



る<sup>5)</sup>が、赤潮の発生状況については、各自治体が管轄する海域について発生回数が報告されているのみで、詳細な解析はなされていない。

そこで本研究では、長期間の水質モニタリングデータを赤潮の視点から解析し、東京湾内の赤潮発生分布やその推移、気象条件や栄養塩濃度と赤潮発生との関係について検討を試みた。その結果について報告する。

## 2 調査方法

### (1) 使用データ

#### ア 水質データ

公共用水域水質測定結果（東京都、千葉県、神奈川県）<sup>6,8)</sup>から図1に示す東京湾内42地点、30年間（1981～2010年度）の水質測定データを使用した。このうち東京都内湾には8地点（図中で“St.”を付した地点、この海域の詳細な地図を図4に示す）存在する。水質項目は、クロロフィルa（Chl-a）、水温、塩分、全窒素（T-N）、全りん（T-P）、りん酸性りん（PO<sub>4</sub>-P）及び溶存性無機態窒素（DIN）で、ここでのChl-aは、フエオ色素を含む濃度を示している。DINは、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素の合計値として求めた。測定頻度は月1回、採水層は上層である。

#### イ 気象データ

東京（大手町）の日平均風速及び降水量日合計値のデータを使用した<sup>9)</sup>。風速は水質調査日の前日の値、降水量については、日単位で水質測定日の前日から7日前まで、各積算値を求めて、それぞれ赤潮発生との関連を検討した。

#### ウ 潮高データ

東京湾の潮汐調和定数表<sup>10)</sup>を用いた潮高計算プログラムを作成し、水質調査時の潮高及び潮位差（調査1時間後の潮高一調査1時間前の潮高）を求めた。

### (2) 解析方法

#### ア 赤潮状態の判定

東京湾では、東京都、千葉県、神奈川県が、各海域における年間の赤潮発生回数や日数を報告している<sup>10)</sup>。表1は、各都県が赤潮の有無を判定する際に目安として用いている項目を示したもので、評価方法は相互に若干異なる<sup>11)</sup>。また、調査頻度や海域の

表1 各自治体における赤潮判定の目安

| 項 目                     | 千葉県                           | 東京都                                                      | 神奈川県                       |
|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------|
| 水色                      | オリーブ色<br>～茶色                  | 茶褐色、黄褐色<br>緑褐色等                                          | 茶褐色、黄褐色<br>緑褐色等<br>通常と異なる色 |
| 透明度                     | ≤ 1.5 m                       | ≤ 1.5 m                                                  | ≤ 2 m                      |
| クロロフィル<br>又は<br>クロロフィルa | ≥ 50 µg/L<br>SCOR/UNESCO<br>法 | ≥ 50 mg/m <sup>3</sup><br>吸光度法及び<br>LORENZEN 法<br>に準ずる方法 | ≥ 50 µg/L<br>蛍光法           |
| 溶存酸素飽和度                 | ≥ 150 %                       | —                                                        | —                          |
| pH                      | ≥ 8.5                         | —                                                        | —                          |
| プランクトン                  | —                             | 顕微鏡下で<br>多数確認                                            | 顕微鏡下で<br>多数確認              |

面積も同じではない。そのため各都県により報告された値から東京湾全域の赤潮発生状況を統一的に評価するのは難しい。更にこれらの集計結果は、それぞれ都県単位での総数であるため、地域的な赤潮発生状況の特徴や変化を把握することができない。

そこで本研究では、表1の赤潮判定で共通に用いられているクロロフィルa濃度（Chl-a ≥ 50mg/m<sup>3</sup>）のみを基準として赤潮の有無を判定し、一定期間の赤潮発生回数から発生率（%）を求め、赤潮発生分布とその推移、各種要因と赤潮発生の関係について解析した。したがって、ここで定義した赤潮は、植物プランクトンによる場合のみが対象で、クロロフィルを持たない動物プランクトンによるものは含まない。

#### イ 平面補間

42地点で得られた赤潮発生率の値をスプライン法により平面補間して、東京湾全域の赤潮発生率の分布図を作成した。スプライン補間には、フリーソフトのGMTを使用した。

#### ウ 赤潮発生条件の解析

1981～2010年度の水質測定データを用いて、東京都内湾の8地点における環境条件（気象・海象や水質）と赤潮発生の有無との関係を単項目ロジスティック回帰分析により解析した。ロジスティック回帰分析では、説明変数（水質等）の値に対する、目的変数（赤潮）の生起確率を予測する手法で、回帰係数のp値から予測の有意性（例えば、水質値の変化が赤潮の発生に関係しているか否か）を、また回帰係数の正負から、正の場合には、説明変数の値が高くなると目的変数の生起確率が高くなり、負の場合には、低くなることが示される。なお、赤潮の発生

