

磯焼けの話④ 東京湾の赤潮発生について

～湘南海岸の赤潮発生メカニズムとの違いとは！～

裏方 思考

磯焼けの話から少々逸脱するが、磯やけの反対が、海の栄養過多が引き起こす植物性プランクトンの異常発生、つまり赤潮発生であると考えられるので取り上げてみた。

今年（平成29年）のゴールデンウィークに鎌倉の湘南海岸において赤潮が発生すると、マスコミがこぞって連日報道した。あの美しい江の島海岸で赤潮が発生することが珍しくもあり、しかも、夜光虫が多かったので、夜になると白波が幻想的な光の帯になり、一層インパクトが大きく、ニュース性が否が応にも高まったのであろう（本誌149号で紹介）。

ところで、湘南海岸の隣の東京湾は三浦半島と房総半島に囲まれた閉鎖性水域であるが、赤潮は発生しないのであろうか？ 調べてみると、東京湾の赤潮は毎年発生しているので珍しいことではなく、ニュースにもならない。東京湾における環境調査は、潮流、水質・水温・塩分濃度等、海水交換や風況など、各分野ごとにかなり詳細に行われている。しかし、それぞれの調査、研究分野に特化されている傾向にあり、赤潮発生のメカニズムにまで科学的に言及した論文や調査報告書は見当たらない。

そこで、これまでの磯焼け、琵琶湖や湘南海岸の赤潮発生のメカニズム、豊穡な海の条件に共通したキーワードをリストアップし、裏方思考的な発想で東京湾の赤潮発生のメカニズムを推測してみた。なお、筆者は、海洋や水環境の専門家でもないし、調査・研究も行っていない。都合の良いデータを組み合わせている可能性もある。が、磯焼け、豊饒の海、赤潮発生を同じメカニズムで合

理的に説明できることに真実性があり、単なる思い付きではない。化学反応の反応式を組み立てるときによく言われる「化学学者、見てきたようなウソを言い！」に類似しているかも！

1. 東京湾と琵琶湖の概要について

東京湾の赤潮発生を検討するにあたり、海水の流れに影響を及ぼす地形が大きな要因になるので、同じ規模の閉鎖性水域の琵琶湖の事例と比較してその要因を探ってみた。表1に東京湾と琵琶湖の概要を比較して示した。

1. 1 東京湾の概要

東京湾は、図1に示すように千葉県、東京都、神奈川県に面しており、関東平野と神奈川県三浦半島と千葉県房総半島に囲まれた南北約50km、東西約20kmの長方形の湾である。通常、三浦半島の観音崎と房総半島の富津岬を結んだ線の北側を内湾、三浦半島釧崎と房総半島洲崎を結んだ線より北側を外湾と称する。湾奥西岸部からは都会の下水処理水や河川水が絶えず大量に流入し、浦賀水道が湾口となり太平洋へと流出するが、湾口が狭いので外海との海水の交換は行われ難い。

また、図2に東京湾の等水深線を示したように、千葉県側および湾奥は、水深20m未満の浅い海である。東京湾（内湾）の面積は琵琶湖の1.5倍近くあるが、容積は琵琶湖の半分強しかない。入り口が狭くて奥行きが深く、しかも浅い海である。このため、内湾の海水は外洋との交換が少ないので、一旦、水質が汚染されると容易には改善しない。つまり、下水処理水等栄養分の豊富な流入水が多

表1 東京湾と琵琶湖の比較

比較項目	東京湾	琵琶湖	東京湾／琵琶湖
面 積	約1,380km ² 内湾：922km ² 外湾：458km ²	約674km ² 北湖：619km ² 南湖：55km ²	2.05倍 約1.5倍 —
容 積	約621億m ³	約275億m ³	2.26倍
長 さ	約70km	約63.5km	1.1倍
幅	約7～20km	約1.35～22.8km	—
沿岸線延長	約1,650km	約235km	約7倍
最大水深	約700m	約104m	約7倍
平均水深	外湾：約46m 内湾：約15m	北湖：約43m 南湖：約4m	ほぼ同じ 約3.8倍

