東京湾における湧昇イベントと 青潮発生の有無について

宮下 寿哉¹・中村 由行²・比嘉 紘士³・田中 陽二⁴・伊藤 比伽留⁵・
池津 拓哉⁶・金谷 一憲⁷・鈴木 崇之⁸

¹横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府
(〒240-0085 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1) E-mail:miyashita-kazuya-bk@ynu.jp

²正会員 横浜国立大学教授 大学院都市イノベーション研究院
E-mail:nakamura-y@ynu.ac.jp

³正会員 横浜国立大学助教 大学院都市イノベーション研究院

⁴正会員 株式会社エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

⁵正会員 東京都庁 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

⁶東電設計株式会社 (〒143-0024 東京都大田区中央3-26-2)

⁷株式会社ニュージェック (〒136-0071 東京都江東区亀戸1-5-7)

⁸正会員 横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院

2016年8月～9月に連続的な岸壁調査および計4回にわたる船上調査を実施し、東京湾湾奥部における複数の湧昇イベントを捉えた。4回の船上調査のうち一度は青潮発生の直前に対応し、残りのうち2回は青潮に至らない弱い湧昇の直前とそのピーク時に対応していた。各湧昇イベント時の水塊の起源推定を行ったところ、青潮発生時には千葉本航路内でも湾央側の航路底層から硫黄を含む水塊が岸壁まで湧昇し青潮に至ったものと推定された。一方、弱い湧昇時では比較的浅い層の湧昇にとどまり、水面の着色や濁度の上昇はなく青潮として確認されなかったが、その期間には航路内で硫化物や硫黄が活発に生成していたことが示唆された。

Key Words : blue tide, upwelling, turbidity, sulfur, observation, Tokyo Bay

1. 序論

富栄養化した閉鎖性内湾である東京湾では、毎年夏季に底層で貧酸素水塊が形成され、貧酸素化がさらに進行すると無酸素水塊となって硫化水素が蓄積する。これらの水塊は離岸風として北風が連吹すると湾奥部沿岸に湧昇するが、硫化水素を含む無酸素水塊の場合は酸素と接触することで硫黄粒子（単体イオウ）が生成され、海面が青白く濁る青潮現象が発生する。東京湾では現在も年数回にわたり青潮が発生しているが、明白な改善傾向はみられておらず、しばしば漁業被害をもたらしている。こうした青潮への対策を講じるためには、その挙動の解明が必要であるが、非定常性が強い現象であり、青潮を構成する硫黄粒子の生成過程などの硫黄循環や、それらの化学的反応過程と物理的な湧昇過程の関連性など、現地観測によって実態を捉えることは困難であるとされてきた。青潮現象後に報告されている干潟浅海域での生物被害についても、貧酸素状態が原因か、青潮水に含まれ硫化物（特に硫化水素）が原因であるかについてもいま

だに不明である。

一方、最近の著者らの一連の研究において、観測濁度を硫黄粒子濃度と関連付ける研究が進んでいる。まず、田中ら¹⁾は、青潮発生の前に硫化物が含まれる無酸素層上部で高濁度水塊が発生することを観測している。また、山本ら²⁾は青潮発生時における濁度観測値と数値計算による硫黄粒子濃度が対応することを示唆している。濁度と硫黄粒子濃度の関係については、田中ら³⁾が湧昇した青潮水塊中の観測濁度と硫黄粒子濃度の分析値に高い相関関係があることを示しており、その結果を用いて、青潮発生後に水塊が中層へ流出する過程を濁度から推定している。

濁度は水温・塩分、DO、pHセンサーなどとともに多項目水質計などに標準装備されており、他の水質項目と同時に、広範囲の計測を機動的に行うことができる。さらに湾奥部に設置されているモニタリングポストにおいても濁度が連続的に計測されてきたことから、濁度を硫黄粒子濃度の代替指標として用い、青潮を含む貧酸素・無酸素水塊の湧昇、および水中での硫黄の生成過程を詳

細に調べることが可能になり、実態解明が飛躍的に進むものと期待される。

以上のような研究背景から、本研究では青潮、すなわち海面が青白く着色する現象に至る湧昇と着色のない湧昇イベントの現地観測を行い、他の水質項目と同時に計測しながら濁度を硫黄粒子濃度のトレーサーとして用い、それぞれの湧昇時における硫黄粒子の生成過程の違いを調べることを目的とした。

