

磯焼けの話⑤ 東京湾の青潮発生の仕組みについて

～青潮と硫黄温泉は同じ原理で着色する！～

裏方 思考

前回（平成29年12月；環境施設150号、磯焼けの話④）は東京湾の赤潮発生メカニズムについて解説を試みたが、今回は、青潮に焦点を当ててみた。青潮は東京湾に限らず瀬戸内海、大坂湾、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（ひんさんそすいかい）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、青潮の写真をみると、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る。温泉の源は地熱であり、特に活火山付近に多くの硫黄温泉が分布する。青潮は、微生物による色ではなく、微生物活動により酸素が消費され、嫌気性状態になったため海中の硫酸イオンが還元されて硫化水素が生成するためである。

硫黄泉と青潮の類似性を比較しながら青みかかった乳白濁が発色する仕組みについて解説するとともに、富栄養化が要因となって発生する青潮と赤潮の発生の仕組みについて調べてみました。

1. 東京湾の赤潮および青潮の発生状況

これまで湘南海岸や東京湾における赤潮発生を取り上げたが、その発生メカニズムはいくつかの条件が揃った場合に植物プランクトンが異常発生するためであることを紹介した。その条件とは、基本的には栄養分、日射量、水温であるが、爆発

的に赤潮が発生するためには「引き金」が必要であり、水中に溶存した鉄類等の微量必須元素の存在が必要であることを紹介した。

ところで、東京湾では、赤潮よりも発生件数は少ないが、青潮がしばしば大きな漁業被害を引き起こすことで問題になっている。図1に平成元年から赤潮と青潮の年間発生回数の推移を示した。なお、発生回数のほかに発生日数で表すこともある。また、その定義も東京都独自の基準があるなど、必ずしも他の海域で発生する判定基準と違うことにも留意する必要がある。

赤潮の発生件数は、年によりバラツキが見られるものの、昭和54年～平成4年までは概ね年40回前後で推移していた。平成5年以降は、目視等による観測態勢が充実したこともあり、発生回数が急増し、平成15年までは概ね年40～60回程度が確認されている。長期的にはやや減少傾向にあるが、平成17年以降は年26～37回程度で推移している。

一方、青潮の確認件数は、赤潮と比較してバラツキも小さく、昭和60年までは年10回前後であったものが、昭和61年以降は年6回程度に減少し、平成7年以降は、さらに年3回前後まで減少している。長期的な減少傾向にあるものの、現在は2～6回でほぼ横ばいである。