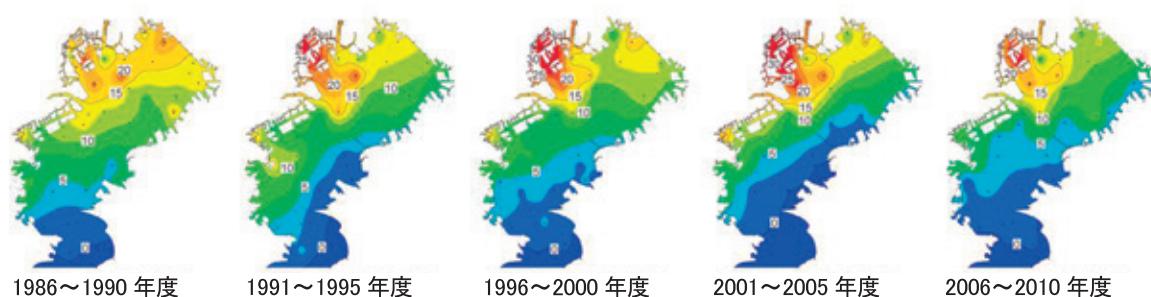


図2 東京湾における赤潮発生率（％）の長期的推移

頻度と環境条件（気象、水質項目）の値は、どちらも変動に季節性があるため、年間のデータをそのまま使用して解析を行うと、多くの項目で赤潮発生との関係が疑似的に認められてしまう。そのため、ここでは暖候期（6～9月）のデータについて解析を行った。ロジスティック回帰分析には、フリーウェアのRを用いた。

### 3 結果と考察

#### (1) 東京湾全域の赤潮発生分布とその推移

図2は、東京湾における5年間毎の赤潮発生率の推移を示したものである。全期間を通じ東京都の沿岸海域の赤潮発生率が他の海域に比べて高いことが特徴として挙げられる。特に中央防波堤内側の海域（図1、図4のSt.5、6、11が位置する海域）は、赤潮発生率が高く、平均的には30%近い値をとっている。一方、東京湾全域の長期的な推移に着目すると、近年になるほど発生率が低い緑から青色の領域が拡大し、全体的には赤潮発生率が低下する傾向が認められ、特に湾の東側（千葉県沿岸）では、赤潮発生率の低い青色で示される海域が経年的に湾口付近から湾奥に向かって北上するような形で拡大する傾向が認められる。東京湾のCODやT-N、T-P濃度の平面分布も同様に、東京湾東岸部で濃度が減少する傾向にあることが報告<sup>5)</sup>されている。このことは、これまで東京湾で実施されてきた総量規制等の対策の効果が次第に顕在化した結果と考えられる。すなわちN、Pの流入負荷量が削減されてN、P濃度が低下した結果、植物プランクトンの増殖が抑制されて赤潮発生率が低下し、海水中の有機物が減少してCOD濃度が低下したと考えられる。

#### (2) 地点のT-P平均濃度と赤潮発生率の関係

前述のように、東京湾では湾口部と湾奥部で赤潮の発生頻度が大きく異なり、それは、地点間の栄養塩の濃度レベルの差によるものと推測される。一方、水質調査時の赤潮発生の有無には、後述のように、気象・海象など、その時点の一時的な要因も関係している。しかし、これら一時的な要因の効果は、長期な平均操作を行うことにより打ち消され、赤潮発生と栄養塩濃度との関係が明確化すると考えられる。

