

「磯やけ」の話②

～豊穡な海の条件とは！～

裏方 思考

「環境施設」147号（2017.3）では、「磯やけとテトラポットの浜辺」と題してこれらの関連性について寄稿した。北海道奥尻地震後に沿岸部には波消しテトラポットの投入と高さ5mもの護岸堤防が延々と整備された。が、浜辺の人々は海藻や魚介類の密度がしだいに低くなっていると感じている。海中に投入されたセメントを原料とするコンクリート製のテトラポットが影響しているのではと疑っていることを紹介した（写真1・2）。

ところで、このような磯やけ現象は北日本海に限らず全国に拡大している。このため、国により漁業資源の枯渇や漁業の衰退を防止するために調査、研究、現場試験などが行われている。水産庁が発行した平成18年度「磯焼け対策ガイドライン」の内容は、対処療法的な発想で試行錯誤の繰り返しのように思えたが、平成26年度「改正 磯焼け対策ガイドライン」は、磯やけの本質に切り込むような、かなり改善された内容であったが、ここでは省略する。

私は、この中の対策の一つに水中の鉄分補給に

よる磯やけ対策に大きな関心を持っている。鉄は、人の生命を維持する上で必要な微量元素の一つであるが、海藻および魚の餌となる植物プランクトンにとっても重要な元素であるはずである。最近の磯やけ対策の内容について紹介したいが、ページ数が限られているので、「コンクリート原因説」に至った背景について紹介するとともに、「豊穡な海」に共通する条件を見出し、鉄との関係に留意しつつ思考してみた。

1. 「磯やけの主原因がコンクリートではないか？」 ～背景～

磯やけには多くの原因が挙げられており、人工的な藻場の整備や直接磯やけの原因を除外するなど方法が試行されている。しかしながら、人工漁礁などによる藻場育成の方法あるいは海藻を食害とするウニや食植性魚類（ブダイなど）の駆除あるいは海藻育成区への侵入防止対策を講じたとしても、基本的には従前から存在する自然藻場が回復しなければ、真の対策とは言えず、漁業の復活



写真1 波で洗われるテトラ（ネットより）



写真2 堤防とテトラ群（ネットより）

はおぼつかない。

本来、歴史的な時間をかけて形成された自然界の藻場は、豊富な栄養分や餌、あるいは太陽光、酸素や二酸化炭素溶存量など海藻や魚介類の繁殖に適した条件が整った結果、豊穡な海が形成されたと言えよう。人工的な藻場整備は、あくまでも自然界の藻場の補完であり、磯やけ対策の本質ではないと思うが！

【コンクリート原因説の背景とは！】

「磯やけの主原因はコンクリートではないか？」と考えた背景は、「大量のコンクリートを海へ投入すると、いずれセメント成分の石灰が海中に溶け、主成分のカルシウムが沈殿して海底や岩礁の表面をコーティングすることにならないか？あるいはアルカリ性が強くなり、海中生物に大きな影響を及ぼすのではないか？」と常に疑念を持っていた。そのような疑問を抱く下地は、海育ちなので常に海への関心が強いこと、及び関西学院大学理学部で学んだ化学（物理化学）に関する基礎知識が役立っている。つまり、直感が働く本当の意味は、多くの経験と幅広い基礎知識が必要であることを教えている。「ニュートンが、木からリンゴが落ちただけで引力の存在を思いついた」こと背景には多くの経験、関心及び基礎知識があったはずである。

磯やけについては、専門分野でないし研究も行っ



図1 琵琶湖の地形図

ていない、かつ基礎知識や最新情報にも欠けており、学術的な根拠は薄弱である。が、目前に起こった諸問題に対処しようとする従来の専門家とは違った視点から現象を把握し、従来の知見も交えながら自由な発想で対策を思考することができるのではないかと考えている。磯やけに限らず！

