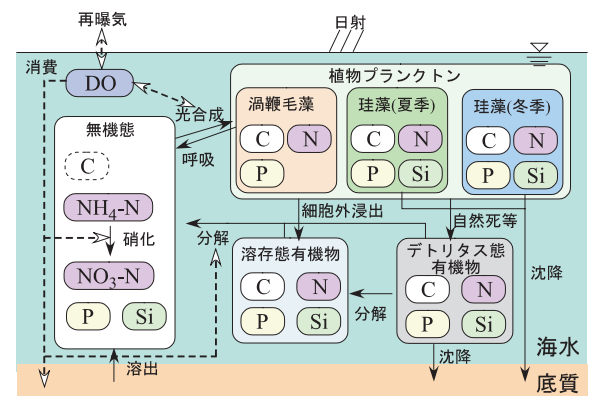
流動モデルは一般によく用いられる連続式、静水圧近似・ブシネスク近似の運動方程式、塩分・熱輸送方程式、UNESCO (1981) の状態方程式で構成された準3次元解析モデルである。鉛直混合モデルには Mellor (2001) のレベル2.5クロージャーモデル、海面フラックスの算定には Kondo (1975) の方法を採用している。数値解法には水平・鉛直方向ともに有限差分法を用いており、鉛直方向の格子分割にはレベル座標系(デカルト座標系)、自由水面の追跡にはVOF法⁴⁾を適用している。本モデルでは陸域負荷物質の移流拡散を的確に評価するため、水平方向の移流スキームに保存保証型セミラグランジュ解法であるRCIP-CSL2を導入している⁵⁾。

(2) 水質・生態系モデル

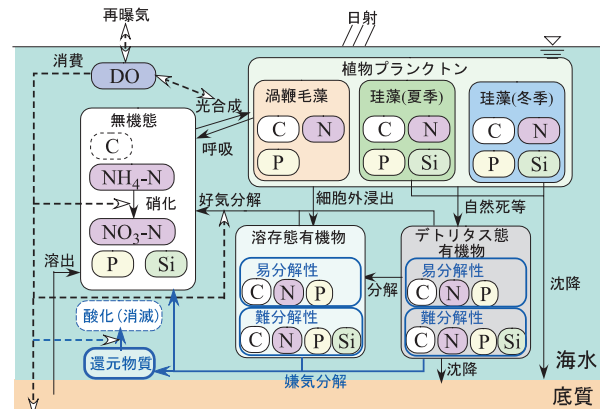
海域の生態系モデルは流動モデルと比べてモデル構造・解法がまだ確立されていないといっても過言ではない。それは生物の増殖や死亡のダイナミクス、食物連鎖による生物間相互作用、及びそれらに関わる各種物質の動態・循環など非常に複雑な系を容易にモデル化できないことが原因と考えられる。しかしながら、既往の赤潮・貧酸素水塊を予測・評価するための生態系モデルに限定すれば、「植物プランクトンが水中の栄養塩を取込み、太陽エネルギーを受けて有機物を生成する」、「そ

れが死亡して非生物態の有機物となり、バクテリアによって分解されて栄養塩に回帰する」という構造・支配方程式は共通している。その基本構造をさらに発展させ、複数種の植物プランクトンを考慮する、植物プランクトンを捕食して生活する動物プランクトンを加えるなど、多くの研究者が改良・高精度化を試みている。

東ら(2009)は既往の生態系モデル(岸ら、1985;岸、1994;渡辺ら、1998;藤田ら、2001;PICES、2006)などを参考にし、沿岸域の水質・生態系モデルを図27aのように構築した。水質・生態系モデルの解析対象物質は炭素、窒素、リン、ケイ素および溶存酸素であり、これらが植物プランクトン態、デトリタス態、溶存有機態および溶存無機態の形態変化を伴いつつ、水中移動する。水中移動の支配方程式には塩分や熱と同様に移流拡散方程式を採用し、流動モデルで得られた流速や渦拡散係数を用いて準3次元計算される仕組みになっている。本モデルを伊勢湾に適用したところ全有機態炭素、全窒素、全リン、溶存酸素(DO)の季節変動や伊勢湾底層に見られる有機物濃度の長期トレンドを良好に再現した



(a) 改良前



(b) 改良後

図27 生態系モデルの構造

が、内部生産が活発な夏季の富栄養化現象（赤潮レベルの Chl *a* 濃度や大規模な貧酸素水塊）の再現精度には課題を残している。

生態系モデルは支配方程式・モデル定数が非常に多いため原因を特定することは困難であるが、少なくとも図 27 a のモデルにおいてはデトリタス態有機物の易・難分解性を考慮していないこと、海水-底質間の物質・溶存酸素フローの妥当性を現場データがなかったため十分に検証できていないことが課題であると考えられた。本研究では室内実験で明らかにされた底泥の酸素消費速度及び植物プランクトン由来の有機物分解速度を用い、水質・生態系モデルの高精度化を検討した。

i) 底泥の酸素消費速度

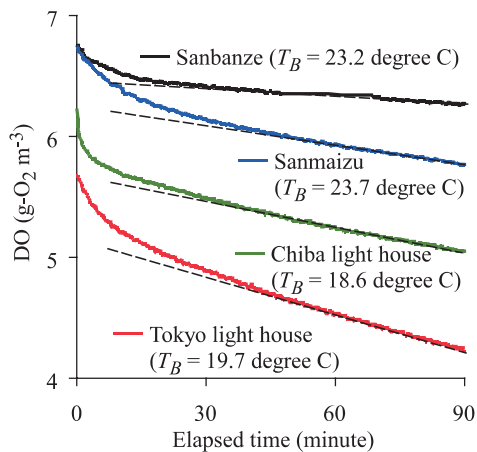
図 28 a は 2.3 で論じた三番瀬、三枚洲、東京灯標、千葉灯標の柱状採泥試料を用いた DO 消費実験の結果の一例である。水柱直上水中の DO 減少速度に着目すると、実験開始直後に急激な DO 減少が見られるが、概ね 30

