

磯焼けの話⑥ 赤潮と青潮は、同じ仕組みで発生する！

～東京湾の青潮発生は海底地形にあり！～

裏方 思考

磯焼けの話から始めた「散歩のみち」も赤潮、青潮の発生の仕組みとやや逸れてきたが、このメカニズムは豊穡の海の条件や地球温暖化に大きな影響を及ぼすと言われる深海流など、海のみならず地球環境にも大いに影響を及ぼしそうなのである。

前回（平成30年3月；151号、磯焼けの話⑤）は東京湾の青潮発生メカニズムとあのやや青みかかった乳濁色が硫黄温泉との類似性について解説を試みた。青潮は東京湾に限らず瀬戸内海、大阪湾、伊勢湾、諫早湾、宍道湖など各地でも発生しており、漁業に大きな被害をもたらす。いずれも富栄養化と密接に関わっているが、底層における溶存酸素の著しい低下が大きな原因であることが報告されている。また、赤潮は植物プランクトンの異常発生が原因であるが、青潮は微生物ではなく、底層から湧き上がった溶存酸素が著しく低い貧酸素水塊に含まれる硫化水素が原因であることが知られている。

ところで、青潮の色は、硫黄温泉のやや青みかかった乳白濁、硫化水素臭が妙に類似していたことから、共通の化学物質である硫黄及び硫化水素に着目してメカニズムについて解説した。青潮発生の原因は、富栄養化が要因の一つではあるが、青潮と赤潮が東京湾の特異的な海底地形に依存していることを紹介します。

1. 青潮・赤潮発生のメカニズムの概要（再掲）

赤潮・青潮の発生メカニズムは、次のようであると紹介した。

赤潮・青潮の発生原因は、いずれも栄養分が過

剰に供給されて海中に存在あるいは沈殿して海底に堆積していることが大きな要因の一つである。とくに、表層水は、溶存酸素濃度が高いので、水温上昇や日射量が強くなると好気性のバクテリアである赤潮が爆発的に発生する。なお、バクテリアが増殖するためには、鉄などの微量必須元素が必要であるとされている。

他方、溶存酸素の低いあるいは無酸素状態の海底では、有機物は嫌気性菌により分解され、有機物中の炭素はメタンに、硫黄分は硫化水素に還元されて海中に溶存する。このような貧酸素水塊となった底層水が、昇流により表層へ移流すると、豊富な酸素と硫化水素が反応して固体の硫黄化合物が生成し、超微粒子（コロイド状）で浮遊する。これに太陽光が反射して青みかかった乳白濁に見えることを紹介した。酸素不足で硫化水素が確実に酸化されない場合には、硫化水素として大気中へ揮散し、硫化水素臭を伴う。その概念図を図1に再掲する。

2. 東京湾の青潮発生と海底地形について

赤潮と青潮の発生メカニズムは類似しているが、それぞれの発生時における底層から昇流する貧酸素水塊の溶存酸素濃度に関する報文は見つけられなかった。その特性と発生メカニズムを比較すると、海底地形が大きな要因であるのではないかとの結論に至る。つまり、海底が比較的平坦な地形では赤潮が、凹型の深い窪地や掘削航路が存在すると青潮発生の要因になると深読みしている。なお、海底からの湧昇が重要な役割を果たすに当たり、当然、地形、気象条件、河川流入などの要因も大

