

東京湾の青潮に及ぼす平場と浚渫窪地水塊の影響評価

Evaluation of the Effect of Anoxic Water in Dredged Trenches on Blue Tides in Tokyo Bay

佐々木淳¹・川本慎哉²・吉本侑矢²・石井光廣³・柿野純⁴

Jun SASAKI, Shinya KAWAMOTO, Yuya YOSHIMOTO, Mitsuhiro ISHII and Jun KAKINO

Bule tides, upwelling of anoxic waters, have been one of the most serious environmental problems issues in Tokyo Bay. The major sources of the blue tides are considered to be the anoxic waters containing hydrogen sulfide in dredged trenches, navigation channels and the flat bottom waters at the head of the bay. The objective of the present study is to reveal each contribution to blue tide, which is still unclear, based on the estimation of time variation in the amounts of hydrogen sulfide in these waters comparing to occurrences of blue tide events. We revealed the large contribution of the flat bottom anoxic waters compared to the waters in the largest dredged trench in case of large scale blue tides.

1. はじめに

東京湾では貧酸素水塊の発達する初夏から晩秋にかけて青潮が発生し、特に青潮水が三番瀬等の浅場進入するとアサリを含む底生動物のへい死を引き起こす可能性があることから、重大な水質問題と認識されている(例えば、柿野, 1986; 鬼塚ら, 1988; 佐々木ら, 1996)。青潮の原因となる硫化物を含む水塊は航路、浚渫窪地、および湾奥中央の平場に存在するが、硫化物に関するデータが少ないこともあって、それぞれの青潮への寄与割合に関しては不明な点が多い。佐々木(1997)は規模の大きい青潮における平場起源の硫化物の重要性を指摘しているが、一方で浚渫窪地の水塊が青潮の主因であるとする議論も多い。いずれにせよ、航路、浚渫窪地、および平場それぞれの水塊の青潮への影響度については不明な点が多く残されている。環境再生の一環として浚渫窪地の埋め戻しが議論されているが、埋め戻しによる青潮軽減効果に関する定量的な評価が十分になされていない現状は費用対効果に基づく合理的な検討を困難にしている。

そこで本研究では現地調査および既往の現地データを用いた解析を行い、浚渫窪地および湾奥中央平場の水塊それぞれが青潮に及ぼす影響度合いを推定する方法について検討し、近年の事例への適用を試みる。同時に本手法の限界と今後必要とされる研究の方向性についても考察する。なお、航路については現状では情報が不足していると判断し、検討の対象から除外することとした。

2. pHを用いた硫化物濃度の推定

東京湾における硫化物の測定はいくつか行われているが、そのほとんどが平面的な分布を網羅しておらず、また鉛直方向にも通常は底層の1点程度の測定に限られる。そのため、平場や浚渫窪地における硫化物の総量を過去の測定結果から直接見積もることはほぼ不可能と考えられる。一方、硫化物濃度はセンサー計測の可能なpHと比較的良好な相関があることが知られており(千葉県土木部・千葉県企業庁, 1998)、既往の現地データを基にした硫化物量を概算する手段の一つと考えられる。そこで本研究では改めて既往データを中心に硫化物濃度とpHに関する情報を収集し、両者の相関関係を調べることとし、著者らによる2004年の調査に加え、環境庁(1989, 1990, 1992, 1993, 1994)、五明ら(1998)による情報を整理した。

以上のデータから硫化物濃度とpHの相関を見たものを図-1に示し、相関を表す近似曲線として次式を採用することとした。

$$C_{H_2S} = 4.3328C_{pH}^4 - 149.2C_{pH}^3 + 1925.5C_{pH}^2 - 11038C_{pH} + 23718 \cdots \cdots (1)$$

