

「磯やけ」の話③ 赤潮発生は磯やけ対策のヒントでは！

～鎌倉・湘南海岸で発生した赤潮について！～

裏方 思考

海の大きな環境問題の一つである海藻の消滅やプランクトンの減少を引き起こす「磯やけ」を取り上げてきたが、その正反対の現象である植物プランクトンの爆発的な増殖に伴う赤潮発生が全国紙やテレビで大きく報道された。とくに、平成29年5月にあの湘南海岸で赤潮が発生し、夜になると夜光虫が波間で青白く光り、幻想的な光景が連日報道された。赤潮の発生原因は、富栄養化などが考えられるが、意外に解明されていないのである。「裏方思考」的な発想で原因を探ってみた！

1. 鎌倉・湘南海岸で発生した赤潮について

1. 1 湘南海岸の赤潮発生

【湘南海岸とは！】

湘南海岸は伊豆半島と三浦半島に囲まれた相模湾の奥まった海岸である（図1）。神奈川県茅ヶ崎市から鎌倉市にある海岸で、古くから日本を代表する海水浴場、サーフィンの好ポイントとして全国的に有名である。江の島をはじめ、富士山を中心に左に箱根・伊豆、右に丹沢の山々が見える場所が多く、日本の白砂青松100選にも選ばれてい

る自然景観に優れた有数の景勝地である（写真1）。きれいな海を代表する自然海岸において突如として真っ赤な赤潮が発生し、夜になると夜光虫が青白く輝き、その意外性が社会の関心を引き付けた（写真2）。

「なぜ、白砂青松の自然海岸に赤潮が！」と思いつつ、海藻消滅やプランクトン減少に伴う磯やけ現象と「赤潮発生」はまさに正反対であることが気になる。植物プランクトンの爆発的な異常発生が原因であることは磯やけ対策のヒントが隠されているように思い、その原因について探ってみた。

【基礎知識；プランクトンとは！】

プランクトンとは、水中に浮遊して生活する微小な生物の総称であり、これには植物プランクトンと動物プランクトンがある。植物プランクトンは、水中の二酸化炭素（CO₂）を吸収して太陽光で光合成（炭酸同化作用）を行い、自らの細胞を作り増殖するとともに、陸上の植物と同様に酸素を生成する。つまり、赤潮発生の条件は、水、溶存CO₂、太陽光、栄養分及び好気性微生物なので溶存酸素が必要不可欠である。



図1 湘南海岸の位置図



写真1 湘南海岸と江の島



写真2 湘南海岸で発生した赤潮（ネットより）

微生物の体は主に有機物で作られており、その構成は、炭素（C）を100とすれば、窒素（N）が5、りん（P）が1程度の比率で、これに鉄などの微量元素が必須であり、単に栄養分だけでは赤潮は発生しないと言われている。

通常、海水中のCO₂は、90%以上が炭酸水素イオン（HCO₃⁻）として存在しており、他は炭酸イオン（CO₃²⁻）及び二酸化炭素（CO₂）として存在する。海に吸収されたり、放出されるCO₂量は膨大であり、地球温暖化のカギを握っていると言われている。

【赤潮発生を引き起こす富栄養化とは！】

赤潮は植物プランクトンの大量発生により起こる現象で、水域の状態（閉鎖性、富栄養化、日照、水温等）により発生すると考えられている。具体的には、プランクトンの餌であるBOD（生物化学的酸素要求量）をはじめ、窒素、りんの増加に伴う水域の富栄養化、陸水や降雨による塩分低下等の物理的刺激などの説がある。富栄養化の排出源は田畑の肥料もあるが、鎌倉市の下水処理場である七里ヶ浜浄化センターからの放流水が疑われる。下水処理施設は昭和48年に整備されたもので、最初沈殿と有機物処理（標準活性汚泥法）、砂ろ過、滅菌して七里ヶ浜に放流（日量4.8万トン）されている。有機物成分のBODは除去できても富栄養化の源である窒素やりんの除去率は低く、赤潮発生の原因の一つではあると疑いたくなる。しかし、下水処理水は、常時、海へ放流されているのであり、特定の時期に赤潮が発生しているので、他の発生要因がありそうである。

なお、赤潮はプランクトンであり、水中の酸素を消費するので、溶存酸素が少なくなるあるいは魚のえらをプランクトンで塞いだり、えらが損傷したりして多くの魚が斃死（へいし）するので、漁業に大きな影響を及ぼす。