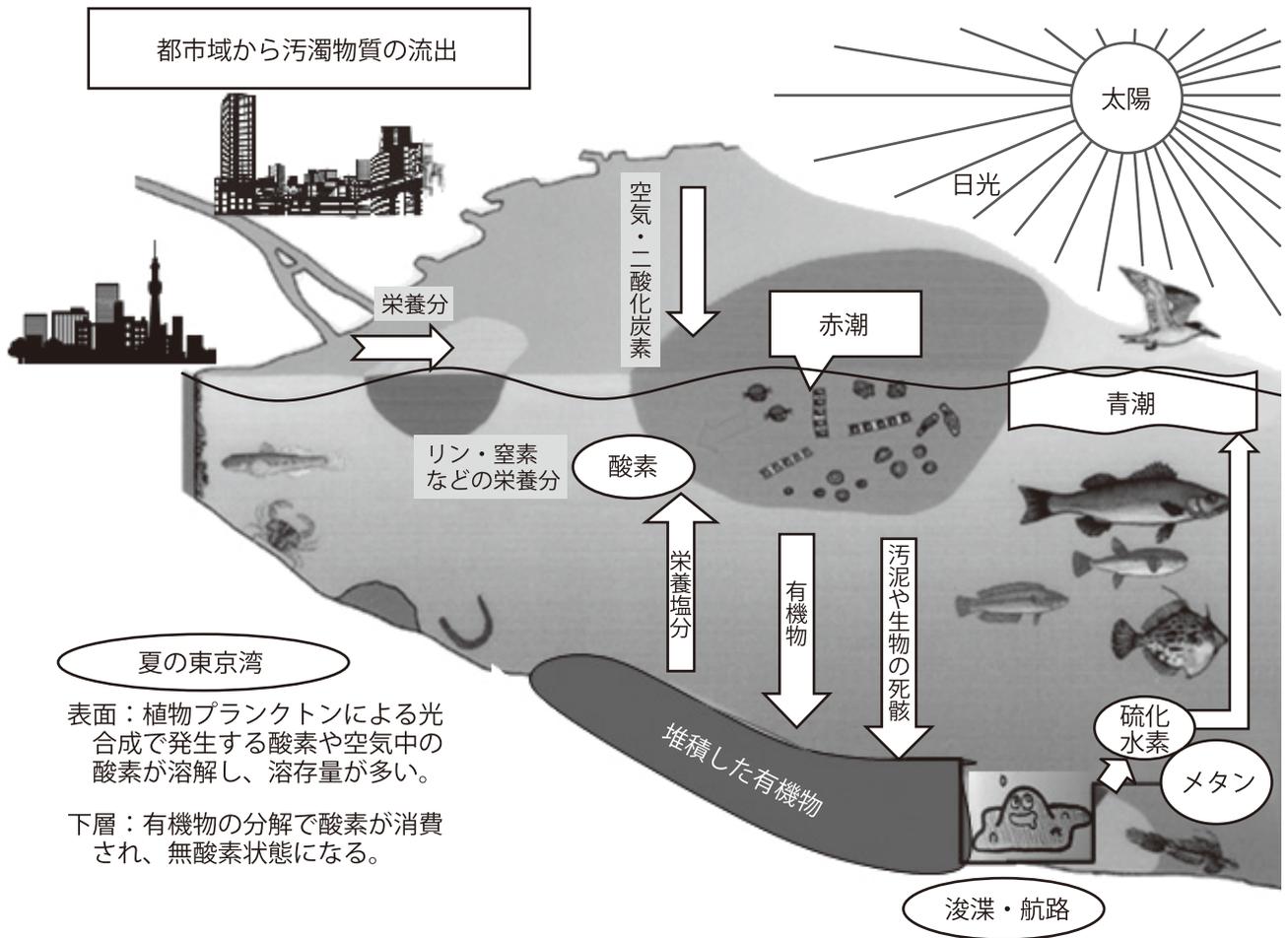


図1 赤潮・青潮発生仕組み¹⁾

いに影響する。

【東京湾の浚渫窪地及び掘削航路について】²⁾

貧酸素水塊を発生させる大きな要因である大規模な浚渫跡地は、東京湾奥部、三河湾、大阪湾や瀬戸内海でも広く分布する。これら浚渫土を採取した跡地は、1ヵ所ヵ所を深く掘り下げて凹状の窪地型と海底の起伏を平坦に均したような平滑型の二つのタイプがある。前者は、堆積物が溜りやすく、海水も滞留しやすいので貧酸素状態になりやすいが、後者は、必ずしも貧酸素水塊は発生しない。