2. 硫黄温泉の青い乳白濁色について！

【色と光の話】

私は、これまで温度により色が変わるサーモカラー、エチレングスを400気圧の高圧下に封じ込め紫外線を照射してポリエチレンを生成する実験

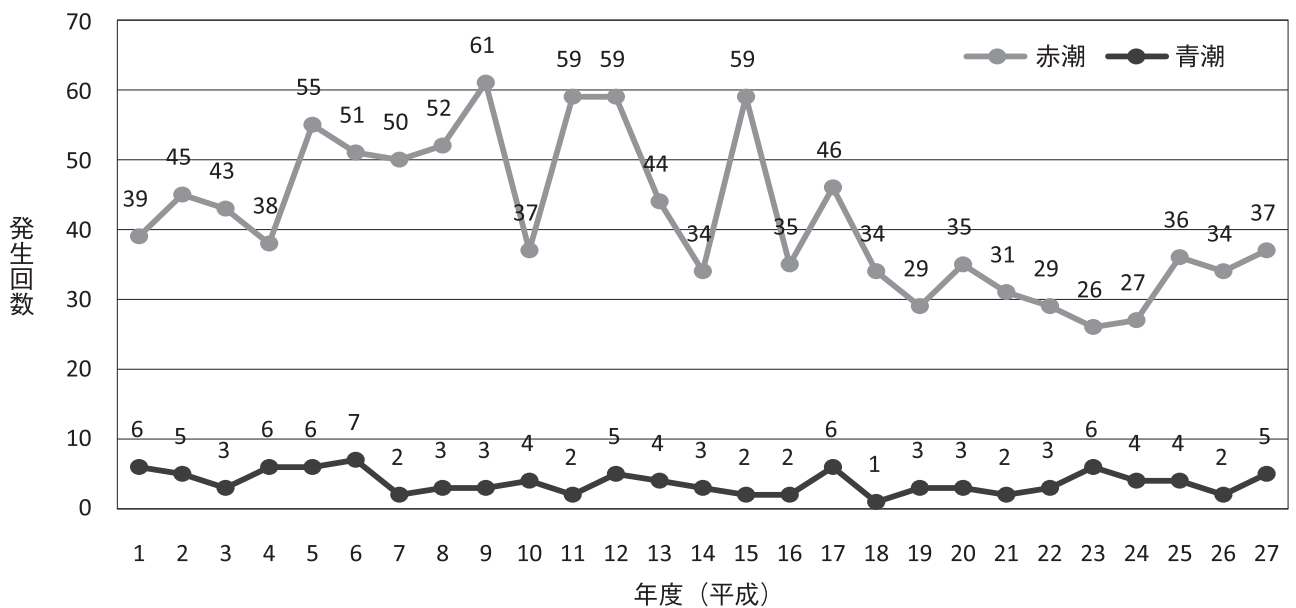


図1 東京湾の赤潮と青潮の発生回数の推移¹⁾

あるいは赤外線スペクトルによる構造解析などの経験があるので、まず色について説明します。青潮の写真を見ると、すぐに硫黄温泉のやや青みかった乳濁した光景が思い浮かぶ。硫酸酸性の硫黄泉は乳白色あるいは青白く、中性の場合は緑色に着色し、少し粒子が大きくなると白濁して見えることがある。これは硫黄などの微細粒子（コロイド）による光の散乱と係わりあるためである。

ところで、太陽光のうち、目に見える可視光は、波長が380nm～780nmの範囲の光である。図2に光の波長と色の関係を示した。波長の短いものは紫から青色に、波長の長いものは赤色に、すべての光が混じると白色に見える。仮に温泉中に青色の波長の光だけを散乱させる粒子があれば、他の光は吸収や透過して青色の波長の光だけが目に入っているためである。また、すべての波長の光を散乱させる大きな粒子が存在すれば白色に見える。美しい森の緑は、緑以外の波長が吸収され、この色の波長が散乱されて目に入るのであり、葉が緑の波長を吸収しているのではないのである。

ところで、赤色よりも長い波長の光（電磁波）は赤外線であり、物体を暖める。波長が長くなると分子や粒子等に散乱されにくいので遠方まで到達する。一方、紫色よりも短い波長は紫外線であり、波長が短いと散乱されやすく、透過力は小さ

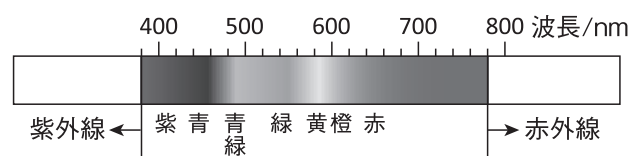


図2 光の波長と色の関係

いが、エネルギーが大きいので生物に大きな影響を及ぼす。夕日が赤いのは、真上の太陽よりも沈む太陽と地球の距離が長くなることや波長の短い光が空気や水分、チリなどで散乱され、長い波長の赤い光が届くためなのである。

【皆既月食は赤かった！】

平成30年1月31日に皆既月食があり、赤い月が観測された。白い月が次第に欠けてすっぽりと地球の裏側に入ったときに赤い月が変わった。図3に示したように、太陽光の光は地球の大気でわずかに屈折するので地球を回り込んで月を照らす。いつもなら地球に邪魔されないで太陽光が月に届き、すべての波長の光が反射されて地球に届くので白く見える。が、月食では、地球の大気を通過して月に届く過程で、地球の大気で波長の短い青色は散乱されてしまい、大気層を通過した波長の長い赤や褐色の波長が月に届き、反射されて地球