両者には概ねpHが下がると硫化物濃度が上昇するという関係が見られ、図中に示した近似曲線は比較的良好な関係が表現できていると考えられる。ところで環境庁(1990)によるデータ等では相対的に硫化物濃度の値が非常に高く、他のデータと傾向が異なる。この原因は不明だが、これらの値が一般に報告されている値より際だって大きいことから、近似曲線を作成するにあたり、除外するのが適当であると判断した。また、式(1)は特にpHが8に近い場合のように比較的高い値を取る領域では、式に要求される精度に比較してデータのばらつき幅が大きく、信頼性が低い。この点を含む本手法の課

1 正会員 博(工) 横浜国立大学准教授 大学院工学研究院システム創生部門
2 横浜国立大学大学院工学府社会空間システム学専攻
3 千葉県水産総合研究センター
4 博(水産) (株)東京久栄技術顧問 前千葉県水産総合研究センター東京湾漁業研究所長

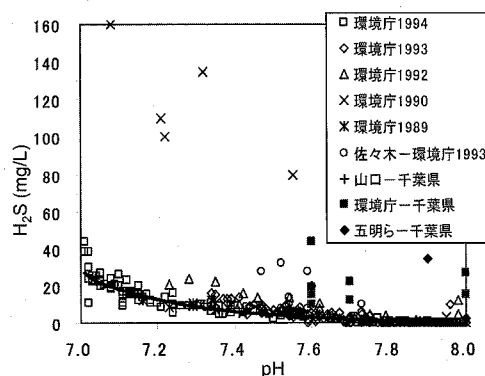


図-1 硫化物濃度とpHの相関



図-2 東京湾奥部における浚渫窪地の平面分布と千葉県水産総合研究センターによる東京湾定点調査点。浚渫窪地の平面分布は環境庁水質保全局編(1990)のデータを基に作成。

題については後に再度考察する。得られた近似式を用いると、時空間データの豊富なpHデータを用いて硫化物の総量を概算できることになる。

3. 浚渫窪地および平場における硫化物量の推定法

前章で得られた結果を利用して平場および浚渫窪地それぞれの硫化物量の時系列を推定するには、pHの詳細な時空間分布が必要となる。そこで本研究では約2週間に1度、鉛直1m間隔で測定されている、千葉県水産総合研究センターによる東京湾定点調査データを活用することとした。ただし、浚渫窪地については幕張沖の1測点におけるデータしかない等制約があるため、その解決策を含め、以下の通り検討した。

(1) 浚渫窪地の概要

東京湾奥部には浦安沖から幕張沖を経て袖ヶ浦沖にかけて多くの浚渫窪地が点在している(図-2)。これらの内、青潮に密接に関わると考えられる浚渫窪地を特定するため、2004年9月9日、10月14日、および11月25日に現地調査を実施した。調査では各浚渫窪地および平場の数点において、多項目水質計(アレック電子AAQ1186)を用いた水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)等の水質測定、また、10月14日のみ水質計にくくりつけた採水器による底層水の深度別採水を実施し、現場で酸素瓶に固定した後、総合環境分析(株)に依頼して硫化物濃度の測定を行った。

本調査により、房総半島側の浚渫窪地とされる場所は広くなだらかに掘られた凹地であることから閉鎖性は強くなく、硫化物が蓄積する環境にはないと判断された。また、浦安沖の浚渫窪地は水深が15m程度と小さく、大規模な青潮にはあまり効かないものと考えられた。その結果、幕張沖および稲毛沖の2つの浚渫窪地の重要性が確認されたが、中でも規模の大きい前者が硫化物の主要な起源であると判断され、千葉県水産総合研究センターによる定点調査の調査点ともなっていることから、本

研究の解析対象とした。

(2) 浚渫窪地内における水質の空間分布

千葉県水産総合研究センターによる調査点は幕張沖浚渫窪地の1測点のみであることから、この情報から幕張沖浚渫窪地全体のpH分布の推定法について検討する必要がある。そこで2004年10月14日の現地調査では幕張沖浚渫窪地内の3測点(図-2参照)において水質の鉛直分布を測定した。図-3にこれら3測点におけるDO分布を示すが、水深の違いにかかわらず類似の鉛直分布が得られている。本結果は秋の混合期初期のデータであるため、窪地内においてもDOの鉛直変化が見られ、その鉛直勾配の類似性はpH等の他の水質項目についても水平方向に比較的一様であることを示唆している。そこで、pHの鉛直分布が水平方向に一様であると仮定して解析を進めることとした。