2. 観測方法

(1) 岸壁調査の方法

2016年8月8日から9月28日までの期間に、東京湾湾奥部において岸壁および船上からの水質調査を実施した。岸壁調査は千葉港口岸壁（Stn.1a）において期間中週3回程度、青潮発生時には千葉港岸壁（Stn.1）において連日実施し、多項目水質計（AAQ-RINKO, JFEアドバンテック社製）による水温、塩分、溶存酸素（以下DO）、濁度等の0.1m毎の鉛直プロファイルの取得、およびバンドーン採水器による表層、中層および底層での採水を行った（図-1）。採水したサンプルは、硫化物イオン、全鉄・全マンガン、硫黄粒子、栄養塩類の分析に供した。

(2) 船上調査の方法

船上調査は東京湾湾奥部沿岸（A1～A5, B1～B5）、および千葉本航路沿い（C1～C6）の計16地点において、計4回（2016年8月25日、9月10日、9月15日、9月23日）にわたり実施した（図-1）。多項目水質計による水質測定は、岸壁調査と同様の項目に加え酸化還元電位（以下ORP）についても行った。また、北原式採水器による採水を行い、硫化物イオン濃度の分析を行った。採水水深は各地点の表層および底層に加え、多項目水質計でDOが0、ORPが0以下あるいは濁度が急激に上昇する水深付近を対象とした。硫化物イオンは、現地での採水後にフラン瓶に移し、直ちに水酸化ナトリウム固体を添加して固定した後、メチレンブルー吸光光度法により測定した。

3. 観測結果

(1) 観測期間中の風況および水質の概況

本観測期間である8月8日～9月28日の風況および岸壁調査結果として Stn.1a における水温、塩分、DO 濁度の鉛直分布の時系列変化を図-2 に示す。図は水面を基準として各項目の分布を示したものである。したがって、潮位によって全水深が変化する。風況については国土交通省関東地方整備局が東京湾湾奥部に設置している千葉波浪観測塔の連続水質観測結果⁴⁾から、15分平均値として公開されている風向風速データを1時間平均化して図

図-1 岸壁調査および船上調査の観測地点

図-2 風向風速（千葉波浪観測塔）および水温、塩分、DO、濁度の時系列変化（Stn.1a）

写真-1 青潮発生時の千葉港内（Stn.1aより、著者撮影）

示している。本調査期間中は台風や温帯低気圧が東京湾に頻繁に接近したため風況の変動が激しく⁵⁾、それに伴って湾奥部での水塊密度も変動しており、湧昇および後退が頻繁に繰り返されていたことが岸壁調査より確認された。Stn.1aでの底層塩分 28 psu を基準とし、それを超える期間を「湧昇」と定義すれば、湧昇は観測期間中に4回生じていた。

8月26日から9月2日にかけての湧昇時(期間Ⅰとする)をみると、平均 6 m/s 程度の北風が連吹しており、底層の塩分はピーク時で 32.5 程度となっていた。期間Ⅰの8月29日11:00頃の岸壁調査時には、Stn.1aおよびStn.1において目視により青潮の発生を確認し(写真-1)、同時に水質計での濁度上昇も捉えた。海面の濁りは一様ではなく、広がりも千葉港近辺に留まっていたため、比較的小規模な青潮であった。青潮はその後8月31日まで続いた。

北風の連吹および底層の塩分の上昇から、9月10日から9月16日までの期間(期間Ⅱとする)においても湧昇が発生しているものと推察される。期間中の9月15日に実施した船上調査における表層の水質分布(図-3)をみても、湾奥部沿岸のA1~A5やB1~B5で低水温、高塩分となっており、C1~C6では岸側に向かうにつれ低

水温、高塩分の傾向がみられ、湧昇の様子が確認できる。このとき、DOについても沿岸部で低下傾向にあるものの、濁度は湾奥部全体で3度(ホルマジン)未満と低く、目視および水質測定 of いずれでも期間中に青潮は確認されなかった⁶⁾。

図-3 9月15日における水質の空間分布, (a)水温, (b)塩分, (c)DO, (d)濁度(青潮を伴わない湧昇イベント時)