1. 2 琵琶湖における赤潮発生の教訓

【琵琶湖の赤潮発生について】

ところで、昭和50年代の琵琶湖では、毎年、①5～6月頃になると赤潮が発生していた。京都市

では、明治維新と東京遷都に伴い、人口の減少や産業も衰退したため、上水道、水運、水車の動力を目的とした琵琶湖疏水（そすい）を計画し、1890年（明治23年）に第1疏水が完成した。琵琶湖から取水して日本で初めての水力発電を行い、市電を走らせ、水運や水道水源として利用したことは有名である。琵琶湖で赤潮が発生すると、水道水は独特のカビ臭でまざるのですぐにわかった。その都度、浄水場で活性炭を投入して臭気対策を講じていた。現在は、活性炭でカビ臭を吸着除去し、凝集沈殿や滅菌処理により安全でおいしい水道水が供給されている。

赤潮の原因が、琵琶湖という②閉鎖性水域においてその周辺から流入する有機物を含んだ排水、とくに、③窒素とりんが主原因で④プランクトンが異常増殖するとされた。⑤生活排水は、琵琶湖流域下水道の整備で対応し、工場排水については昭和55年に「窒素・りん処理技術マニュアル」を作成し、処理技術の普及が図られた。私もマニュアル作成並びに県内で処理技術の説明に携わった。当時の技術では窒素除去が難しかったので、主に凝集沈殿で対応できるりん除去に主眼がおかれた。また、主たる排出原因であった「合成洗剤」を回収し、滋賀県内では、りんを含まない石鹸への切り替えが行われた。その後、石鹸は、溶解性が劣



図2 琵琶湖の地形図

るので使い難く、かつ、合成洗剤よりも洗浄力が劣るため無りんの合成洗剤が普及した。

しかしながら、同じ琵琶湖圏内でもより富栄養化が進んでいる水域があるにも関わらず必ずしも赤潮が発生しないなどいくつかの疑問があった。その後、京都大学（故）門田元先生が、⑥溶存鉄が赤潮発生を引き金になるとの研究結果を発表されたと記憶している。なお、現在では、大規模な赤潮の発生はほとんど聞かない。富栄養化対策により栄養塩の減少が功を奏していることも理由であろう。

【湖水の循環（対流）が栄養供給の源！】

ところで、琵琶湖は年に一度、底層水と表層水の循環（対流）が起こり入れ替わる。冬季になると表層の水温が低くなるので、重くなった表層水は沈み込み、やや暖かい底層水が上昇し、対流が起こる。表層水は、酸素が沢山溶けているので底層に酸素を供給し生物に好影響を及ぼす。

一方、底層部には、プランクトン等や動植物の死骸である有機物が沈殿し、溶存酸素の低い嫌気性状態で分解し、豊富な栄養分が蓄積する。しかし、水中の酸素濃度は低いので生物の活動は低い、が、生物の必須元素である鉄分はこのような酸素の少ない状態では溶解性の鉄分に変化する。鉄が十分に存在していても溶解していなければ海藻やプランクトンには吸収されず役に立たない。これら細胞を作る栄養分や必須微量元素が表層に供給されると豊富な栄養分、太陽光、水と溶存CO₂による炭酸同化作用により藻類や植物プランクトンなどが爆発的に増殖すると考えられる。

1. 3 湘南海岸の赤潮発生の原因は！

琵琶湖における赤潮発生の特徴をキーワードで示すと①季節は5～6月頃、②閉鎖性水域、③窒素とりん、④プランクトン、⑦生活排水、⑧溶存性鉄を挙げることができる。

さて、これらのキーワードは湘南海岸の赤潮発生と関係するのであるだろうか？

①鎌倉（湘南海岸）の地形が影響するか？

相模湾は伊豆半島と三浦半島に囲まれた内海を

形成している（図1）。海流（黒潮）は伊豆半島で遮られそれに沿って沿岸流となって流れ込む。湘南海岸は、突き出た三浦半島に囲まれた奥まった湾、いわば半閉鎖性水域を形成する。大陸棚がほとんどなく、急に1,000mを超える深い海底が存在（相模トラフ；船状海盆地形）する。一方、その背後には富士山などの高い山々が配置しているので、積雪が融解して冷たい雪解け水が流入する。冷たい水は重いので沈み込み、海盆地の対流を引き起こし、この深層水には栄養分の他に溶解性鉄分が多いので、これが表層に上昇して赤潮の大発生のきっかけになったと深読みできる！

