

東京湾奥部の浚渫窪地における 硫化物量の簡易推定手法の提案

DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT METHOD FOR ESTIMATION OF TOTAL HYDROGEN SULFIDE IN A DREDGED TRENCH OF TOKYO BAY

市岡志保¹・佐々木 淳²・吉本侑矢¹・松坂省一³・有路隆一⁴・諸星一信⁵
Shiho ICHIOKA, Jun SASAKI, Yuya YOSHIMOTO, Shoichi MATSUZAKA, Ryuichi ARIJI and
Kazunobu MOROHOSHI

¹ 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

² 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の創生部門

³ 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東京湾再生センター環境情報課長

⁴ 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東京湾再生センター係長

⁵ 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長

Blue tides, upwelling of anoxic water, are a major environmental problem in Tokyo Bay because they cause mortality of benthic animals in shallows and tidal flats. There are three types of sources of anoxic water containing hydrogen sulfide: dredged trenches, flat bottom at the head of the bay, and navigation channels. To consider remedies for this problem, it is important to clarify each contribution to occurrence of blue tide. It is, however, difficult because of the lack of time series data for the total amount of hydrogen sulfide in each of water. Thus, in the present study, focusing on dredged trenches as a first step, we developed a simple and reliable methodology for the estimation of the total amount of hydrogen sulfide. We utilized the data of pH and ORP collected using a water quality sensor, which have a good correlation with the concentration of hydrogen sulfide. Moreover, we found that the accuracy of estimation is quite improved if we use information of hydrogen sulfide concentration at the bottom. The proposed method is rather simple and very effective because those data are usually available in conventional monitoring.

Key Words: Blue tides, anoxic water, dredged trenches, hydrogen sulfide, pH and ORP

1. はじめに

夏季から秋季における東京湾奥部では、底層に形成された無酸素水塊が北東風によって湧昇し青潮が発生する。青潮は、干潟・浅場におけるアサリ等の底生動物のへい死を引き起こすことから重大な水質問題として認識されている。ところで、青潮の原因となる硫化物を含む水塊の起源は、湾奥平場、航路筋、および湾奥部に点在する浚渫窪地であると考えられているが、現状では調査に多大な労力が必要となることから硫化物に関するデータが少なく、各水塊の青潮への寄与割合については不明な点が多く残されている。佐々木¹⁾は平場での水塊を主要な起源とする大規模な青潮の発生の重要性について指摘すると共に、成層期に高濃度の硫化物を蓄積している浚渫窪地水塊の湧昇による青潮の規模や継続時間の拡大についても示唆しているが、限られた情報に基づいたものであり、定量的評価には至っていない。

各水塊の青潮へ及ぼす影響については、湾奥平場、浚渫窪地の底層無酸素水塊中における硫化物総量の時系列を硫化物濃度と相関のある pH 値から推定し、その寄与度について検討する手法が提案されているが、硫化物濃度の推定誤差が大きく、十分な信頼性があるとはいえない^{2), 3)}。

そこで本研究では 2007 年に実施した現地観測と既往の青潮関連調査結果に基づき、硫化物濃度の簡便かつ信頼性の高い推定手法について検討し、東京湾の浚渫窪地を対象とした硫化物総量の時系列動態を把握する手法を提案することを目的とする。併せて 2007 年秋季における硫化物動態を明らかにし、青潮との関連について考察を加える。