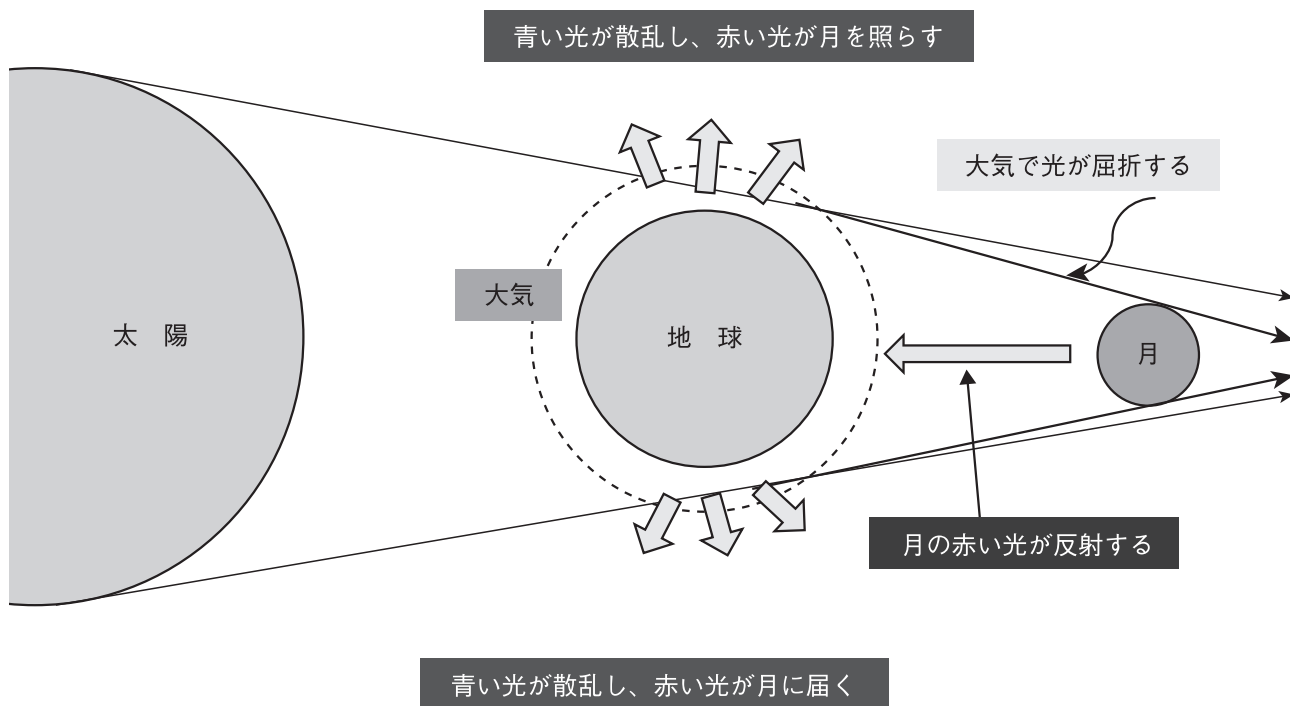


図3 皆既月食の原理と赤い月

にいる我々の眼に入るので赤く見えたのである。

なお、大気に厚い雲がかかると光が月に届かなくなるので、暗く、黒っぽく見えるはずである。

【乳白濁の温泉の色】

ところで、自然界には硫黄が豊富に存在しているが、通常は鉱物としてあるいは地下水に溶けて硫酸イオン、火山性ガスなど大気中には硫黄酸化物や硫化水素として存在する。

鉱物の硫黄分は硫酸塩や硫化物として存在するが、酸素のない地中深くでは地熱に温められると還元されて硫化水素に変化する。これが岩盤の亀裂から地表へ上昇し、地下水に溶ける。地中から湧き出したばかりでは無色透明であるが、空気と触れると乳白色へと変化する。温泉の成分として含まれる硫化水素が空気中の酸素によって酸化されて水に溶けにくい硫黄が生成し、写真1に示すように硫黄のコロイドが青色に見え、カルシウムなどの微粒子によって太陽光が散乱し、すべての波長の光が目に入ると白色に見えるなど様々な色を示す。

一方、ガス状で噴出した場合には、硫化水素は地表で空気中の酸素と反応して酸化され、亜硫酸



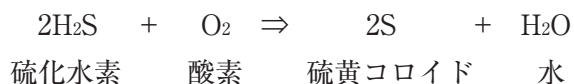
写真1 硫黄泉の青みかかった乳白濁



写真2 小笠原諸島の硫黄山（本当は真黄色）

ガスや硫黄となる。硫黄の融点は約390℃、沸点は約450℃なので、大気温度の岩肌に触れると、写真2に示したように結露と同じ原理で黄色の硫黄が固体として析出する。

固体の硫黄が生成される化学反応式は次のようであり、温泉の成分として含まれるイオンやその他の物質によって光が吸収されたり、コロイド粒子という非常に小さな粒子が存在することにより光が散乱するなどして様々な色を呈したりする。