東京湾奥部はまさに凹状の窪地型で掘削されており、かつ大型船の通行に必要な深い航路が設けられており、他の海域よりも赤潮や青潮の発生要件が揃っている。横浜沖には東京湾の入口にあたる浦賀水道と千葉沖に航路等があり、その付近に

は「中ノ瀬」及び「三番瀬」と言われる浅瀬が存在する。

①浦賀水道：図2に示すように東京湾の内湾入口である浦賀水道には、水深が23mの浦賀水

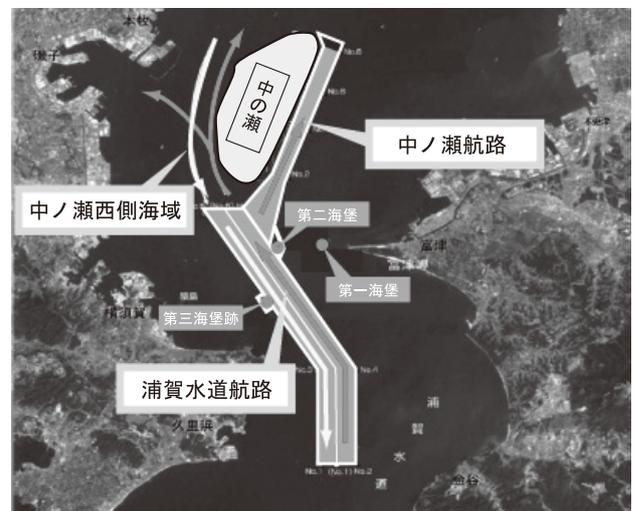


図2 浦賀水道の航路位置図²⁾

道航路と中の瀬航路があり、浅瀬の「中の瀬」を回り込むように迂回する航路である。中の瀬は東京湾入口の中央部南側付近に位置する深度15～20mに盛り上がった浅瀬で、南北に長い楕円形の形状である。一般的に水深が深い場合には湧昇が起りにくいので赤潮や青潮は発生しにくいですが、この深い航路と浅瀬の存在が発生に関わっていると考えられている。

②千葉沖：一方、市川市と船橋市の沖に、図3に示すように「三番瀬」と呼ばれる浅海域（浅瀬や干潟）と2本の航路が設けられている。三番瀬は、水深5m以下の浅瀬が岸から沖合い3～4kmの範囲に広がっていて、その先は急に深くなっている。その面積は、東西

