

干潟・浅瀬の保全の重要性： 東京湾における有機汚濁軽減のために

飯島 明子*

Importance of the Conservation of Tidal Flats and Shallow Areas: with a View to Decreasing in Organic Pollution in Tokyo Bay

IIJIMA Akiko*

要 旨

東京湾で深刻な水質汚染（有機汚濁）について、その成因と結果について解説した。成因としては、沿岸の人口集中による生活排水の増加、外洋水と混合しにくい地形、埋立による湾奥の地形変化、埋立による干潟・浅瀬などの浅海域の減少を特に取り上げた。浅海域に生息する底生動物の多くは、植物プランクトンや懸濁態有機物、堆積有機物を摂食することにより、東京湾の有機汚濁軽減に貢献している。またその巣穴によって脱窒細菌の活動の場を飛躍的に増加させ、内湾水の過剰な窒素を空中に放出する役割も担っている。東京湾の干潟における底生動物分布調査の結果、現存する干潟には有機汚濁を軽減する能力を持つ生物が多く生息していることが示された。東京湾の浅海域を保全することは、有機汚濁を軽減し、浅海域の持つ食料生産機能、レクリエーション機能、教育機能を高めるほか、地球規模での生物多様性の維持・保全にも繋がる。

* 神田外語大学国際言語文化学科専任講師。Assistant Professor, Department of International Language and Culture, Kanda University of International Studies.

Abstract

This article examines the causes and effects of serious water pollution (organic pollution) in Tokyo Bay. The causes are as follows: the increase of the use of domestic waste water due to densely populated coastal areas, geographical features which make it difficult to mix with ocean water, changes in geographical features due to inner areas of the bay by reclamation, and the decrease in shallow water areas such as tidal flats and shallow subtidal areas. Many of the benthic organisms which live in the shallow water areas contribute to the alleviation of organic pollution in Tokyo Bay, by digesting the phytoplankton, particle organic matter, sedimentary organic matter. Also, by the burrows of benthic animals, the area of activity for the denitrifying bacteria is significantly increased, and contributes to disseminating nitrogen in the inner waters into the air. After conducting a survey of the distribution of the benthic animals in the tidal flats of the Tokyo Bay, it has been confirmed that there is an abundance of species in the tidal flats which are capable of decreasing organic pollution. Therefore, preservation of the shallow water areas in Tokyo Bay would lead to decrease in organic pollution, improvement of food production, recreation, and educational functions, and lastly but not the least, to the maintenance and preservation of biodiversity at the global level.

はじめに

東京湾は古くから沿岸漁業の盛んな豊かな海であり、今も「江戸前」の魚介類の水揚げは多い。その一方で、高度経済成長期に干潟を含む浅海域のほとんどが埋め立てられ、水質汚染も進み、現在に至るもまだ解決の目処が立っていない。沿岸漁業と埋立と水質は、一般にしばしば別個の事象として捉えられているが、これらの間には切っても切れない密接な関係がある。

本稿では、東京湾の水質汚染の中でも特に大きな問題の1つである「有機汚濁」の現状と成因、中でも干潟を含む浅海域の埋立と有機汚濁の関係について述べ、浅海域に生息する底生生物（多くが漁獲種またはその食物資源で

ある）の生態学的機能について解説し、有機汚濁軽減に向けた浅海域保全の重要性について述べる。また、地球規模での生物多様性の維持・保全の観点からも、東京湾の浅海域の保全は重要であるが、その理由についても解説する。

有機汚濁とは何か

「有機物」は炭素を含む高分子化合物の総称であり、「有機汚濁」とは簡単に定義するならば、水中に有機物が多量に存在し水が濁っている状態のことである。水中の有機物は、植物プランクトンなど生物そのもののほか、生物の分泌する有機物や生物の死骸、さらにその死骸の分解産物などがある。東京湾のように河川が流れ込む内湾の場合は、湾内で生産される有機物と河川水から供給される有機物の両方が存在する（和田、2000）。植物プランクトン以外で水中に懸濁している有機物粒子を懸濁体有機物（POM: particulate organic matter）、水に溶けている状態の有機物を溶存体有機物（DOM: dissolved organic matter）と呼ぶ。また底質上に堆積している有機物を堆積有機物（SOM: sediment organic matter）と呼ぶ。