分以降になると経過時間に対して直線的に DO が減少していることが分かる。前者については、採泥試料に直上海水を重層する際に、もしくは実験初期に不可避の不安定攪拌によって試料表層にわずかながらの攪乱が生じ、底質中の鉄 (II) やマンガン (II)、硫化水素などの還元物質が水中に溶出したため、それらが水中で速やかに酸化されて DO が急激に減少したと考えられる。水中の還元物質が完全に酸化された後の DO 減少は底泥内に堆積した有機物の分解に伴うものであり、底質中を拡散で移動した DO が好気分解もしくは嫌気分解で生成された還元物質の酸化に利用されているものと推察される。本研究では実験後期 DO が時間とともに一定で減少する部分) の底質酸素消費速度 SOC ($\text{mg-O}_2/\text{m}^2/\text{時間}$) をパラメタライズした式 (1) を用い、水質・生態系モデルに組み込んだ。

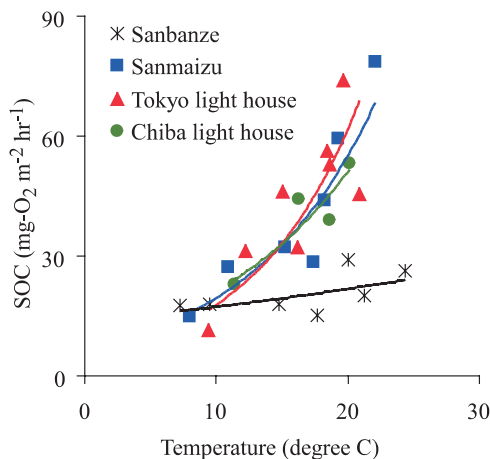
$$\text{SOC} = \text{SOC}_{0i} \exp(k_{\text{soc}i} T_B) \quad (1)$$

ここに、 SOC_{0i} ：底質 *i* の 0℃ における酸素消費速度 ($\text{mg-O}_2/\text{m}^2/\text{時間}$)、 $k_{\text{soc}i}$ ：底質 *i* の温度定数 ($1/^\circ\text{C}$)、 T_B ：泥温 ($^\circ\text{C}$) である。2007～2008 年度に行った柱状採泥試料酸素消費実験にて得られた実験後期の SOC と実験温度 (泥温) の関係を図 28 b に示す。主として泥質である三枚洲、東京灯標、千葉灯標の SOC はほぼ同じ温度依存性を有しているが、砂質の三番瀬は前3者とは大きく異なる温度依存性であることが分かる。本モデルでは上記の結果を踏まえて東京湾全域の底質を砂質と泥質に大別し、砂質については三番瀬の SOC 特性 (図 28 中の黒線。 $\text{SOC}_0 = 13.8 \text{ mg-O}_2/\text{m}^2/\text{時間}$ 、 $k_{\text{soc}} = 0.0227/^\circ\text{C}$) を、泥質については三枚洲、東京灯標、千葉灯標の特性を平均したもの (図 28 中の赤・青・緑線の平均。 $\text{SOC}_0 = 6.46 \text{ mg-O}_2/\text{m}^2/\text{時間}$ 、 $k_{\text{soc}} = 0.1087/^\circ\text{C}$) を与えた。なお、従来モデルにおいても SOC は式 (1) で与えているが、底質の違いによる SOC の差は考慮していないことが改良モデルと異なる点である。

実験開始直後に見られる急激な酸素消費については前述のように実験初期の人為的な要因による現象ではあるが、一方で底泥から溶出した還元物質が水中で酸化されることによって急激な酸素消費が生じることを示している。ここでは Sohma et al. (2008) を参考にして以下のように還元物質の生成・酸化による酸素消費をモデルに組み込んだ。まず、DO の低下を引き起こす原因となる