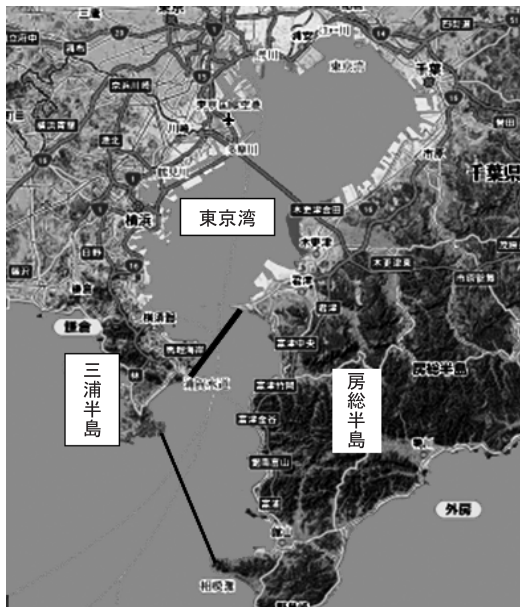


図1 東京湾の内湾と外湾

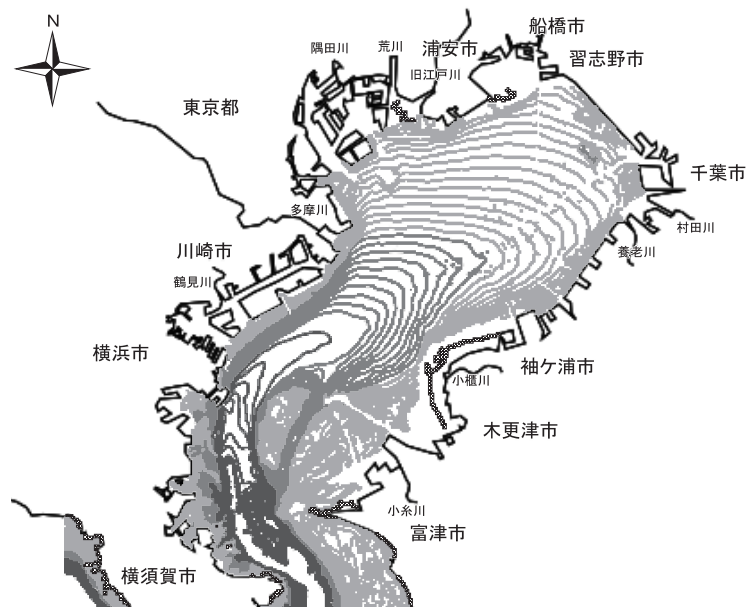


図2 東京湾の等水深線

いので、プランクトンの異常発生である赤潮が発生し易い条件を満たしている。

一方、外湾部は、陸から離れた沖の海底が急激に深くなっており、水深500m以上に達する東京湾海底谷が相模トラフに合流する。この海底谷には河川を通じて東京湾に流れ込んだ有機物が沈殿しており、栄養が豊富な深海環境が形成されている。そのためメガマウスやミツクリザメなど世界的に希少な深海魚が捕獲されることがある。

この栄養豊富な深海水や底層水が昇流すれば、表層に栄養が豊富に供給されるので、赤潮発生の要因になるのではないかと深読みしている。

※相模トラフ：日本海溝から相模湾に至る全長約250km、水深約1,000mの舟状海盆地形で、フィリピン海プレートの北東端に該当し、斜めの衝突様式を持つプレート境界。

1. 2 琵琶湖の概要

東京湾の概要をイメージするには、京都に住んでいるのでどうしても赤潮が社会問題になった琵琶湖と対比したくなる。なお、琵琶湖の赤潮問題については、すでに「環境施設」(磯焼けの話②～豊穡な海の条件とは！～；No.148、pp.76 (2017.6))で紹介した通りである。

