

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

人工構造物に囲まれた内湾の干潟・藻場生態系に対する
貧酸素・青潮影響の軽減策の提案
(5-1404)

平成26年度～平成28年度

Proposals of the Effective Countermeasures against the Attack of Oxygen Depleted Water Mass and Blue Tide to Tidal Flat and Sea Grass Beds Enclosed by Artificial Coastline

横浜国立大学
国立研究開発法人国立環境研究所
国立研究開発法人港湾空港技術研究所
東京大学
愛知県水産試験場

〈研究協力機関〉
東京都市大学
島根大学

平成29年5月

環境省
総合環境政策局総務課環境研究技術室
環境保健部環境安全課環境リスク評価室
地球環境局総務課研究調査室

人工構造物に囲まれた内湾の干潟・藻場生態系に対する

貧酸素・青潮影響の軽減策の提案

(5-1404)

I. 成果の概要	.....	i
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
(1) 生態系モデルの改良とモデルによる現地地形及び保全策後の変化解析 (国立大学法人横浜国立大学)	.....	1
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	2
2. 研究開発目的	.....	2
3. 研究開発方法	.....	2
4. 結果及び考察	.....	8
5. 本研究により得られた成果	.....	22
6. 国際共同研究等の状況	.....	23
7. 研究成果の発表状況	.....	23
8. 引用文献	.....	25
(2) 三河湾における貧酸素および硫化物が魚介類の生息および再生産に与える影響解明 (愛知県水産試験場)	.....	27
要旨	.....	27
1. はじめに	.....	28
2. 研究開発目的	.....	28
3. 研究開発方法	.....	28
4. 結果及び考察	.....	32
5. 本研究により得られた成果	.....	45
6. 国際共同研究等の状況	.....	45
7. 研究成果の発表状況	.....	45
8. 引用文献	.....	46
(3) 貧酸素及び硫化物に対する浅海域の魚介類の応答 (国立研究開発法人国立環境研究所)	.....	47
要旨	.....	47
1. はじめに	.....	47
2. 研究開発目的	.....	48
3. 研究開発方法	.....	48
4. 結果及び考察	.....	49
5. 本研究により得られた成果	.....	61
6. 国際共同研究等の状況	.....	61
7. 研究成果の発表状況	.....	61
8. 引用文献	.....	62
(4) 東京湾の貧酸素・硫化物分布に関する実態調査	.....	63

(国立大学法人東京大学)	
要旨	63
1. はじめに	64
2. 研究開発目的	64
3. 研究開発方法	65
4. 結果及び考察	70
5. 本研究により得られた成果	79
6. 国際共同研究等の状況	81
7. 研究成果の発表状況	81
8. 引用文献	82
(5) 貧酸素・硫化物の蓄積過程の解析と実験	83
(国立研究開発法人港湾空港技術研究所)	
要旨	83
1. はじめに	83
2. 研究開発目的	84
3. 研究開発方法	84
4. 結果及び考察	94
5. 本研究により得られた成果	105
6. 国際共同研究等の状況	106
7. 研究成果の発表状況	106
8. 引用文献	106
III. 英文Abstract	107

課題名 5-1404 人工構造物に囲まれた内湾の干潟・藻場生態系に対する貧酸素・青潮影響の軽減策の提案

課題代表者名 中村 由行（国立大学法人横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院教授）

研究実施期間 平成26～28年度

累計予算額 151,745千円（うち平成28年度：48,073千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 貧酸素水塊、青潮、硫化物、底生魚介類、生態系モデル解析、対策技術、東京湾、三河湾、浚渫窪地・航路・平場

研究体制

- (1) 生態系モデルの改良とモデルによる現地形及び保全策後の変化解析（国立大学法人横浜国立大学）
- (2) 三河湾における貧酸素および硫化物が魚介類の生息および再生産に与える影響解明（愛知県水産試験場）
- (3) 貧酸素及び硫化物に対する浅海域の魚介類の応答（国立研究開発法人国立環境研究所）
- (4) 東京湾の貧酸素・硫化物分布に関する実態把握（国立大学法人東京大学）
- (5) 貧酸素・硫化物の蓄積過程の解析と実験（国立研究開発法人港湾空港技術研究所）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

東京湾奥部や三河湾東部海域には、三番瀬・谷津干潟や六條潟などの貴重な干潟・藻場や浅海域が存在し、開発が進んだ現在でも水産有用種や野鳥などの高次の生物生産を支え、さまざまな生態系サービスをもたらしている。このような干潟・藻場生態系にとって、現在最も大きな脅威となっているのは貧酸素水塊や青潮の来襲である。しかしながら特に青潮は貧酸素水塊の湧昇現象であり、気象擾乱によって突発的に生じ、しかもしばしば大規模であるため、周辺の関連研究は多いもののその予測技術の進展は遅れ、実効ある有効な対策はなされていない。青潮対策が遅れている理由は科学的知見の不足にもあり、青潮の生物影響という観点からは酸素濃度の低さよりもむしろ青潮水塊に含まれる硫化物が重要であるという指摘があるにもかかわらず、硫化水素を主体とした硫化物が生物群集に与える影響や、環境中での硫化物の蓄積機構はほとんど調べられていない。このような現状を考慮すると、まず現場海域において貧酸素水塊や青潮イベントに関する詳細な観測を行って、干潟等の生態系がさらされる水質の実態を把握することが必要である。その上で、干潟・藻場生態系干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮影響を軽減するため、発生源での対策とともに、干潟・浅海域での実効性のある青潮回避策を構築することが喫緊の課題であるといえる。

2. 研究開発目的

東京湾ならびに三河湾での現地観測によって貧酸素や青潮の生物被害に至るまでの溶存酸素や硫化物動態を詳細に調べるとともに、室内実験によって海底境界層近傍の硫化物蓄積過程ならびに底生生物へのインパクトを調べる。これらの成果を統合し、干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮影響を軽減するため、発生源対策及び青潮回避策を提案し、具体的な諸対策効果の定量化を行うことを課題全体の目的とする。

以上の目的のため、東京湾および三河湾において、貧酸素及び硫化物の分布や動態に関する実態把握調査を行う。東京湾については、湾奥部の平場と浚渫窪地における下層水中の溶存酸素濃度、硫化物濃度、および底質中の硫化物含有量について初夏から秋にかけての実態調査を行い、貧酸素水塊、無酸素水塊、および硫化物の時空間変動を把握する。貧酸素水塊の湧昇やそれに伴う青潮形成時に着目した調査を実施し、硫黄動態に関する知見を集積する。これらにより、平場および浚渫窪地それぞれの青潮発生源としての寄与率を推定し、発生源対策群の有効な選択法をとりまとめる。

三河湾においては、湾全体、デッドゾーン、干潟・藻場に区分し、生物分布と合わせた水塊変動調査を行う。

また、東京湾および三河湾において、貧酸素及び硫化物（硫化水素を含む）の忌避行動を含めた生物影響について実態調査を行い、生物の密度及び空間分布、生存や再生産に及ぼす影響を解析する。

貧酸素・硫化物動態やそれに関連した生物影響の評価の際に、現地観測では得にくい情報については、室内実験系での詳細な実験を行う。まず、硫化水素等硫化物が底生生物等の生残等に及ぼす影響を調べる実験系を作成し、実験データを得て、貧酸素単独、硫化水素単独及び貧酸素と硫化水素の共存時の影響を明らかにする。さらに、海底境界層近傍の硫化物蓄積過程を調べる実験系を作成し、硫化物の溶出過程を調べるとともに、それを抑制する手法を実験的に調べる。あわせて現場でのパイロット実験を行う。

これらの成果を統合し、干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮影響を軽減するため、発生源対策及び青潮回避策を提案し、具体的な諸対策効果の定量化を行う。上述の現場海域や室内実験での知見を基に、貧酸素水塊や青潮の来襲による生物・生態系影響を評価できるツールとしての生態系モデルを構築する。本モデルを用い、青潮インパクトを軽減するための対策ごとに、貧酸素・硫化物濃度と暴露時間の変化解析結果と生物影響実験結果を統合し、各対策による生物資源量の損傷回避効果を定量化する。その上で、三河湾及び東京湾それぞれにふさわしい手法の組み合わせを提案する。

3. 研究開発の方法

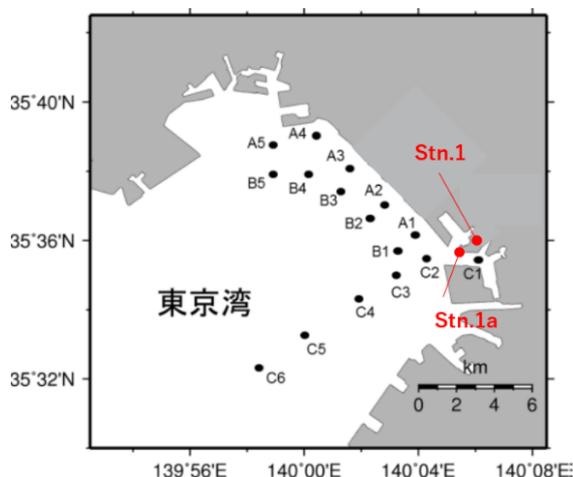
(1) 生態系モデルの改良とモデルによる現地形及び保全策後の変化解析

貧酸素や青潮インパクトの軽減策のうち、主として発生源対策(発生源と推定されている場の貧酸素・硫化物発生を軽減する対策)に的を絞り、これまで行われてきた技術の文献レビューを行い、現状で可能性のある対策群の候補を選ぶとともに、それらの対策前後での貧酸素化・硫化物生成量の違いを表現するために必要な数理解析手法としての生態系モデルの改良点を整理した。さらに、これらの諸対策やそのモデルによる評価方法を俯瞰し、事前検討で欠けていた研究開発要素を特定し、下記の現地調査を実施した。

・数理モデル検証のための、航路を中心とした青潮の観測

従来不足していた青潮発生時のイオウの動態と成分に関する情報を得るため、東京湾奥部で青潮発生時前後での現地観測を実施した。可能な限り確実に青潮を捕捉するため、東京湾奥部3地点での岸壁に沿った高頻度観測(岸壁調査)と、船上からの観測(船上調査)を並行して実施した。さらに、青潮の空間的挙動の把握を行うため、衛星リモートセンシング及び高所からのビデオ連続撮影による青潮の把握調査を実施した。

観測データをできるだけ集積するため、研究3か年度にわたって毎年ほぼ同じ趣旨の現地観測を実施した。岸壁調査の観測場所は、千葉みなと(Stn.1, 水深3m)、検見川浜(Stn.2, 水深7m)、の2箇所を基本とした。一方、船上調査は千葉航路および湾奥部の沿岸付近を面的に観測した(図(1)-1)。船上観測地点は、B4地点についてのみ変更し、2014年は幕張沖窪地周辺の平場、2年目以降は同窪地内で実施した。



図(1)-1 岸壁及び船上観測地点(2016年の例)

岸壁調査は、2014年の場合には8/18~9/5に週3回程度、青潮発生時にはほぼ毎日実施した。2015年以降もほぼ同様である。船上調査はいずれの年も計4回行った。岸壁調査では総合水質計による観測を実施し、船上調査では総合水質計と硫化物センサーによる計測を行うとともに、採水して栄養塩・硫化物・単体イオウ、鉄・マンガンの分析を行った。

単体硫黄(S^0)の定量については、Bartlett and Skoog(1954)の方法を基に、青潮発生時の海水中単体硫黄の簡易な濃縮・定量法を確立し、東京湾青潮発生時の海水中の単体硫黄を定量した。海水試料は直ちにガラス繊維ろ紙(Whatman GF/F)で濾過して共存硫化物の影響を除き、ろ紙上の単体硫黄の抽出には、n-ヘキサンと親水性有機溶媒の混合溶媒を用いた。

青潮発生中に実施した現地観測により青潮の光学的特性を明らかにした上で、静止海色衛星COMS/GOCIによる硫黄濃度推定に基づく青潮分布の簡易的モニタリング手法について検討した。現地観測は、大規模な青潮が発生した2015年8月24日に、上述の船上観測地点において実施し、上向き放射輝度(L_w)、下向き放射照度(E_s)を測定した。衛星画像についてMUMM大気補正を実施し、さらに衛星画像による R_{rs} の推定値を実測値により校正した。現地により測定した R_{rs} と硫黄濃度の関係から海色リモートセンシングのための硫黄濃度推定モデルを作成し、このモデルを青潮発生期間に取得された衛星画像に適用した。

ビデオモニタリングでは、Stn.1 に近接した千葉ポートタワー展望室から、ビデオカメラガーデンウオッチカム(CBR-GWC)を2台設置することにより、2015年8月24日から30分おきに画像を取得した。

・生態系モデルの改良と現地地形及び保全策後の変化解析

本研究で用いた計算モデルは、内湾生態系の解析ツールとして(独)港湾空港技術研究所が開発している非静水圧3次元流動モデル(STOC-LT)と生態系モデルを組み合わせたモデルをベースとし、従来モデルでは考慮されていなかった硫化物イオンから硫黄粒子、さらに硫酸イオンへの酸化反応を組み込んだモデルを構築した。さらに、堆積物からの硫化物溶出過程についての改良を加えた。

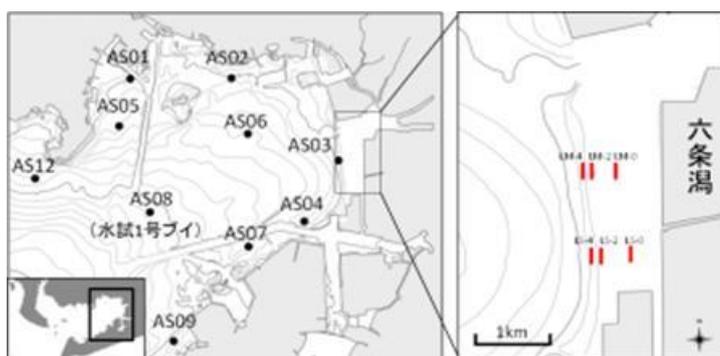
改良モデルを用い、東京湾最大の窪地である幕張沖窪地を対象に、その埋め戻し効果を調べた。その結果および分担機関の成果を踏まえ、東京湾及び三河湾に対し、貧酸素・青潮影響を軽減する対策の候補を取りまとめた。

(2) 三河湾における貧酸素および硫化物が魚介類の生息および再生産に与える影響説明

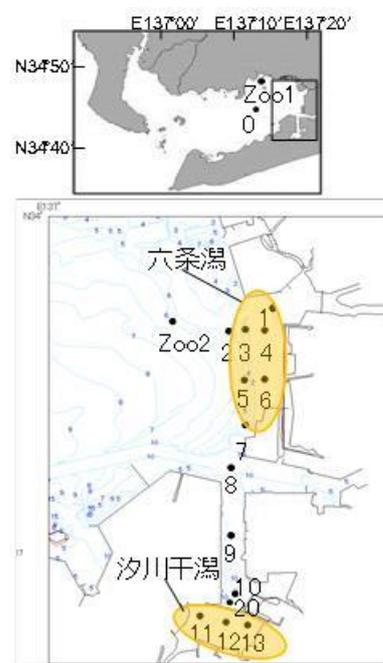
三河湾における貧酸素水塊及び硫化物が底生性魚介類資源に与える影響を評価するために、貧酸素水塊が発達する春季から秋季にかけて湾全体及び湾東部で水質観測(水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)、溶存硫化物濃度)と漁船による底びき網調査、湾奥部の六条潟における小型桁網による調査(ソリネット調査)を行い(図(2)-1)、採取された魚介類試料のうち水産上有用種であるカレイ類、ガザミ類、エビ類及びシヤコを主要魚介類として取り扱った。

三河湾湾奥の人工構造物に囲まれた航路・泊地及び隣接する干潟域の水質及び流動環境を把握するため、六条潟及び隣接する航路・泊地に設定した全測点において(図(2)-2)、2014年から2016年の各年の6月から10月にかけて毎月1~2回各層の水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)を測定し、測点2、4、6、7においては自記式連続観測機器を設置し、海底直上の水温、塩分、DO、流向流速の連続観測を行った。また、同時期に全測点においてマクロベントスの採取を毎月1回行った。貧酸素化が動物プランクトン現存量に与える影響を評価するため、春季から秋季にかけて毎月1回、動物プランクトンの採集を行い、種ごとに換算式を用い炭素現存量を求めた。

溶存硫化物発生抑制策の検討における、溶存硫化物及び鉄の動態を把握するため、湾中央及び航路・泊地において、毎月1回柱状採泥を図(2)-2に示す湾中央の測点0、航路の測点9、10、20または8の4測点で行い、得られた試料を表面から1cmの層別に計8層に分割し、各層における溶存硫化物、硫化鉄、溶存態鉄を分析した。



図(2)-1 湾東部漁船調査(左図)及びソリネット調査(右図)測点



図(2)-2 調査測点

(3) 貧酸素及び硫化物に対する浅海域の魚介類の応答(国立環境研究所)

東京湾内湾部において2014年6月~12月、2015年7月~12月、および2016年7月~10月の期間に毎月1回の頻度で、底曳網による底生生物採集、CTD-DOロガー(JFEアドバンテック製RINKO profiler)による表層(海面下50cm)、底層(海底直上50cm)の水温、塩分および溶存酸素濃度の測定を行った。調査地点は次の4定点とした: St. A夏季に長期間無生物域となる湾奥・浚渫窪地・航路付近、St. B夏季に無生物域となる湾奥・沖合の平場、St. C 湾中央・貧酸素~通常酸素濃度の境界水域、St. D南部沖合、中ノ瀬周辺水域(対照地点)。また、

不攪乱柱状採泥器により採取した海底直上水(海底表面から5cmおよび10cm)および底泥(海底表面から0, 1, 2, 3, 4および5 cm)の硫化水素濃度をユニセンス社製マイクロセンサーを用いて測定し、あわせて海底直上水(海底表面から5cm)の溶存酸素濃度を蛍光式DOセンサー(YSI製ProODO)により測定した。以上により貧酸素水塊ならびに海底直上水および底泥中の硫化水素の経時変化および空間分布を調べた。また、併せて底生生物の個体数・重量密度および多様度指数(Shannon's H')も調べた。3年間の調査結果を解析し、2014~2016年における水質、底質および底生生物相の時空間的変動を明らかにした。

また、貧酸素水塊および硫化水素等硫化物が海産生物の初期生活史段階の生残等に及ぼす影響を調べるための室内実験系を構築し、溶存酸素濃度、硫化水素濃度およびpHの安定性を検討した。次に、構築した実験系を用いて、アサリ幼生・稚貝、およびヨシエビ幼生・稚エビの硫化水素耐性を明らかにするための曝露試験を実施し、個体の斃死を引き起こす硫化水素濃度を調査した。

(4) 東京湾の貧酸素・硫化物分布に関する実態調査

無酸素水塊の発生源である、湾奥中央平場、浚渫窪地、および航路を対象とし、硫化物濃度を含む無酸素水塊の時空間分布に関する現地調査を行った。調査に際しては千葉県水産総合研究センターの貧酸素予測システムの活用と水質センサーによる要採水基準の確立、およびORPと濁度計に基づく無酸素水塊層厚の把握を総合し、効率的なモニタリング手法を検討した。現地調査は2014年の8月8日、8月26日、9月5日、9月18日、2015年の7月24日、8月24日、9月1日、9月16日、および2016年の7月26日、8月19日、9月2日、9月13日の3カ年計12回行った。各調査では、多項目水質計JFE Advantec社AAQ-Rinkoを用いて水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)、濁度、pH等を測定し、多項目水質計にくりつけたニスキ型採水器を用いて、深度を確認しながら底層水の採水を行った。本研究で採用した全硫化物濃度の分析精度が0.05mg/Lであることを考慮し、全硫化物濃度がこれを下回ることが確実な場合は採水を行わないこととし、このような作業の効率化を図ることで、従来データがあまり無く、不明点の多い平場の無酸素水塊の全体像を把握するよう努めた。

数値予測システムの構築においては、流動モデルにはDHI社のMike3非静水圧モデルを採用し、水質モデルはDHI社Mike3のEcolabプラットフォームを採用し、硫化物およびイオウの生成過程を含むモデル化を行った。本モデリングでは浚渫窪地における溶存酸素濃度と硫化物濃度を主な予測対象とし、感度分析から影響の大きい過程を抽出することで、実用性の高い簡易なモデルの構築に努めた。本システムに時々刻々の境界条件を与えることで、周年スケールの無酸素水塊の再現を行い、本研究で得られた観測結果と比較することで、本予測システムの検証を行った。

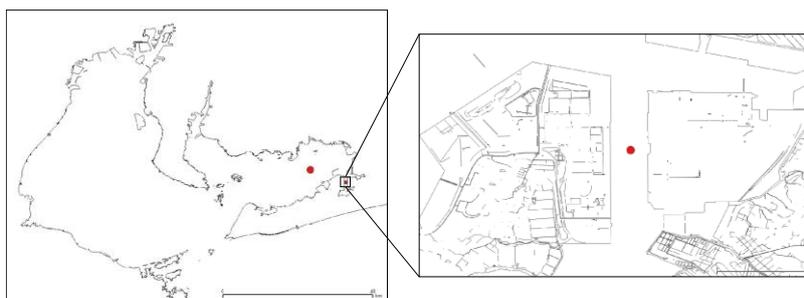
観測結果と数値計算結果を総合することで、平場、浚渫窪地、および航路における硫化物を含む無酸素水塊の発生規模を推定し、東京湾三番瀬をはじめとする青潮発生域を想定し、それぞれの水塊による寄与を推算した。

(5) 貧酸素・硫化物の蓄積過程の解析と実験

三河湾で採取し堆積物を用いて行ったコア培養実験と現地観測データの解析結果を比較し、現場の値を定量化できる手法を開発する。また、渦相関法で得られた酸素消費フラックス(SOD: sediment oxygen demand)と平均流速の関係を考察する。さらにコア培養実験での攪拌速度と流速の関係、流速と酸素消費速度の関係を検討する。流動条件に着目することで、最適なコア実験の条件設定が可能になり、現場の値を精度よく室内実験から推定することが可能になる。現場観測と同地点同時期において、現地(図(5)-1左図)より採取した未攪乱堆積物コアを用いて堆積物による酸素消費フラックスの推定を目的とするバッチ法によるコア培養実験も行っている。室内実験装置においてLDV(Laser Doppler Velocimeter)によるコア内の流動測定を行った。測定はコアの底面から0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 cmの各高さ、コア中心から半径方向に0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 cmの計24箇所で行った。コア内の直情水はプロペラにより攪拌されるが、この攪拌速度を33.3, 46.7, 60.0, 73.3, 86.7rpmの5段階に分けて測定を行った。

上記で確立した室内実験手法を用いて、底質環境の改善手法を提案することを目的とし、室内実験において種々の鉄資材を添加した未攪乱底泥コアを用いた溶出実験を行うことにより、硫化水素を沈殿・除去するために適切な鉄添加量および有効な鉄資材の2点について検討した。

本研究では三河湾を調査対象とした。現場(図(5)-1右図)において採取した未攪乱堆積物コアのうち採泥条件の良い6本を用いて、静置培養実験を5日間行った。6月、7月、8月の溶出実験について、6本のうち3本は鉄粉添加、3本は水酸化第二鉄添加とした。9月の溶出実験については、6本のうち2本は水酸化第二鉄添加、2本は酸化水酸化鉄(III)添加、2本は四酸化三鉄添加とした。供給水には、現場底層水をワットマンGF/Cでろ過したものを窒素曝気して用いた。



図(5)-1 調査地点（左図：SOD実験用コア採取地点、右図：硫化物溶出実験用コア採取地点）

また、堆積物からの硫化物溶出抑制手法の一つとして底層曝気に着目し、東京湾奥部に位置する千葉港において設置・稼働されていた高濃度酸素水供給装置について、その効果を検討した。

最後に、堆積物中の硫化物動態を詳細に検討するため、生物化学的反應過程を取り込んだ数理モデル化を行うとともに、底面境界層を表現する物理的な数理モデルを組み合わせ、水・堆積物界面近傍での物質循環過程を精度良く再現できるモデルの構築を目指した。

4. 結果及び考察

(1) 生態系モデルの改良とモデルによる現地地形及び保全策後の変化解析

発生源対策（発生源と推定されている場の貧酸素・硫化物発生を軽減する対策）技術として、既存の技術をレビューした。本研究の直接の対象は東京湾及び三河湾であるが、今後本研究の成果がそれ以外の閉鎖性海域にも適用される可能性を考慮し、また将来的には社会経済的な条件が変化して取り得る対策メニュー変化する可能性があることから、現時点で多少とも可能性のある発生源対策は可能な限り検討することとした。

a. 窪地：窪地の埋戻しによる地形改変、曝気・高濃度酸素水等による酸素供給、温排水・外海水導入や噴流等による流動性の確保・維持

b. 航路・泊地：航路地形の改変、航路・泊地陸上側端部の流動性確保、曝気・高濃度酸素水等による酸素供給

c. 平場：覆砂による有機泥の封じ込め、ベギアトア（硝酸蓄積性硫黄酸化細菌）の添加、スラグ等鉄剤の散布（鉄による溶出抑制、硫化物吸着・硫酸還元菌活性の抑制）

以上の対策手法のうち、窪地の流動促進や埋め戻し、底層水への酸素供給、鉄剤添加による底質改善については実験もしくはモデル解析によって具体的な評価を実施し、対策案の提案に役立てた。

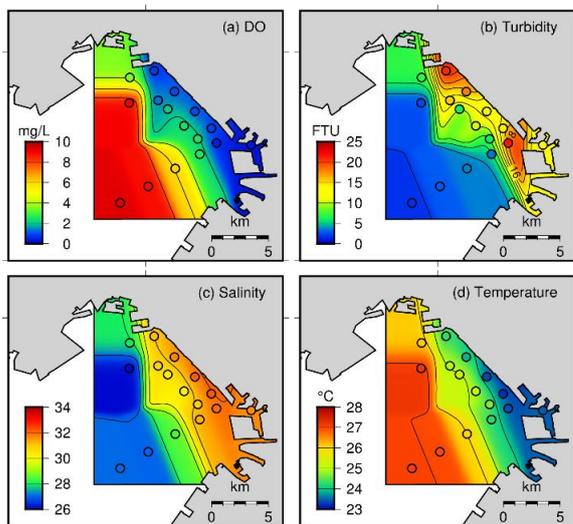
・数理モデル検証のための、航路を中心とした青潮の観測

3か年の調査期間のうち、2015年の青潮が最も規模が大きく、かつ青潮形成時に船上の観測を実施することができたため、ここでは2015年の結果を中心にまとめ、必要に応じて多年度の観測の成果を補足的に述べる。2015年の青潮は8/24から市原港、千葉中央港、稲毛～茜浜地先および船橋港内で発生していることが確認され、8/25には三番瀬漁場内の一部でも発生が確認された。千葉本港内での青潮は8/26ごろまで続いた。特に8/24に実施した観測によって、同時期に発生した比較的大規模な青潮を、船上から三次元的に捉えることができた。

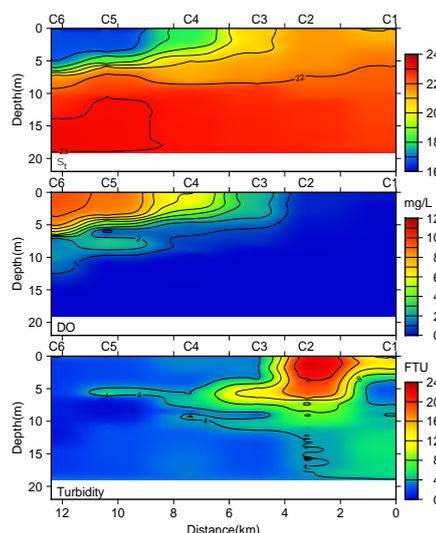
図(1)-2に、8/24における湾奥沿岸部表層での、DO、濁度、塩分、水温の分布を示す。高塩分・低水温、かつ低DO濃度の領域が広域に広がり、大規模な湧昇現象であったことがわかる。濁度の高い領域も低DO領域に一致し、大規模な青潮であったことがわかる。濁度の高さは目視による青潮の色の強度と一致し、最も濁度が高かったのはC2地点であった。船上からは、C2とC3中間地点に青白く変色した青潮水塊のフロントが確認された。

図(1)-3に千葉航路沿いで観測された水質の鉛直断面を示す。湾奥側ほど表層で貧酸素化・高密度化・高濁度化しており、底層の無酸素水塊がC2～C3の中間付近で湧昇し青潮となっていることが確認された。高濁度の中心はC1ではなく、C2地点表層付近であり、C3では水深6m付近で高濁度のピークが見られた。濁度の極大域は、ほぼ同じ密度をとる領域であり、無酸素水塊の中心ではなく、酸素の供給がある密度界面近傍である。

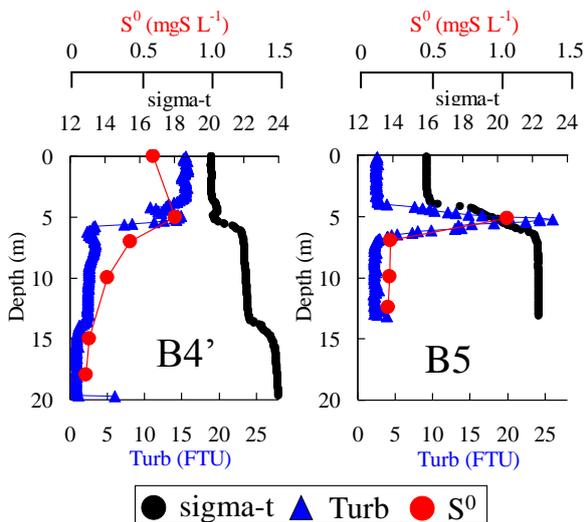
8/24における単体硫黄濃度を調べた結果の一例を図(1)-4に示す。躍層以浅と躍層以深の単体硫黄の濃度は、躍層以浅の方が高く、その濃度は0.5～1 mgS/Lだった（図(1)-4左）。また、B5地点の測定結果から、密度躍層上に単体硫黄が蓄積していることも分かった（図(1)-4右）。さらに濁度計（JFEアドバンテック社製AAQ）の値ともよい相間を示し、濁度の極大層と濃度が高い層が一致したことから、青潮発生時の濁度の由来は単体硫黄であり、また濁度センサーの値から単体硫黄の値も推定可能であることが示された（図(1)-5）。このことは、濁度計を用いれば、青潮やそれを構成する単体硫黄の空間的な分布を容易に把握できることを意味し、青潮前後における硫黄の化学動態の3次元的な把握が効率よく行えることを示唆する。



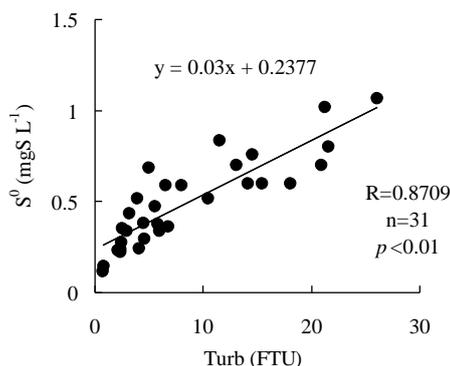
図(1)-2 8/24の青潮形成時における表層水質分布 (a) DO, (b)濁度, (c)塩分, (d)水温(図中の丸印は観測点)



図(1)-3 千葉航路(C線)での水質縦断面分布 (上:α, 中:DO, 下:濁度)



図(1)-4 単体硫黄(S⁰), 密度(sigma-t)及び濁度の鉛直分布



図(1)-5 単体硫黄濃度と濁度の相関

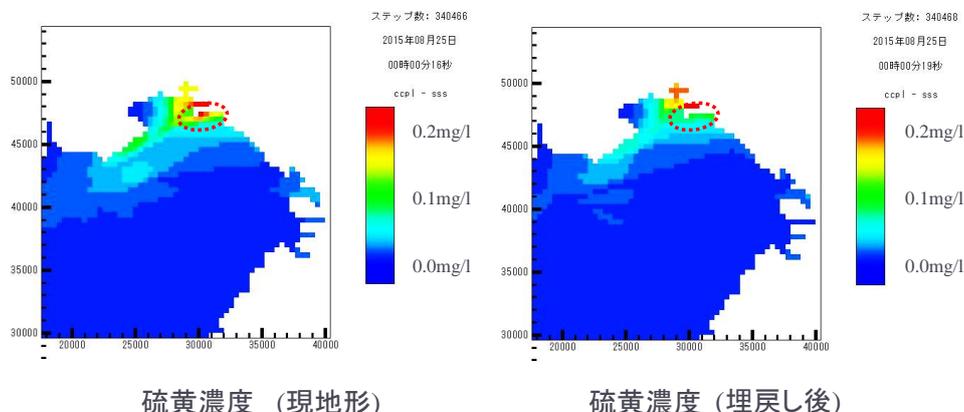
船上観測により、青潮の発生のみならず、湧昇後の青潮水の挙動についても重要な知見を得ることができた。湧昇した青潮水塊は連吹している離岸風によって表層水と混合しながら沖側に流される。その際、青潮水塊は混合によって密度がやや軽くなるため、元の水深帯に戻るのではなく、中層(密度成層の上部)に貫入し沖側へ流出していく(図(1)-3における濁度分布を参照)。

単体イオウ粒子は化学的に安定であり、比較的長寿命に存在して濁度として検出可能である。従来の知見では、青潮の目視による解消と、単体イオウの(硫酸イオンまでの)酸化による消滅が同一視されていたが、今回の観測により、海表面から青潮が消滅した後も単体イオウを含む水塊は高濁度水となって中層付近に存在し続ける可能性があると言える。過去の青潮発生時前後においても、しばしば水質自動観測地点の中層で高い濁度が観測されている。このように、自動水質観測の濁度データは、青潮水の物理的な輸送や単体イオウ等の化学的な動態解析にきわめて有効に活用できることが示唆された。

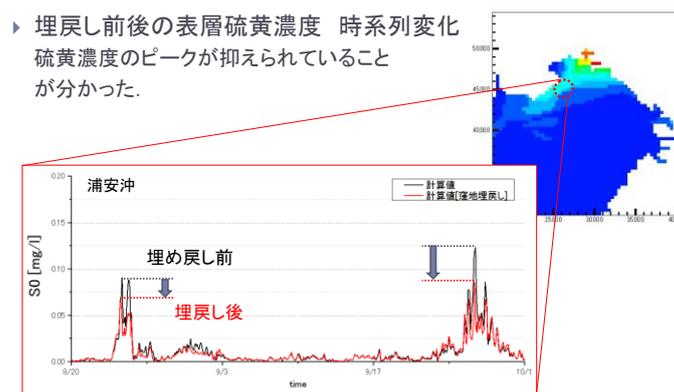
・生態系モデルを用いた、青潮等による影響軽減策の提案と評価

本研究では、最も規模の大きい幕張沖窪地を対象に、埋め戻しをしたケースの青潮軽減効果を調べた。現地形と幕張沖窪地埋め戻し後について、最も単体硫黄濃度域が広がった時点での面的な分布形状を比較すると、窪地埋め戻しによって単体硫黄が生じる領域は減少しているがそれほど顕著ではない。これは、対象とした青潮が窪地による寄与がそれほど大きくなかったことを示唆している(図(1)-6)。

しかしながら、固定点、例えば浦安沖での時系列の単体硫黄濃度変化を調べると、その効果は最大濃度時点で差が大きく、2度現れた濃度極大値は埋め戻し後には約2/3程度に減少していることがわかる(図(1)-7)。生物へのリスクは単体硫黄よりは溶存硫化物、特に分子状硫化水素であるといわれている。硫化水素の存在はpHより推定可能であり、サブテーマ(3)の成果と組み合わせることで青潮の生物影響軽減効果を評価できる。なお、本計算結果から、窪地と平場、航路はそれぞれ独立というよりも、互いに連動して水塊移動を行っている可能性が見出された。この点に関しては、今後更なる調査が必要である。



図(1)-6 幕張沖窪地が存在する現状のケース(左図)と埋め戻したケース(右図)における最大青潮発生時の表層単体硫黄濃度の比較



図(1)-7 浦安沖における現状ケースと埋め戻したケースの表層単体硫黄濃度の比較

最後に、研究分担機関の結果もあわせて、東京湾、三河湾にふさわしい貧酸素・青潮影響の軽減策を取りまとめると以下ようになる。

東京湾に対して、規模の大きい窪地の埋め戻しが重要であるほか、埋め戻しに至る過程においては、密度の軽い流体の導入による循環流の促進が効率的である。また、航路端部を起源とする青潮の頻度が高いことから、三河湾の場合も含め、鉄剤散布による底質改善が有効であると考えられた。その場合、鉄による硫化物溶出抑制効果を持続させるため、適宜高酸素濃度の水を供給する必要があると考えられる。さらに三河湾の場合には、生態系モデルによる青潮予報システムを高精度化することにより、三河湾全体のアサリ資源を支える六条潟のアサリ稚貝を早期に回収するシステムが有効であると考えられる。さらに、モデルとともに既存のモニタリングブイの有機的な活用が有効である。

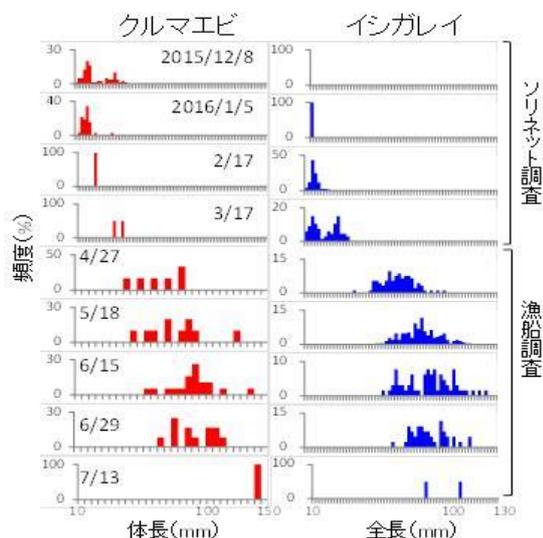
(2) 三河湾における貧酸素および硫化物が魚介類の生息および再生産に与える影響解明

全湾及び湾奥部における調査から、貧酸素水塊の進行に伴って底生性魚介類の個体数及び現存量が大きく低下し、湾奥部ではそれらの分布域が消滅していたこと、また、貧酸素水塊に対する応答は各分類群で異なること、貧酸素化が本格化する前の渥美湾奥部には底生性魚介類が豊富に分布し、特にクルマエビやイシガレイなどの重要水産資源が若齢期の生育場として高度に利用していることが明らかとなった(図(2)-3、4)。

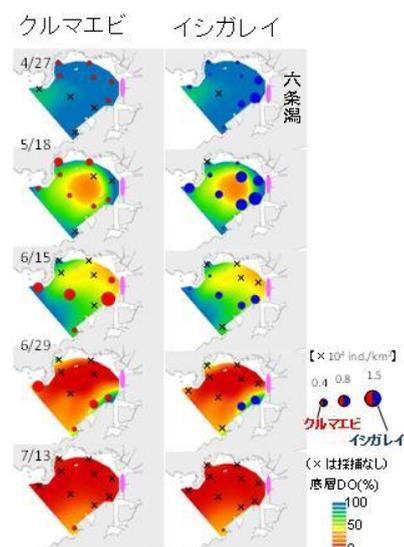
湾奥部ではわずかに残された干潟域が魚介類の初期生活史の場として機能し、沖合を含めて若齢期の生育場となるが、沿岸開発に伴う直立護岸や大規模な航路・泊地が数多く存在し、かつ逃避場として機能する有効な浅海域が少ないことにより、貧酸素化の進行に伴って多くの魚介類が逃避できずに死滅し、生活史が遮断さ

れているものと考えられた。

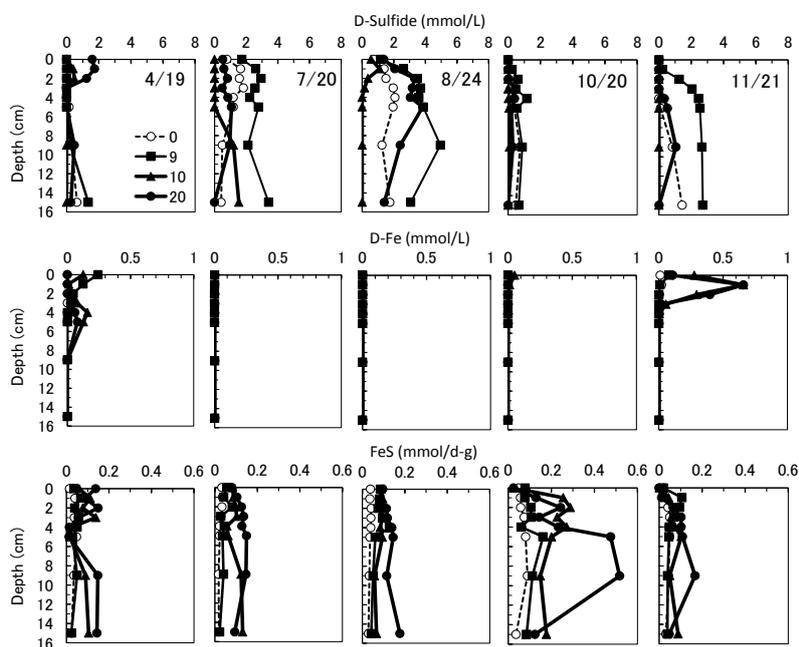
干潟上の水質及び流動場の連続観測から、六条潟では貧酸素水塊の湧昇が頻発していることが明らかとなり、約1週間程度の長期間にわたるDOの低下によって、マクロベントス現存量が大きく減少し、アサリの大量へい死が認められた。六条潟では台風接近等の気象イベントを契機として青潮が発生し、その後、小潮期に入るなど静穏環境を必要条件とした上で、干潟上生物のへい死の連鎖により干潟上で高濃度の硫化水素が生成され、アサリ稚貝の大量へい死を引き起こしている可能性が考えられた。航路・泊地における動物プランクトンの鉛直分布は底層の貧酸素化により制限されることが明らかとなり、水柱全体の動物プランクトン現存量の低下に貧酸素化が直接的もしくは間接的に影響していると考えられた。



図(2)-3 クルマエビ及びイシガレイの体サイズ組成



図(2)-4 クルマエビ及びイシガレイの分布と底層DO



図(2)-5 各測点 (○: 測点0、■: 測点9、▲: 測点10、●: 測点20) における溶存硫化物(上段)、溶存態鉄(中段)、硫化鉄(下段)の鉛直分布

湾央及び航路・泊地の底泥中における溶存硫化物と鉄の動態調査において、春季から夏季にかけて、底泥中で発生した溶存硫化物の一部は溶存態鉄により硫化鉄として捕捉され、溶存態鉄による発生抑制効果が認められたものの、溶存態鉄の枯渇に伴い、底層水中へ溶出していることが明らかとなった(図(2)-5)。また、秋季から冬季にかけては、硫化鉄は徐々に酸化され溶存態鉄となり、翌夏再び溶存硫化物の発生抑制に寄与することが示唆された。

(3) 貧酸素及び硫化物に対する浅海域の魚介類の応答(国立環境研究所)

・東京湾における貧酸素水塊、底生生物群集および硫化水素濃度の時空間的変動

東京湾の貧酸素水塊と硫化水素、および底生生物群集の時空間的変動を明らかにするため、内湾部に4定点を設定し、2014～2016年の夏～秋季に月1回の水質・底質調査および試験底曳を行った。貧酸素水塊は、2014年および2016年においては6月から10月、2015年には6月から11月まで湾奥～中央部の広範囲にわたって発生が認められた。底生生物の個体数密度、重量および多様性指数は湾北部で低く、湾中央部から南部にかけて高い傾向にあった。特に、湾北部は夏季に無生物域となり、貧酸素水塊が縮小および解消する10～11月以降に当年生まれの新規年級群の加入による生物相の回復が認められた。

不攪乱柱状採泥器により採取した底泥試料について、酸揮発性硫化物(AVS)濃度、強熱減量および含水率を測定した結果、いずれも湾北～中央部で高く、湾南部で最も低い値が観測された。

海底直上水(海底表面から5cmおよび10cm)および底質(海底表面から5 cm層まで)の硫化水素濃度を測定した結果、底質の硫化水素は貧酸素水塊が発生する夏～秋の湾奥～中央部で検出され、深い層ほど濃度が高い傾向が認められた。一方、湾南部では硫化水素濃度は湾奥～中央部と比べ、硫化水素濃度は著しく低かった。

海底直上水への硫化水素溶出の有無を明らかにするため、底泥試料採取時に不攪乱柱状採泥器のコア上部を密閉するための改良を施した蓋を作製し、2016年にコア試料の直上水の硫化水素濃度を測定した。9月の湾奥部の直上水で0.1～0.8 mg/lの濃度の硫化水素を検出した。この結果は、東京湾北部海域における底泥から海底直上水へ硫化水素の溶出が生じていることを示唆する。

・アサリおよびヨシエビの生活史初期個体の硫化水素耐性

貧酸素化により底泥より発生、または沿岸に湧昇した青潮水に含まれる硫化水素がアサリ幼生・稚貝に及ぼす生態影響を調べるため、硫化水素が底棲生物の初期生活史段階の生残に及ぼす影響を調査するための実験系を構築した。そして、室内における24時間の硫化水素曝露実験により幼生・稚貝の斃死を引き起こす硫化水素濃度を調査した。野外採集によるアサリ成貝を用いて飼育水槽内で人工授精を行い、得られた受精卵から孵化した幼生(D状期、アンボ期、フルグロウン期)および稚貝について硫化水素耐性を調査した。24時間曝露実験の結果、アサリ生活史初期における硫化水素耐性は、孵化後の発達にともない増強し、フルグロウン期から稚貝にかけて非常に強い硫化水素耐性を獲得すると推察された。また、生残率は水温上昇および硫化水素濃度増加にともない低下すると考えられた。

一方、野外採集による個体を用いた予備実験においては、稚貝の成長にともない硫化水素耐性が減弱する傾向が観察された。今後、人工孵化による種苗を育成して硫化水素実験を行い、稚貝の成長にともなう硫化水素耐性の減弱が生じるかどうか確認する必要がある。

また、稚貝について、より長時間の硫化水素曝露、および間欠的な硫化水素曝露の影響を調べるため、48時間連続、および48時間間欠(24時間硫化水素曝露後に、空気曝気した海水における24時間の回復期間を経て、再度24時間の硫化水素曝露を実施)の曝露実験を行った。48時間連続曝露の生残率は24時間連続曝露よりも低く、曝露時間が長くなると生残率が減少することが示された。一方、48時間間欠曝露では、48時間連続曝露した場合に比べ、各硫化水素濃度の生残率は高い結果となった。このことは、硫化水素への曝露が中断された場合、個体が回復し、硫化水素への再曝露に耐えることができるようになる可能性があることを示唆する。

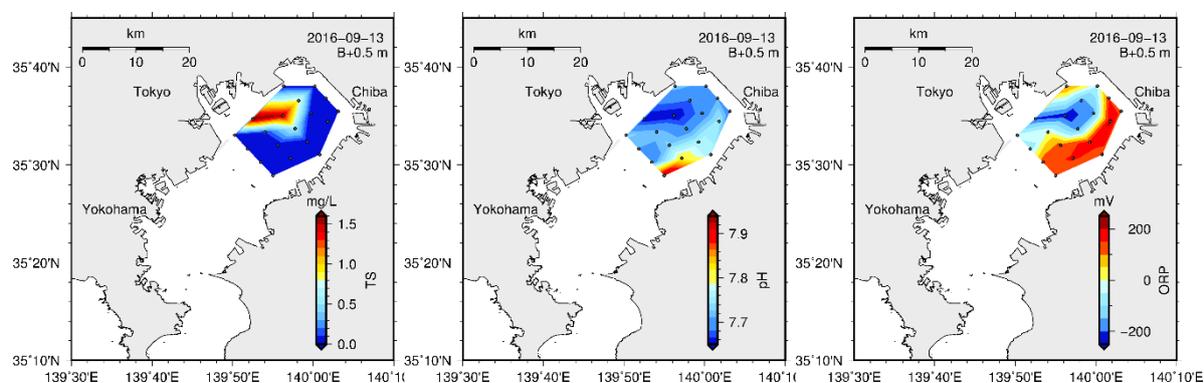
硫化水素がヨシエビ幼生・稚エビに及ぼす生態影響を調べるため、室内における1時間の硫化水素曝露実験により幼生(ノープリウス期、プロトゾエア期、ミス期、ポストラバ期)および稚エビの斃死を引き起こす硫化水素濃度を調査した。ノープリウス・プロトゾエアは貧酸素区での生残率は高く、硫化水素濃度0.1 mg/lでも50%以下ながら生残する個体が存在した。一方、0.2 mg/l以上の硫化水素曝露で供試個体全数が斃死した。ミス、ポストラバ、稚エビでは、貧酸素区および全ての硫化水素区で全数斃死した。水塊交換完了直後に、通気対照区では遊泳・歩行していたが、貧酸素・硫化水素区では底面に沈降して動かず、1時間後に取上げて観察したところ、個体が既に斃死または瀕死(腹肢痙攣、臓器細動→24時間以内に斃死)の状態にあった。

以上より、ヨシエビは成長にともない貧酸素・硫化水素耐性が減弱する傾向にあることが明らかとなった。ノープリウス、プロトゾエアでは貧酸素耐性があるものの、1 mg/l未満の低濃度の硫化水素が加わることで斃死率が大きく上昇した。東京湾における硫化水素濃度の観測において、湾奥部の海底直上水で0.1-0.8 mg/lの硫化水素が検出されていることから、本実験で生残率の著しい低下がみられた濃度範囲の硫化水素に実海域で遭遇し大量斃死が生じることも有り得る。また、今回のアサリ・ヨシエビの一連の実験により、硫化水素耐性は種によって大きく異なることが示された。比較的貧酸素耐性が高いと考えられているヨシエビにおいて、低濃度の硫化水素曝露により著しい生残率低下が認められたことより、青潮の来襲にともなう貧酸素・硫化水素曝露によって、棲息する生物種の多くにおいて大量斃死が生じるものと推察される。今後、青潮が生態系に及ぼす影響をより詳細に定量化するため、他種の貧酸素・硫化水素耐性についての知見を獲得・集積する必要がある。

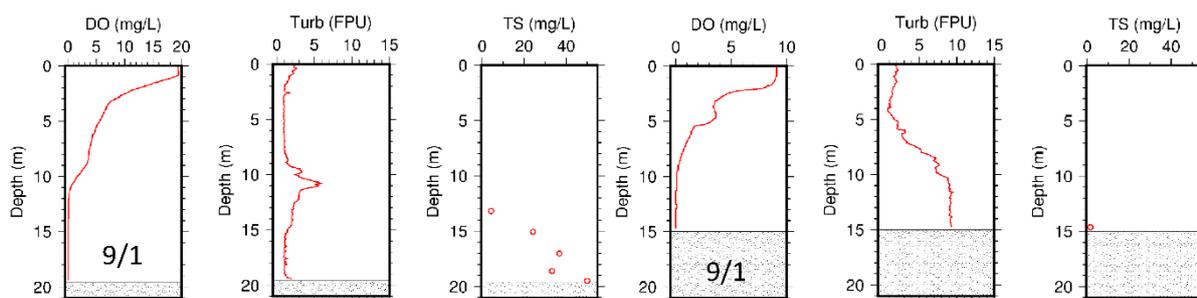
(4) 東京湾の貧酸素・硫化物分布に関する実態調査

2014年度および2015年度の平場底層水中において硫化物が観測された測点は非常に少なく、値も0.1mg/L程度と低かった。本研究における平場観測では2016年9月13日に最も高濃度の硫化物が観測された。この年は8月17日に通過した台風7号の強風により、貧酸素水塊の規模が縮小し、その後9月13日の観測時まで貧酸素水塊が発達したものと考えられる。図(4)-1にこの9月13日の平場における全硫化物(TS)、pH、酸化還元電位(ORP)の平面分布を示す。浦安沖の平場底層において、最大1.62mg/Lの全硫化物濃度が観測され、ORPの鉛直分布からその層厚は約3.5mであり、その層上端では濁度のピークが見られた。これは硫化物が酸化的環境に曝露することでイオウ粒子が析出したものと考えられる。この硫化物発生域ではpHが低下し、ORPが負値を示す傾向が見られ、これは既往の知見と整合している。

浚渫地においては、2015年の夏季に極めて高い硫化物濃度が観測された。図(4)-2に幕張沖浚渫地(左)と浦安沖浚渫地におけるDO、濁度、および全硫化物濃度の鉛直分布を示すが、全硫化物に着目すると、幕張沖浚渫地の下層では50mg/Lを越える値が観測されており、これは既往の知見と比較しても極めて高い値である。一方、浦安沖浚渫地の全硫化物濃度は幕張沖より1オーダー以上低い値となっており、この傾向は他の観測においても見られ、両浚渫地の規模の相違を反映したものと考えられる。幕張沖浚渫地では無酸素水塊の上端付近で濁度の極大域が見られ、平場と同様に硫化物の酸化に伴うイオウ粒子の析出が起こっているものと推察される。一方、無酸素水塊中の濁度は高くなく、濁度から読み取れる情報は限られている。

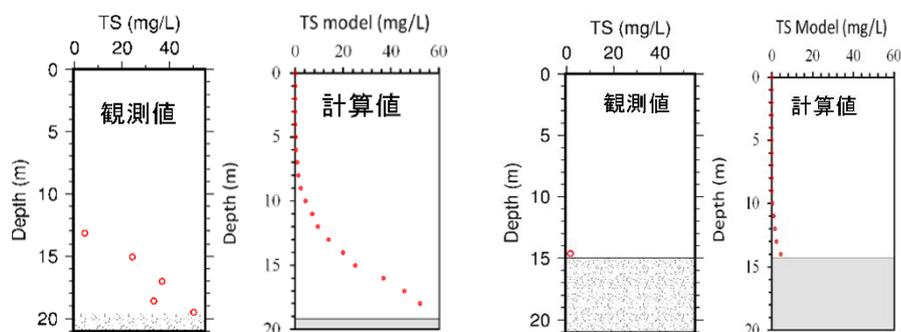


図(4)-1 2016年9月13日における平場の海底直上水中(B+0.5 m)の全硫化物(TS), pH, ORP



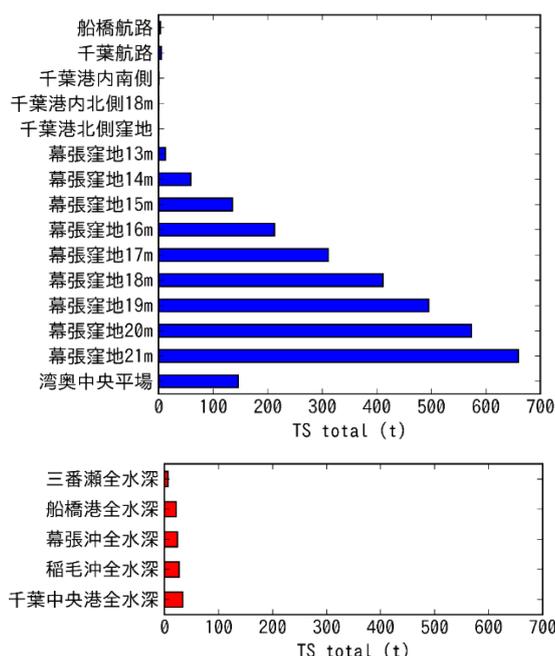
図(4)-2 幕張沖浚渫地(左)と浦安沖浚渫地(右)における、2015年9月1日の溶存酸素濃度(DO), 濁度(Turb), 全硫化物(TS)の鉛直分布