湾内で生産される有機物は主に、①植物プランクトン、②底生微小藻類¹⁾、③海藻及び海草²⁾、④これらの分泌物・死骸・枯死体とその分解産物（デトリタス、POM、DOM、SOM）、に大別できる。うち、④の起源でもある①～③は光合成を行う一次生産者であり³⁾、水中の二酸化炭素と光があれば有

1) 底生微小藻類とは、単細胞、あるいは細胞が1列に連なっただけの単純な構造の藻類のうち、底質（石・砂・泥など）に付着して成育するものの総称である。珪藻・緑藻・紅藻・シアノバクテリアなどが含まれる。

2) 海草とは、陸上の種子植物（単子葉類）の一部が海へ進出したものであり、海藻と全く異なる生物である。

3) 一次生産とは、二酸化炭素から有機物を合成することであり、光合成はその代表例である。

機物を合成できるのだが、他に窒素（アンモニウムイオン、硝酸イオンなど）、リン（リン酸）も必要とする⁴⁾。東京湾など都市部の内湾では、生活排水・工業排水由来の窒素とリンが絶えず大量に流入している。特に首都圏では人口が集中しているため、生活排水（尿尿や洗濯、入浴後の排水など）に含まれる窒素・リンの量は極めて多い。植物プランクトン等にとっての栄養塩となる窒素・リンが多量に存在することを「富栄養」と呼ぶ。東京湾は強度に富栄養化した海域である。

東京湾沿岸では、下水や合併浄化槽が普及するまで、生活排水等に含まれる有機物及び高濃度の窒素やリンが、河川を通じて長期間にわたって東京湾に流入し続けた。現在では下水の普及によって排水中の有機物含有率は下がったが、後述するように窒素・リンの完全な除去は困難であり、現在も東京湾へ流入する河川への窒素・リンの負荷は続いている（たとえば青井、2000）。

東京湾は出入り口が狭く奥まった地形であるため、外洋との間の水の交換が悪く、内湾水の有機物及び窒素・リン含有率は高い状態に維持されやすい。このため、①～③の一次生産者、なかんずく細胞分裂によって素早く増殖できる植物プランクトンと底生微小藻類にとっては、東京湾は増殖に適した水域である。特に水温の高い春から秋にかけては、東京湾の湾奥部では植物プランクトンが爆発的に増殖し、水が緑褐色・赤褐色・黒褐色に濁って見える。この状態を「赤潮」と呼ぶ。

4) 窒素はアミノ酸・タンパク質・核酸（遺伝情報を担うDNAなど）・アデノシン三リン酸（生体内のエネルギーの「通貨」として働く物質）などの構成要素として、リンは核酸・アデノシン三リン酸などの構成要素として、生物にとって欠くべからざる元素である。換言すれば、元・生物であったもの（死骸及び排泄物）の中には窒素とリンが豊富に含まれている。

豊穡と死の海

植物プランクトンの多くは動物プランクトンや小型魚類、二枚貝など（二次生産者⁵⁾）の食物資源となる。また底生微小藻類や河川から流入するPOM、河川起源のSOM、河川から流入する陸上植物の落ち葉なども、二次生産者の食物資源として重要であることが判明している（和田、2000； 富永・牧田、2008； 櫻井・柳井、2008）。東京湾の浅海域における生物生産量は高く、たとえば三番瀬では1 m²の底質中に生息する底生動物⁶⁾の湿重量が1 kgを越えることは珍しくない。その80%以上が軟体動物（ほとんどが二枚貝）の場合もある（木幡、2000）。

1988年から1991年にかけて、私は東邦大学理学部生物学科の風呂田利夫博士による三番瀬生物調査にほぼ毎月同行した。船橋沖の浅海域（水深4 m程度）における底曳き網採集では、バカガイ（商品名「あおやぎ」）、シオフキガイ（可食、ただし日本では水産資源ではない）、シャコ、エビジャコ、イシガニ（可食、水産資源としてはあまり流通していない）、ハタタテヌメリ（商品名「めぐち」）などがしばしば大量に採取され、マテガイ、トリガイ、サルボウ（アカガイに近い種、しばしば「あかがい」として流通）、ガザミ（商品名「わたりがに」）、イシガレイ、マコガレイも頻回に採取された。水深2 m程度の浅瀬でスクーバ潜水を行うと、1 m²当たり約500個体のアサリが確認できた。植物プランクトンや底生微小藻類、POM、SOMなどが江戸前の海の豊穡を支えているのである。