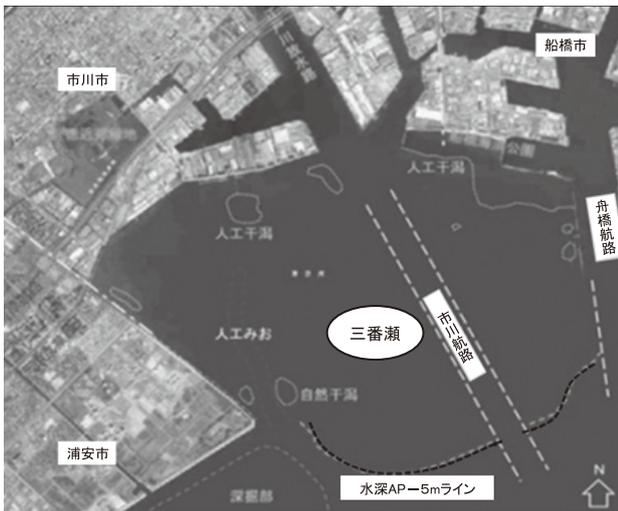


図3 千葉沖の浅瀬と航路の位置図²⁾

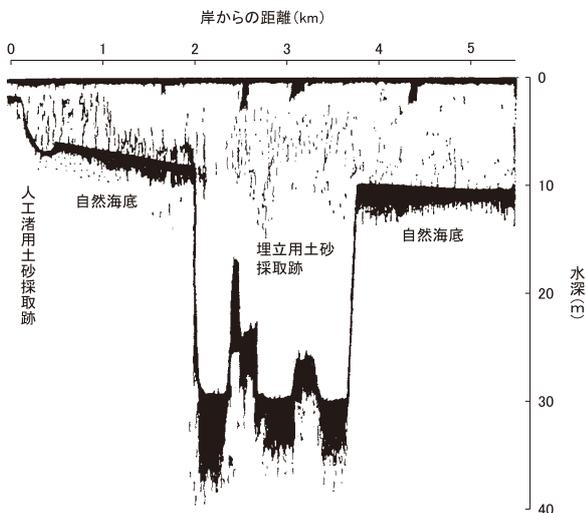


図4 幕張沖の土砂採取窪地 (1990)³⁾

5,700m、南北4,000mの範囲に広がっており、水深1m未満の面積は約1,200ha、水深5mまでの海域を含めると面積は約1,800haに達する。

この浅瀬には、市川航路と舟橋航路が設けられている。市川航路は、三番瀬の中央部を縦断する水深6.5m、幅約200m、長さが約4.6kmの掘下げ水路である。また、三番瀬の東側の縁に舟橋水路が設けられており、水深が12m、幅約300m、長さが10.2kmの掘下げ水路である。すなわち、水深5m程度以下の浅瀬を分割するように深い水路が掘削されている。また、過去に東京湾岸部の埋立用に大規模な浚渫が行われ、1億m³もの土砂が掘削されて窪地となっている。図4に示したように、その水深は30～40mもあり、多くの有機物等が堆積しているものと予想される。

このような深い窪地は、流れが遅いので有機物が堆積しやすいうえ、バクテリアの活動で溶存酸素が消費され、貧酸素水塊ができやすい。つまり、浅瀬に向かって昇流が起ると赤潮や青潮が頻繁に発生する条件が揃っている。

【東京湾奥部の表層と底層の水質の違い】⁴⁾

一般に夏季に水温が高くなると上層から底層への酸素供給が抑制され、かつ、底部に堆積した有機物の分解に伴い溶存酸素量が低下するので、貧酸素化する傾向が見られる。湾内奥部の表層と底層の溶存酸素の分布状況を図5に示した。ラインBの東京都江東区新木場と千葉県袖ヶ浦ライン付近では、表層の溶存酸素は6～10mg/lであるが、底層部では4mg/l以下になり、とくに千葉沖では1mg/l以下の貧酸素水化が顕著である。

ラインB付近の区域の水温、塩化物濃度、化学的酸素要求量(COD)は次のように報告されている。水の密度は温度が高いと小さくなり、軽いので表層に移動し、温度が低いと重いので底層に移動し、表層よりも約7℃程度低くなる。水温が低いほど酸素は溶存しやすいが、表層のように空気