次に数値予測システムを用い、2014年1月から2015年12月までを対象として、時別の気象データ、日別の河川流量等を境界条件として与えることで、硫化物を含む無酸素水塊を主な対象とした再現計算を行った。図(4)-3に2015年9月1日の、幕張沖浚渫地と浦安沖浚渫地の水柱における全硫化物濃度の観測値と計算値の比較を示す。計算値は概ね観測値と整合しており、幕張沖と浦安沖の浚渫地における全硫化物濃度のオーダーの相違が十分に再現されていると判断される。



図(4)-3 2015年9月1日の幕張沖と浦安沖の浚渫窪地における全硫化物濃度の観測値と計算値の比較

観測結果および数値計算結果を総合し、平場、浚渫窪地、航路、および泊地における硫化物総量の見積を行った結果を図(4)-4上段に示す。同図中の幕張沖浚渫窪地の値は、湧昇する水塊の最大深度毎にまとめたものとなっている。この結果から、硫化物総量としては、幕張沖浚渫窪地の値が大きく、次いで湾奥中央平場の値が大きいという結果となった。浚渫窪地の硫化物は夏季には恒常的に存在しているのに対し、湾奥中央平場では間欠的な発生であり、あまり発達しない年も多いものと推察される。このことは、浚渫窪地における発生源対策が現実的かつ有効な手段であることを示唆している。図(4)-4下段には三番瀬をはじめとする、青潮発生海域における硫化物総量のポテンシャル(実際には酸化され大部分がイオウ粒子になると考えられる)を推算した結果を示す。これらの結果は、三番瀬等の各青潮発生海域における青潮発生時のイオウ総量は、無酸素水塊発生域におけるイオウ総量の内、浚渫窪地内の無酸素水塊上層や湾奥中央平場の硫化物総量と同程度のオーダーとなっており、浚渫窪地の硫化物総量の削減が有効であることをあらためて示唆するものと考えられる。



図(4)-4 無酸素水塊発生源別の硫化物総量の見積(上段)と青潮発生海域別の青潮時の硫化物および硫化物の酸化で生成される単体イオウを合わせたイオウ総量ポテンシャルの見積(下段)

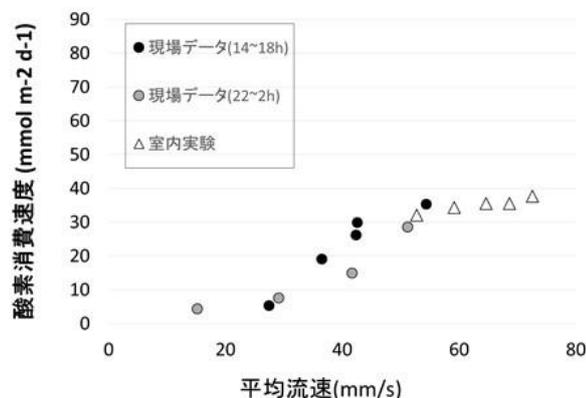
(5) 貧酸素・硫化物の蓄積過程の解析と実験

酸素消費速度と平均流速の関係について、現地解析結果と室内実験結果との比較を図(5)-2に示す。渦相関法による現場解析結果と室内実験の結果とでは平均流速において重なる範囲が少なかった。しかしながら、現場解析結果と室内実験結果の関係性はおおむね一致した。これらの結果から、生化学的なパラメーターのみならず、物理的なパラメーターについても考察対象とできる室内実験系が確立されたと判断した。

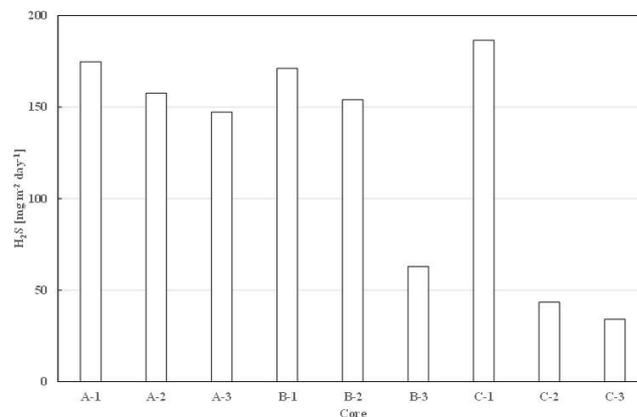
鉄材の添加については、無添加のコアと比較して約73~79%減少した(図(5)-3)。この結果から硫化水素を沈殿・除去し、溶出抑制するための適切な鉄添加量および有効な含鉄資材が示された。この効果の長期継続性などについて検討課題は残るが、鉄は安価な材料として入手可能であることから、

経済的な底質改善手法として有望である。今後詳細な研究開発が望まれる。

また、東京湾奥での高濃度酸素水供給期間中の堆積物CODの変化量をもとに、CODを1(mg/g乾泥)減少させるのに必要な日数を算出した。さらに堆積物のモデル化において、生化学的な数理モデル化を行いサブテーマ(1)のモデル改良に資する知見を得た。



図(5)-2 室内実験及び現場渦相関法による酸素消費速度測定結果の比較



図(5)-3 鉄添加による硫化水素溶出速度抑制効果
無添加(A-1~A-3),

純鉄粉: 0.4, 0.8, 1.6×10^{-3} g cm⁻²添加(B-1, B-2, B-3)

水酸化第二鉄: 0.7, 1.4, 2.6×10^{-3} g cm⁻²添加(C-1, C-2, C-3)

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究により、無酸素水塊中への溶存硫化物の蓄積、水塊の湧昇とその前後での単体硫黄の生成、青潮の生成と解消、という非定常性の強い青潮に関する一連の過程と全体像をはじめ捉えることに成功し、その過程における硫黄動態を明らかにすることができた。青潮という着色現象の構成主体である単体硫黄が、湧昇の前後に密度成層界面に存在していること、青潮の初期には湧昇前にすでに生成していた単体硫黄が青潮水を構成する場合があることをはじめ定量的に示した点は、従来の青潮現象に対する科学的理解を書き換えるものであると同時に、対策に関する多くの示唆を与える。

現場での魚介類の分布調査結果は、同時に実施された底層溶存酸素濃度計測結果とあわせて、忌避行動を含む、従来の魚介類貧酸素耐性に関する乏しい科学的知見を補完し、保全対象とすべき具体的な生物群(魚介類)の目標D0レベルを決定するための科学的根拠を与える。

特に、三河湾湾央及びデッドゾーンで発生する貧酸素水・溶存硫化物の干潟域への湧昇現象を把握し、底生性魚介類資源の応答、干潟の生息場の重要性が明らかとなった。また、底泥中の溶存硫化物、溶存態鉄、硫化鉄の実態把握から、鉄による硫化物発生抑制が示唆された。以上より、漁獲対象生物への影響評価の定量化及び生物被害改善策の構築が可能となった。これらの知見により、内湾性魚介類が生活史の一部として利用する干潟・藻場生態系が保たれ、健全な物質循環の持続性に繋がる手法を提案できた。

貧酸素や青潮影響の軽減策を考える上では、発生源対策がまず不可欠であるが、本研究では主要な発生源である、湾奥中央平場、浚渫地、および航路における硫化物を含む無酸素水塊の発生規模を明らかにした。中でも、平場における硫化物濃度のモニタリングは対象海域が広範囲にわたることから困難であったが、本研究では近年発達してきた、公的機関によるリアルタイムモニタリング結果を活用することで、効率的な把握が可能となることを示した。また、浚渫地では、幕張沖と浦安沖に存在する、規模の異なる2つの浚渫地を対象とした調査を行うことで、浚渫地の規模が硫化物濃度の大小に普遍的な影響を与えることを明らかにした。

また、これまでに正確な測定が困難であった水・堆積物海面における酸素や硫化物の輸送フラックスに関して、渦相関法と現場コア法の比較がなされ、流動等の物理的影響についても定量的に考察可能な測定精度の高い実験系が確立された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

船橋市漁業協同組合が事業主体となり、千葉県および船橋市の補助金を得て、東京湾三番瀬における青潮対策として、水流発生装置を用いた青潮軽減対策に関する取り組みが2016年度から3カ年の予定で開始されている。これは、東京湾における青潮対策としては初めての本格的な行政支援による取り組みであり、その中では、

無酸素水塊の発生源の特定と青潮の発生経路、および青潮発生時の水流発生装置による無酸素水塊の低減効果の予測に基づく、水流発生装置の効果的な配置と規模の検討が必要となっている。研究分担者の東京大学は、本研究成果をベースとして、本取り組みに当初より協力し、無酸素水塊の発生源および発生経路に関する助言を行うと同時に、本研究で開発している無酸素水塊予測システムに水流発生装置の機能をモデル化して組み込み、水流発生装置の貧酸素水低減効果予測や水流発生装置の規模と配置の最適化に関する検討に活用することで、本取り組みの実装に貢献している。

<行政が活用することが見込まれる成果>

環境省は2016年3月に、湖沼や閉鎖性海域における水質の生活環境項目に関して、これまでのCODを中心とした体系を修正し、新たに底層D0濃度を追加した。現在、東京湾や琵琶湖を対象として、保全対象とすべき具体的な生物群（魚介類）の選定とそれらの目標D0レベルの設定、さらには海域の類型化に向けた議論が行われている。また、あわせて将来の貧酸素対策に資する技術に関するレビューが行われている。本研究の成果は、現在進行中のこれら行政課題に直接活かされるべきものである。

まず、本研究で得られた各生活史段階における底生性魚介類の生息状況は、底層溶存酸素量基準の類型指定を行う際に必須の情報として利用される見込みである。現場での魚介類の分布調査結果は、その場で同時に実施された底層溶存酸素濃度計測結果とあわせて、従来の魚介類貧酸素耐性に関する乏しい科学的知見を補完し、保全対象とすべき具体的な生物群（魚介類）の選定とそれらの目標D0レベルを決定するための科学的根拠を与える。

また、具体的な貧酸素水塊対策の考え方や技術の適用について、本研究で提案した様々な既存技術の評価と新たなアイデアは、生態系モデルという評価ツールとあわせて今後の具体的な対策メニューの検討に活かされるべきものである。特に本研究で構築した、硫化物を含む無酸素水塊予測システム－生態系モデル－（東京大学、横浜国立大学）は、貧酸素や青潮の対策を検討する際に有用なツールとなるものと確信する。特に、浚渫窪地の規模の大小が硫化物濃度の高低や無酸素水塊規模に与える影響について、周年スケールでの再現が可能となっていることから、浚渫窪地の埋め戻しの程度が青潮影響の軽減に与える影響といった、小規模な対策を検討する上でも有用なツールとなり得るものと考えられる。

また、D0濃度の低下よりもさらに毒性の大きい硫化水素の影響については、中央環境審議会等においても重要性が認識されながら、環境基準改定作業では議論されていない。これをどう評価するかが今後の大きな課題とされているが、この点に関しても本研究の成果が活かされる。干潟・藻場のような、浅く生物生息に適した環境への貧酸素水塊や青潮の来襲は、生物生態系に大きなインパクトを与えているが、D0欠乏が原因か、あるいは硫化水素による影響が大きいのかは依然として不明であり、本研究はこれらの課題解明に向け、まず基礎となるイオウの形態のうち、硫化物イオン（溶存硫化物）、単体硫黄を簡易に区分できる方法を見出したことから、次年度以降の発展と環境政策への貢献が期待できる。あわせて本研究により室内実験で効果を検証できた鉄剤散布による溶出抑制技術は、現地へただちに適用するにはまだ検討すべき課題を残しているものの、経済的な硫化物溶出抑制手法として、今後の検討が望まれる。

あわせて環境モニタリングという観点では、本研究の成果の発展形として、従来から水質モニタリングに使われていたセンサー類の新たな使用方法を提案する。つまり、濁度を単体硫黄の指標として、またさらにpH及びORPを溶存硫化物の存在範囲の指標として活用することは、無酸素水塊周辺での溶存硫化物・単体硫黄の連続的な環視を可能とする手法として、強く推奨できる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 山本修司、中村由行、鈴木崇之、田中陽二：硫黄の酸化反応を考慮した3Dモデルによる青潮の数値解析，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.71, No.2, pp.I_1279-I_1284, 2015.
- 2) 田中陽二、中村由行、伊藤比伽留、田中雄介、山本修司、鈴木崇之：船上調査と岸壁調査を組み合わせた東京湾湾奥部における青潮の現地観測，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.71, No.2, pp. I_1273-I_1278, 2015.
- 3) 佐藤文也，佐々木淳，佐野弘明，呉海鍾：東京湾奥部における硫化物を含む無酸素水塊の変動特性と数値再現，土木学会論文集B2(海岸工学)，71(2), I_1267-I_1272, 2015.
- 4) 田中陽二、比嘉紘士、中村由行、宇野佳朗、軽部智章、伊藤比伽留、管原庄吾、鈴木崇之：東京湾奥部における青潮の湧昇と中層流出現象の現地観測，土木学会論文集B2(海岸工学)，72(2), I_1759-I_1764, 2016.
- 5) 比嘉紘士、中村由行、田中陽二、管原庄吾、虎谷充浩、伊藤比伽留、鈴木崇之：濁度推定手法に基づく静

止海色衛星COMS/GOCIを用いた青潮分布の把握、土木学会論文集B2(海岸工学), 72(2), I_1759-I_1764, 2016.

- 6) 呉海鍾, 佐々木淳, 佐野弘明: 東京湾奥部における柱状採泥に基づく有機汚濁底質の時空間堆積特性, 土木学会論文集B2(海岸工学), 72(2), I_1291-I_1296, 2016.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 和久光靖: 三河湾における環境修復の現状と課題—太平洋側の事例—、平成26年度日本水産学会中部支部大会、2014.
- 2) 中村由行・伊藤比伽留・田中雄介・田中陽二・山本修司・鈴木崇之: 2014年8月の東京湾奥部における青潮イベントの観測、第49回日本水環境学会年会講演集、2015.
- 3) 山本修司・中村由行・鈴木崇之・田中陽二: 硫黄の酸化反応を考慮した3Dモデルによる青潮の数値解析、第49回日本水環境学会年会講演集、2015.
- 4) 伊藤比伽留、中村由行、田中雄介、田中陽二、山本修司、鈴木崇之: 東京湾奥部における航路を発生源とした青潮イベントの観測、第52回環境工学研究フォーラム、2015.
- 5) 曾根亮太・和久光靖・山田智: 三河湾における底生性魚介類の分布と環境、愛知県水産試験場研究発表大会、2015.
- 6) 曾根亮太・和久光靖・山田智: 三河湾におけるデッドゾーンの実態とその解消に向けて、第9回海の再生全国会議、2015.
- 7) 和久光靖: 三河湾における環境修復の現状と課題、全国アマモサミット2015inくまもと・やつしろ、2015.
- 8) 曾根亮太・和久光靖・山田智・石田俊朗・鈴木輝明: 三河湾における貧酸素水塊と底生性水産資源の時空間分布、水産海洋学会、2015.
- 9) 和久光靖: 三河湾奥部の干潟・浅場における貧酸素水塊・苦潮による生態系被害とその回避策の検討、水産海洋学会地域研究集会—第11回伊勢・三河湾の環境と漁業を考える—、2015.
- 10) 曾根亮太: 三河湾における貧酸素水塊と底生生物資源の時空間変動、水産海洋学会地域研究集会—第11回伊勢・三河湾の環境と漁業を考える—、2015.
- 11) 佐藤文也・佐々木淳・呉海鍾: 東京湾奥部における無酸素水塊の時空間分布、第28回日本沿岸域学会研究討論会、水戸市、2015.
- 12) 伊藤比伽留、比嘉紘士、田中陽二、宇野佳朗、軽部智章、鈴木崇之、中村由行、管原庄吾: 定点での連続観測により捉えた青潮発生前後の水質変動、第50回日本水環境学会年会、2016.
- 13) 田中陽二、比嘉紘士、伊藤比伽留、中村由行、鈴木崇之、宇野佳朗、軽部智章、管原庄吾: 東京湾奥部における2015年8月に発生した青潮の船上観測、第50回日本水環境学会年会、2016.
- 14) 比嘉紘士、中村由行、田中陽二、伊藤比伽留、鈴木崇之: 東京湾における3次元モニタリングによる青潮・貧酸素水塊の挙動に関する考察、第50回日本水環境学会年会講演集、pp.520、2016.
- 15) Higa H, Sugahara S, Tanaka Y, Nakamura Y, Ito H and Suzuki T: Development of Sulfur Estimation Model for Monitoring of Blue Tides by COMS/GOCI in a semi-Enclosed Water Area, The 4th Asian/13th Korea-Japan workshop on ocean color (4th AWOC/13th KJWOC), Thailand, pp.34, 2016.
- 16) Kodama K, Akatsuka T, Waku M, Sone R, Ishida T, Horiguchi T. Ontogenetic changes in tolerance to hypoxia and hydrogen sulfide during the early life stages of manila clam *Ruditapes philippinarum*. 8th International Conference on Marine Pollution and Ecotoxicology. O-47. University of Hong Kong, Hong Kong, June 2016.
- 17) Kodama K, Waku M, Sone R, Ishida T., Akatsuka T, Horiguchi T. Effect of hypoxia and hydrogen sulfide on the survival of manila clam *Ruditapes philippinarum* during the early life stage. The 7th Bilateral Seminar Italy-Japan "Physical and Chemical Impacts on Marine Organisms: Emerging Hazards and Strategies for Saving the Oceans. Minamiboso-Tomiura Royal Hotel, Minamiboso, Japan. November 2016.
- 18) 呉海鍾, 佐々木淳, 佐野弘明: 東京湾奥部の柱状採泥に基づく有機汚濁底質環境分析に関する研究, 第29回日本沿岸域学会研究討論会, 高知市, 2016.
- 19) 佐々木淳, 呉海鍾: 東京湾奥部における無酸素水塊規模の推定に関する検討, 第29回日本沿岸域学会研究討論会, 高知市, 2016.
- 20) Sasaki, J.: Strategies and policies towards environmental and fisheries restoration in Tokyo Bay, 12th Int. Conf. Coasts, Ports and Marine Structures, Tehran, Iran, 2016. (基調講演)

- 21)Higa H: Development of sulfur estimation model for monitoring of blue tides using satellite remote sensing in Tokyo Bay, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission 2016,Tokyo Chiyodaku-Hitotsubashi, Japan 2017.
- 22)宮下寿哉、中村由行、比嘉紘士、田中陽二:現地観測に基づいた東京湾湾奥部における貧酸素水塊形成および湧昇現象の考察、第51回日本水環境学会年会講演集、pp.170, 2017.
- 23)伊藤比伽留、中村由行、比嘉紘士、田中陽二:3D モデルによる青潮の数値解析とその対応策の検討、第51回日本水環境学会年会講演集、pp.169, 2017.
- 24)児玉圭太、曾根亮太、宮脇 大、石田俊朗、和久光靖、赤塚徹志、堀口敏宏. 硫化水素がアサリ生活史初期個体の生残に及ぼす影響. 平成29年度日本水産学会春季大会. 1187. 東京海洋大学品川キャンパス、2017.
- 25)藤原裕次、井上徹教、古泉統義、田村圭一、中村由行、鈴木崇之. 底泥への鉄資材添加による硫化水素除去能の検討、第51回日本水環境学会年会講演要旨集、p175, 2017.

7. 研究者略歴

課題代表者:中村 由行

東京大学大学院修了、工学博士、現在、横浜国立大学大学院教授

研究分担者

1) 鈴木 崇之

横浜国立大学大学院修了、現在、横浜国立大学大学院准教授

2) 蒲原 聡

名城大学総合学術研究科修了、学術博士、現在、愛知県水産試験場漁業環境研究部長

3) 曾根 亮太

三重大学生物資源学部卒業、愛知県水産試験場漁業環境研究部主任、現在、愛知県農林水産部水産課主任

4) 堀口 敏宏

東京大学大学院修了、博士(農学)、現在、国立環境研究所環境リスク・健康研究センター室長

5) 児玉 圭太

東京大学大学院修了、博士(農学)、現在、国立環境研究所環境リスク・健康研究センター主任研究員

6) 佐々木 淳

東京大学工学部卒業、横浜国立大学教授、現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科教授

7) 井上 徹教

九州大学工学部水工土木学科卒業、九州大学大学院工学研究院助手、現在、港湾空港技術研究所グループ長

5-1404 人工構造物に囲まれた内湾の干潟・藻場生態系に対する貧酸素・青潮影響の軽減策の提案

(1) 生態系モデルの改良とモデルによる現地地形及び保全策後の変化解析

国立大学法人横浜国立大学

都市イノベーション研究院 都市地域社会専攻

中村 由行・鈴木 崇之

研究協力者

横浜国立大学都市イノベーション研究院

比嘉 紘士

東京都市大学工学部都市工学科

田中 陽二

島根大学大学院総合理工学研究科

管原 庄吾

平成26～28年度累計予算額：13,916千円（うち平成28年度：4,675千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、東京湾ならびに三河湾での現地観測によって青潮に至る溶存酸素や硫化物動態を詳細に調べ、干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮影響を軽減するための、発生源対策及び青潮回避策を提案し、具体的な対策効果の定量化を行った。

そのために、まず、東京湾・三河湾における青潮発生時の水質・底質に関する資料解析を行い、主要な青潮発生源として、航路、窪地、人為的な改変を受けていない平場に区分し、可能な発生源対策の候補となる技術をレビューした。発生源のうち、知見に乏しい航路を主たるターゲットとした現地観測を実施した。東京湾において青潮を確実に捕捉できる観測体制を考案し、岸壁からの観測と航路周辺を中心とした船上観測を実施し、青潮の主要構成物質である単体イオウを中心に、青潮発生前後における酸素や硫黄動態に関する知見を得ることができた。本研究による新たな成果として、青潮発生前から単体イオウが密度成層界面近傍に集積していること、濁度が単体イオウ濃度の良い指標となることを見出し、濁度を時空間的に追跡することで、青潮の発生から消滅に至る過程を通して、現地海域での貧酸素・青潮曝露実態を把握することができた。これらの現場海域での知見や、他機関が実施した海底境界層近傍での硫化物蓄積過程に関する成果を基に既存の生態系モデルを改良し、貧酸素水塊や青潮の形成過程を再現し、かつ対策効果を評価することができる生態系モデルを構築した。青潮インパクトを軽減するための対策として、特に窪地の埋め戻しに着目し、埋め戻し前後における貧酸素・硫化物濃度と暴露時間の変化解析を行った。それらの結果と生物影響実験結果を統合し、各対策による生物資源量の損傷回避効果を定量化した。その上で、三河湾及び東京湾それぞれにふさわしい手法の組み合わせを提案した。

[キーワード]

貧酸素水塊、青潮、生態系モデル解析、硫黄循環、対策技術

1. はじめに

東京湾奥部や三河湾東部海域には、三番瀬・谷津干潟や六條潟などの貴重な干潟・藻場や浅海域が存在し、開発が進んだ現在でも水産有用種や野鳥などの高次の生物生産を支え、さまざまな生態系サービスをもたらしている。このような干潟・藻場生態系にとって、現在最も大きな脅威となっているのは貧酸素水塊や青潮の来襲である。しかしながら特に青潮は貧酸素水塊の湧昇現象であり、気象擾乱によって突発的に生じ、しかもしばしば大規模であるため、周辺の関連研究は多いもののその予測技術の進展は遅れ、実効ある有効な対策はなされていない。青潮対策が遅れている理由は科学的知見の不足にもあり、青潮の生物影響という観点からは酸素濃度の低さよりもむしろ青潮水塊に含まれる硫化物が重要であるという指摘があるにもかかわらず、硫化水素を主体とした硫化物が生物群集に与える影響や、環境中での硫化物の蓄積機構はほとんど調べられていない。このような現状を考慮すると、まず現場海域において貧酸素水塊や青潮イベントに関する詳細な観測を行って、干潟等の生態系がさらされる水質の実態を把握することが必要である。その上で、干潟・藻場生態系干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮影響を軽減するため、貧酸素水塊が発生する場での対策とともに、それらの来襲を受ける干潟・浅海域での青潮回避策を実効性のあるものとして構築することが喫緊の課題であるといえる。

2. 研究開発目的

本研究全体の課題として、東京湾ならびに三河湾での現地観測によって青潮に至る硫化物動態を詳細に調べるとともに、室内実験によって海底境界層近傍の硫化物蓄積過程ならびに生物へのインパクトを調べる。これらの成果を統合し、干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮影響を軽減するため、発生源対策及び青潮回避策を提案し、具体的な諸対策効果の定量化を行うことを目的とする。

そのため本サブテーマにおいては、まず、東京湾における青潮発生時の水質・底質の資料解析を行い、主要な青潮発生源の区分と青潮インパクトの軽減策のうち、可能な発生源対策をとりまとめる。貧酸素水塊の湧昇や青潮イベントの発生源のうち、特にこれまで知見の少ない航路を中心とした現地観測を東京湾について行い、青潮発生前後における酸素や硫黄動態に関する知見を得るとともに、現地浅海域での貧酸素・青潮曝露実態を把握し、生物影響をもたらす物理・化学的要因を解析する。これらの現場海域での知見を基に、貧酸素水塊や青潮の来襲による生物・生態系影響を評価するツールとしての生態系モデルを構築する。本モデルを用い、青潮インパクトを軽減するための対策ごとに、貧酸素・硫化物濃度と暴露時間の変化解析結果と生物影響実験結果を統合し、各対策による生物資源量の損傷回避効果を定量化する。その上で、三河湾及び東京湾それぞれにふさわしい手法の組み合わせを提案する。

3. 研究開発方法

(1) 貧酸素・青潮発生源対策として可能な現状技術のレビュー

研究初年度においては、貧酸素や青潮インパクトの軽減策のうち、主として発生源対策（貧酸素水塊の湧昇や青潮イベントが発生する源と推定されている場の貧酸素・硫化物発生を軽減する対策）に的を絞り、これまで行われてきた技術の文献レビューを行い、現状で可能性のある対策

群の候補を選ぶとともに、それらの対策前後での貧酸素化・硫化物生成量の違いを表現するために必要な数理解析手法としての生態系モデルの改良点を挙げることにした。さらに、これらの諸対策やそのモデルによる評価方法を俯瞰し、事前検討で欠けていた研究開発要素を特定することとした。

(2) 数理モデル検証のための、航路を発生源とした青潮の観測

従来研究のレビューにより、今までの知見に欠けていた、青潮発生時のイオウの動態と成分に関する情報の蓄積が必要であることが見出された。そのため、東京湾奥部での青潮発生時を中心とした現地観測を行うこととした。

現地観測は、可能な限り確実に青潮を捕捉するため、東京湾奥部3 地点での岸壁に沿った高頻度観測（岸壁調査）と、船上からの観測（船上調査）を並行して実施した。さらに、青潮の空間的挙動の把握を行うため、衛星リモートセンシング及び高所からのビデオ連続撮影による青潮の把握調査も合わせて実施した。

1) 岸壁観測と船上観測

観測データをできるだけ集積するため、研究3カ年度にわたって毎年ほぼ同じ趣旨の現地観測を実施した。岸壁調査の観測場所は、2014年は千葉みなと（Stn. 1, 水深3m）、検見川浜（Stn. 2, 水深7m）、市川塩浜（Stn. 3, 水深0.5m）の3 地点としたが、2年目以降はStn. 1及びStn. 2の2箇所とした。一方、船上調査は千葉航路および湾奥部の沿岸付近を面的に観測した（図(1)-1）。船上観測地点は、B4地点についてのみ変更し、2014年は幕張沖窪地周辺の平場、2年目以降は同窪地内で実施した。

岸壁調査は、2014 年の場合には8/18～9/5 に週3 回程度、青潮発生時にはほぼ毎日実施した。2015年以降もほぼ同様である。船上調査はいずれの年も計4 回行った。岸壁調査では総合水質計による観測を実施し、船上調査では総合水質計と硫化物センサーによる計測を行うとともに、貧酸素層周辺から採水して栄養塩・硫化物濃度・単体イオウ濃度の分析を行った。

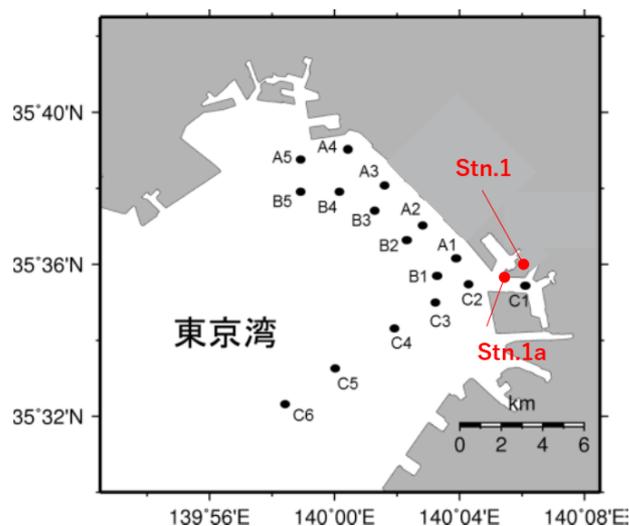
2) 単体硫黄 (S^0) の定量手法

単体硫黄 (S^0) の定量手法の一つに、Bartlett and Skoogの方法¹⁾がある。この手法は2段階の反応を利用して単体硫黄を定量する手法である。まず、単体硫黄を含む有機溶媒にシアン化ナトリウムを加えてシアノリシス化反応によりチオシアン酸イオンを生成させ、次に、塩化第二鉄95%アセトン溶液を加えるとチオシアン酸鉄が生成する。しかし、試料中に硫化水素等の還元物質が共存すると第二鉄の一部が還元され、測定結果が過小評価になる恐れがある。また、試料中の単体硫黄を抽出する有機溶媒には石油エーテルやn-ヘキサンがあるが、これらは疎水性のため水分を含む試料では抽出効率が下がる。そこで、本研究ではBartlett and Skoogの方法¹⁾を基に、青潮発生時の海水中単体硫黄の濃縮・定量法を検討した。また、その改変法を用いて東京湾青潮発生時の海水中の単体硫黄を定量した。

分析試料としては、船上または岸壁から採取した海水試料を直ちにガラス繊維ろ紙（Whatman GF/F）でハンドポンプによって濾過し、アルミホイルにくるんでクーラーボックスに入れ、研究室に輸送して冷凍保存して分析に供した。

青潮発生時の単体硫黄は、海水中に分散している。そこで、北原式採水器等で海水を採水し、

メスシリンダーで一定量とり、GF/Fを用いて吸引ろ過を行った。青潮は硫化水素を含む水塊が一気に浅場に湧昇しておこる現象であり、青潮発生時には単体硫黄と硫化水素が共存する場合がある。そのため、ろ過を行うことで単体硫黄と妨害物質である硫化水素を分離することができた。ろ紙 (GF/F) 上にトラップされた単体硫黄の抽出には、n-ヘキサンと親水性有機溶媒の混合溶媒を用いることとした。これは、ろ過後のろ紙は水分を含むため、疎水性のn-ヘキサンのみでは水分が邪魔をして単体硫黄を完全に抽出できなかつたためである。また、水分を飛ばすためにろ紙を乾燥させると単体硫黄濃度が減少した。これは、加熱により単体硫黄が変化したことが示唆された。このことから、湿ったままのろ紙から単体硫黄を抽出することとした。



図(1)-1 岸壁及び船上観測地点 (2016年の例)

3) 衛星リモートセンシング及びビデオ撮影による青潮の空間的挙動の把握

青潮の空間的挙動については殆ど知見がない状態であったが、近年、静止海色衛星の打上げにより青潮の空間分布を捉えることが理論的には可能となった。本研究では、青潮発生中に実施した現地観測により、青潮の光学的特性を明らかにした上で、静止海色衛星 COMS/GOCI による硫黄濃度推定に基づく青潮分布の簡易的モニタリング手法について検討した。現地観測は、大規模な青潮が発生した 2015 年 8 月 24 日を対象に、上述の船上観測地点において実施した。観測項目としては、上述の船上観測項目のほかに、上向き放射輝度(L_w), 下向き放射照度(E_s)を測定した。

COMS/GOCI の衛星画像は通常 GDPS によって大気補正が実施されるが、東京湾では、陸地に近い海域の一部がマスクされ青潮の分布が一部表示できないといった問題が指摘されていた。そこで本研究では、散乱の高い水域に有効とされる MUMM 大気補正を実施し、さらに衛星画像による R_{rs} の推定値を実測値により校正した。また、現地により測定した R_{rs} と硫黄濃度の関係から海色リモートセンシングのための硫黄濃度推定モデルを作成し、このモデルを青潮が発生した期間に取得された衛星画像に適用した。

ビデオモニタリングでは、Stn.1 に近接した千葉ポートタワー展望室から、ビデオカメラガーデンウオッチカム(CBR-GWC)を 2 台設置することにより、2015 年 8 月 24 日から 30 分おきに画像を取得した。

2) 現状の再現

表(1)-1 モデルの解析条件

メッシュ	水平：400m 鉛直：30層(-90m~5m)
乱流モデル	水平：SGSモデル 鉛直：Richardson数の関数
初期条件	$T=10$ $S=32$ $r=0$
湾口境界	水質：水温塩分は横浜技調S4データ ⁹⁾ ，栄養塩は年間通して全層一定，水位：布良の潮位データ(32分潮)(気象庁web ⁸⁾ ，流速：勾配0
河川境界	国交省水文水質データベース(web ¹⁰⁾)から江戸川，荒川，中川，多摩川，鶴見川，隅田川の流量(H-Q曲線)，水温(布川の自動観測)より推定，塩分はゼロ，栄養塩濃度は鈴木 ¹¹⁾ から算定
気象条件	風向風速：気象台(気象庁web ² ¹²⁾)，アメダス，海上観測所のデータを平面補間 その他：気温，日射，降水，気圧は東京気象台(気象庁web ² ¹²⁾)

表(1)-2 流動モデルのパラメータ

項目	設定値
時間刻み	60 [s]
コリオリパラメータ	8.5208×10^{-5} [s^{-1}]
水平方向の渦動粘性係数	SGS乱流モデル $C_s = 0.12$
水平方向の乱流シュミット数	0.9 [-]
水平方向のプラントル数	0.9 [-]
鉛直方向の渦動粘性係数	Munk-Andersonモデル $\nu_{v0} = 5.0 \times 10^{-4}$ [$m^2 s^{-1}$], $\alpha_d = -1$, $\beta_d = 5.2$
鉛直方向の渦動拡散係数	Munk-Andersonモデル $D_{v0} = 1.0 \times 10^{-4}$ [$m^2 s^{-1}$], $\alpha_d = -3/2$, $\beta_d = 10/3$
TVDスキーム	水平方向： $\kappa = 1/3$ 、鉛直方向： $\kappa = 1.0$
水面の摩擦係数	本多・光易 ¹³⁾
海底面の摩擦係数	0.0026 [-]
水面のアルベード	0.07 [-]

計算期間は、2015年1月1日～2014年9月30日を基本ケースとした。これは3カ年の調査期間のうち、2015年の青潮が最も規模が大きく、参照となる青潮イベント時の各種観測データが取得できたためである。あわせて2014年1月1日～2014年9月30日についても、比較のために実施した。

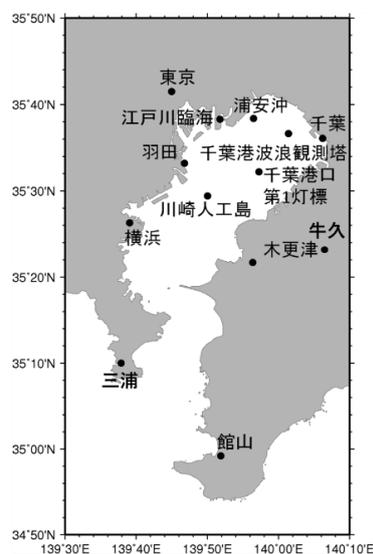
初期条件は最も近い冬季の観測値を基に全格子一様に与えた。

湾口境界の水位は布良の潮位データ⁸⁾を用いた。栄養塩は近傍の観測地点での観測値を基に全層一定で与えた。例えば水温、塩分、D0等の水質は横浜港湾空港技術調査事務所S4データ⁹⁾を用いた。2008年度から2010年度の観測データを平均して一般的な湾口境界水質として与えた。鉛直メッシュ各層ごとにデータを与え、湾口境界鉛直分布を考慮した(以上の具体的な値は省略)。

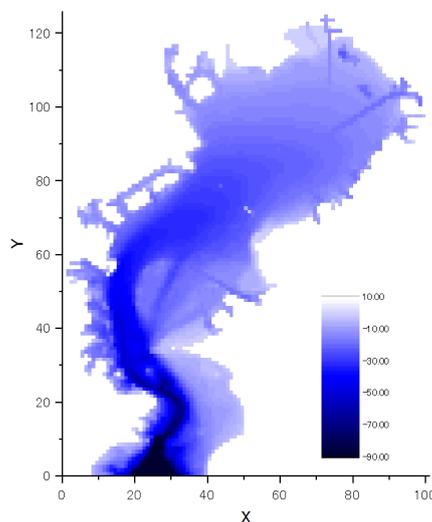
河川境界は、江戸川、荒川、中川、多摩川、鶴見川、隅田川の6河川を与えた。国土交通省水文水質データベース¹⁰⁾から各河川上流部の毎時水位を取得し、鈴木¹¹⁾を参考にH-Q曲線から流量を求めた。水温は布川の観測値を全河川に与えた。塩分は0とし、栄養塩量[ton/day]は鈴木¹¹⁾を参考に式(1.1)に示すL-Q式より算定した。

$$L = aQ^b \quad (1.1)$$

気象条件は、気温、日射、気圧は東京気象台の観測データ¹²を一様に与え、降水は千葉、横浜、館山、羽田臨海、船橋、木更津、三浦、牛久の観測値を平面補間して与えた（図(1)-3）。風向風速に関しては、降水量を求めた8か所の観測所に浦安沖、千葉港波浪観測塔、千葉港口第1灯標、川崎人工島の4か所を加えた12か所のデータ⁸)を用いて平面補間を行った。図(1)-3 に気象台、アメダス、海上観測地点の位置を示す。



図(1)-3 気象台、アメダス、海上観測地点の位置



図(1)-4 計算メッシュ

水平方向の計算メッシュは400m正方格子とし、101×126メッシュとした（図(1)-4参照）。流動モデルのパラメータおよび設定条件を表(1)-2に示す。

(4) 生態系モデルを用いた、青潮等による影響軽減策の提案と評価

1) 修復効果の評価－窪地の埋め戻し効果－

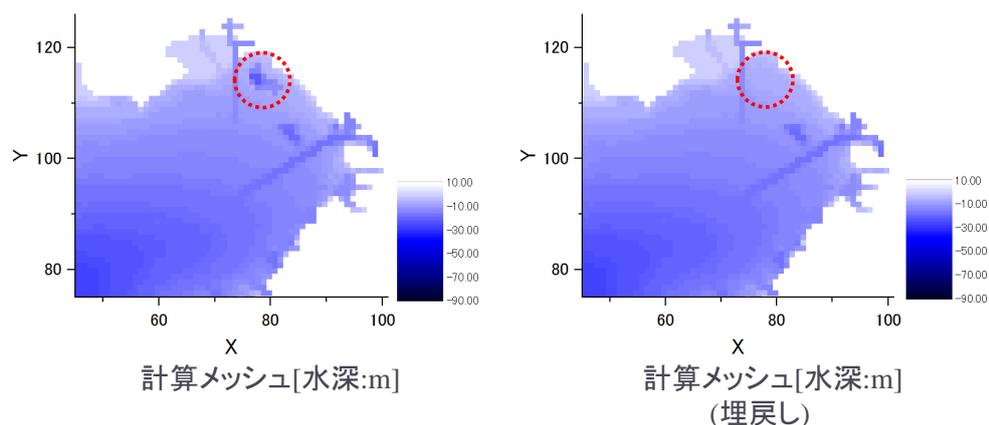
様々な貧酸素・青潮対応策が考えられる中で、ここでは、2015年の青潮イベントを対象とし、窪地埋め戻しの効果を調べた。まず、図(1)-5に幕張沖窪地が存在する現状と埋め戻しを行ったケースの海底地形を示す。これらの海底地形を与え、他は現状再現ケースと同様な解析をして青潮の軽減効果、すなわち表層の単体硫黄濃度分布の違いを調べた。

2) 三河湾及び東京湾への対策手法の提案

最後に、対策による生物資源量の損傷回避効果の定量化と、三河湾及び東京湾それぞれにふさわしい手法の組み合わせの提案を行う。

ここでは、サブテーマ(3)による生物の貧酸素・硫化水素の生物耐性試験の知見を基に、手順としての生物資源量の算定法を考案する。

最後に、現地観測結果に基づく各湾の自然環境や有用生物の分布、生産活動の実態の特性を考慮し、三河湾及び東京湾それぞれにふさわしい手法の組み合わせの提案を行う。



図(1)-5 幕張沖窪地が存在する現状のケース(左図)と埋め戻したケース(右図)の海底地形

4. 結果及び考察

(1) 貧酸素・青潮発生源対策として可能な現状技術のレビュー

発生源対策（発生源と推定されている場の貧酸素・硫化物発生を軽減する対策）として、以下の項目が挙げられた。本研究の直接の対象は東京湾及び三河湾であるが、今後本研究の成果がそれ以外の閉鎖性海域にも適用される可能性を考慮し、また将来的には社会経済的な条件が変化して取り得る対策メニュー変化する可能性があることから、現時点で多少とも可能性のある発生源対策は可能な限り検討することとした。

1) 発生源別の可能性のある対策

a. 窪地

窪地の埋戻しによる地形改変、曝気・高濃度酸素水等による酸素供給、温排水・外海水導入や噴流等による流動性の確保・維持

b. 航路・泊地

航路地形の改変、航路・泊地陸上側端部の流動性確保、曝気・高濃度酸素水等による酸素供給

c. 平場

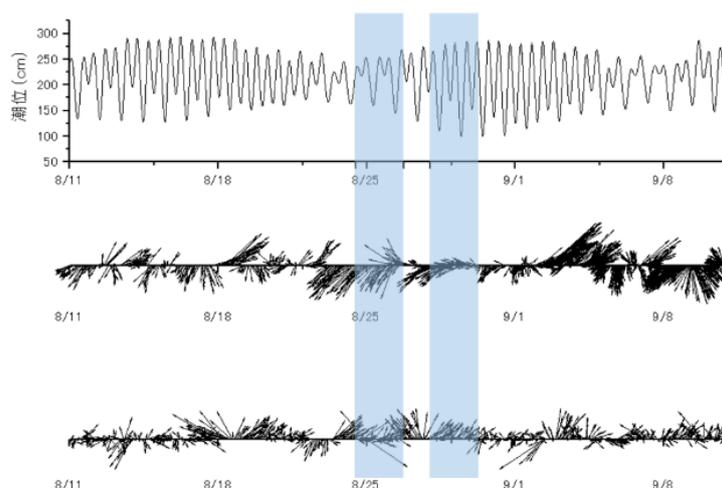
覆砂による有機泥の封じ込め、ベギアトア（硝酸蓄積性硫黄酸化細菌）の添加、スラグ等鉄材料の利用（硫化物吸着・硫酸還元菌活性の抑制）

(2) 数理モデル検証のための、航路を発生源とした青潮の観測

1) 2015年の青潮観測

3カ年の調査期間のうち、2015年の青潮が最も規模が大きく、かつ青潮形成時に船上の観測を実施することができたため、ここでは2015年の結果を中心にまとめ、必要に応じて多年度の観測の成果を補足的に述べる。

2015年の青潮は8/24から市原港，千葉中央港，稲毛～茜浜地先および船橋港内で発生していることが確認され，8/25には三番瀬漁場内の一部でも発生が確認された。千葉本港内での青潮は8/26ごろまで継続した。



図(1)-6 千葉灯標における2015年観測データ(上から潮位, 風況, 底層流況)。青色背景は青潮が確認された1回目の湧昇時及び2度目の湧昇時を示す。

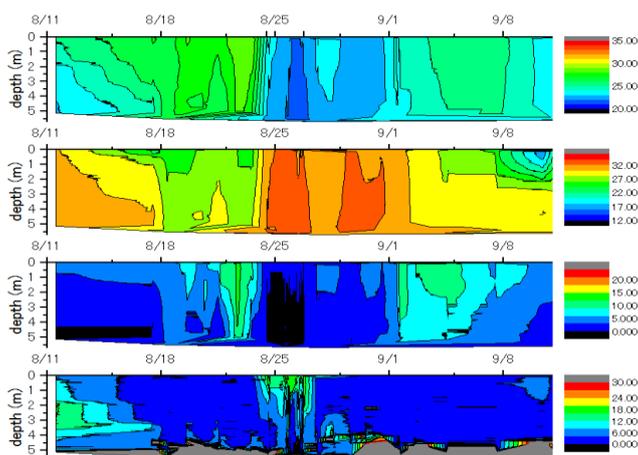
青潮発生前後の気象と潮位の状況を図(1)-6に示す。8/23の1:00ごろに南風から北東風へ転じ、その後は風速8~10m/s程度の北東風が連吹した。この北東風の連吹は太平洋沖を北上していた台風1516号が8/22に東京湾に最接近したあとの吹き戻しによるものである。したがって、東京湾奥部で広域に発生したこの時期の青潮は、台風の通過に伴う強い北東風の連吹により底層水塊が湧昇し、青潮に至ったものと考えられた。なお、青潮発生時の8/24は小潮であり、吹送流の影響が相対的に大きくなる時期であった。風は8/26以降弱まったが、その後8/28頃に再び北東風になると、底層流も再び北東方きが変わった。

a. 岸壁観測による結果と考察

岸壁調査による観測期間中には、Stn. 1(千葉港)において、海面が青潮特有の青白色に着色する現象が8/24から8/26頃まで確認された。Stn. 1では8/24から塩分上昇と水温低下が確認され、湧昇現象が示唆された。表層付近の濁度は、風向きが南東に変わる8/26まで大きく上昇しており、この期間は青潮が目視で確認された期間と一致した(図(1)-7)。風が弱まった8/26以降湧昇現象も弱まったが、8/28頃に再び北東風になると、Stn. 1では再度低水温・高塩分となり、強い湧昇現象が確認された。しかしながらこの二度目の湧昇では青潮には至らず、濁度も低いままであった。Stn. 1で採水した底層水は、一度目の湧昇時に硫化物イオンが検出されたものの、二度目の湧昇時には検出されなかった。これらのことにより、二度目の湧昇では硫化物イオンが十分に供給されなかったため、青潮に至らなかったと示唆された。

b. 船上観測の結果と考察

2015年度の船上観測では、4回実施した船上観測のうち8/24に実施した観測によって、同時期に発生した比較的大規模な青潮を、船上から三次元的に捉えることができた。そのため、ここでは8/24の観測結果を中心に紹介する。



図(1)-7 Stn.1千葉港での水質鉛直分布の時系列変化(上から水温, 塩分, D0, 濁度)

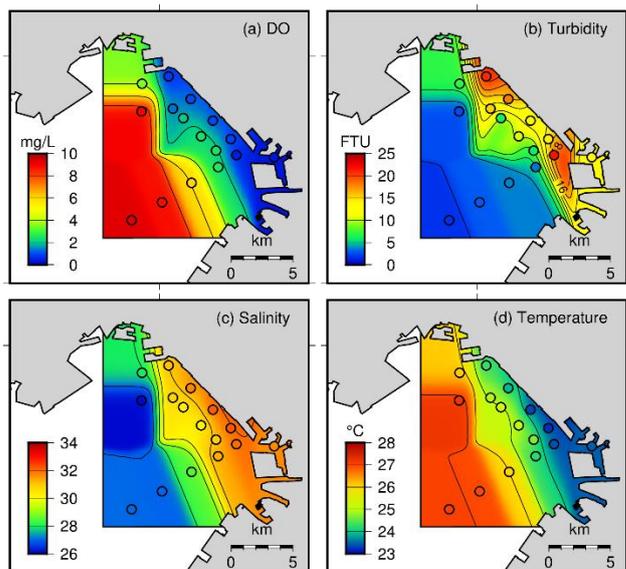
図(1)-8に、8/24における湾奥沿岸部表層での、D0、濁度、塩分、水温の分布を示す。高塩分・低水温、かつ低D0濃度の領域が広域に広がり、大規模な湧昇現象であったことがわかる。濁度の高い領域も低D0領域に一致し、大規模な青潮であったことがわかる。濁度の高さは目視による青潮の色の強度と一致し、最も濁度が高かったのはC2地点であった。船上からは、C2とC3中間地点に青白く変色した青潮水塊のフロントが確認された。

図(1)-9に千葉航路沿いで観測された水質の鉛直断面を示す。湾奥側ほど表層で貧酸素化・高密度化・高濁度化しており、底層の無酸素水塊がC2～C3の中間付近で湧昇し青潮となっていることが確認された。高濁度の中心はC1ではなく、C2地点表層付近であり、C3では水深6m付近で高濁度のピークが見られた。濁度の極大域は、ほぼ同じ密度をとる領域であり、無酸素水塊の中心ではなく、酸素の供給がある密度界面近傍である。

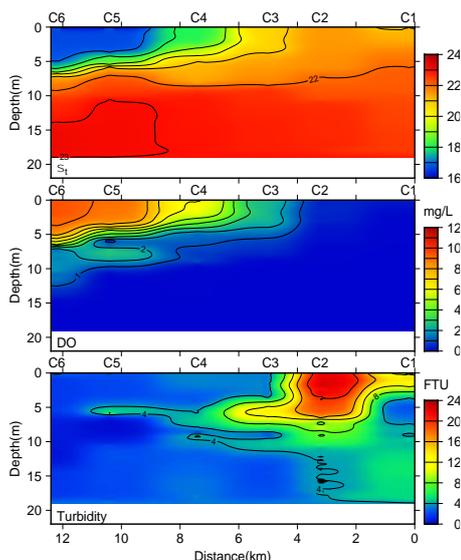
8/24における単体硫黄濃度を調べた結果の一例を図(1)-10に示す。躍層以浅と躍層以深の単体硫黄の濃度は、躍層以浅の方が高く、その濃度は0.5~1 mgS/Lだった(図(1)-10左)。また、B5地点の測定結果から、密度躍層上に単体硫黄が蓄積していることも分かった(図(1)-10右)。さらに濁度計(JFEアドバンテック社製AAQ)の値ともよい相間を示し、濁度の極大層と濃度が高い層が一致したことから、



写真(1)-1 2015年8/24、測点C2で観測された青潮の様子

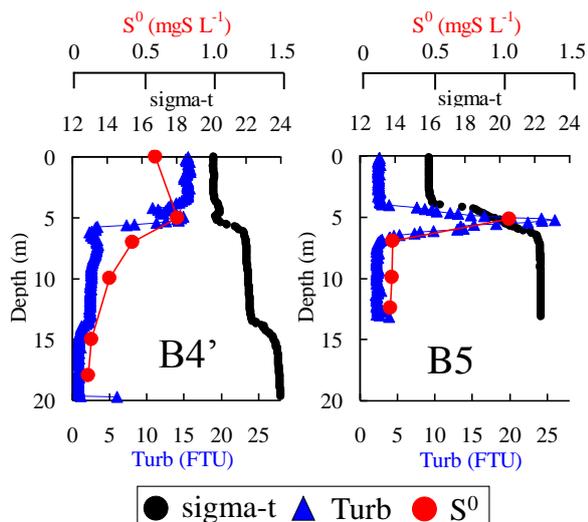


図(1)-8 8/24の青潮形成時における表層水質分布 (a) DO, (b)濁度, (c)塩分, (d)水温 (図中の丸印は観測点)

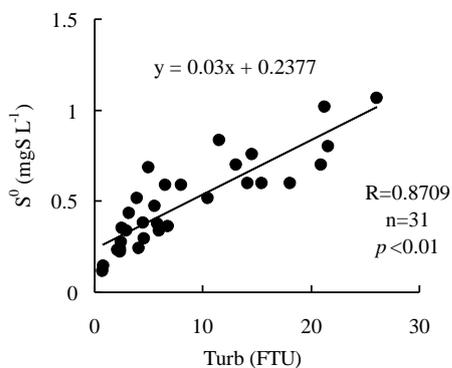


図(1)-9 千葉航路 (C線) での水質縦断面分布 (上: σ_t , 中: DO, 下: 濁度) ・単体硫黄の分布と濁度

青潮発生時の濁度の由来は単体硫黄であり、また濁度センサーの値から単体硫黄の値も推定可能であることが示された (図(1)-11)。このことは、濁度計を用いれば、青潮やそれを構成する単体硫黄の空間的な分布を容易に把握できることを意味し、青潮前後における硫黄の化学動態の3次元的な把握が効率よく行えることを示唆する。



図(1)-10 単体硫黄 (S^0), 密度 (σ_t) 及び濁度 (Turb) の鉛直分布



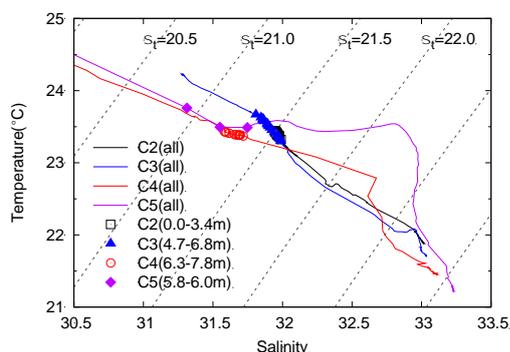
図(1)-11 単体硫黄濃度と濁度センサー値の解析には船上観測の結果のみ使用した。

c. 青潮に伴う水塊の移動と硫黄動態

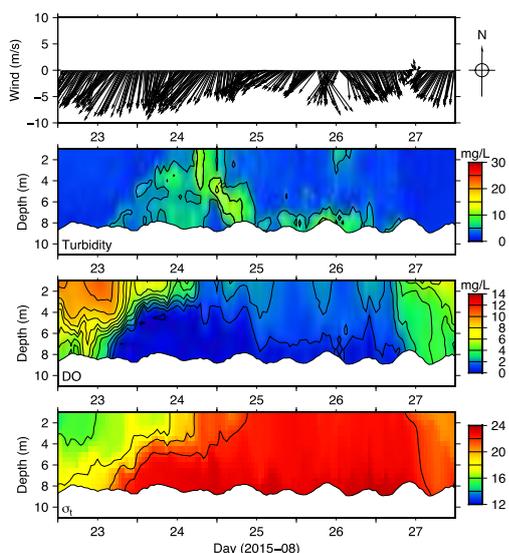
図(1)-10や図(1)-11に示したように、青潮形成時前後での濁度が単体硫黄濃度の代替指標として汎用性を持つならば、労力と時間を要する採水とその後の化学分析に頼らずとも、効率的かつ容易に単体硫黄の分布を推定できるようになり、硫黄動態に関する知見が大きく広がることになる。