(a) 直上水 DO の経時変化



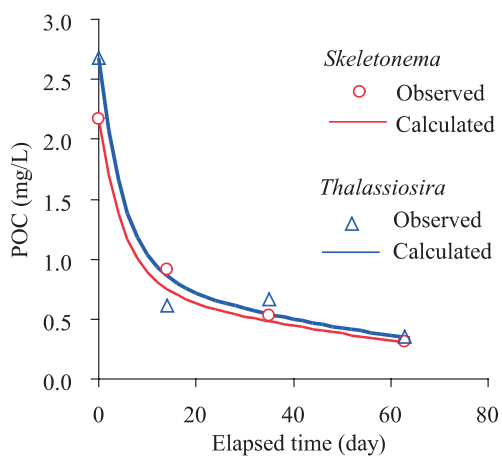
(b) SOC (実験後期) と温度との関係

図 28 柱状採泥試料酸素消費実験結果

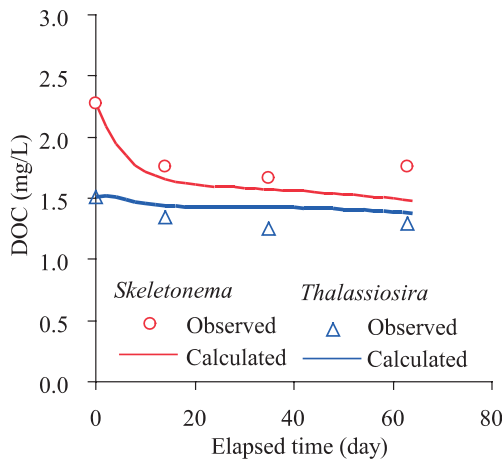
還元物質を解析対象物質に追加した。還元物質には鉄、マンガン、硫化水素などが挙げられるが、これらを個々に評価するにはモデル構造を著しく複雑化させる必要があるため、ここでは1つにまとめて評価した。次に、有機物の分解を好気分解と嫌気分解に分け、有酸素条件下では好気分解が進行するが、貧・無酸素条件下になると好気分解が停止して嫌気分解が生じるように改良した。還元物質は嫌気分解に伴って有機炭素の無機化に必要な酸素に相当する量の発生があり、DOが水中に供給されれば即時に酸化されて消滅する仕組みとした。言い換えれば、還元物質は単位を $\text{g-O}_2/\text{m}^3$ とする酸素要求物質であり、水中の溶存酸素の負値に相当するものである。

ii) 植物プランクトン由来の有機物分解速度

図 29 に珪藻由来の懸濁態有機物の分解実験を行った結果¹⁴⁾を示す。なお、本実験で用いられた珪藻は東京湾で優占出現する *Skeletonema costatum* と *Thalassiosira* sp. (共に実際に東京湾から採取・単離された株)であり、



(a) POC の経時変



(b) DOC の経時変化

図 29 培養珪藻分解試験結果

海水は東京湾湾奥部・東京港付近の京浜運河（東京都品川区勝島付近）において採取されたものである。本実験の結果、植物プランクトン由来の POC の分解率は京浜運河の海水に含まれる POC より 2.4～2.5 倍高いと見積もられ、植物プランクトン由来と陸起源の有機物分解速度に大きな差があることが認められている。

本研究では懸濁態（デトリタス態）有機物 POC と溶解態有機物 DOC をそれぞれ分解速度が速い易分解性（POCF、DOCF）と遅い難分解性（POCS、DOCS）に分離し、植物プランクトン由来と陸域起源の有機物分解速度の違いをモデルに反映させた。上述の分解実験の結果より、植物プランクトンの自然死によって生成される POC はその 90 % を POCF、残りの 10 % を POCS とした。陸域起源の POC、DOC はすべて難分解性のものとした。易・難分解性有機物の分解量については式 (2) で算定した。

$$Dec_M = Dec_{0M} \exp(k_{Dec} T_B) M \quad (2)$$

ここに、 Dec_M ：有機物 M の分解速度 ($\text{g-C}/\text{m}^3/\text{秒}$)、 M ：有機物 M の濃度 ($\text{g-C}/\text{m}^3$) である。 Dec_{0M} は有機物 M の 0°C における分解速度 ($/\text{秒}$) であり、分解実験の POC、DOC の経時変化を再現できるように値を調整した結果 (図 29)、POCF \rightarrow DOCF の Dec_0 は 0.005、POCF \rightarrow DIC (無機化) は 0.045、POCS \rightarrow DOCS は 0.039、POCS \rightarrow DOCS は 0.000、DOCF \rightarrow DIC は 0.050、DOCS \rightarrow DIC は 0.002/日となった。なお、 k_{Dec} は温度定数 ($^\circ\text{C}$) であり、有機物分解の温度依存性を示すものであるが、上記の分解実験より得ることはできないため、ここでは一般に用いられている $0.0693/^\circ\text{C}$ を与えた。

(3) 東京湾の解析条件

改良前後のモデルを用いて 2008 年の 1 年間の東京湾の再現計算を実施し、モデル改良の効果を検討する。水平方向は 0.75×0.75 分 (南北方向約 1.4 km、東西方向約 1.1 km)、鉛直方向 18 層 (層厚は T.P. 1 \sim -21 m は 2 m、T.P. -21 \sim -100 m は 4 \sim 50 m) の直交格子で分割した。海底地形については日本海洋データセンター (JODC) の 500 m メッシュ水深データを用い、節点の位置に最も近い水深データを与えた。改良モデルに必要な底質情報については、東京湾環境情報センターにて公表されている粒度組成を参考にし、メッシュ毎に砂質・泥質を区分した。初期値については後述する 2007