図-4 千葉本航路上におけるDOの縦断面分布および濁度(赤), ORP(青), 硫化物濃度(緑)の鉛直分布, (a)8月25日, (b)9月10日

(2) 千葉本航路沿い（C線）での船上調査結果

本論文では、計4回にわたる船上調査のうち、期間Ⅰ直前の8月25日、期間Ⅲに含まれる9月10日および9月15日の計3回の船上調査を中心に報告する。千葉本航路沿い（C線）におけるこれら3回の船上調査のうち、DO、濁度、ORP、および硫化物濃度の結果を図-4に示す。ただし、DOについては鉛直縦断面分布として、他の項目については鉛直プロファイルとして示している。

千葉本航路は水深約10～12m以深で浚渫されているため、航路底層では水塊が停滞して夏季に貧酸素化が進行しやすい。図-4より、C線上の水深10m以深では3回の船上観測のいずれにおいてもDOは1.0mg/lを下回っており、地点によっては完全な無酸素状態となっていた。このうち、9月10日のC2、C3および9月15日のC1、C3、C4では底層で硫化物が検出されたが、8月25日にはいずれの地点でも検出限界（0.05 mg/l）未満であった。

4. 考察

(1) 湧昇した水塊の起源推定

期間ⅠおよびⅡで岸壁に湧昇した水塊の起源について、TSダイアグラムによる考察を行った。両期間におけるTSダイアグラムをそれぞれ図-5、図-6に示す。なお、各図においては、岸壁調査を実線、船上調査を破線として示している。

a) 期間Ⅰ

期間Ⅰでは8月27日5:00頃から北風が卓越し始めた後、8月30日13:00頃まで平均約6 m/sで連吹した（図-2）。期間中8月29日11:00のStn.1aにおいて、青潮の発生を確認した。図-5に示すTSダイアグラムでみると、この時のStn.1aの水塊は8月25日の船上調査におけるC5の底層と近い低水温・高塩分の水塊であったことから、千葉航路内でも湾奥側の底層水塊が湧昇していたものと推定された。この水塊は航路周辺にあたるB1等の底層水塊に比べても高密度であった。大規模な青潮の発生条件として、多量の硫化物が蓄積された湾奥部平場海域の水塊が寄与している可能性が指摘されているが、期間Ⅰで発生した青潮については、平場起源の可能性は低いものと考えられる。航路底層の水塊が沿岸部で湧昇した後さらに沖側の平場底層水塊が湧昇する場合、平場底層の水塊はより高密度であるため、岸壁における水塊密度も高密度化するはずである。しかし、期間Ⅰにおいては8月29日以降、さらに高密度になることはなかった。したがって、期間Ⅰに発生した青潮は航路内に蓄積された硫化物や単体硫黄を主体とするもので、比較的小規模なものに留まったものと考えられる。

8月25日の船上調査の時点では、航路内で無酸素化していたのはC6の底層のごく薄い層のみであったものの、

底層付近でのORPの低下および濁度の上昇は各地点で見られた。8月29日の青潮発生時のStn.1aの平均濁度が6度であるのに対し、その起源である8月25日のC5の11m以深の平均濁度は1.7度程度であった。したがって、8月25日の青潮は湧昇前に生成されていた硫黄よりも湧昇の過程で生成された硫黄が支配的であったものと考えられる。

b) 期間Ⅱ

期間Ⅱでは、Stn.1aにおいて、9月12日から9月14日にかけては低水温、高塩分へとシフトしており湧昇が進行している。しかし、その後9月16日に至るまでStn.1aの水塊構造にはほぼ変化が見られない。さらに、期間Ⅲにおける風況（図-2）をみると、9月14日13:00頃までは北風が連吹した後、北風が弱まり南風が発生している。すなわち、9月14日13:00頃までは湧昇が強化される傾向にあったものの、その後はStn.1a付近の水塊が停滞しており、9月15日の船上調査では期間Ⅲにおける湧昇のピークを捉えていたものと考えられる。

図-6に示すように、湧昇ピーク時（9/14～16）のStn.1aにおける水塊は、9月10日のC4の水深9.0から10.0m付近および9月15日のC1の水深3.0から8.5mのものと酷似しており、C4中層由来の水塊がC1を経て岸壁まで湧昇したものであると推定された。一方、9月15日の船上調査結果（図-4）より、航路底層は無酸素化し硫化物の蓄積がみられ、直上の有酸素層との境界付近で濁度の上昇が確