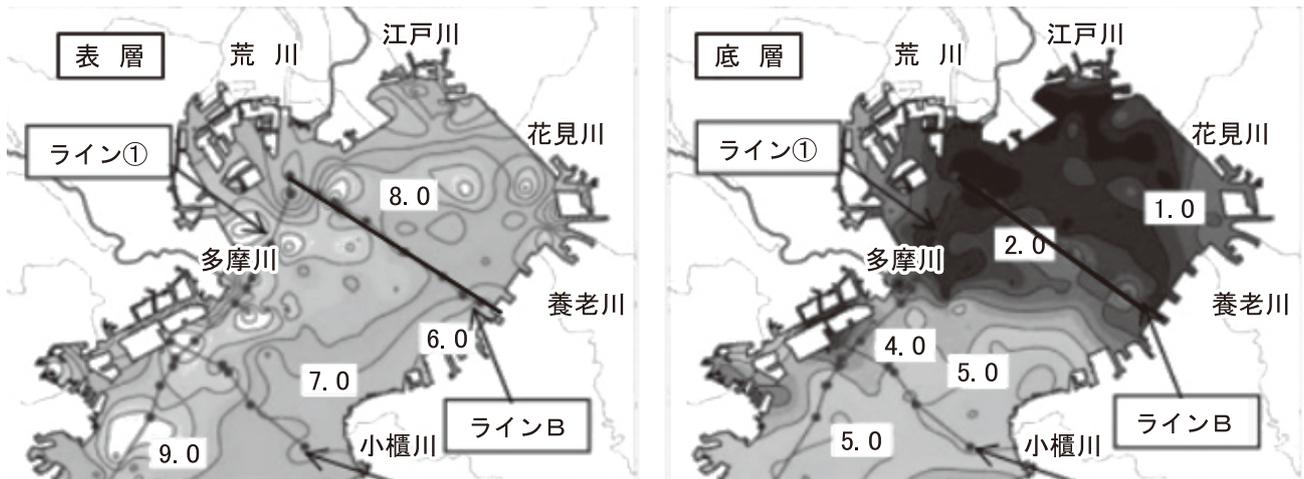


図5 東京湾奥部の表層と底層の溶存酸素濃度分布（平成21年8月）⁴⁾

との接触がないことや有機物が存在するとバクテリアが消費するので低くなる。なお、塩分は水温には影響されないが、塩分の低い大量の河川水が流入するので表層は低くなる。

○水温分布：表層は25～27℃、底層は17～20℃
 でおおよそ7～8℃程度低い

○塩分分布：表層は2.6～2.8‰、底層は3.2‰以上
 でおおよそ0.5‰程度高い

○溶存酸素量：表層は6～8mg/l、底層は1～2mg/l
 でおおよそ6mg/l程度低い

○化学的酸素要求量（COD）：4～6mg/lで湾
 口部よりも高い傾向あり

※湾奥部のCODの環境基準は、A類型、B類
 型、C類型が混在し、沿岸部にC類型が分
 布

※DO：A類型は7.5mg/l以上、B類型は5
 mg/l以上、C類型は2mg/l以上

※COD：A類型は2mg/l以下、B類型は3
 mg/l以下、C類型は8mg/l以下

【溶存酸素の減少と生物への影響】

東京湾は、面積が約960km²、平均水深15mの閉鎖性の内湾である。大都会に囲まれており、大量の有機物が流入し、湾奥には大量の有機性の汚泥が堆積し、湾内の富栄養化や植物プランクトンの増殖の要因となり、水生生物に大きな影響を及ぼしている。

漁業被害は、主に魚類が溶存酸素不足やエラに赤潮が詰まって酸欠でへい死すると言われている。一方、青潮は、急激な貧酸素水塊の襲来で酸欠や硫化水素などによりへい死するが、主に移動ができない貝類に影響が顕著に表れる。青潮は、主に浅瀬の多い千葉県沖合で発生するが、最近では水深の深い横浜方面でも発生している。なお、漁業被害は、単なる赤潮と青潮による被害と思われがちであるが、視界に入らないがそれを引き起こした溶存酸素量が低い貧酸素水塊の湧昇によることもある。

水生生物は、水に溶存した酸素を利用して生存、増殖するので、酸素が低くなると現存量が低下する。東京湾奥部の溶存酸素は、空気に触れる表層水では6～10mg/l程度であるが、底層部は極端に低下する。とくに水温の高い夏場には、対流が起こりにくいので、溶存酸素の供給が難しい。水温が低下すると密度が大きくなるので、沈み込むので下層部との循環が起こるので、貧酸素状態が解消される。

一般的に、表1に示したように溶存酸素量が4mg/l程度から魚介類に影響が始め、それ以下では悪影響があり、2mg/l以下では致死に至り、ゼロでは生存は難しいと言われている。このような条件下では還元反応が促進され、硫化水素の生成反応が急速に起こると予想している。なお、溶存酸素濃度だけでは、どの程度の還元状態であるか

表1 溶存酸素の魚介類へ与える影響

溶存酸素量 (DO)	魚介類へ与える影響
約 4 mg/l	魚類・甲殻類に悪影響
約 2 mg/l	貝類・底生魚類の生存困難
約 0.8mg/l	全ての底生生物の生存困難