2. 現地調査と硫化物分析

(1) 現地調査の内容

2007 年の 8 月から 11 月の 3 ヶ月間にわたって、東京湾奥部の図-1 に示す測点 1～10 の浚渫窪地および平場において現地調査を行った(測点 1～7 および 9 が平場、測点 8 および 10 が浚渫窪地)。調査は約 1 週間に 1 回のペースで全 9 回(8 月 24 日、8 月 30 日、8 月 31 日、9 月 20 日、9 月 27 日、10 月 1 日、10 月 15 日、10 月 29 日)、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の環境調査船を用いて実施した。調査項目の内、水温、塩分、DO、pH、クロロフィル蛍光、ORP、および濁度は多項目水質計(YSI 社 6600V2-4)を用いて測定した。一方、各測点では DO が 0.5mg/L 以下または ORP が負の値を示した深度以深において、多項目水質計に接続した採水器(リゴ- B 号透明採水器 5023-A)を用いて採水し、酸素瓶に取り分け、水酸化ナトリウムを添加して硫化物を固定した。採水試料は横浜国立大学水理実験棟に持ち帰り、硫化物濃度の測定に供した。

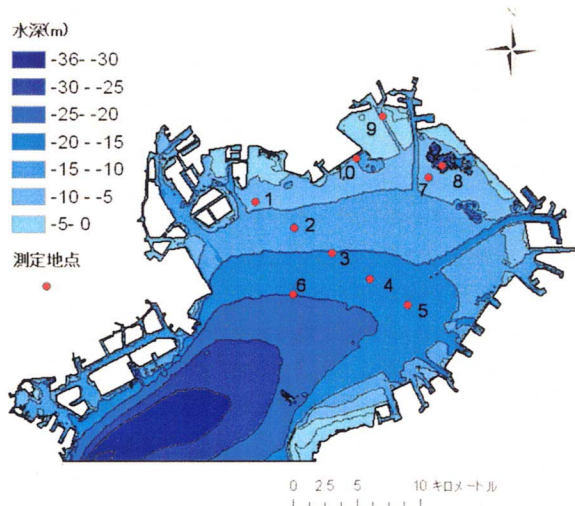


図-1 東京湾奥部における現地調査地点

(2) 硫化物分析

水中の硫化物の測定には、微量の場合はメチレンブルー吸光光度法が代表的な測定法であり、本研究でもこの方法を採用した。これは硫化物が塩化鉄(Ⅲ)の存在のもとで NN ジメチル p フェニレンジアミンと反応して生成するメチレンブルーの呈色の吸光度を測定して硫化物を定量する方法である。なお、吸光光度計には島津製作所 UVmini-1240 を使用した。

吸光度とは特定の波長の光に対して物質の吸収強度を示す尺度であり、この場合硫化物濃度が高ければ高いほど、吸光度が高くなる。まず、既知の濃度の標準試料を用いて目的物質の濃度と吸光度に関する検量線を作成し、次に、未知試料を同様に処理して得られる吸光度から濃度を求めるものである。

(3) 観測期間中の気象と青潮発生 の概況

2007 年 8 月は全国的に気温が高く、月平均気温も平年を 1～2℃ 上回り、晴れて暑い日が続く高温が顕

著であった。特に中旬には高気圧の勢力が強まって厳しい暑さとなり、月降水量は平年比 40% と少なく日照時間の比は 140% と多かった。9 月に入ってから平均気温は高く、真夏日が観測されるなど気温の高い日が続いたが、9 月上旬に台風 9 号が発生し、台風や台風から変わった低気圧などの影響で、大雨となり降水量は多くなった。一方 10 月の中旬以降は寒気の影響で低温となり、10 月下旬には台風 20 号が発生し、その影響を受け大雨や強風がみられた。2007 年における台風の発生回数は、9 月 5 個、10 月 6 個と平年を上回り、記録的な大雨となる日が目立った。

観測期間中の 9 月の初旬および 10 月の中旬に青潮の発生が報告されている。

(4) 9 月初旬の青潮時

ここでは 9 月初旬に発生した青潮時を対象とし現地観測結果について述べる。図-2 に 8 月 24 日、8 月 30 日、8 月 31 日における幕張沖浚渫窪地(測点 8)の現地観測データから得られた水温と塩分を、図-3 に DO および硫化物濃度の鉛直分布を示す。

