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

佐藤 文也¹・佐々木 淳²・佐野 弘明³・呉 海鍾⁴

¹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 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: fumiya.sato0416@gmail.com

²正会員 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: jsasaki@k.u-tokyo.ac.jp

³横浜市役所 (〒231-0017 横浜市中区港町1-1)

E-mail: n033fd@gmail.com

⁴正会員 東京大学特任研究員 大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: ohc@sbk.k.u-tokyo.ac.jp

東京湾では夏季の貧酸素化に伴う生物生息環境の劣化が長年にわたり深刻な問題となっている。貧酸素水の改善を短期的に捉えることは困難であり、より深刻な硫化物を含む無酸素水塊に着目することで改善の兆しが現れると考えられるが、その実態は十分把握されておらず、数値予測手法も未確立である。そこで本研究では効率的な硫化物モニタリング手法を確立し、時空間分布を検討すること、および硫化物を含む無酸素水塊の数値再現性の向上を目的とする。2014年の夏季にモニタリングを実施し、硫化物の発生状況や底質分布との関係を明らかにした。また、2010年を対象とした数値解析を通して、水柱における有機物生産およびその底質へのフラックスが硫化物発生に大きく寄与すること、および大小の浚渫窪地における硫化物濃度の再現性向上には非静水圧モデルの適用が有効であることを示した。

Key Words : anoxic water, hydrogen sulfide, blue tide, numerical modeling, dissolved oxygen

1. はじめに

閉鎖性水域である東京湾では夏季に密度成層が形成されやすく、海水の鉛直混合が妨げられるため底層において貧酸素化が進行しやすい。底層が無酸素状態になると底質中微生物の嫌気分解により硫化物が発生し、生物の成層環境を奪うと同時に青潮の原因となる。青潮の発生は二枚貝のへい死等、東京湾の水産資源に甚大な被害を及ぼすため根本的な解決策が求められている。

東京湾再生推進会議の「東京湾再生のための行動計画(第一期)」では貧酸素の改善を目標に掲げたが、目に見える効果は得られなかったと認識されている。そこで2013年に始まった「第二期」では、提案組織として官民連携フォーラムを立ち上げ、貧酸素改善の初期段階での発現が期待される、無酸素水塊の縮小および硫化物の縮減を目標に据えることが検討され、そのモニタリングと予測手法の確立が急務となっている¹⁾²⁾³⁾。しかし硫化物は時間変動が大きく、広範囲の調査が必要となるため硫

化物を含む平場の無酸素水塊の情報は十分でない。また、数値モデルは環境再生の検討に有効であるが、これまで溶存酸素濃度(DO)の予測については多くの検討がなされ、ある程度精度のよい予測が可能となりつつあるが、硫化物濃度の時空間変動や硫化物の発生から消滅に至る過程を整合的に再現可能な数値モデルはほとんど存在していないと考えられる。

そこで本研究では硫化物を含む無酸素水塊に着目し、効率的なモニタリング手法の検討に基づき時空間変動を把握することを目的とする。さらに、硫化物の再現を目的とした数値モデルについて検討し、2010年を対象として、大小二つの浚渫窪地における硫化物濃度の相違を再現可能な数値計算手法について検討し、9月に発生した規模の異なる青潮との整合性を検討することで、硫化物の再現性の向上に資する計算手法を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

図-1 国土技術政策総合研究所底質含水比 map⁰の高含水比域に設定した観測候補点 (左, 中), 観測候補点と観測直前の千葉県水産総合研究センター貧酸素水塊予測図を重ね合わせ観測点を絞り込む様子 (左), 数値モデルの計算領域 (右)

(1) 現地観測の方法

東京湾の水質モニタリングは2014年7月24日, 8月8日, 8月26日, 9月5日, 9月18日, 10月9日, 10月17日, 10月24日の計8回行った。実施項目は多項目水質計AAQ-RINKOによる水温, 塩分, DO, 濁度, pH, クロロフィルの測定, ニスキ型採水器を用いた採水による底層水中硫化物分析, エクマンバージ採泥器を用いた採泥による表層底質分析を行った。採水にあたっては底泥の巻き上がりによる測定誤差の発生に注意を払いながら海底から+0.5m地点で行った。採泥に関しては表層2~3cmを採取すよう留意した。