判断することは難しい。廃棄物最終処分場では、メタンや硫化水素の発生条件の調査にあたり、酸化還元電位 (ORP) を測定するが、そのような調査結果は見当たらない。

【漁業被害の概略】

東京湾における漁業被害は、1990年代には4万トン以上であったが、2000年代には2万トンに急減し、さらに減少の傾向にある。なお、漁獲量の減少、就業者数の減少が大きな要因であろう。最近の青潮による漁獲量の被害の状況を抜粋した。

- 2010年9月；三番瀬で青潮の影響でアサリ約4,700トンが死滅した。
- 2014年8～9月；千葉県発表によると、東京湾で発生した青潮の影響で、三番瀬のアサリが推計で3,880トン死滅したことを明らかにした。青潮発生前の県の調査では6,110トンのアサリがいたとみられ、全体のおおよそ6割が死滅したことになる。
- 2017年7月；千葉市から船橋市の約15kmの範囲で青潮が発生した。漁業への影響が懸念されているが、被害は確認されていない。

3. 大坂湾における青潮発生について

湾口部が狭く、外海との海水交換が行われにくい海域を閉鎖性海域というが、国内では大小88海域があり、代表的な海域には東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海、有明海がある。これらの閉鎖性海域の多くは背後から生活排水や工場排水が流入する。閉鎖性のために流入する多量の汚濁負荷が蓄積することが海域汚濁の大きな原因となり、現在も赤潮、青潮や貧酸素水塊の発生している。

大阪湾の赤潮発生件数は、最近は年間10から20

件程度で推移しているが、最近では青潮の発生件数のデータはほとんど見当たらない。青潮を引き起こす貧酸素水塊の発生が確認されているので、気象条件により底層水が海面へ昇流すると、発生の可能性は高いと考えられる。

とくに、海底に凹型の深い窪地や掘削航路が存在すると青潮発生の原因となる貧酸素水塊が発生しやすい。この水塊は、嫌気性状態であり、有機物を還元してメタンや硫化水素が発生して海水に溶存する。これが、海底から昇流すると青潮が発生すると考えられる。昇流は、海底地形、気象条件や河川流入などの要因にも大きく影響される。

大阪湾などでも大規模に浚渫が行われており、さらに船舶による物質輸送が増えると、船舶の大型化が進み、深くて大きな航路が必要になる。平成25年10月には主航路は、水深-15m、航路幅400mまで完了しているが、平成38年度頃には、主航路の水深16m化（航路幅560m）が完了する予定であった。なお、航路の浚渫は、水深は比較的浅く、海水が流れやすい平滑型であるので、貧酸素水塊あるいは青潮発生への懸念は小さいと考えられる。

大阪湾においては自然環境の保全に様々な観点から取り組まれている。例えば、人工干潟の整備、藻場の造成、攪拌ブロック礁の設置及び窪地の埋め戻しに取り組んでいる。とくに、海底の窪地は、昭和30年代後半より埋立用の土砂を海底から掘削した際にできたもので、大阪湾に21ヵ所、総容積約3,400万m³が存在する。窪地にはヘドロが溜まり、夏場は貧酸素状態になるため、魚介類が生息できず、有害な青潮発生の一因になっている。

このため、窪地対策として新たな航路浚渫や河川浚渫等の事業で発生する土砂を活用し、埋め戻しを実施している。とくに、図6に示した優先的に埋め戻す3ヵ所を選定し、平成26年度は、阪南2区沖において、大阪港主航路及び堺泉北港天津航路の浚渫土砂を活用して埋め戻しを実施している。優先して埋め戻す窪地の規模と進捗状況（平成26年度末）は表2の通りである。

表2 優先して埋め戻す窪地の規模と進捗状況（平成26年度末）⁵⁾

位置	表面積 (m ²)	週辺海底との水深差 (m)	容積 (万m ³)	埋戻量 (万m ³)	進捗率 (%)
堺2区北泊地	359,850	3.5	124.8	約31	25
阪南2区沖	452,540	5.8	452.7	約275	61
阪南港4区沖	1,870,000	10.5	1351.4	約2	0.1