東京湾にはモニタリングポストが複数存在し、濁度は標準的な観測項目の一つとして連続的に計測されている。そこで使われている濁度計のスペックは全く同じではないので、定量的な吟味は今後必要となるものの、これまであまり利用されてこなかった濁度データが、硫黄動態に広く利用できる可能性が出てきたことは、現象の解明に大きく貢献することが期待できる。ここでは、2017年の青潮発生時期前後における千葉波浪観測所での濁度の連続データを解析した例を紹介する。

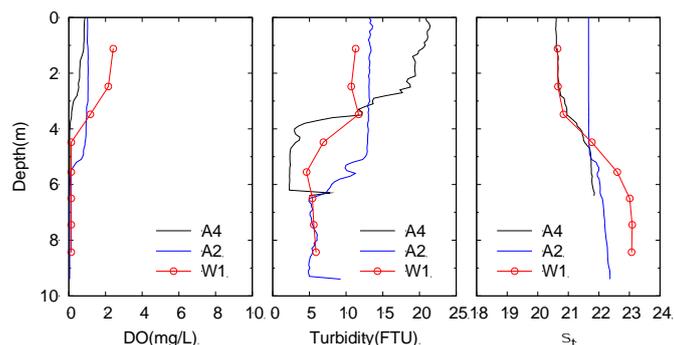
前述したように、千葉航路沿いの観測から、C2表層付近のみならずC3から沖側に中層高濁度水塊が見出された。これらの高濁度水塊が青潮由来であれば、それらとC2表層の青潮水塊の水温・塩分構成がほぼ同じになると期待される。一般に、時空間的な水塊の移動や混合は、TSダイアグラムで調べることが可能である。C2～C5の水塊についてTSダイアグラムで比較したところ、C2とC3およびC4とC5の高濁度水塊の水温・塩分構成がほぼ一致した（図(1)-12）。これより、C3の高濁度水塊はC2付近で湧昇した青潮由来の水塊と推定された。一方、C4～C5の高濁度水塊はC2～C3とは水温・塩分構成が少し異なることから、湧昇した青潮水塊それ自体ではなく、青潮水が周辺の水塊と混合して生成されたか、あるいは青潮発生以前に無酸素層上部で形成された高濁度層によるものと推定される。後者であれば、青潮発生前にも単体硫黄が密度界面近傍で高濃度に蓄積する可能性があることを意味する。青潮水塊が沖側へ流出するならば、自動水質観測装置でも青潮発生時に高濁度の水塊が観測される可能性がある。そのため、観測Bラインに近い千葉港波浪観測塔（W1）における水質観測結果を調べたところ、8/24～8/25に水深1.2～3.5mで10FTU以上の濁度が観測されていた（図(1)-13）。8/24の船上調査の結果と比較すると、W1（18:00観測）の水質鉛直分布は、表層で高濁度が観測されたA4（17:37観測）との強い類似性が見られた（図(1)-14）。これより、A4付近で湧昇した青潮水塊が沖側へ流出し、W1で濁度として観測したものと推定された。すなわち、自動水質観測地点の高濁度水塊は青潮由来であることが船上観測結果から裏付けられた。



図(1)-12 C2～C5のTSダイアグラム（実線は全水深データ，点は高濁度の水深



図(1)-13 W1（千葉港波浪観測塔）での青潮発生前後の水質変化（上から風況，濁度，DO，

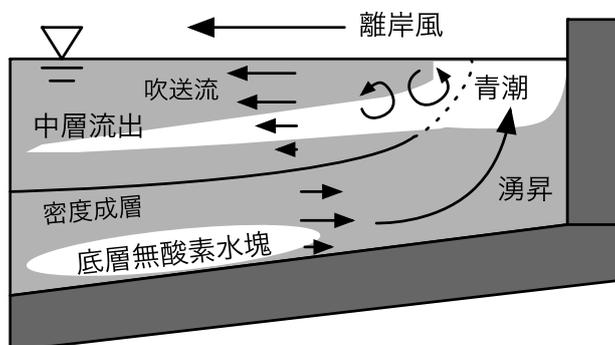


図(1)-14 8/24におけるA4(17:37), A2(16:52), W1(18:00)の水質鉛直プロフィール (左からDO, 濁度, σ_t)

同様のTSダイアグラムによる解析は2016年度における船上及び岸壁観測データについても行い、単体硫黄が湧昇前にも生成しており、青潮の発生初期にはその寄与が大きいことを示すことができた（その内容は、田中ら¹⁴⁾に詳しい）。

今回の船上観測により、青潮の発生のみならず、湧昇後の青潮水の挙動についても重要な知見を得ることができた。従来の知見では、一般的な吹送流効果による青潮の発生として、離岸風の連吹によって表層水が沖に流され、岸側の密度躍層が上昇し、底層水が表層に湧昇して青潮に至るとされている。今回の観測によっても、その基本的な機構は裏付けられた。のみならず、その後の青潮水塊の挙動は以下のように推測された。つまり、湧昇した青潮水塊は連吹している離岸風によって表層水と混合しながら沖側に流される。その際、青潮水塊は混合によって密度がやや軽くなるため、元の水深帯に戻るのではなく、中層（密度成層の上部）に貫入し沖側へ流出していく（図(1)-15）。

単体イオウ粒子は化学的に安定であり、比較的長寿命に存在して濁度として検出可能である。従来の知見では、青潮の目視による解消と、単体イオウの（硫酸イオンまでの）酸化による消滅が同一視されていたが³⁾⁴⁾⁵⁾、今回の観測により、海表面から青潮が消滅した後も単体イオウを含む水塊は高濁度水となって中層付近に存在し続ける可能性があると言える。過去の青潮発生時前後においても、しばしば水質自動観測地点の中層で高い濁度が観測されている（図省略）。このように、自動水質観測の濁度データは、青潮水の物理的な輸送や単体イオウ等の化学的な動態解析にきわめて有効に活用できることが示唆された。

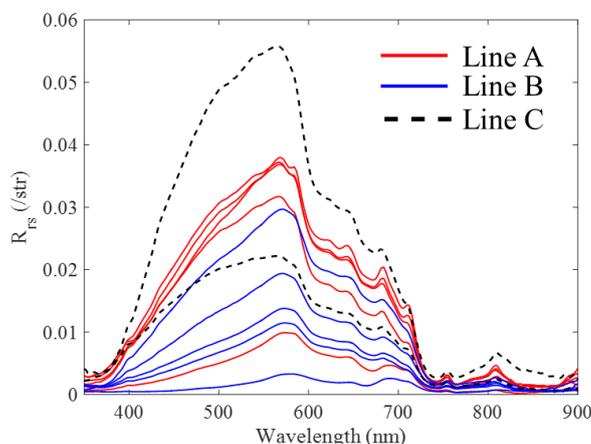


図(1)-15 青潮の中層流出の模式図

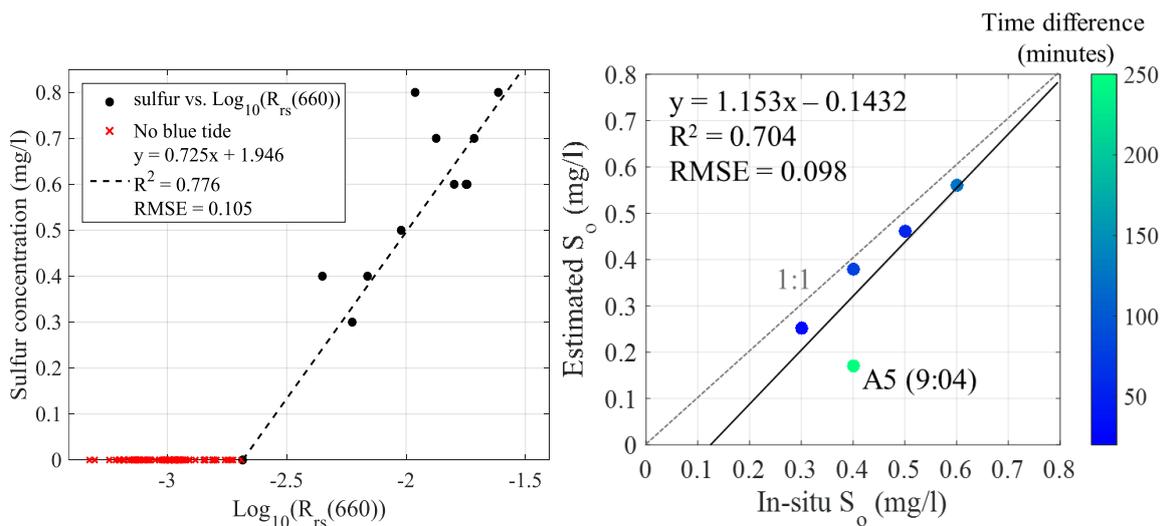
2) 衛星リモートセンシング及びビデオ撮影による青潮の空間的挙動の把握

a. 人工衛星リモートセンシングによる青潮分布の推定

衛星リモートセンシングにより青潮分布を推定するため、青潮が発生した2015年8月24日に、図(1)-1の観測地点において海面放射照度・輝度を測定し、青潮のリモートセンシング反射率(R_{rs})を把握した。図(1)-16にその結果を示す。青潮の光学特性として、 R_{rs} は570nmをピークに大きく上昇しており、青潮が発生していないときと比較して約5~8倍上昇する非常に強い散乱特性があることが分かった。そこで、 R_{rs} の実測値を使用して硫黄濃度を推定可能な波長帯を探索した結果、衛星の搭載バンドを想定した660nmの R_{rs} が最も硫黄濃度を推定可能であることが分かった。また、図(1)-17に示すように、青潮水が及んでいる箇所と及んでいない箇所を判別するため、2010年~2013年の定期光学観測により測定された R_{rs} の青潮が発生していないときの結果を使用し、硫黄濃度を0、 R_{rs} の最大値を基点としたモデルを作成した。これによって、青潮領域と非青潮領域の判別を可能とした。



図(1)-16 青潮発生時のリモートセンシング反射率

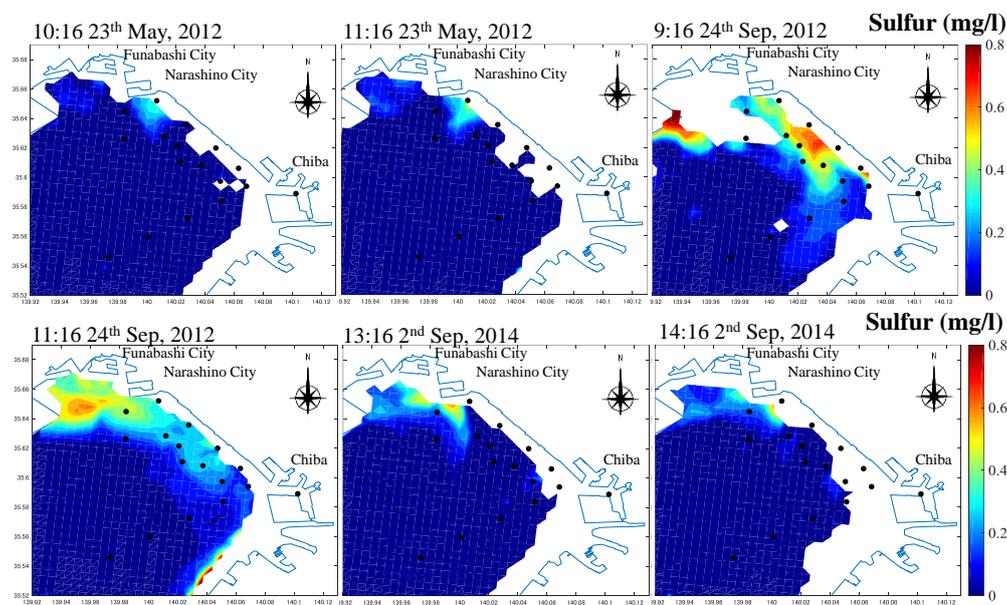


図(1)-17 R_{rs} (660)の対数と硫黄濃度実測値との関係(左図)、

図(1)-18 R_{rs} の静止海色衛星による推定値と現地により取得した実測値との関係(右図)

次に、現地観測を実施した2015年8月24日の衛星画像に対して高濁度の水域において有効であるMUMM大気補正を実施し、 R_{rs} の推定値を実測値により校正後、作成した硫黄推定モデルを適用した。陸域に近い観測点は雲の影響が大きかったため、沖側のB1～B4及びA5において硫黄の推定値と実測値を比較した。その結果を図(1)-18に示す。B1～B4においては、硫黄濃度が高精度に推定されていたが、A5は1:1のラインから外れた結果になった。これは、青潮分布の変動は大きく、観測開始時間と衛星の画像取得時間の差が大きいために分布が変化していたことが原因であったと示唆された。

さらに、千葉県環境研究センターの記録から東京湾における青潮の発生日について確認し、COMS/GOCIが打ち上げられた2010年以降の青潮発生時における衛星画像を取得した。衛星画像により青潮分布が捉えられていた日は、2012年5月23日、2012年9月24日、2014年9月2日であり、これらの日に得られた衛星画像に硫黄推定モデルを適用した。その結果を図(1)-19に示す。全ての画像から硫黄濃度が検出されており、青潮を空間的に推定できていることが分かる。特に2012年9月24日は大規模な青潮が発生していたと報告されており、分布の拡がりの大きさからその様子が確認できる。このように、青潮を硫黄濃度として空間的に推定することが可能となった。



図(1)-19 硫黄推定モデル適用結果

b. 定点カメラによる青潮分布の把握

千葉港内の青潮を捉えるため、千葉ポートタワー（北緯35度35分50秒、140度6分5秒）の展望台（高さ113m）にガーデンウォッチカム（CBR-GWC）を設置した。カメラモニタリングの結果、2015年8月24日発生した青潮及び2016年8月29日に発生した青潮が捉えられた。2015年の結果を図(1)-20に示す。2015年は30分インターバルでの撮影であったため、青潮の短期スケールのダイナミックな変動を連続的に捉えることが困難であったことが分かる。また約17分差の2台のカメラを見た場合においても青潮分布が途切れていることを考慮すると、青潮の空間的挙動を連続的に把握するには10分よりも小さいインターバルの撮影が必要であることが分かった。

2016年のモニタリングでは、1分インターバルで8:30～14:30まで撮影した。図には示さないが、

港湾内及び岸壁側から青潮が発生しており、湾奥側へと流れていく様子が確認できた。このときの潮位は、最干潮の48cmであり、潮汐流の影響は小さかったと考えると、青潮水の港から湾奥への流れは、千葉における8月27日14:00から29日まで連吹していた北東及び北北東の風が影響していたと考えられる。また、2016年8月29日の青潮は比較的小規模であったため、港内を完全に覆うことなく、ほぼ港内及び岸壁側からの起源と推測される青潮水塊が湾奥へ流れていた状況がモニタリングされていた。このように、連続的な青潮の空間的な挙動を捉えるためには1分インターバル程度の高頻度の撮影が必要であることが見出された。



図(1)-20 2015年8月24日4:38～12:08の青潮モニタリング結果

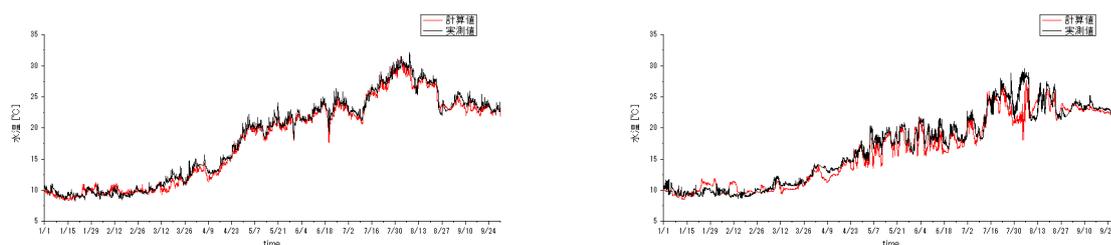
(3) 対策前後の貧酸素化・硫化物生成量の違いを表現する数理的手法の開発

前述したように、2015年夏期にはプロジェクト期間中最も大規模な青潮が発生し、青潮発生タイミングで船上観測を行ってさまざまな環境データを取得することができた。そのため、生態系モデル解析においては、まず2015年の現象再現解析を行った。さらに、対策の一例として窪地埋め戻し効果を2015年の条件を基に調べた。

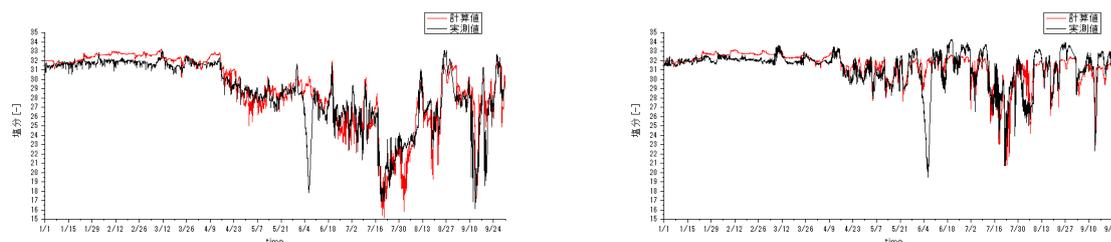
1) モニタリングポストデータとの比較

東京湾内では、浦安沖、千葉港波浪観測塔、千葉港口第1灯標、川崎人工島の4地点で水質連続観測を行っているモニタリングポストが存在する(図(1)-3参照)。水質項目として水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)、クロロフィルa、濁度が測定されており、風向風速、気温、流速も併せて測定されている。それらの地点で得られたデータ¹⁵⁾と数値計算結果を比較した。

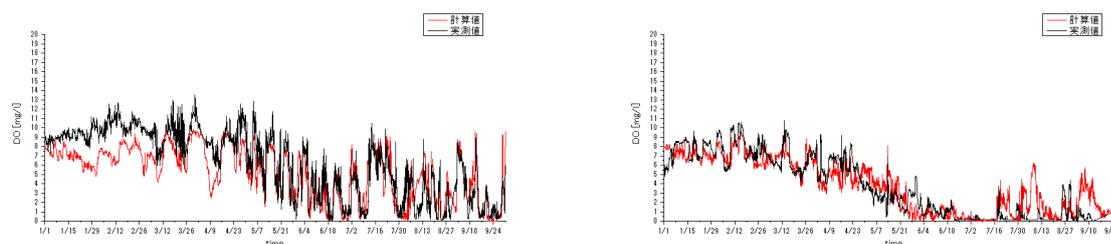
ここでは、千葉波浪観測所での観測結果との比較を、表層及び底層の水温、塩分について、それぞれ図(1)-20、図(1)-21に示す。また、底層DOについては、千葉波浪観測所と千葉港口での観測結果と比較したものを図(1)-22に示す。季節的な水温・塩分の成層化と、貧酸素水塊の発達や青潮形成時の水温・塩分等の時間的な急変現象が良く再現されている。



図(1)-21. モデル解析の結果（千葉波浪観測所における表層水温(上図)及び底層水温（下図）の観測値と計算値の比較。



図(1)-22. モデル解析の結果（千葉波浪観測所における表層塩分(上図)及び底層塩分（下図）の観測値と計算値の比較。



図(1)-23. モデルによる底層DOの解析結果（千葉波浪観測所(左図)及び千葉港口(右図)での観測値との比較。

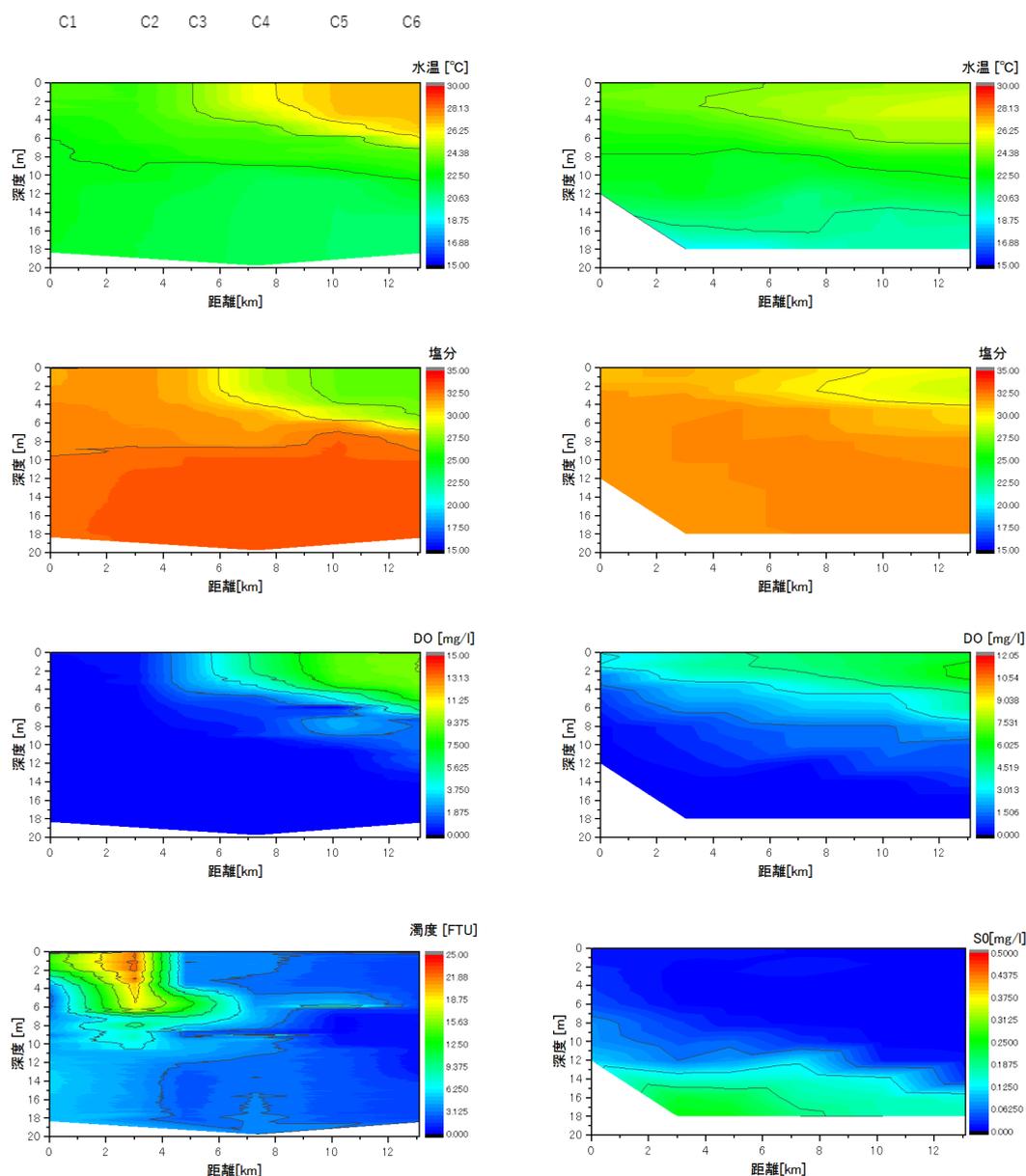
2) 青潮形成時における船上観測との比較

青潮発生日である2015年8月24日船上観測における千葉航路(Cライン)の観測結果と計算結果を比較した(図(1)-24 千葉航路 縦断面分布図比較(左側実測値、右側計算値))。

湾口側に位置するC1に向かって低水温、高塩分になる様子を再現できている。また、DOについては、10m以深ほどで貧酸素が広がる様子も再現できている。しかし、C1、C2付近表層部分における湧昇の再現、特に貧酸素かつ高濁度の再現には至らなかった。

船上観測の採水により得られた硫化物イオン濃度 S^{2-} と硫化水素 H_2S の計算結果を比較する。分析はアルカリ状態にして行うため、得られた硫化物イオンは硫化水素が全てイオン化したときの結果であり、計算では硫化水素はイオン化しない。そのため、採水の硫化物イオンと計算の硫化水素は同等となる。

硫化水素、単体硫黄濃度共に過小評価になっている。B4においては、窪地底近傍の高濃度の硫化水素を再現できていない。これは先のモニタリングポストで述べたことと同様に、沖側の高塩分水塊の北上の再現が不十分であるためと考えられる。



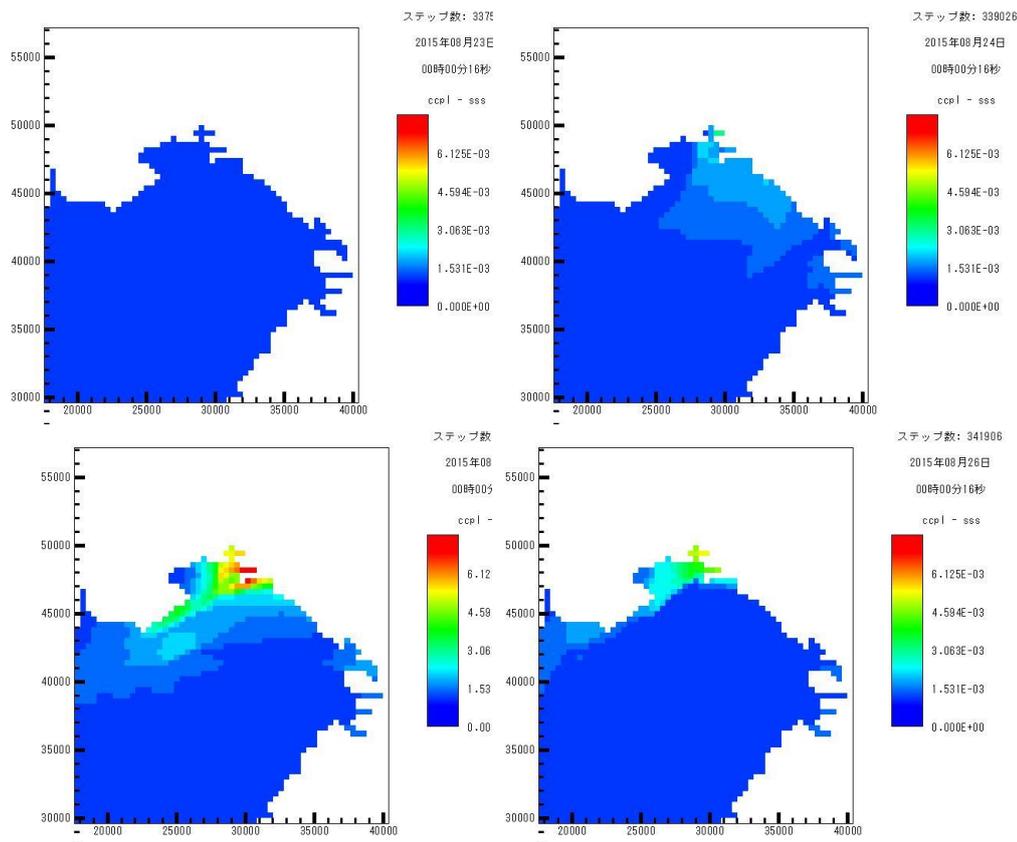
図(1)-24 千葉航路 縦断面分布図比較(左側実測値、右側計算値)

硫黄濃度は、鉛直的な広がり再現には至らなかった。これは鉛直メッシュサイズが数 m おきになっており、解像度が粗いことにも由来している可能性が示唆される。

3) 青潮水塊の面的な分布

2015年8月24日から数日間、青潮が確認された。図(1)-24に8月23日0時から1日おきの表層における単体硫黄濃度分布の計算結果を示す。計算結果は青潮が確認された船橋から千葉港を拡大して示す。

計算結果をみると8月23日には表層で単体硫黄を確認することができない、24日には広い範囲で単体硫黄が確認できる。これは千葉県水質保全課からの情報の内容と一致する。その後、25日



図(1)-25 硫黄濃度平面分布 計算結果

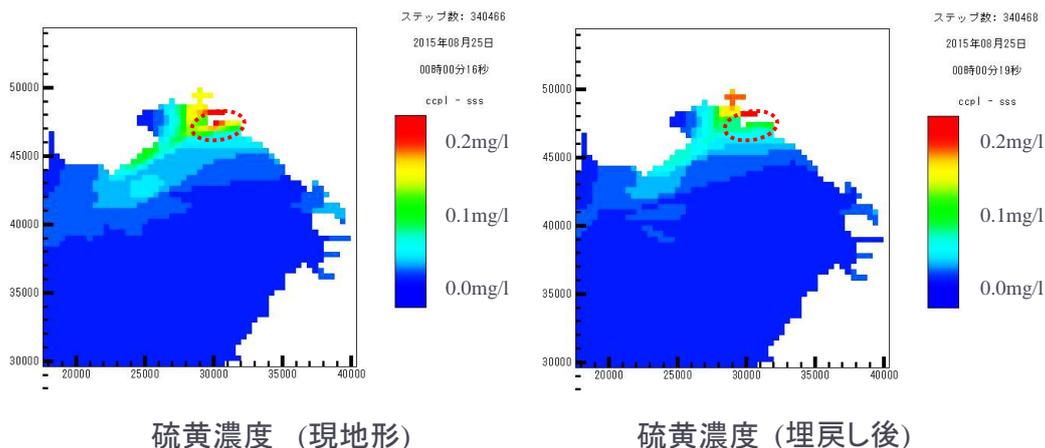
をピークに濃度は高まり、26日以降濃度が減少していき、29日には一部でしか存在しなくなった。その後、再び硫黄濃度が高まっている（図は省略）。これは報告された青潮の風向きが再び北東風が優勢になったためと考えられる。

(4) 生態系モデルを用いた、青潮等による影響軽減策の提案と評価

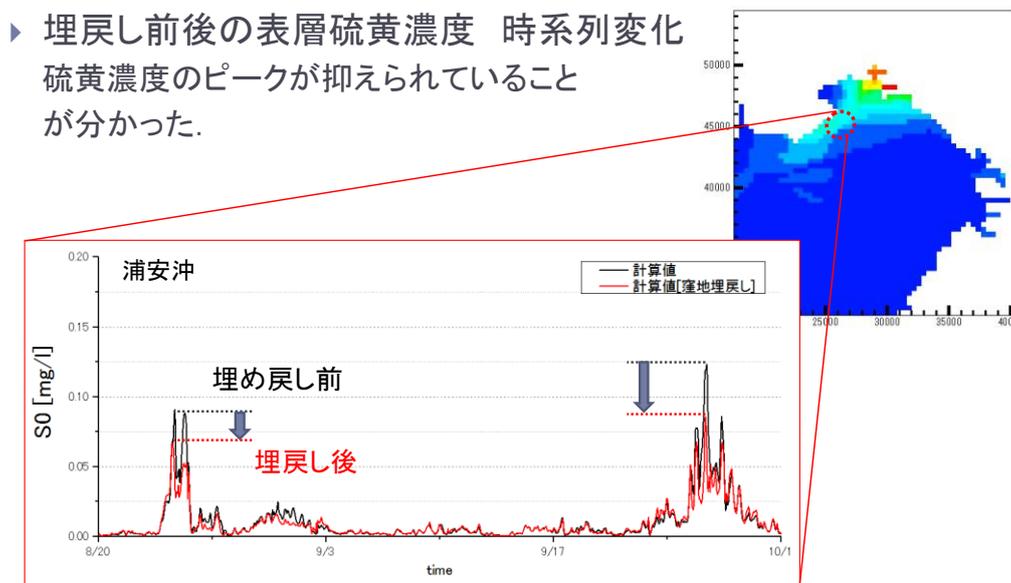
1) 修復効果の評価－窪地の埋め戻し効果－

様々な貧酸素・青潮対応策が考えられる中で、本研究では窪地の埋め戻し効果を検討した。特に最も規模の大きい幕張沖窪地を対象に、埋め戻しをしたケースの青潮軽減効果を調べた。現地形と幕張沖窪地埋め戻し後について、最も単体硫黄濃度域が広がった時点での面的な分布形状を比較すると、窪地埋め戻しによって単体硫黄が生じる領域は減少しているがそれほど顕著ではない。これは、対象とした青潮が窪地による寄与がそれほど大きくなかったことを示唆している（図(1)-26）。

しかしながら、固定点、例えば浦安沖での時系列の単体硫黄濃度変化を調べると、その効果は最大濃度時点で差が大きく、2度現れた濃度極大値は埋め戻し後には約 2/3 程度に減少していることがわかる（図(1)-27）。生物へのリスクは単体硫黄よりは溶存硫化物、特に分子状硫化水素であるといわれている。従って、このことが生物生息への悪影響を軽減できているかどうかは不明であるが、少なくとも青潮の軽減効果はそれなりに大きいものがあると考えられる。



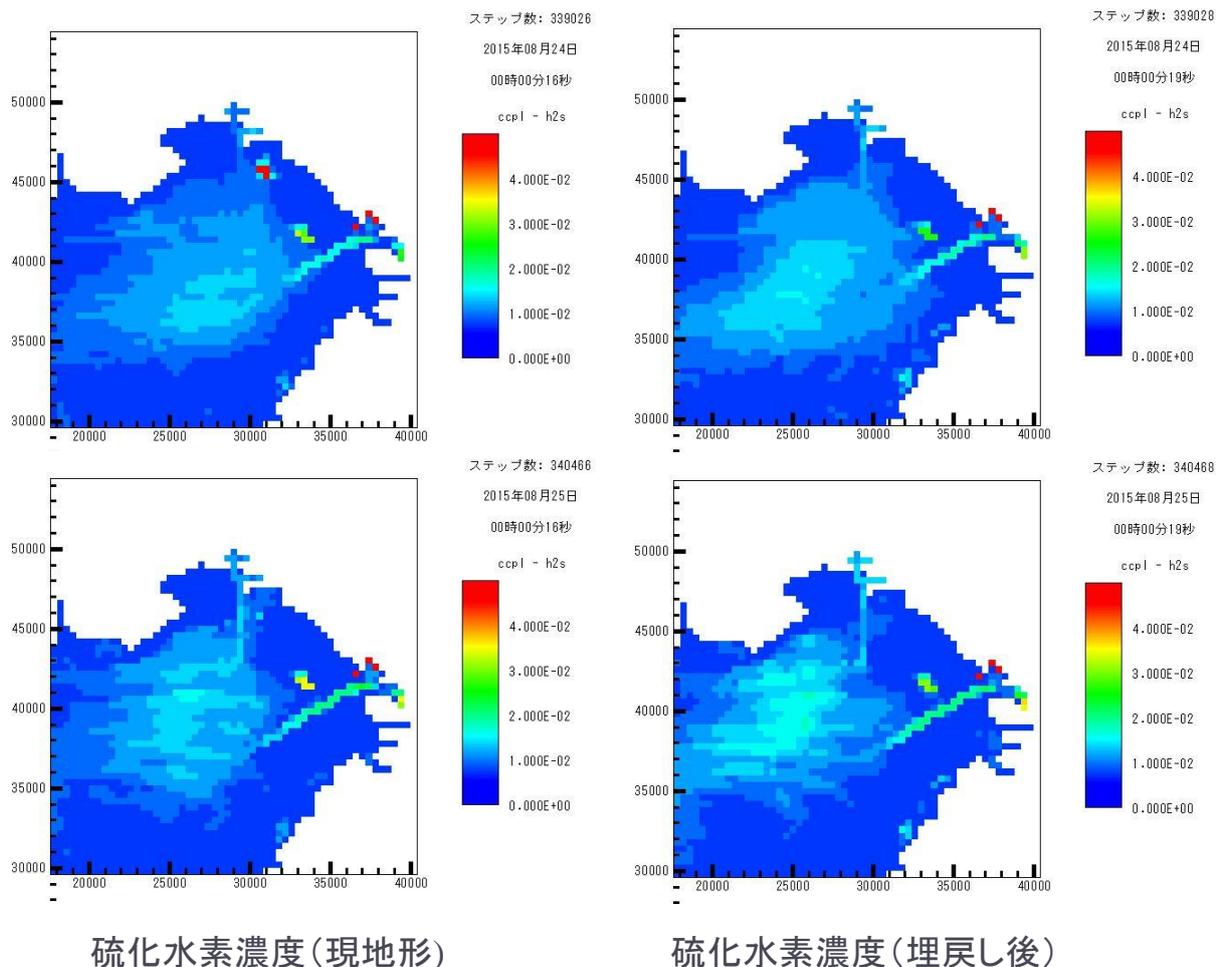
図(1)-26 幕張沖窪地が存在する現状のケース(左図)と埋め戻したケース(右図)における最大青潮発生時の表層単体硫黄濃度の比較



図(1)-27 浦安沖における現状ケースと埋め戻したケースの表層単体硫黄濃度の比較

青潮が発生し始めた8/24及び青潮最盛時の8/25における底層水中の溶存硫化物濃度を、現地形及び埋戻し後で比較すると、特に沖合い平場の比較的高い溶存硫化物濃度を含む水塊が、船橋航路に沿って北上している様子が見取れる。一方、千葉本航路には溶存硫化物濃度が高濃度で存在しているが、時系列的に移動はあまり見られていない。風外力等との力学的な流動特性との比較が必要であるが、少なくとも本計算結果からは、船橋航路沿いに比較して、千葉本航路底層水を大きく湧昇させる力が働かなかった可能性が強い。

本計算結果の妥当性、特に青潮の起源については詳細な検討の余地があるが、窪地と平場、航路はそれぞれ独立というよりも、互いに連動して水塊移動を行っている可能性が見出された点は興味深い。今後更なる調査が必要である。



図(1)-28 青潮発生時(8/24)及び最盛時(8/25)における、底層水中における溶存硫化物濃度(左図)現地形、(右図)埋戻し後

2) 三河湾及び東京湾への対策手法の提案

最後に、対策による生物資源量の損傷回避効果の定量化と、三河湾及び東京湾それぞれにふさわしい手法の組み合わせの提案を行う。

ここでは、サブテーマ(3)による生物の貧酸素・硫化水素の生物耐性試験の知見を基に、手順としての生物資源量の算定法を考案する。まず、上述したモデルによる解析結果は、底層水の湧昇時や青潮形成時における硫化物やDOの曝露環境(濃度レベルやその継続時間)の変化情報を与えている。これらの情報を、国立環境研究所が行ってきた底生生物の耐性実験結果と組み合わせることで、いくつかの生物種について斃死の規模を対策前後で推定することができる。さらに、複数の対策ごとにそれらの評価を行えば、有効な対策メニューを提案することが可能となる。

最後に、サブテーマ(1)及び(4)の知見やサブテーマ(5)による鉄剤散布による改善効果の検討結果を含めて、現地観測結果に基づく各湾の自然環境や有用生物の分布、生産活動の実態の特性を考慮し、三河湾及び東京湾それぞれにふさわしい手法の組み合わせ手法を取りまとめると以下のようなになる。

まず東京湾に対して、規模の大きい窪地の埋め戻しが重要であるほか、埋め戻しに至る過程に

においては、密度の軽い流体の導入による循環流の促進が効率的である。また、航路端部を起源とする青潮の頻度が高いことから、三河湾の場合も含め、鉄剤散布による底質改善が有効であると考えられた。その場合、鉄による硫化物溶出抑制効果を持続させるため、適宜高酸素濃度の水を供給する必要があると考えられる。さらに三河湾の場合には、生態系モデルによる青潮予報システムを高精度化することにより、三河湾全体のアサリ資源を支える六条潟のアサリ稚貝を早期に回収するシステムが有効であると考えられる。さらに、モデルとともに既存のモニタリングブイの有機的な活用が有効である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

(1) 科学的意義

本研究は、貧酸素や青潮水が生物・生態系に与える影響を調べるものである。そのためには、青潮を伴う大規模な湧昇現象の一連の物理過程を追跡し、そこで生じる生物化学的過程を追跡し、生物の生残に影響を与える溶存酸素や硫化物濃度レベルと継続性や、酸素の消費と硫黄の酸化過程に関する正確な情報を得ることが必要であるが、これまでそのような知見には極めて乏しかった。本研究における東京湾での現地観測の結果、青潮発生前後の三次元的な水塊把握調査を行うことに成功し、青潮の発生から消滅に至る一連の過程の全体像を、ほぼ把握することができた点は、重要な科学的知見である。すなわち、従来は底層無酸素水中に含まれる硫化物が、物理的な湧昇後あるいは湧昇の過程で酸化されて硫黄粒子が生じ、青潮という着色現象が生じるものとされてきた。しかしながら、昨年度の現地調査により、すでに湧昇以前に硫黄粒子は中・底層水中に高濃度に蓄積されていることが強く示唆された。今年度は、青潮形成時での現地調査により、単体イオウ濃度と濁度との強い相関関係を得ることができた。その関係を用いることで、簡易な硫黄粒子濃度の推定を行うことが可能となり、湧昇前後の非定常性の強い硫黄動態を正確にトレースすることを可能とした。濁度計は現場観測に広く利用されており、容易に検出できることから、今後飛躍的にその動態に関する知見が広がることが期待できる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

環境省は2016年3月に、湖沼や閉鎖性海域における水質の生活環境項目に関して、これまでのCODを中心とした体系を修正し、新たに底層DO濃度を追加した。現在、東京湾や琵琶湖を対象として、保全対象とすべき具体的な生物群（魚介類）の選定とそれらの目標DOレベルの設定、さらには海域の類型化に向けた議論が行われている。また、あわせて将来の貧酸素対策に資する技術に関するレビューが行われている。本研究の成果は、現在進行中のこれら行政課題に直接活かされるべきものである。

まず、本研究で得られた各生活史段階における底生性魚介類の生息状況は、底層溶存酸素量基準

の類型指定を行う際に必須の情報として利用される見込みである。現場での魚介類の分布調査結果は、その場で同時に実施された底層溶存酸素濃度計測結果とあわせて、従来の魚介類貧酸素耐性に関する乏しい科学的知見を補完し、保全対象とすべき具体的な生物群（魚介類）の選定とそれらの目標D0レベルを決定するための科学的根拠を与える。

また、具体的な貧酸素水塊対策の考え方や技術の適用について、本研究で提案した様々な既存技術の評価と新たなアイデアは、生態系モデルという評価ツールとあわせて今後の具体的な対策メニューの検討に活かされるべきものである。特に本研究で構築した、貧酸素水塊や硫化物を含む無酸素水塊の生成、さらに青潮発生を予測手法－生態系モデル－は、貧酸素や青潮の対策を検討する際に有用なツールとなるものと確信する。

さらに、D0濃度の低下よりもさらに毒性の大きい硫化水素の影響については、中央環境審議会等においても重要性が認識されながら、環境基準改定作業では議論されていない。これをどう評価するかが今後の大きな課題とされているが、この点に関しても本研究の成果が活かされる。干潟・藻場のような、浅く生物生息に適した環境への貧酸素水塊や青潮の来襲は、生物生態系に大きなインパクトを与えているが、D0欠乏が原因か、あるいは硫化水素による影響が大きいのかは依然として不明であり、本研究はこれらの課題解明に向け、まず基礎となるイオウの形態のうち、硫化物イオン(溶存硫化物)、単体硫黄を簡易に区分できる方法を見出したことから、次年度以降の発展と環境政策への貢献が期待できる。あわせて本研究により提案した鉄剤散布は、現地への適用には検討課題を残しているものの、経済的な硫化物溶出抑制手法として、実地での検討が望まれる。

あわせて環境モニタリングという観点では、本研究の成果の発展形として、従来から水質モニタリングに使われていたセンサー類の新たな使用方法を提案する。つまり、濁度を単体硫黄の指標として、またさらにpH及びORPを溶存硫化物の存在範囲の指標として活用することは、無酸素水塊周辺での溶存硫化物・単体硫黄の連続的な環視を可能とする手法として、強く推奨できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況（※別添.報告書作成要領参照）

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 山本修司、中村由行、鈴木崇之、田中陽二：硫黄の酸化反応を考慮した3Dモデルによる青潮の数値解析，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 71, No. 2, pp. I_1279-I_1284, 2015.
- 2) 田中陽二、中村由行、伊藤比伽留、田中雄介、山本修司、鈴木崇之：船上調査と岸壁調査を組み合わせた東京湾湾奥部における青潮の現地観測，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 71, No. 2, pp. I_1273-I_1278, 2015.
- 3) 田中陽二、比嘉紘士、中村由行、宇野佳朗、軽部智章、伊藤比伽留、管原庄吾、鈴木崇之：東京湾奥部における青潮の湧昇と中層流出現象の現地観測，土木学会論文集B2（海岸工学），72(2)，I_1759-I_1764, 2016.
- 4) 比嘉紘士、中村由行、田中陽二、管原庄吾、虎谷充浩、伊藤比伽留、鈴木崇之：濁度推定手

法に基づく静止海色衛星COMS/GOCIを用いた青潮分布の把握、土木学会論文集B2（海岸工学）、72(2), I_1759-I_1764, 2016.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 中村由行：青潮を捉える、ヘドロ129号、2017（印刷中）
- 2) 中村由行：東京湾等における貧酸素・青潮現象の解明と対策に関する共同研究、海洋理工学会平成29年度春季大会シンポジウム、2017（印刷中）
- 3) 比嘉紘士：海色リモートセンシングによる青潮分布検出のための硫黄濃度推定手法の提案、海洋理工学会平成29年度春季大会シンポジウム、2017（印刷中）

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 中村由行・伊藤比伽留・田中雄介・田中陽二・山本修司・鈴木崇之：2014年8月の東京湾奥部における青潮イベントの観測、第49回日本水環境学会年会講演集、2015.
- 2) 山本修司・中村由行・鈴木崇之・田中陽二：硫黄の酸化反応を考慮した3Dモデルによる青潮の数値解析、第49回日本水環境学会年会講演集、2015.
- 3) 伊藤比伽留、中村由行、田中雄介、田中陽二、山本修司、鈴木崇之：東京湾奥部における航路を発生源とした青潮イベントの観測、第52回環境工学研究フォーラム、2015.
- 4) 伊藤比伽留、比嘉紘士、田中陽二、宇野佳朗、軽部智章、鈴木崇之、中村由行、管原庄吾：定点での連続観測により捉えた青潮発生前後の水質変動、第50回日本水環境学会年会、2016.
- 5) 田中陽二、比嘉紘士、伊藤比伽留、中村由行、鈴木崇之、宇野佳朗、軽部智章、管原庄吾：東京湾奥部における2015年8月に発生した青潮の船上観測、第50回日本水環境学会年会、2016.
- 6) 比嘉紘士、中村由行、田中陽二、伊藤比伽留、鈴木崇之：東京湾における3次元モニタリングによる青潮・貧酸素水塊の挙動に関する考察、第50回日本水環境学会年会講演集、pp. 520、2016.
- 7) Higa H, Sugahara S, Tanaka Y, Nakamura Y, Ito H and Suzuki T: Development of Sulfur Estimation Model for Monitoring of Blue Tides by COMS/GOCI in a semi-Enclosed Water Area, The 4th Asian/13th Korea-Japan workshop on ocean color (4th AWOC/13th KJWOC), Thailand, pp. 34, 2016.
- 8) Higa H: Development of sulfur estimation model for monitoring of blue tides using satellite remote sensing in Tokyo Bay, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission 2016, Tokyo Chiyodaku-Hitotsubashi, Japan 2017.
- 9) 宮下寿哉、中村由行、比嘉紘士、田中陽二：現地観測に基づいた東京湾湾奥部における貧酸素水塊形成および湧昇現象の考察、第51回日本水環境学会年会講演集、pp. 170, 2017.
- 10) 伊藤比伽留、中村由行、比嘉紘士、田中陽二：3Dモデルによる青潮の数値解析とその対応策の検討、第51回日本水環境学会年会講演集、pp. 169, 2017.

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「第16回東京湾シンポジウム」（主催：国土交通省国土技術政策総合研究所、2015年10月23日、横浜赤レンガ倉庫1号館3階ホール、参加者約300名）にて講演。
- 2) 第14回横浜国立大学統合的海洋教育・研究センターシンポジウム「東京湾の水環境の未来像を考える」（2016年12月5日、横浜市開港記念会館、観客250名）を主催、及び講演。
- 3) 第42回水底質浄化技術セミナー（主催：水底質浄化協会、2016年11月29日、日本消防会館、観客約150名）において講演：中村由行「内湾における貧酸素化と青潮形成の現状と対策について」
- 4) 平成28年度東京都下水道局施設管理部研修「水質最前線」（2017年1月17日、東京都庁第二本庁舎、参加者約50名）にて講演：中村由行「これからの沿岸海域再生の方向性について」

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) Bartlett, J.K. and D. A. Skoog: Colorimetric determination of elemental sulfur in hydrocarbons, *Analytical Chemistry*, Vol. 26, No. 6, 1954.
- 2) 田中陽二, 中村由行, 鈴木高二朗, 井上徹教, 西村洋子: 微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築, *港湾空港技術研究所報告*, Vol.50, No.2, 68p, 2011.
- 3) 富永衛, 木村明, 寒川強, 太田一之, 松尾信, 山本雅洋, 北村博, 近磯晴: 東京湾北部海域における青潮の化学的特性について, *公害*, Vol.23, pp.17-25, 1988.
- 4) 福岡一平, 北原宏一, 和田明, 川永充人, 賀上裕二, 高野康隆: 東京湾奥部における青潮現象の現地観測結果について, *海洋調査技術*17(1), pp.13-24, 2005.
- 5) 風呂田利夫: 東京湾における青潮の発生, *水質汚濁研究*, Vol.10, No.8, pp.470-474, 1987.
- 6) 田中昌宏, Arjen Markus, 阪東浩造: 青潮の生化学反応を含む数値モデルの開発, *海岸工学論文集*, Vol.44, pp.1096-1100, 1997.
- 7) 佐々木淳・磯部雅彦・藤本英樹: 東京湾における青潮簡易予測手法の開発, *海岸工学論文集*, 第46巻, pp.1006-1010, 1999.
- 8) 気象庁(web2): 潮汐観測資料, <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>, 参照2013-10.
- 9) 東京湾環境情報センター(web): 東京湾水質連続観測, <http://www.tbeic.go.jp>, 参照2015-03.

- 10) 国土交通省河川局(web) : 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>, 参照2014-10.
- 11) 鈴木高二朗 : 東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす淡水流入と風の影響について, 港湾空港技術研究所資料, 第1276巻, 97p, 2013.
- 12) 気象庁(web1) : 過去の気象データ検索,
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 参照2014-10.
- 13) 本多忠夫, 光易恒: 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93, 1980.
- 14) 田中陽二, 中村由行, 伊藤比伽留, 田中雄介, 山本修司, 鈴木崇之 : 船上調査と岸壁調査を組み合わせた東京湾湾奥部における青潮の現地観測, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_1273-I_1278, 2015.
- 15) 東京湾環境情報センター(web) : 東京湾水質連続観測, <http://www.tbeic.go.jp>, 参照2015-03.