年1月～12月の境界条件を与えた計算を繰り返し実施し、得られた2008年1月1日の擬定常解を与えた。

境界条件として湾口部の潮位は布良の観測値（気象庁）を与え、水温・塩分にはJODCの月別統計値を与えた。気象条件については東京、横浜、千葉、館山の気象台・測候所における地上気象観測値（気象庁）を内挿して与えた。陸域からの流入条件については、鶴見川、多摩川、荒川、中川、江戸川、隅田川を經由して流入するものと、陸域から海域に直接流入するものに分けて与えた。河川流量や汚濁負荷量は流量年表や水質年表（国土交通省）等に記載されている実際の観測値を用いるのが望ましいが、解析を行った時点ではまだ確定・公表されていなかったため、以下のようにして与えた。鶴見川（亀の子橋）、多摩川（石原）、荒川（大芦橋）、江戸川（流山）の河川流量については2000年以前の水位月表と流量月表、及び2007～2008年の水位月表が公表されているため、1999～2000年の水位月表と流量月表を用いて水位・流量曲線を作成し、それを用いて2007～2008年の水位月表より各地点の流量を推定した。東京湾への流入量 Q は先に求めた観測地点の流量に（全流域面積）/（観測地点より上流の流域面積）を乗じた値とした。隅田川および中川については、流量データが得られなかったため、多摩川の流量に（隅田川、中川の流域面積）/（多摩川の流域面積）を乗じたもので代替した。物質負荷量 L は、水質年表（国土交通省河川局）に記載されている河口もしくは合流点にもっとも近い観測地点の物質濃度 C に Q を乗じて算出した。なお、物質濃度 C は水質年表の2000～2001年の観測値を観測日の河川流量で重み付け平均して得られた値とした。また、Si濃度については対象河川全てにおいて水質年表に記載されていなかったため、荒川、多摩川については小林（1960）の計測値を参考にして与え、他の河川は両者の平均値とした。陸域から海域への直接流入については東京湾周辺の16下水処理施設の処理水量および負荷量を対象とし、下水道統計（日本下水道協会）および東京都下水道事業年報（東京都下水道局）に記載されている計測値を参考にして与えた。

2.5.3 解析結果と考察

流動・水質・生態系モデルの再現精度を検討するため、湾奥部10定点（図30参照）にて得られた水温・塩分・Chl a 濃度及びDOの現場センサー観測データと計算結

果の比較を行った。図31に2008年5月15日及び同年9月9日のSt. 3～10の観測・計算結果の鉛直分布の比較を示す。

水温・塩分の鉛直分布を見ると、5月の弱混合期、9月の成層期ともに計算値と観測値はかなりよく一致している。とくに、淡水流入量が多い湾西側の測点(St. 3・7)においては強い成層が維持され、東側にいくにつれて成層が弱まっている状況がうまく再現されている。本流動モデルによる水温・塩分の再現は妥当であると認められる。

改良モデルによるChl a の計算値を見ると、9月9日については、St. 7で過大評価しているものの、それを除いては概ね観測値に近い鉛直分布が得られている。しかし、5月15日の結果では、観測値のピークは2～4 mg/m³であるのに対し、計算値のピークは観測値よりも過大な20～60 mg/m³となっている。とくに湾西側の表層において計算値と観測値の差が顕著であるため、境界条件として与えた陸域からの栄養塩負荷量が実際よりも過大であったことが誤差の原因として考えられる。

改良モデルによる5月15日のDOの計算値を見ると、湾西側の表層では過大評価の傾向があるものの、それを除けば観測値とよく一致している。計算値の表層DOが観測値よりも過大になったのは先に述べたChl a の過大評価が原因であり、植物プランクトンの光合成に伴って生成されるDOが過剰であったためである。一方、9月9日の計算値は、湾東側では観測値の鉛直分布特性を概

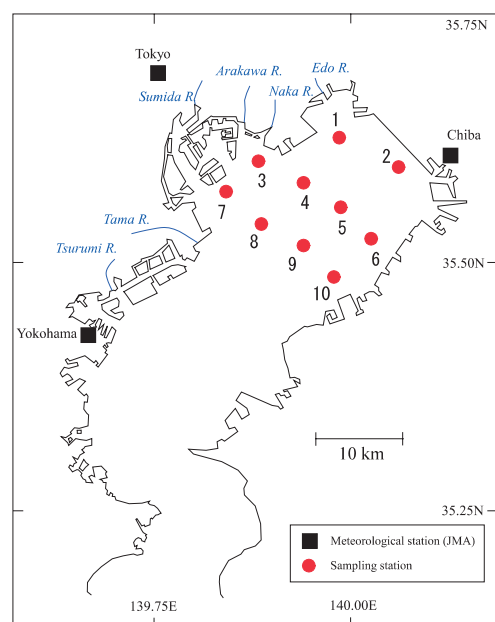
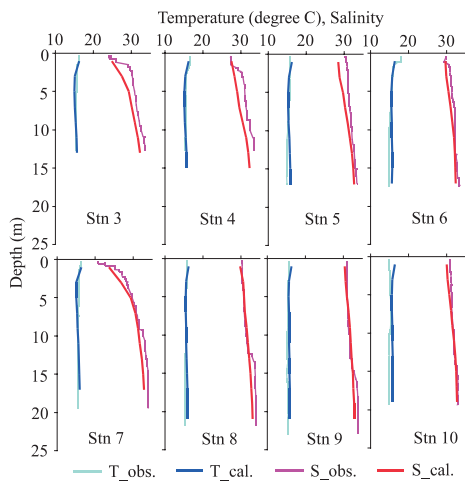
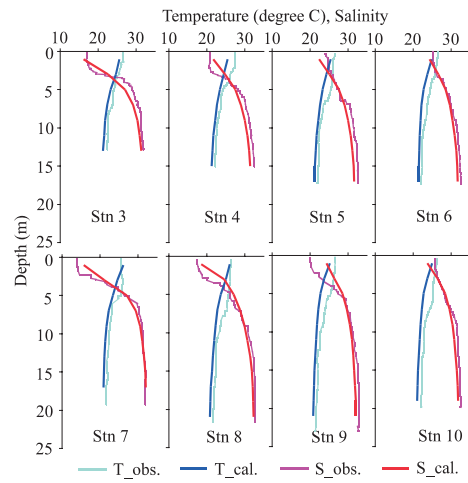