以下に発想の源になった事例の一部を紹介するが、「豊穡な海」を形成する条件に焦点を合わせて、鉄分とのかかわりについて眺めてみた。

2. 事例① 琵琶湖の富栄養化と赤潮について

磯やけを取り挙げたいいくつかの疑念がきっかけになったので以下に紹介する。

昭和50年代初期には、琵琶湖水を水道源として使用していた京都の水道は、6月になると臭いと味に異常が感じられていた。琵琶湖に赤潮が発生したことがすぐにわかった。市では膨大な費用をかけて活性炭で浄化して給水していたものである(図1、写真3)。

〈滋賀県の富栄養化防止対策について〉

赤潮の原因が、琵琶湖という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、窒素とりんが主原因でプランクトンが異常増殖するとされた。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、処理技術の広報と普及を推進した。私もこのマニュアル作成に係わり、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いので、主に

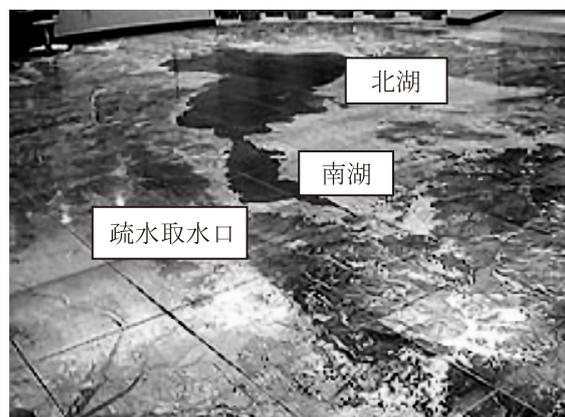


写真3 北湖と南湖（琵琶湖疏水から取水）

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、りんを含まない石鹼への切り替えが行われた。

しかし、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を持っていた。また、赤潮の色は、鉄分ではないかと直感していた。その後、京都大学（故）門田元先生が、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ことを記憶している。なお、現在では、大規模な赤潮の発生はほとんど聞かない。

〈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。冬季になると水温が低くなると重くなるので沈み込み、底層のやや暖かい湖水が上昇して対流が起こる。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、生物活動に好影響を及ぼす。

一方、深層部には、プランクトン等や動植物の死骸である有機物が沈殿して分解し栄養分が豊富に存在するが、水中の酸素濃度が低いので生物の活動は低い。しかし、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。これらが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太陽光を浴び、高い水温等の条件下で藻類やプランクトンなどが爆発的に進むと考えられる。しかし、閉鎖性水域で異常発生すると細胞の呼吸で酸素が消費され、酸欠状態になるので、魚介類は死滅することになる。〈身近な鉄の挙動について〉

鉄分は空気中では酸素と反応して不溶性の酸化鉄になる。これでは生物に取り込まれたとしても機能することができない。しかし、自然界では不溶性になったり、水に溶けたり、酸素の有無により様々な挙動を示す。たとえば、山間地の水田の下から赤い泥水が湧出するのを見たことがあると思う。水田は粘土が張り付いており、空気と触れた

表層水は地下に浸透しにくい。このため、水田の下は嫌気性になりやすい。自然界には多くの鉄分が含まれているので地下水には溶けた状態で存在する。これが空気に触れると酸化し、不溶性の酸化鉄に変わるので、赤い泥として湧出するのである。同じような現象が、琵琶湖の底層でも起こっているはずである。

また、広大な森林地帯では膨大な落葉や倒木が土壌微生物により分解され、BODや窒素、リンなどの有機物あるいはフルボ酸やフミン酸を作り出す。これらは弱酸性なので土に含まれる鉄分を溶かすことができる。これらが河川水に含まれて海へ供給されるとバランスのとれた栄養豊富な水が供給されるので好漁場を作る。森は海を豊かにすることは古くから知られている。