(2) 三河湾における貧酸素および硫化物が魚介類の生息および再生産に与える影響解明

愛知県水産試験場

漁場環境研究部 漁場改善グループ

蒲原 聡・曾根 亮太

研究協力者 愛知県水産試験場

宮脇 大、和久 光靖、石田 俊朗、山田 智

平成26(開始年度)～28年度累計予算額：48,341千円（うち平成28年度：15,113千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

三河湾東部海域には、高次の生物生産を支える六条潟や汐川干潟などの貴重な干潟・藻場や浅海域が存在しているが、貧酸素水塊や青潮の来襲が生物生産機能や水質浄化機能の低下、漁業被害を招いており、干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮の影響を軽減するため、発生源での対策とともに、干潟・浅海域での実効性のある青潮回避策を構築することが喫緊の課題である。本研究では、三河湾全湾規模及び航路泊地、周辺の干潟・藻場における貧酸素水塊及び青潮の発生・解消機構の把握及び貧酸素水塊・青潮（溶存硫化物）が底生性魚介類の分布に与える影響を評価し、溶存硫化物発生抑制策の検討のための溶存硫化物及び鉄の動態把握を行った。

貧酸素水塊が三河湾全湾の底生性魚介類資源に及ぼす影響をそれぞれの生活史に着目して評価したところ、湾内の広範囲に分布していた底生性魚介類は、貧酸素水塊の発達に伴い激減すること、また、湾奥に位置する六条潟はクルマエビ等の着底初期の生息場として機能し、その沖合は若齢個体の重要な成育場であることが確認されたが、貧酸素化によりその生息域が失われることが明らかとなった。航路・泊地等の局所的環境悪化水域（デッドゾーン）における貧酸素水塊の発生、湧昇が、底生性魚介類資源及び周辺底生生態系に及ぼす影響の評価において、湾奥の六条潟や汐川干潟における溶存酸素飽和度の低下は、湾央や隣接する航路泊地に由来する貧酸素水塊の湧昇に起因しており、アサリを始めとする底生生態系の機能劣化の要因となっていることが明らかとなった。湾央及びデッドゾーンにおける溶存硫化物及び鉄の動態を調査し、底層水中の貧酸素化に伴い底泥中で発生した溶存硫化物は、溶存態鉄により硫化鉄として捕捉され、溶存態鉄による発生抑制効果が認められたものの、溶存態鉄の枯渇に伴い、底層水中へ溶出している現象を捉えることができた。また、底層水中の酸素濃度の増加に伴い、硫化鉄は徐々に酸化され溶存態鉄となり、その後の貧酸素化時には再び溶存硫化物の発生抑制に寄与することが示唆された。

[キーワード]

三河湾、貧酸素水塊、溶存硫化物、底生性魚介類、鉄

1. はじめに

三河湾東部海域には、六条潟や汐川干潟などの貴重な干潟・藻場や浅海域が存在し、開発が進んだ現在でも水産有用種や野鳥などの高次の生物生産を支え、さまざまな生態系サービスをもたらしている。このような干潟・藻場生態系にとって、貧酸素水塊や青潮の来襲が脅威となっているが、青潮は貧酸素水塊の湧昇現象であり、気象擾乱によって突発的に生じ、しかもしばしば大規模であるため、その予測技術の進展は遅れ、実効ある有効な対策はなされていない。青潮対策が遅れている理由は科学的知見の不足にもあり、青潮の生物影響という観点からは硫化物が重要であるという指摘があるにもかかわらず、硫化水素を主体とした硫化物が生物群集に与える影響や、環境中での硫化物の蓄積機構はほとんど調べられていない。このような現状から、干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮影響を軽減するため、発生源での対策とともに、干潟・浅海域での実効性のある青潮回避策を構築することが喫緊の課題である。

2. 研究開発目的

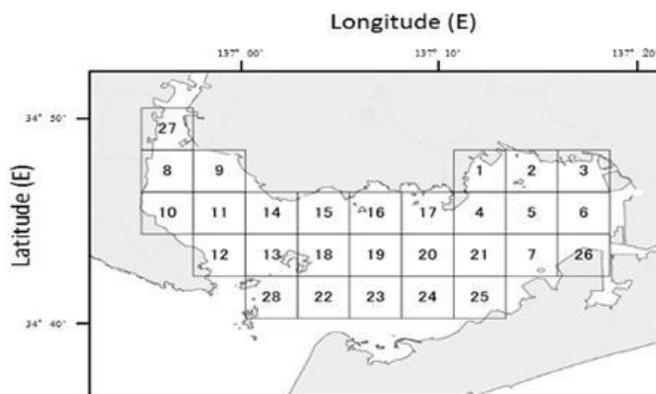
干潟・藻場生態系への貧酸素・青潮影響の軽減策を提案するため、三河湾全体スケール規模及び航路・泊地、周辺の干潟・藻場における貧酸素及び溶存硫化物の発生・解消機構を調べ、これらが底生性魚介類の分布に与える影響を把握し、評価する。また、溶存硫化物発生抑制策を検討するため、硫化物及び鉄の動態を把握する。

3. 研究開発方法

(1) 貧酸素水・溶存硫化物及び底生性魚介類の分布

1) 全湾調査

湾全体規模での貧酸素水塊及び溶存硫化物が底生性魚介類資源に与える影響を評価するために、三河湾において貧酸素水塊が発達する春季から秋季にかけて水質観測と底びき網調査を行った。調査は三河湾を4 km 四方の28水域に区分し（図(2)-1）、2014年6月～10月の各月1回実施した。魚介類の採捕は小型機船底びき網（えびけた網）により行い、けた幅は4.2～5.3m、袋網の目合いは7節

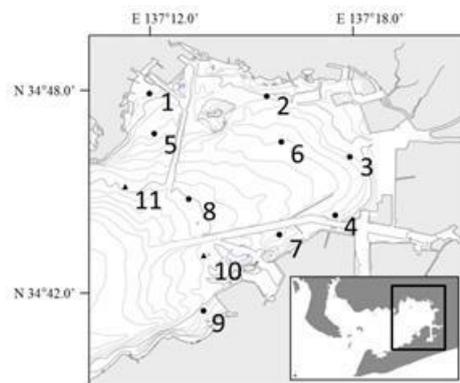


図(2)-1 調査水域

(約5.0cm)を用いた。1回の曳網は約500mを目安とし、実際の曳網距離はGPSの航跡記録から算出した。投網前及び揚網後に表層（水面下-0.5m）及び底層（底上+0.5m）について多項目水質計（JFEアレック社製AAQ1182s-H）を用いて、水温、塩分及び溶存酸素濃度（DO）を測定した。また、北原式採水器を用いて海底直上水（底上+0.5m）を採取し、ヨウ素滴定法（JIS K0102）により硫化物イオン濃度を測定し、溶存硫化物濃度とした。採集された魚介類サンプルは可能な限り下位の分類群まで同定を行った後、個体数を計数し、分類群ごとの総湿重量を測定した。ここでは、個体数及び湿重量において優占し、かつ水産上有用種であるカレイ類、ガザミ類、エビ類、シャコ、及び二枚貝を主要魚介類として取り扱った。

2) 湾奥部調査

貧酸素水塊及び硫化物が底生性魚介類資源に与える影響を評価するために、三河湾東部海域（渥美湾）において春季から夏季の貧酸素化の進行過程にかけて水底質観測と底びき網調査を行った。調査は渥美湾に11測点を設定し（図(2)-2）、2015年5月から8月にかけて毎月1～2回の合計6回実施した。魚介類の採捕は小型機船底びき網（えびけた網）により行い、けた幅は5.0 m、袋網の目合いは7節（約5.0cm）を用いた。1回の曳網は約500mを目安とし、実際の曳網距離はGPS（Garmin社製eTrex）の航跡記録から算出した。投網前及び揚網後に表層（水面下-0.5m）及び底層（底上+0.5m）について多項目水質計を用いて、水温、塩分及びDOを測定した。また、北原式採水器を用いて海底直上水（底上+0.5m）を採取し、ヨウ素滴定法により硫化物イオン濃度を測定し、溶存硫化物濃度とした。採集された魚介類サンプルは可能な限り下位の分類群まで同定を行った後、個体数を計数し、分類群ごとの総湿重量を測定した。ここでは、個体数及び湿重量において優占し、かつ水産上有用種であるカレイ類、ガザミ類、エビ類及びシャコを主要魚介類として取り扱った。

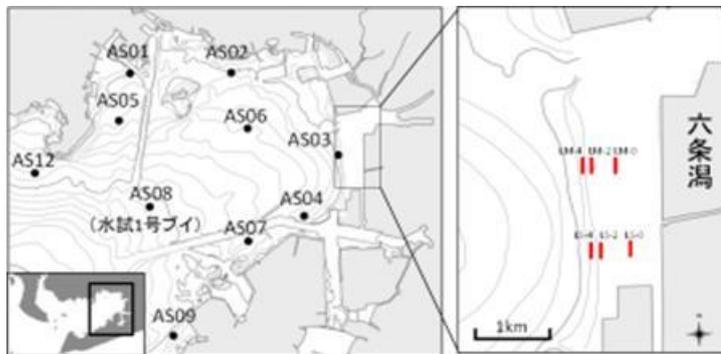


図(2)-2 調査水域

●：水質観測及び底生性魚介類調査、▲：水質観測のみ

3) 湾奥部干潟域及び周辺海域における底生性魚介類の動態

湾奥部における底生性魚介類の動態と貧酸素化による影響を明らかにするために、三河湾奥部の六条潟における小型桁網による調査（ソリネット調査）と、その周辺海域における底びき網漁船を用いた調査（漁船調査）を実施した。ソリネット調査は2015年12月から2016年7月まで毎月1回の合計8回実施した。魚介類の採捕は六条潟6地点（図(2)-3右図）において船外機船を用いたソリネット（網口幅2m，網口高30cm，ソリ幅10cm，網長6m，追い込み部網目幅9.0mm，採集袋部網目幅3.0mm）により行い、1地点につき100mを目安に曳網し、実際の距離はGPSの航跡記録から算出した。得られたサンプルは可能な限り下位の分類群まで同定した後、計数し、湿重量を測定した。漁船調査は三河湾東部海域（渥美湾）に10測点を設定し（図(2)-3左図）、2016年4月から7月にかけて毎月1～2回の合計5回実施した。魚介類の採捕は小型機船底びき網（えびけた網）により行い、けた幅は5.0 m、袋網の目合いは7節（約5.0cm）を用いた。1回の曳網は約500mを目安とし、実際の曳網距離はGPSの航跡記録から算出した。投網前及び揚網後に表層（水面下-0.5m）及び底層（底上+0.5m）について多項目水質計を用いて、水温、塩分及びDOを測定した。採集された魚介類サ



図(2)-3 漁船調査（左図）及びソリネット調査（右図）調査測点

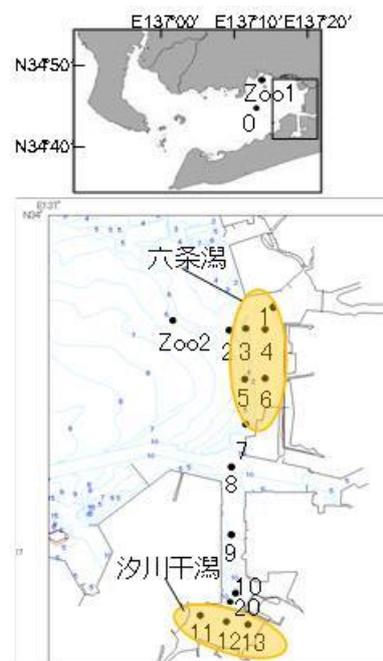
サンプルは可能な限り下位の分類群まで同定を行った後、個体数を計数し、分類群ごとの総湿重量を測定した。

(2) 人工構造物に囲まれた干潟・藻場における調査

1) 航路・泊地及び隣接する干潟域の水質・流動環境

a. 水質及び流動場観測 (2014年調査)

三河湾湾奥の干潟・藻場及び隣接する航路・泊地に設定した13測点 (1~13) において2014年6月から9月までの間に計8回、多項目水質計を用いて各層の水温、塩分、D0を測定した (図(2)-4)。また、D0飽和度が5%以下の層については北原式採水器を用いて採水し、ヨウ素滴定法により硫化物イオン濃度を測定し、溶存硫化物濃度とした。測点2、4、6、7においては2014年7月14日から9月30日までの間、自記式連続観測機器を設置し、海底上+0.1 m層の水温・塩分 (JFEアドバンテック社製Infinity-CTW) 及びD0 (JFEアドバンテック社製RINKO-W) の連続観測を行い10分間隔で値を記録した。加えて測点4、7では、海底上+0.9 mから表面まで0.5 m間隔で各層の流向流速の値を10分間隔で記録した。6月18日、7月30日、8月28日及び9月26日の計4回、全13測点において、マクロベントスを採取した。エクマンバーン採泥器 (採集面積0.02 m²) を用いて表面から15 cmまでの底泥を3回採取し、目合い1 mmのふるいにかけて、ふるい上の生物を10%中性ホルマリンで固定して実験室に持ち帰り、種の同定と個体数の計数、湿重量の測定を行った。



図(2)-4 調査測点

b. 水質及び流動場観測 (2015年調査)

三河湾湾奥の干潟・藻場及び隣接する航路泊地に設定した13測点 (1~13、図(2)-4) において2015年6月から10月までの間に計9回、2014年調査と同様に多項目水質計により各層の水温、塩分、D0の測定を行い、測点2、4、6、7においては2015年6月19日から10月13日までの間、海底直上層の流向流速、水温・塩分及びD0の連続観測を行い10分間隔で値を記録した。

c. 水質・流動環境と底生生物への影響

三河湾奥部の干潟・藻場及び隣接する航路泊地に設定した13測点 (1~13、図(2)-4) において2016年6月から10月までの間に計8回、2014年調査及び2015年調査と同様に多項目水質計により各層の水温、塩分、D0を測定した。また、2016年6月から10月にかけて毎月1回、コドラート内 (25 cm×25 cm) の底泥を採取し、1mm目によりふるったサンプルについて種同定を行うとともに、個体数と湿重量を測定した。測点2、4、6、7においては2016年6月15日から10月12日までの間、海底直上層の流向流速 (JFEアドバンテック社製Infinity-EMまたはNortek社製Aquadopp

Profiler)、水温・塩分及びD0の連続観測を行い10分間隔で値を記録した。

六条潟のような生物量の豊富な干潟では青潮を契機とした生物のへい死の連鎖により干潟上において高濃度の硫化水素が生成される可能性が考えられる。そこで、この可能性を検証するために、2016年8月22日の測点4において干潟上堆積物をアサリ等のマクロベントス（アサリ個体数密度12,000 ind./m²）を含んだままアクリルコアで抜き取り密閉し、夏季の干潟上の水温条件（28℃）での静置培養実験を実施した。培養後3日目、4日目、6日目、20日目に直上水の溶存硫化物濃度をメチレンブルー法により定量した。

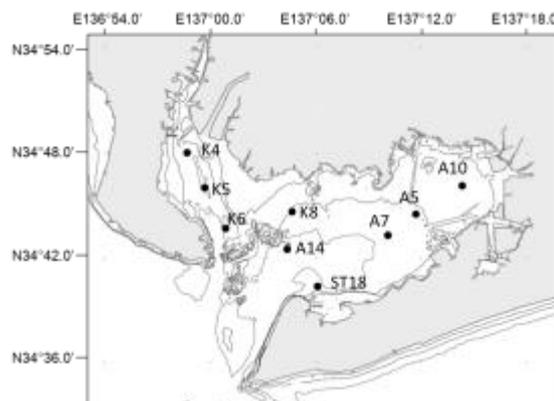
2) 貧酸素化が動物プランクトン現存量に与える影響評価

a. 湾央及び干潟周辺域、航路・泊地の鉛直分布

図(2)-4に示す6測点（0, 8, 9, 10, Zoo1, Zoo2）において、5月から9月にかけて計5回動物プランクトンの採集を行った。各測点の水深に応じて4～8層から水中ポンプにより200Lを船上にくみ上げ、50μmメッシュでろ過して試料を得た。検鏡により動物プランクトンの同定、計数を行い、種ごとに換算式を用い炭素現存量を求めた。動物プランクトン採集層においては、多項目水質計を用いて、水温、塩分及びD0を測定した。

b. 全湾における空間分布

図(2)-5に示す9測点において、2016年6月から11月にかけて計5回動物プランクトンの採集を行った。北原式定量閉鎖ネット（50μmメッシュ）を用いて測点の水深に応じた2-4層の層別の鉛直曳きを行った。得られたサンプルは検鏡により動物プランクトンの同定、計数を行い、種ごとに換算式を用い炭素現存量を求めた。また、動物プランクトン採集時に多項目水質計を用いて、水温、塩分及びD0を測定した。



図(2)-5 動物プランクトン調査測点

(3) 鉄による溶存硫化物発生抑制効果の検討

1) 溶存硫化物と鉄の動態（2015年調査）

図(2)-4に示す4測点（0, 8, 9, 10）において2015年4月から2016年2月にかけて毎月1回、潜水により柱状採泥を行い、試料は表面から層別（0-1、1-2、2-3、3-4、4-5、5-6、9-10、15-16 cm）に切り、各層における溶存硫化物、硫化鉄、溶存態鉄を分析した。

2) 溶存硫化物と鉄の動態（2016年調査）

図(2)-4に示す湾央1点（測点0）、航路3点（測点9, 10, 20）の計4測点において2016年4月から2017年1月にかけて毎月1回、潜水により柱状採泥を行い、2015年調査と同様に試料を表面から層別に計8層に分割し、各層における溶存硫化物、硫化鉄、溶存態鉄を分析した。溶存硫化物の分析については少量の試料であるためSugahara et al. (2016)¹⁾に従った。

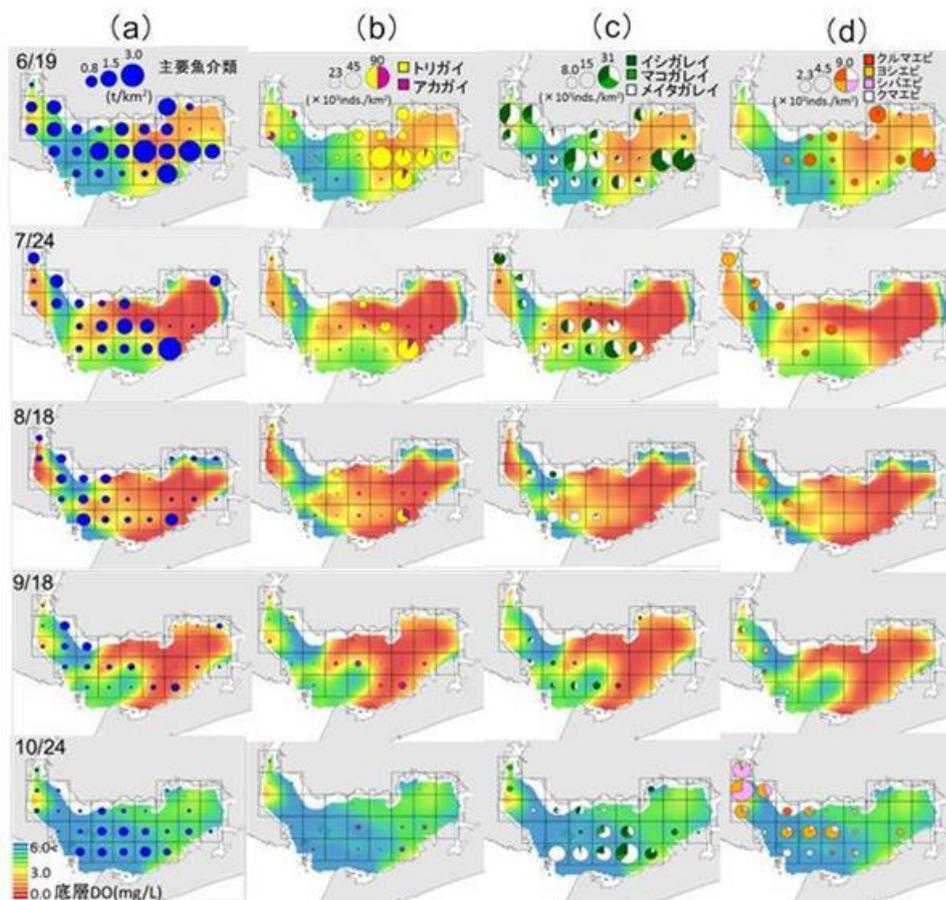
4. 結果及び考察

(1) 貧酸素水・溶存硫化物及び底生性魚介類の分布

1) 全湾調査

2014年6月から10月における主要魚介類の現存量の推移を各調査日における底層D0とともに図(2)-6(a)に示した。7月になると渥美湾奥部で貧酸素水塊が急激に発達し、無酸素水塊も見られた。8月にはその分布範囲が拡大した。9月は8月よりも分布が若干縮小したものの、依然として渥美湾を中心に貧酸素水塊が広く分布していた。10月になると貧酸素水塊は解消した。溶存硫化物は7月のst. 24で投網前・揚網後平均0.02 mg/L、8月のst. 6で平均0.53mg/L、9月のst. 4で平均0.10 mg/Lであり、いずれも渥美湾の無酸素環境下(底層D0 0.1 mg/L未満)で検出されたが、一部の水域に限られていた。

主要魚介類は6月には湾内に広く分布しており、平均現存量は944 kg/km²であった。しかし、貧酸素水塊の発達に伴って現存量は大きく減少し、9月の平均現存量は125 kg/km²となり、6月から86%減少した。一方、貧酸素水塊が回復した10月には若干分布域を広げ、平均現存量は203 kg/km²となり、9月の約1.6倍となった。各分類群について貧酸素水塊に対する応答を見るとその様相はそれぞれ異なった。このうち、6月の現存量に占める割合の高かった二枚貝、移動能力を有するカレイ類及びエビ類の個体数密度の推移についてそれぞれ図(2)-6(b)(c)(d)に示した。二枚貝のうち、6月には渥美湾を中心に多くのトリガイが見られたが、7月以降の貧酸素化に伴って分布域は縮小、個体数は減少し、10月には酸素環境は回復したものの、トリガイは全く採捕されなかった。一方で、移動能力を有するカレイ類の分布状況を見ると、6月には湾奥部まで広く分布していたが、貧酸素化に敏感に応答し、8月及び9月は湾内での分布は少なくなった。しかし、10月になって貧酸素水塊が解消すると、湾口部を中心に分布が見られた。また、エビ類についてみると、クルマエビは6月に渥美湾奥部で最も多くの個体が確認されたが、7月にはその生息域は消滅した。その後も湾内の分布はわずかであった。一方で、ヨシエビ及びシバエビについては6月から9月までは湾内の採捕個体数はわずかであったが、10月には西部海域(知多湾)を中心に分布が見られ、個体数が急増した。エビ類の中でも種によって出現時期やその分布域は異なっていた。



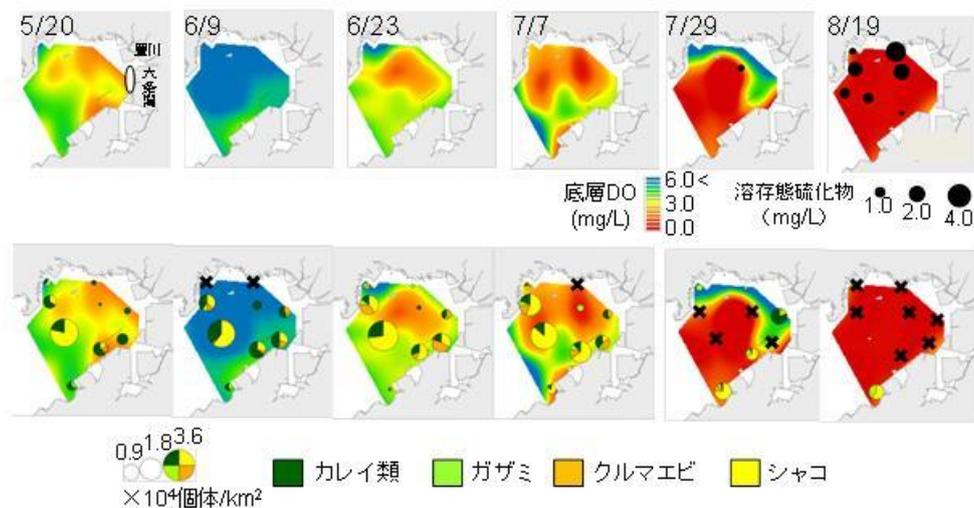
図(2)-6 2014年6月から10月における底生性魚介類の分布と底層溶存酸素濃度
 (a)主要魚介類現存量 (トン/㎢) (カレイ類、ガザミ類、エビ類、シャコ、二枚貝)、
 (b)二枚貝個体数密度 (個体数/ ㎢) (トリガイ、アカガイ)、(c)カレイ類個体数密度
 (個体数/ ㎢) (イシガレイ、マコガレイ、メイタガレイ)、(d)エビ類個体数密度 (個
 体数/ ㎢) (クルマエビ、シバエビ、クマエビ)

本研究により、貧酸素水塊の進行に伴って底生性魚介類の個体数及び現存量が大きく低下すること、また、貧酸素水塊に対する応答は各分類群毎に異なることが分かった。イシガレイやクルマエビはその体長組成より多くが当歳魚であると考えられ、貧酸素水塊が本格化する前の湾奥部を若齢期の生育場として高度に利用していることが明らかとなった。しかし、貧酸素水塊の発達に伴って湾奥の生息域が消滅しており、生育場から沖合生息域への移行経路で貧酸素水塊と遭遇し、その生活史に影響を与えていることが示唆された。一方、貧酸素水塊解消後はカレイ類など移動能力を有する分類群が湾内に戻り、またヨシエビやシバエビが知多湾で多く確認された。ヨシエビやシバエビについては10月に出現した個体は体長組成より当年の春季～夏季発生であると考えられた。これらの種は夏季に貧酸素水塊の影響の少ない河口域で成長し、秋季に沖合に移動していることが考えられた。

2) 湾奥部調査

2015年5月から8月における主要魚介類の個体数密度の推移を各調査日における底層DO及び溶

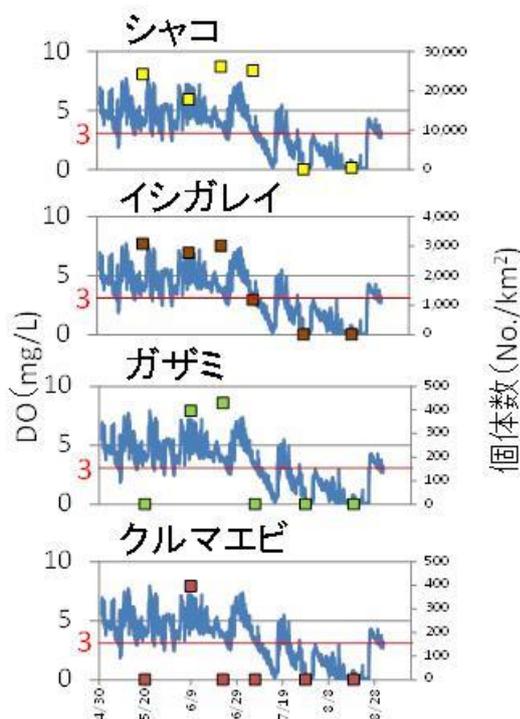
存硫化物濃度とともに図(2)-7に示した。底層DOは5月20日から6月23日までは局所的に2 mg/L以下となる水域も見られたが、顕著な貧酸素化の進行は見られなかった。7月7日になると湾北部において貧酸素化が進行し、低DO水域が拡大した。7月29日には湾北部のDOは回復したが、他の水域でDOが極度に低下し、測点6では0.4 mg/Lの溶存硫化物が確認された。8月19日には水域のほとんど全てが1 mg/L以下となり、湾北部を中心に溶存硫化物濃度が上昇し、測点2で最大の3.6 mg/Lとなった。底生性魚介類についてはカレイ類やシャコは5月20日から出現し、広く分布していたが、測点1、2、6などの湾北部や湾南部の測点では少ない傾向にあった。クルマエビは5月20日にはほとんど出現が見られなかったが、6月9日に六条潟周辺の測点3、4において出現し、その後は沿岸域で分布が見られた。ガザミは6月23日までは出現がわずかであったが、7月7日以降は沿岸部において分布が見られた。一方で、極度にDOが低下し、貧酸素化が拡大した7月29日には主要魚介類の分布域は減少し、個体数は大きく減少した。また、ほぼ全ての水域で無酸素化した8月19日には主要魚介類の分布はほとんど見られなかった。



図(2)-7 底層DOおよび溶存硫化物濃度の分布推移（上段）と主要魚介類の時空間分布（下段）

測点8におけるブイのDO連続観測値と主要魚介類の出現状況を対比したところ、各種が応答する底層DOに差異が見られた（図(2)-8）。測点8のDO連続観測値は大きく変動を伴うものの6月末までは3 mg/L以上を維持していたが、その後貧酸素化が進行した。これに対して各種の個体数の減少時期には多少のずれがあり、クルマエビ、ガザミ、イシガレイ、シャコの順番で早期に個体数が減少した。この時のDO推移状況から出現閾値を推察すると、クルマエビでは約4.0 mg/L、ガザミ及びイシガレイでは約3.0～4.0 mg/L、シャコでは約2.0 mg/Lであると考えられた。

前年度に行った三河湾全域を対象とした底生性魚介類調査では、貧酸素化が本格化する前の渥美湾奥部には底生性魚介類が豊富に分布し、特にクルマエビやイシガレイなどの重要水産資源が若齢期の生育場として高度に利用していることが明らかとなった一方で、貧酸素化の進行した夏季にはその分布域は消滅していた。今年度はその渥美湾奥部における底生性魚介類の減耗過程を明らかにするために時間的に詳細な観測を行った。5月から6月にかけて主要魚介類は広く分布し、特にイシガレイやクルマエビでは当歳個体が主体であり、渥美湾奥部が若齢個体の



図(2)-8 測点8(水試1号ブイ)における底層DO連続観測値と主要魚介類の出現状況

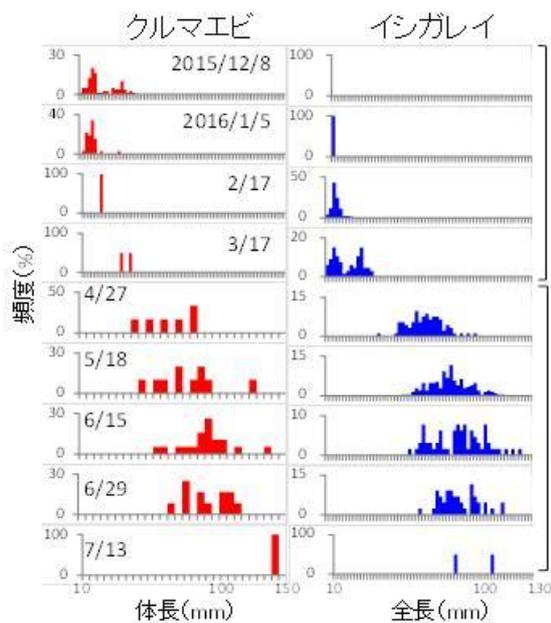
生育場であることが改めて示された。しかし、7月中旬以降の急速な貧酸素化の進行により、各種の個体数が急減した。また、測点8におけるDO連続観測と各種の出現分布状況から従来の室内実験により導かれる貧酸素耐性値(矢持ほか、1998²⁾; Yamochi et al., 1995³⁾; 浜野・山元、2005⁴⁾)よりも高い濃度で応答していることが明らかとなった。一方で、貧酸素化の進行に伴う浅場への目立った逃避は見られなかったことから、多くの個体が死亡により減耗したと考えられた。

渥美湾奥部ではわずかに残された周辺の干潟域が魚介類の初期生活史の場として機能し、沖合を含めて若齢期の生育場となるが、沿岸開発に伴う直立護岸や大規模な航路・泊地が数多く存在し、かつ逃避場として機能する有効な浅海域が少ないことにより、貧酸素化の進行に伴って多くの魚介類が逃避できずに死滅し、生活史が遮断されているものと考えられた。

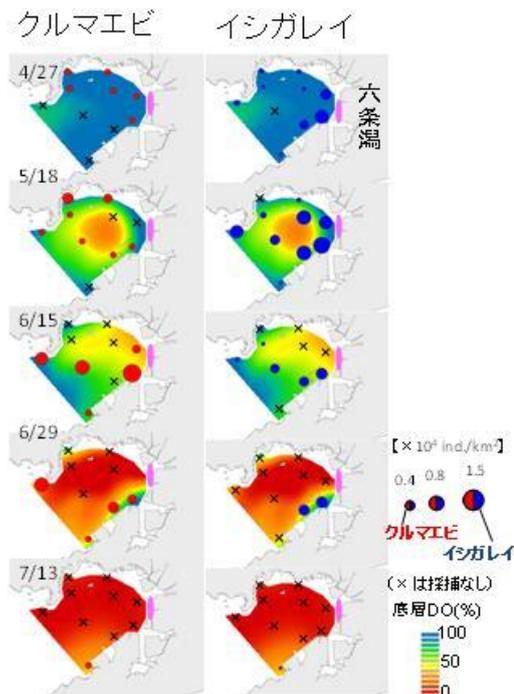
3) 湾奥部干潟域及び周辺海域における底生性魚介類の動態

図(2)-9に2015年12月から2016年3月までのソリネット調査、また2016年4月から7月までの漁船調査におけるクルマエビ及びイシガレイの体サイズ組成を示した。また、図(2)-10には2016年4月から7月までの漁船調査におけるクルマエビ及びイシガレイの分布を底層DOと対比して示した。2015年12月には六条潟では晩夏から秋生まれと考えられるクルマエビ稚エビが、また、2016年2月には12月頃生まれと考えられるイシガレイ稚魚が多数出現した。その後、六条潟では徐々に生息密度が低下したが、周辺海域では成長した個体が4月から6月にかけて徐々に増加し、六条潟からその周辺海域に生息場を移していることが明らかとなった。

一方で、周辺海域では6~7月頃から貧酸素化が急速に進行し、クルマエビやイシガレイの生息場所が消失した。本来であれば、クルマエビやイシガレイは湾奥部の保育場から成長に伴い湾口や外海に生息域を移行するが、湾奥部の貧酸素化はこれらの生活史を阻害していると考えられた。これまでに、六条潟周辺水域は三河湾全体の中でも、クルマエビやイシガレイの幼魚が最も多く分布する水域であることが分かっており、湾奥部での生死は海域全体の資源量を左右すると考えられた。



図(2)-9 クルマエビ及びイシガレイの体サイズ組成



図(2)-10 クルマエビ及びイシガレイの分布と底層DO

(2) 人工構造物に囲まれた干潟・藻場における調査

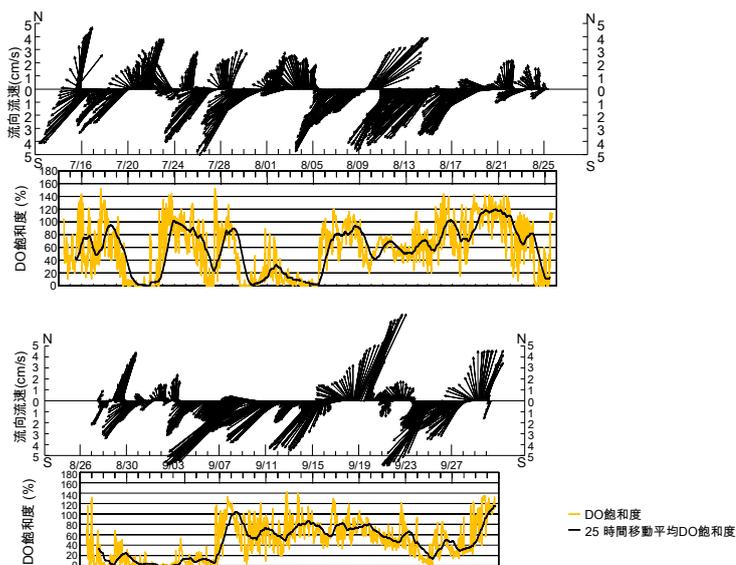
1) 航路・泊地及び隣接する干潟域の水質・流動環境

a. 水質及び流動場観測 (2014年調査)

測点2及び測点7の海底上+0.1 m層におけるDOは観測期間中、それぞれ0-135%、0-156%の間で変動した。変動の傾向は両測点で類似していた。7月19日-7月22日、7月29日-8月5日、8月26日-9月6日には両測点で断続的に無酸素状態となったが、DOの下降、上昇のタイミングは両測点でほぼ一致していた。

測点7の海底上+0.9 m層における流れを25時間で後方移動平均し、測点7で断続的に無酸素状態となった上述の3期間についてみると、いずれもDOの急減時には、顕著な南西向き（南西に流れ去る）の流れが認められた（図(2)-11）。

測点7の底層DOの急減時の直前には、湾中央に設置されている愛知県水産試験場自動観測1号ブイの海底上1 mが無酸素状態であったこと



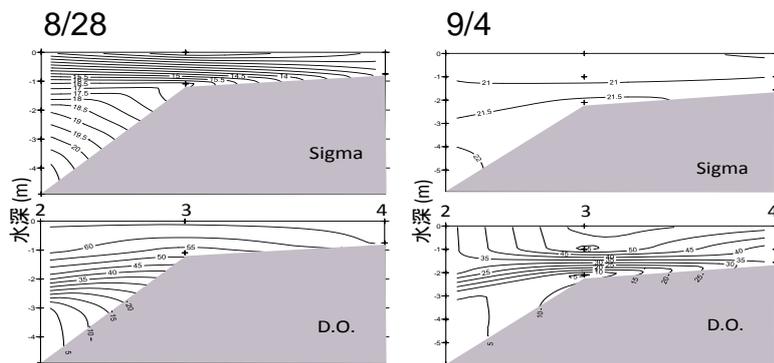
図(2)-11 測点7における海底上+0.1 m層のDO飽和度と海底上+0.1 m層の流向流速の25時間移動平均

産試験場自動観測1号ブイの海底上1 mが無酸素状態であったこと

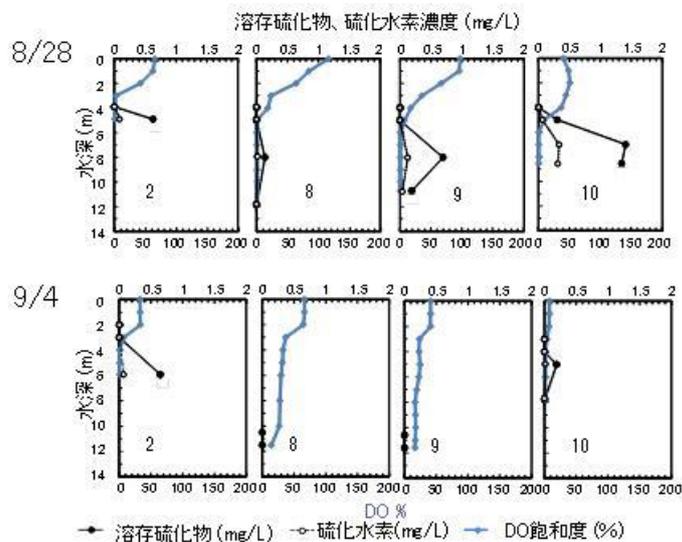
から、この時期、湾中央の底層には無酸素水塊が存在していたと考えられる。また、測点7で断続的に無酸素状態となった期間には、1号ブイの海上では、北西向き（北西に吹き去る）の風が連吹していた。これらのことから、測点2及び7の底層の無酸素化は、湾中央部の無酸素水塊が、北西向きの風の吹送に伴う東向きの底層補完流によって六条潟前面に移動したものを捉えたと考えられる。測点7の底層D0が急減したときに、海底上+0.9 m層で顕著な南西向きの流れが認められた。湾中央部の貧酸素水塊は底層を六条潟に向かい南東向きに進んだ後、測点7付近では海岸線に沿って時計回りに回転し、南西向きに輸送された可能性が考えられる。

8月26日-9月6日については、北西向きの海上風の吹送が断続的に長期に持続した。8月31日から9月6日にかけて、六条潟干潟上の測点4の海底上+0.1 m層ではD0が断続的に低下しており、干潟が貧酸素水に覆われたことが示唆される。

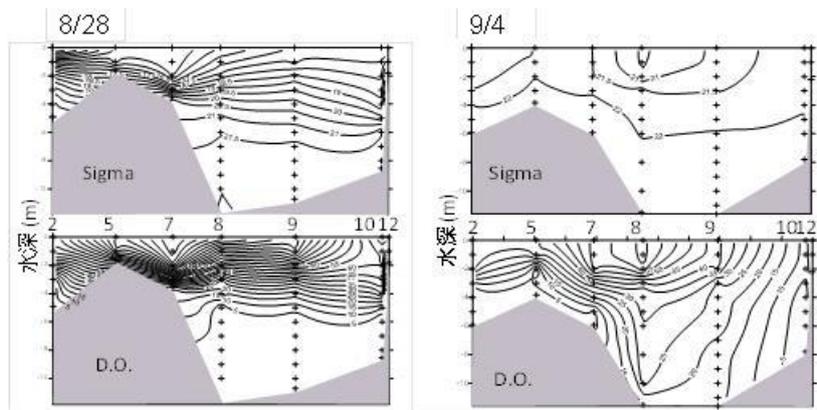
8月28日における六条潟縁辺部から干潟部にかけての東西断面をみると、六条潟前面には貧酸素水が存在していたが、干潟上はD050%以上の海水に覆われていた（図(2)-12左）。これが9月4日になると干潟上を密度21以上、D035%以下の高密度、低D0水が干潟を覆っていた（図(2)-12右）。これは、貧酸素水塊が北西向き海上風の長期の持続により、干潟上に湧昇したことを示唆する。測点2では8月28日に海底直上水に0.5 mg/Lの溶存硫化物が検出され、現場のpHから硫化水素濃度を計算すると0.1 mg/L程度であった。9月4日も海底直上水の溶存硫化物濃度、硫化水素濃度に大きな変化はなかった（図(2)-13）。



図(2)-12 六条潟縁辺部から六条潟干潟部にかけての密度とD0の東西断面



図(2)-13 8月28日及び9月4日における溶存硫化物、硫化水素、D0の鉛直分布



図(2)-14 六条潟から汐川干潟にかけての密度とD.O.の南北断面

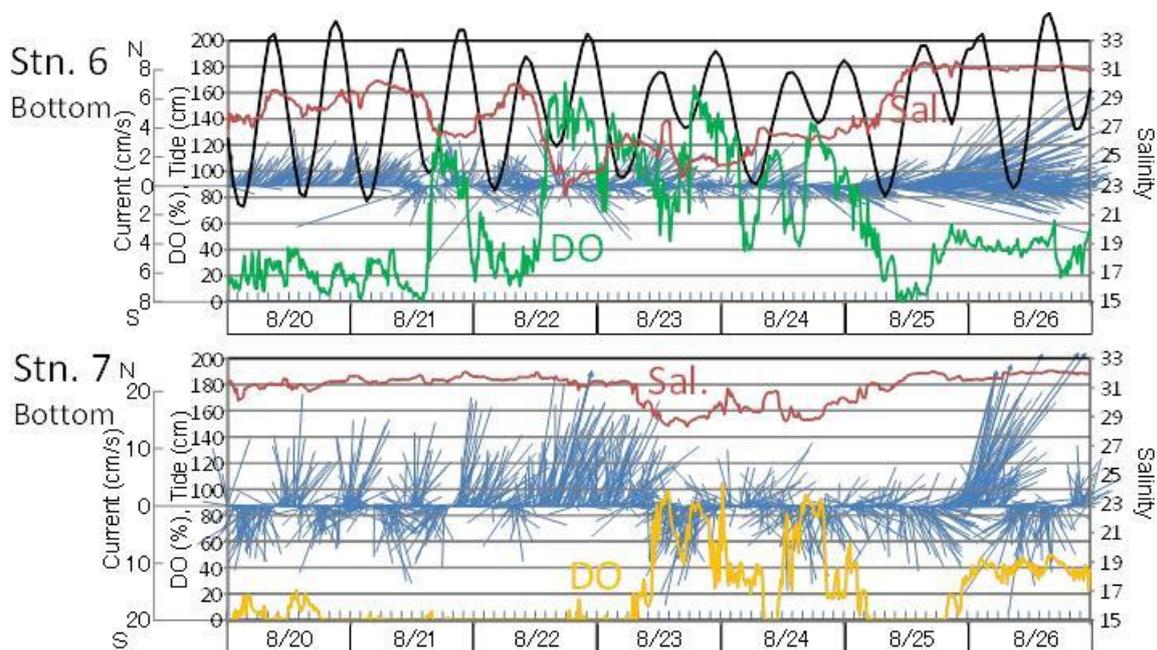
一方、六条潟前面の測点2から航路・泊地内の測点8、9、10を経て汐川干潟上の測点12に至る南北断面をみると、8月28日には成層により航路・泊地の測点8、9、10の底層には無酸素水が滞留していたが、9月4日には等濃度線が鉛直的に大きく傾き、航路・泊地の底層のD.O.が上昇した一方、汐川干潟の測点12はD.O.が10%以下の海水で占められていた(図(2)-14)。これは、航路・泊地の底層の無酸素水塊が北西向きの海上風の長期の持続により、汐川干潟上に湧昇したことを示唆する。このとき汐川干潟の東部では海色が乳青色に変色しており、青潮(青潮)の発生が認められた。航路・泊地の底層には0.2-1.5 mg/Lの溶存硫化物が検出され、0.05-0.3 mg/Lの硫化水素の存在が現場pHから求められたが、9月4日には大幅に減少しており、汐川干潟上に湧昇したと考えられた(図(2)-13)。

干潟上の測点4では4回の採取日とも二枚貝類が4,1000個体/m²以上の高密度で生息しており、ほとんど全てがアサリで占められていた。9月4日に測点4の海底を潜水して観察したところ、海底一面に水管を伸ばしたアサリ稚貝が這い出していた。上述のように、干潟上の測点4では、8月31日から9月6日にかけて海底が貧酸素水に断続的に覆われたため、アサリ稚貝が酸素欠乏のため這いだしたものと考えられる。D.O.が回復した9月8日に再度海底を観察したところ、這い出したアサリ稚貝は認められず、潜砂している個体が多く認められた。測点4では貧酸素水の襲来前後でアサリ稚貝の個体数密度にほとんど差が無く、貧酸素化によるへい死を免れた。これは貧酸素水の湧昇が比較的短時間で収束したためと考えられる。航路・泊地の測点8、9、10では、6月18日にはシズクガイやイトゴカイといったマクロベントスの生息が認められたが、7月30日以降はマクロベントスの生息密度はほぼ0となった。航路・泊地の測点では7月末にかけて、成層の発達に伴い底層の貧酸素化が進行しており、このためマクロベントスがへい死したのと考えられる。汐川干潟上の測点11、12、13では、9月4日の青潮の前後でマクロベントスの個体数密度の減少は認められず、青潮の影響によるへい死は捉えられなかった。

三河湾では8月10日に接近した台風11号の影響により、湾中央底層の無酸素水塊が一旦解消されたほか、六条潟南部の航路・泊地底層においても無酸素状態が解消された。この後、湾中央底層、航路・泊地底層では無酸素化が再度進行したが、台風の擾乱による底層水の酸素環境の好転がなければ無酸素化が極度に進行し、より高濃度の溶存硫化物が蓄積され、9月当初の六条潟への貧酸素水の湧昇、汐川干潟での青潮により底生生態系が大きな打撃を被っていたものと考えられる。

b. 水質及び流動場観測（2015年調査）

図(2)-15上段に六条潟南部の測点6 (Stn. 6) の海底直上におけるD0、塩分、流向流速を、D0の顕著な低下が認められた期間について示す。D0の低下は塩分の上昇を伴っていることから、Stn. 6におけるD0の低下は、深場からの高塩分、低D0水の湧昇によるものと考えられる。8月20日から8月21日にかけてD0が断続的に低下した期間に着目すると、潮時に関係なく、北東向きの流れが持続していた。このときの六条潟南部縁辺部の測点7 (Stn. 7) の底層の状況を見ると、高塩分の貧酸素水に占められ、南西向き、北東向きの流れが交互に認められた(図(2)-15下段)。北東向きの流れの2-4時間後にStn. 6のD0が低下した。これらのことから、この期間のStn. 6におけるD0の低下は南部の深場、すなわち航路・泊地由来の貧酸素水の湧昇によって引き起こされたと考えられる。また、8月25日にもD0の低下が認められたが、このときStn. 6底層では顕著な東向きの流れが持続していた。三河湾湾央(図(2)-4中Stn. 0)にある愛知県水産試験場自動観測1号ブイの観測記録によると、8月24日から8月26日にかけて、強い東風の連吹が捉えられており、Stn. 6底層の顕著な東向きの流れはこれによって引き起こされたと考えられる。8月19日には六条潟前面底層に広範囲に貧酸素水が分布しており(図(2)-7)、このときのD0の低下は、六条潟前面に形成された貧酸素水塊の湧昇によるものと考えられる。このように、三河湾奥部に位置する六条潟におけるD0の低下は、南に隣接する航路・泊地底層と、湾央部底層に形成された貧酸素水塊、それぞれからの湧昇によりもたらされていることが明らかとなった。



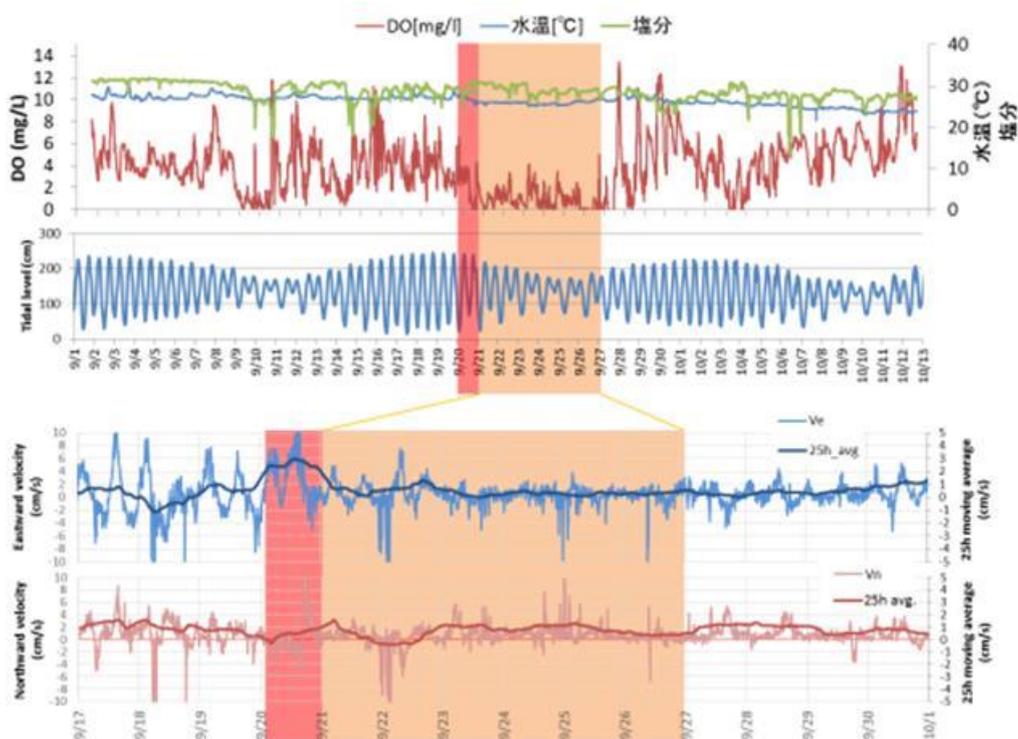
図(2)-15 Stn. 6 (上段) とStn. 7 (下段) における海底直上の溶存酸素 (D0) 飽和度、塩分及び流向流速の推移。黒線は三河港の実測潮位を示す

c. 水質・流動環境と底生生物への影響

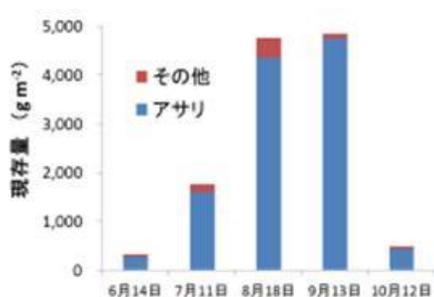
図(2)-16には干潟上測点4における水温・塩分・D0及び流れの連続観測記録の一部(2016年9月1日から10月12日)を示した。干潟上において急激な水温低下・塩分上昇に伴うD0の低下がし

ばしば確認され、貧酸素水塊の干潟上への湧昇が認められた（例えば、9月13日頃、9月20日頃、10月3日頃）。その発生回数は観測期間中で合計8回程度認められた。いずれのケースも台風接近等の東寄りの風が吹いたときに干潟上へ湧昇することが考えられた。図(2)-17にはHS04におけるアサリを含むマクロベントス現存量の推移を示した。6月から8月までアサリの成長等により現存量が増加し、8月から9月は横ばいであったが、10月には大きく低下した。また、干潟上堆積物のコア培養実験では、培養後に生物呼吸や底泥の酸素消費により貧酸素化し、培養3日目には直上水の溶存硫化物濃度は30 mg/Lに達し、その後はほぼ横ばいであった（図(2)-18）。

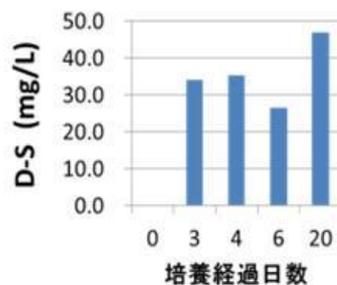
干潟上の連続観測結果より六条潟では貧酸素水塊の湧昇が頻発していることが明らかとなった。特に、9月20日頃のDO低下はその後約1週間程度と長期間にわたり、この期間にマクロベン



図(2)-16 2016年の測点4における水温・塩分・DO及び流速の東方成分・北方成分
矢印は水温の低下、塩分の上昇を伴う貧酸素水塊の湧昇を示す。



図(2)-17 2016年の測点4におけるマクロベントス現存量



図(2)-18 干潟上堆積物のコア培養実験における溶存硫化物の推移

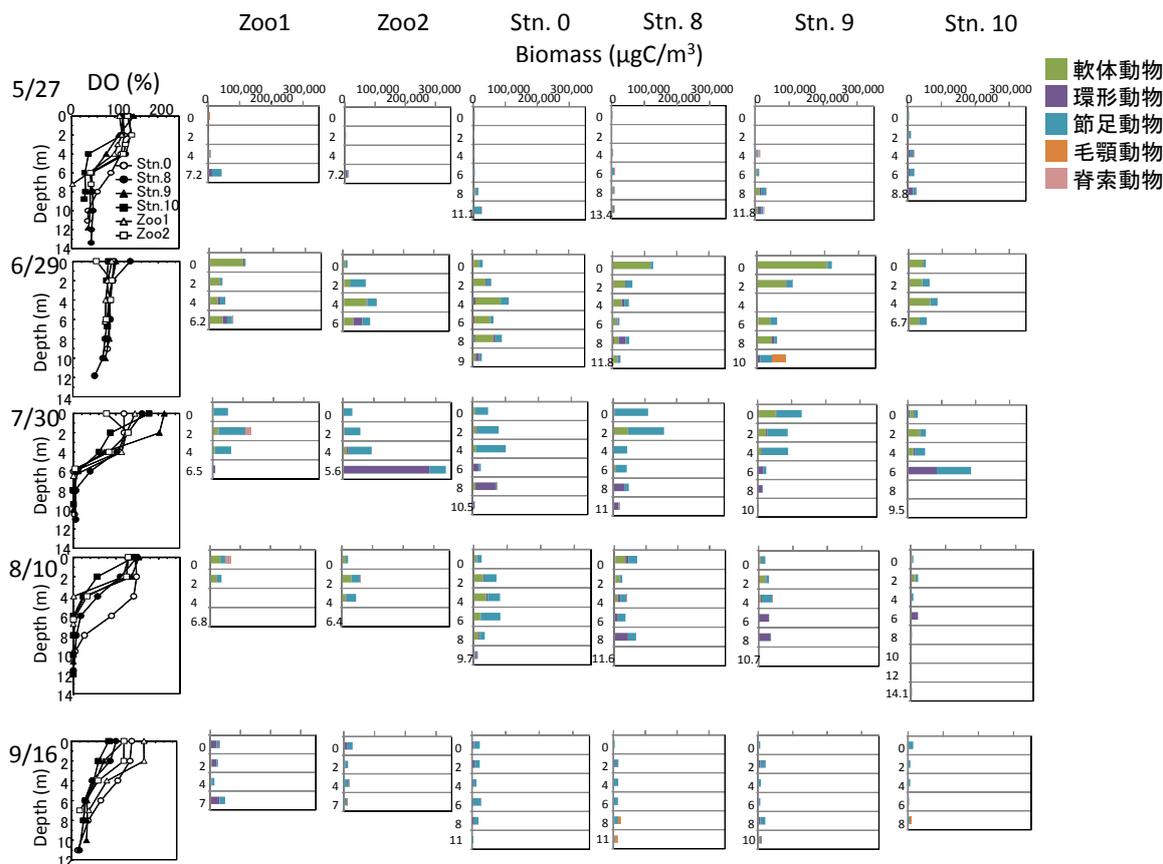
トス現存量が大きく減少し、アサリの大量へい死が認められた。アサリ稚貝は貧酸素のみならず、硫化水素耐性も極めて高く、室内実験では約40 mg/Lの高濃度硫化水素でも24時間暴露ではへい死が認められず、48時間暴露で生残率が低下することが確認されている。アサリ稚貝が大量へい死するためには高濃度の硫化水素が長期間継続する必要があるが、沖合や航路・泊地底層水における溶存硫化物濃度は高くても3 mg/L程度であるため、一時的な青潮ではアサリ稚貝の大量へい死を説明することは出来ない。