5) 二次生産者とは、一次生産者を摂食する動物の総称である。

6) 底生動物とは、水底に生息する動物の総称である。例えば、この項で触れた軟体動物門（腹足綱・二枚貝綱）、環形動物門（多毛綱）、節足動物門（軟甲綱十脚目）、棘皮動物門などはすべて底生動物である。

ではなぜ、植物プランクトンの増加による赤潮は好ましくないのだろうか。

赤潮は、二次生産者による摂食が追いつかないほど植物プランクトンが増殖した状態である。このとき、プランクトンの死骸や植物プランクトンの分泌した有機物は二次生産者に利用されないまま海底に沈降する。海底では好気性細菌がこれらの有機物を分解し、その過程で酸素を消費する(内藤ら、1996)。

海水が十分に流動・攪拌されていれば、海底で細菌が酸素を消費しても、新たに酸素の多い表層水が流入するので問題はないのだが、後述するように東京湾奥部では海水の流動が少ない場所が多い。そこでは細菌による酸素消費が周囲からの酸素供給を上回り、溶存酸素量の少ない貧酸素水塊(溶存酸素: DOが2~3 mg/L以下)が形成される。東京湾の場合は、完全に酸素が消費されてDOが0 mg/Lになる無酸素水塊も頻回に形成される(以降、無酸素水塊も含めて「貧酸素水塊」と呼ぶ)。酸素の足りない海水中では、上に述べたさまざまな生物も生きることができない。移動能力の高いシャコや魚類は貧酸素水塊から逃げられる可能性もあるが、二枚貝綱、腹足綱(巻貝の仲間)、多毛綱(ゴカイの仲間)、小型の十脚目(カニ・エビ・ヤドカリの仲間)、棘皮動物門(クモヒトデ類、ヒトデ類、ナマコ類)などの動物は移動能力が低いいため、貧酸素水塊の中で窒息死してしまう。これらの死骸もまた有機物であるから、細菌による分解を受け、そのためさらに貧酸素水塊の形成が促進される。

貧酸素水塊は、植物プランクトンが増え、細菌活性も高くなる高水温期(初夏から秋)に、東京湾奥部、つまり東京都及び千葉県都市部沿岸などの海底近くで頻繁に形成される(山田、1992)。形成される場所は、急に深くなっている航路や海砂を浚渫した後の穴など、特に水の交換が起きにくい所が多い(風呂田、1987)。貧酸素水塊の中では嫌気性細菌によって有機物の分解が継続され、その過程で硫化水素も生じる。硫化水素自体も生物にとっ

て有害な物質であり、短期的な貧酸素に耐えて生き延びた生物にもダメージを与える。たとえばヤマトシジミでは、硫化水素の存在下で殻の成長が阻害されることが知られている（山口、2009）。

海底に形成された貧酸素水塊は、その場の生物を死滅させるだけでなく、気象条件によって表層へ湧昇し、表層の魚類や浅瀬の底生動物も死滅させる。表層へ浮上した時の貧酸素水塊は、含有している硫化水素が硫黄粒子として析出するため、全体に白濁し、青や黄緑色を呈することが多い。この状態の貧酸素水塊を「青潮」と呼ぶ。

青潮の被害に遭った浅海域の状況は凄惨きわまりない。アサリをはじめとした二枚貝やゴカイの仲間は、酸素を求めて苦しみあまり砂から這い出しつつ死んでおり、エビやカニの仲間やヒトデの仲間、逃げ遅れた魚類も含めて、足の踏み場もないほどの累々たる屍の山が、つい数日前まで豊かな生物量を誇っていた干潟を埋め尽くす。豊穡の海は貧酸素水塊（青潮）の襲来によって、一転して死の海となるのだ。