なお、地球の地表面における鉄存在量は、酸素、ケイ素、アルミニウムに次いで4番目に多く（4.7%）、水に不溶性な鉄と溶解性の鉄として豊富に存在している。

〈地球温暖化の影響は？〉

ところで、地球温暖化により冬でも温度が低下しなくなると湖水の循環が弱くなる。湖水の循環が弱いあるいは起こらなくなると生態系が大きく変わるのでないかと懸念されている。水の循環は、底層の栄養分を表層へ運び、溶存酸素の多い表層の水を底層へ運ぶ。循環しなければ底層の栄養分は腐敗し、魚介類の生存は難しくなると思われる。冬は寒いなりに大きな役割を担っているのである。※赤潮と青潮：富栄養化によりプランクトンが爆発的に増えた場合に赤潮と呼ばれる。一方、青潮は、これらが大量死して底に沈み、酸欠状態でバクテリアにより分解されると、水中の硫黄分がコロイド化し、白濁して水が青く見える。いずれも水の中の酸素を消費して酸欠状態を生み出すので、魚介類の大量死を引き起こす。

3. 事例② 「豊穡な海」の条件とは！；富山湾、駿河湾、相模湾

豊穡な海の条件を俯瞰するにあたり、日本近海の海流の概要を把握することが大切である。日本

の沿岸部には図2に示したように、冷たいが栄養分を多く含んで南下する親潮（寒流）と、暖かいが栄養分の少ない黒潮（暖流）が北上し、三陸沖付近でぶつかり合い、好漁場を形成する。黒潮だけの富山湾と駿河湾・相模湾でも豊富な魚種や漁獲量で有名である。これらの好漁場に共通する条件を俯瞰すると、図3、図4の地形図に示したように①大きな半島があること、②背後に日本有数の高い山（日本アルプス、富士山）がそびえていること、③それぞれの湾沿岸部の大陸棚は狭く、急激に1,000mもの深さに達する深海が存在することに気づく。それぞれの共通条件が次のような理由で好漁場を形成すると考えられるが、その最も大きな条件は餌が豊富であることに尽きる。

①半島の役割について

半島が外海に突き出ているので、南から北上する暖かい黒潮が半島で遮られ、地形に沿って湾内に流れ込む。とくに、黒潮は深さ1,000mにも達する深海流を伴うので、流れが遮られると深層海流は表層部へと上昇し、栄養に富んだ深層水を表層へと届ける。いわば対流と同じ現象が海流によって引き起こされると考えられる。栄養豊富な深層水は、湾内に貯留されるので、魚種も多く、魚介類の宝庫となりうる。仮りに海流を遮る半島がなければ、深層水が上昇することもなく、かつそのままか外海を流れてしまい、栄養豊富な寒流とぶつかった場所で対流が起こり、深層部の栄養が豊

富に供給され、高漁場を形成すると考えられる。

②急峻な深海の役割

表層で発生したプランクトンなどの死骸は深層部に沈下し、BOD、窒素やりん有機物に分解され蓄積する。また、溶存酸素の多い海面の鉄分は不溶性になりがちであるが、沈殿すると深海では溶存酸素が少ないために還元されて溶存性の鉄分に変化し、海水中に溶ける。

これらの栄養分が、海流により表層へ押し上げられると、太陽光を浴びて植物プランクトンが大発生し、合せて動物性プランクトンの増殖を促す。餌が豊富になると、小魚が大繁殖し、中型・大型魚類の繁殖に結びつくと考えられる。