一方で、干潟上堆積物のコア培養実験から干潟上生物のへい死の連鎖により干潟上で高濃度の硫化水素が生成されている可能性が考えられた。すなわち、六条潟では台風接近等の気象イベントを契機として青潮が発生し、その後、小潮期に入るなど静穏環境を必要条件とした上で、干潟上生物のへい死の連鎖により干潟上で高濃度の硫化水素が生成され、アサリ稚貝の大量へい死を引き起こしている可能性が考えられた。

2) 貧酸素化が動物プランクトン現存量に与える影響評価

a. 湾央及び干潟周辺域、航路・泊地の鉛直分布

図(2)-19に各測点における、動物プランクトン各種の炭素現存量を示す。5月27日はいずれの測点においても顕著な底層の貧酸素化は認められなかったが、水柱を通じて現存量は低かった。このときいずれの測点でもポンプアップされた海水にクラゲが相当量混入しており、クラゲの

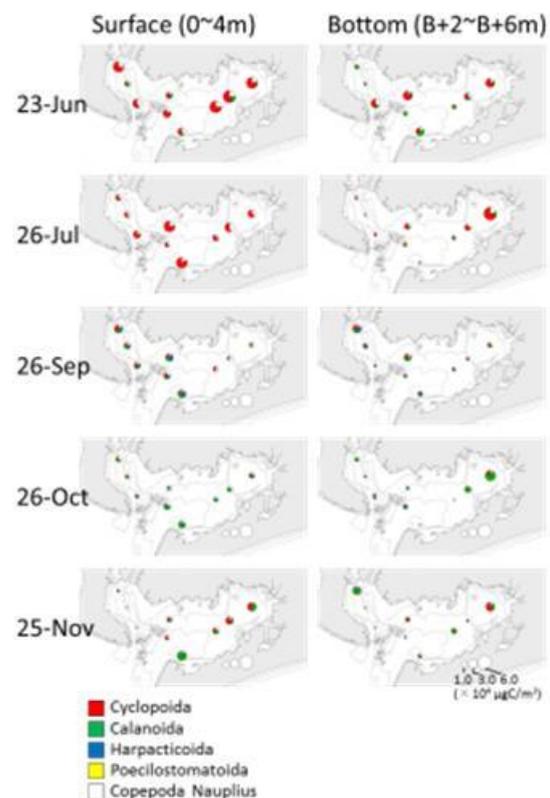


図(2)-19 各測点における溶存酸素 (DO) 飽和度鉛直分布と動物プランクトン炭素現存量

生息密度が高かったと考えられる。動物プランクトン現存量が低かった原因として、クラゲによる捕食もしくはクラゲ混獲による採集効率の低下の可能性が考えられるが特定はできなかった。6月29日は依然として底層の貧酸素化は認められなかったが、いずれの測点も水柱を通じて、軟体動物（主に二枚貝類の幼生で占められた）が出現し、プランクトン現存量の主体を占めていた。7月30日には、底層に貧酸素水塊が形成されていた。各測点とも表層で節足動物の現存量が増加したのに対し、貧酸素化していた底層は、環形動物（ゴカイ類の幼生で占められた）を除くと、プランクトン現存量が極めて低くなっていた。表層で増加した節足動物は橈脚類 *Oithona davisae* がほとんどを占めた。8月10日は底層の貧酸素化が継続しており、湾央の測点 0 よりも航路・泊地のデッドゾーンの測点 8、9、10の方がより貧酸素化が発達していた。底層は依然として動物プランクトン現存量が極めて低い一方、表層付近の動物プランクトン現存量がそれまでに比べ減少しており、その傾向は航路・泊地の奥の測点ほど顕著であった。9月16日にはいずれの測点についても底層の酸素濃度が回復したが、動物プランクトン現存量は水柱を通じそれまでよりもさらに低くなった。*Oithona davisae* は夏季に増加すること、卵を抱いたままふ化させるという生殖戦略から貧酸素化には比較的強い種であることが報告されている。夏季の同種の減少については貧酸素水塊への遭遇によるへい死の他、クラゲによる捕食の影響が他海域で報告されている。本研究ではクラゲの現存量を定量していないので、この現象についてはクラゲによる影響は不明確であるが、貧酸素化により上層に *Oithona davisae* が偏在させられることにより、クラゲによる被食強度が増加すると考えられる。いずれにせよ、水柱全体の動物プランクトン現存量の低下に貧酸素化が直接的もしくは間接的に影響していると考えられる。

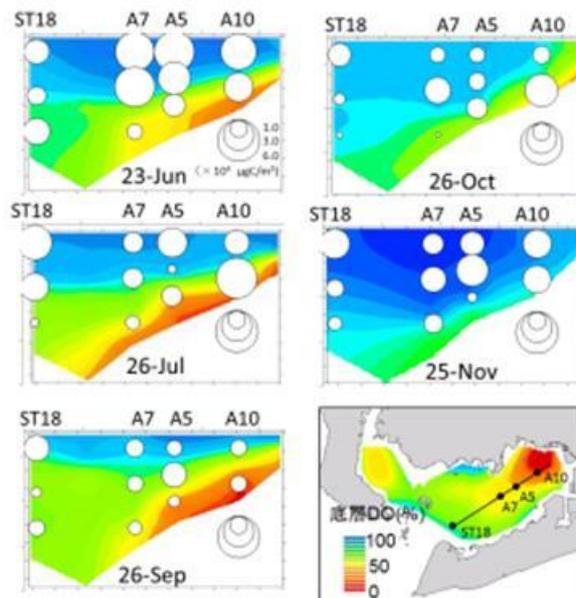
b. 全湾における空間分布

図(2)-20に表層及び底層におけるカイアシ類の炭素現存量の空間分布を示した。2016年6月から10月にかけて現存量が減少する傾向にあったが、10月から11月にかけて現存量が若干回復した。6月及び7月はキクロプス目の *Oithona davisae* が優占したが、9月から11月はカラヌス目の *Paracalanus* spp. が優占した。図(2)-21には渥美湾のD0鉛直断面（A10、A5、A7、ST18）とともにカイアシ類炭素現存量を示した。底層に貧酸素水塊が確認された6月、7月は底層と比べて表層に多く分布する傾向が見られ、9月は他の調査日と比較すると全層で現存量が低かった。また、鉛直混合の進んだ10月、11月は現存量が増加した。前年度の観測結果より航路・泊地デッドゾーンにおける動物プランクトンの鉛直分布は底層の貧酸素化により制限されることが明らかとなっているが、全湾でも同様に貧酸素化の影響を受けていることが考えられた。また、貧酸素化の進行した9



図(2)-20 表層および底層におけるカイアシ類の炭素現存量

月は現存量が低下したが、これは底層の貧酸素化による減耗に加えて、表層への偏在によりクラゲや浮き魚による摂食圧が相対的に増大した可能性が考えられた。なお、9月には優占種の交代が見られることから、今後、優占種群の生活史を考慮に入れた上で貧酸素水塊との関係性を調査・解析する必要がある。一方で、貧酸素化解消後の10月から11月にかけて現存量の回復が見られたが、これは鉛直混合による栄養塩供給に伴い一次生産が増大し、このことによってカイアシ類の生産速度が増加したと考えられた。

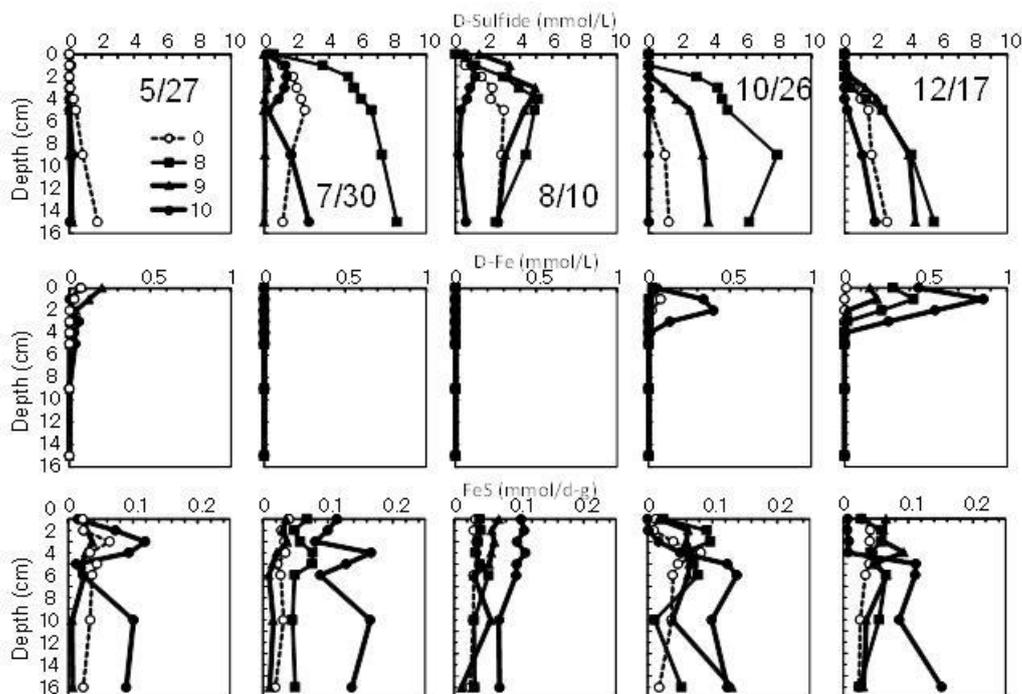


図(2)-21 渥美湾 (A10、A5、A7、ST18) におけるカイアシ類炭素現存量とDOの鉛直断面

(3) 鉄による溶存硫化物発生抑制効果の検討

1) 溶存硫化物と鉄の動態 (2015年調査)

溶存硫化物は各測点とも、春季から夏季にかけて分布深度が上昇し、航路の測点8、9、10では8月10日に底泥表面に溶存硫化物が到達した (図(2)-22)。その後、冬季にかけて表面付近の溶存硫化物が消失し、分布深度が低くなった。溶存態鉄は春季には表面付近に分布していたが、7、8



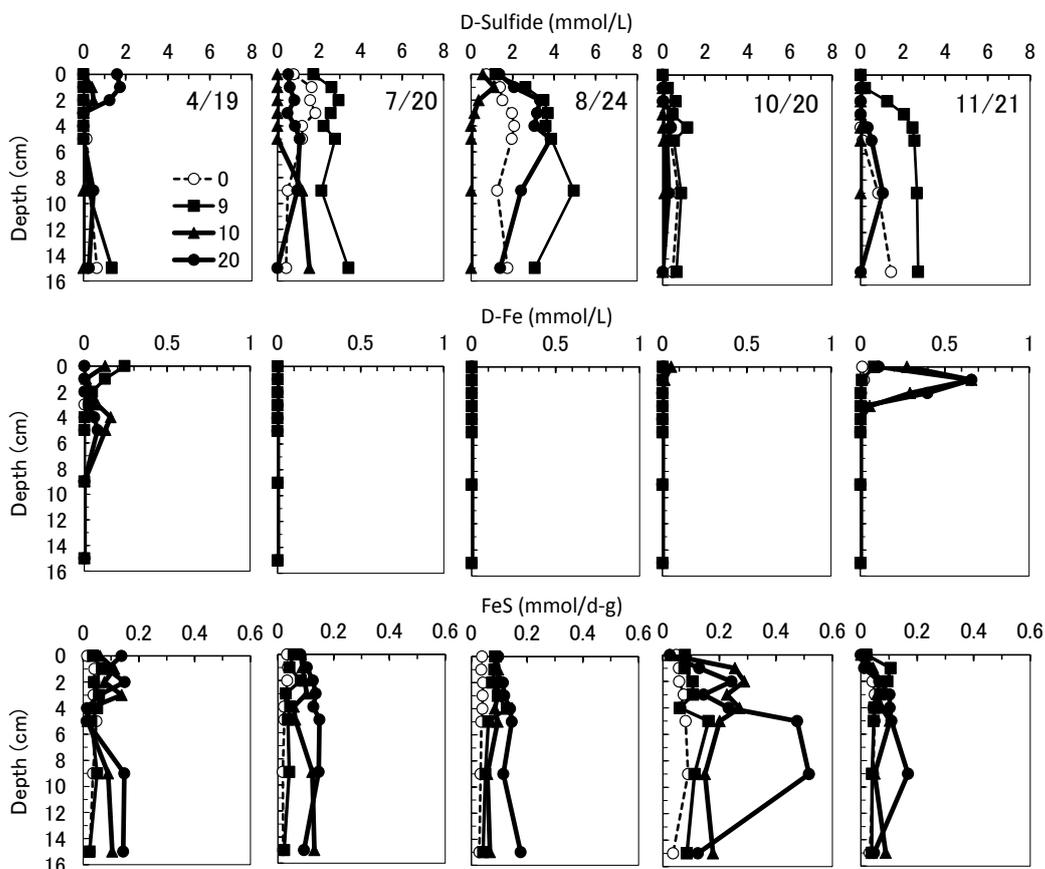
図(2)-22 各測点 (○ : Stn. 0、■ : Stn. 8、▲ : Stn. 9、● : Stn. 10) における溶存硫化物 (上段)、溶存態鉄 (中段)、硫化鉄 (下段) の鉛直分布。

月には全層で枯渇した。その後、10月以降は各測点とも表面付近の濃度が再び上昇した。硫化鉄は、いずれの測点においても、溶存態鉄の枯渇とともに夏季に表面付近の濃度が高くなったが、10月以降は表面付近の濃度が低下した。

2) 溶存硫化物と鉄の動態 (2016年調査)

溶存硫化物は各測点とも、春季から夏季にかけて分布深度が上昇し、航路の測点20では4月に底泥表面で確認され、湾央の測点0及び航路の測点9では7月に、航路の測点10では8月に底泥表面で確認されたが、全ての測点において7月に海底直上水中への溶出が確認された (図(2)-23)。その後、10月に全測点で底泥表面付近の溶存硫化物が消失し、冬季にかけて全測点の溶存硫化物の濃度は低下した。溶存態鉄は春季には表面付近に分布していたが、7月には全測点の全層で枯渇した (図(2)-23)。その後、10月は各測点とも表面付近の濃度が上昇し始め、11月には底泥表面付近において急激に濃度が上昇し、冬季にかけて濃度の上昇が継続して確認された。硫化鉄は、いずれの測点においても、夏季の溶存態鉄の枯渇とともに表面付近の濃度が高くなったが、10月以降は表面付近の濃度が低下していた (図(2)-23)。

このように、春季から夏季にかけて、底泥中で発生した溶存硫化物の一部は溶存態鉄により硫化鉄として捕捉され、溶存態鉄による発生抑制効果が認められたものの、溶存態鉄の枯渇に伴い、底層水中へ溶出していることが明らかとなった。また、秋季から冬季にかけては、硫化鉄は徐々に酸化され溶存態鉄となり、翌夏再び溶存硫化物の発生抑制に寄与することが示唆された。



図(2)-23 各測点 (○ : 測点0、■ : 測点9、▲ : 測点10、● : 測点20) における溶存硫化物 (上段)、溶存態鉄 (中段)、硫化鉄 (下段) の鉛直分布

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

湾央及びデッドゾーンで発生する貧酸素水・溶存硫化物の干潟域への湧昇現象を把握し、底生性魚介類資源の応答、干潟の生息場の重要性が明らかとなり、また、底泥中の溶存硫化物、溶存態鉄、硫化鉄の実態把握から、鉄による硫化物発生抑制が示唆されたことから、漁獲対象生物への影響評価の定量化及び生物被害改善策の構築が可能となり、内湾性魚介類が生活史の一部として利用する干潟・藻場生態系が保たれ、健全な物質循環の持続性に繋がる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で得られた各生活史段階における底生性魚介類の生息状況は、底層溶存酸素量基準の類型指定を行う際に必須の情報として利用される見込み。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 曾根亮太、和久光靖、山田智、鈴木輝明、高倍昭洋：水産海洋研究（投稿中）
「三河湾における底生性魚介類の貧酸素化に対する時空間的応答と減耗過程」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 和久光靖：平成26年度日本水産学会中部支部大会（2014）
「三河湾における環境修復の現状と課題－太平洋側の事例－」
- 2) 曾根亮太・和久光靖・山田智：愛知県水産試験場研究発表大会（2015）
「三河湾における底生性魚介類の分布と環境」
- 3) 曾根亮太・和久光靖・山田智：第9回海の再生全国会議（2015）
「三河湾におけるデッドゾーンの実態とその解消に向けて」
- 4) 和久光靖：全国アマモサミット2015inくまもと・やつしろ（2015）
「三河湾における環境修復の現状と課題」

- 5) 曾根亮太・和久光靖・山田智・石田俊朗・鈴木輝明：水産海洋学会（2015）
「三河湾における貧酸素水塊と底生性水産資源の時空間分布」
- 6) 和久光靖：水産海洋学会地域研究集会-第11回伊勢・三河湾の環境と漁業を考える-（2015）
「三河湾奥部の干潟・浅場における貧酸素水塊・苦潮による生態系被害とその回避策の検討」
- 7) 曾根亮太：水産海洋学会地域研究集会-第11回伊勢・三河湾の環境と漁業を考える-（2015）
「三河湾における貧酸素水塊と底生生物資源の時空間変動」

（3）知的財産権

特に記載すべき事項はない

（4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 平成27年度東三河漁協青年部連絡協議会第1回臨時総会（2016年1月19日、参加者約30名）にて成果紹介
- 2) 平成28年度藻類貝類養殖技術修練会（2016年7月5日、参加者約100名）にて成果紹介
- 3) 愛知県水産試験場研究発表会（2017年2月28日、参加者約90名）にて成果紹介

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

（6）その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) Sugawara, S., M. Suzuki, H. Kamiya, M. Yamamuro, H. Semura, Y. Senga, M. Egawa and Y. Seike: Colorimetric determination of sulfide in microsamples, *Analytical Sciences*, 32, 1129-1131, 2016.
- 2) 矢持進, 有山啓之, 佐野雅基: 大阪湾湾奥沿岸域の環境修復 -堺泉北港干潟造成予定地周辺の水質・底質ならびに底生動物相とマコガレイの貧酸素に対する応答-, *海の研究*, Vol.7, No.5, 1998.
- 3) Yamochi, S., H. Ariyama and M. Sano: Occurrence and Hypoxic Tolerance of the Juvenile *Metapenaeus ensis* at the Mouth of Yodo River, Osaka, *Fishery Science*, 61 (3), 391-395, 1995.
- 4) 浜野龍夫・山元憲一: 漁場におけるシャコの分布や資源量に影響する2つの要因, 走流性と貧酸素耐性に関する研究, *水産大学校*, 53 (3), 117-129, 2005.

(3) 貧酸素及び硫化物に対する浅海域の魚介類の応答

国立研究開発法人国立環境研究所

環境リスク・健康研究センター 生態系影響評価研究室 堀口敏宏・児玉圭太

平成26(開始年度)～28年度累計予算額：46,606千円（うち平成28年度：15,065千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

貧酸素水塊および硫化水素の発生により内湾生態系へのインパクトが生じる過程を明らかにするため、東京湾における現地観測調査を実施した。夏季の貧酸素水塊発生により、湾中央～北部において無生物域がみられるなど、生物量の減少がみられた。硫化水素については、貧酸素水塊が発生した水域・時期において、底質中の濃度が増加することが観察された。また、湾北部の海底直上水において1 mg/l未満の低濃度ながらも硫化水素が検出され、海底から硫化水素の溶出が生じていることが示唆された。

また、貧酸素および硫化水素が底棲魚介類の生活史初期個体に及ぼす影響を調査するための室内実験系を構築し、アサリ幼生・稚貝に対して硫化水素の曝露実験を実施した。その結果、幼生は成長にともない硫化水素耐性が増強したが、着底後の稚貝は逆に成長にともない硫化水素耐性が減弱する、という結果が得られ、成長にともない硫化水素耐性が変化することが示唆された。また、異なる水温帯で実験を行った結果、水温が上昇するにつれ硫化水素耐性が減弱する傾向が認められた。次に、ヨシエビの幼生・稚エビについても硫化水素曝露実験を実施した。その結果、1 mg/l未満の低濃度の硫化水素曝露により、生残率の著しい低下が認められた。東京湾における硫化水素濃度の観測において、湾奥部の海底直上水で0.1-0.8 mg/lの硫化水素が検出されていることから、本実験で生残率の著しい低下がみられた濃度範囲の硫化水素に実海域で遭遇し大量斃死が生じることも有り得る。また、今回のアサリ・ヨシエビの一連の実験により、硫化水素耐性は種によって大きく異なることが示された。既往知見から貧酸素耐性が比較的高いと考えられているヨシエビにおいて、低濃度の硫化水素による同時曝露により著しい生残率低下が認められたことより、青潮の来襲にともなう貧酸素・硫化水素曝露によって、棲息する生物種の多くにおいて大量斃死が生じるものと推察される。

[キーワード]

底棲魚介類、生活史初期、硫化水素、貧酸素水塊、東京湾

1. はじめに

わが国の沿岸域においては栄養塩負荷の総量規制の実施により全窒素・リン濃度の減少など水質改善の傾向が認められている。しかし、各地の沿岸域において貧酸素水塊の面積規模拡大および発生期間の長期化が生じており、また生物量の減少や、種組成の単調化など生物相の衰退が観察されている。さらに硫化物を含有する貧酸素水塊の湧昇により生じる青潮にともない、浅海域

の生物の大量斃死も生じている。こうした状況を鑑みると、貧酸素水塊や硫化物が生物の生残や再生産に悪影響を及ぼしているものと推察されるが、そのメカニズム解明のためには現場観測を行うとともに、室内実験による検証も実施する必要がある。

貧酸素および溶存態硫化物（硫化水素、硫化水素イオン、硫黄）が海産生物に及ぼす影響を明らかにするための室内実験に関しては、これまでに国内外において多くの研究事例がある。しかし、生物に対して毒性の強い硫化水素の単体に限った生態影響評価については、硫化水素濃度の測定が困難であったため、研究例は殆ど無い。本研究では、近年開発された硫化水素センサーを利用し、東京湾における現地調査により硫化水素の経時変化を明らかにする。また、飼育下において硫化水素を海産生物に曝露する室内試験法を開発し、斃死を引き起こす硫化水素濃度を室内実験により明らかにする。

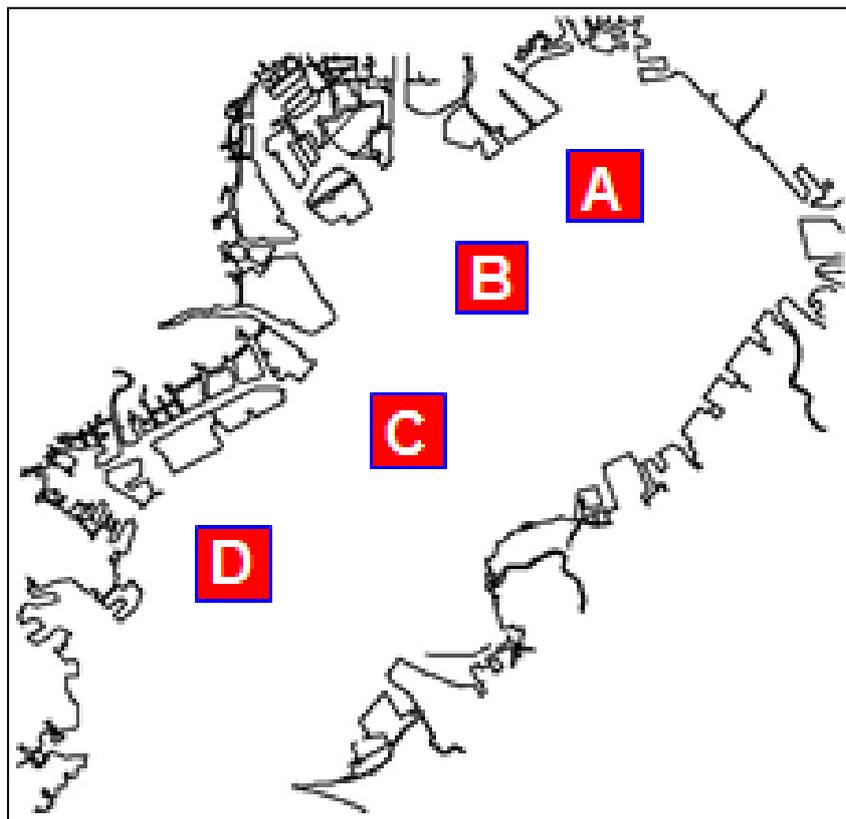
2. 研究開発目的

東京湾において貧酸素水塊の形成や硫化水素発生後に内湾生態系へのインパクトが生じる過程を明らかにするため、現地観測調査を実施する。貧酸素および硫化水素が底棲魚介類に及ぼす影響を調査するための室内実験系を構築する。そして、曝露実験を実施し、生活史初期個体の斃死を引き起こす硫化水素濃度および曝露時間を明らかにする。

3. 研究開発方法

東京湾内湾部において2014年6月～12月、2015年7月～12月、および2016年7月～10月の期間に毎月1回の頻度で、底曳網による底生生物採集、CTD-D0ロガー（JFEアドバンテック製RINKO profiler）による表層（海面下50cm）、底層（海底直上50cm）の水温、塩分および溶存酸素濃度の測定を行った。調査地点は次の4定点とした（図(3)-1）：St. A夏季に長期間無生物域となる湾奥・浚渫窪地・航路付近、St. B夏季に無生物域となる湾奥・沖合の平場、St. C 湾中央・貧酸素～通常酸素濃度の境界水域、St. D南部沖合、中ノ瀬周辺水域（対照地点）。また、不攪乱柱状採泥器により採取した海底直上水（海底表面から5cmおよび10cm）および底泥（海底表面から0, 1, 2, 3, 4 および5 cm）の硫化水素濃度をユニセンス社製マイクロセンサーを用いて測定し、あわせて海底直上水（海底表面から5cm）の溶存酸素濃度を蛍光式DOセンサー（YSI製ProDO）により測定した。以上により貧酸素水塊ならびに海底直上水および底泥中の硫化水素の経時変化および空間分布を調べた。また、併せて底生生物の個体数・重量密度および多様度指数（Shannon's H' ）も調べた。そして、2014～2016年の調査期間における水質、底質および底生生物相の時空間的変動を明らかにした。

また、貧酸素水塊および硫化水素等硫化物が海産生物の初期生活史段階の生残等に及ぼす影響を調べるための室内実験系を構築し、溶存酸素濃度、硫化水素濃度およびpHの安定性を検討した。次に、構築した実験系を用いて、アサリ幼生・稚貝、およびヨシエビ幼生・稚エビの硫化水素耐性を明らかにするための曝露試験を実施し、個体の斃死を引き起こす硫化水素濃度を調査した。



図(3)-1 調査定点

4. 結果及び考察

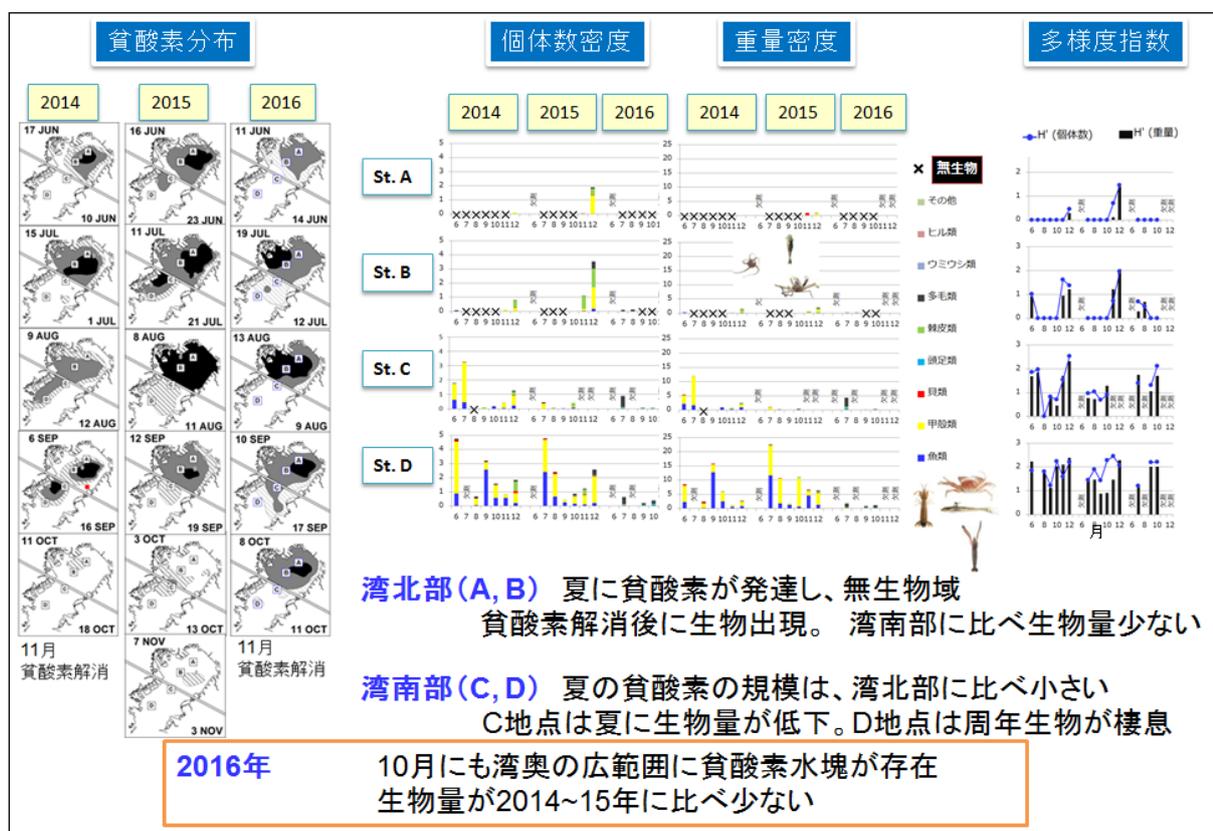
(1) 東京湾における貧酸素水塊、底生生物群集および硫化水素濃度の時空間的変動

溶存酸素濃度2 mg/l未満の貧酸素水塊は、2014年および2016年においては6月から10月、2015年には6月から11月まで発生が認められた(図(3)-2)。溶存酸素濃度0 mg/lの無酸素水塊は、2014年には湾北部のSt. Aで6-7月、St. Bで6-7月および9月、そして湾中央部のSt. Cで9月に発生が認められた。2015年には無酸素水塊は6-9月に湾北～中央部にかけて認められ、特に8月は北部全域に拡大した。2016年には無酸素水塊は7月以降に湾北～中央部にかけて認められ、10月にも貧酸素水塊は湾北部広域に残存し北東部には依然として無酸素水塊が存在していた(図(3)-2)。貧酸素水塊は2014年および2016年は11月、2015年は12月に解消した(図(3)-2)。

底生生物の個体数密度、重量および多様度指数は湾北部(St. A, B)で低く、湾中央部から南部(St. D)にかけて高い傾向にあった(図(3)-2)。特に、湾北部のSt. AおよびSt. Bでは夏季に無生物域となり、貧酸素水塊が縮小および解消する10～11月以降に当年生まれの新規年級群の加入による生物相の回復が認められた。2015年は、エビジャコ、イッカククモガニ、およびクモヒトデ類の加入量が2014年に比べ多かった。2016年は試験底曳を実施した7-10月の期間にSt. Aでは無生物であり、St. Bでも7～8月の生物量は非常に少なく、9-10月は無生物で、2014-2015年に比べ生物量が低下した。2015年および2016年は11-12月に試験底曳を実施できなかったため、生物相回復の程度についての知見は得られなかった。湾中央部のSt. Cも湾北部と同様に個体数・重量密度は夏季に減少し、貧酸素水塊が縮小・解消する10月以降に増加する傾向がみられた。湾南部

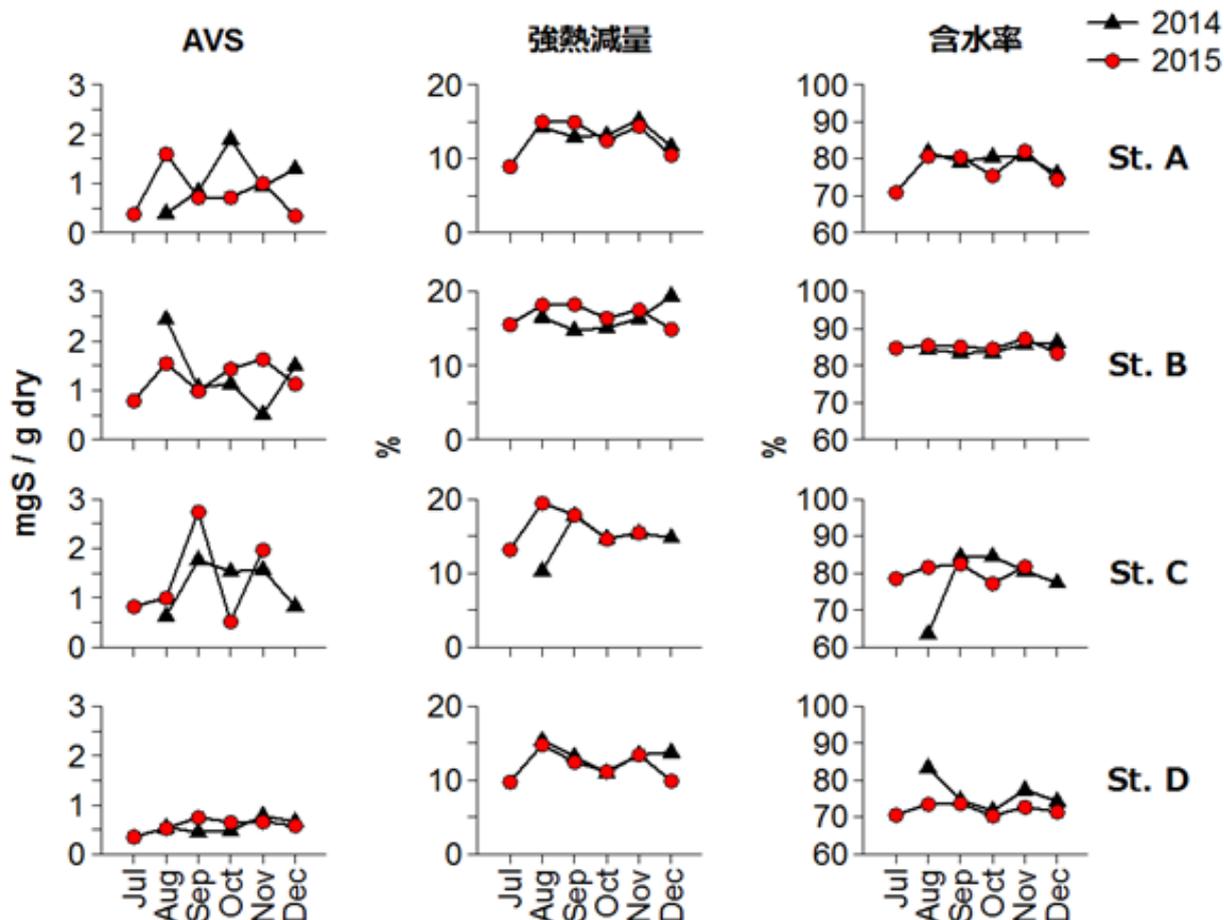
のSt. Dでは、周年生物が生息し、無生物域とはならなかった（図(3)-2）。湾中央St. Cから南部St. Dにかけての2016年の生物量は2014-2015年に比べ低く、2016年には湾全域において底棲魚介類の生物量が低下したことが示唆された（図(3)-2）。

種の多様度については、湾北部（St. A, B）では、エビジャコ、イッカククモガニおよびクモヒトデ類など少数の種が優占したが、湾中央から南部（St. C, D）では魚類（ハタタテヌメリ、スジハゼ、ゲンコ、テンジクダイ）および甲殻類（シャコ、オニテッポウエビ、テナガテッポウエビ、ケブカエンコウガニ、フタホシシガニ）などが優占し、湾北部に比べて種の多様度は高かった（図(3)-2）。



図(3)-2 東京湾の貧酸素水塊および底生生物の経月変化

2014年および2015年に不攪乱柱状採泥器により採取した底泥試料について、底泥表面から深さ5cmまでの表層泥サブサンプルをとり、酸揮発性硫化物（AVS）濃度、強熱減量および含水率を測定した（図(3)-3）。経月的に変化する傾向がみられたが、各因子間で増加・減少する時期が異なっており、一貫した季節的な変動は見られなかった。年平均値はAVS、強熱減量、含水率のいずれにおいても湾北部（St. A及びB）または湾中央部（St. C）で高く、湾南部（St. D）で最も低い値が観測された。



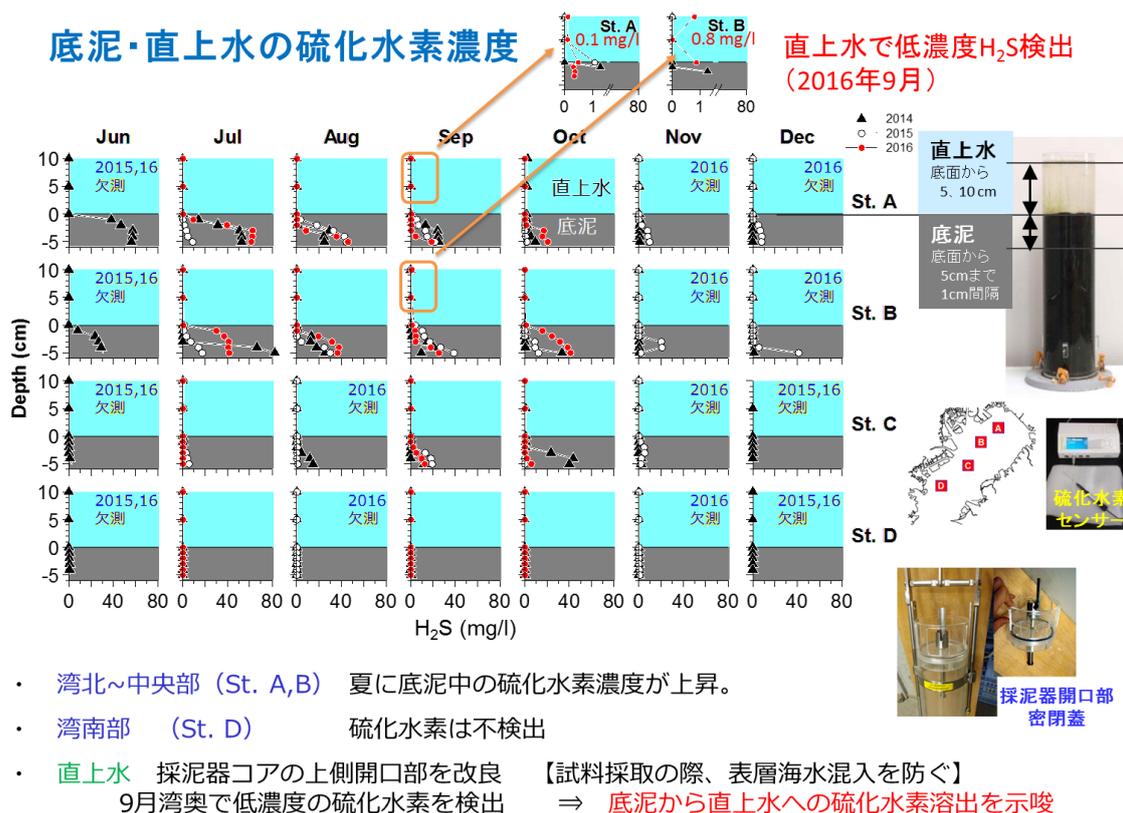
図(3)-3 各定点における酸揮発性硫化物濃度、強熱減量および含水率の経月変化

海底直上水（海底表面から5cmおよび10cm）および底泥（海底表面から0, 1, 2, 3, 4および5 cm）の硫化水素濃度の測定結果を図(3)-4に示した。

湾北部（St. A, B）の底質において、硫化水素は2014年には6-10月、2015年と2016年には調査を実施した7-12月および7-10月の全ての月において検出された。湾中央部（St. C）では、2014年には8-10月、2015年には7-11月、2016年には9-10月に底泥中に硫化水素が検出された。湾南部（St. D）では全ての年において、底泥中に硫化水素は周年検出されなかった。St. A-Cのいずれの定点においても硫化水素濃度のピークは底泥表面下3~5 cmの層においてみられた。経月変化をみると、St. A, Bともに貧酸素水塊が発達する7-9月に硫化水素濃度の上昇がみられた。貧酸素水塊が縮小・解消する11月以降において、St. A, Bの底泥中に2014年には硫化水素は検出されなかったが、2015年には硫化水素の発生が認められ、特に12月のSt. Bの底泥表面下5 cm層では41 mg/lの高い値が検出されたが、この現象についての原因や機構は不明である。

海底直上水においては、2014年と同様、2015年においても調査期間を通して硫化水素は検出されなかったが、これは不攪乱柱状採泥器を海底から海面に引き上げる際にコア上部開口部から表

層・中層の海水がコア内に混入することに起因していると推察された。2016年の調査において、底泥試料採取時にコア上部を密閉するための改良を施した蓋を作製し（図(3)-4）、不攪乱状態の海底直上水について硫化水素濃度の測定を行った。その結果、9月にSt. Aの海底直上5 cmおよび10 cm層において0.1 mg/l、St. Bの海底直上10 cm層において0.8 mg/lの濃度の硫化水素を検出した。この結果は、東京湾北部海域における底泥から海底直上水へ硫化水素の溶出が生じていることを示唆する。

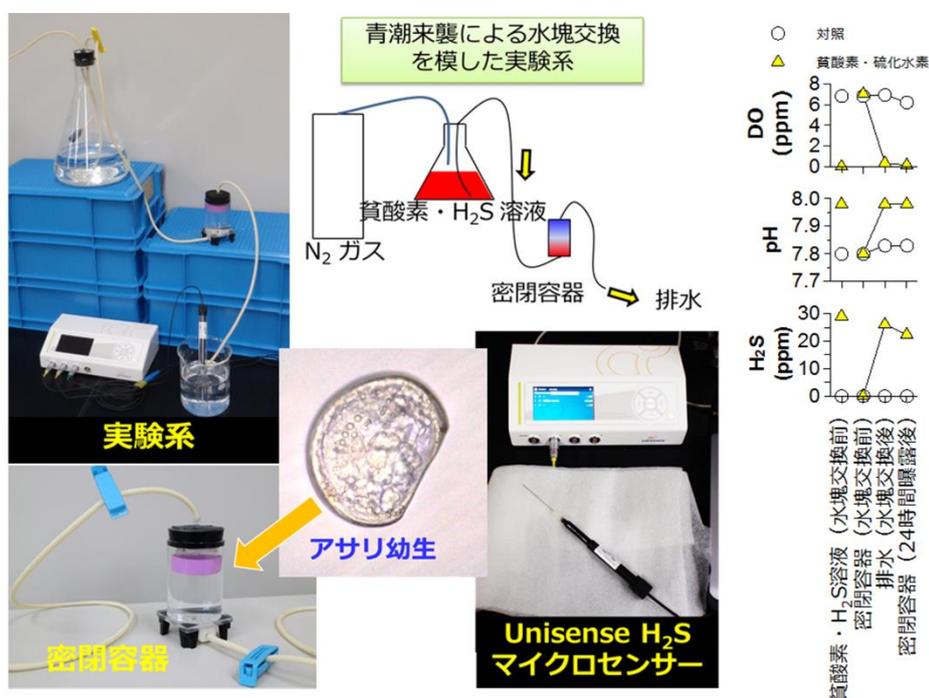


図(3)-4 各定点における底泥および海底直上水の硫化水素濃度の経月変化

(2) 硫化水素曝露の生態影響を調査するための実験系の構築

硫化水素が底棲生物の初期生活史段階の生残に及ぼす影響を調査するための実験系を構築した（図(3)-5）。アクリルパイプ（外径54 mm、厚さ2 mm、長さ74 mm）の片端に、正方形のアクリル板（一辺54 mm、厚み5 mm）を取り付けた。反対側のアクリルパイプ端は開口したままとし、ここにゴム栓（天然ゴム：上部直径56 mm、下部直径44 mm）を取り付けることで、容器を密閉する構造とした。ゴム栓を装着した状態の容器容量は130 mlである。この密閉容器の底部から注水し、上部から排水を行うため、底部アクリル板および上部開口部に取り付けるゴム栓にガラス管（内径3 mm、厚み1 mm）を接続した。また、生活史初期における微小サイズ生物（浮遊期幼生）が排

水口から逸失することを防ぐため、エッペンドルフ管の上部25 mmを切断したものをゴム栓下部に接着し、エッペンドルフ管蓋に直径約25 mmの穴を開け、目合60 μm のプランクトンネット生地を貼付け、これをゴム栓蓋に接着したエッペンドルフ管本体に接続した。容器への注水、および容器からの排水を行うために、底部アクリル板とゴム栓に取り付けたガラス管にファームドチューブ（内径3 mm、厚み1 mm）を接続した。ゴム栓を乾燥状態で実験に用いると、ゴム栓間隙に含まれる空気が試水で満たした容器内に溶け出し、容器内の溶存酸素濃度を上昇させてしまうことが、予備的実験により判明したため、実験を行う1週間前から窒素曝気水にゴム栓を浸してゴム栓間隙内の空気を十分に除いてから、実験を実施した。



- アサリを收容した密閉容器内海水をサイフォンにより貧酸素・ H_2S 溶液に置換
- 容器出入口に接続したチューブをとめ、所定の曝露時間、密閉状態を保持
- 24時間経過後、密閉容器内のDO, pHの変化少ない、一方、 H_2S は27%低下

図(3)-5 硫化水素曝露実験系

三角フラスコ内にて窒素曝気し無酸素状態とした2Lの海水に、硫化ナトリウム九水和物を溶解することにより、所定濃度の硫化水素を含有した海水（硫化水素海水）を作成した。三角フラスコと上述の実験容器をファームドチューブで接続し、サイフォンの効果を利用して三角フラスコ内の硫化水素水を実験容器に送水することにより、容器内の海水交換を行った（図(3)-5）。

実験開始前後の水質の変化を調べるため、生物を收容せず海水のみ満たした実験容器に硫化水素水を送液した。そして、実験開始前の三角フラスコ内硫化水素水、実験開始前の実験容器内の

海水、実験開始し送液が完了した時点における実験容器からの排水、および24時間経過後の実験容器内の海水について、硫化水素マイクロセンサー（ユニセンス社製）により硫化水素、蛍光式DO計（YSI製Pro-OD0）により水温とDO、およびpH計（TOA-DKK製）によりpHを測定した（図(3)-5）。実験区は通常酸素濃度かつ硫化水素を含まない対照区、および貧酸素+硫化水素区の2区を設けた。対照区では、実験の前後において溶存酸素濃度（6.2-7.0 mg DO/L）、pH（7.80-7.83）ともに大きな変動は無く、硫化水素も検出されなかった。一方、貧酸素+硫化水素区においては、実験容器内の海水の溶存酸素濃度およびpHは、換水完了後には送水元の三角フラスコの硫化水素水とほぼ同レベルとなり、24時間の実験終了後にも大きな変化はみられなかった。硫化水素濃度は、送水元の三角フラスコでは29 mg/l、換水完了後の実験容器からの排水では26 mg/lであり、換水による大きな減少はみられなかった。しかし、24時間の実験終了後には実験容器内の海水中硫化水素濃度は22 mg/lとなり、開始時の濃度から27%減少した。この減少は硫化水素の揮発等による損失が考えられるが、今後、実験の前後の試験海水を用いて溶存態硫化物濃度をメチレンブルー法により分析・定量することにより、硫化水素濃度の減少要因を精査する必要がある。

（3）アサリ幼生および稚貝の硫化水素耐性

貧酸素化により底泥より発生、または沿岸に湧昇した青潮水に含まれる硫化水素がアサリ幼生・稚貝に及ぼす生態影響を調べるため、室内実験により幼生・稚貝の斃死を引き起こす硫化水素濃度を調査した。2016年5月17日に愛知県田原市の三河湾沿岸において採集されたアサリ成貝を購入し、愛知県水産試験場（蒲郡市）の海水実験施設に搬送・収容した。収容したアサリ成貝は5月17日夕方に産卵および放精を開始したため、飼育水槽内で授精を行った。この受精卵から孵化した幼生を蒲原ほか（2013, 水産海洋研究 77, 282-289）の飼育方法に従ってD状期、アンボ期、フルグロウン期および稚貝まで育成し、以降の実験に供した（図(3)-6）。

2016年5月17日
田原市福江町沿岸で採集
した親貝を用い人工授精

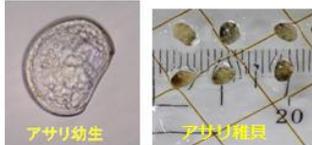
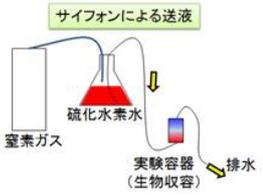



- ・ D状期 (日齢3d, 殻長0.10 mm)
- ・ アンボ期 (6~10d, 0.12 mm)
- ・ アンボ~フルグロウン移行期 (16~20d, 0.17 mm)
- ・ フルグロウン期 (22~26d, 0.30 mm)
- ・ 着底稚貝 (69~73d, 0.73 mm)

● 実験設定

C: 対照
H: 貧酸素
H + H₂S: 硫化水素水 (Na₂S溶液)
3濃度区、各濃度区3容器

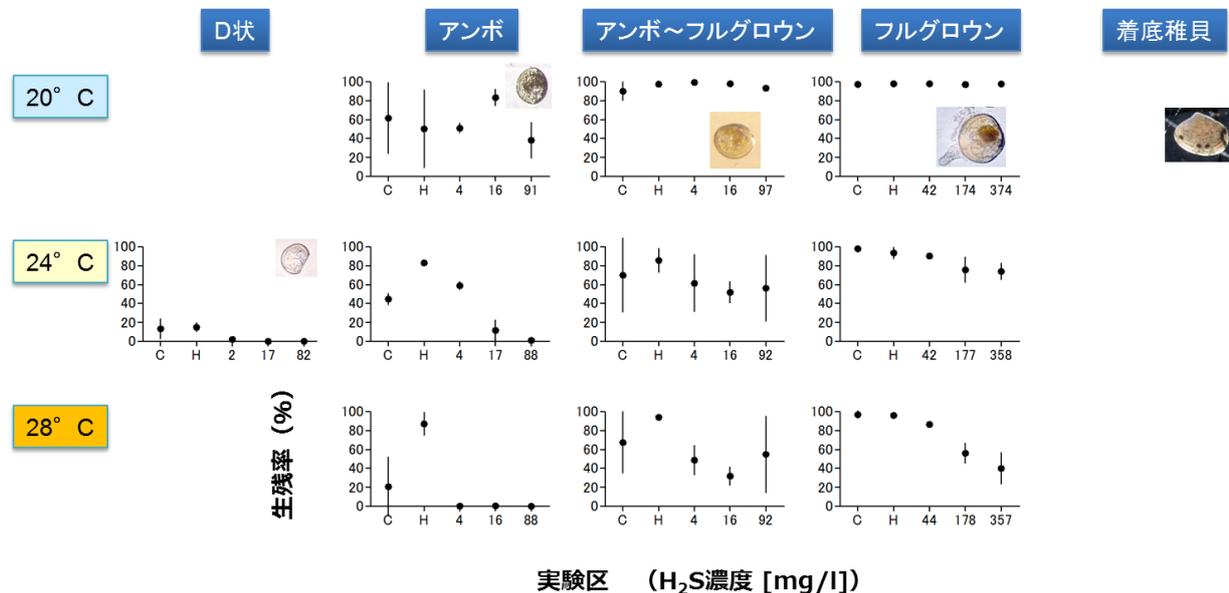
曝露時間: 24時間
水温: 20°C、24°C、28°C pH 7.7


図(3)-6 室内実験に供したアサリ幼生・稚貝、および実験設定の概要

幼生 (D状期、アンボ期、フルグロウン期) および稚貝について、開発した実験系 (図(3)-5) を用いて止水状態において硫化水素含有海水に曝露して一定時間経過後の生残率をみることにより、幼生・稚貝の硫化水素耐性を調査した。実験区は、対照区 (通常酸素濃度、硫化水素を含まない)、貧酸素区 (≤ 0.5 mg DO/L、硫化水素を含まない)、および貧酸素+硫化水素区 (≤ 0.5 mg DO/L、硫化水素を含む) を設定した。貧酸素+硫化水素区については、複数の硫化水素濃度の実験区を設けた。各発達段階における実験において適用する硫化水素濃度の範囲は2015年度に実施した予備的実験の結果をもとに設定した。各実験区につき3容器の繰り返し (triplicate) を設け、実験を行った。実験結果を (図(3)-7) に示した。

アサリ幼生・稚貝 硫化水素耐性（24時間曝露試験）



- ・ 成長にともない貧酸素・硫化水素耐性が高まる傾向
- ・ 水温が高くなると硫化水素耐性は減弱
- ・ アンボ期の対照区生残率が低い ⇒原因不明

図(3)-7 アサリ幼生・稚貝に対する硫化水素24時間曝露実験の結果

D状期幼生においては24°Cのみ実験を行った。24時間曝露後の生残率は、対照区および貧酸素区においてそれぞれ13%および15%であった。この結果は、D状期には自然死亡する個体が多いが、貧酸素状態では通気対照区に比べ生残率は大きく低下せず、貧酸素に対する耐性を有することを示唆する。一方、生残率は硫化水素の添加により著しく減少し、2 mg/l区で2%、17 mg/lおよび82 mg/l区ではいずれも0%であった。すなわち、D状期においては、2 mg/l以上の硫化水素に曝露された場合、大量斃死が生じる可能性がある。

アンボ期幼生においては、3つの水温帯（20、24、28°C）において実験を実施した。対照区の生残率は20～61%の範囲でばらつきがみられた。一方、貧酸素区では20°Cでは生残率は50%と低いが、24°Cでは83%、28°Cでは87%と高かった。対照区と貧酸素区が生残率のばらつきについて原因は不明であるが、アンボ期においては供試個体の健全性の差が大きく、実験区間の生残率のばらつきにつながった可能性がある。アンボ期幼生を硫化水素（4～91 mg/l）に曝露したところ、20°Cでは生残率は46%～93%となり、対照区・貧酸素区に比べて明確な生残率低下は見られなかった。一方、24°Cでは17 mg/l以上、28°Cでは4 mg/l以上の硫化水素濃度への曝露により、生残率の著しい低下が認められた。一方、24°Cでは4 mg/lの硫化水素曝露でも51%の個体が生残しており、

D状幼生に比べて硫化水素耐性が増強していることが示唆された。また、これらの結果より、水温上昇および硫化水素濃度増加にともない、アンボ期幼生の生残率が低下することが示された。