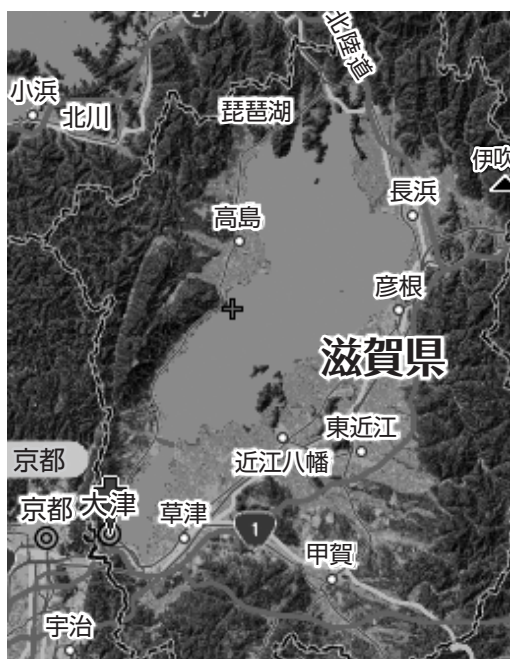


図3 琵琶湖の地形図

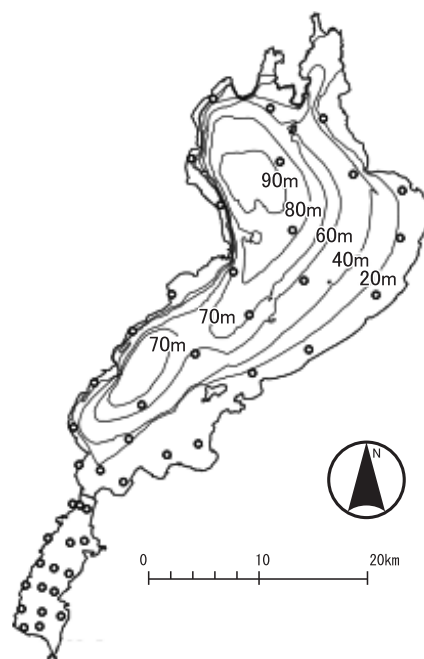


図4 琵琶湖の等水深線の事例

京都は、明治時代に琵琶湖疏水（水路）を完成させ、京都市の上水源になるとともに、その高低差（湖面標高84.4m、高度差36m）を利用して蹴上に水力発電所を設置し、日本で初めて市電を走らせたことで有名である。琵琶湖は、近畿の水瓶であり、現在でも滋賀県をはじめ京都府、大阪府、兵庫県などの京阪神地域に生活用水、農業用水、工業用水を供給し、京阪神1,400万人の人々の暮らしと経済を支えている（図3、図4）。

琵琶湖は閉鎖性水域であり、琵琶湖周辺が都市化や工場が立地するようになると生活排水や工場排水により富栄養化が進んだ。昭和50年代には赤潮が発生し、京都市の水道水がカビ臭く、多くの苦情とともに、健康不安が拡大した。赤潮発生防止対策として浄水場における浄化対策、下水道整備や工場排水のりん除去、りんを含む合成洗剤の使用禁止などの対応が図られた。しかし、湖水が富栄養化していても必ずしも赤潮が発生することはなかった。その引き金は、冷たい雪解け水が湖底に沈みこむ湖水の循環及び底部に堆積した栄養分や溶存した鉄分が上昇し、赤潮発生の引き金になると想定していることを紹介した。

最も重要なポイントは、雪解け水のような比重の重い水が流入することがない東京湾において、

どのようなメカニズムで栄養豊富な底層水が日射の強い表層に移流するかを解明することにある。

2. 東京湾の赤潮発生について

2.1 赤潮の発生状況について

東京湾には、植物の栄養となる窒素やりんを豊富に含んだ河川水等が常に流入している。春から秋にかけて日照時間が長くなり、気温が上昇すると海水中の植物プランクトンや、それを捕食する動物プランクトンが増殖する。プランクトンが異常に繁殖すると海水が濁り、赤潮が発生する。

東京湾の赤潮の確認件数（発生件数）は、図5に示したように年により変動するものの、平成15年までは概ね年40～60回程度であったが、平成21年以降は概ね年30回以下程度とやや減少傾向となっている。いずれにしても東京都内湾では赤潮の発生が慢性化しており、特に夏場は赤潮発生が定常化している。なお、赤潮発生件数は、東京都の判断基準で算定したものであり、プランクトンの量を測定したものではないので、栄養塩からどの程度のプランクトン量が発生し、この有機物がどのように消費されるかなどの収支については不明である。