東京湾では少なくとも1951年には青潮の記録があり、1970年代から1980年代にかけて特に多く見られた（東京湾環境情報センター）。近年はやや発生件数は減ったものの、この数年も毎年平均3回程度、2009年には2回の青潮が確認されている（千葉県水産総合研究センター）。ただし貧酸素水塊の挙動は日々刻々と変化するうえに、これらのデータの元となる調査は毎日ではなく毎月2～6回しか行われていないため（東京湾全域の調査であるから、この頻度で調査するだけでも大変な労力を要するであろう）、青潮発生回数は過小評価の可能性が高い。たとえば、東京湾環境情報センター及び千葉県水産総合研究センターによれば、2003年の青潮発生件数は2回であるが、千葉県水産総合研究センターの海底付近のDOの速報データでは、規模の大きい貧酸素水塊、あるいはDOが0 mg/Lの無酸素水塊も長期間発生していたことが分かっている。そして同じ2003年、千葉灯標に設置したセン

サーを用いて、自動的に毎日・毎正時、海底から海面まで1mごとに水温・塩分濃度・DOの測定を行った山尾(2004)の詳細な研究によれば、青潮に繋がる貧酸素水塊の湧昇が6ヶ月間に10回という高頻度で発生したことが判明している。

埋立による海岸地形の変化と貧酸素水塊の関係

東京湾奥部で貧酸素水塊が形成される原因の1つは、先に挙げたように海水への窒素・リンの供給過剰、及び河川から負荷されるPOMやDOMによる有機汚濁であるが、2番目の大きな原因として、海底近くの低層水と表層水の交換・攪拌が起きにくいことも挙げられる。この第2の原因は、埋立と密接に関係している。

東京湾奥部は江戸期より少しずつ埋立が進んでいたものの、高度経済成長期以前は湾全域で自然のままの海岸が多かった。東京湾は最深部でも水深約30mの浅い湾であり、周囲の河川から供給される土砂によって広大な干潟・浅瀬が形成されていた。たとえば現在の船橋市近辺の沿岸では、岸から沖へ1.5kmから2kmもの干潟が存在していたことが、明治13年の地形図から読み取ることができる。

ここで「干潟」について定義しておく。干潟とは、傾斜のなだらかな soft bottom (砂・泥などの底質)の海岸であり、大潮最大満潮時に水面下に没し、大潮最大干潮時に干出する場所である。いわゆる「砂浜」と異なるのは、傾斜がなだらかなために干出時にも底質中に海水(間隙水)が保持されている点である。このため干潟では、底質中に穿孔して生息する底生生物が多く、砂浜に比べてはるかに生物の現存量(biomass)が大きく、生物多様性も高い。

一方で干潟は、海による土砂の浸食作用が穏やかな、つまり波当たりの弱

い場所に発達するため、埋め立てしやすい場所でもあった。東京湾では1960年代から1970年代にかけて、ほぼ全域にわたって埋立が行われ、現在では沿岸の約90%が人工海岸になってしまった（風呂田、2007a）。

浅海域が埋め立てられると、陸地から海へのなだらかな傾斜は失われ、海岸の多くは急傾斜で（場合によっては垂直に）数m～約10m切り立つ構造になる。自然海岸で傾斜がなだらかな場合は、1日約2回の潮の干満により、交換される海水の体積が大きい。そのため低層水中で多少の貧酸素が起きたとしても、溶存酸素の豊富な表層水と混合しやすく、貧酸素は解消されやすい。しかし埋立・護岸等によって急傾斜になった人工海岸の場合は、潮の干満で交換される海水の体積は極めて小さくなる。

たとえば同じ100mの海岸線で干満差が1.5mだとすると、沖出し1.5kmの干潟の場合は、最低でも

$$1500 \times 1.5 \times 1/2 \times 100 = 112,500 \text{ (m}^3\text{)}$$

の海水が交換されるのに対し、埋立・護岸によって幅10mの海岸になってしまった場合に交換される海水は、

$$10 \times 1.5 \times 1/2 \times 100 = 750 \text{ (m}^3\text{)}$$

に過ぎず、干潟の場合のわずか150分の1まで減少してしまう。このため低層水は表層水と混合しにくく、海底で生じた貧酸素は解消されず、貧酸素水塊が形成されやすい。東京湾沿岸のほとんどが急傾斜の人工海岸である現在、湾内沿岸域の海水交換が少なくなってしまったため、貧酸素水塊が生じやすい状態となっている。