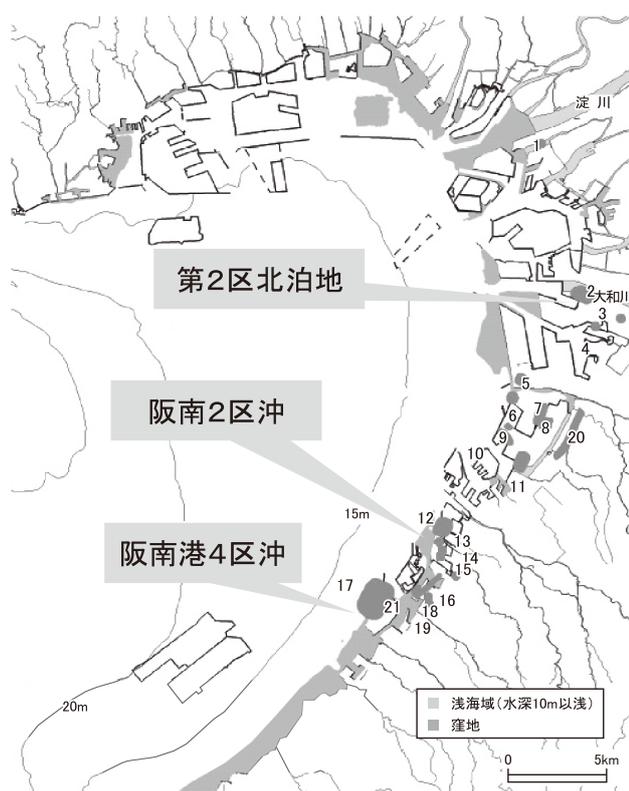


図6 窪地埋め戻しの位置図⁵⁾

おわりに

青潮発生は、海底における窪地や航路などの周辺よりも深い溝に有機物等が沈殿して堆積しやすいこと、および流れが生じ難いので嫌気性になりやすく、溶存酸素がほとんどない、あるいはゼロ

に近い状態であることが大きな要因であることを紹介した。

このような汚濁物質が流入する閉鎖性海域や水域は全国各地にあるので、しばしば赤潮発生が確認され話題になる。また、青潮発生は、海面が乳白濁した青色に染まり、硫化水素臭を伴うのみならず、水生生物、ひいては漁業にも大きな影響があることが知られている。

東京湾については様々な機関で多くの調査が行われているが、他の海域での調査はやや少なく、青潮の調査はとくに少ない。発生件数が少ないためであると推測している。その大きな要因は、東京湾における浚渫や航路は、海底に部分的に深い窪地型の溝があるのに対して、他の海域では平滑型で、海水の移流れが起こりやすいので、有機物の滞留や貧酸素水塊が発生を防いでいるとの報告が多い。

昨年、大阪湾広域環境整備センター「大阪湾海面最終処分場」を視察したおり、大阪湾内に大規模な航路改修計画があることを知った。大阪湾の赤潮や青潮の発生については大きく報道されてはいないが、少し気になったので取り上げてみた。

技術士：衛生工学・環境、建設
環境計画センター 鍵谷 司（かぎやつかさ）

〈引用・参考文献〉

- 1) 東京都環境局、水環境の保全 赤潮発生の仕組みを追加・修正した（筆者）
- 2) 国土交通省関東地方整備局；航路の紹介>浦賀水道航路と中ノ瀬航路（東京湾中央航路）
- 3) 「東京湾の生物誌」（1997、沼田、風呂田編、築地書館）
- 4) 東京湾再生推進会議モニタリング分科会等；東京湾水質一斉調査結果（速報）について（平成21年9月7日）
- 5) 「瀬戸内海の環境の保全に関する大阪府計画（平成20年5月）」資料3；大阪湾の状況及び主な施策の実施状況（大阪府）