8 月 24 日から 8 月下旬に向けて成層が強まり、これに伴う無酸素水塊の発達が見られた。また、このような影響を受け、硫化物濃度も急激に増加している。28 日より風向が北寄りに変わり湧昇が起こりはじめ、9 月 1 日に青潮が発生した。青潮発生直前の 8 月 31 日には無酸素水塊は海面下 4m 付近まで湧昇し、底層の硫化物濃度は 40mg/L 以上の高い濃度で検出された。

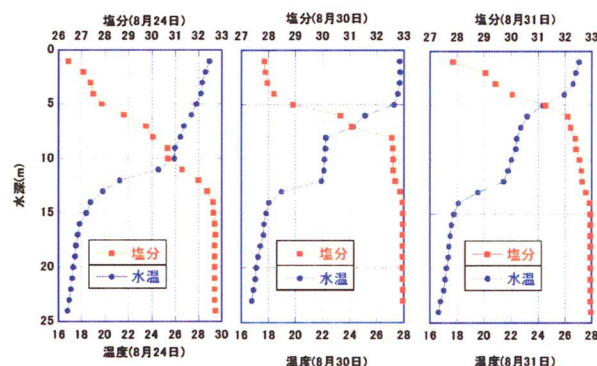


図-2 浚渫窪地での水温・塩分の鉛直分布

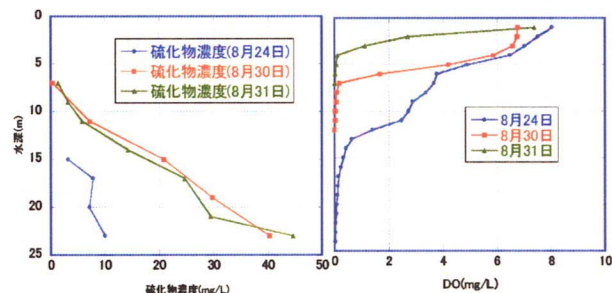


図-3 浚渫窪地での DO・硫化物濃度の鉛直分布

3. 浚渫窪地における硫化物濃度の推定法

平場および浚渫窪地等の各水塊中の硫化物総量を算出するためには、空間的に密な硫化物濃度とそれぞれの硫化物濃度値が代表する水塊体積の把握が必要である。本章では浚渫窪地を対象として、硫化物濃度の高精度な推定法について検討を行う。

(1) pH を用いた既往の硫化物濃度の推定法

硫化物濃度は pH とある程度の相関があることが知られており³⁾、センサー計測が可能で豊富なデータが存在する pH を用いて硫化物濃度を推定する算定式を作成することにより、硫化物濃度の推定が可能である。しかし、1本の推定曲線から得られる結果にはばらつきが大きく、信頼性に問題がある²⁾。そこで本研究では2007年の現地観測データを基に、各水質項目と硫化物濃度との関係について再考を加えることとした。

2007年の現地観測によって得られた pH と硫化物濃度との関係を図-4に示す。図-4からわかるように推定された硫化物濃度と実測値の間にはばらつきが大きく、定量的な評価には問題があることがわかる。