アンボ～フルグロウン移行期においては、対照区の生残率はばらつきがみられるものの、67-97%であった。また、貧酸素区での生残率は87～98%と高く、本発達段階においては24時間の貧酸素曝露を原因とする大量斃死は生じないと考えられる。また、アンボ期とほぼ同範囲の濃度の硫化水素（4～97 mg/l）に曝露したところ、生残率はアンボ期に比べ高い結果となった。すなわち、最も高い濃度の硫化水素曝露区においても、生残率は20℃（97 mg/l）において93%、24℃および28℃（92 mg/l）においてそれぞれ56%および54%、となり、硫化水素耐性の増強が認められた。

フルグロウン期においては、対照区および貧酸素区での生残率は94-98%と高く、本発達段階においても24時間の貧酸素曝露による大量斃死は生じないと考えられた。また、アンボ～フルグロウン移行期に比べ、曝露する硫化水素濃度を大幅に高く設定し実験を行った（42-374 mg/l）。その結果、20℃では高い生残率で殆ど斃死がみられず（97-98%）、24℃も358 mg/lで74%と高い生残率を示した。一方、28℃では生残率は硫化水素濃度上昇にともない減少し、44 mg/lでは87%であったが、357 mg/lでは40%にまで低下した。

稚貝期においては、対照区および貧酸素区で斃死個体はみられず、フルグロウン期同様に24時間の貧酸素曝露による大量斃死は生じないと考えられた。フルグロウン期と同様の濃度範囲の硫化水素（41～360 mg/l）に曝露したところ、20℃および24℃では斃死個体は無く、高い硫化水素耐性を示した。一方、28℃ではフルグロウン期と同様に生残率は硫化水素濃度上昇にともない減少し、42 mg/lでは100%であったが、359 mg/lでは17%にまで低下した。

以上の24時間曝露実験の結果を総合すると、アサリ生活史初期における硫化水素耐性は、孵化後の発達にともない増強し、フルグロウン期から稚貝にかけて非常に強い硫化水素耐性を獲得すると推察される。また、生残率は水温上昇および硫化水素濃度増加にともない低くなると考えられた。

また、2015年度に六条潟で採集した天然の稚貝を用いた硫化水素耐性の予備実験では、稚貝の成長にともない硫化水素耐性が減弱する傾向が示された。今後、本実験で得た人工孵化による種苗を育成して硫化水素実験を行い、稚貝の成長にともなう硫化水素耐性の減弱が生じるかどうか確認する必要がある。

次に、稚貝について、より長時間の硫化水素曝露、および間欠的な硫化水素曝露の影響を調べるための実験を行った。稚貝の供試個体は24時間曝露試験と同じく2017年5月17日に人工孵化により得られた種苗を育成したものをを用いた（図(3)-6）。水温は24℃のみとし、48時間連続、および48時間間欠（24時間硫化水素曝露後に、空気曝気した海水における24時間の回復期間を経て、再度24時間の硫化水素曝露を実施）の曝露実験を行った。結果を（図(3)-8）に示した。

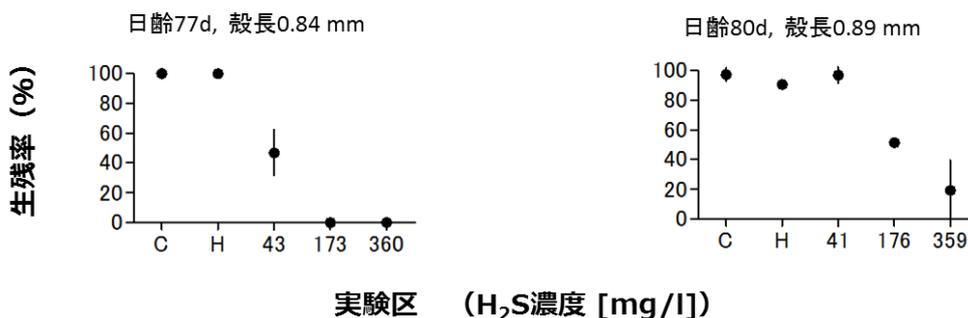
アサリ稚貝 硫化水素耐性（48時間連続・間欠曝露試験）

水温 24℃、pH 7.7



48時間連続曝露

48時間間欠曝露
(24h曝露～24h回復～24h再曝露)



- ・ 24時間連続曝露と比べ、生存率低下
- ・ 間欠曝露では、連続曝露と比べ生存率が高い

図(3)-8 アサリ稚貝に対する硫化水素48時間連続・間欠曝露実験の結果

48時間の連続曝露および間欠曝露について、いずれも対照区と貧酸素区の生存率は高く

(91-100%)、48時間の貧酸素曝露による大量斃死は生じないと考えられた。硫化水素の48時間連続曝露により、生存率は43 mg/lで47%、173 mg/l以上で0%となった。同様の水温・硫化水素濃度の範囲で24時間の曝露実験を行った場合の生存率は100%であった(図(3)-7)ことから、曝露時間が長くなると生存率が減少することが示された。一方、48時間間欠曝露では、生存率は41 mg/lで94%と高く、176 mg/lで49%、最も高い濃度の359 mg/lでも12%となり、48時間連続曝露した場合に比べ、各硫化水素濃度の生存率は高い結果となった。このことは、硫化水素への曝露が中断された場合、個体が回復し、硫化水素への再曝露に耐えることができるようになる可能性があることを示唆する。

(4) ヨシエビ幼生および稚エビの硫化水素耐性

貧酸素化により底泥より発生、または沿岸に湧昇した青潮水に含まれる硫化水素がヨシエビ幼生・稚エビに及ぼす生態影響を調べるため、室内実験により幼生・稚エビの斃死を引き起こす硫化水素濃度を調査した。2016年8月19日に愛知県栽培漁業センターにおいて人工孵化した種苗の提供を受け、これらの幼生・稚エビを愛知県水産試験場(蒲郡市)の海水実験施設に搬送・収容し、

飼育実験に供した。(図(3)-9)。

硫化水素がヨシエビ幼生・稚エビの生残に及ぼす影響

目的 斃死を引き起こす硫化水素濃度を探索

2016年8月19日
愛知県栽培漁業センターで
人工孵化した個体を使用

- ・ ノープリウス期 (日齢, 2d)
- ・ プロトゾエア期 (5d)
- ・ ミシス期 (9d)
- ・ ポストラーバ期 (12d)
- ・ 着底稚エビ (38d)

● 実験設定

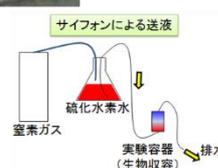
CTRL: 対照

HYP: 貧酸素

HYP+H₂S: 硫化水素水 (Na₂S溶液)
3濃度区 (0.1, 0.2, 0.4 mg/l)
各濃度区3容器設置

曝露時間: 1時間 (急性影響)

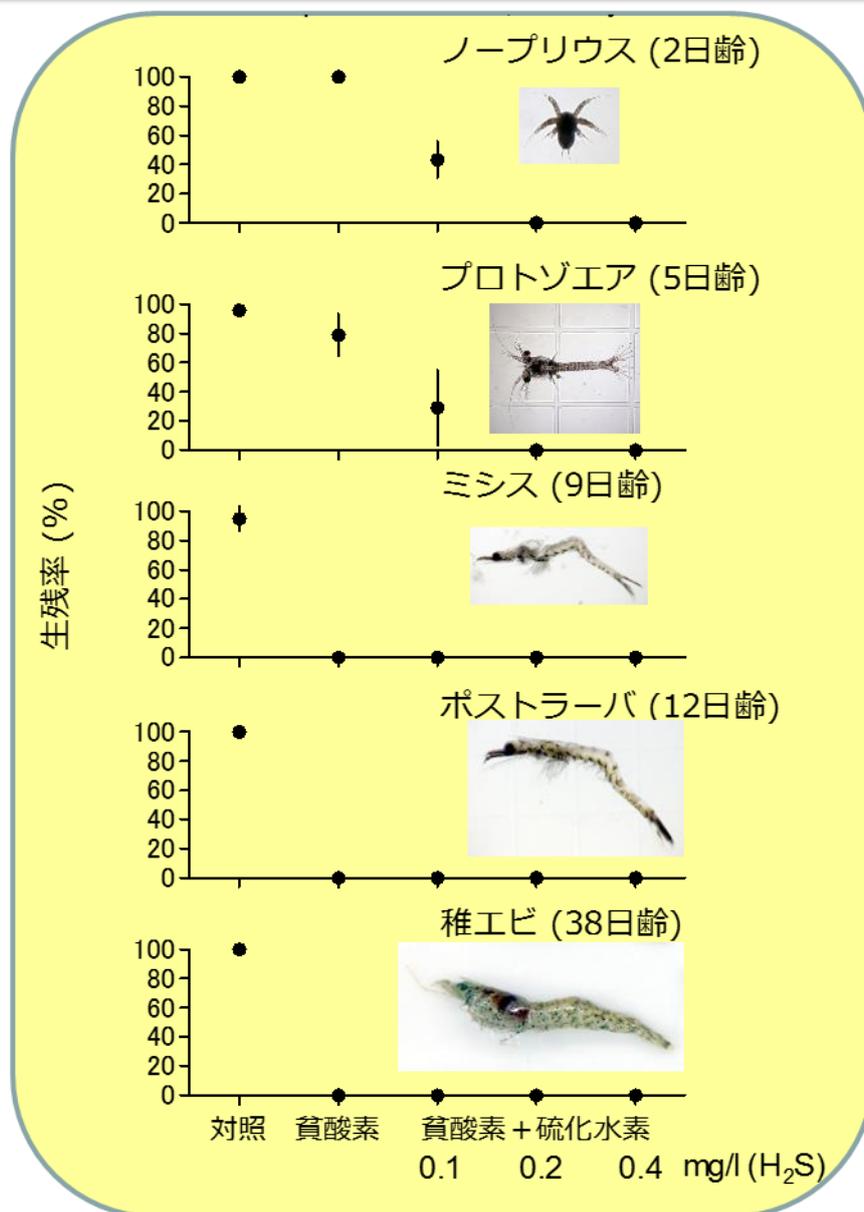
水温: 28°C pH 7.7



図(3)-9 室内実験に供したヨシエビ幼生・稚エビ、および実験設定の概要

幼生（ノープリウス期、プロトゾエア期、ミシス期、ポストラーバ期）および着底した稚エビについて、開発した実験系（図(3)-5）を用いて止水状態において硫化水素含有海水に曝露して一定時間経過後の生残率をみることにより、幼生・稚エビの硫化水素耐性を調査した。実験区は、対照区（通常酸素濃度、硫化水素を含まない）、貧酸素区（ ≤ 0.5 mg DO/L、硫化水素を含まない）、および貧酸素+硫化水素区（ ≤ 0.5 mg DO/L、硫化水素を含む）を設定した。貧酸素+硫化水素区については、複数の硫化水素濃度の実験区を設けた。本実験前に実施した予備的实验の結果をもとに曝露時間は1時間、曝露する硫化水素濃度は0.1, 0.2, 0.4 mg/lとして実験を実施した。各実験区につき3容器の繰り返し（triplicate）を設け、実験を行った。実験結果を（図(3)-10）に示した。

ヨシエビ幼生・稚エビの 硫化水素耐性（1時間曝露試験）



図(3)-9 ヨシエビ幼生・稚エビに対する硫化水素曝露実験の結果

ノープリウス・プロトゾエアは貧酸素区の生存率は高く、硫化水素濃度0.1 mg/lでも50%以下ながら生存する個体が存在した。一方、0.2 mg/lおよび0.4 mg/lの硫化水素曝露では供試個体全数が斃死した。ミシス、ポストラーバ、稚エビでは、貧酸素区および全ての硫化水素区で全数斃死した。

水塊交換完了直後に、通気対照区では遊泳・歩行していたが、貧酸素・硫化水素区では底面に沈

降して動かず、1時間後に取上げて観察したところ、個体が既に斃死または瀕死（腹肢痙攣、臓器細動→24時間以内に斃死）の状態にあった。

以上より、ヨシエビは成長にともない貧酸素・硫化水素耐性が減弱する傾向にあることが明らかとなった。ノープリウス、プロトゾエアでは貧酸素耐性があるものの、1 mg/l未満の低濃度の硫化水素が加わることで斃死率が大きく上昇した。東京湾における硫化水素濃度の観測において、2016年9月の湾奥部の海底直上水で0.1-0.8 mg/lの硫化水素が検出されている（図(3)-4）ことから、本実験で生残率の著しい低下がみられた濃度範囲の硫化水素に実海域で遭遇し大量斃死が生じることも有り得る。また、今回のアサリ・ヨシエビの一連の実験により、硫化水素耐性は種によって大きく異なることが示された。比較的貧酸素耐性が高いと考えられているヨシエビにおいて、低濃度の硫化水素曝露により著しい生残率低下が認められたことより、青潮の来襲にともなう貧酸素・硫化水素曝露によって、棲息する生物種の多くにおいて大量斃死が生じるものと推察される。今後、青潮が生態系に及ぼす影響をより詳細に定量化するため、他種の貧酸素・硫化水素耐性についての知見を獲得・集積する必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

底棲魚介類の生活史初期個体の生残に影響する硫化水素単体の濃度については、これまでほとんど知見が無かったが、これを調査するための室内実験系を構築し、アサリ（幼生と稚貝）およびヨシエビ（幼生と稚エビ）に斃死を引き起こす硫化水素濃度を明らかにした。また、東京湾の現場において、貧酸素発生水域において、底質から直上水への硫化水素の溶出を示唆する観測結果を得ることができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

東京湾の底質および海底直上水における硫化水素濃度の経時変化の観測結果、および貧酸素と硫化水素の複合曝露によるアサリ・ヨシエビの生残についての実験結果を得た。これらの成果は、浅海域における硫化水素の生態影響を評価する上で有用な知見であり、今後、硫化水素に関する環境基準等を検討する際に科学的知見として活用できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Kodama K, Akatsuka T, Waku M, Sone R, Ishida T, Horiguchi T. Ontogenetic changes in tolerance to hypoxia and hydrogen sulfide during the early life stages of manila clam *Ruditapes philippinarum*. 8th International Conference on Marine Pollution and Ecotoxicology. O-47. University of Hong Kong, Hong Kong, June 2016.
- 2) Kodama K, Waku M, Sone R, Ishida T., Akatsuka T, Horiguchi T. Effect of hypoxia and hydrogen sulfide on the survival of manila clam *Ruditapes philippinarum* during the early life stage. The 7th Bilateral Seminar Italy-Japan "Physical and Chemical Impacts on Marine Organisms: Emerging Hazards and Strategies for Saving the Oceans. Minamiboso-Tomiura Royal Hotel, Minamiboso, Japan. November 2016.
- 3) 児玉圭太, 曾根亮太, 宮脇 大, 石田俊朗, 和久光靖, 赤塚徹志, 堀口敏宏. 硫化水素がアサリ生活史初期個体の生残に及ぼす影響. 平成29年度日本水産学会春季大会. 1187. 東京海洋大学品川キャンパス. 3月・2017年

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

(4) 東京湾の貧酸素・硫化物分布に関する実態調査

国立大学法人東京大学

大学院新領域創成科学研究科

社会文化環境学専攻

佐々木 淳

<研究協力者> 呉 海鍾

平成26～28年度累計予算額：12,455千円（うち平成28年度：4,798千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

東京湾における青潮影響の軽減策を検討する上で、その発生源となる硫化物を含む無酸素水塊の時空間分布を把握することが重要である。また、無酸素水塊の発生源対策や青潮発生時の対症療法を検討する上で、周年スケールでの硫化物濃度を含む無酸素水塊の発達と解消過程を再現可能な数値予測システムの構築が有用である。そこで本研究では、現地調査に基づき、硫化物を含む無酸素水塊の発生源を把握すること、それら発生源における硫化物濃度を含む無酸素水塊の水質を再現する予測システムを構築すること、および各発生源の青潮への寄与度を評価し、青潮影響の軽減に向けた対策の優先度を明らかにすることを目的とした。無酸素水塊の発生源である、湾奥中央平場、浚渫窪地、および航路を対象とし、硫化物濃度を含む無酸素水塊の時空間分布に関する現地調査を行った。調査に際しては千葉県水産総合研究センターの貧酸素予測システムの活用と水質センサーによる要採水基準の確立、およびORPと濁度計に基づく無酸素水塊層厚の把握を総合し、効率的なモニタリング手法を構築した。また、非静水圧流動モデルと水質・低次生態系モデルに基づく、溶存酸素濃度と硫化物濃度を予測対象としたシステムを構築し、時々刻々の境界条件を与えることで周年スケールの無酸素水塊の再現を行った。さらにこれらの成果を総合し、無酸素水塊の発生源別の規模の評価を行った。現地調査により、浚渫窪地の規模の大小によって硫化物濃度のオーダーが異なること、平場においては間欠的に硫化物が発生するが、近年はその規模が縮小している可能性があることが示された。また、数値予測システムを用いた周年再現の枠組みで、浚渫窪地の規模による硫化物濃度の差異等が再現され、浚渫窪地の埋め戻しをはじめとする、無酸素水塊の発生源対策等に活用できるツールを提示することができた。これらに基づく無酸素水塊規模の比較評価から、浚渫窪地における発生源対策の有効性が推察された。また、青潮影響の軽減政策を展開する上で、硫化物濃度に着目することが有用であり、その環境基準化の重要性が示された。

[キーワード]

硫化物、無酸素水塊、浚渫窪地・航路・平場、東京湾、数値モデル

1. はじめに

富栄養化した閉鎖性海域における貧酸素水塊の発達とそれに起因する魚介類のへい死や物質循環の劣化は長年にわたり水質上の最も深刻な問題と言ってよい。特に東京湾や三河湾では貧酸素問題が深刻であり、1980年に総量規制が導入されてから現在まで、COD等の流入負荷は半分から1/3にまで減少し、水質は幾分回復したとも言われる中、貧酸素の問題だけはほとんど改善の兆しが見られず、漁業資源も劣化の一途をたどってきた。地球規模での人口増加と経済発展に伴う漁業資源への需要の増大により、沿岸漁業、中でも内湾漁業の重要性は増しており、また、経済的に成熟した社会においては人々の憩いの場として、また国際的な観光資源として、内湾環境の再生への機運が高まっている。

東京湾では2003年から東京湾再生推進会議による環境再生の取り組みである「東京湾再生のための行動計画（第一期）」が開始され、2013年からは「同（第二期）」の取り組みに引き継がれ、さらに、2013年には東京湾再生官民連携フォーラムが設立され、従来の官側主体の取り組みから、官民連携による取り組みへと発展し、その中でも貧酸素問題への取り組みは最重要課題の一つに挙げられている。貧酸素問題における最も深刻な水塊の状態は、無酸素水塊の発達とその水塊中の硫化物の発生であり、この硫化物を含む無酸素水塊が湧昇したものが青潮である。青潮の発生は酸欠に加え、硫化水素の毒性により干潟・浅場の底生動物の多くをへい死させることから深刻な問題であり、貧酸素問題の解決に向けた第一の目標は、硫化物を含む無酸素水塊による影響を軽減させることにあると考えられる。そのため、この無酸素水塊の発生を抑制すること（発生源対策）と、発生した無酸素水塊の湧昇現象である、青潮による底生生物への影響を抑制することが重要となる。これらの課題を考えると、そもそも硫化物を含む無酸素水塊がどこにどのような規模で発生するのか、またそれらの発生源の中でどのような場所と規模で対策を採り、また予想される効果はどのようなものかを把握することが不可欠である。そのためには、硫化物濃度を含む、無酸素水塊の規模を予測するためのツールの開発が必要となる。

本研究ではこのような背景を基に、行政施策への活用を念頭に置き、次に示す研究開発目的を設定し、研究を展開することとした。

2. 研究開発目的

本研究では東京湾を対象に、無酸素水塊の発生する可能性のある湾奥部において現地調査を行い、硫化物濃度と溶存酸素濃度（DO）の時空間分布を把握することで、硫化物を含む無酸素水塊の発生する海域を特定し、その規模を把握することで、硫化物を含む無酸素水塊の実態を把握することを第一の目的とする。その過程では、底層硫化物濃度を環境基準として採り上げることが提案することも視野に入れ、硫化物濃度の空間分布を効率的に把握するための方法についても検討する。

次に、硫化物を含む無酸素水塊に起因する、貧酸素や青潮影響を軽減するための方策を検討するに際し、数値モデルの活用が有効と考えられることから、浚渫窪地および航路を主な対象として、硫化物を含む無酸素水塊分布を再現することを志向した数値予測システムの構築を行う。設計に際しては、硫化物を含む無酸素水塊の形成から消滅するまでの過程を捉えることを想定し、周年再現計算の枠組みの中で、システム構築を図ることを目的とする。一方、低次生態系を含む水質過程を時々刻々精密に再現することは非常に困難であることから、硫化物および無酸素水塊

の再現に関わる高感度な過程を抽出し、なるべく簡便なモデル体系とすることとした。

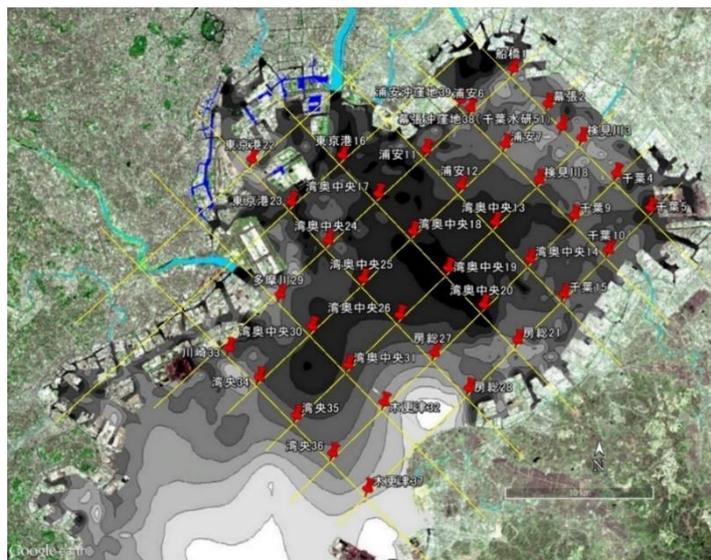
最後にこれらの成果を総合し、無酸素水塊の発生源別にその影響度合いを評価し、発生源対策に関する考察を行う。

3. 研究開発方法

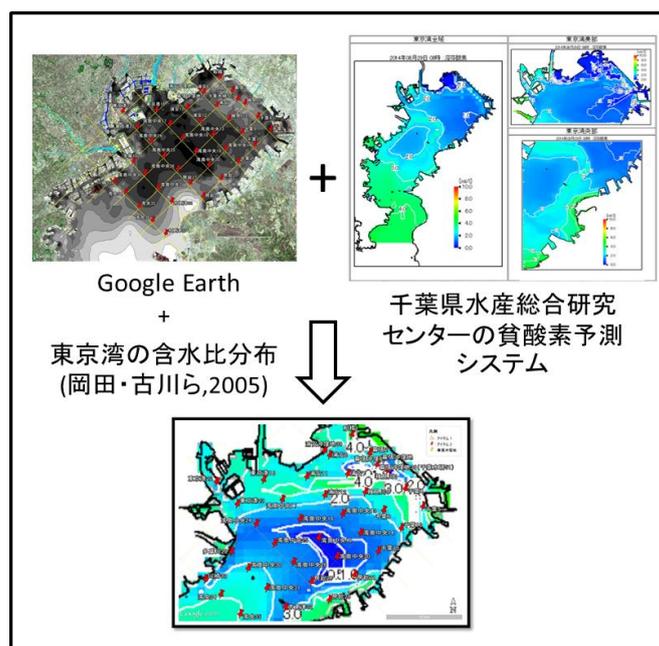
(1) 無酸素水塊のモニタリング

東京湾奥部において硫化物を含む貧酸素・無酸素水塊が発生可能性の高い海域を対象海域として定点を配置した。対象海域の選定にあたっては公共用水域水質測定結果や千葉県水産総合研究センターの貧酸素水塊予測システム²⁾による過去の貧酸素水塊分布を確認した上で、国土交通省国土技術政策総合研究所海洋環境研究室発行の東京湾底質含水比マップ³⁾上において、貧酸素水塊の主要な発生要因と考えられる有機物に富む軟泥域（高含水比域）をカバーするように配慮した。この対象海域において、浦安沖および幕張沖の浚渫窪地と船橋航路および千葉航路を含め、図(4)-1のように調査候補点を設定した。実際の調査に際しては、これらの調査候補点すべてにおいて調査を実施することは資源の制約上困難であるため、平場の調査点の選定に際しては、千葉県水産総合研究センターの貧酸素水塊予測システムにおける調査直前の貧酸素水塊分布予測を参照し、硫化物を含む無酸素水塊の発生が見込まれる海域を絞り込んで、実際の調査点とした(図(4)-2)。一方、浦安沖および幕張沖の浚渫窪地と船橋航路および千葉航路については、可能な限り毎回調査を行うこととした。

現地調査では多項目水質計JFE Advantec社AAQ-Rinkoを用いて水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)、濁度、pH等を測定し、多項目水質計にくくりつけたニスキン型採水器を用いて、深度を確認しながら底層水の採水を行った。本研究で採用した全硫化物濃度の分析精度が0.05mg/Lであることを考慮し、全硫化物濃度がこれを下回ることが確実な場合は採水を行わないこととし、このような作業の効率化を図ることで、従来データがあまり無く、不明点の多い平場の無酸素水塊の全体像を把握するよう努めた。具体的には、本調査の過程で明らかとなった、AAQ RinkoのDO測定値が0.01mg/L以上であれば硫化物が検出限界以下であったことを根拠に、DO測定値が0.01mg/L以上のときは採水を行わないことを最終的な原則とした。ただし、この原則を確立するまではDO測定値が0.05mg/L以下のときに採水して硫化物分析に供することとし、その妥当性を検証した。また、酸化還元電位(ORP)による判定確認、すなわちORP値が正值のときは硫化物が検出されないことを併せて確認した。現地調査における傭船等補助業務および硫化物分析は三洋テクノマリン(株)に委託した。



図(4)-1 国土交通省国土技術政策総合研究所海洋環境研究室提供の底質含水比マップ³⁾（黒い程含水比が高い）に設定した、現地調査候補点



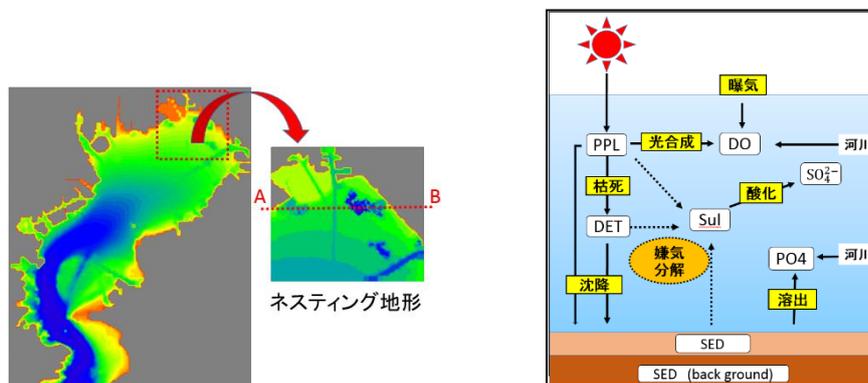
図(4)-2 千葉県水産総合研究センター貧酸素水塊予測システム²⁾と重ね合わせた現地調査候補点

(2) 硫化物濃度および無酸素水塊の数値再現システムの構築と再現計算

浚渫窪地等における硫化物を含む無酸素水塊の発生から消滅過程を含む周年再現を行うことを目的として、吉本ら⁴⁾の数値モデルをベースとした再現予測システムの開発を行った。数値モデルは流動モデルと水質モデルから構成され、流動モデルにはDHI社のMike3を採用し、水質モデルはDHI社のMike3 Ecolabを採用した。

流動モデルは静水圧モデルおよび非静水圧モデルを切り替えて使用することが可能である。渦

動粘性係数は水平方向にはSmagorinsky modelを、鉛直方向には $k-\varepsilon$ modelを採用した。計算格子は水平450m格子を全領域に適用し、浚渫窪地を含む湾奥領域では窪地地形を解像するため、水平450m格子から水平150m格子へのネスティング計算を行うこととした（図(4)-3）。鉛直方向格子は静水位から深度20mまでは1m間隔で、それ以深は2mから5m間隔とした。これらの格子は水質モデルにおいても同様である。



図(4)-3 計算領域（左）とEcolabを用いた水質モデルの概要（右）

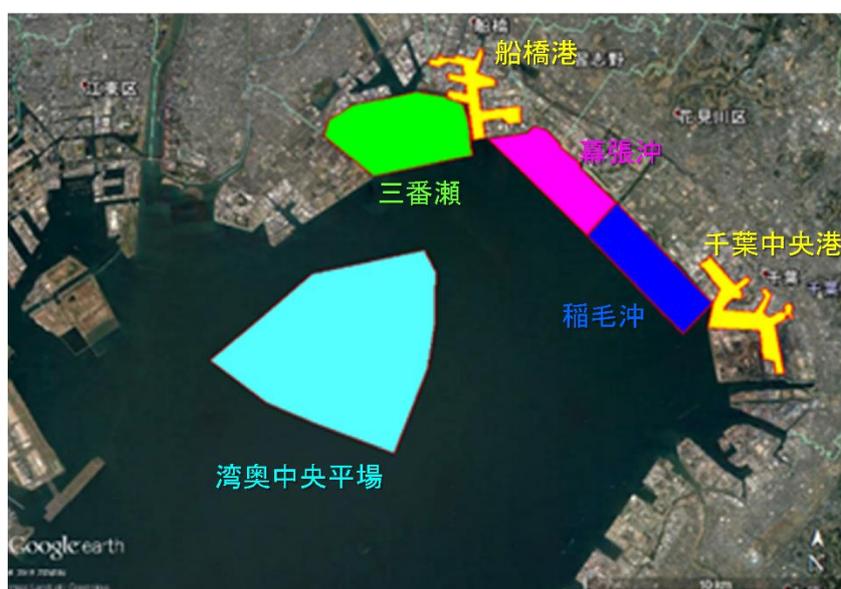
次に水質モデルはユーザーが独自のモデルを設計構築するためのプラットフォームである、DHI Mike3 Ecolabを採用した。本モデルの状態変数は植物プランクトン(C_{PPL})、懸濁態有機物(C_{DET})、底質有機物(C_{SED})、溶存酸素(C_{DO})、リン酸態リン(C_{PO_4})、硫化物(C_{SUL})、および単体硫黄(C_{S_0})である。本モデルの硫化物生成に関わる部分では、バックグラウンドの底質有機物分解と新規堆積有機物の分解とを分けて考慮し、また、嫌気的環境下における有機物分解から硫化物が発生するモデルとした。そのため、溶存酸素濃度の再現性や一次生産による有機物の底質へのフラックスが計算結果に大きな影響を与えることを踏まえて検討することとした。さらに、生成した硫化物は溶存酸素の存在下で速やかに単体イオウに酸化されるものとした。

数値モデルの構築におけるパラメータチューニングに用いた計算対象期間は大規模な幕張沖浚渫窪地と小規模な浦安沖浚渫窪地における硫化物データが存在し、大規模な青潮の発生した2010年を対象とし、水温・塩分の一様性が高く初期条件の設定が容易な初春の2010年3月から青潮の発生が見られた9月までの約半年間の計算を行った。境界条件は、流動場の再現をなるべく精密に行うため、気象庁による時別の気温、降水量、日射量、湿度、風向、風速、雲量といった気象データと日別の河川流量を与えた。また、湾口を開境界とし、気象庁横須賀における潮位と神奈川県水産総合研究センターおよび千葉県水産総合研究センターによる毎月の水温、塩分の観測値を参考に、開境界条件を与えた。

次に本研究における現地観測結果の再現を行うため、2014年1月1日から2015年12月31日までの2年間の計算対象とし、1年目は計算の助走期間と位置づけ、2年目の2015年夏季に実施された現地調査結果を再現することを試みた。2015年は8月24日に幕張沖浚渫窪地において50mg/Lを越える極めて高濃度の硫化物が観測されたが、この幕張沖浚渫窪地と浦安沖浚渫窪地の再現計算を通して、その再現性を確認することとした。

(3) 無酸素水塊の発生源と規模に関する推定と評価

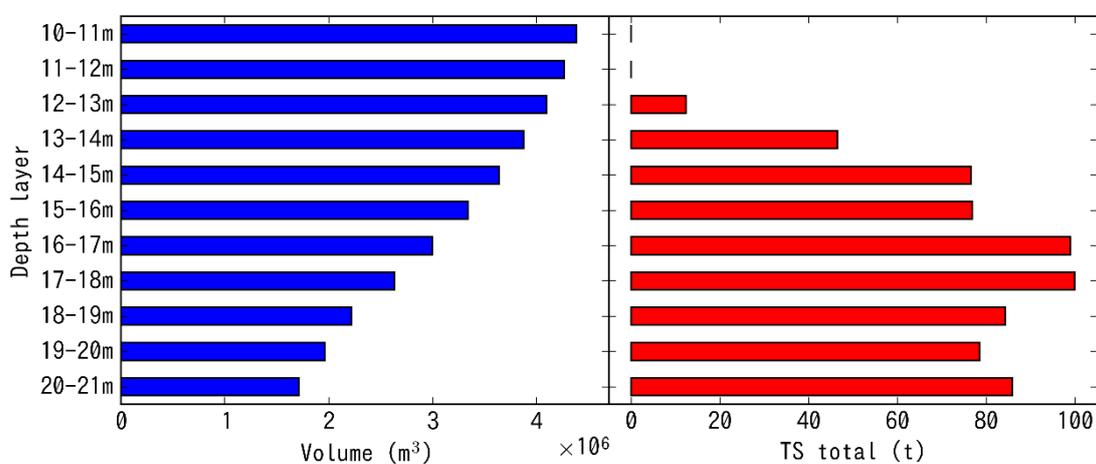
干潟・浅場に青潮水が侵入すると、底生動物等のへい死を引き起こすが、これは貧酸素水塊による直接的な影響に加え、硫化物、特に硫化水素の毒性と硫化物の酸化時に溶存酸素がさらに消費されることによる酸欠の長期化によるものと考えられる。そこで、東京湾奥部における干潟・浅場である三番瀬を対象として、三番瀬が青潮水に覆われる状況を想定し、複数の硫化物を含む無酸素水塊の発生源別に、三番瀬を覆う青潮水となるポテンシャルの大きさを見積もる。さらに、青潮水に覆われる海域として、幕張沖海域、稲毛沖海域、船橋港、および千葉中央港を想定し（図(4)-4）、同様に発生源別の青潮水となるポテンシャルの大きさを見積もる。一方、硫化物を含む無酸素水塊の主要な発生源としては、幕張沖浚渫窪地、千葉航路、船橋航路、および湾奥中央平場を仮定する（図(4)-4）。



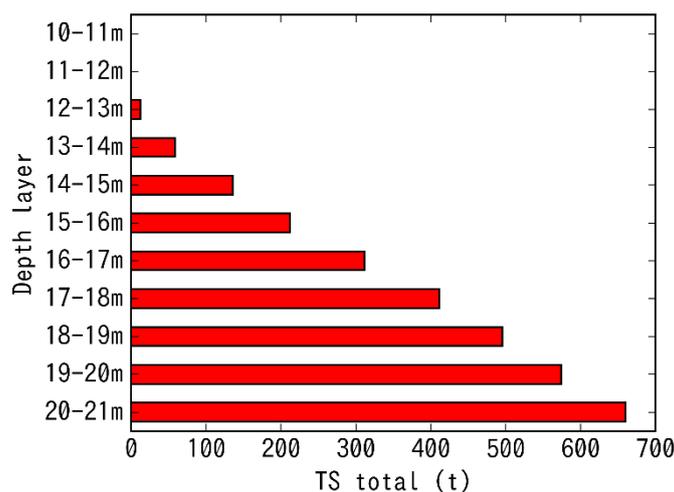
図(4)-4 東京湾奥部における青潮水曝露想定海域と観測に基づく湾奥中央平場の無酸素水塊発生海域

硫化物の主要な発生源の一つである、幕張沖浚渫窪地においては、無酸素水塊が主に発生する深度10m以深において、鉛直1m層毎の水塊体積を求め、3カ年の観測において最も高濃度の硫化物が観測された2015年度の硫化物濃度の観測値と数値計算結果を基に、それぞれの層内に含まれる硫化物量を見積もった。青潮発生時には窪地の水塊全てが湧昇することはまず起こらず、窪地内に侵入する沖合水の密度と等しい密度の窪地内深度以浅の海水が湧昇すると仮定できることから⁵⁾、最大湧昇深度別の硫化物総量を見積もることとした。図(4)-5の左に幕張沖浚渫窪地における層別の水塊体積を、同図右に層別の硫化物総量の概算見積値を示す。また、図(4)-6に深度層別の湧昇した硫化物総量の概算見積値を示す。例えば、深度15 mまでの水塊が湧昇した場合は約135 tの硫化物が湧昇したと推算される。一方、千葉航路および船橋航路においては、海図から航路の水平面積を算出し、硫化物を含む無酸素水塊の存在する底層層厚を仮定し（層厚の標準値として、2016年度の最大層厚が1.8mであったことを参考に、2mを仮定した）、これに全硫化物濃度の実測値および計算値を参考に、層内鉛直平均値を乗じることで全硫化物の総量を推定することとした。

さらに、平場においては2016年9月13日に観測された無酸素水塊の分布に基づき（図(4)-4）、その水平面積を算出し、無酸素水塊の底層層厚については、2016年度に観測された最大層厚である、3.5mを採用し、これに全硫化物濃度の層内鉛直平均値を乗じることで全硫化物の総量を推定した。最後に千葉港内は水深が16m～18mの深い泊地が広く存在していることから、これらの海域の硫化物発生ポテンシャルを見積もるため、これまでと同様に千葉港内の平面の面積に千葉航路と同様の硫化物を含む無酸素水層厚を仮定し、その影響を見積もった。青潮水への曝露を想定した三番瀬、幕張沖海域、稲毛沖海域、船橋港、および千葉中央港（図(4)-4）において、それぞれの海域の平面積を海図に基づき計算し、青潮水に曝露されたときの硫化物濃度と上層厚を想定し、青潮曝露時の硫化物総量ポテンシャルを推定した。表(4)-1にこれらの見積もりに用いた水域の平面積、周長、無酸素水塊の層厚、無酸素水塊中の平均硫化物濃度を示す。



図(4)-5 幕張沖浚渫窪地における深度層別の水塊体積（左）と硫化物総量の概算見積（右）



図(4)-6 幕張沖浚渫窪地における各深度までの水塊湧昇に伴う湧昇硫化物総量の見積

表(4)-1 硫化物総量の推定に用いた、各水域の平面積、周長、無酸素水塊の鉛直層厚、および無酸素水塊中の平均全硫化物濃度

	Area (km ²)	Perimeter (km)	Layer (m)	Sulfide (mg/L)
船橋航路	3.26	24.00	2	0.5
千葉航路	4.51	25.10	2	0.5
千葉港内南側	0.91	4.41	2	0.5
千葉港内北側18m	0.52	3.10	2	0.5
千葉港北側窪地	0.39	3.82	2	0.5
三番瀬全水深	13.20	14.50	1	1.0
幕張沖全水深	7.99	13.30	6	1.0
稲毛沖全水深	8.88	14.00	6	1.0
船橋港全水深	3.58	18.30	12	1.0
千葉中央港全水深	4.81	20.60	14	1.0

4. 結果及び考察

(1) 無酸素水塊のモニタリング

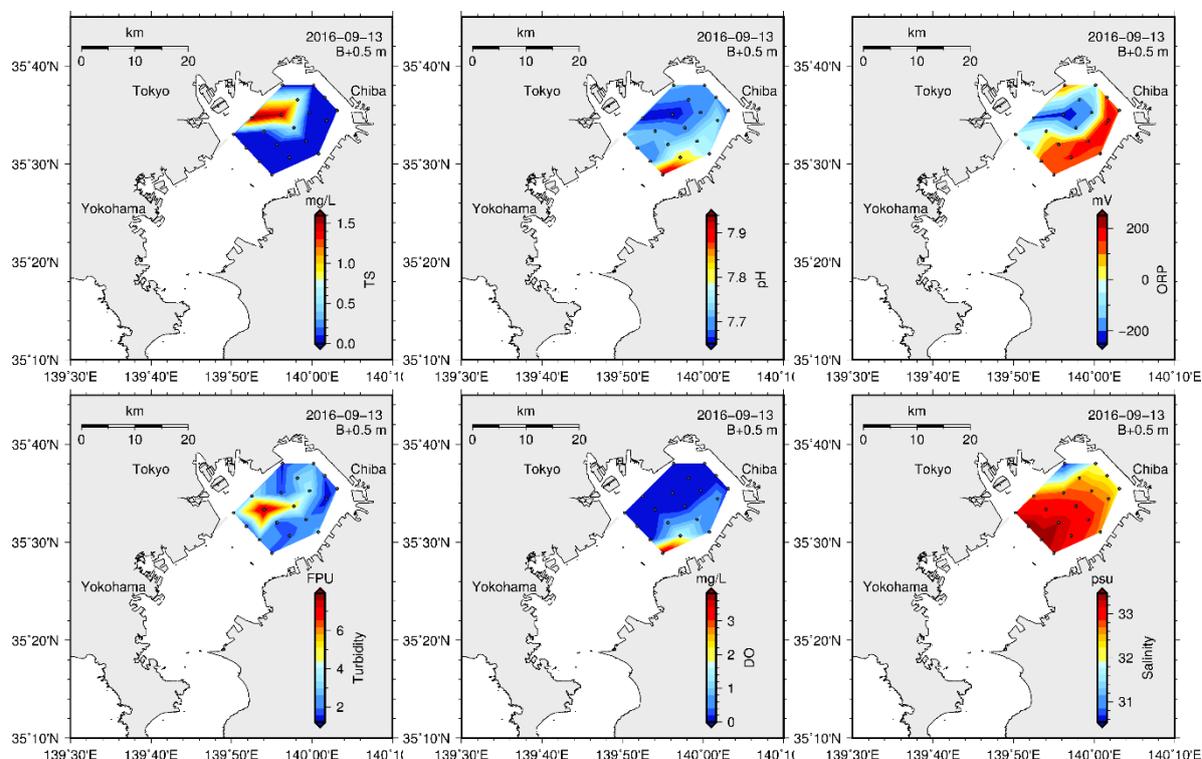
無酸素水塊モニタリングは、2014年は8月8日、8月26日、9月5日、9月18日、2015年は7月24日、8月24日、9月1日、9月16日、2016年は7月26日、8月19日、9月2日、9月13日に実施され、各年4回ずつ、合計12回実施した。この間では2014年8月27日から9月3日に東京湾奥部の広範囲で青潮が発生し、三番瀬では3,880tのアサリがへい死するといった被害報告されているが、本研究における8月26日の調査時は既に湧昇過程にあり、このときは平場の無酸素水塊のポテンシャルの把握には至らなかった。そこで平場については最も高濃度の硫化物が観測された2016年度を中心に紹介し、浚渫窪地や航路は2016年度に加え、最も高濃度の硫化物が観測された2015年度を併せて紹介する。

図(4)-7に2016年9月13日の平場における全硫化物(TS)、pH、酸化還元電位(ORP)、濁度(Turbidity)、溶存酸素濃度(DO)、および塩分(Salinity)の平面分布を示す。また、図(4)-8に2016年7月26日、8月19日、9月2日、9月13日の幕張沖浚渫窪地(Stn.38)、浦安沖浚渫窪地(Stn.39)、千葉航路(Stn.C4)、湾奥中央平場(Stn.17)における、溶存酸素濃度(DO)、濁度(Turb)、pH、酸化還元電位(ORP)、および全硫化物(TS)の鉛直分布実測値を、図(4)-9に2015年7月24日、8月24日、9月1日、9月16日の幕張沖浚渫窪地(Stn.38)と浦安沖浚渫窪地(Stn.39)における溶存酸素濃度(DO)、濁度(Turb)、pH、全硫化物(TS)の鉛直分布実測値を示す。

1) 平場における結果と考察

2014年度および2015年度の平場底層水中において硫化物が観測された測点は非常に少なく、値も0.1mg/L程度と低かった。既述のように2014年8月27日から比較的規模の大きい青潮が発生しているが、8月26日の観測からは平場における硫化物の発生は捉えられなかった。それ以前が不明であるが、2014年度および2015年度は全般的に平場における硫化物を含む無酸素水塊の発達は弱かったものと推察される。

本研究における平場観測では2016年9月13日に最も高濃度の硫化物が観測された。この年は8月17日に通過した台風7号の強風により、貧酸素水塊の規模が縮小し、その後9月13日の観測時まで貧酸素水塊が発達したものと考えられる。図(4)-7の平面分布を見ると、浦安沖の平場底層において、最大1.62mg/Lの硫化物濃度が観測され、その硫化物発生域でpHが低下し、ORPが負値を示す分布が得られ、これは既往の知見の傾向と一致する。濁度は硫化物の酸化による単体イオウに起因する上昇がしばしば見られるが、この調査結果ではそれは見られていない。これは同図が底層の分布を示したものであり、図(4)-8のStn.17に示されているように、海底直上3.5m付近に濁度の極大域の存在が認められた。DOは広範囲にわたり0mg/Lに近い値を示し、湾奥底層はほぼ貧酸素状態となっていた。浦安沖の湾奥中央平場では約11 m以深でORPが負値を示し、その上端である深度11 m付近で濁度の最大値が観測されている。その層厚は約3.5 mであり、全硫化物の最大値は1.62 mg/Lであった。

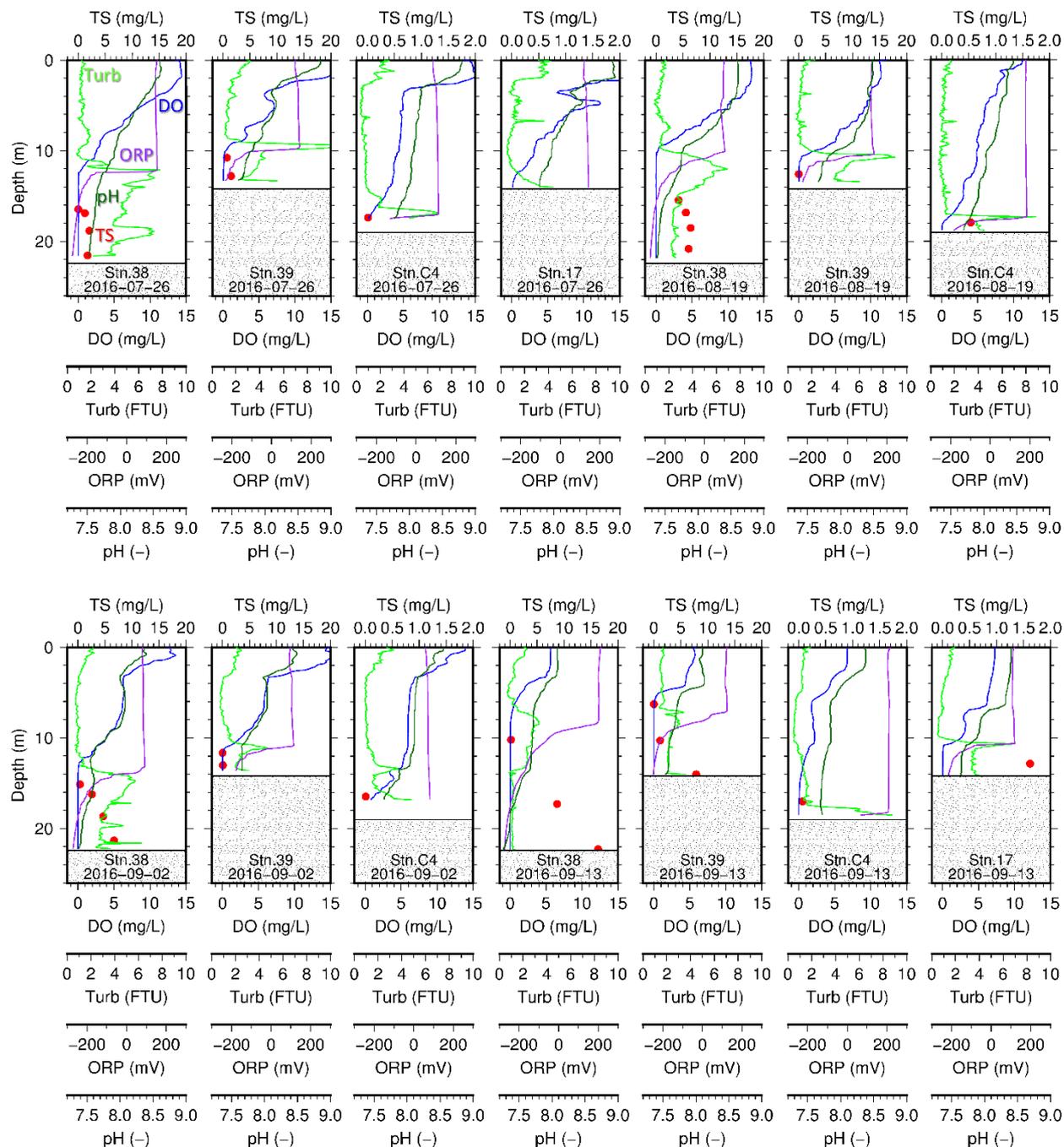


図(4)-7 2016年9月13日における平場の海底直上水中 (B+0.5 m) の全硫化物 (TS) , pH, ORP (上段) , 濁度 (Turb) , 溶存酸素濃度 (DO) , 塩分 (下段)

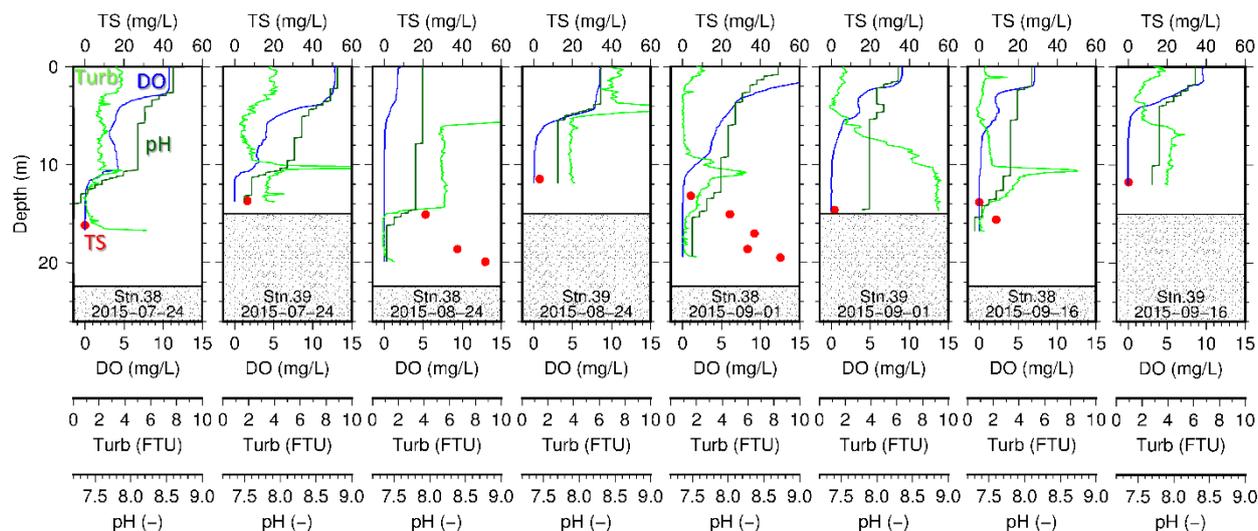
2) 浚渫窪地および航路における結果と考察

浚渫窪地における硫化物は2015年度が最も発達した年であった。図(4)-8および図(4)-9に示す2016年と2015年の幕張沖浚渫窪地と浦安沖浚渫窪地における水質鉛直分布から、全般的傾向として、規模の大きい幕張沖窪地における無酸素水塊の層厚は大きく、硫化物濃度も高い値を示しており、浦安沖窪地の値より1オーダー高い値となっていた。2015年8月24日は青潮発生初期に当たり、7月24日と比較して無酸素 (貧酸素) 水塊の厚みが増大している様子が見取れ、この間の無酸素水塊の発達や無酸素水塊の湧昇が捉えられていると考えられる。幕張沖窪地の硫化物濃度は

最大で50mg/Lを超える値が記録されているが、これは極めて高い値である。2015年7月24日、8月24日、2016年7月26日、8月19日の浦安沖窪地や2015年9月1日と9月16日、2016年8月19日の幕張沖窪地に見られるように、無酸素水塊の上端付近では濁度の極大域が見られるが、これはその付近で溶存酸素への曝露により硫化物が酸化されて単体イオウ粒子となった様子を捉えたものと考えられ、それ以深での硫化物の存在を示すものである。



図(4)-8 2016年7月26日、8月19日、9月2日、9月13日の幕張沖浚渫窪地 (Stn.38)、浦安沖浚渫窪地 (Stn.39)、千葉航路 (Stn.C4)、湾奥中央平場 (Stn.17) における、溶存酸素濃度 (DO)、濁度 (Turb)、pH、酸化還元電位 (ORP)、および全硫化物 (TS) の鉛直分布実測値



図(4)-9 2015年7月24日、8月24日、9月1日、9月16日の幕張沖浚渫窪地 (Stn.38) と浦安沖浚渫窪地 (Stn.39) における溶存酸素濃度 (DO)、濁度 (Turb)、pH、全硫化物 (TS) の鉛直分布実測値

また、この濁度極大域の深度はORPが正から負の値に遷移する深度によく一致しており、ORPによって直接的に無酸素層を捉えられると同時に、ORPが観測されていない場合でも濁度の極大域を指標に無酸素層厚を推算することができるものと考えられる。

一方、特に大規模な幕張沖浚渫窪地におけるこの濁度極大域以深では、濁度は減少し全硫化物は増大していく傾向がある。この濁度極大域以深は酸素が全く存在せず、硫化物の酸化によるイオウ粒子の生成がほとんど認められないことによるものと考えられ、このような環境下で高濃度の硫化物が蓄積すると理解できる。これに対し、規模の小さい浦安沖浚渫窪地では底層でも濁度が高い傾向にあり、これは底層への酸素供給によって活発に硫化物が酸化され、イオウ粒子が析出しているためと理解される。結果として、浦安沖浚渫窪地の底層の硫化物濃度は低めの値に抑えられており、青潮水の起源としては硫化物を相対的に多量に含む幕張沖浚渫窪地の重要性が際立っている。