東京湾における赤潮発生には次の特徴があり、発生メカニズムを検討する上で重要な事象である。

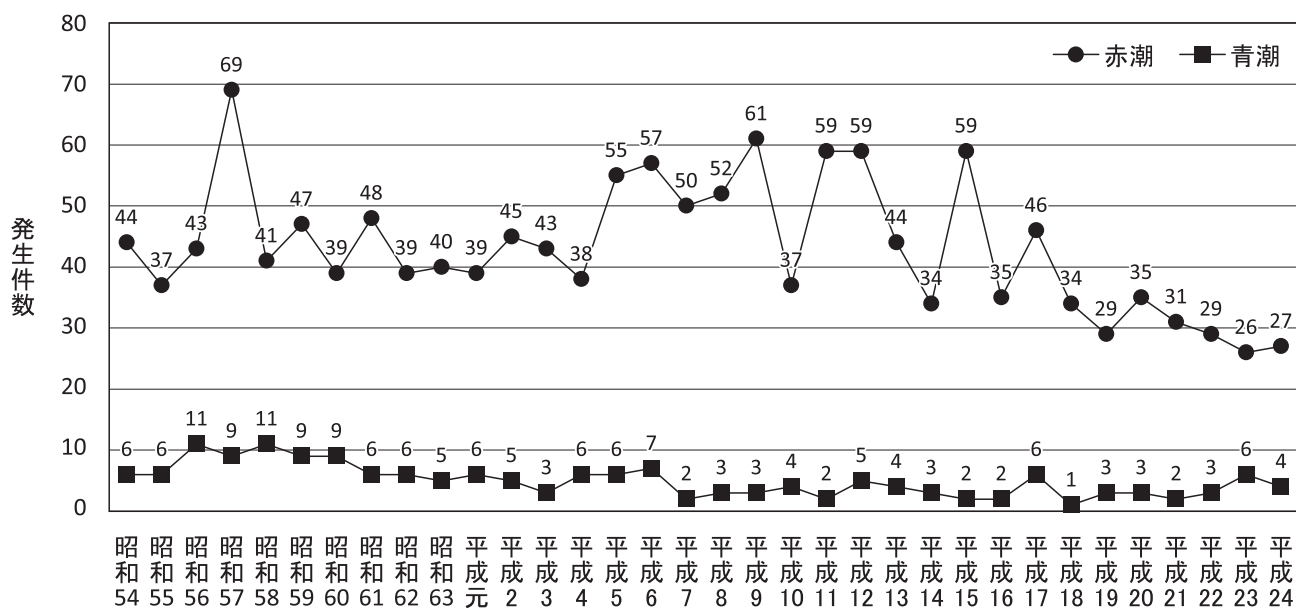


図5 東京湾の赤潮と青潮の発生件数の推移
(東京都環境局資料より)

- 植物プランクトンが光合成をするため溶存酸素が多い。が、夜間は光合成ができないので溶存酸素が消費される。
- 発生時期は6月に集中、水温が20℃前後を超えるとときに藻類が異常繁殖する。
- 降雨後に水温が上昇して好適温度になる。

2. 2 赤潮の発生条件について

栄養塩、光及び水温の変動に対する植物プランクトン生産量については図6の報告がある¹⁾。栄養塩は河川や下水処理水の流入により絶え間なく供給されているので、爆発的な植物プランクトン

の発生は、日射量が多く、水温が20℃以上の6月くらいが多そうである。図7に示したように月別平均水温が20℃以上は5月頃から9月頃までであり、数か月にわたって発生することを示唆する。つまり、栄養塩が多くても光強度や水温が低い条件では発生が抑制され、むしろ水温が律速になっていることを示す。なお、水温が上昇すると、図8に示すように海水が膨張して軽くなるので表層を流れやすい。一方、水温の上昇により気体である二酸化炭素や酸素の溶存量が低下するなど、植物プランクトンの爆発的な発生に複雑に影響するものと考えられる。