3. 青潮の元となる硫化水素の生成メカニズム

【赤潮と青潮の色について】

赤潮は、赤く呈色しているが、赤潮を引き起こす植物プランクトン（微生物）に色素として緑色のクロロフィルのほかにトマトやニンジンに含まれる種々のカロテノイドを含む。このため、細胞がオレンジ色や赤色を呈するので赤く見える。つまり、海水中の窒素やリンなどの栄養分が豊富になり、水温や光などの条件が整うと植物プランクトンは爆発的に増殖し、真っ赤に見える。

一方、青潮は、海底など溶存酸素の極端に低い所では、海水中に含まれている硫酸イオンが還元されて硫化水素に変化し、海水に溶存する。この海水が溶存酸素の豊富な海面に上昇すると、上述した化学反応により硫化水素は酸素と反応して硫黄を生成する。これが非常に小さな微粒子状（コ

ロイド）の硫黄粒子として表流水に浮遊し、光を散乱して乳白濁や青色などに変色する現象なのである。写真3は、昨年千葉沖で大発生した青潮である。白黒写真なので、分かり難いが、よく似た色なのである。

【青潮発生の元となる硫酸イオンについて！】

青潮は、海水が青白く白濁すること、DO（溶存酸素量）が極端に低く、ときどき硫化水素臭を伴うことが大きな特徴である。海水には酸素がおおよそ6～10mg/ℓ程度溶けているので、多くの生物はこの酸素を利用して有機物を酸化分解してエネルギーを取得し、生存・増殖している。しかし、青潮が発生するような海域の底層には、生物の餌である有機物が豊富に堆積しているが、ほぼ無酸素あるいはそれに近い状態にある。このような条件下では酸素を必要とする好気性の微生物は生存することができない。

しかしながら、このような無酸素の状態においても嫌気性菌は、溶存酸素を用いずに有機物中の酸素分子を活用してメタンを生成し、エネルギーを取得して活動・増殖する。また、硫酸還元菌は、海水中に高濃度に含まれている硫酸イオン（約2,600mg/ℓ）から酸素を奪って硫化水素に還元する過程でエネルギーを取得して活動する。その過程で硫化水素が生成し、海水に溶存する。

海底から表層へ昇流が起これば表層の溶存酸素の多い海水に触れると硫化水素は酸化されて硫黄が生成する。これは固体であり、微粒子の状態では表層を漂うと太陽光を散乱して白から青色に乳濁する。当然、溶存する硫化水素濃度が高いあるいは表層水の溶存酸素が少ない場合には、すべての硫化水素を硫黄に変えられないので、一部、硫化水素が大気中へ揮散し、硫黄泉のような、卵が腐った時の臭いが問題になることもある。