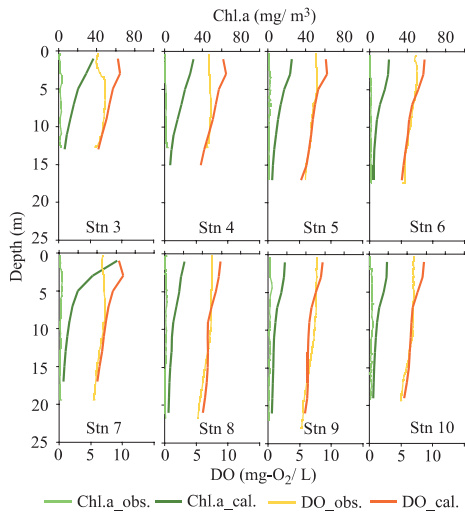
図30 東京湾の概要と調査地点



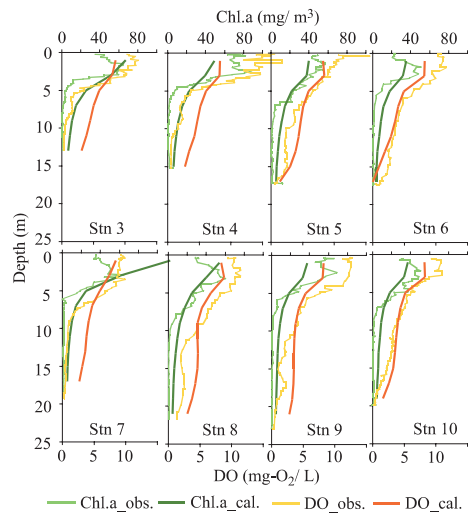
(a) 水温・塩分 (2008/5/15)



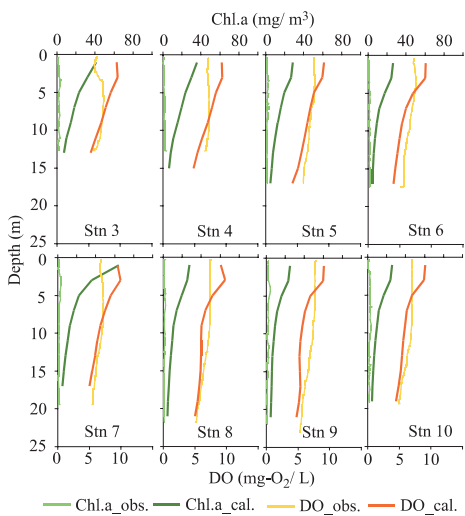
(b) 水温・塩分 (2008/9/9)



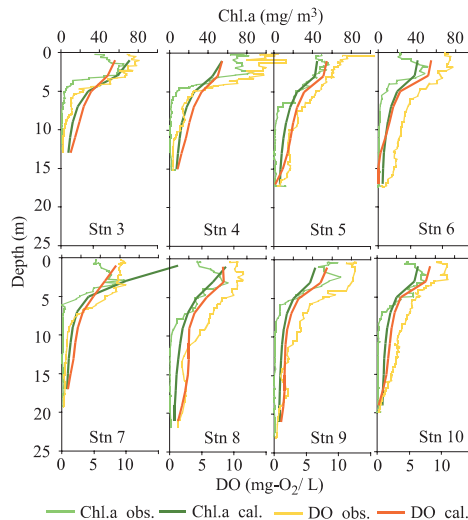
(c) 改良後モデルの Chl.a・DO (2008/5/15)



(d) 改良後モデルの Chl.a・DO (2008/9/9)



(e) 改良前モデルの Chl.a・DO (2008/5/15)



(f) 改良後モデルの Chl.a・DO (2008/9/9)

図 31 流動・水質・生態系モデルによる東京湾の再現計算結果

ね再現できているが、湾西側では底層 DO が過大評価になっている。この誤差についての詳細の原因は明らかではないが、おそらく SOC が過小であることが原因ではないかと推察している。改良モデルでは砂質・泥質に分けて SOC を経験式で与えたが、実際にはそれでは不十分で有機物堆積量など底質状況の経時変化を考慮したモデル化が必要であると考えられる。

モデル改良前後の Chl *a* と DO の計算値を比較すると、全体的に見られる傾向として改良前の結果は改良後よりも Chl *a* は大きく、DO は小さくなるのが分かる。その結果、9月9日の湾西側を除けば、改良前の DO 計算値は改良後のものより観測値との差がわずかながら大きくなっている。9月9日の湾西側については、上述のように元々改良後の計算値が観測値よりも過大であったため、改良後よりも小さくなる傾向にある改良前モデルの結果は観測値に近づいたと考えられる。SOC と有機物分解速度に着目した生態系モデルの改良は DO の再現性の向上に一定の寄与があったといえるが、その効果はそれほど顕著とはいえない。東京湾では内部生産される易分解性有機物量が陸域由来の難分解性のものより著しく多く、有機物を易・難分解性に区別する効果が現れにくいこと、長年にわたって大量に湾奥部全体に有機物が堆積しているおり、それが SOC に及ぼす影響を本モデルでは考慮されていないことが主な原因と考えられる。