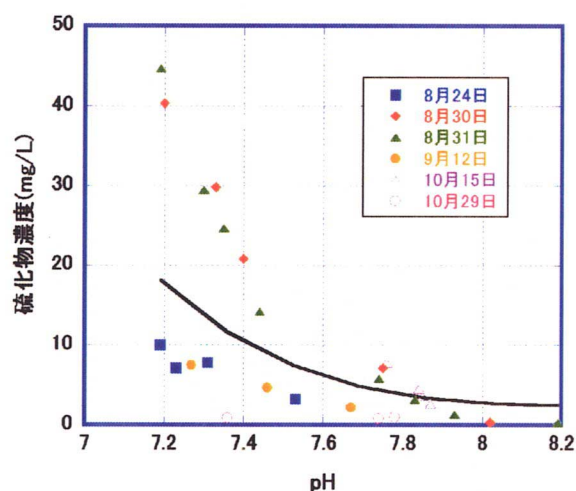


図-4 硫化物濃度と pH の相関（曲線は文献 2)に基づく相関曲線）

(2) 新しい硫化物濃度推定法の提案

あらためて図-4を見ると、pH と硫化物濃度の関係は全体としてはばらついてはいるが、各観測日の結果は比較的良好に一つの曲線上に乗っているように見える。そこで、すべての調査結果を一つの式で表現することはあきらめ、各調査日、各調査地点ごとに推定曲線を求めることで精度の向上を図ることとした。そのため、底層の1測点における硫化物濃度の実測値が既知であることを条件として、なるべく簡便かつ汎用性の高い推定式を提案することを試みる。

図-4の各調査日のデータより、pH が 8 程度のと

きに硫化物濃度が 0 となり、これより pH 値が下がるにつれて硫化物濃度が上昇する様子が見て取れる。そこで、この性質を満たす簡単なものとして式(1)に示すべき乗型の推定式を提案する。

$$C_{H_2S} = a(c - pH)^b \quad (1)$$

ここに C_{H_2S} は硫化物濃度、 pH は pH 値であり、 a および b はモデルパラメータである。パラメータ c の値は硫化物が 0 となる時の pH 値に相当するが、ここでは現地データに基づき $c=8$ として解析を進めるが、次章で再度検討する。式(1)を対象として観測日ごとに最小自乗法によってパラメータ a 、 b を求めた結果を表-1に示す。

表-1より、パラメータ a は気象状況や海象状況の影響を受けての変動が大きいと考えられるが、パラメータ b は比較的良好にまとまっていることがわかる。そこで、パラメータ b を固定値として与え、底層 1 点の硫化物濃度データを用いてパラメータ a を決定することで、各調査日、各調査地点における硫化物濃度推定式を構成することとし、検討の結果、 $b=1.65$ を採用した。

表-1 観測日ごとの最小自乗法による推定式のパラメータの決定

調査日	a	b
8月24日	11.705	1.2789
8月30日	53.697	1.4849
8月31日	55.536	1.6277
9月20日	12.860	1.7066
10月15日	95.349	1.7458

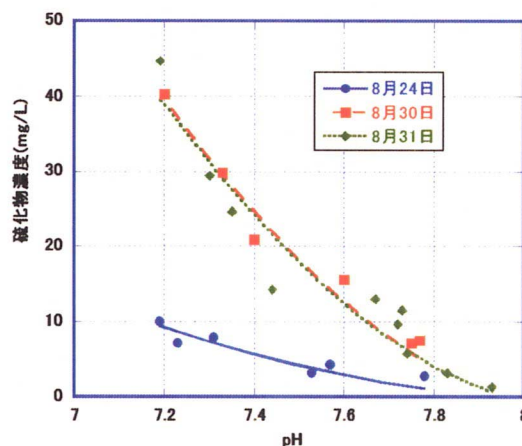


図-5 推定式による硫化物濃度と pH の相関

以上より浚渫窪地を対象とした硫化物濃度の推

定式として、式(2)を提案した。

$$C_{H_2S} = a(c - pH)^{1.65} \quad (2)$$

図-5 に調査日ごとの推定式から得られる曲線と実測値を示すが、両者はよく一致しており、提案した手法の有効性が確認された。

本推定手法は硫化物の実測値を必要とするが、底層1点のみのデータがあればよいことから、公共用水域水質測定の手組みの中での適用が可能となるといった特長がある。

(3) 検証

本推定手法は 2007 年の現地データを基に提案されたものである。そこで本手法が汎用性を有するものであるか検証するため、硫化物濃度データが比較的豊富に存在する環境庁による既往データ^{4), 5), 6), 7), 8)}に適用することで検証を行う。方法としては、各調査日、調査地点において、底層1点の pH と硫化物濃度の実測値を既知として式(2)のパラメータ a を決定し、得られた推定式に実測の pH 値を入力することで硫化物濃度の推定値を出し、この結果を実測の硫化物濃度データと比較した。