③後背地の高い山と森の役割

背後には2,000mを超える山々、あるいは最高峰の富士山がそびえており、夏でも大量の積雪が残っており、その広大な裾野には森林地帯が広がり、



図2 日本近海の海流（ネットより）



図3 富山湾の地形

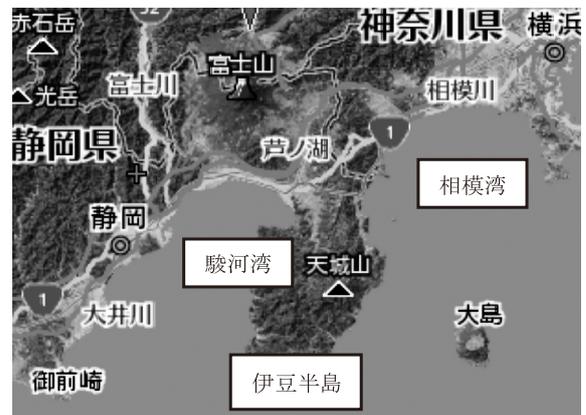


図4 駿河湾と相模湾の地形

水、太陽光と二酸化炭素を源に炭酸同化作用により大量に増殖する。春には気温が上昇するので冷たい雪解け水が森の栄養分を含んで大量に湾内に流れ込む。暖かな表層水の温度が低下すると、重くなるので沈降する。湾内はいわば半閉鎖性の水域であるので、対流が起り、栄養豊富な深層水が表層に供給され、プランクトンの餌が豊富に供給される。

このように半島は海流を堰き止め、湾内に栄養分を蓄積する。急峻な海底は海流による栄養に富んだ深層水の上昇、後背地の広大な山岳地帯がそびえており、土壌・森林の養分の補給源及び雪解け水は温度が低いので、湾内の対流（循環）に寄与し、溶存鉄と日射量が引き金になり、植物性プランクトンが爆発的に増殖し、魚の餌が豊富な好漁場を形成していると考えられる。とくに、暖かな黒潮は栄養分が少ないので、栄養に富んだ深層水との混合によりプランクトンが大量に発生し、好漁場を形成すると考えられる。

なお、海流の遅い内海や湾内など閉鎖性水域でプランクトンが異常に発生すると赤潮や青潮を引き起こすことがある。とくに、強い太陽光、水温の上昇、降雨の多い時期には河川から栄養が豊富に供給される入江などの半閉鎖性湾内では赤潮が発生しやすいと予想される。

※黒潮：北赤道海流の暖流がフィリピン諸島から台湾付近で生じる。流れる速さは1～4ノット（～2.5m/s）と早く、厚さは200～300m程度。水温が20～30℃と高く、塩分が多く、酸素や栄養塩・プランクトンが少なく透明度が高いため、濃い藍色に見える。主たる魚種は、アジ・イワシ・カツオ・カレイ・サバ・タイ・タコ・ヒラメ・ブリ・マグロなど。

※親潮：オホーツク海から流れ出して千島列島に沿って南下して北海道の南側を通過して三陸沿岸を流れる海流。速さは0.5～1ノット（～0.5m/s）で、層厚は1,000mにもなる。色は黄緑色を帯びており、水温は低いが、酸素や栄養分が多いのでプランクトンを多く含む。主たる魚種は、カニ・サケ・サンマ・タラ・ニシン・ホタテなど。

3. 事例③ 極地はエサの宝庫；アリューシャン・マジック

北極や南極は、極寒の地であり、森林・土壌もほとんどなく、雨もなく、人も住んでいないので、海への栄養分の供給は少ないので、どう考えても魚類は生育しそうにない。しかしながら、最近の気象状況の予報や大型船の進歩により極地における調査が進んでいる。ある時期になると膨大なオキアミが発生し、小魚、中型・大型魚、海鳥やクジラなどの大型動物の好餌場となることが知られている。

2010年11月7日、NHKで取り上げられた「アリューシャン・マジック」と呼ばれる映像があった。ベーリング海で爆発的に発生したオキアミを求めて世界中から凄まじい数の魚、海鳥や大型動物が集合し、その数だけでも圧倒されるような衝撃的なものであった。

さて、アリューシャン列島は、図5示したようにアメリカのアラスカ半島からロシアのカムチャッカ半島にかけて東西に約1,930kmにわたって弧を描くように伸びる列島で、ベーリング海を封じ込めるように配列している。ベーリング海では寒流と暖流が流れており、列島の間から太平洋へと流れ出る。海底の北東半は大陸棚、南西半はアリューシャン海盆（最深4,085m）を形成している。