(3) 浚渫窪地の深度別容積の算定と硫化物量の推定

対象とした浚渫窪地内の硫化物総量を求めるにはpHの鉛直分布に加えて、浚渫窪地内における例えば鉛直層厚1mごとの水塊体積の鉛直分布を算出する必要がある。そこで2006年11月1日、12月20日、2007年1月26日に幕張沖浚渫窪地を対象とした深淺測量を実施した。深淺測量には200kHzの超音波による深度データとディファレンシャルGPSによる緯度経度を同時に記録可能な魚群探知機(FishStrike 2000C, EAGLE社)を用いて行った。得られた幕張沖浚渫窪地の地形を図-4に示す。次にこの水深データと水平方向50m格子の東京湾全体の水深データ(国土交通省関東地方整備局千葉港湾事務所)をArcGIS(ESRI社)上で結合し、3D Analystのサーフェス解析により、窪地内深度10m以深の鉛直1m層厚ごとの深度層別水塊体積分布を求めた(図-5)。

次に千葉県水産総合研究センターによるpHの鉛直分布データから各深度層におけるpHを求め、式(1)を用いて硫化物濃度を推定した。先の検討からpHは各深

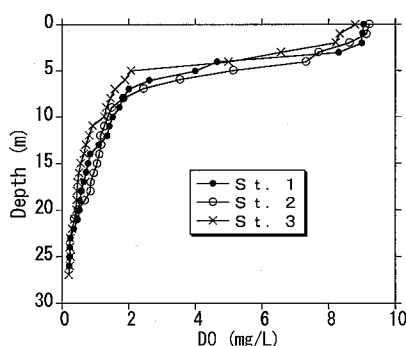


図-3 幕張沖浚渫窪地内の3測点におけるDO鉛直分布の比較

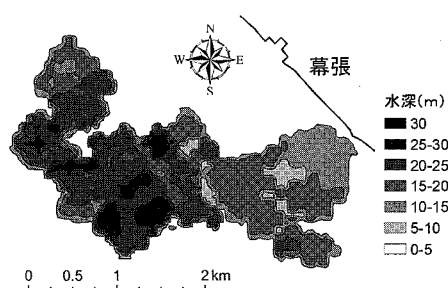


図-4 幕張沖浚渫窪地の形状

度層内で一様であると仮定し、各深度層において硫化物濃度に水塊体積をかけることで硫化物量を算出し、すべての深度層の和をとることで、浚渫窪地における硫化物の総量を推定した。

(4) 平場における硫化物量の推定法

平場においても千葉県水産総合研究センターによって図-2に示す測点において鉛直1m間隔の水質測定が実施されている。これらのデータからpHの空間分布を内挿により求め、得られたpHの3次元分布から硫化物濃度分布の推定を試みる。

まず、東京湾を水平200mのデカルト格子、鉛直50層のシグマ座標格子によって分割し、任意の観測日におけるpH等の水質を格子点の中心において $C(i, j, k)$ と定義した。ただし、 C は任意の水質であり、 i, j, k はそれぞれ水平 x 方向、 y 方向、および鉛直シグマ方向の格子点番号である。観測点が含まれる格子 (i_0, j_0) においては、鉛直1m間隔の実測データを内挿して各シグマレベルにおける値 $C(i_0, j_0, k)$ を設定した。

次に任意の一つの鉛直格子番号 k における曲面を考え、三角化法を用いて観測値を内挿してすべての格子点における値 $C(i, j, k)$ を求めた。具体的にはまず、観測点を除くすべての格子点の値を欠損値として設定しておき、Wessel・Smith (1998) が開発した GMT の triangulate 機能を用いた三角化法による格子点への内