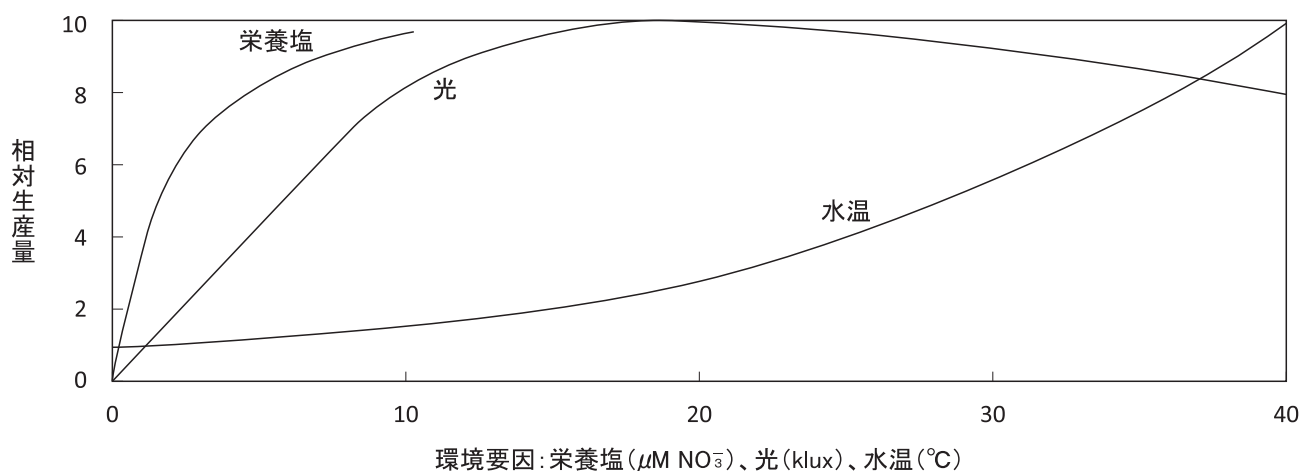


図6 水温、光、栄養塩と植物プランクトン生産量の応答

3. 赤潮発生メカニズムについて

3. 1 内湾における赤潮発生メカニズムについて

ところで、栄養塩、光及び水温の変動に対する植物プランクトンの生産量の応答を図6に示したが、この条件を満たしていても必ずしも赤潮は発生しない。これまでの事例や文献調査に基づくと「赤潮発生は鉄類等の金属類が異常発生の引き金である」と言われている。表層水では溶存酸素が多いので酸化鉄となり沈殿しやすい。また、酸化鉄は不溶性なのでプランクトンには取り込まれ難く、ほとんど沈殿してしまう。しかし、溶存酸素の少ない底層部の環境下では沈殿した不溶性鉄分が還元されて溶解性の二価鉄に変化する。また、栄養分も底層に沈殿して堆積することが分かっており、栄養分の供給源になりうる。なお、底層部では、栄養分、鉄分が豊富に存在しても十分に光が届かない、水温が低い、嫌気性であるので溶存酸素も十分でない、好気性の植物プランクトンの発生は難しい。

その結果、底層部の溶解鉄や栄養分の多い底層水が対流あるいは潮の流れで表層に移流（昇流）した場合には爆発的に植物プランクトンが発生し、これが動物プランクトンなど魚の餌が豊富に供給され、豊穡な海を形成することはすでに述べた通りである。昇流の条件は、地形、気象条件、潮流、海水温、塩分など多くの要因が赤潮発生メカニズムを構成していると考えられている。

これらのキーワードを裏方思考的な視点から俯瞰すると、東京湾には冷たい雪解け水が流入するとは考え難いし、外海の深層部（相模トラフ）の塩分濃度の高い重い親潮が行き止まりの湾内に突き進むとは考え難い。しかし、東京湾に特有な潮流を引き起こすメカニズムも存在する。東京湾の大きな特徴は、①比較的狭く湾奥部は浅く、しかも行き止まりである、②定常的に河川水や下水処理水などの海水よりも軽い淡水が主に湾奥部から流入している、③強い風により表層水が湾奥部あるいは湾口部に押し流されると底層の流れにも影響することであろう。