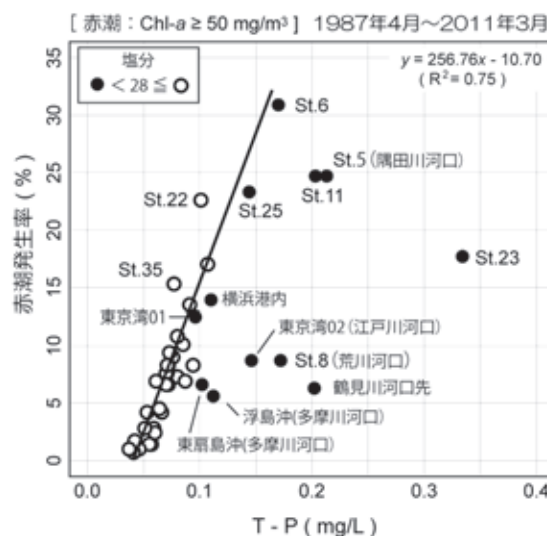


図3 T-Pの平均濃度と赤潮発生率の関係

東京湾内42地点の過去24年間(1987～2010年度)のT-P平均濃度と同一期間の赤潮発生率との関係を図3に示す。また、各地点に対する淡水の影響を示すため、塩分についても同じ期間の平均値を求め、その値により28未満は●、28以上は○に色分けした（外洋水の塩分を35とすると、塩分28の海水には、淡水が20%混合していると考えられる）。図右上に示す○の地点のデータのみを用いて作成した回帰式（y：赤潮発生率、x：T-P平均濃度、図中の直線は

回帰直線)によれば、これら塩分の高い地点では、T-P 濃度と赤潮発生率の間に強い直線関係が認められる。一方、低塩分の●の地点は、全て回帰直線の下側にあり、T-P 濃度に対する赤潮発生率が高塩分の地点に比べて低いことを示している。特に、河川の河口部や大規模下水処理場の放流口近く(St.23、鶴見川河口先)に位置する常に流れがある地点では、その傾向が顕著である。しかし、同様に塩分が低い地点でも、地形的に閉鎖性が高い地点(St.6、横浜港内)や河口から離れた地点(東京湾 01、St.25)では、ほぼ回帰直線上に乗っている。

これらのことから、赤潮発生率は、平均的にはその地点の T-P 濃度で決まるが、河口近くなど常に流れがある地点では、滞留時間が短いために赤潮プランクトンが十分成長する前に流下してしまい、結果として発生が抑制され、T-P 濃度に比べて赤潮発生率が低くなっていると推察される。

なお、T-N 濃度についての解析でも同様な結果が認められたが、ここでは省略する。

### (3) 東京都内湾における赤潮発生条件

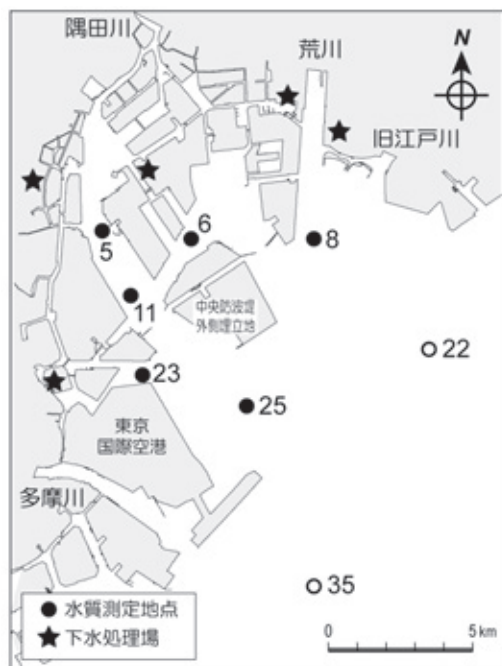


図4 東京都内湾の水質測定地点

前述の(2)では、長期間の平均的な赤潮発生率に関係する条件について解析した結果を示したが、短期的には気象や水質等の環境条件が、調査時の赤潮発生の有無を決定する要因になっていると考えられる。そこで、東京都内湾では、どのような気象・水質等

の条件が赤潮発生に関係しているかについて解析した結果を次に述べる。

表2 東京都内湾各地点の赤潮発生と各要因との関係

| 項目<br>地点 | 雨量 | 塩分 | 潮高 | 潮位<br>差 | 風速<br>(前日) | T-N | T-P |
|----------|----|----|----|---------|------------|-----|-----|
| 5        | △  | ×  | ×  | ×       | ×          | ×   | ○   |
| 6        | ×  | ×  | ×  | ×       | △          | ×   | ●   |
| 8        | ×  | ×  | ●  | ×       | ×          | ×   | ×   |
| 11       | △  | ×  | ×  | ×       | △          | ×   | ○   |
| 22       | ×  | ×  | ×  | ×       | △          | ●   | ●   |
| 23       | △  | ×  | ×  | ×       | △          | ×   | ×   |
| 25       | △  | ×  | ×  | ×       | △          | ×   | ×   |
| 35       | ×  | ×  | ×  | ×       | △          | ●   | ●   |