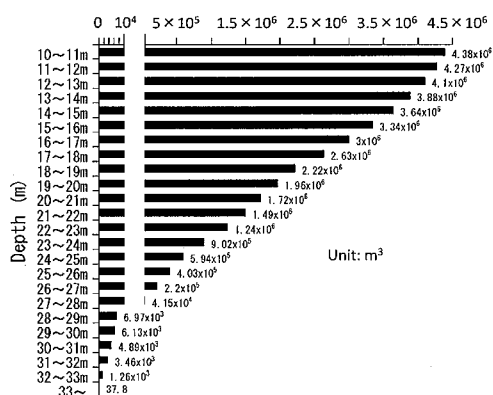


図-5 幕張沖浚渫窪地における鉛直1m層別の水塊体積

挿を行った。この方法では観測点の存在する平面領域の外側への外挿は行わないため、外挿に伴う硫化物総量推定値の過大評価を避けることができる。

得られた格子点値の内、欠損値を除くすべての格子点を対象として、 $C_{DO}(i, j, k) < 1$ かつ $C_{ORP}(i, j, k) < 0$ かつ $C_{pH}(i, j, k) < 8$ を満たす格子点のみを抽出した。ここに $C_{DO}(i, j, k)$, $C_{ORP}(i, j, k)$, および $C_{pH}(i, j, k)$ はそれぞれ格子点 (i, j, k) におけるDO、酸化還元電位(ORP), およびpHである。硫化物濃度の推定にはpH値のみが必要となるが、異常値をなるべく機械的に除去するため、硫化物が存在するときには少なくともDOは1mg/L未満、ORPは0mV未満の値を取ることを条件に加えてある。最後に、抽出された各格子点においてpH値を式(1)に代入して硫化物濃度を求め、これに格子体積をかけることで硫化物量を求め、すべての格子における和をとることで、平場における硫化物総量を推算した。

4. 結果と考察

2003年から2006年の4年間を対象として平場および浚渫窪地それぞれの硫化物量の時系列を推定し、観測された青潮との関係やそれぞれの水塊の青潮への寄与割合について検討する。このうち2003年は冷夏であり、他の3年間は猛暑の年であった。青潮の発生動向について見ると、表-1に示すように、2005年には6回の発生が見られ、延べ発生日数は21日間に及んだ。これに対し、他の3カ年は台風来襲の影響などもあり、青潮の発生回数は1, 2回程度にとどまっていた。以下ではこれらの内、青潮の発生の多かった2005年と冷夏の2003年を対象として、硫化物量の変動と青潮との関係を示し、浚渫窪地および平場水塊の青潮への寄与度や本手法の課題に関する考察を行う。

(1) 2003年

2003年の硫化物総量の時系列推定結果と青潮の発生

表-1 2003～2006年の青潮の発生状況

年	9年間平均	03	04	05	06
回数	3.1	2	1	6	1
延べ発生日数	9.9	7	4	21	3

時期を図-6に示す。青潮は5月16日～19日、および9月22日～24日に発生しており、9月の青潮は浦安沖から千葉中央港にかけて発生した比較的大規模の青潮であった。青潮の発生前後の硫化物総量の変化を見ると、5月は平場の硫化物の減少が見られるのに対し、浚渫窪地の硫化物量にはほとんど変化が見られなかった。ただし、前後の観測時間に空きがあるため、青潮の発生時に硫化物が湧昇し、その後発生前と同程度まで回復したと見るのが妥当であり、浚渫窪地と平場の両者の寄与が考えられる。この青潮は規模が小さく、硫化物量の変化も小さいことから、平場と浚渫窪地それぞれの青潮に対する寄与割合は不明である。一方、9月の青潮は比較的大規模のものであり、その直前に平場の硫化物量が著しく高い値となり、青潮後に硫化物が解消していることが分かる。浚渫窪地の硫化物は青潮発生前は300t程度で安定していたが、青潮時には100t程度まで減少していた。このときの青潮への寄与を結果から単純に概算すると平場が700t、浚渫窪地が200tとなり、平場の寄与が大きかったことになる。ただし、後に見るように貧酸素水塊の発達した2005年の硫化物量の変動と比較してもこの平場の値は大きな値となっており、平場のpH値が推定誤差割合の大きい高めの値が主体であったことから、定量性には疑問がある。この点に関しては再度考察でふれることにする。