2.5.4 まとめ

本研究では、底泥の酸素消費速度と有機物の分解速度に着目して生態系モデルの高精度化を検討した。得られた結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) 三番瀬、三枚洲、東京灯標、千葉灯標の柱状採泥試料酸素消費実験の結果を応用し、水質・生態系モデル中の底質の酸素消費量の改良を検討した。実験結果で得られた酸素消費速度は式 (1) で近似することができるが、底質が砂質のものと泥質のものとで異なる温度依存性を有しており、モデルではそれを考慮する必要があることが明らかになった。
- 2) 炭素安定同位体比を活用して行った珪藻由来の懸濁態有機物の分解実験の結果より、植物プランクトン由来の有機物は陸起源の有機物よりも分解速度が顕著に速いことが分かった。それを踏まえて水質・生態系モデルの有機物を易分解性と難分解性を別々に評価するようにモデルを改良したところ、

実験結果の POC、DOC の経時変化をうまく再現した。

- 3) 1) と 2) の水質・生態系モデルの改良効果を調べるため、改良前後のモデルで東京湾の再現計算を行った。改良後モデルの計算結果は改良前のモデルに比べて DO の再現性が向上した。しかし、湾西部の淡水が多量に流入する付近では改良後モデルにおいても Chl *a*・DO の再現精度が低いことが分かり、陸域負荷量の与え方や底質状況の経時変化を考慮したモデル化など再検討を要する課題が残された。

参考文献

- 1) UNESCO (1981) Tenth rep. of the joint panel on oceanographic tables and standards, UNESCO Tech. Pap. in Marine Science, No. 36, UNESCO, Paris, 1-25.
- 2) Mellor, G. L. (2001) One-dimensional, ocean surface layer modeling: a problem and a solution, *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 790-809.
- 3) Kondo, J. (1975) Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Bound.-Layer Meteor.*, 9, 91-112.
- 4) Hirt, C. W and Nichols, B. D. (1981) Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, 39, 201-225.
- 5) Nakamura, T., Tanaka, R., Yabe, T., and Takizawa, K. (2001) Exactly conservative semi-Lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique, *J. Comput. Phys.*, 174 (1), 171-207.
- 6) 東博紀, 越川海, 木幡邦男, 村上正吾, 水落元之 (2009)伊勢湾における水質の長期変動傾向と風向・風速の経年変化の関係に関する数値解析, 水工学論文集, 53, 1483-1488.
- 7) 岸道郎, 池田三郎, 平野敏行, 西村陽 (1985) 赤潮生態系の数値モデル, 沿岸研究海洋ノート, 22 (2), 109-118.
- 8) 岸道郎 (1994) 底泥による酸素消費を考慮した養殖場の数値モデル, 沿岸研究海洋ノート, 32 (1), 43-53.
- 9) 渡辺正孝, 天野邦彦, 石川祐二, 木幡邦男 (1998)

秋季の東京湾における風の成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程, 土木学会論文集, 608 (VII-9), 13-29.

- 10) 藤田健一, 李寅鐵, 楠田哲也 (2001) 水一底質相互作用モデルによる博多湾のリン循環の数値予測, 水環境学会誌, 24 (1), 48-57.
- 11) PICES (2006) 2000 MODEL workshop report, http://www.pices.int/memberstask_teams/MODEL_materials/mwsl.html.
- 12) Sohma, A., Sekiguchi, Y., Kuwae, T., and Nakamura, Y. (2008) A benthic-pelagic coupled ecosystem model to estimate the hypoxic estuary including tidal flat – Model description and variation of seasonal/daily dynamics, *Ecol. Mod.*, 215, 10-39.
- 13) 環境省水・大気環境局水環境課 (2009) 水質環境基準生活環境項目検討調査報告書 (現地調査及び機構説明) 平成 20 年度.
- 14) 小林純 (1960) 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究, 農学研究, 48, 63-109.

2.6 まとめと今後の展望

本特別研究では東京湾を対象海域として、貧酸素水塊の形成とその影響に関する議論を展開した。サブテーマ 1 (本報告書 2.1 節) では貧酸素水塊形成の主因である水塊中の有機物の分解性の比較を行った。当初の研究計画でサブテーマに設定していなかった補遺の 2.2 では、沈降粒子捕捉 (セディメント・トラップ) 調査により、湾奥部における植物プランクトン等に由来する浮遊系の有機物粒子の底層・底質への移行・供給量の見積りを行った。サブテーマ 2 (2.3) では底泥の酸素消費速度の時空間分布の把握、およびそれらの水柱中の全酸素消費速度に対する寄与の見積りを行った。サブテーマ 3 (2.4) では、東京湾における代表的な複数種の二枚貝について劣悪環境下における現場生存試験を行い、貧酸素水塊に対する二枚貝の種毎の耐性・脆弱性の評価・比較を行った。サブテーマ 4 (2.5) ではサブテーマ 1 (2.1)、2 (2.3) で得られた貧酸素水塊形成に関わる過程とデータを 3 次元流動・水質 (生態系) モデルに適用し、貧酸素水塊再現の精度向上の検証を行った。