【青潮・赤潮発生のメカニズムとは！】

図4に赤潮と青潮の発生の仕組みを示した。箇条書きで示すと次のようになる。

①主に都会から微生物の餌となる有機物が湾内に



写真3 千葉市沖で発生した乳白色の青潮
(2017年6月19日)²⁾

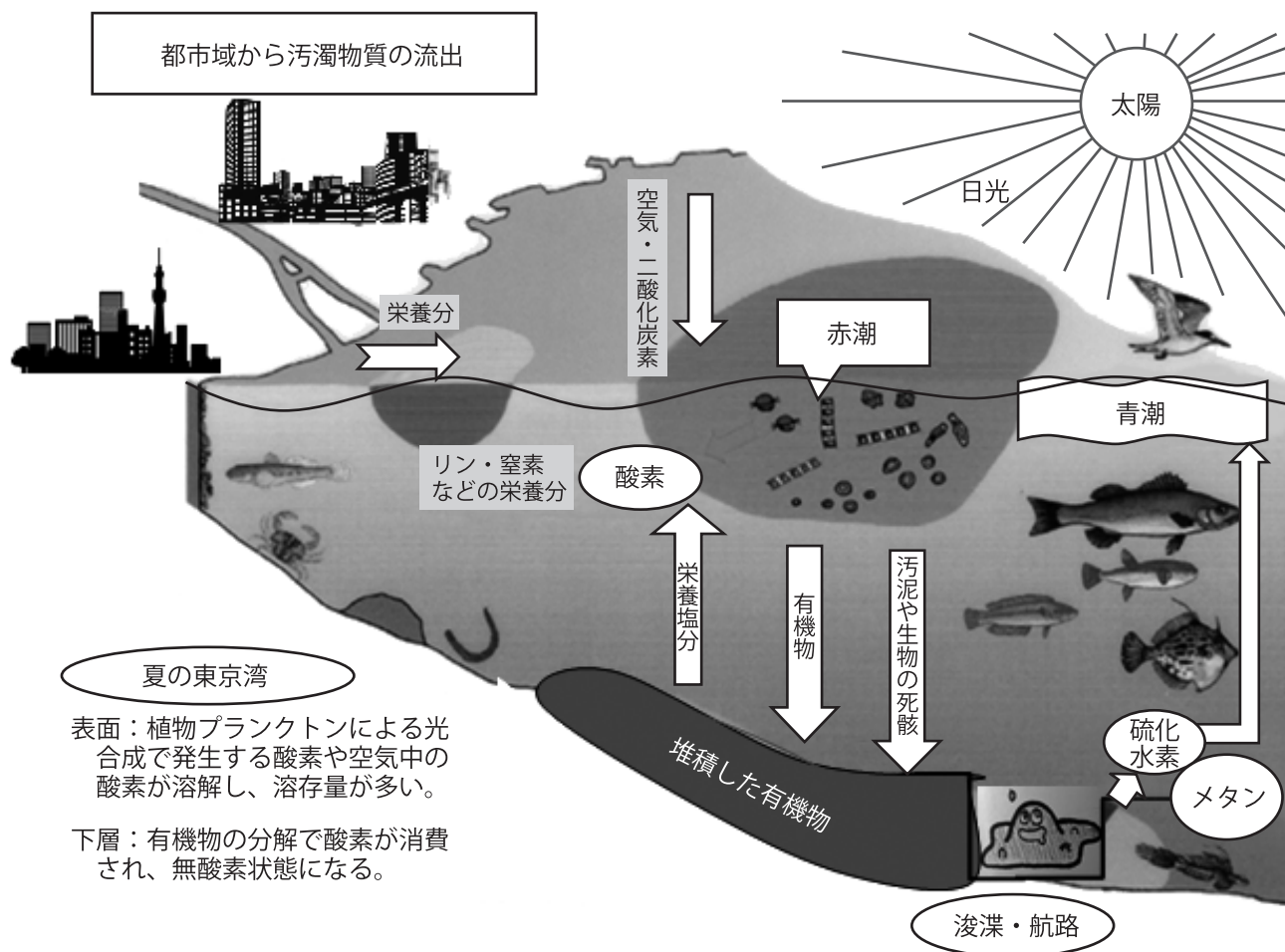


図4 赤潮・青潮発生の仕組み（一部追記した）³⁾

流入し、分解しきれずに底部に堆積する。また、爆発的に発生した植物プランクトンや貝類の死骸なども有機物の供給源である。

②海底には、有機物が沈殿しており、バクテリアが活動して酸素を消費するので海水の溶存酸素が低くなる。こうなると、好気性微生物は生存できなくなる。

③海底では、溶存酸素がないあるいは低酸素の嫌気性状態になると次のことが起こる。

- 堆積した有機物が嫌気性菌により分解され、メタンや硫化水素を生成し、海中に溶ける。
- 溶存酸素の多い表層部では、鉄などの重金属類は酸化物なので、水に溶けにくいので海底に沈殿する。酸素の無い嫌気状態では還元されて溶解性の鉄類に化学変化して溶ける。
- 海水に豊富に存在する硫酸イオンは硫酸還元菌により硫化水素になり、海水に溶ける。

④強い離岸風（陸から海方向への風）が吹くと表層水が沖へ流れ、逆に海底の溶存酸素がほとんどない貧酸素水塊が浅瀬に湧き上る。表層水には空気中から酸素が溶け込んでいるので溶存酸素が多い。その結果、赤潮あるいは青潮の発生を引き起こす。