2003年の特徴としては浚渫窪地の硫化物は4月頃から発達し始め、7月頃に最大値に達した後、多少の増減を伴いながらも10月末までは安定した状態にあったのに対し、平場の硫化物は間欠的に発生していたものと推察される。このように浚渫窪地の硫化物は高い値で安定しているのに対し、平場の硫化物は短期間で大きく変動することが分かる。

(2) 2005年

図-7に2005年の浚渫窪地および平場における硫化物量の時系列と青潮発生時期を示す。解析対象の4年間の中で、青潮の発生は最も多い計6回を記録した。このうちの4回は2日程度の継続時間に留まったが、9月26日～30日および10月12日～17日に船橋沖から千葉港にかけて比較的大規模の青潮の発生が見られた。このうち9月26日から30日の青潮についてはその前後で硫化物量が大きく減少していることが分かり、平場の硫化物量が150t程度減少したのに対し、浚渫窪地の硫化物の減少は30t程度に留まっていた。

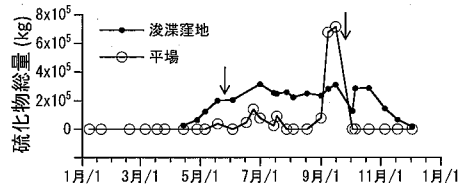


図-6 2003年の硫化物総量の時系列と青潮の発生時期(矢印)

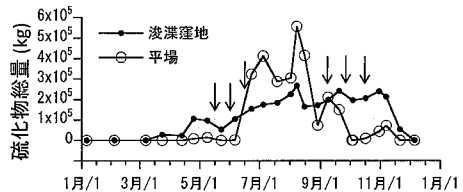


図-7 2005年の硫化物総量の時系列と青潮の発生時期(矢印)

平場の硫化物量は8月初旬に550tの最大値に達し、8月末には台風接近に伴う強風によって約80tまで低下していた。このときの硫化物の減少量は大きい、台風に伴う攪拌作用によって青潮の発生には至らなかったものと推察される。一方、浚渫窪地の硫化物は8月頃まで発達し、以後は11月まで250t前後で安定した状態にあった。

(3) 考 察

硫化物量の推定結果については既述のように特に平場では値の変動が大きく、疑問な点も残されている。そこでここでは硫化物量の推定に係わる問題点について検討することとする。

まず、浚渫窪地については毎年、夏に向かって300t程度まで漸近する傾向があり、成層期の浚渫窪地内の硫化物量の変動は比較的小さく、安定した状態にあるという結果が得られている。これは定性的には既往の観測と整合する妥当なものであると考えられる。このように値が比較的安定していると考えられる理由は、浚渫窪地のpH値が低めの値を取るケースが多く、pHの誤差による硫化物濃度の推定誤差の割合が小さく抑えられていることが挙げられる。ただし、青潮の発生との関係を論じる場合には、硫化物が減少した後の、硫化物の回復速度についても考慮に入れた解析が本来は必要である。pHデータは青潮発生直後のものが入手できるとは限らないため、既に硫化物がある程度回復した状態を観測している可能性があるためである。

一方、平場における硫化物量の推定値に関しては、かなり変動が大きく、また、定量的には疑問の残る結果も得られている。これは既述のように平場におけるpH値が高めの値を取る場合が多く、その場合の硫化物濃度の推定誤差が相当に大きくなってしまふことにあると考え

られる。本研究で採用した式(1)は全体としては妥当な近似曲線と考えられるが、pH値が高い領域では高めの推定値となっている可能性がある。また、電極法によるpH値の測定誤差は状態がよい場合でも0.2程度はあると考えられるが、この値は特にpH値が高い範囲では推定値の変化の割合が大きくなる。これに加え、平場の底層付近ではpHの変化が大きく、値が安定する時定数が大きいことからpHが高めの推定値となっている可能性もあり、このことは硫化物の推定値を過小評価する原因となる。このように、平場の推定に本手法を適用することには難があり、さらなる検討が不可欠である。航路筋を起源とする青潮の評価を含め、各水塊の青潮への寄与に関する知見を様々な角度から蓄積していくことが必要である。