項目の値が上昇  
→ 赤潮発生率が ○: 上昇 △: 低下  
回帰係数の有意性  
→ 黒:  $p < 0.001$  灰:  $p < 0.01$  白:  $p < 0.05$  ×: 有意でない

表2は、ロジスティック回帰分析により得られた、東京都内湾の各地点(図4)における赤潮発生と各項目との関係を一覧表にまとめたもので、値の増加により赤潮発生率が高くなる項目は○、逆に低くなる項目は△、両者に関係が認められなかった項目は×で示した。また、回帰係数のp値により、最も有意性が高い場合の黒から灰、白の順番に3水準に記号を色分けした。

表2によれば、塩分及び調査前後の潮位差(潮の干満)については、各地点とも赤潮発生率との関係は認められなかった。

調査日前の雨量については、積算日数毎に回帰分析を行い、最も回帰係数の有意性が高かった結果を示した。St.5、St.11、St.23、St.25では、雨量が多いほど赤潮発生率が低下する傾向が認められた。隅田川の流路に位置する St.5、St.11、St.25 や大規模下水処理場の放流先の運河に位置する St.23 は、雨天時に流量が増加しやすく、また赤潮発生率が高いために(図3)、閉鎖性の高い St.6 や晴天時にも流れの影響を強く受けていて赤潮発生率が低い St.8 に比べて降雨の影響が表れやすいと考えられる。

潮高については、St.8 で潮高が大きいほど赤潮発生率が高くなる関係が高い有意性で認められた。図3によれば、St.8 の赤潮発生率はその沖合の St.22



や St.25 に比べて著しく低い。したがって満ち潮時に赤潮状態の沖合の海水が押し寄せてくることや河川水の流れが弱まって滞留時間が増加することなどにより、赤潮発生率が高まると考えられる。

前日の風速については、河口直下の St.5 と St.8 以外の地点で、赤潮発生率を低下させる効果が認められた。風速が強まると、海域では、海水の上下混合が起こり、そのため表層のプランクトン濃度が低下することが原因と推測される。

栄養塩については、濃度が高いほど赤潮発生率が高い傾向を示す地点が認められた。

T-N については、東京都内湾では最も沖合の St.35 と St.22 で赤潮発生との関係に高い有意性が認められたが、その他の地点では、両者に有意な関係は認められなかった。

T-P は、T-N と同様に、St.35 と St.22 で、赤潮発生と濃度との間に有意性の高い関係が認められ、St.6、St.5、St.11 でも有意性は低いが、両者に関係が認められた。しかし、St.8、St.23、St.25 では有意な関係は認められなかった。

このように、栄養塩について地点により有意性に違いが生じる原因を次に検討した。

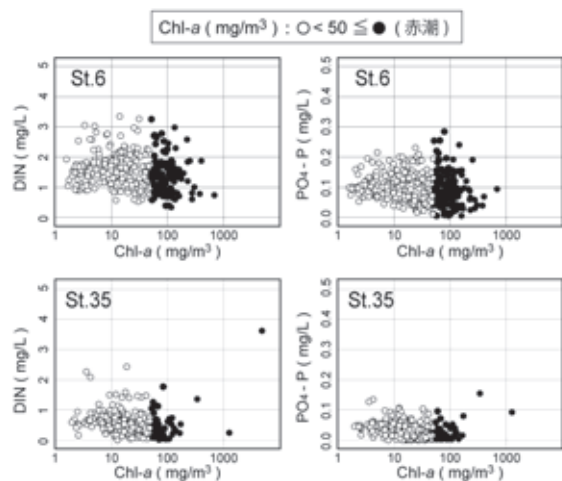


図5 赤潮発生の有無と残存栄養塩濃度

図5は、東京都内湾で最も赤潮発生率の高い St.6 と最も低い St.35 における Chl-a 濃度の対数変換値を横軸、DIN 及び PO<sub>4</sub>-P 濃度を縦軸とする散布図で、赤潮発生時 (Chl-a  $\geq 50\text{mg/m}^3$ ) を●、非発生時を○に色分した。