その中でサブテーマ 1 (2.1) においては、水塊中の有機物の分解性は植物プランクトン細胞を主成分とす

る (つまり内部生産に由来する) 懸濁態有機物が最も高く、陸起源の懸濁態有機物や溶存態の有機物は低いことが示された。本特別研究で分解性を評価した海水中に主に含まれる植物プランクトンは主に *Skeletonema costatum* 等の常在的な珪藻に占められていた場合が多かった。しかし、東京湾では初夏にクロロフィル a 濃度で数百 $\mu\text{g/L}$ に達するような *Heterosigma* (ラフィド藻) や *Prorocentrum* (渦鞭毛藻) 属による赤潮が形成され、冬季にも *Rhizosolenia* や *Eucampia* 属の大型の珪藻類がそれぞれ極端に卓越する時がある。しかしこれらの季節特異的に発生する植物プランクトン由来の懸濁態有機物の分解性について評価されておらず、今後の調査検討が必要と思われる。

同様に補遺 (2.2) に述べたセディメントトラップによる有機物沈降粒子の底質移行量評価においても、今回は初夏～初秋期の *Skeletonema costatum* 等の珪藻卓越時に、クロロフィル濃度としても東京湾奥部としてはそれほど高いとは言えない時期に二回しか行っておらず、上記のようなラフィド藻や渦鞭毛藻、大型の珪藻類が卓越する時期にも同様の調査・評価がなされるべきであると考えられる。

サブテーマ 2 (2.3) においては、水深 20 m 以浅の底質・水深の異なる 4 地点について底泥酸素消費速度を季節毎に測定を行った。東京湾で毎夏、底層が貧酸素水塊に見舞われる箇所の内、水深 20 m を越える部分はかなりあり、情報の少ない底質の一般項目と共に底泥の酸素消費速度についても系統的に評価されるべきであると考えられる。特に底生魚介類の主な漁場になっている神奈川県 (川崎市・横浜市) 沖海域では、操業や水揚げに大きな影響をおよぼす貧酸素水塊が大きく変動し、貧酸素水塊が神奈川県沖海域の底泥の酸素消費によるものなのか、湾奥部で発生したものが南方向に移動したことによるものなのかを精査するためにも、より水深のある地点での底泥の酸素消費速度の評価が求められる。

さらに、今回調査対象にした地点の中で相対的に水深があり、長時間貧酸素状態に見舞われ、底質の強熱減量や硫化物、シルト・粘土分含量が高い千葉・東京両灯標周辺より、強熱減量、硫化物、シルト・粘土分含量共に低く、また浅い三枚洲の方が概ね底泥の酸素消費速度が高かった理由は明確に出来ていない。底泥の酸素消費速度には、易分解性の有機物、硫化物の含量やその遊離型・

結合型の形態、鉄・マンガン等の金属類の含量やその形態、さらにはその底泥中の分布や直上水との交換・拡散等、非常に複雑な因子が複合的に影響をおよぼすために、主な因子を特定するのは容易ではないと考えられるが、今後は酸素消費速度の測定と共にこれらの諸因子の詳細な把握を行っていく必要がある。

サブテーマ1 (2.1) と2 (2.3) の結果から、水柱中における単位面積当たりの全酸素消費速度に対する水塊中の有機物（懸濁態・溶存態）の分解に伴う酸素消費速度と底泥の酸素消費速度それぞれの寄与を見積もったが、これらは成層、植物プランクトンと懸濁態・溶存態有機物の鉛直分布、底泥の酸素消費速度の変動に大きく影響を受けるものであり、今後もこれらの諸因子の詳細なモニタリングを含む詳細な評価を引き続き行っていく必要性が有ると考えられる。

サブテーマ3 (2.4) では、京浜運河という東京湾奥部でも屈指の劣悪な底層・底質環境を有する地点で、東京湾に特徴的な（だった）二枚貝の生存・成長の現場試験を行った。その結果、貧酸素水塊の進入に対して、生残率が種間で大きく異なることが示された。このことは二枚貝生息場の環境保全のための底層 DO の目標設定に一定の情報を与えるものと考えている。しかしながら、現場試験において近接した地点でも底質が異なれば、同じ種の二枚貝の生死の様子が異なっていたことから、二枚貝の生存に硫化水素等の因子も介在していると考えられ、今後、底泥中の硫化水素の形態、発生・蓄積状況と併せて評価を行っていく必要性が有ると考えられた。

また、東京湾でほぼ消滅したハマグリは、上記の劣悪底質環境においても強い耐性（生存率と成長）を有するという意外な結果を示した。このことは成貝の個体は劣悪底質環境に強い耐性を有していても、その卵や浮遊幼生、着底した幼貝におよぼす劣悪な環境の影響を含む一連の生活環を通じた評価が今後、沿岸環境に生息する水生生物の保全のために必要であることを示していると思われる。

サブテーマ4 (2.5) では、サブテーマ1 (2.1)、2 (2.3) で得られた底泥の酸素消費速度と有機物の分解速度に基づき、生態系モデルの高精度化を試み、改良