5. 結 論

硫化物濃度とpHとの相関を見ることにより、pHから硫化物濃度を推定する算定式を作成し、これを用いた平場および浚渫窪地水塊中の硫化物総量の概算を試みた。本手法により2003年から2006年の硫化物量の変動と青潮との関係について解析した。

平場の硫化物は無酸素水塊の発達が始まる6月頃から見られるようになり、10月頃にはほぼ消滅しているが、この間の時間変動が大きい。一方、浚渫窪地の硫化物は4月頃から発達し、年によっては11月頃まで増加傾向にあるが、比較的変動は小さく、特に夏季から秋季にかけては相当に安定した水塊であるといえる。

硫化物量の概算結果の精度については、浚渫窪地においては毎年比較的類似した結果が得られ、ある程度定量性を持った情報であると考えられるが、平場水塊についてはpH値の高い値を取る場合が多く、この領域での硫化物濃度の推定値の精度に問題があること、および平場のデータ点数が十分でないことから、再検討が必要である。さらに、硫化物量の変動と青潮の事象とが必ずしも対応しないケースについては、航路の影響が常時ある程度存在すること、青潮発生時期とその前後の調査日とに間が空き、水塊が変動してしまっていることが考えられる。

謝辞：東京湾の50 mメッシュ水深データは国土交通省

関東地方整備局千葉港湾事務所に御提供いただいた。備船に際しては横浜市根岸の八幡橋鴨下丸にご協力いただいた。現地調査に際しては横浜国立大学大学院工学府水環境研究室の山口諒氏をはじめとする研究室内の学生諸氏の協力を得た。本研究の一部は2003年度～2006年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号15360263の補助によるものである。

参 考 文 献

- 鬼塚正光・寒川強・太田一之・長岡克郎(1988):1985年の8月の青潮の海象に関する知見, 公害, Vol. 23, No. 2, pp. 81, 101.
- 柿野純(1986):東京湾奥部における貝類への死事例 特に貧酸素水の影響について, 水産土木, Vol. 23, No. 1, pp. 41, 47.
- 環境庁水質保全局(1989):青潮の発生機構の解明等に関する調査, 243p.
- 環境庁水質保全局(1990):青潮の発生機構の解明等に関する調査, 263p.
- 環境庁水質保全局(1992):青潮発生予測手法の確立調査, 135p.
- 環境庁水質保全局(1993):青潮発生予測手法の確立調査, 205p.
- 環境庁水質保全局(1994):青潮発生予測手法の確立調査, 186p.
- 環境庁水質保全局編(1990):かけがえのない東京湾を次世代に引き継ぐために, 大蔵省印刷局, 70p.
- 五明美智男・佐々木淳・磯部雅彦(1998):東京湾湾奥の浚渫窪地における湧昇現象の現地観測, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 981-985.
- 佐々木淳(1997):東京湾湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響, 海岸工学論文集, Vol. 44, pp. 1101-1105.
- 佐々木淳・磯部雅彦・渡辺 晃・五明美智男(1996):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, Vol. 43, pp. 1111-1115.
- 千葉県(2003):公共用水域及び地下水の水質測定結果報告書(平成15年度).
- 千葉県(2004):公共用水域及び地下水の水質測定結果報告書(平成16年度).
- 千葉県(2005):公共用水域及び地下水の水質測定結果報告書(平成17年度).
- 千葉県水産総合研究センター(2006):貧酸素水塊速報.
- 千葉県土木部・千葉県企業庁(1998):市川二期地区・京葉港二期地区計画に係わる環境の現況について(要約版), 336p.
- Wessel, P., and W.H.F. Smith (1998):New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Amer. Geophys. U., Vol. 79, No. 47, p. 579.