平場の調査地点の決定にあたっては平場の底層水中硫化物分布を効率的に把握するため, 国土技術政策総合研究所底質含水比 map⁰の高含水比域を対象とし, さらに調査直前の千葉県水産総合研究センターによる貧酸素水塊分布予測図⁰を用いて観測当日の無酸素水塊分布を推定し調査点とした (図-1左, 中)。また, 水塊が滞留し硫化物が発生しやすい幕張沖および浦安沖の浅瀬窪地では毎回観測を行った。そのほか千葉航路上の点を測定の候補に加え, 平場との比較を行った。

(2) 数値計算の方法

数値計算には流動モデル DHI-Mike3 を用い, 静水圧モデル, 非静水圧モデル双方の使用による再現性の違いを検討した。対象期間は大規模な幕張沖窪地と小規模な浦安沖窪地のデータが存在し, 大規模な青潮の発生した2010年3月から9月とした。地形データは450mのメッシュを全領域で採用し, 窪地を含む湾中央領域では高い解像度による計算が必要となるため450mメッシュから150mメッシュへのネスティングを行った (図-1右)。また, 沿岸域では水温や塩分は水平方向よりも鉛直方向の変化が大きいという特徴を考慮して, 水平方向には Smagorinsky model, 鉛直方向には $k-\epsilon$ model を用いた。

河川データは多摩川実測値を用い, 塩分チューニング

図-2 生態系モデルの概念図

の結果として流量値を1.5倍し, その他の項目は実測値をそのまま使用した。江戸川, 荒川, 隅田川, 鶴見川に関しては多摩川の値を基にそれぞれ年間流量比をかけて調整し, 日別値として与えた。また, 湾口開境界では毎時の横須賀の潮位実測値, 毎月の水温, 塩分の鉛直分布を与えた。気象条件に関しては気象庁の毎時の気温, 降水量, 日射量, 湿度, 風向, 風速, 雲量を与えた。初期条件は全格子で水温は14℃, 塩分は34psu, 計算時間間隔は30sとした。

次に DHI-Mike3 の生態系モデル作成モジュール ECO Lab を用いて, 周年スケールの計算における硫化物再現性の向上について検討した。ECO Lab ではユーザーが自由に生態系モデルを構築することができ, 本研究では吉本ら(2009)のモデルをベースとした⁵⁾⁶⁾⁷⁾。本モデルの状態変数は植物プランクトン(C_{PPL}), デトリタス(C_{DET}), 底質(C_{SED}), 溶存酸素(C_{DO}), リン酸態リン(C_{PO_4}), 硫化物イオン(C_{SUL})の6つである (図-2)。また流れ場と同様に湾口境界条件として植物プランクトン, デトリタス, DO, 溶存態リンの鉛直分布を月ごとに与えた。河川水に関しても月ごとにDOとリンの流入を考慮した。

既往の研究⁸⁾では導水を用いた貧酸素改善シミュレーションを行っていたが, 硫化物は観測結果を初期条件と

図-3 観測結果

して与えていた。本研究では2010年3月～9月の計算を行い、貧酸素水塊、硫化物が発達していく様子を再現した。既往のモデルを使って計算を行ったところ硫化物の初期条件を 0 mg/L とした季節変動再現では過小評価となることがわかったため、本研究では硫化物発生プロセスに関わるパラメータを感度分析により調整しながら再現性の向上を試みた。特に硫化物発生に関わる底質中有機物の取り扱いが重要と考えられ、バックグラウンド分と新規堆積分を分けてモデル化した。

3. 結果と考察

(1) 現地観測

底層水中硫化物イオンの全期間の平均値と期間内最大値（図-3(a), (b)）を見ると湾奥中央部で高い値をとり、表層底質中有機炭素含有量（図-3(g)）と正の相関が見られた。このことから底質中有機炭素含有量の大きい地点では硫化物濃度が高い傾向にあることがわかる。硫化物は水中で H_2S , HS^- , S^{2-} のいずれかの形態で存在するが、底生生物に特に悪影響を及ぼすのは毒性の強い H_2S であるため、観測されたpHを用いて H_2S を推算し³⁾、上記と同様に平均値と最大値を算出したところ（図-3(c), (d)）、2014年は硫化物全体のうち H_2S が占める割合が小さく、pHが低い地点ほど H_2S 濃度が高い傾向が見られた。次に、底層水中pH（図-3(e)）と底質表層中全硫化物（図-3(f)）の全期間平均値を参照すると、pHと底質中全硫化物の間には負の相関がみられた。さらに表層底質中