2007 年および環境庁の既往データ^{6), 7), 8)}を対象として、pH の推定値と実測値を比較したものを図-6 に示す。これより多くの既往データに対して、従来の方法に比べよい精度で硫化物濃度の推定が可能であることが分かった。

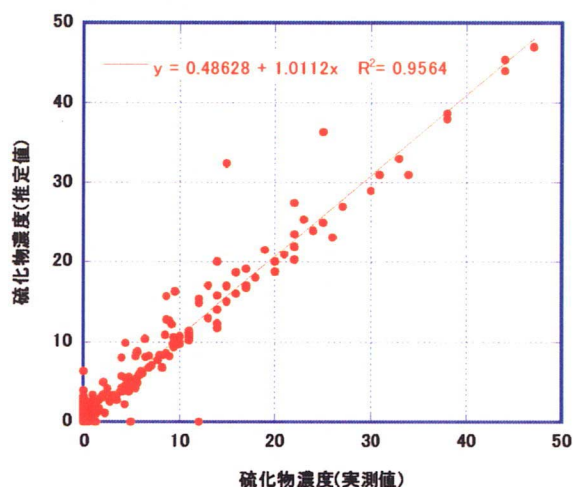


図-6 推定値と実測値の比較

4. 考察

(1) 推定誤差の要因と改善策について

既往のデータに対しても本推定手法は概ね適用可能であることが分かったが、推定値の誤差が大きいケースも存在する。その原因とさらに推定精度を

向上させる方策について、pH 以外の情報の活用を含め考察を行う。

推定誤差の大きい事例として環境庁による 1993 年 7 月 22 日および 9 月 22 日に実施された、幕張浚渫窪地におけるケースを採りあげる⁷⁾。それぞれのケースについて硫化物の推定値と実測値を pH の関数としてまとめたものを図-7 および図-8 に示す。

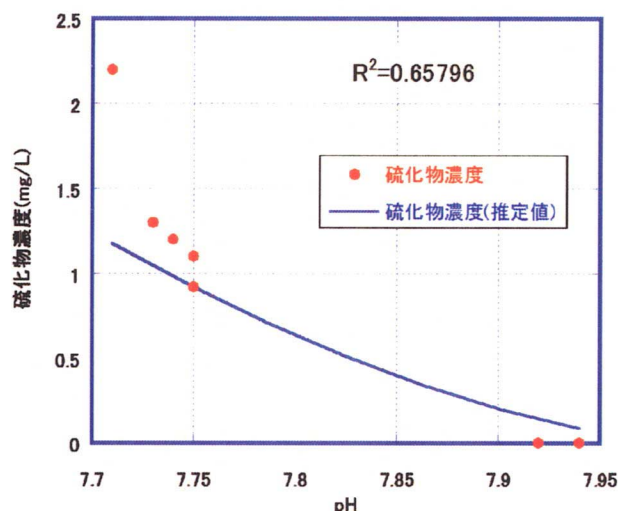


図-7 実測値と推定値の比較(1993 年 7 月 22 日)

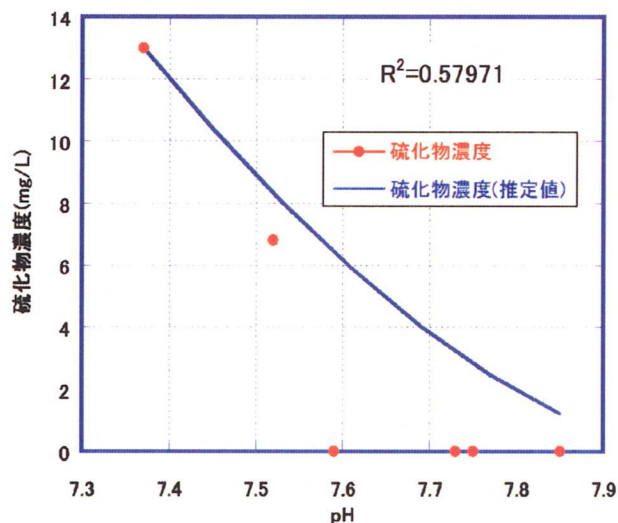


図-8 実測値と推定値の比較(1993 年 9 月 22 日)