3. 2 底層水の昇流メカニズムについて³⁾

このような特性から底層水が上昇する主たるメカニズムとしては次の二通りが想定される。

(1) 淡水と海水の比重差による底層水の循環（重力循環）について

東京湾は、閉鎖性の高い湾であるので、夏季には表層の海水は温められやすく、水温が高い傾向がある。表層水温は20～27℃程度であり、湾奥西部で高く、湾中央から湾口にかけて低い。表層から底層までの温度差は約9～10℃であり、水深が深くなるほど低くなることが分かっている。図8に水の温度と比重の関係、図9に塩分と比重の関係を示した。日射が強くなると表層の水温が上昇して一層軽くなる。一方、底層は水温が低いこと

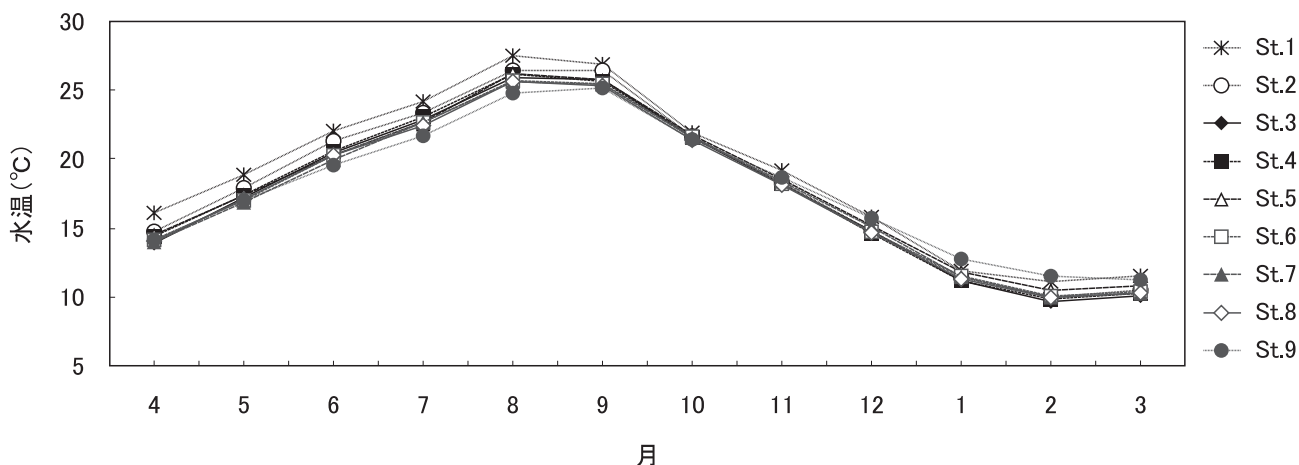


図7 東京湾西岸域における上層水温の季節変化²⁾
(1985年4月～2005年3月の20年間平均)

や塩分濃度が高いので重い。これでは対流（水の循環）は起こり難い。

さらに、定常的に軽い河川水等の淡水が東京湾に流入しており、西岸の多摩川、隅田川や荒川からの河川水（淡水）は東岸（千葉沖）に向かって流出する。河口部周辺では塩分濃度が低く、東岸沖で高くなる。また、塩分濃度は淡水が流出する表層ほど低く、深くなるに従って高くなる傾向がある。表層付近の塩分濃度は1.5～3.2%程度であり、河川が流入する湾奥部よりも塩分濃度が高い黒潮が流入する湾口部ほど高い傾向にある。

図9に示したように淡水は塩分を含まないので比重が小さく、表層部を流れる。また、夏季には水温が上昇すると図8に示したように比重が小さくなり、表流水として大きな流れが生じる。それとともに図10に示すように底層部では逆流して湾

奥部へと湧昇し、バランスを保つ。水温が20℃以上になると底層水の逆流により還元性の底層水が昇流し、表層水に栄養分や溶解性鉄分を供給するメカニズムが考えられる。

（2）風による底層水の循環（吹送流循環）について

東京湾は、湾奥部が行き止まりであり、強い風により表流水の吹送流が起こると、図11に示したように底層水は逆流する。北風では、湾奥部から湾口部へ表流水の吹送流が起こり、その底層水は逆に湾口部から湾内へと移流して湧昇が生じる。一方、南風では、湾口部から湾奥部へ吹送流が起こり、逆に底層水は湾内から湾口部へと移流する（図10）³⁾。