図-5 期間ⅠにおけるTSダイアグラム

図-6 期間ⅢにおけるTSダイアグラム

認されている。硫化物については湧昇前の9月10日にも同様に検出されていることから、9月15日までの弱い湧昇下では硫化物が継続して生成・蓄積していた可能性が高い。さらに、9月10日に比べ9月15日の航路内各測点の濁度のピーク値が大きいことから、期間Ⅱの湧昇ピーク時にまでに次式の反応によって航路内で硫黄粒子が生成し、高濃度に蓄積されていたことが示唆される。

しかし、9月15日に濁度のピークが確認された水深はいずれも12 m以深であった。すなわち、この期間には比較的弱い北風の連吹によって湧昇は発生したもの、航路の高濁度層より浅い中層の水塊がStn.1aまで達したところで湧昇がとどまり、高濁度水塊が表層まで運ばれず、青潮として確認されなかったものと考えられる。しかしながら、図-4の中図および下図を比較すると、無酸素層と有酸素層の界面近傍では部分的な混合が進み、DO濃度が1 mg/l程度以下の層を中心に単体硫黄の生成が活発に生じていたものと考えられる。

(2) 期間Ⅲにおける航路内の硫化物および硫黄の総量

期間Ⅲにおいては航路底層水中において硫化物が、そして無酸素層の上部界面近傍において単体硫黄が蓄積されていると推測される。そこで、田中³⁾に基づき、DOが0～1.0 mg/lとなる水深における濁度がすべて単体硫黄によるものと仮定し、期間Ⅲにおける2回の船上調査における硫化物および単体硫黄の総量の推定を行った。まず航路はほぼ様な矩形断面であることを利用し、千葉航路をC1～C6の各測点を中心とする6個の等面積Aのボックスに分割した。各ボックスを0.1 mの鉛直層に分割し単体硫黄および硫化物の鉛直濃度を推定し（後述）、式(2)に基づいてボックス内各層の物質量を推定した。

$$M_i(z) = A \cdot \Delta z \cdot \{C_i(z) + C_i(z + \Delta z)\} / 2 \quad (2)$$

ここに、 z は底層からの高さ[m]、 $M_i(z)$ はボックスiの $z \sim z + \Delta z$ 層における単体硫黄あるいは硫化物量[t]、 $C_i(z)$ はボックスiの水深 z における推定濃度[mg/l]、 A は面積[km²]、 Δz は層厚(0.1[m])である。ただしボックスの同じ層では水質が一樣に分布しているものと仮定した。佐々木ら⁷⁾は、千葉航路の総面積を4.51 km²と推定しており、本研究ではこの値を基に $A = 0.752 \text{ km}^2$ とした。

a) 単体硫黄総量の推定

単体硫黄については田中ら³⁾の方法を基に、濁度の観測値から鉛直プロファイルを推定した。田中らは青潮形成時の濁度と硫黄粒子濃度計測値を比較し、式(3)に示す相関関係を見出した。

$$\text{S}^0 = 0.030C_t + 0.238 \quad (3)$$

ここに、 S^0 は単体硫黄濃度[mg/l]、 C_t は観測濁度[FTU]である。田中らの推定式を用いる場合、濁度がゼロの場合でも一定濃度の単体硫黄が存在することになる。また、

図-7 硫黄総量の推定に使用した濁度と単体硫黄の関係

図-8 期間Ⅱの千葉航路内各層における硫化物及び単体硫黄の総量、(a)9月10日、(b)9月15日

期間ⅢにおけるC線の濁度は水質計の着底時を除けば2～12程度であり、大規模な青潮発生時にみられる20程度³⁾に比べて小さい値であった。そのため本研究では、図-7に示すように、田中らが測定した濃度範囲のうち濁度13度未満の範囲から式(4)に示す近似式を求め、これを基に単体硫黄濃度を推定した。

$$\text{S}^0 = 0.047C_t + 0.168 \quad (4)$$

水質計の着底時に50度以上や0度付近といった急激な変動が発生するため、それらを除いた濁度がすべて硫黄によるものとして総量を推定した。

b) 硫化物総量の推定

硫化物については航路内の複数の地点で検出されたものの、各地点では底層1点のみであった。そのため、市岡ら^{8,9)}の方法を用い、pH、ORPの観測値および底層1点の硫化物濃度の分析値から硫化物濃度の鉛直プロファイル推定した（式(5)）。