まず、これらの 9 月 22 日および 7 月 22 日における海況状況について調べたところ、両日ともに青潮発生時の水質測定であったことが判明した。7 月 22 日については、底層よりも中層における硫化物濃度の方が高い値を示していたが、これは青潮の発生により浚渫窪地の底層の硫化物濃度が減少したためであると推察される。一方、9 月 22 日については浚渫窪地の測点においてのみ、海底上 5m 以深で硫化物が検出され、それ以浅では検出されていなかった。

このように青潮発生時には硫化物濃度が特異な

鉛直分布を示す場合があり、その結果、本推定方法の適用が困難となることが分かった。そこで、このような場合に対しては pH 以外の情報も活用することで推定精度の向上が図れないか検討することとした。

式(2)を適用する際には pH が 8 以上の場合に硫化物濃度を 0 と仮定しているが、実際には硫化物濃度が 0 となる pH が常に 8 であるとは限らない。硫化物は嫌気的環境下で生成されることを考慮すると、センサー計測の可能な ORP が 0 を下回る時の pH 値を式(2)のパラメータ c に代入するのが合理的であると考えられる。すなわち、仮に pH が 8 未満の値を示していても ORP が正の値であれば硫化物濃度は 0 であるとし、ORP が負値となつてはじめて式(2)によって硫化物濃度を推定することとした。

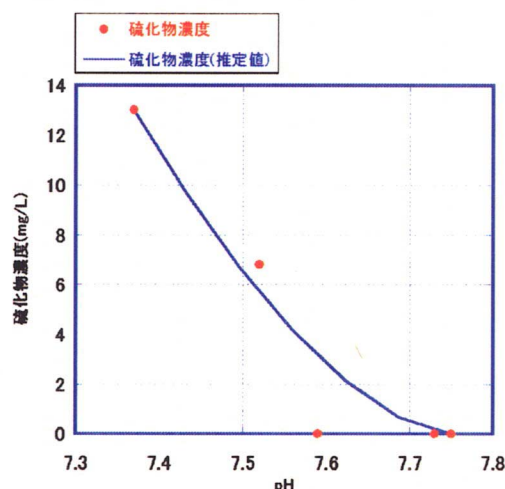


図-9 ORP を考慮した式による推定値と実測値の比較

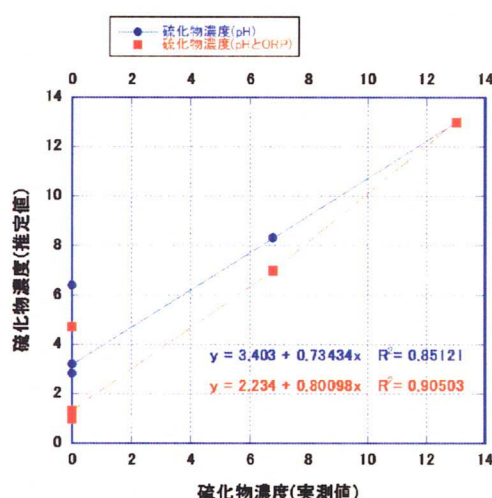


図-10 ORP を考慮した式による推定値と実測値の相関

ここでは 9 月 22 日のデータに対して ORP の情報から式(2)のパラメータ $c=7.75$ と決定し、底層 1 点の硫化物濃度測定値から推定式を決定し求め、これ

を用いた硫化物の推定値と実測値を pH の関数としてまとめたものを図-9 に示す。

一方、9 月 22 日のデータを対象として、ORP の情報を用いた場合と用いない場合の推定式を作成し、硫化物の推定値と実測値の相関を見たものを図-10 に示す。

これより ORP を考慮して式(2)のパラメータ c を決定することで、相関係数の向上が図られたことが分かり、ORP のデータが利用可能な場合にはここで提案した手法が有用であることが確認された。