つまり北風の方が、底層水の湧昇が起こりやすいが、北風は秋から冬にかけておこるので、日射

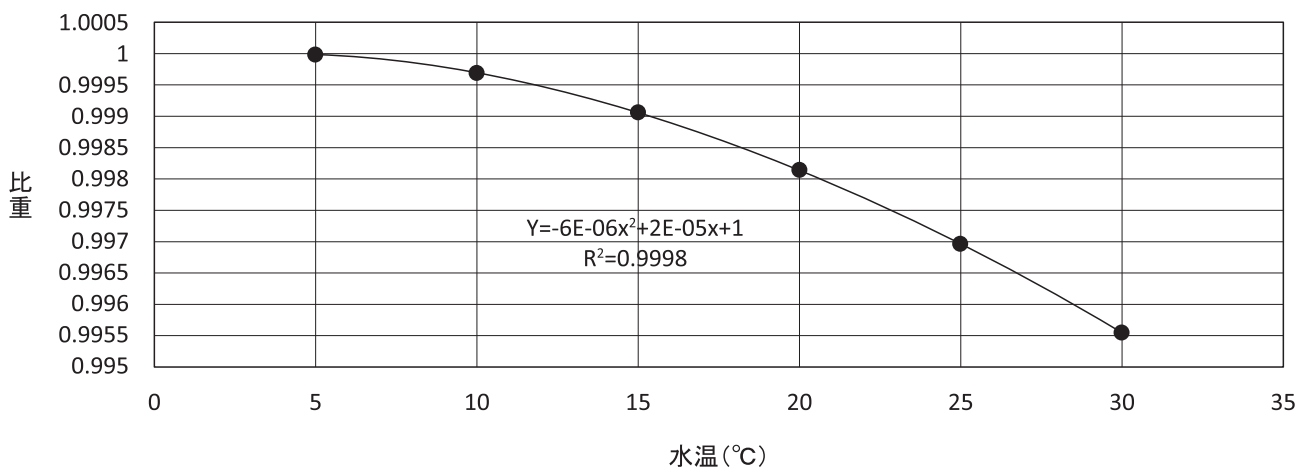


図8 水の温度と比重の関係

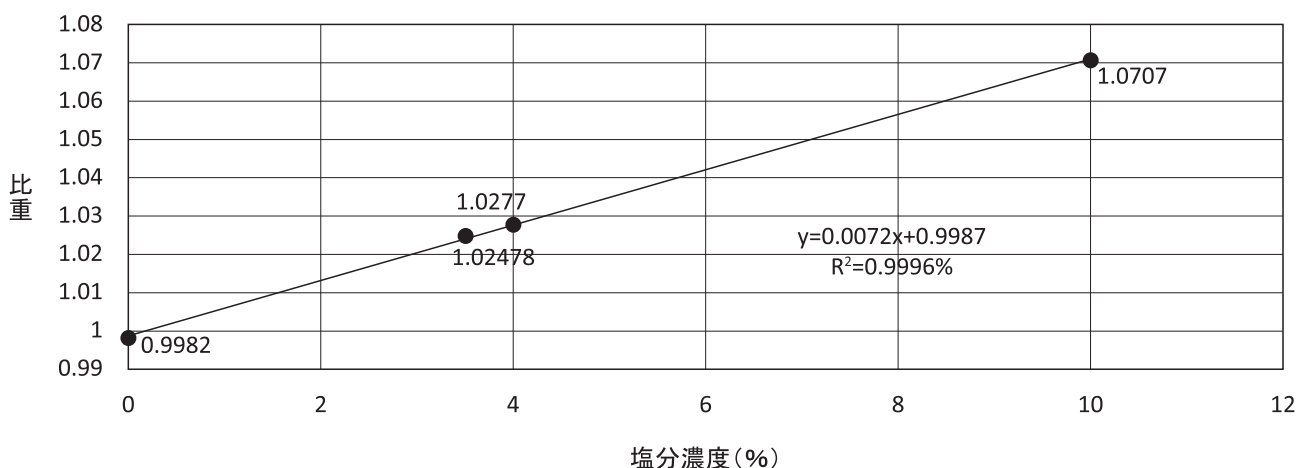


図9 塩分濃度 (%) と比重の関係

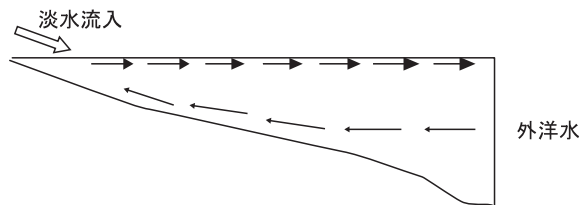


図10 重力循環の模式図

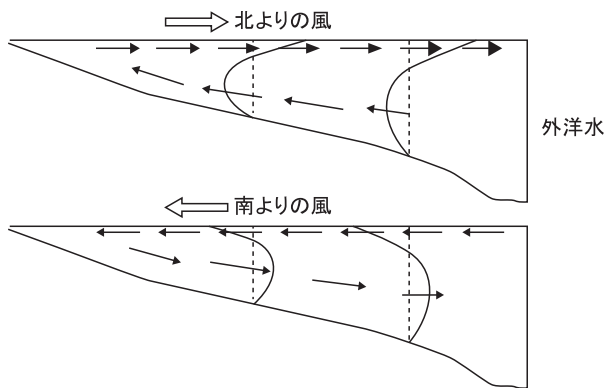


図11 風による循環（吹送流循環）の模式図

量も少なく、水温も低いので、赤潮発生は起こり難いであろう。むしろ、春から夏にかけて台風や低気圧の通過など気圧配置により北風が強い気象条件では赤潮発生条件が整うことになる。

このように東京湾における赤潮発生は、その閉鎖性ゆえに淡水と塩水の比重差による重力循環及び風により表層水の吹送流により底層水が逆流して湧昇を引き起こす2つのメカニズムが考えられる。

おわりに

これまでに強い関心を寄せてきた海藻が枯れる「磯やけ」あるいは「豊かな海の条件」について思いを巡らすうちに、海の生態系の変化を説明する上で重要なキーワードは、栄養分、水温、光強度が揃うことが基本ではあるが、植物プランクトンの発生には、溶存鉄などの微量物質の存在が必要

不可欠であることを指摘した。なお、海水の溶存鉄のデータは見当たらない。鉄分はごく微量である上に、海水中には塩分や各種の塩類が高濃度で含まれているので分析が難しい。鉄以外の溶存した二価重金属類（亜鉛等）やビタミン類も引き金になりうると思っている。

その供給源は、栄養塩や溶存鉄分の豊富な底層水が表層へ移流することが共通の条件であり、これには潮流、海底地形、半島の存在、後背地の高山&積雪、栄養分の供給源などすべての環境と関わっていることを痛感する。