次に図(4)-8に示す2016年の千葉航路 (Stn.C4) における結果に着目すると、観測された最大の硫化物濃度は8月19日の0.54 mg/Lであり、浚渫窪地に比較するとかなり低い値である。最大値が観測された8月19日はORPが負値となる底層の層厚が最も大きくなっており、その値は約1.8 mであった。その層厚の上端で濁度の最大値が観測されており、これは浚渫窪地における結果とよく整合するものである。一方、それ以外の日付ではORPから判断される無酸素層厚は小さく、硫化物はほとんど検出されないことも多い。

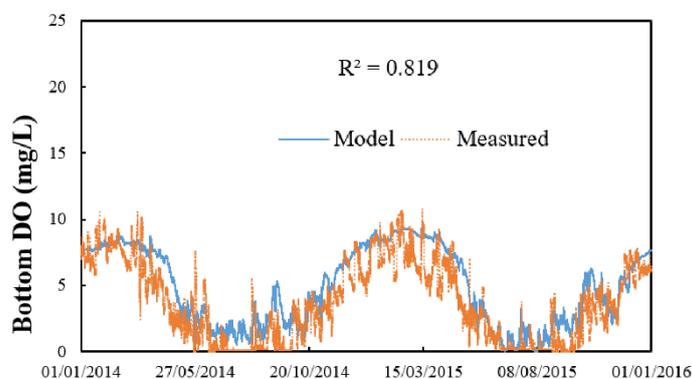
(2) 硫化物濃度および無酸素水塊の数値再現システムの構築と再現計算

図(4)-10に2014年1月1日から2015年12月31日までの千葉灯標における底層溶存酸素濃度 (DO) の計算値と観測値の比較を示す。2014年の夏季の貧酸素化は観測値に比べ計算値はやや弱くなっていたが、2015年の夏季には改善されている様子が見て取れる。また、周年を通じた計算結果は計算結果と概ね整合していると判断した。

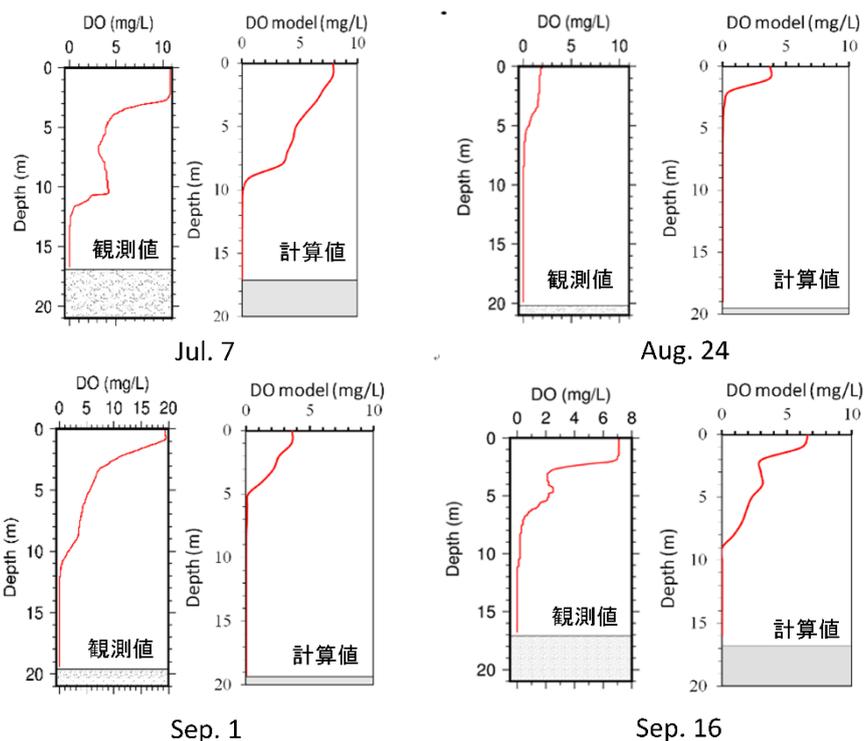
図(4)-11および図(4)-12にそれぞれ幕張沖浚渫窪地および浦安沖浚渫窪地における、7月24日、8月24日、9月1日、および9月16日の溶存酸素濃度の観測値と計算値の比較を示す。また、図(4)-13および図(4)-14にそれぞれ同様の全硫化物濃度の観測値と計算値の比較を示す。溶存酸素濃度の結果を見ると、幕張沖浚渫窪地および浦安沖浚渫窪地の双方において、まずまずの整合性があると考えられる。基本的な傾向は上層で高く、中層以降ではほぼ0 mg/Lとなる分布形であるが、この傾向はある程度再現されている。

全硫化物濃度の結果を見ると、観測値が限られていることから溶存酸素濃度程の比較はできないが、データの存在する範囲では計算値は観測値をよく再現していると判断される。特に、規模の大きく異なる幕張沖窪地と浦安沖窪地では硫化物濃度の観測値が1オーダー以上異なる場合が多いが、このオーダーの相違は計算結果でも良く再現されている。定量的に見ると、幕張沖窪地の8月24日において、計算による最大の全硫化物濃度は約60mg/Lであり、これは観測値の約50mg/Lよりやや過大であるが、複雑な過程の長期にわたる結果として規定される全硫化物濃度の再現として極めてよく整合していると言える。一方、7月24日の結果では現地調査の全硫化物濃度が極めて低く、計算結果は大きく乖離していた。このときの計算値は8月24日の値より低くなっており、この点は妥当であるが、両者の乖離が大きかった理由は不明である。観測値が1点しかなく、採水時の何らかのトラブルの可能性等も排除できないため、計算結果が不適切であるとは断言できない。一方、浦安浚渫窪地の全硫化物観測値は基本的には幕張沖窪地の値の1/10のオーダーであるが、数値計算結果はこれとよく整合した結果となっていた。また、7月24日および8月24日共に計算値と観測値はよく整合していた。7月24日における幕張沖窪地の観測値は浦安沖窪地の観測値よりも低い値を示しており、この点からも7月24日の幕張沖窪地の観測結果の妥当性が疑われる。

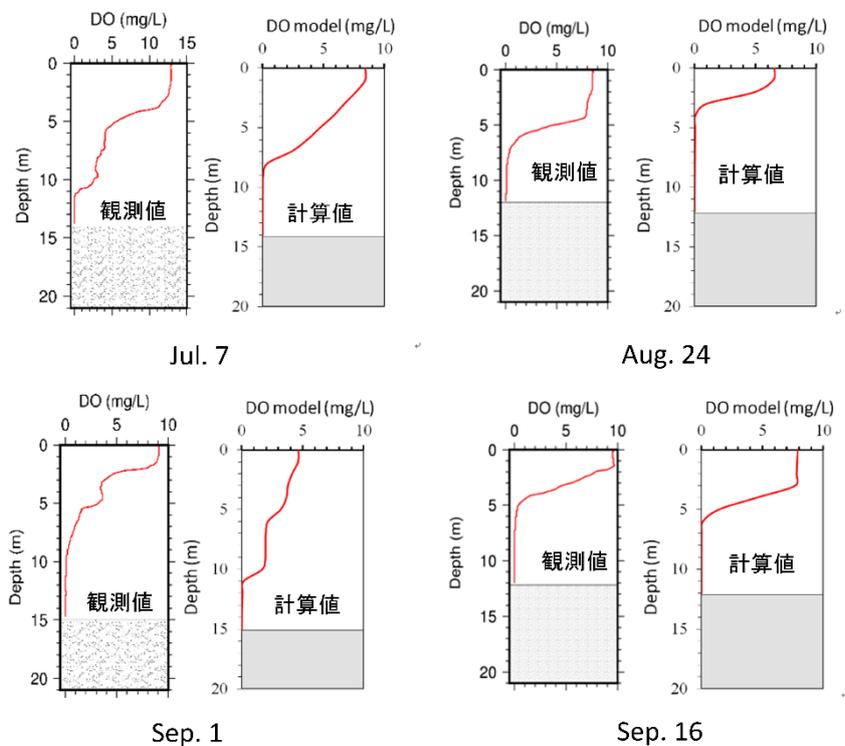
図(4)-15および図(4)-16に幕張沖窪地および浦安沖窪地における、7月24日、8月24日、9月1日、9月16日のイオウ粒子濃度の計算結果を示す。イオウ粒子濃度に関しては対応する観測値が存在しないため、その評価はできないが、研究代表機関が青潮発生時に測定したイオウ粒子濃度とオーダーにおいては整合した結果となっている。イオウ粒子を含む海水が表層まで湧昇したものが青潮水であり、計算結果は青潮が発生していない日の上層においてもイオウ粒子が存在するという結果になった。この原因として、数値計算においては沈降過程が考慮されていないことが挙げられる。実現象ではイオウ粒子の沈降による底質への堆積と底質中の硫黄酸化細菌による硫酸イオンへの変換が生じていると推察され、これらの過程が数値計算には含まれていない。



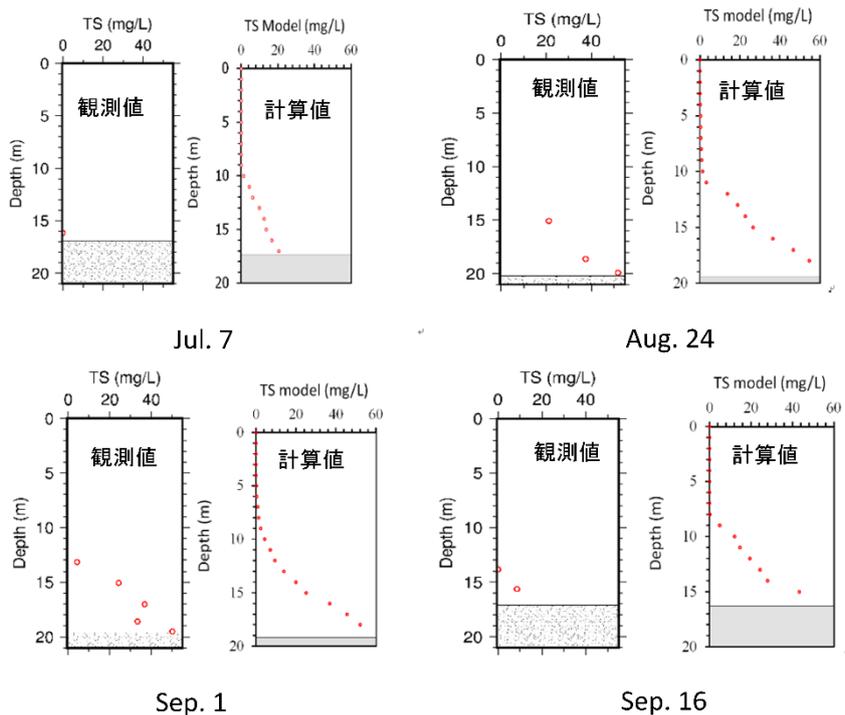
図(4)-10 2014年1月から2015年12月までの千葉灯標底層における溶存酸素濃度の観測値（橙）と計算値（青）の比較



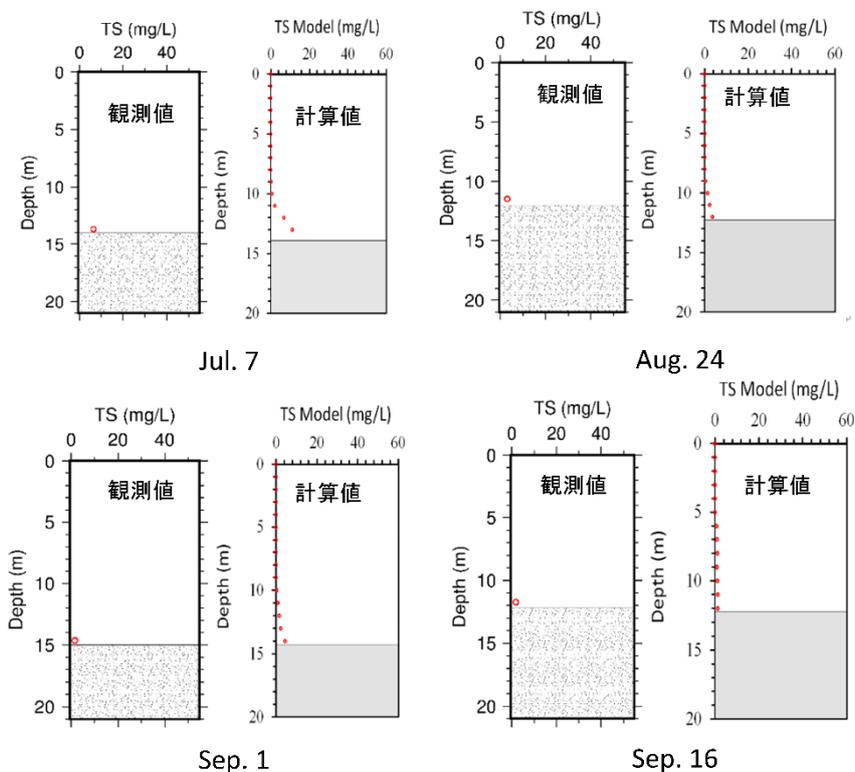
図(4)-11 2015年7月24日、8月24日、9月1日、9月16日の幕張沖浚渫窪地における溶存酸素濃度の鉛直分布の観測値と計算値の比較



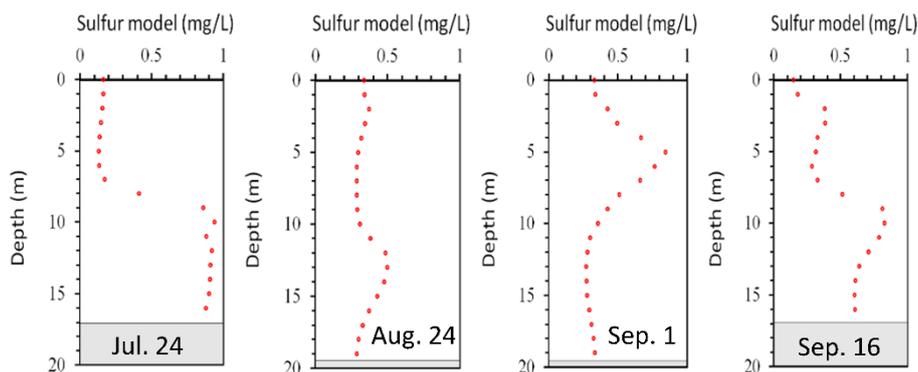
図(4)-12 2015年7月24日、8月24日、9月1日、9月16日の浦安沖浚渫窪地における溶存酸素濃度の鉛直分布の観測値と計算値の比較



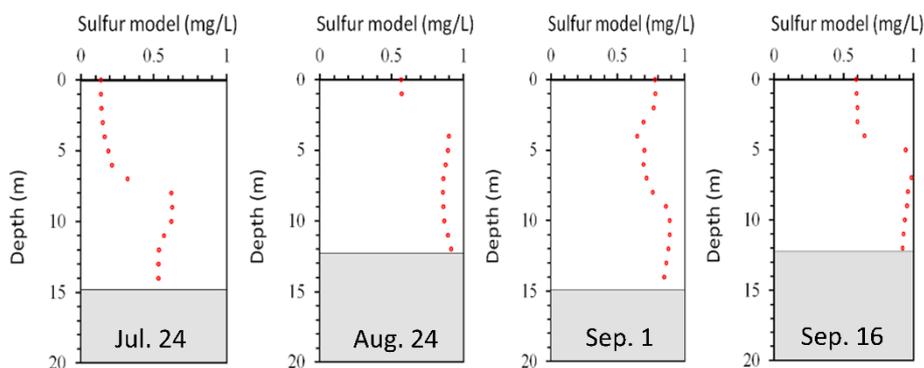
図(4)-13 2015年7月24日、8月24日、9月1日、9月16日の幕張沖浚渫窪地における全硫化物濃度の鉛直分布の観測値と計算値の比較



図(4)-14 2015年7月24日、8月24日、9月1日、9月16日の浦安沖浚渫窪地における全硫化物濃度の鉛直分布の観測値と計算値の比較



図(4)-15 2015年7月24日、8月24日、9月1日、9月16日の
幕張沖浚渫窪地におけるイオウ粒子濃度の鉛直分布の計算値



図(4)-16 2015年7月24日、8月24日、9月1日、9月16日の
浦安沖浚渫窪地におけるイオウ粒子濃度の鉛直分布の計算値

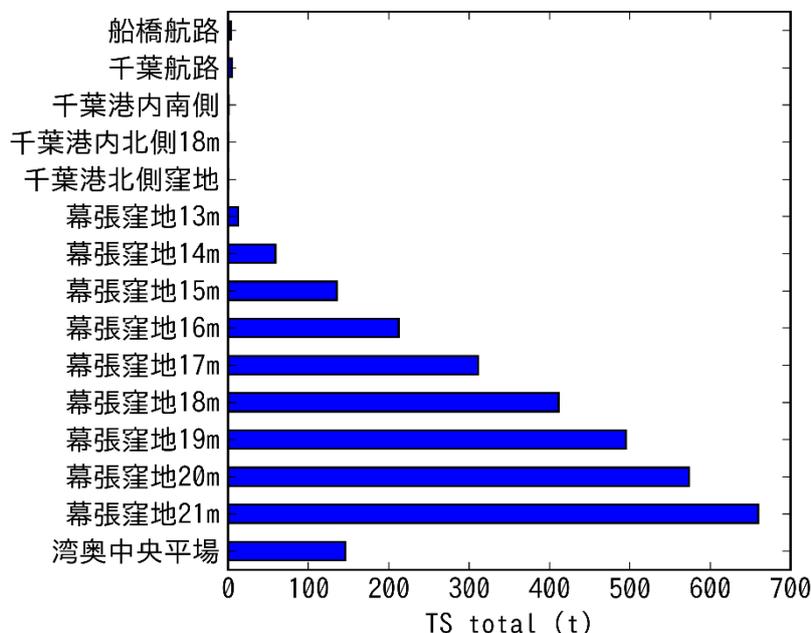
(3) 無酸素水塊の発生規模の推定と評価

図(4)-17に表(4)-1に示した各パラメータの値を仮定したときの、硫化物を含む無酸素水塊発生源別の硫化物総量の見積結果を示す。ここに、幕張窪地は各深度で浅い水塊が湧昇したと仮定した場合の湧昇硫化物総量を表す。この結果は硫化物の発生源として、幕張沖浚渫窪地のポテンシャルが極めて大きいことを示している。ただし、幕張沖窪地の水塊は低温高塩分なため密度が高く安定で、沖合からそれを越える密度の水塊が流入してこない限りほとんど湧昇が起こらない。大規模な青潮時でも深度14 mから15 m程度までしか湧昇しないことが知られており、その場合、湧昇する硫化物ポテンシャルは湾奥中央平場の硫化物総量と同程度と見積もられる。この湾奥中央平場の硫化物総量は既述のように2016年9月13日の観測結果に基づくものであるが、2016年は無酸素水塊の発達が比較的弱かったことから、さらに大きな値を採りうることは十分に考えられる。一方、船橋航路および千葉航路内に発生する硫化物の総量は幕張沖窪地や平場に比較してかなり少なく、それぞれ約3.3 tおよび4.5 tと見積もられた。

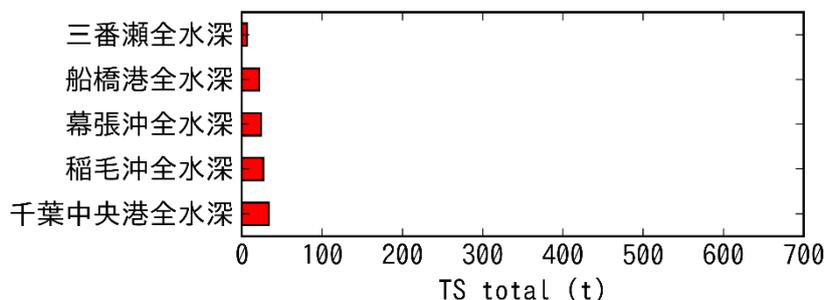
航路の硫化物を含む無酸素水塊はその地形的特徴から、青潮時には全量が湧昇するものと考えられる。その過程で貧酸素化した沖合水が航路内を流れる中で、新たに硫化物が発生するものと想定される。港湾空港技術研究所の硫化物生成実験結果から、その速度を約 $0.5\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ と仮定する

と、船橋航路内および千葉航路内ではそれぞれ1.64 t/dayおよび2.26 t/dayの硫化物が発生しうると見積もられる。これらは元々の硫化物存在量の半分程度に匹敵するものであり、硫化物からイオウ粒子への活発な変換が起こっているものと推察されるが、青潮発生時に酸素消費を引き起こす硫化物量としては、この新たに生成される硫化物のせいぜい数日分が加味される程度と考えられ、それらを合わせた硫化物を含むイオウの総量は10 t前後と概算される。一方、青潮発生海域別の青潮時の硫化物および硫化物の酸化で生成される単体イオウを合わせたイオウ総量ポテンシャルの見積を図(4)-18に示すが、船橋港および千葉中央港の全水深が0.5 mg/Lのイオウで満たされるためには、それぞれ21.48 tおよび33.67 tのイオウが必要と見積もられる。仮に全層の半分から1/3程度が主に青潮水であると考えたと、船橋航路および千葉航路を起源とする硫化物と同程度となる。

一方、三番瀬が青潮水に曝露されたときの硫化物を含むイオウの総量は6.6 t程度と概算された。この値は各硫化物発生源の硫化物総量と比較するとかなり小さな値であり、三番瀬が湧昇域に覆われる場合は容易に青潮状態となり得ることを示している。



図(4)-17 硫化物を含む無酸素水塊発生源別の硫化物総量の見積



図(4)-18 青潮発生海域別の青潮時の硫化物および硫化物の酸化で生成される単体イオウを合わせたイオウ総量ポテンシャルの見積

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

貧酸素や青潮影響の軽減策を考える上では、発生源対策がまず不可欠であるが、本研究では主要な発生源である、湾奥中央平場、浚渫窪地、および航路における硫化物を含む無酸素水塊の発生規模を明らかにした。中でも、平場における硫化物濃度のモニタリングは対象海域が広範囲にわたることから困難であったが、本研究では近年発達してきた、公的機関によるリアルタイムモニタリング結果を活用することで、効率的な把握が可能となることを示した。また、浚渫窪地では、幕張沖と浦安沖に存在する、規模の異なる2つの浚渫窪地を対象とした調査を行うことで、浚渫窪地の規模が硫化物濃度の大小に普遍的な影響を与えることを明らかにした。加えて、浚渫窪地や航路においては、硫化物を含む無酸素水塊と有酸素水塊の境界付近で硫化物の酸化に伴うイオウ粒子の析出（青潮と同じ現象）を捉えることができ、センサーによる簡便な測定が可能な濁度の鉛直プロファイルから、硫化物を含む無酸素水塊の層厚を推定可能であることを示した。一方、大小二つの浚渫窪地における水質測定結果の比較から、硫化物の濃度と濁度には必ずしも明瞭な関係はなく、硫化物濃度の測定無くして、硫化物を含む無酸素水塊の規模を推定することは困難であることも明らかとなった。

本研究ではまた、比較的簡易な数値モデルをベースとして、貧酸素および硫化物に関わる水質過程の再現を志向した数値予測システムを構築した。このシステムは、非静水圧3次元流動モデルと標準的な水質・低次生態系モデルをベースとしたものである。本システムにより、冬季の1月から計算を開始し、時々刻々の気象、河川、湾口海象に関する境界条件によってモデルを駆動することで、浚渫窪地や航路における貧酸素化と硫化物の発生、消滅過程をシームレスに再現可能となることを示した。システム開発においては、しばしば採用される静水圧近似モデルでは浚渫窪地等の局所的な地形急変部における再現性が十分ではないこと、および、植物プランクトンの光合成により生産された新鮮な有機物が底質に移行し、その分解を通して急速な貧酸素化や硫化物の生成が起こることを表現することが必要であることを明らかにした。逆に、これらの点に注意してモデル化するならば、比較的簡易なモデルであっても、時々刻々の再現を行いながら周年スケールの現象再現がある程度可能であることが示唆された。幕張沖と浦安沖の規模の異なる浚渫窪地における調査結果から明らかとなった、両者の硫化物濃度のオーダーの相違が数値シミュレーションにおいてもよく再現され、様々な物理的、生物化学的過程の中でも、特に移流・拡散といった物理過程の重要性が明らかとなった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

船橋市漁業協同組合が事業主体となり、千葉県および船橋市の補助金を得て、東京湾三番瀬における青潮対策として、水流発生装置を用いた青潮軽減対策に関する取り組みを2016年度から3カ年の予定で開始されている。これは、東京湾における青潮対策としては初めての本格的な行政支援による取り組みであり、その中では、無酸素水塊の発生源の特定と青潮の発生経路、および青潮発生時の水流発生装置による無酸素水塊の低減効果の予測に基づき、水流発生装置の効果的な配置と規模の検討が必要となっている。東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻佐々木研究室では、本研究成果をベースとして、本取り組みに当初より協力し、無酸素水塊の

発生源および発生経路に関する助言を行うと同時に、本研究で開発している無酸素水塊予測システムに水流発生装置の機能をモデル化して組み込み、水流発生装置の貧酸素水低減効果予測や水流発生装置の規模と配置の最適化に関する検討に活用することで、本取り組みの実装に貢献している。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で明らかのように、貧酸素水塊と硫化物を含む無酸素水塊はその影響に大きな違いがあり、硫化物を含む無酸素水塊は硫化物の酸化や硫化水素の毒性の影響のため、より深刻な影響を及ぼす。また、硫化物総量を含む無酸素水塊の規模が青潮影響の程度に大きく寄与することから、硫化物の把握が重要であることがあらためて示された。現在の環境基準や公共用水域水質測定では底層の溶存酸素濃度が指標となっており、貧酸素水塊の規模の縮小および解消は環境政策上の最重要課題の一つに位置づけられていると理解するが、實際上その達成は極めて困難であり、現状では必ずしも適切な環境基準とは言えない対象海域が存在する。夏季の東京湾のように、無酸素水塊が恒常的に発生する現状を考えると、行政が設定すべき現実的な目標として、硫化物を含む無酸素水塊が発生しなくなることを採用すべきであり、そのためこのような海域においては、底層硫化物濃度を環境基準として設定することが期待される。本研究はその方向に向けた検討への根拠を提示するものとする。

行政が貧酸素および硫化物影響の軽減策を検討するに際しては、硫化物を含む無酸素水塊の発生源対策と無酸素水塊の湧昇後の影響軽減を目的とした対症療法による対策が考えられる。まず、発生源対策を考える際には、硫化物を含む無酸素水塊の把握が不可欠であり、本研究の成果によって、検討すべき無酸素水塊の発生源が特定され、効率的なモニタリング方法を採用することが可能である。本研究にも示されているように、無酸素水塊の発生源としては、湾奥中央平場、浚渫窪地、および航路が挙げられる。行政が発生源対策を検討するに際しては、それぞれの発生源を対象とした際の費用対効果の把握が必要となる。本研究の成果により、浚渫窪地における埋め戻し等による無酸素水塊解消対策は十分に効果的であることが示された。一方、航路は船舶航行上その存在が不可欠であり、埋め戻しの適用は不可能である。酸素供給等による対策の可能性はあるが、本研究の成果によれば、航路における無酸素水塊の規模は浚渫窪地に比較してかなり小さく、その直接的影響は概ね港内とその周辺に限られることから、航路に対する対策を採らないとしても、浚渫窪地の対策を採ることで、青潮軽減効果を発現させることができる。このように本研究の成果は浚渫窪地のみに対策が留まるとしても、青潮軽減に効果を発揮することを示す根拠となるものとする。一方、平場の無酸素水塊の発生は間欠的であり、状況によっては大規模に発生する可能性があるが、3年間の調査からその頻度は高くないことが示唆された。平場の無酸素水塊の縮小には干潟・浅場の再生等の長期的な取り組みが不可欠であり、当面は青潮発生時の対症療法として取り組むより他に手はないと考えられる。

本研究で構築した、硫化物を含む無酸素水塊予測システムは、現状と同様の流入負荷等の環境条件の下で、浚渫窪地の埋め戻し等、局所的な地形改変による無酸素水塊の発生源対策や、酸素供給等による青潮の対症療法に関する検討を行う際に有用なツールとなるものと確信する。特に、浚渫窪地の規模の大小が硫化物濃度の高低や無酸素水塊規模に与える影響について、周年スケールでの再現が可能となっていることから、浚渫窪地の埋め戻しの程度が青潮影響の軽減に与える

影響といった、小規模な対策を検討する上でも有用なツールとなり得るものとする。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

※雑誌名は正確に、欧文誌の場合は雑誌の正式な略称で記載すること（IE等の検索の際、支障をきたすため）。

<論文（査読あり）>

- 3) 佐藤文也、佐々木淳、佐野弘明、呉海鍾：東京湾奥部における硫化物を含む無酸素水塊の変動特性と数値再現、土木学会論文集B2（海岸工学）、71(2)、I_1267-I_1272、2015.
- 2) 呉海鍾、佐々木淳、佐野弘明：東京湾奥部における柱状採泥に基づく有機汚濁底質の時空間堆積特性、土木学会論文集B2（海岸工学）、72(2)、I_1291-I_1296、2016.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 佐々木淳：内湾における環境再生の課題－官民連携による生き物生息場づくりの取り組み、都市計画、66(1)、30-33、2017.（依頼解説論文）

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 佐藤文也・佐々木淳・呉海鍾：東京湾奥部における無酸素水塊の時空間分布、第28回日本沿岸域学会研究討論会、水戸市、2015.
- 2) 呉海鍾、佐々木淳、佐野弘明：東京湾奥部の柱状採泥に基づく有機汚濁底質環境分析に関する研究、第29回日本沿岸域学会研究討論会、高知市、2016.
- 3) 佐々木淳、呉海鍾：東京湾奥部における無酸素水塊規模の推定に関する検討、第29回日本沿岸域学会研究討論会、高知市、2016.
- 4) Sasaki、 J.: Strategies and policies towards environmental and fisheries restoration in Tokyo Bay、12th Int. Conf. Coasts、 Ports and Marine Structures、 Tehran、 Iran、 2016.（基調講演）

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 第119回東京大学公開講座「人間はシンポしているか？」（主催：東京大学公開講座企画委員会、2014年4月26日、東京大学法文2号館、参加者約700名）にて、「沿岸域の防災・環境と向き合う人間の進歩」の講演で研究紹介
- 2) 一般公開シンポジウム「第15回東京湾シンポジウム」（主催：国土交通省国土技術政策総合研究所、2014年10月24日、横浜赤レンガ倉庫1号館3階ホール、参加者約300名）にて講演
- 3) 一般公開シンポジウム「第16回東京湾シンポジウム」（主催：国土交通省国土技術政策総合

研究所、2015年10月23日、横浜赤レンガ倉庫1号館3階ホール、参加者約300名)にて講演

- 4) うらやす市民大学「環境特別講座」(主催：浦安市、2017年3月4日、うらやす市民大学受講室、聴講者約70名)にて成果紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 佐々木淳：持続型社会の構築に向けた港湾への期待，港湾，90巻，2013.
- 2) 石井光廣，古川恵太，佐々木 淳，柿野 純，増田修一，小森明裕，桃井幹夫，麻生晃也：東京湾底層DO分布の短期予測システムの水産分野への活用に向けた実証的研究，土木学会論文集B2（海岸工学），67(2)，1236-1240，2011.
- 3) 岡田知也，古川恵太：東京湾沿岸域における音響装置を用いた詳細な底質分布図の作成とベントス生息場，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1431-1435，2005.
- 4) 吉本侑矢，佐々木 淳，下迫健一郎，木村俊介：浚渫窪地における導水を用いた貧酸素改善に関する検討，土木学会論文集B2（海岸工学），65(1)，1176-1180，2009.
- 5) 佐々木淳，磯部雅彦，渡辺晃，五明美智男：東京湾における青潮の発生規模に関する考察，海岸工学論文集，43，1111-1115，1996.

(5) 貧酸素・硫化物の蓄積過程の解析と実験

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
海洋情報・津波研究領域 海洋環境情報研究グループ 井上 徹教

平成26～28年度累計予算額：28,683千円（うち平成28年度：7,788千円）
予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

生化学的な環境条件のコントロール法のみならず底層水の流動という物理的な環境条件についても現場環境を再現することが可能な、未攪乱堆積物コアを用いた室内培養実験手法の確立を行った。その結果、現場堆積物直上の流動観測より得られた平均流速の値と、堆積物コア内の平均流速の値を等しくすることで、現場と矛盾のない室内実験結果が得られることがわかった。

次に、上記で確立した室内実験手法を用いて、底質環境の改善手法を提案することを目的とし、室内実験において種々の鉄資材を添加した未攪乱底泥コアを用いた溶出実験を行うことにより、硫化水素を長期間にわたり沈殿・除去するために適切な鉄添加量および有効な鉄資材の2点について検討した。その結果、三河湾での硫化物循環の一つの指針となる硫化物溶出速度が得られるとともに、硫化水素を沈殿・除去するための適切な鉄添加量および有効な含鉄資材についての指針が得られた。

さらに、東京湾奥部に位置する千葉港において設置・稼働されていた高濃度酸素水供給装置について、その効果を検討した。その結果、堆積物中のCODの変化量からCODを1(mg/g乾泥)減少させるのに必要な日数を算出された。

最後に、堆積物内の生化学的な数理モデル化を行うとともに、底面境界層を表現する物理的な数理モデルを組み合わせ、水・堆積物界面近傍での物質循環過程を精度良く再現できるモデルの構築を行った。

[キーワード]

青潮、対策技術、室内実験、鉄散布、三河湾

1. はじめに

富栄養化した閉鎖性内湾では、夏季の密度成層の発達に伴い、底層の貧酸素化や愛潮の原因物質となる硫化物濃度の上昇がしばしば認められる。これらは共に堆積物による影響を強く受けた結果であり、貧酸素化や青潮発生状況を定量的に把握するためには、水・堆積物間の酸素や硫化物の輸送速度を正確に見積もる必要がある。このため、これまで未攪乱堆積物コアを用いた室内培養実験が行われてきており、生化学的な環境条件のコントロール法については確立されていたが、底層水の流動という物理的な環境条件については十分な検討が行われていなかった。そこで本サブテーマでは、まずこの点に着目した室内実験手法の確立を行った。

次に上記の室内溶出実験を行い、三河湾における堆積物からの硫化物溶出速度を定量化するとともに、その抑制対策として堆積物表面への鉄剤散布を挙げ、その効果を見積もった。また、東京湾奥で行われた底層曝気による底質改善効果を見積もった。最後に、本研究を数値的に表現するモデル化を行い、サブテーマ1における今後のシミュレーションモデルの改良に資する知見を得た。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、まず生化学的な環境条件のコントロール法のみならず底層水の流動という物理的な環境条件についても現場環境を再現することが可能な、未攪乱堆積物コアを用いた室内培養実験手法の確立を目的とする。次に、その確立した室内実験手法を用いて、三河湾での硫化物溶出速度を定量するとともに、硫化水素を沈殿・除去するための適切な鉄添加量および有効な含鉄資材についての指針を得る。さらに、東京湾奥部に位置する千葉港において設置・稼働されていた高濃度酸素水供給装置について、その底質改善効果を検討する。最後に、堆積物内の生化学的な数理モデル化を行うとともに、底面境界層を表現する物理的な数理モデルを組み合わせ、水・堆積物界面近傍での物質循環過程を精度良く再現できるモデルの構築を行う。

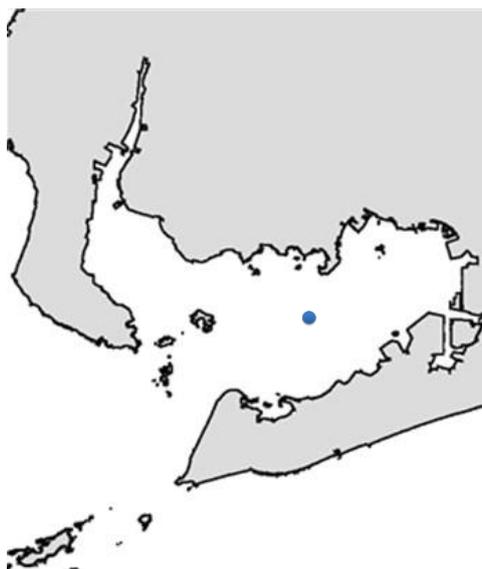
3. 研究開発方法

(1) 室内実験手法の確立

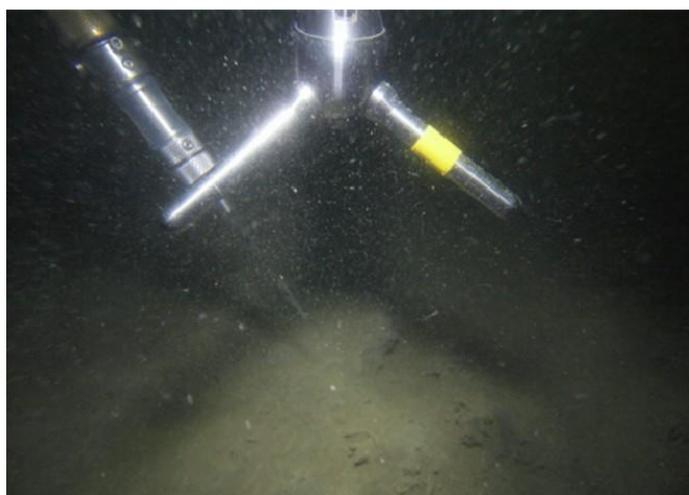
1) 現場実験の解析

本研究では、三河湾で採取したデータを用いて行ったコア培養実験と現地観測データの解析結果を比較し、現場の値を定量化できる手法を開発する。また、渦相関法で得られた酸素消費フラックス (SOD: sediment oxygen demand) と平均流速の関係を考察する。さらにコア培養実験での攪拌速度と流速の関係、流速と酸素消費速度の関係を検討する。流動条件に着目することで、最適なコア実験の条件設定が可能になり、現場の値を精度よく室内実験から推定することが可能になる。

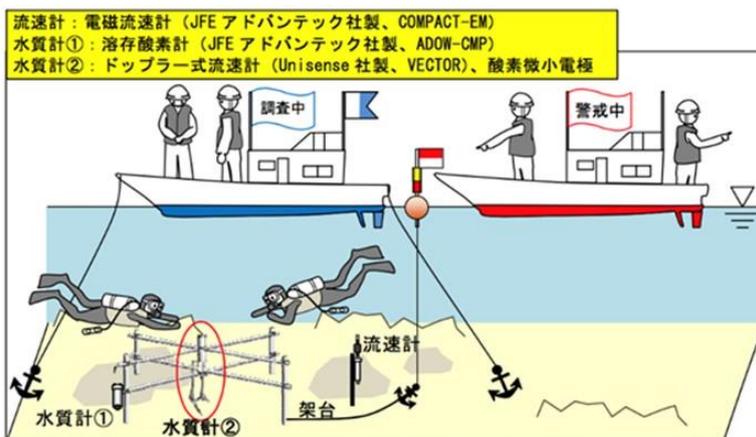
まず、現地調査の概要を述べる。三河湾内の水深12メートル程度の水域 (図(5)-1参照) において、ドップラー流速計及び酸素微小電極 (図(5)-2参照) を海底近傍に設置し、渦相関法により海底上約10cm程度の高さにおいて酸素の鉛直輸送フラックスを計測した。図(5)-3に示すように機材の設置はダイバーにより行い、自記式の溶存酸素計や電磁流速計を併設することで微小酸素電極のキャリブレーション等を行った。



図(5)-1 調査地点



図(5)-2 ドップラー流速計及び酸素微小電極



図(5)-3 酸素フラックス測定装置測定状況図

2) コアバッチ実験の解析

上記と同地点同時期において、現地より採取した未攪乱堆積物コアを用いて堆積物による酸素消費フラックスの推定を目的とするバッチ法によるコア培養実験も行っている。室内実験装置においてLDV (Laser Doppler Velocimeter) によるコア内の流動測定を行った (図 (5)-4)。測定はコアの底面から0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 cmの各高さ、コア中心から半径方向に0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 cmの計24箇所で行った。コア内の直情水はプロペラにより攪拌されるが、この攪拌速度を33.3, 46.7, 60.0, 73.3, 86.7rpmの5段階に分けて測定を行った。攪拌速度を変更した直後は変化の影響が水中全体に十分に伝わるよう時間間隔をあけて測定した。また、適切な測定時間を検討した結果、各点において60秒間測定を行うこととした。

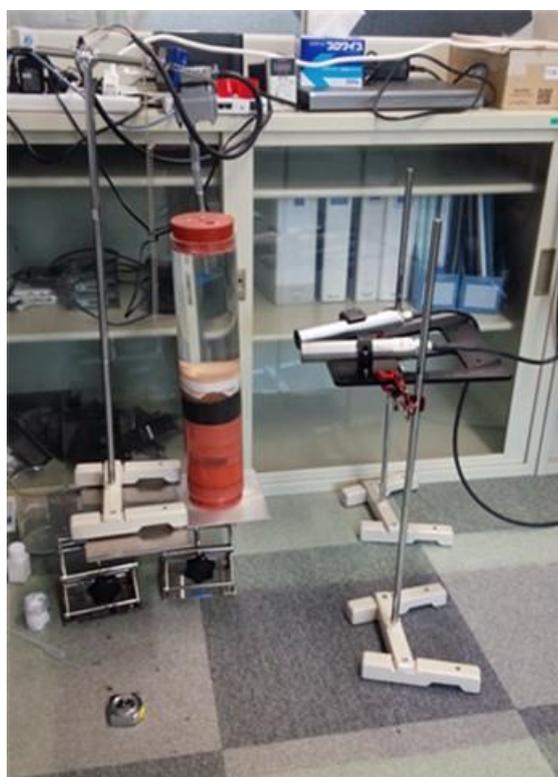
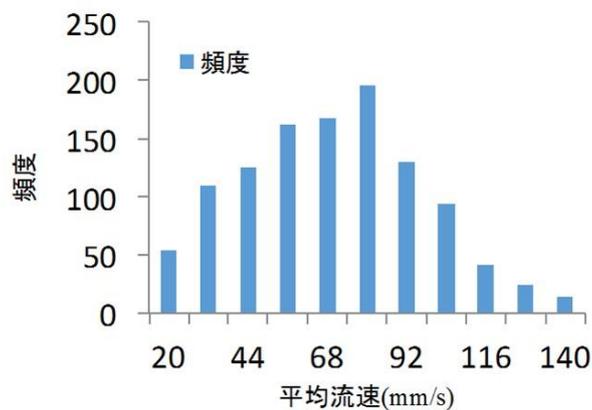


図 (5)-4 LDV測定状況

測定データ自体には多くのノイズと思われる成分が含まれていたため、流速のヒストグラムによりノイズの除去を行った。頻度が最大の流速区間に対し、10%以下の流速区間を削除することでノイズを除去し正確な平均流速を算出することとした。ヒストグラムの一例を図 (5)-5に示す。作業手順は以下の通りである。

- ① 測定した流速の最大値と最小値を求めおおよそ10の区間に分割する。
- ② 頻度が最大の流速区間に対し、10%以下の流速区間を削除する。
- ③ ①, ②の作業を任意の回数繰り返し、頻度の分布が左右均等 (山型) になるまで行う。



図(5)-5 ヒストグラムの一例

3) 現場観測との比較培養実験

三河湾における底層の貧酸素化および底層への硫化物蓄積過程を定量的に考察することを目的とし、現場堆積物を用いた室内実験を行った。未攪乱堆積物コアの採取は、図(5)-6に示す調査地点Stn. 1において行った。調査船をアンカーで固定した後スクーバ潜水によりアクリルパイプ（高さ50cm×内径100mm）5本を用いて、高さ30cm程度の未攪乱堆積物コアを海底より採取した（図(5)-7参照）。同時に底層水も採取し、後述の培養実験に使用した。



図(5)-6 調査地点



図(5)-7 未攪乱堆積物コアの採取状況

採取した未攪乱堆積物コアは速やか未実験室に持ち帰り、採取地点底層近傍の水温に調節した恒温水槽内に設置した(図(5)-8参照)。コア内の直上水は、現場底層水をガラスフィルター(Whatman, GF/C)でろ過したもので置換した。コア上部は、直上水の攪拌装置、溶存酸素(DO)メーターのプローブ部、採水口を付けたゴム栓で蓋をし、直上水の空気への暴露を防いだ。未攪乱堆積物コアの培養期間中は、装置全体を暗幕で覆うことにより、暗条件での実験とした。



図(5)-8 室内実験の様子

本調査では、コア内の直上水の攪拌速度を変化させることで、直上水の流動が堆積物による酸素消費速度に与える影響について検討した。攪拌条件は5段階に変更し(計5RUN実施)、他の条件は同一のものとした。各RUNではコア直上水の攪拌速度は一定とし、連続的に攪拌を行うことでDO濃度等は一様に保つこととした。各RUNは5時間程度の培養時間とし、期間中のコア内のDO濃度を連続的にモニターすることでその変化率より堆積物による酸素消費フラックス(以下SODとする)を次式より計算した。

$$V \frac{dC}{dt} = -SOD \cdot A \quad (5.1)$$

ここで、Vは直上水の体積、Cは直上水中のDO濃度、tは実験経過時間、Aは堆積物表面積(コア断

面積)を表す。

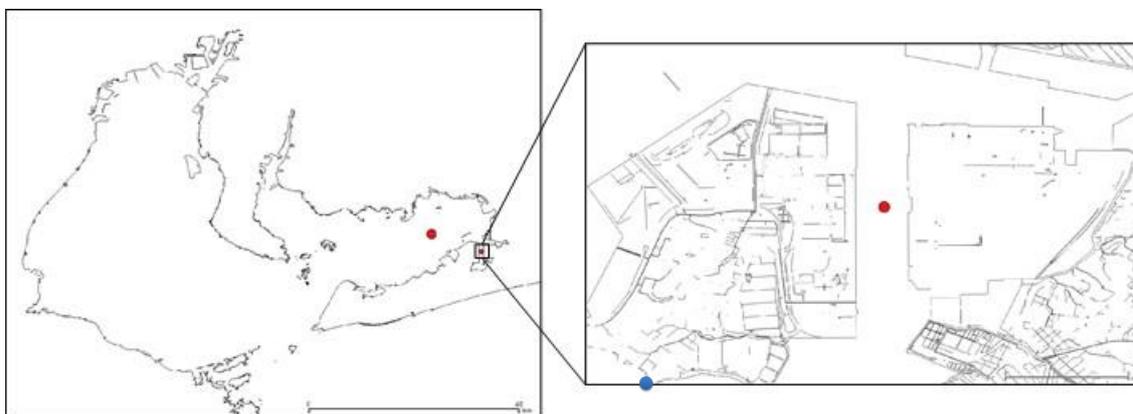
また、上記のSOD測定実験終了後、直上水を窒素曝気により無酸素化させた後、恒温水槽内の温度を25℃に上昇させ継続して培養することで硫化物溶出実験とした。本実験においては、約12時間毎にペリスターポンプを用いて直上水を抽出すると同時に窒素曝気したろ過底層水をコア内に補充することで直上水を採取した。空気への暴露を防ぐため、採取した直上水は予め発色試薬を投入したサンプル瓶に直接垂下させ、メチレンブルー法により発色させた後、分光光度計により波長660nmでの吸光度測定を行った。

(2) 鉄剤散布による硫化物溶出抑制実験

上記で確立した室内実験手法を用いて、底質環境の改善手法を提案することを目的とし、室内実験において種々の鉄資材を添加した未攪乱底泥コアを用いた溶出実験を行うことにより、硫化水素を沈殿・除去するために適切な鉄添加量および有効な鉄資材の2点について検討した。なお、本研究では伊勢湾・三河湾を調査対象とした。

今回実験の対象としたのは、三河湾の湾奥部の堆積物である。採泥現場 (HS09) は北緯34度42分、東経137度18分に位置し、水深はC. D. L=10.2mである (図(5)-9参照)。採泥現場には埋め立て工事の採土浚渫の結果生じた深掘箇所があり、急激に水深が深くなるため、水が滞りやすく堆積物が溜まりやすい環境である。

採泥は2016年6月22日、7月20日、8月24日、9月27日に実施した。採泥は円形アクリルパイプ (内径10cm, 外径11cm, 高さ50cm) を直接底泥に差し込むことにより乱さないように行い、採泥したサンプルコアはただちに実験室に持ち帰り、実験装置に設置した。調査工程を表(5)-1に示す。



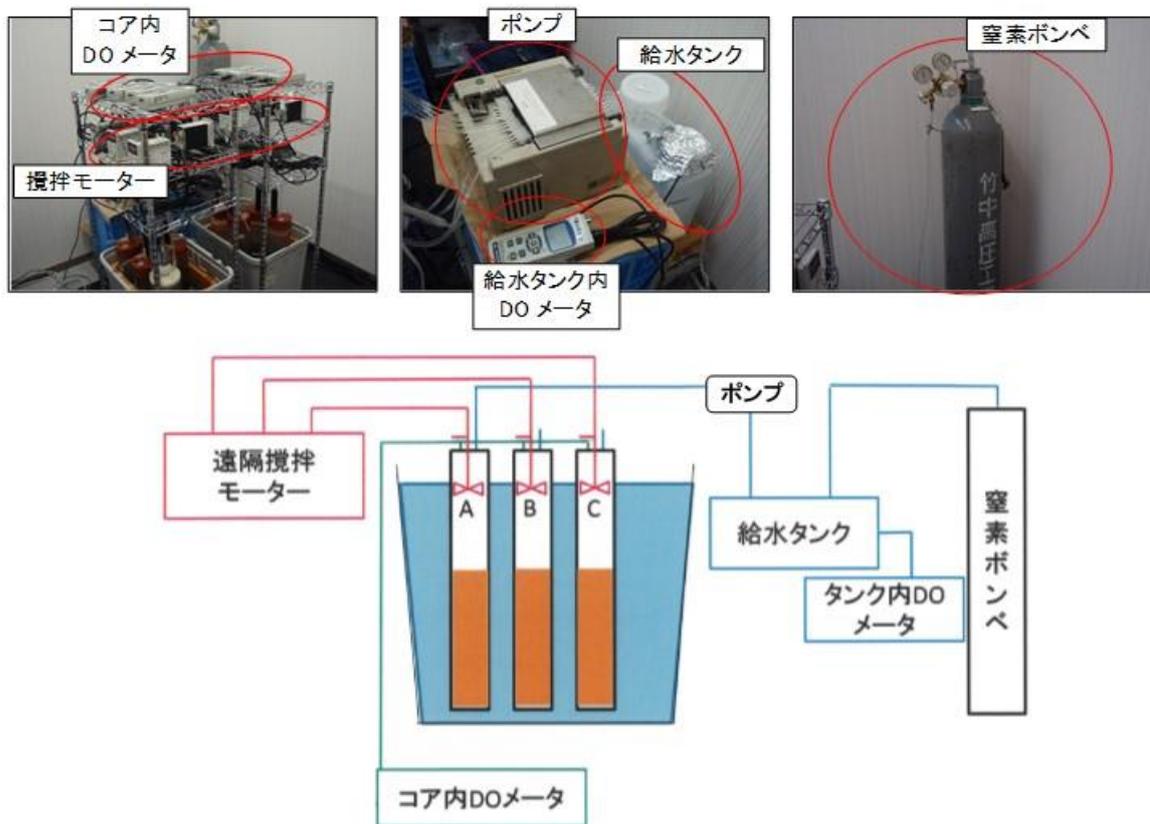
図(5)-9 調査地点

表(5)-1 調査工程

	1	2	3	4	5	6	7	8	(日目)
①室内実験準備	準備 (底泥受け取り)								
②室内実験		試験 ←1日目→	試験 ←2日目→	試験 ←3日目→	試験 ←4日目→	試験 ←5日目→			
③実験終了後の堆積物分取							分取 (輪切り作業)		
④堆積物サンプルの分析							分析 (後日分析 サンプルは 冷凍)		
⑤室内実験片付け								片付け、 サンプル 送付	

6月	6/22	6/23	6/24	6/25	6/26	6/27	6/28	6/29
7月	7/20	7/21	7/22	7/23	7/24	7/25	7/26	7/27
8月	8/24	8/25	8/26	8/27	8/28	8/29	8/30	8/31
9月	9/27	9/28	9/29	9/30	10/1	10/2	10/3	10/4

実験は図(5)-10に示す、窒素ガス、給水タンク、恒温水槽、攪拌モーター、それらをつなぐチューブ類などの準備・設置を行い、溶存酸素計(DOメーター)の空気校正・設置を行った。



図(5)-10 実験装置図

現場において採取した未攪乱堆積物コア10本のうち採泥条件の良い6本を用いて、静置培養実験を5日間行った。6月、7月、8月の溶出実験について、6本の内3本は鉄粉添加、3本は水酸化第二鉄添加とした。9月の溶出実験については、6本の内2本は水酸化第二鉄添加、2本は酸化水酸化鉄(Ⅲ)添加、2本は四酸化三鉄添加とした。供給水には、現場から採取した底層水をワットマンGF/Cでろ過したものを窒素曝気して用いた。得られた水サンプルは冷凍保管し、実験終了後に冷凍の宅配便で港湾空港技術研究所に送付した。

実験後の堆積物は、堆積物の酸化還元状態を変化させないように十分に注意し、実験に使用した6本のコアについて表層9cmを1.5cm毎に軟膏瓶に分取した。得られた底質サンプルは冷凍保管し、実験終了後に冷凍の宅配便で底質分析室に送付した。

底質についてpH、ORP、含水率、強熱減量、化学的酸素要求量(COD)、全窒素、全リン、遊離硫化物、酸揮発性硫化物、全鉄、間隙水中のリン酸態リン、間隙水中の全リン、間隙水中のアンモニア酸態窒素、間隙水中の亜硝酸酸態窒素、間隙水中の硝酸酸態窒素、間隙水中の全窒素、間隙水中の溶存鉄(ICP法)、間隙水中の溶存マンガン(ICP法)の分析を行った。pH、ORP、遊離硫化物の分析と間隙水の抽出については速やかに行った。分取や間隙水の採取においては、酸化還元状態等の底質の状態の変化がないよう十分注意した。

(3) 東京湾奥での底質浄化実験

堆積物からの硫化物溶出抑制手法の一つとして、底層曝気が挙げられる。本項では東京湾奥部に位置する千葉港において設置・稼働されていた高濃度酸素水供給装置について、その効果を以下に検討する。