のCN比（図-3(h)）を見ると湾奥中央部では値が低く、周辺へ向かうにつれて値が高くなっていることから、含水比が高い地点で未分解の有機物が多く残存していると考えられる。これは有機物を分解するための酸素が不足していることを意味するので、高含水比地点ではDOが低いため硫化物濃度が高い傾向にあることがCN比からも示唆された。底質中硫化物量に比べ、底層水中の硫化物濃度は湾奥中央よりもやや湾口側で高い傾向にある。これは東京湾の水深が湾口に向かうにつれて深くなっていくためであると考えられる。

図示はしていないが、千葉航路上の点では平場よりも硫化物濃度が高い傾向にあり、平均で 0.4 mg/L 程度の値が観測された。図-4に幕張沖窪地における8月8日、26日、9月5日の塩分・水温（上）とDO・濁度（下）を示すが、密度躍層の発達した8月8日の躍層付近では酸素と硫化物イオンが反応してイオウ粒子が析出したためと推察される濁度上昇が見られた。8月27日から青潮が発生したが、その直前の8月26日の結果は湧昇の始まりを捉えており、9月5日の結果から硫化物の減少と酸素供給による窪地内の濁度上昇が見て取れ、これは沖合の高塩分水が窪地内に流入し、内部の硫化物を含む無酸素水を押し出したからであると考えられる。

図-5に示すように窪地内の硫化物濃度は全般に高いが、窪地の規模によりその程度は大きく異なる。また、幕張沖窪地、浦安沖窪地、平場の硫化物濃度の時間変動を見ると平場の発生規模は小さく、両窪地内の硫化物量は青潮発生後に大きく減少していることから、先述のとおり

り8月27日に発生した青潮は主に窪地起源であると推定された。2014年は貧酸素水塊の発達が弱く、硫化物の発生も小規模であったが、平場の硫化物が青潮の主要な起源となる可能性も示唆されており⁹⁾、今後も継続してモニタリングを行い、時空間変動を捉えていく必要がある。

(2) 数値計算

図-6 に千葉灯標における表層と底層の水温・塩分・DO の観測値と計算値の比較を示す。日オーダーの変動の再現性には改善の余地が残るが、密度成層の形成過程、貧酸素水塊の発達過程といった、季節変動特性の再現性は良好である。

9月1日における図-1 右の A-B 側線断面における硫化物計算値を図-7 に示す。9月初旬は成層の発達により硫化物の発生が多くみられる時期であり、2010 年の観測結果は浦安沖窪地で 2 mg/L、幕張沖窪地で 20 mg/L のオーダーであった。吉本らのモデルでは底層の貧酸素化は再現できていたものの、硫化物は幕張沖窪地の底層でわずかに発生するという著しい過小評価となった(図-7(a))。硫化物発生の条件は無酸素であることに加え、有機物の嫌気分解が行われることである。そこで底質のバックグラウンド値を増加する方向でのチューニングを試みたところ、底質の直上でしか嫌気分解の効果が現れず、また長期的に整合する硫化物再現は困難であり、全体に過小評価となった(図-7(b))。一方、水柱における有機物生産およびその底質へのフラックスを全体の整合性を保った上で調整したところ、大きな改善が見られた(図-7(c))。特にデトリタスの沈降速度 w_{DET} が再現性に大きく影響を与えていることがわかり、 w_{DET} の値を増加させ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0, 10.0 m/day の各ケースで計算を行ったところ、 $w_{DET}=1.5$ m/day のケースで硫化物発生量が最も現実のオーダーに近い値となった。

以上の感度分析の過程によりある程度硫化濃度は増加したが、実測では硫化物濃度のオーダーの異なる浦安沖と幕張沖窪地の差異が十分再現できていなかった。一般に水平スケールに比べて鉛直スケールが小さい場合は計