低層水と表層水が混合しにくい条件としては、埋立による地形の変化に加

え、淡水の流入、夏期の高水温、及び夏期の南風も挙げられる（風呂田、1987）。

東京湾をはじめ日本の内湾の多くは、河川の流入によって淡水が供給されている。淡水は海水より比重が軽いので、塩分濃度が高く重い低層水の上に、塩分濃度が低く軽い表層水が「載っている」状態になる。また初夏から秋口までの間、日照が強く気温も高いため、東京湾の海水も温められる。この時、表層水から温まるので、ただでさえ比重が軽い表層水は温まってさらに軽くなる。また夏期は、東京湾の上ではおおむね南（湾口の方向）からの風が吹くことが多いので、表層水は風によって湾奥へ押しつけられる状態になる。これらの条件によって表層水と低層水との混合はさらに起きにくくなる。

実際、夏に船橋沖で表層から1mごとに水温・塩分濃度・溶存酸素を測定すると、水深数mで水温・塩分濃度・DOの明瞭な変曲点が見られることが多い（風呂田、1987；山田、1992）。表層では水温が高く、塩分濃度が低く、DOも十分に高いのだが、数～10mより深くなると、水温は急に低く、塩分濃度は高く、DOも急激に低くなる。このように「軽い水」と「重い水」がはっきり2層に分かれている状態を「成層」と呼び、水底の貧酸素水塊が発達する大きな要因となっている。

前項で触れた青潮は、この成層が崩れて海底の貧酸素水塊が湧昇することによって起きる現象である。成層が崩れる原因としては、北偏風が吹くこと、北偏風が吹き始めてから平均気温が4℃以上低下することなどが知られている（内藤ら、1996）。そのため秋口に青潮が発生することが多いのだが、初夏から夏期にかけても発生することはある。たとえば2007年7月30日には、首都圏で降雨があり、北東風が強く吹いて急激に気温が下がった。翌31日には谷津干潟で青潮が発生しており、体長数cm程度の小型の魚が死んで大量に打ち上がっていた（飯島、観察）。

浅海域の生物による水質浄化

埋立による浅海域（干潟・浅瀬）の消失は、前項に述べた成層だけに関わる問題なのだろうか。

浅海域、特に干潟について調べると、「干潟の浄化機能」という言葉が頻出する。この「浄化」とは、主に生物の活動による富栄養化・有機汚濁の軽減を指す言葉であり、その内容は大きく2つに分けることができる。

第1は、干潟に生息する底生動物が植物プランクトン・底生微小藻類・POM・SOMなどを食べることにより、水中から有機物及び窒素・リンを除去し、底生動物自身の体組織として保持することである。2002年から2004年にかけて、全国で干潟の底生動物分布調査（「全国干潟調査」）が統一的手法によって行われた（環境省・日本国際湿地保全連合、2007）。東京湾ではわずかに残っている干潟の中で、野島海岸、葛西沖干潟、江戸川放水路、三番瀬、谷津干潟、小櫃川河口干潟（盤洲）、富津干潟が調査の対象地であり、アサリ、バカガイ、シオフキ、マテガイなどの二枚貝が多数発見された（末尾表参照）。これらの二枚貝は、植物プランクトンとPOM、及び水中に巻き上がって懸濁している底生微小藻類を吸い込んで鰓で濾過し、摂食している（小池ら、1992；沼口、2001；Kasai et al., 2004；Yokoyama et al., 2005）。同調査で確認され、同様に懸濁物を吸い込んで摂食している動物は、イボキサゴ（腹足綱）、ツバサゴカイ、スピオ類（多毛綱）、アナジャコ、ニホンスナモグリ（十脚目）などである（風呂田、2007b；佐藤、2006；Yokoyama et al., 2005）。ウミニナ、ホソウミニナ、フトヘナタリ、カワアイ（腹足綱）、*Hediste* 属の1種（多毛綱）、コメツキガニ、チゴガニ、ヤマトオサガニ（十脚目）なども多く確認されており、これらの生物は底生微小藻類や底質上のSOMを摂食している（Tsuchiya and Kurihara, 1979；和田、2000；佐藤、2006；