• 赤潮：十分な栄養分と溶解した鉄分等が海底から表層へ湧き上がると、水温が高く、日射量が強いと植物プランクトンが爆発的に発生する。赤潮の発生である。海底でも若干の溶存酸素が残っている状態で昇流した場合は赤潮が発生しやすいと考えられる。

• 青潮：溶存酸素がほとんどない貧酸素状態では、嫌気性菌により有機物が分解され、より一層無酸素状態になる。このため、硫黄分は還元されて硫化水素になり、海水に溶存しているため、昇流により表層水の溶存酸素と反

応して固体の硫黄を生成する。硫黄は海水に溶け難いので、海水中に漂っている粒子に太陽光があたると、散乱して青あるいは白濁して見える。とくに、浚渫窪地や航路窪地は、海水の流れがなく滞留しやすいので、有機物の腐敗に伴う貧酸素水塊が生成しやすいと考えられる。

赤潮・青潮の発生メカニズムは、いずれも栄養分が過剰に供給されて海底に沈殿・堆積し、嫌気性菌により分解し、一層、無酸素状態になり、還元反応が起こり易い。栄養分や溶解した鉄類等が湧き上がると赤潮が、無酸素状態で溶存した硫化水素が湧き上がると青潮が発生すると考えられる。

なお、冬季においても栄養分は常に供給されるが、水温が低いと重くなるため表流水が沈むので上下流が生じ、溶存酸素を底部へと運ぶ、あるいは海が荒れたり、風が強い場合には、海水がかき混ぜられて貧酸素状態にはなりにくいと推測される。また、日射も弱いので、植物プランクトンの発生は見込めない。寒い冬季に施肥しても植物は生育しないのに似ている。

おわりに

東京湾奥の千葉沖の青潮発生について調査した結果をまとめた。前回紹介した赤潮と青潮とはほとんど同じメカニズムで発生することにやや驚いた。海底部に溶存酸素がやや多い場合には、栄養分や重金属類の湧昇により赤潮が発生し、溶存酸素が極端に低い場合には、硫化水素やメタンが発生し、湧昇により表層の酸素と触れると酸化されて硫黄粒子になり、青くあるいは白濁して見えることを解説した。これは、ちょうど、硫黄温泉で良く見られるやや青みかかった乳白濁の生成原理と同じ仕組みであることに気付いた。

また、気温の低い冬季においては、たとえ豊富に栄養が供給されても水温が低いことや日射量が少ないので赤潮も青潮も発生しない。とくに、寒い冬は海水温度が低下し、密度が大きくなるので、表層から下層へ沈降して溶存酸素を運搬することも大きな理由である。

ということは、地球温暖化により寒い冬がなくなると、海水の上下循環がなくなるので、赤潮や青潮の発生が季節を問わず頻発することを意味する。これにより漁業に大きな影響を及ぼすことが容易に想定される。

今回は、東京湾では、他の海域よりも赤潮や青潮の発生頻度が高いようなので、その要因について調べてみる。瀬戸内海や伊勢湾などにおいても、沿岸部の都市化が進んでいるので、都市域からの栄養分は豊富に流入しているのであり、富栄養化以外に赤潮あるいは青潮を発生させる重要なキーがあるはずであり、これをターゲットに切り込んでみたい。

ところで、寒い冬は、陸上では、病原菌や害虫の卵の越冬を阻害し、高い山には積雪が多くなる。これは水を貯水するので、水不足はなくなり、たぶん農作物は豊作になると予想される。また、海や湖沼では、水循環が起こり、底層部の栄養分などが表層へ供給され、「海の米」ともいわれる植物プランクトンが切れ目なく増殖することになるので豊漁が期待できる。

このように厳しく寒い冬は、陸地にも海にも大きな富をもたらすと期待でき、貴重なのである。この厳しい冬の重要性に思いを巡らし、寒波による事故や災害がないことを願いつつ、比叡山を眺めながらストレッチに明け暮れている。

技術士：衛生工学・環境、建設
環境計画センター 鍵谷 司

〈参考文献〉

- 1) 東京都環境情報センター、東京湾を取り巻く環境、赤潮・青潮より
- 2) 東京湾岸 赤潮 千葉、带状に15km；毎日新聞（2017.6.19）
- 3) 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）