算コスト低減のため、鉛直方向の加速度を無視した静水圧近似を用いることが多い。しかし、航路、浚渫窪地等の急峻部では、鉛直方向の加速度項が無視できず、静水圧モデルの適用が不適切である可能性が考えられる。そこで、図-7(c)の条件下で非静水圧モデルの適用検討を行った。

非静水圧モデルの計算結果として、水深が大きい幕張沖窪地では硫化物濃度が上昇、水深が小さい浦安沖窪地では硫化物が減少した(図-7(d))。これは地形データ上の、局所的な窪地内部において鉛直方向の流れが生じる

図-4 幕張窪地における 8 月 8 日、26 日、9 月 5 日の水質鉛直分布

図-5 8 月 27 日に発生した青潮前後における窪地および平場底層水中の硫化物濃度の時系列

図-6 2010年千葉灯標における水温、塩分、DOの観測値と計算値の比較

図-7 幕張沖、浦安沖窪地を含む A-B 断面(図-1 右参照)の硫化物計算値。(a)既存モデル，(b)底質バックグラウンド値を増大，(c)懸濁態有機物の沈降速度増加，(d)(c)の条件下で非静水圧モデルに変更

図-8 青潮の再現結果

ことで混合作用が強まったためであると考えられる。そのため浅い窪地では硫化物が発生しても高濃度になる前に酸化されたり外へ流出し、一方深い窪地では硫化物が溜まりやすいという計算結果となり、現地調査結果との整合性が向上した。硫化物は多くの期間で窪地内に溜まっていたが、9月1日には周辺の平場上にも存在する結果となった。本モデルでは硫化物の速やかな酸化によるイオウの析出がモデル化されていないが、現実にはこのイオウの析出が起こった状況を表していると解釈される。

表-1 に現地観測のデータとの比較を示すが、両窪地ともにオーダーの違いが再現できたことがわかる。浦安沖窪地に関しては実測と計算のずれが小さいが、幕張沖窪地に関しては8月から9月にかけての増分が小さく、9月では過小評価となった。一つの原因として植物プランクトンのブルームとそれに伴う新規堆積有機物量の増加のような急激な変化が再現できていないことがあげられる。そのため水温や光等、状態変数の増減に大きな影響を与える因子をより詳細に検討することが求められる。

表-1 2010 年の幕張沖および浦安沖の浚渫窪地底層における硫化物濃度の比較

	8月27日	9月17日
幕張沖 実測	15 (mg/L)	40 (mg/L)
幕張沖 計算	19 (mg/L)	23 (mg/L)
浦安沖 実測	2 (mg/L)	6 (mg/L)
浦安沖 計算	3 (mg/L)	4 (mg/L)

また、大規模な硫化物の発生は主に無酸素下の平場の底質において発生するものと推察され、平場の底質性状に大きく影響される。下水処理場の整備をはじめとして、ここ数十年にわたる流入負荷削減の努力にもかかわらず、平場の貧酸素水塊の規模はあまり変わっていないものと認識されている。その一つの要因としては、底質中有機物含有量（例えば、図-3(g)）の低下がほとんど見られないことが挙げられ、今後の様々な施策による環境改善の効果を見極めるためには、平場を対象とした詳細な底質形成過程を含む数値モデルの開発と長期的な予測手法の確立が不可欠であると考えられる。

次に、図-7(d)の計算条件を用いて 2010 年 9 月に発生した青潮の再現を試みた結果を図-8 に示す。計算結果は水面における硫化物濃度を示しているが、酸素供給の活発な水面では、硫化物は直ちに酸化されコロイド状イオウとなる。そのため、計算結果は青潮が発生している状況を模擬していると見る事が可能である。

2010 年は千葉中央港において 9 月 15 日から 21 日に小規模な青潮、9 月 24 日から 29 日に大規模な青潮の発生が報告されており¹⁰⁾、発生時期および規模ともに整合した計算結果が得られた。発生初期は港の東側に無酸素水塊が湧昇し、岸を右に見て反時計回りに移動し、湾奥沿岸に広がる様子が見て取れる。再現性の詳細についてはさらなる検討が必要だが、周年スケールでの再現計算の枠組みにおいて、硫化物を含む無酸素水塊の短時間の変動過程の再現性が向上したものと考えられる。