Yokoyama et al., 2005)。また底質中の SOM を底質ごと摂食するものとしては、タマシキゴカイ、コアシギボシイソメ (多毛綱) (佐藤、2006) が多く見られた。全国干潟調査で東京湾の干潟で確認された底生動物は 144 種であり、うち少なくとも 66 種は、植物プランクトン、底生微小藻類、大型藻類、POM、SOM を摂食している種であると推測される。

これらの底生動物のうち、多毛綱 (ゴカイの仲間) や十脚目 (エビ、カニの仲間) は、鳥 (特にシギ・チドリ類) に捕食されることが多く (Bengtson and Svensson, 1968; 秋山、2000; 上野・古賀、2006)、その場合、底生動物の体組織中に保持されていた窒素・リンは、鳥を介して東京湾の外に出ることとなる。鳥の糞という形で陸上へ持ち出されるだけでなく、鳥の体組織を作り、(渡り鳥の場合は) 東南アジア等の越冬地やシベリア・アラスカ等の繁殖地にまで運ばれる (天野、2006; Iwamatsu et al., 2007)。二枚貝はエイ (山口、2003)、イシガレイ (上原・清水、1999) などに捕食される他、言うまでもなく漁獲されている。従って東京湾産の二枚貝やカレイなどの水産物をヒトが食べることは、東京湾の過剰な窒素・リンをヒトの体内に取り込むこと (=東京湾の有機汚濁軽減に貢献すること) に他ならない。

第 2 の干潟の浄化機能は、細菌による脱窒である (佐々木、1989)。脱窒とは、アンモニウムイオン (NH_4^+) を N_2 に変化させる反応である。 N_2 は大気の主成分の 1 つだが、植物プランクトンなどの一次生産者のほとんどは、 N_2 の状態の窒素を利用することができず、アンモニアや硝酸の形で利用する。従って水中のアンモニウムイオンや硝酸イオンが脱窒によって N_2 になり、空中に放出されれば、植物プランクトンなどが利用できる形の窒素が減少し、結果として有機汚濁が軽減される。

脱窒は、アンモニウムイオンが好気性細菌によって酸化され、その酸化産物が嫌気性細菌によって還元されるというステップを経て行われる (Knowles, 1982)。好気性細菌は酸素呼吸を行うので、干潟を含む浅海域の

底質表面近傍に生息している。一方で嫌気性細菌は酸素のない場所で活動する。

多くの干潟では、表面から数 mm ～数 cm ほど、底質中の鉄分が酸化して淡赤褐色を呈する層が存在し、酸素が行き渡っていることが目視でも確認できる。この層を酸化層と呼ぶ。酸化層の厚みは海域の富栄養化の状態及び底質の性質により変化する。東京湾では、湾口部近くの流動性に富む砂質干潟の場合には酸化層の厚みが 20 cm に達することもあるが、湾奥部の泥質干潟ではわずか 2～3 mm しかない所もある（飯島、観察）。いずれの場合も酸化層の下には、酸素が行きわたらず鉄が酸化されないため、灰色ないし黒色を呈する底質（還元層）が続いている。先に述べたように、脱窒は好気性細菌と嫌気性細菌によって行われるため、底質の酸化層と還元層の境界領域で最も盛んである。従って干潟の存在は、脱窒反応を行う広大な面積を確保するという意味も持つ。

さらに、脱窒反応は干潟・浅瀬に生息する底生動物、特に巣穴を掘る生物の活動によって促進される。たとえば東京湾の干潟において多く見られたチゴガニ、コメツキガニ、ヤマトオサガニ、アナジャコ、ヨコヤアナジャコ、ニホンスナモグリなどの十脚目、また *Hediste* 属、スピオ科、イトゴカイ科などの多毛綱は、干潟から浅瀬にかけての底質に巣穴を掘って生息している。これらの生物の巣穴の縦断面を観察すると、深く還元層まで穿たれた巣穴の表面およびその周辺の底質が赤褐色の酸化層であることが確認できる。これらの生物は巣穴を掘ることにより、結果的に干潟の表面積を増大させている（Kikuchi, 1986; 佐藤, 2006）。