$$C_{sul}=a(b-C_{ph})^{1.65} \quad (5)$$

ここに、 C_{sul} は硫化物濃度[mg/l]、 C_{ph} は同水深におけるpH値、 a 、 b は地点ごとに定めるパラメータ^{8,9)}である。

c) 推定結果

9月10日および9月15日の硫化物および単体硫黄の総量の推定結果を図-8に示す。ただし、図は海底面から0.1 mごとに推定した値をさらに1 m層ごとに積分し、6つのボックスの値を合計して示している。硫化物総量は0.41 tから1.0 tへの増加、単体硫黄総量についても9.4 tから10.1 tへと増加する結果となり、両者の総和では9.9 tから11.1 tへの増加となった。佐々木ら⁷⁾は千葉航路を起源とする硫化物総量は4.5 t、単体硫黄を含む総量は10 t程度と推定しており、これらの値と比べると硫化物総量は小さく、単体硫黄を含む総量はほぼ同じ値となった。式(4)による推定は比較的低濁度範囲に限定しているものの、濁度が0に近い場合でも硫黄が存在する（図のy切片がある）という課題は解消されておらず、推定総量が過大になっている可能性は十分に考えられる。濁度と硫黄濃度の相関関係の普遍性については、今後データを蓄積しながら検討していく必要があると考えられる。

5. 結論

本研究では2016年8月から9月にかけて東京湾湾奥部での船上観測および岸壁観測を行い、青潮を含む複数の湧昇イベントを捉えた。その間の濁度の時空間分布から、単体硫黄の形成過程を追跡することができた。観測期間中に発生した青潮は比較的小さい規模であり、航路内の湾央側の水塊の湧昇によるものであると推定された。さらに、青潮が生じていない弱い湧昇時の場合においても、水中の無酸素水塊直上近傍で単体硫黄粒子が活発に生成されていることが見いだされた。

謝辞：本研究は環境省総合推進費「人工構造物で囲まれた内湾の干潟・藻場生態系に及ぼす貧酸素・青潮影響の軽減策の提案（研究代表者・中村由行）」により行われた。また、本研究の観測に際して国土交通省関東地方整備局千葉港湾事務所にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 山本修司, 中村由行, 田中陽二, 鈴木崇之: 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.
- 3) 田中陽二, 中村由行, 比嘉紘士, 宇野佳朗, 軽部智章, 伊藤比伽留, 菅原庄吾, 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), Vol. 72, No.2, pp.I_1237-I_1242, 2016.
- 4) 国土交通省関東地方整備局港湾空港部: 東京湾環境情報センター, <http://www.tbeic.go.jp>, 参照 2017-3.
- 5) 気象庁: 過去の気象データ検索, <http://data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 参照 2017-3.
- 6) 千葉県水産総合研究センター: 貧酸素水塊速報, <http://www.pref.chiba.lg.jp/lab-suisan/suisan/suisan/suikaisokuhou/index.html>, 参照 2017-3.
- 7) 佐々木淳: 東京湾の貧酸素・硫化物分布に関する実態調査, 環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書(印刷中).
- 8) 市岡志保, 佐々木淳, 吉本侑矢, 松坂省一, 有路隆一, 諸星一信: 東京湾奥部の浚渫窪地における硫化物量の簡易推定法の提案, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.669-674, 2008.
- 9) 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.

(2017.3.15 受付)

A STUDY ON UPWELLING EVENTS WITH AND WITHOUT BLUE TIDE FORMATION IN TOKYO BAY

Kazuya MIYASHITA, Yoshiyuki NAKAMURA, Hiroto HIGA, Yoji TANAKA, Hikaru ITO, Takuya IKEZU, Kazunori KANAYA and Takayuki SUZUKI

We conducted continuous quay side observations and four times on-board observation in the inner part of Tokyo Bay from August to September in 2016 to find several upwelling events. One of four on-board observations corresponded to just before a blue tide event when surface water color changed to milky white, and other two corresponded to just before and in the peak of mild upwelling events without any color changes. Analysis based on the TS diagram revealed that the origin of water mass of the quay side during the blue tide event was the water mass upwelled from off shore side of near the bottom of the Chiba navigation channel containing sulfide ion. While during the mild upwelling events, the upwelled water mass came from relatively shallower layer of the channel without elemental sulfur nor sulfide. However, formation of elemental sulfur actively occurred in the deeper part of the navigation channel during the event.