東京湾の赤潮についても「底層水の昇流である」ことを想定してメカニズムを構築してみた。東京湾についてはさすがに、水質、水温、塩分をはじめ多くの測定データが豊富に蓄積されており、ヒントとなる底層水の昇流についても、比重の違いによる重力循環や風による底層水の吹送循環に関する研究、調査が行われていた。

しかしながら、これらの測定データと赤潮や青潮発生の関連を結びつけるような研究は見当たらない。環境は広範な要因から構成されているので、このような測定データは貴重ではあるが、赤潮発生のメカニズムを科学的に解明しなければ、効果的な赤潮防止を実践することは期待できないのでは！ このメカニズムを地球規模で拡大解釈すると地球を一周するのに2000年を要すると言われる深海流の気象あるいは生態系に重大な影響を及ぼすことを示唆しており、いずれ注目を浴びることになるのでは？

今回は、珍しい「青潮発生」に焦点を当てて思考してみたい。

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) 谷口旭；水温、光強度、栄養塩（硝酸態窒素）の変動に対する植物プランクトン生産量の応答、化学と生物、Vol.21、No.9、pp.602-606
- 2) 二宮勝幸（横浜市環境科学研究所）、柏木宣久（統計数理研究所）、岡敬一（神奈川県環境科学センター）；東京湾西岸域における海水温の上昇と季節のずれ、横浜市環境科学研究所所報 第35号、pp.35（2011）
- 3) 鈴木高二郎；東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす淡水流入と風の影響について、港湾空港技術研究所資料、pp.8-11、No.1276（2013.9）