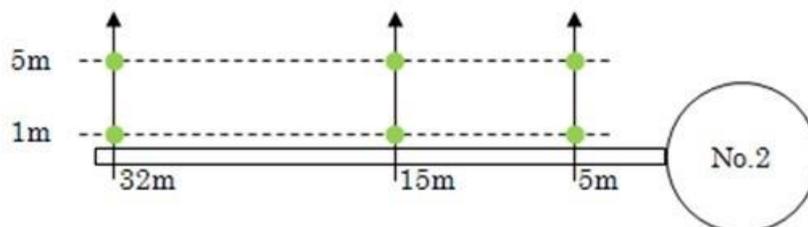
高濃度酸素水供給装置は3台設置されていた。装置は水中に沈められており、水圧を利用して効率よく酸素を溶解させることができる特徴を持つ。浄化装置稼働に期待する効果は以下のことが考えられる。

- 1) 高濃度酸素水による底質改善効果
- 2) 底質改善に伴う底生生物生息状況の改善効果
- 3) 底泥による酸素消費及び栄養塩溶出の抑制効果
- 4) 青潮や貧酸素水塊来襲時の魚介類の避難場所としての利用

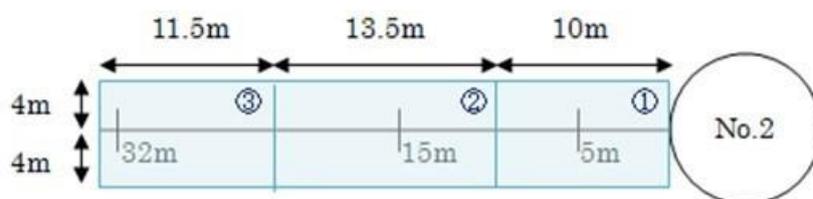
平成22年度のモニタリング調査では、浄化装置から離れた場所では底質の改善効果がみられなかった。そこで、海底面へ高濃度酸素水を長時間暴露させるための装置改良がおこなわれた。改良があったのは3台のうちの1台(No.2)で、穴のあいた約35mの吐出管が設けられた。穴は下向きに開いており、高濃度酸素水を直接海底面に噴出できる。また、平成23年度のモニタリング調査では、改良を施したNo.2では高濃度酸素水による底質改善効果が見られた。一方未改良のNo.1およびNo.3では、底質改善効果や底生生物への効果は見られなかったと報告されている。

No.2の装置は、図(5)-11のような観測地点が設けられた。各観測地点について、6月と9月の底質状況が観測されているので、この値をもとに底質改善に消費された酸素の量を計算した。また、底質改善された土の体積は、以下のように計算した。まず、どの地点でも吐出管から垂直方向4mまで、海底面から深さ5cmまでの範囲は底質が良くなっただろうと仮定した。次に、この直方体を3つに区切った(図(5)-12)。図(5)-12の各直方体内では均一に底質改善が起こったと仮定し、吐

出管から1m離れた地点での測定値をもとに、直方体の中でどれだけの酸素が消費されたか計算した。



図(5)-11 観測地点平面図



図(5)-12 底質改善予測平面図

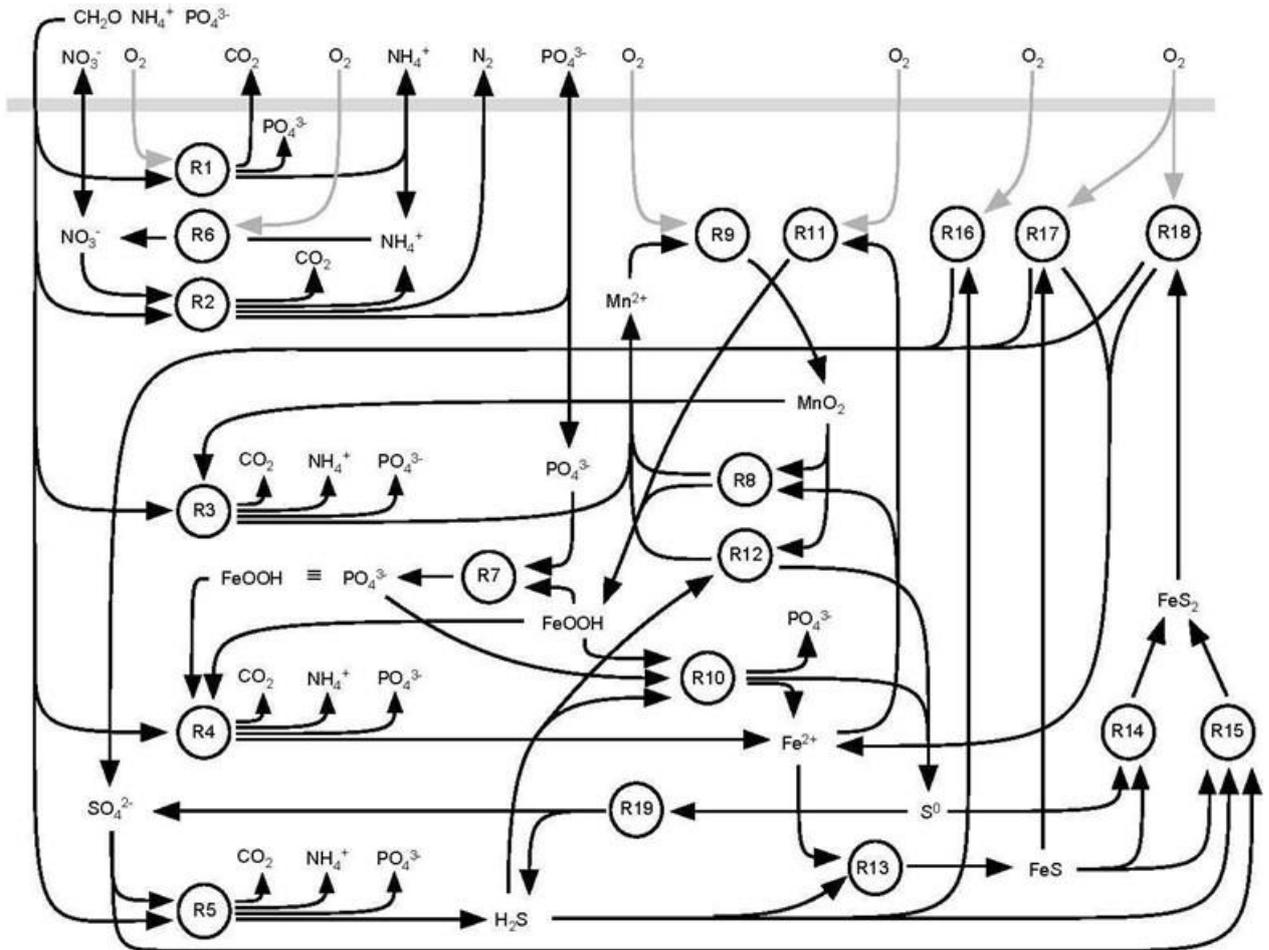
CODから酸素消費量を計算する際にはまず6月と9月の含水率から平均をとり、この平均の含水率と乾泥の密度および海水の密度を用いて、泥全体の体積に対する乾泥の体積の比率を求めた。次に、直方体の体積から直方体中の乾泥の体積を求め、乾泥の密度を掛けてその質量を計算した。最後に、乾泥の質量にCODの変化量を掛けて、消費された酸素の量とした。

T-Sから酸素消費量を計算する際には、まず以下の化学反応式から二硫化鉄1molが酸化されるのに必要な酸素の物質量を求めた。結果、二硫化鉄1molに対して酸素は4.25mol必要であることが分かった。

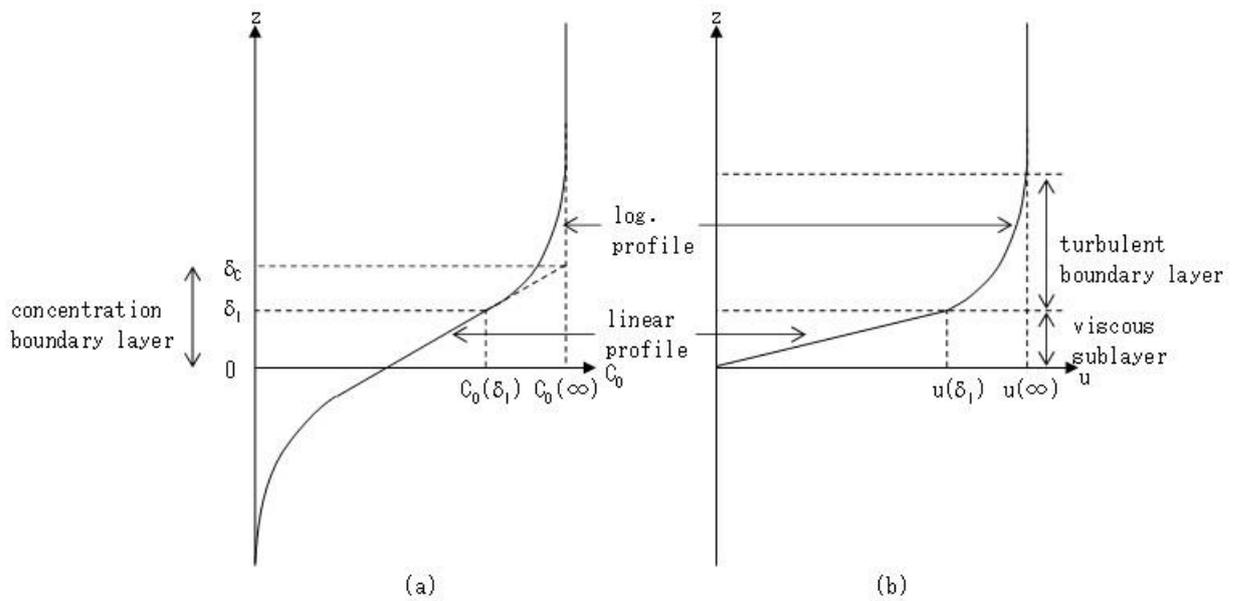


(4) 数理モデルの構築

堆積物中の硫化物動態を詳細に検討するためには精度良いモデル化を行う必要がある。本研究では、Fossing et al. (2004)¹⁾ (図(5)-13参照)を元に生化学的な数理モデル化を行うとともに、Inoue and Nakamura (2012)²⁾を元に底面境界層(図(5)-14参照)を表現する物理的な数理モデルを組み合わせ、水・堆積物界面近傍での物質循環過程を精度良く再現できるモデルの構築を目指す。



図(5)-13 物質循環モデル概念図



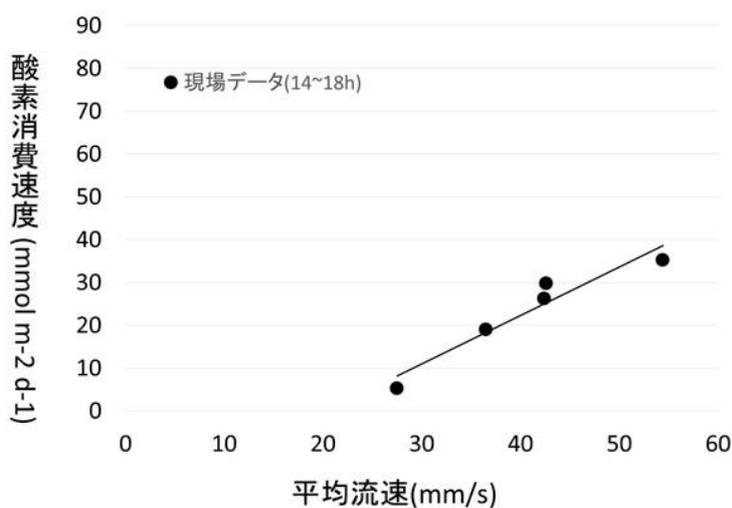
図(5)-14 底面境界層概念図

4. 結果及び考察

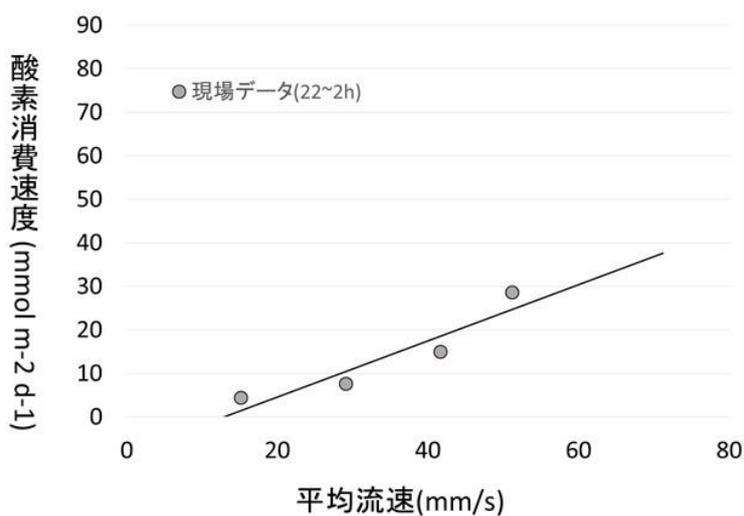
(1) 室内実験手法の確立

1) 現場実験の解析

観測期間中の結果において、4時間間隔の時間ウィンドウで分割してまとめた。現地データの解析より算出した酸素消費速度と平均流速の関係をまとめたところ、観測データが安定していた14～18時（図(5)-15）と22～2時（図(5)-16）の期間において流速と酸素消費フラックスとの間に明瞭な関係性が示された。



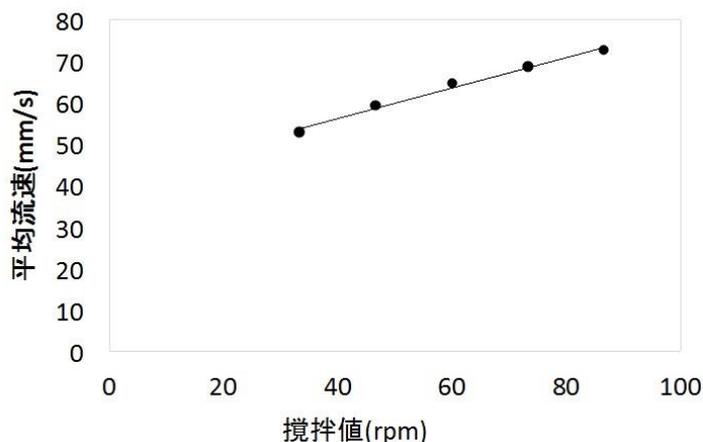
図(5)-15 酸素消費速度と平均流速の関係（14～18時）



図(5)-16 酸素消費速度と平均流速の関係（22～2時）

2) コアバッチ実験の解析

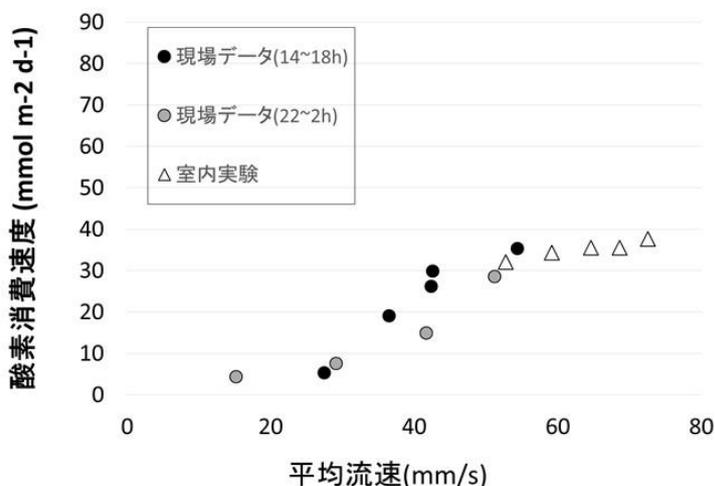
LDVによる測定結果を攪拌値ごとにまとめるため、全断面平均流速を算出した。算出方法としては、半径5cmのコア内を半径方向に1cmずつの5つの領域に分ける。それぞれの平均流速と断面積から全断面平均流速を算出した。算出した全断面平均流速と攪拌値の関係を図(5)-17に示す。



図(5)-17 コア内の平均流速と攪拌値の関係

3) 現場観測との比較培養実験

酸素消費速度と平均流速の関係について、現地解析結果と室内実験結果との比較を図(5)-18に示す。渦相関法による現場解析結果（図中丸印）と室内実験の結果（図中三角印）とでは平均流速において重なる範囲が少なかった。これは、室内実験においてコア内の攪拌速度を小さくすると溶存酸素電極による酸素濃度の測定に誤差が出るため、これより小さな攪拌速度の設定を行わなかったためである。今後は燐光等の異なる酸素濃度プローブを使用するなどの改良が必要である。しかしながら、現場解析結果と室内実験結果の関係性はおおむね一致した。これらの結果から、生化学的なパラメータのみならず、物理的なパラメータについても考察対象とできる室内実験系が確立されたと判断した。

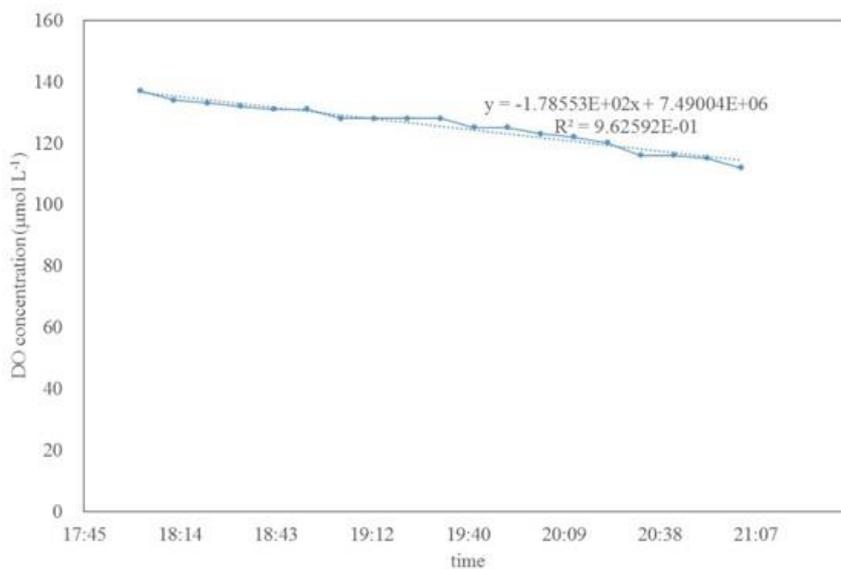


図(5)-18 酸素消費速度実験結果

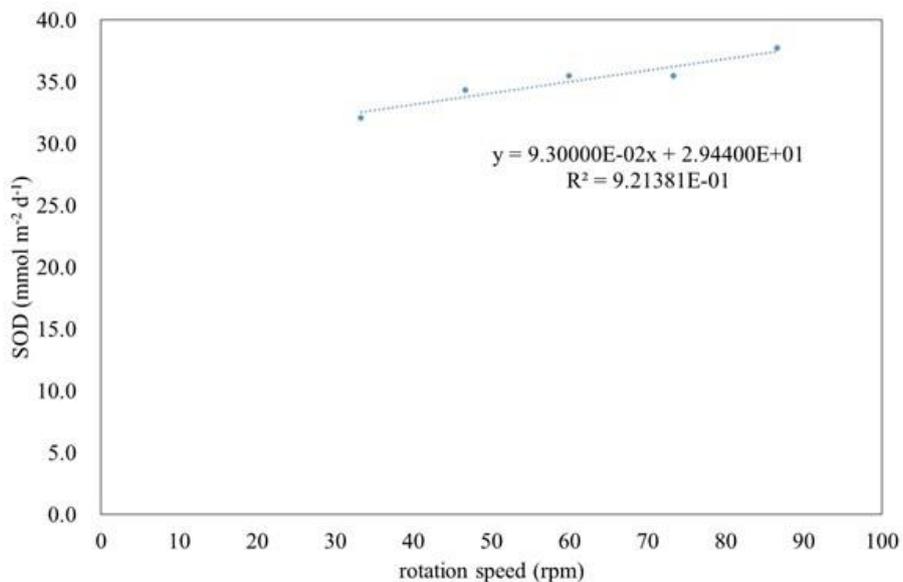
(2) 鉄剤散布による硫化物溶出抑制実験

1) 堆積物による酸素消費速度及び硫化物溶出実験

まず、三河湾堆積物の基本的な性状として、SOD測定実験結果の一例を図(5)-19に示す。堆積物の酸素消費により、直上水中の酸素濃度は時間の経過に伴い減少していく。この酸素濃度の減少速度から計算された堆積物による酸素消費速度と直上水の攪拌速度との関係を図(5)-20に示す。図より攪拌速度（流速）の増加に伴い、SODも単調に増加する様子が見て取れる。

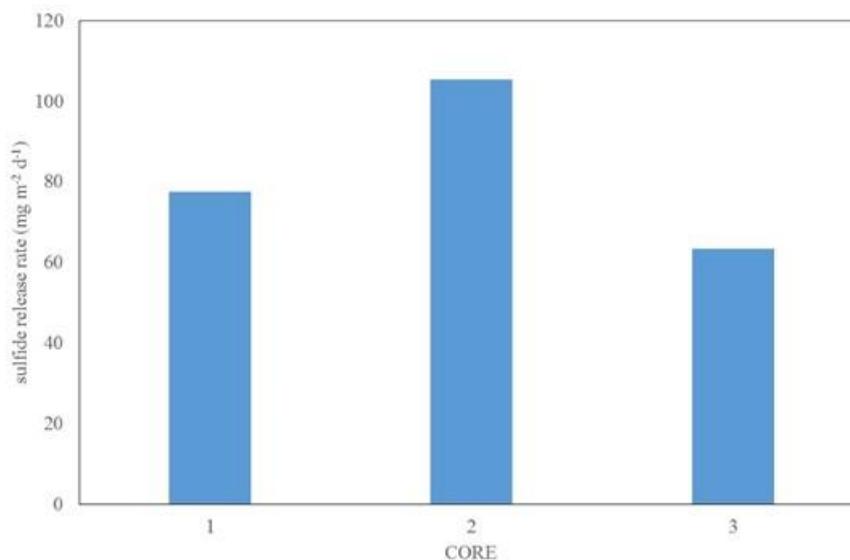


図(5)-19 コアバッチ法による酸素消費実験結果の一例



図(5)-20 攪拌速度と酸素消費速度との関係

次に、硫化物溶出実験の結果を図(5)-21に示す。コア毎でややばらつきが大きいですが、平均的には $82 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の値が得られた。詳細な解析にはより多くの観測点で、また異なる水温・時期での観測が必要となるが、三河湾での硫化物循環の一つの指針が得られた。



図(5)-21 硫化物溶出実験結果

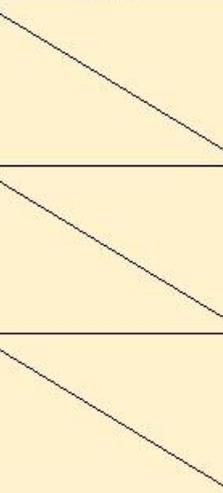
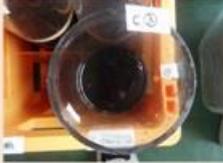
2) 鉄剤散布による硫化物溶出抑制実験

以下では硫化水素の溶出が顕著にみられた7月の実験結果について述べる。7月溶出実験開始前に採取した未攪乱堆積物コア10本のうち採泥条件の良い6本を用いて、静置培養実験を5日間行った(コアの名称を添加物別にB-①、B-②、B-③、C-①、C-②、C-③とする)。B-①、B-②、B-③、C-①、C-②、C-③の海水容量は、それぞれ約1.54L、1.32L、1.30L、1.33L、1.51L、1.24Lであった。

また、表(5)-2に7月溶出実験における各アクリルコアへの添加物量を示す。図(5)-22には各アクリルコアへの添加物の添加前、添加後、実験後の表層泥状況写真を示す。

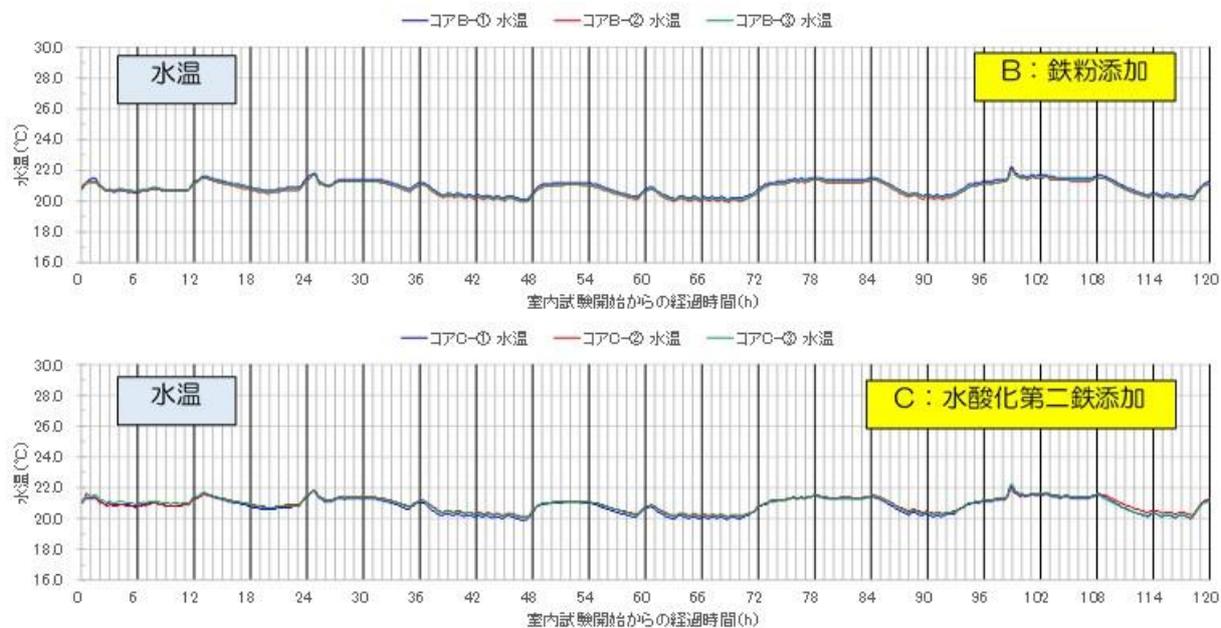
表(5)-2 各アクリルコアへの添加物量

「鉄粉」 添加量	B①	0.031	g
	B②	0.063	g
	B③	0.122	g
「水酸化第二鉄」 添加量	C①	0.053	g
	C②	0.108	g
	C③	0.201	g

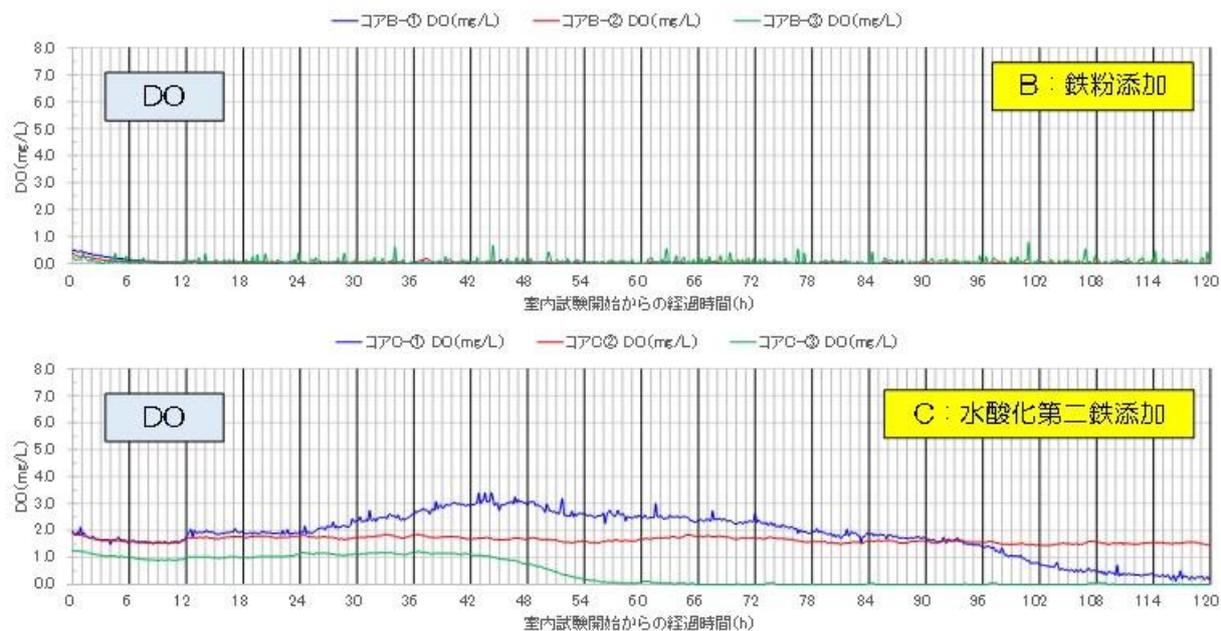
添加前	A: 無添加	B: 鉄粉添加	C: 水酸化第二鉄添加
①			
②			
③			
添加後	A: 無添加	B: 鉄粉添加	C: 水酸化第二鉄添加
①			
②			
③			
実験後	A: 無添加	B: 鉄粉添加	C: 水酸化第二鉄添加
①			
②			
③			

図(5)-22 各アクリルコアの添加前、添加後、実験後の表層泥状況

図(5)-23、図(5)-24に室内実験中の各コア内水温、溶存酸素（DO）の時系列グラフを示す。室内実験中のコア内海水水温は採泥時底層水温22.4℃を参考に調整を行った。各コアとも室内実験中の平均水温は20.9℃であった。各コア内DOは、実験中ほぼ0.0mg/Lを保っていた。

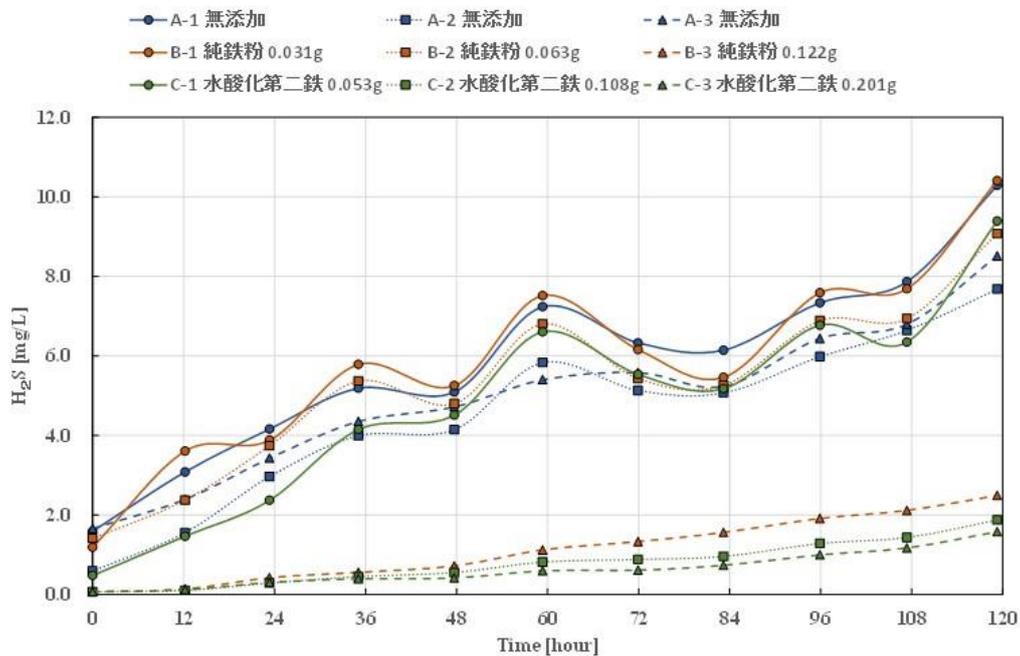


図(5)-23 室内実験期間中の各コア内海水水温時系列

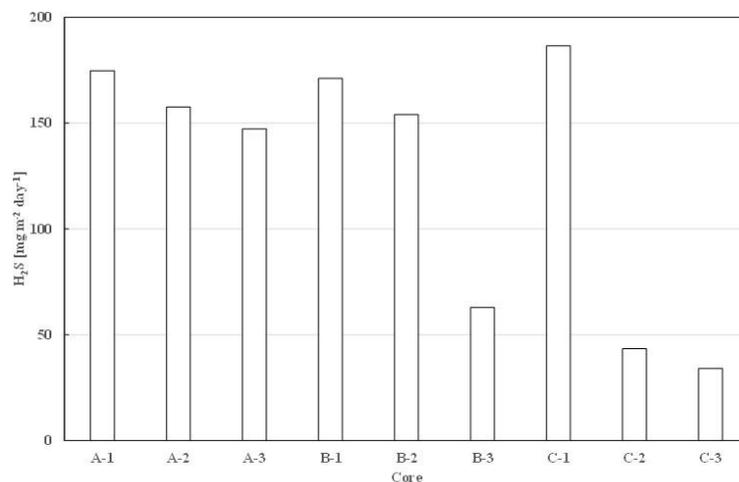


図(5)-24 室内実験期間中の各コア内海水溶存酸素時系列

7月に行った実験では、無添加のコア（A-1, A-2, A-3）での硫化水素の溶出フラックスは、それぞれ約 $175 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $158 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $147 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。純鉄粉を $4 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$, $8 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$, $1.6 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$ 添加したコア（B-1, B-2, B-3）では、硫化水素の溶出フラックスはそれぞれ約 $171 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $154 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $63 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であり、無添加のコアと比較してB-1, B-2ではほとんど変わらなかったが、B-3では約61%減少した。水酸化第二鉄を $7 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$, $1.4 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$, $2.6 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$ 添加したコア（C-1, C-2, C-3）では、硫化水素の溶出フラックスはそれぞれ約 $187 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $43 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $34 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であり、無添加のコアと比較してC-1ではほとんど変わらなかったが、C-2では約73%、C-3では約79%減少した。以上の結果から硫化水素を沈殿・除去するためには、適切な鉄添加量および有効な含鉄資材が異なることが示唆された。

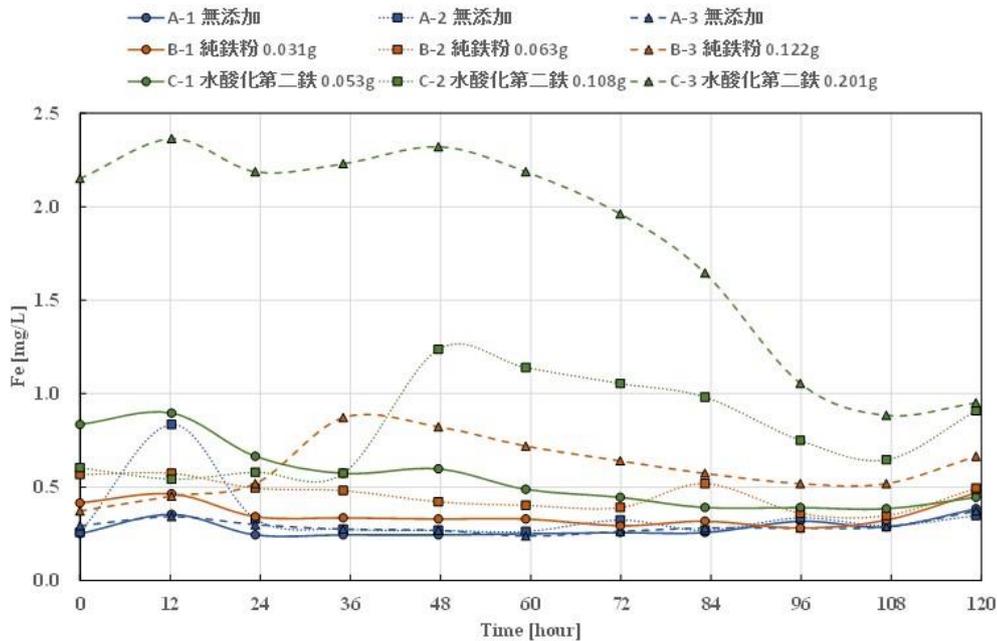


図(5)-25 室内実験期間中の各コア内硫化水素時系列

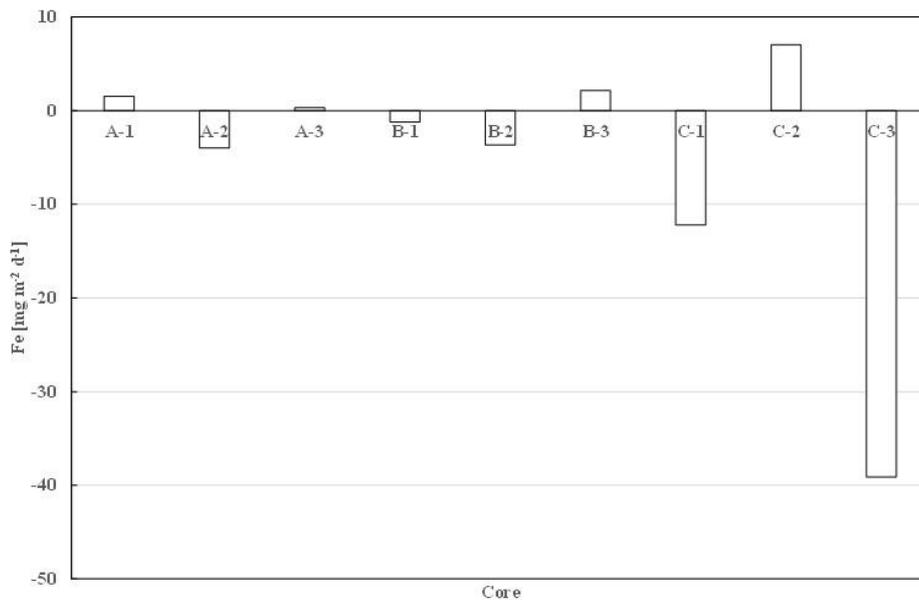


図(5)-26 各コアの硫化水素溶出速度

二価鉄濃度については、無添加のコア（A-1, A-2, A-3）での実験期間中の直上水の二価鉄濃度は約 0.3 mg L^{-1} であった。 $4 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$, $8 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$, $1.6 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$ の純鉄粉添加に伴い、直上水の二価鉄含量はそれぞれ平均で1.2, 1.5および2.0倍となった。また、 $7 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$, $1.4 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$, $2.6 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$ の水酸化第二鉄添加に伴い、直上水の二価鉄含量はそれぞれ平均で1.8, 2.7および5.9倍となった。

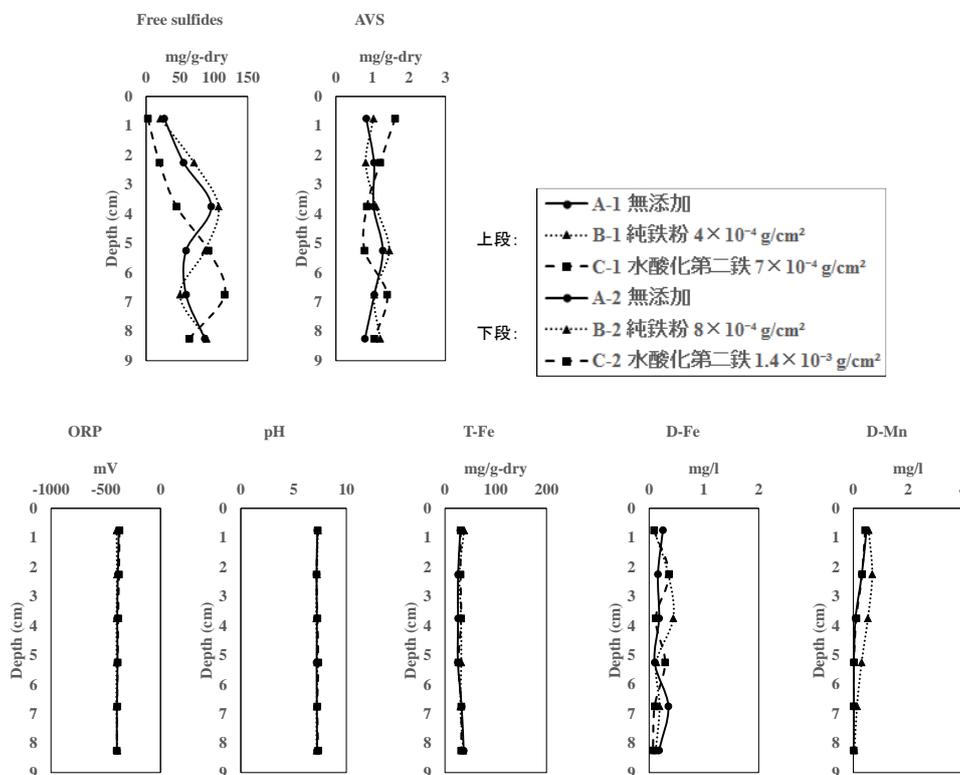


図(5)-27 室内実験期間中の各コア内二価鉄時系列



図(5)-28 各コアの二価鉄溶出速度

堆積物中における遊離硫化物、AVS、ORP、pH、全鉄濃度、溶存鉄濃度および溶存マンガン濃度は、無添加のコアと比較して、純鉄粉を添加したコアおよび水酸化第二鉄を添加したコアでは有意な変化を示さなかった。実験終了時において、底泥に種々の鉄資材を添加したのもかかわらず溶存鉄は枯渇しており、底泥の硫化水素除去能は消失していた。



図(5)-29 堆積物中の各物質濃度の鉛直分布

(3) 東京湾奥での底質浄化実験

計算された酸素消費量を表(5)-3~6に示す。さらに、稼働期間中のCODの変化量をもとに、CODを1(mg/g乾泥)減少させるのに必要な日数を算出し、表(5)-7に示した。効果は場所毎にばらつきがみられるが、これは吐出量が一樣ではないために見られる結果であると考えられる。

表(5)-3 5m-1mでの底質状況の変化

測点	5m-1m			
	調査月	6月	9月	変化量
COD		12.3	2.2	-10.1
T-S		0.35	0.03	-0.32
含水率		43.6	27.4	

表(5)-4 15m-1mでの底質状況の変化

測点	15m-1m			
	調査月	6月	9月	変化量
COD		15.1	14.5	-0.5
T-S		0.70	0.29	-0.41

表(5)-5 32m-1mでの底質状況の変化

測点	32m-1m		
	6月	9月	変化量
COD	12.2	10.1	-2.1
T-S	0.51	0.16	-0.35

表(5)-6 それぞれの直方体で消費された酸素の量

直方体	1	2	3
体積 (cm ³)	4.00E+06	5.40E+06	4.60E+06
CODから計算した酸素消費量(g)	4.38E+04	2.45E+03	8.52E+03
T-Sから計算した酸素消費量(g)	5.88E+03	7.09E+03	6.02E+03

表(5)-7 CODを1(mg/g乾泥)減少させるために必要な日数

地点(装置からの距離-吐出管からの距離)	5m-1m	15m-1m	32m-1m
必要な日数	10日	175日	50日

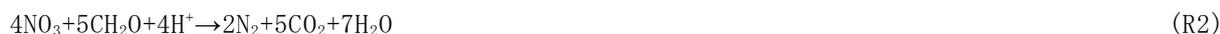
(4) 数理モデルの構築

Fossing et al. (2004)¹⁾を元に生化学的な数理モデル化を検討した結果、本モデルにおける物質収支の基礎方程式は下記のように定式化することとした。

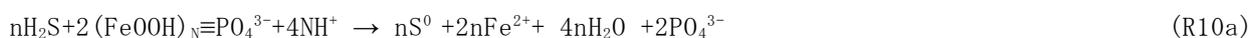
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \varphi D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - w \frac{\partial C}{\partial x} + R \quad w: \text{堆積速度}[\text{cm/s}] \quad (5.6)$$

上式における反応項 R は以下の通り。

Primary reactions

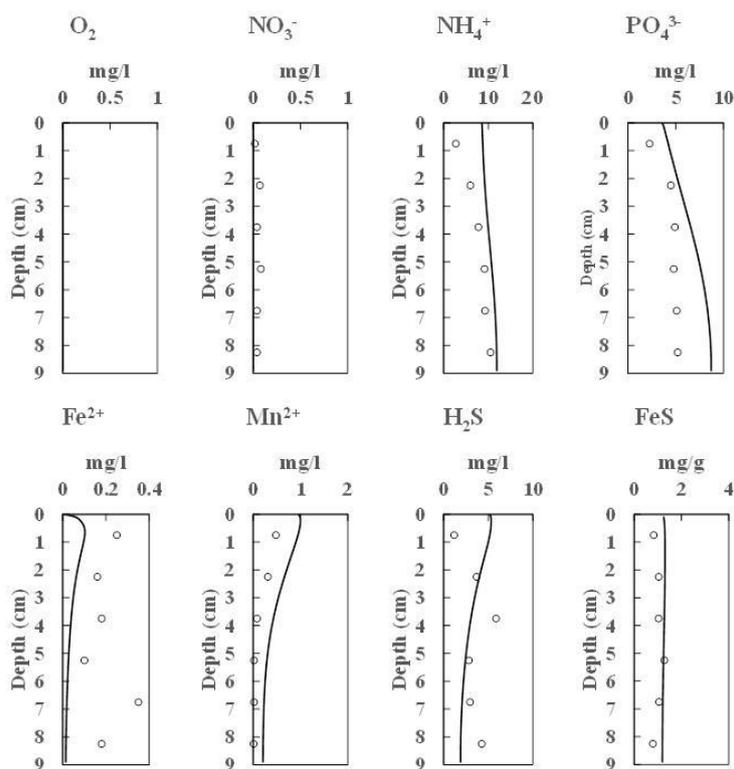


Secondary reaction





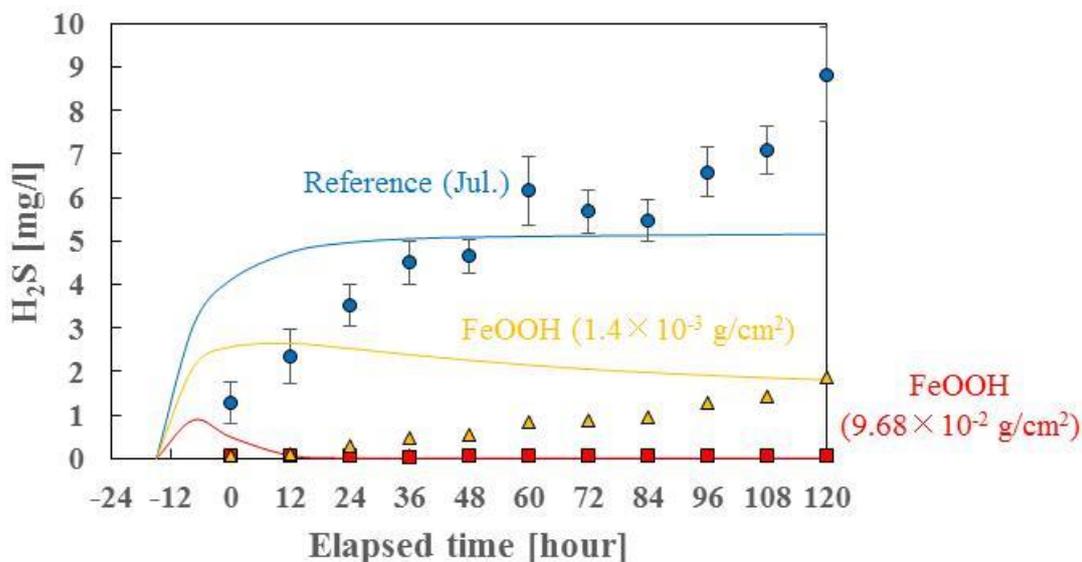
上述の未攪乱堆積物コアを用いた硫化物溶出実験において得られた堆積物間隙水中の各種物質濃度の鉛直分布、および本モデルによる再現計算結果を実験図(5)-30に示す。実際の間隙水中の Fe^{2+} 濃度は、深さ7cm付近で極大値を持っているのに対し、モデル計算の結果は1cm深さ以深で漸減傾向にあり濃度レベルも過小評価となっている。 FeS の再現性は良好であり、 Fe^{2+} と S^{2-} との反応係数等は妥当であると考えられるため、モデル化されていない Fe^{2+} の供給源等について検討する必要がある。しかし、その他の再現性については比較的良好であるといえ、本モデルの妥当性が示唆される。



図(5)-30 間隙中の各物質濃度とモデルによる再現結果

次に、本モデルによる硫化物溶出速度の再現性を確認するため、実験結果との比較を図(5)-31で行った。水酸化鉄の添加の有無によらず、モデル計算結果は実験結果を精度良く再現している。

このことから本モデルの再現性に関する妥当性が示されており、水酸化鉄等の添加についての考察にも適用可能であると考えられる。しかし、モデル計算結果は計算開始後48時間程度で定常的な状態に達しているのに対し、実験結果では継続的な濃度上昇が確認される。このことから本実験は非定常的な環境下であったことが示唆され、本モデルの検証には必ずしも適しているとは言えない。今後は、モデル計算とより比較が容易な実験系での結果も求められる。



図(5)-31 7月実験時の直上水中のH₂S濃度の変化とモデルによる再現計算結果

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでに正確な測定が困難であった水・堆積物海面における酸素や硫化物の輸送フラックスに関して、流動等の物理的影響についても定量的に考察可能な測定精度の高い実験系が確立された。また、水堆積物界面近傍における物質循環に関する過程の数理モデル化を行い三次元生態系モデルの改良のための情報を得た。さらに、三河湾奥部での堆積物からの硫化水素溶出速度を定量するとともに、鉄剤による硫化水素溶出抑制効果が示された。今後は、鉄資材添加により一時的には堆積物からの硫化水素の溶出を抑制することは可能であることが確認されたため、長期間にわたりその効果を継続させるために有効な鉄添加量についての検討が必要である。また、鉄資材毎の硫化水素溶出抑制効果を定量的に把握するため、より詳細で時空間的に密な室内実験の実施することも必要と考えられる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

国土交通省中部地方整備局の伊勢湾再生海域検討会研究WGや伊勢湾漁業影響調査委員会等において、本研究成果である堆積物モデルを応用したシミュレーションモデルによる検討が行われた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

今後、本研究成果を踏まえたシミュレーションモデルの改良等が見込まれるが、現時点では具体的に特に記載すべき事項はない

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

1) (139) 藤原裕次, 井上徹教, 古泉統義, 田村圭一, 中村由行, 鈴木崇之. 底泥への鉄資材添加による硫化水素除去能の検討. 第51回日本水環境学会年会講演要旨集, p175.

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

1) 港湾空港技術研究所一般公開(2016年7月23日、参加者約1,000名)にて成果紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Fossing, H., P. Berg, B. Thamdrup, S. Rysgaard, H. M. Sørensen and K. Nielsen (2004). A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay (Denmark). NERI Technical Report, National Environmental Research Institute, Ministry of the Environment. Denmark. 483: 65pp.
- 2) Inoue, T. and Y. Nakamura (2012). "Response of benthic soluble reactive phosphorus transfer rates to step changes in flow velocity." Journal of Soils and Sediments 12(10): 1559-1567.

Proposals of the Effective Countermeasures against the Attack of Oxygen Depleted Water Mass and Blue Tide to Tidal Flat and Sea Grass Beds Enclosed by Artificial Coastal Line

Principal Investigator: Yoshiyuki NAKAMURA

Institution: Yokohama National University (YNU)
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-City,
Kanagawa 240-8501, JAPAN
Tel: +81-45-339-4238 / Fax: +81-45-348-4565
E-mail: nakamura-y@ynu.ac.jp

Cooperated by: Aichi Prefectural Fisheries Institute, National Institute of Environmental Studies, University of Tokyo, and Port and Airport Research Institute

[Abstract]

Key Words: Hypoxic water mass, Blue tide, Hydrogen sulfide, Benthic fauna, Ecosystem model, Countermeasure, Tokyo Bay, Mikawa Bay, Underwater borrow pits

The attack of hypoxic or anoxic water mass to shallow tidal flats and seagrass beds is one of the most serious events to organisms habitats such biologically active area in Tokyo Bay, Mikawa Bay and other eutrophic embayments. Blue tide formation containing elemental sulfur is a typical example. Such events are strongly non-steady phenomena and little is known about their physical as well as bio-chemical characteristics. Therefore, it is very difficult to set up effective countermeasures against the attack.

In this cooperative study, we aimed to understand causal chain from the anoxia formation in the bottom water which accumulates sulfide to the damages to biota by the attack of the blue tide, and to propose effective countermeasures. Combinations of frequent field observations collecting fundamental information on the phenomena and controlled laboratory experiments were planned to obtain the goal of this study.

Field observations were conducted for several purposes; one is simultaneous measurement of organisms and DO as well as sulfide concentrations to clarify adverse effects of these elements on their survival. Field observation on hypoxic/anoxic water mass distribution in underwater borrow pits, navigation channels, and flat area of the beds were also conducted to make clear the amount of sulfide in such area and identify their relative contribution to blue tide formation. Field observations before, during and after the blue tide events were also made to understand fate and transport of elemental sulfur and DO.

Laboratory experiments were also conducted for two distinct purposes; one is to experimentally define adverse effects of anoxia and hydrogen sulfide on biota. For this

objectives, special experimental device was constructed simulating sudden attack of anoxic water to identify critical concentrations for different life stage of benthic fauna from larvae to juvenile, including clam *Ruditapes phillipinarum* and *yoshiebi*, *Metapenaeus ensis*. Another laboratory experiments were also made to model depletion of bottom DO concentration with measurements of sediment oxygen demand and to reproduce sulfide accumulation process in the bottom water. Using special device constructed for these purposes, investigations on the effectiveness of iron addition to sediment surface were also conducted. Stoichiometrically reasonable effects to reduce sulfide release from sediments were obtained. This result revealed the effectiveness of the method which can potentially be applicable to the field, as iron application is supposed to be economically feasible.

The above information were served to construct 3-D ecosystem model to simulate observed phenomena of hypoxia development and the blue tide events formation. The model well reproduced not only seasonal variation of bottom DO as well as the development of density stratification, but also satisfactorily reproduce upwelling events with or without blue tide formation. The model further applied to assess the effectiveness of filling borrow pits in Tokyo Bay. 2/3 of reduction of the peak concentration of elemental sulfur was obtained in case of the blue tide event in 2015. This ecosystem model can potentially be used to assess the effectiveness of other methods of the countermeasure, including iron application to sediments.

Finally, we summarized to propose promising countermeasures for hypoxia or blue tide attack in tidal flats and seagrass beds in Tokyo Bay and Mikawa Bay. For Tokyo Bay, filling borrow pits is strongly recommend as accumulation amount of sulfide is always maximum inside of the borrow pits. While for the Mikawa Bay, sediment mediation such as iron application can be recommended as it is strongly suggested that dead zone including navigation channel is attributed to the main stocking area of sulfide in Mikawa Bay. Additional work by supplying DO rich water to the bottom later might be effective, however, further research would be necessary to identify combination of economically feasible countermeasures.