調査時点における DIN 及び PO<sub>4</sub>-P 濃度は、植物プランクトンが、更に増殖するために利用可能な残存栄養塩濃度を示すと考えられる。DIN 濃度の場合、St.6 では、●の赤潮状態の場合でも値がゼロになっていないのに対して St.35 では、○の赤潮状態でない場合にもゼロになることが起きている。一方、PO<sub>4</sub>-P 濃度の場合には、St.6 でも、●の赤潮状態の場合には値がゼロになることが起き、St.35 では、Chl-a 濃度が DIN の場合よりもさらに低いレベルでもゼロになっていることが分かる。このことから、T-N 及び T-P 濃度と赤潮発生率との関係は、植物プランクトンの増殖に伴う N、P の枯渇状況に関係していると考えられ、これらの結果から、東京都内湾では、全体的には、N に比べて P の方が枯渇しやすいことや、最も沖合に位置する St.22、St.35 では、N、P ともに枯渇しやすい状況にあり、今後更に栄養塩濃度が低下すれば、これらの地点では赤潮の発生率が低下しやすいことが推測される。

#### 4 まとめ

本研究により、以下のことが明らかになった。

- ① 東京湾の東岸寄りの海域では、湾口から湾奥に向けて次第に赤潮発生率が低い海域が拡大する傾向が認められる。
- ② 東京湾内では、東京都の沿岸域の赤潮発生率が周辺海域よりも高く、特に、中央防波堤内側の海域が顕著である。
- ③ 東京湾内各地点の赤潮発生率は、長期的には栄養塩濃度とよく対応するが、河口部近く地点では、流れの影響で、栄養塩濃度に比して赤潮発生率が低い。
- ④ 東京都内湾の赤潮発生条件は、地点により違いがあり、調査前の雨量や風速、調査時の潮高や栄養塩濃度などが関係している。
- ⑤ 東京都内湾では、赤潮発生の制限要因としては N よりも P の場合が多いと考えられる。
- ⑥ 東京都内湾で最も沖合に位置する St.22 と St.35 では、赤潮が発生していない状況でも、N、P が枯渇することが起きており、今後、栄養塩濃度が低下すると、赤潮発生率も比較的容易に低下すると推察される。

今回の報告では、単項目でロジスティック回帰分析を行ったが、今後は、東京湾内の 42 地点について同様な解析を行うとともに、多項目のロジスティック回帰分析を行い、項目相互の関係等についても考慮した検討を行っていききたい。

告書(平成 22 年度), p.46, 2012

#### 参考文献

- 1) 東京湾再生推進会議：東京湾再生のための行動計画（第一期）期末評価報告書（2013）  
[http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TB\\_Renaissance/RenaissanceProject/Handouts/7th/H\\_02.pdf](http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TB_Renaissance/RenaissanceProject/Handouts/7th/H_02.pdf).
- 2) 東京湾再生推進会議：東京湾の水環境の現状（東京湾再生のための行動計画（第一期）期末評価時点）  
[http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TB\\_Renaissance/RenaissanceProject/Handouts/7th/H\\_03.pdf](http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TB_Renaissance/RenaissanceProject/Handouts/7th/H_03.pdf).
- 3) 東京都環境局：公共用水域及び地下水の水質測定結果 総括編, (2003)
- 4) 東京都環境局：東京湾の赤潮と水生生物の調査結果, (2010)
- 5) 安藤晴夫：東京湾の水環境について，平成 21 年度公開研究発表会資料，  
[http://www.tokyokankyo.jp/kankyoken\\_contents/research-meeting/h21-12/2101-tokyobay%20pp.pdf](http://www.tokyokankyo.jp/kankyoken_contents/research-meeting/h21-12/2101-tokyobay%20pp.pdf).
- 6) 東京都環境局：公共用水域水質測定結果，  
[http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/water/tokyo\\_bay/measurements/index.html](http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/water/tokyo_bay/measurements/index.html).
- 7) 千葉県：公共用水域及び地下水の水質測定結果，  
<http://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/kasentou/koukyouyousui/index.html>.
- 8) 神奈川県：公共用水域及び地下水の水質測定結果，  
<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f41010/>.
- 9) 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード  
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>.
- 10) 海上保安庁水路部：書誌 742 号 日本沿岸潮汐調和定数表, (1992)
- 11) 東京湾岸自治体環境保全会議：東京湾水質調査報