また、この列島は150箇所の火山があるので、ここからミネラル分がベーリング海に流れ込む。列島の南北に寒流と暖流がぶつかり、寒流は重いので沈みこみ、さらに島で遮られた海流は上昇し、渦を巻いて海底の栄養分が海面に浮き上る。太陽光と豊富な酸素が供給されると膨大な植物プランクトン、これを餌にする動物性プランクトンが大発生し、動植物の餌場となる。

日本から約5,000kmも離れたアリューシャン列島の海では、夏になると数時間のうちに1,000万羽を超える海鳥（ミズナギ鳥など）と500頭ものクジラが怒濤のように押し寄せ、一説には4万頭を超えるクジラの餌場となっていると言われている。もちろん、イワシやニシンをはじめ多くの魚類が集合し、イルカ、クジラ、シャチなど数えきれない種類の生物と数で占められるのである。このよ



図5 アリューシャン海域の位置図

うな世界中の生きものがわずか数時間のうちに密集したと思いきや、あっという間になくなる自然現象で、この大集結は「アリューシャン・マジック」と呼ばれている。いわば、ベーリング海をアリューシャン列島が特有の地形で閉め切り、海洋条件が生み出すオキアミの大発生が要因であることは言うまでもない（写真4・5・6；NHK）。〈大量発生の要因は！〉

アリューシャン・マジックでは、他の好漁場とは比較にならないほどの膨大な餌であるオキアミが発生し、魚類、海洋生物が大集合する奇跡的な豊穡の海なのである。上述した豊穡の海の条件と照らし合わせると次のような結論に至る。いわば、好漁場の条件である、①アリューシャン列島によるベーリング海流の堰き止め（半島と同じ役割）、②火山列島からの栄養流出（後背地からの栄養分の供給に相当）、③深海の存在（栄養分が沈殿して溜る）、④寒流と暖流の存在（表層と深海の循環を引き起こす）が、オキアミ（プランクトンの一種）が大規模に爆発的に餌の発生する条件が備わっていることにある。

つまり、ベーリング海から太平洋へ流れる海流

が列島により遮られるので、深層水が上昇し、栄養分に富んだあるいは溶解性の鉄を含んだ深層水が表層へ上昇し、オキアミが大発生する。また、溶存酸素の豊かな表層水は、深層部へと沈み込むので、深海でも餌が豊富になり、魚類が著しく増加する。また、ベーリング海では寒流と暖流が流れているので、ちょうど三陸沖の好漁場の条件、富山湾の能登半島や駿河湾の伊豆半島以上に海流を堰き止める列島があり、さらに深海は4,000mを越える深海が存在し、豊穡の海に必要なすべての条件を大規模に備えている。北極圏の冷水が流れ込めば、深海の膨大な栄養分が表層へ上昇し、好餌場の湾の条件を全て満たすような広大な好漁場を形成していると考えられる。

また、ベーリング海を囲む火山帯からは鉄分や硫黄分など大量に流入し、発生したオキアミなどの死骸は深層部に沈降し、嫌気性のバクテリアで分解される。沈殿した鉄は酸素不足の条件下で溶解性鉄に化学変化し、有機物類の栄養源とともに豊富に存在する。これらが表層へ上昇すると、太陽光を浴びて膨大な植物性プランクトン、これを餌にする動物性プランクトンであるオキアミ、イワシやニシンなどが湧き出るように大発生し、地球上の海洋大型動物を引き寄せると考えられる。

結 論

今回は、テトラポットとはあまり関係のない話題を紹介したが、豊穡の海の事例を調べるといずれも深い海があり、海底に溜った栄養分は対流等により表層へ移動することがポイントである。また、深いほど海底は酸素不足になるので、鉄分は溶解性鉄に変化していると考えられる。鉄は、細