(2) 硫化物総量の算出

得られた硫化物濃度推定式を用い、佐々木らの方法²⁾を適用することで、2007 年の調査期間中における浚渫窪地と平場における硫化物総量の時系列を算出し、得られた結果を図-11 に示す。ただし、平場については硫化物濃度の推定法も含め、佐々木らの方法²⁾を踏襲している。

観測期間中に発生した青潮との関係についてみると、9 月初旬および 10 月中旬の青潮発生前における浚渫窪地および平場水塊中での硫化物総量の増大と、青潮後の硫化物量の減少が見られた。しかし、9 月初旬の青潮発生時の直後には台風が発生したため、台風による攪拌作用の影響を受けての硫化物の希釈効果が顕著であると考えられる。よって各水塊による寄与度の定量化には、平場等における硫化物濃度の推定法と共に、データセットを蓄積していく必要がある。

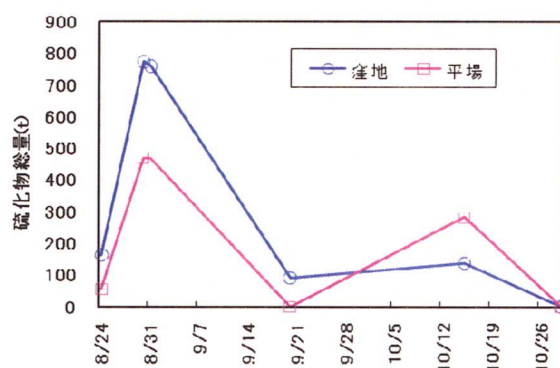


図-11 2007 年における平場と浚渫窪地の硫化物総量の時系列変化

5. まとめ

浚渫窪地を対象とした硫化物濃度鉛直分布の簡便な推定手法の提案を目的として、2007 年 8 月から 10 月まで東京湾奥部において硫化物濃度、DO、pH、ORP を含む水質調査を実施した。得られたデータが

ら硫化物濃度と pH の相関に着目し、さらに底層 1 点の硫化物濃度データを活用する新たな硫化物濃度の推定手法を提案した。本手法を環境庁による既往のデータに適用し、妥当性を検証したところ、ほとんどのケースについて、硫化物鉛直分布データを精度よく再現できることが分かった。本手法はセンサー計測の可能な pH と底層 1 点における硫化物濃度実測値のみを用いる方法であり、これらの測定が実施されている、公共用水域水質測定の様組みで利用可能な手法となっている。一方、一部の再現性の悪いデータについて考察を行ったところ、これらのデータは青潮発生時のデータといった、平常時とは異なる状況におけるデータであることが判明した。このような場合の改善方法について検討したところ、ORP のデータを併せて考慮することで、高い精度の再現が可能であることが明らかとなった。

本研究では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の環境調査船を用いることによって、高頻度の詳細な現地調査が可能となった。今後も同調査船を用い、継続的にデータを蓄積し、本手法の精度の向上と各水塊による青潮への寄与割合について検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究の一部は 2007 年度～2010 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 19360220 の補助によるものである。

参考文献

- 1) 佐々木淳：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. 1101-1105，1997.
- 2) 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.
- 3) 千葉県土木部・千葉県企業庁：市川二期地区・京葉港二期地区計画に係る環境の現況について（要約版），336p，1998.
- 4) 環境庁水質保全局：青潮の発生機構の解明等に関する調査，1989.
- 5) 環境庁水質保全局：青潮の発生機構の解明等に関する調査，1990.
- 6) 環境庁水質保全局：青潮発生予測の手法の課率調査，1992.
- 7) 環境庁水質保全局：青潮発生予測の手法の課率調査，1993.
- 8) 環境庁水質保全局：青潮発生予測の手法の課率調査，1994.