②なぜ、5月に発生したか？

背後の山々からの雪解け水は、3月頃から流入しはじめると考えられるが、雪解け量が少ないので海水表層の水温低下による対流を起こすまでに至らない。また、海水温が上昇する夏には、表層水の水温低下が小さいので対流も小規模になろう。つまり、雪解けによる冷たい水の量、海面の水温により対流の規模が決まり、ちょうど5月頃が最も大きな循環が起きるのではないかと考えるとつじつまが合うが！

なお、冬季の寒い時期に寒波が襲来すると海面が冷却されるので、小さな規模で対流は起こるのであろうが、空気による冷却能力は小さいので、大きな効果はなかろう。まして、伊豆付近は温暖地帯であるため寒波も長続きしないので、効果は限定的であろう。

③赤潮は沿岸部の浅瀬で起るのでは！

赤潮発生のもう一つの共通点として、発生場所が沿岸部の浅瀬が多いイメージがある。浅瀬と言えば、砂浜に押し寄せる白波や岩礁の波しぶきが思い浮かぶ。これらはいずれもべた凧や大波と比べて空気との接触面積が大きくなるので、空気中の酸素がたくさん溶ける。また、後背地から栄養分や溶存酸素を含む河川水が大量に海岸部へ流入する。微生物にとって必須である溶存酸素の供給に欠かせない条件ではないかと直感する。

赤潮は好気性微生物である様々な種類のプランクトンが大増殖し、その結果、海水中の溶存酸素



写真3 湘南海岸に押し寄せる白波

が消費されるので低酸素状態になり、魚が斃死する一原因であると言われている。つまり、赤潮自身も溶存酸素が不足すれば斃死するのであり、栄養が十分にあっても大増殖はできないことになる。ここで、水温と飽和酸素量（酸素が溶け込む最大量）の相関を調べると図3に示すように、水温が上がるにしたがって水に溶ける酸素量は少なくなる。図3は、最大の酸素の溶存量（飽和溶存濃度）を示したものであり、実際の酸素溶存量は6 (mg/l) 程度であり、最大量の約6割程度より溶けていない。

一方、溶存CO₂、水と太陽光による炭酸同化作用により植物プランクトンは大増殖するとともに酸素を生成する。海水中に溶けた酸素がプランクトンにより消費される。しかし、海面表層では溶

存酸素が存在すると増殖するが、太陽光が届き難い水中では増殖は抑制される。さらに、太陽が沈んだ夜間には光合成しないので、増殖は止まり、酸素の発生も止まる。が、プランクトンは生きていたのでその呼吸により酸素が消費される。新たな溶存酸素の多い海水が流れ込まないと水中の酸素濃度が低下して死滅し、減少することになる。

④相模湾の后背地の役割は！

相模湾の后背地である丹沢は、神奈川県西北部に位置する標高1,500m前後の山々からなる。相模湾には、丹沢山系の山々や山中湖を水源とする富士山北麓の水を集めながら多くの河川が流れ込む（図1）。代表的な河川は、富士山麓を源流とする相模川と酒匂川（さかわがわ）という二つの大きな河川がある。

閉鎖性水域の対流（循環）が起こすのは、寒い冬により海面が冷やされて水温が低下し、重くなって沈降するあるいは冷たい雪解け水が湾内に流入するためであると想定される。后背地の高い山々の雪解け水の流入、しかも5月頃になると暖かくなるので融解量も多く、水量も豊富になると推測できる。なお、雪解け水は、后背地に広がる裾野の森の栄養分を含みながら湾内に流入するので、赤潮発生の栄養分及び溶存酸素の補給源でもある。さらに、森林の腐食物質には、溶解性鉄分を含むので好漁場を形成しうると考えられる。