写真4 1,000万羽を超えるミズナギ鳥 写真5 海を埋め尽くすニシンの群れ 写真6 4万頭のクジラが集結する

胞を作るうえで必須であるが、水に溶けていなければ取り込んでも機能しない。一方、水に溶けた鉄分もアルカリ性の海水に浸かると化学変化して不溶性の鉄になるので沈殿してしまい、増殖には役立たないと推測される。テトラポットの原料はセメントであり、その主成分は、酸化カルシウム (CaO) であるので、水の溶けると水酸化カルシウム (消石灰) になりアルカリ性を呈する。つまり、その付近では溶けた鉄分は沈殿することになり、海藻などには取り込めないことを危惧しているのである。

次回は、鉄に焦点を当てて藻場の再生事例などを取り上げたい。……つづく

【参考；水の不思議について】

私たちの常識では、暖かい海、日差しが強いほどプランクトンが発生しやすく、好漁場を形成すると考えるが、なぜ北極や南極の極寒地方が好漁場あることは不思議な限りである。漁業の場は海であり、その水の特性が生物の生存、繁殖に大きな意味を持っているので少し解説します。

この世には最も軽い水素から始まる100以上の元素があり、それぞれが結合して無数の化合物が作られる。その中でも化学の常識（規則性）を超えた性質をもつ物質が「水」である。一般的に、密度（単位体積当たりの重さ）は、気体が最も軽く、液体になると次第に、固体になると最も重くなる。しかしながら、水は、他の物質と異なり、気体（水蒸気）は空気よりも軽いので空中に存在



写真7 オホーツク海の流氷群（撮影；カギヤ）

するが、冷えると液体（水）になり、重くなるので雨となって地表に落下する。さらに0℃以下では水（固体）になるにも関わらず水よりも軽くなり水面に浮かぶ（写真7）。

つまり、寒くなって海水の温度が低下すると重くなるので沈み、4℃で最も重くなるのでより深くまで沈む。深い海底まで凍ることがないのである。表層は水で覆われて温度低下を防ぐ効果もあり、海中の生物は死滅することはなく、生命が維持されることになる。真夏の海で泳いだ時に海面は暖かいが、潜ると冷たいことは誰もが経験することである。

ところが、水の密度は、図6に示したように、ちょうど4℃を頂点としてそれよりも高くなると軽くなり水面に移流する。また、それよりも低くても軽くなって水面へ移流する。つまり、4℃以下に冷えると逆に軽くなり浮くことになるので、表面から氷ができる。仮に0℃から4℃までの水に、このような性質がないとするといつでも冷たい水が底のほうに沈むことになり、底から氷ることになる。そうすると、海の魚は、全て氷の中に閉じ込められるかあるいは氷の上に追い出されてしまう。4億年以上も海の生物が生存し続けられたのは、このような水の特殊な性質に依るものであり、まさに奇跡の物質なのである！

※海水：海水は塩分を含むので、凍り始めるのは-1.8℃程度である。また最大密度は-3℃以下である。低温でも凍りにくいことや、対流温度が淡水と若干異なる。

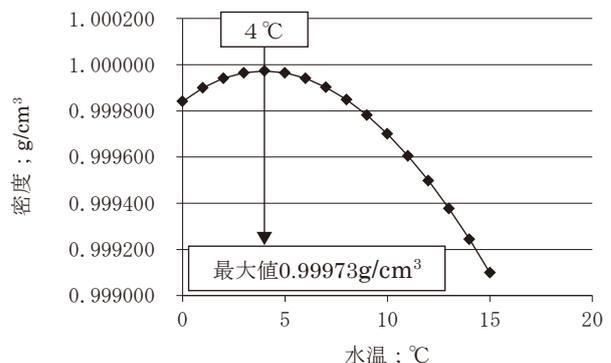


図6 水温 (°C) と密度 (g/cm³) の関係 (作成；カギヤ)