4. おわりに

観測の結果、2014 年は無酸素水塊の規模が小さく、硫化物の発生規模も小さかった。平場で局所的に高い硫化物濃度が検出された地点もあったが時間変動が大きく、青潮への寄与は限定的であったと考えられる。無酸素水塊の発達した平場の硫化物濃度のデータはまだ十分とは言えないため、今後も継続的なモニタリングが必要である。また底質環境と硫化物の間には相関が見られたことから、底質分析を進めることは貧酸素水塊の縮減策を検討するうえで重要であることが示唆された。

数値計算においては貧酸素化ならびに硫化物の発生に関わる支配要因として、デトリタスの沈降速度を含む新規堆積有機物過程が重要であり、また、非静水圧モデルを使用することで規模の異なる窪地における硫化物濃度の差異の再現性が向上することが分かった。このことは浚渫窪地のような急峻な地形を扱う場合に非静水圧モデルの適用が不可欠であることを示唆している。

謝辞：現地観測に際しては、三洋テクノマリン（株）、東京都市大学田中陽二講師、横浜国立大学比嘉紘士博士、および東京大学佐々木研究室の学生諸氏に協力頂いた。DHI-Mike3およびECO LabはDHIより東京大学に対し使用を許諾して頂いた。本研究は環境省環境総合研究推進費課題番号5-1404(4)、平成26年度国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所受託研究費、およびJSPS科研費課題番号25289152の支援によるものである。

参考文献

- 1) 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), Vol.67, No.2, pp.1236-1240, 2011.
- 2) 市岡志保, 佐々木淳, 吉本侑矢, 下迫健一郎, 木村俊介: 航路と浚渫窪地に着目した硫化物動態と青潮影響に関する考察, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.1041-1045, 2009.
- 3) 岡田知也, 吉田 潤, 古川恵太: 現場型硫化物センサーを用いた硫化物の鉛直分布の測定およびその分布の特徴, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.67, No.2, pp.334-339, 2011.
- 4) 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状況, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.1431-1435, 2005.
- 5) 佐々木淳, 佐貫宏, 磯部雅彦: 東京湾における富栄養現象の再現計算, 海岸工学論文集, Vol.45, pp.1036-1040, 1998.
- 6) 佐々木淳, 今井 誠, 磯部雅彦: 内湾における溶存酸素予測モデル, 海岸工学論文集, Vol.44, pp.1091-1095, 1997.
- 7) 松梨順三郎: 環境流体汚染, 森北出版, 1993.
- 8) 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, 海岸工学論文集, Vol.65, No.1, pp.1176-1180, 2009.
- 9) 佐々木淳, 川本慎哉, 吉本侑矢, 石井光廣, 柿野純: 東京湾の青潮に及ぼす平場と浚渫窪地水塊の影響評価, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.1041-1045, 2007.
- 10) 飯村晃, 小林広, 小倉久子: 東京湾の青潮発生状況, 千葉県環境研究センター年報第10号, 2010.
- 11) DHI: MIKE 3 FLOW MODEL Hydrodynamic Module User Guide, 2014.

(2015.3.18 受付)

SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS AND NUMERICAL REPRODUCTION OF ANOXIC WATER AT THE HEAD OF TOKYO BAY

Fumiya SATO, Jun SASAKI, Hiroaki SANO and HaeChong O

Decline in habitat due to appearance of hypoxia and anoxia has been a serious problem in Tokyo Bay for long time. It is quite difficult to improve hypoxia and thus considering to improve anoxia seems to be a feasible first target among environmental restoration strategies. Monitoring of anoxic water, however, has not been well performed and numerical reproducibility has not been satisfactory. The objectives of the present study are to understand spatial and temporal characteristics of anoxic water and to consider enhancing the numerical reproducibility of sulfide. We performed monitoring of anoxic water, including sulfide and sediment quality, in the summer of 2014 and revealed their characteristics along with establishing an efficient monitoring method. Through numerical analyses for reproducing sulfide in 2010, we found that production of organic materials and resultant flux to the sediment is one of the most sensitive processes and adopting non-hydrostatic model is essential for succeeding in reproducing the difference in sulfide concentration between a large and a small dredged pits.