前後のモデルで東京湾の水質の再現計算を行いその結果を比較した。改良後モデルの計算結果は改良前のモデルに比べて DO の鉛直分布の再現性が向上した。しかし、湾西部の淡水が多量に流入する東京都周辺では改良後モデルにおいても Chl *a*・DO の鉛直分布の再現精度に課題が残り、今後は陸域負荷量の与え方や底質状況の経時変化を考慮したモデル化など再検討する必要があると思われる。

さらに、底生生物への影響を評価するためには貧酸素水塊のみでは不足であり、底泥中に発生・蓄積する硫化水素の挙動をモデルにおいても考慮することが必要である。硫化水素の発生を再現するためには底泥内の生物化学的反応をモデル化した底質モデルを本モデルに組み込む必要があり、今後の課題であると考えられる。

東京湾に限らず大都市近傍の閉鎖性沿岸海域では、流入負荷削減等による陸域起源の有機物の流入量の減少、水塊中の栄養塩類の低下が見られる。それにも拘わらず、毎年、成層の発達する温暖な時季に底層に貧酸素水塊が発生するなど、底質・底層環境の改善傾向が見られている事例は少ない。その結果、底生魚介類の生息環境の消失、資源の大幅な減耗をまねいている。

本特別研究でも示したように、貧酸素水塊形成のために底泥の酸素消費が大きな要因として挙げられるが、底質に関する環境基準に設定された項目はダイオキシン以外には無く、公共用水域の測定計画等の行政調査において、底質環境は頻繁かつ高密度に監視・評価されるには限らない。また上記のように、底質環境の改善は水質ほど迅速かつ明確に見られないことから、中長期に渡る酸素消費速度を含む測定と評価が必要であると考えられる。

今回、対象水域を東京湾に限定して一連の調査研究を実施してきたが、水塊中の有機物の形態や分解性評価、底泥への有機性の沈降粒子量の把握、底泥の酸素消費速度の系統的な測定、実現場における底生生物の生存性評価、それらを統合する流動・生態系（水質再現）モデル構築とシミュレーションに関わる手法を改良しつつ、ここで得られた結果をさらに発展させることで、貧酸素水塊解消と底質環境改善に向けた施策に活用することが望まれる。

[資料]

I 研究の組織と研究課題の構成

1 研究の組織

[A 研究担当者]

水圏環境研究領域

海洋環境研究室

牧 秀明

中村泰男

アジア自然共生研究グループ

アジア水環境研究室

越川 海

東 博紀

[B 客員研究員]

浦川秀敏* (東京大学海洋研究所先端海洋システム研究センター) (平成 19 年度)

*米国ワシントン大学

2 研究課題と担当者

(1) サブテーマ 1 プランクトン由来の有機物と陸起源の有機物による貧酸素水塊形成への寄与の定量化

牧 秀明・越川 海

(2) サブテーマ 2 底泥の酸素消費速度の時空間分布特性の把握

牧 秀明・中村泰男

(3) サブテーマ 3 水塊の貧酸素化に伴う底生生物生息環境への影響評価

中村泰男

(4) サブテーマ 4 陸起源負荷の貧酸素発生への寄与を定量的に表す 3 次元流動・水質・生態系モデルの開発

東 博紀

II 研究成果発表一覧

1 誌上発表

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

東博紀, 牧秀明 (2008) CIP-FEM を用いた準 3 次元内湾流動モデルによる東京湾の循環流に関する基礎研究, 水工学論文集, 52, 1405-1410.

中村泰男, 小泉孝義, 市村康, 木幡邦男 (2009) 東京湾の人工干潟におけるハマグリが生残と成長: ケージ実験による他種との比較, 水環境学会誌, 32, 549-555.

東博紀, 花町優次, 樋渡武彦, 水野知巳, 村上正吾, 木幡邦男 (2010) 数値シミュレーションによる伊勢湾のアサリ資源量の減少傾向に関する考察, 水工学論文集, 54, 1597-1602.

Nakamura Y., Nakano T, Yurimoto T., Maeno Y., Koizumi T., Tamaki A. Reproductive cycle of the clam *Meretrix lusoria* in Ariake Sound and Tokyo Bay.. Submitted to Fisheries Science.

2 口頭発表

発表者・(暦年)・題目・学会等名称・予稿集名・頁

牧秀明, 越川海, 木幡邦男 (2008) 東京湾湾奥部における表層水中の有機炭素の分解性比較, 2008年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 142p.

牧秀明, 中村泰男, 木幡邦男 (2009) 東京湾湾奥部における底泥酸素消費, 第43回日本水環境学会年会講演集, 322p.

牧秀明, 木幡邦男, 越川海 (2010) 東京湾湾奥部における有機物の分解性比較, 第44回日本水環境学会年会講演集, 467p.

牧秀明, 越川海, 中村泰男, 木幡邦男 (2010) 東京湾湾奥部におけるセディメントトラップによる沈降粒子の評価, 2010年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 124p.

REPORT OF SPECIAL RESEARCH FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

国立環境研究所特別研究報告
SR - 93 - 2010

平成 22 年 9 月 30 日発行

編 集 国立環境研究所 編集委員会

発 行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2

電話 029-850-2343 (ダイヤルイン)

印 刷 株式会社 イ セ ブ

〒305-0005 茨城県つくば市天久保 2 丁目 11-20

Published by the National Institute for Environmental Studies

16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan

September 2010

無断転載を禁じます

リサイクル適性の表示：紙へリサイクル可

本冊子は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料 [A ランク] のみを用いて作製しています。