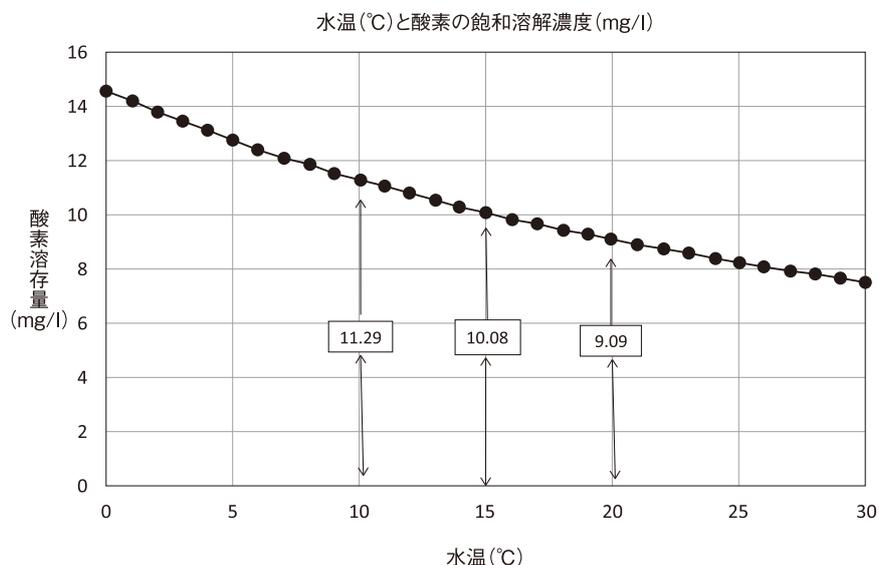


図3 水温と酸素溶存量の相関

【波消しテトラの影響は！】

「散歩のみち」第1回では、海藻が枯れて魚介類が激減する磯やけ現象に注目し、アルカリ剤であるセメントを原料として製造されたコンクリート構造物、テトラポットが大きな原因ではないかとの危惧を述べた。さて、かなり飛躍した発想であるが、磯やけした沿岸部では、赤潮が発生しないのではないかと直感している。磯やけは栄養分やミネラル不足等が海藻の消滅の大きな原因の一つである。他方、赤潮は、瀬戸内海、伊勢湾、東京湾をはじめ多くの閉鎖性水域で富栄養化により発生すると言われている。このような内海では、外海の影響を直接受けないので、高潮や津波対策など防災上の大がかりなコンクリート構造物は概して少ない。一方、外海に面した日本海沿岸部では、コンクリート製の波消しテトラポット等は高潮や津波対策として膨大に海に投入されている。

仮にコンクリートが磯やけの大きな原因の一つであるならば、逆に赤潮の発生は抑制される可能性が高いのではないか？ つまり、赤潮発生の際にアルカリ剤であるセメントや消石灰を散布すれば、赤潮の増殖は抑制されることになるが？ 新たに赤潮が発生しないとしても既存の赤潮は残存するのですぐには消えそうにない。

おわりに

相模湾の奥に位置する湘南海岸における赤潮発生のメカニズムは解明されていない。ここは伊豆半島と三浦半島に囲まれた内海を形成しており、大陸棚がほとんどなく急に1,000mを超える深い海

底（相模トラフ；舟形海盆地形）が存在する。その背後地は、富士山及び1,500mを超える丹沢山系があり、雪解け時期になると冷たい雪解け水が豊富に流入する。冷たい水は重いので沈み込み、海盆地の対流を引き起こし、栄養豊富で溶解性鉄を含んだ深層水が海面へ上昇し、太陽光エネルギーや溶存CO₂などで光合成し、赤潮の大発生を引き起こしたと推測した。

湘南海岸は、海水浴場として全国的にも有名であり、波消しブロックが海中に沈められている様子はない。溶解性鉄を沈殿させるアルカリ剤（コンクリート）は、藻場やプランクトンの発生の障害となりうるが、逆に「赤潮が発生しにくい」と考えが成り立つ。

ところで、半閉鎖性海域である東京湾では、毎年、赤潮が40件程度、青潮が数件程度発生しているとの報告がある。ここは、相模湾とはまったく地形条件、気象条件、海流条件、栄養塩（水質）供給条件などが大きく異なる。しかも海水温が上昇する7月に発生することは赤潮発生のメカニズムも異なることを示唆する。

一般的には赤潮発生の条件は、プランクトンの増殖に必須である栄養塩、光合成に必要な強い太陽光、増殖しやすい高い水温が必須であるが、裏方思想的には、底層の栄養塩や鉄類がプランクトンの爆発的な発生の引き金になると想定しており、ほとんどの現象を合理的に説明できる。次回、東京湾で問題になっている赤潮、青潮の発生メカニズムを探ってみる。



写真4 コンクリート製テトラポットと赤潮発生の相関性とは！