中でも最も顕著な働きを行う生物はアナジャコであろう。アナジャコ *Upogebia major* は、体長 10 cm を越えるエビの一種（十脚目、アナジャコ上科、アナジャコ科）だが、近縁他種と比べて桁違いに深い巣穴を掘ることで知られている。東京湾の干潟・浅瀬に生息する中では、間違いなく最も深く

巣穴を掘る大型の底生動物である。Kinoshita (2002) が合成樹脂を巣穴に流し込んで型取りした結果によれば、深さ 2 m に及ぶ巣穴も珍しくなかった。流れ込んだ樹脂の体積から推定すると、2.5 m に達する巣穴も存在するようだが、この例も含めて多くの場合、巣型をすべて掘り出すことが物理的に不可能であり、途中で折り取るしかなかった。それでも現時点で確認されている最大の巣穴は深さ 208 cm である。アナジャコの巣穴は、大型個体の場合は直径約 2 cm であり、深さ約 50 cm の U 字管と、U の底の部分からほぼ垂直に真下に伸びる I 字管から成る。東京湾奥部の江戸川放水路と連絡している新浜湖の人工干潟では、Kinoshita ら (2003 a) は干潟面積 1 m² に対するアナジャコの巣穴内壁総面積を、アナジャコの巣穴数・個体密度・サイズ組成から、平均で 7 m² と推定した。底質表面積の拡大へのアナジャコの寄与は極めて高い。またアナジャコの巣穴の場合は、アナジャコ自身の活動により有機物が巣穴内壁に多く蓄積されるため、干潟表面よりも細菌数が多く、新浜湖の干潟の場合は干潟表面積の 10~13 倍の細菌が生息しているという (Kinoshita et al., 2003 b; Kinoshita et al., 2007)。そして細菌以外の微生物もアナジャコ巣穴内壁には多く生息し、巣穴内壁の有機物を消費している。アナジャコは巣穴を掘ることによって底質の酸化層の表面積を増やし、干潟の脱窒能を向上させているだけでなく、有機物を巣穴内にトラップすることによっても干潟の物質循環に大きな役割を果たしている。

浅海域の多様な機能

干潟や浅瀬では上述のように、生息する底生動物により有機物が直接消費される他、底質内の脱窒作用もあり、東京湾のような内湾の富栄養化・有機汚濁の軽減に貢献していることは、すでに多くの研究で明らかにされてきた (たとえば佐々木、1998; 鈴木、2000)。また、下水処理場と比較して干潟や

浅瀬の経済効果について試算している研究もある。たとえば三河湾の一色干潟における物質循環の研究を行った青山ら（1996）は、10 km²の干潟は10万人相当の生活排水を処理する能力を持つと試算し、同等の処理機能を有する下水処理場を建設するためには878.2億円が必要であると述べている。

生活排水の下水処理は、物理的に汚濁物を沈殿させるなどの方法で除去する「一次処理」と、その後で好気性細菌に有機物を消費させる「二次処理」、好気性細菌と嫌気性細菌の両方を用いて脱窒・脱リンなどを行う「高度処理」の三段階を経て行われる。二次処理までで有機物は減少するのでBOD⁷⁾は下がるが、高度処理を行わなければ溶存態窒素（アンモニウムイオン、硝酸イオンなど）やリンの量はあまり減少しない。しかし高度処理を行う施設は建設に大きなコストがかかるため、普及率は高くない。平成14年度時点では、日本全国の下水処理場1845箇所の内、高度処理を行っている場所は231箇所であり（社団法人日本下水道協会）、わずか12.5%に過ぎなかった。これにひきかえ、干潟や浅瀬は、高度処理まで行うことのできる天然の浄化槽としての機能を果たしている。

水質浄化だけにとどまらず、干潟を含む浅海域は多様な機能を有している。人間社会と直接関わる部分を見ても、浅海域は、水産資源である生物およびその食物資源である生物の生息場・採食場として、稚仔魚や幼個体の成育場や隠れ場（Subramaniam, 1990; Polte et al., 2005）として、人間の食物生産機能を担っている。また潮干狩りや自然観察を通し、レクリエーションや環境教育の場ともなっている。

さらに、人間社会との直接的な関わりは見えづらくとも、浅海域は生物多様性が高いため、保全の重要度も高い。現代は白亜紀の大絶滅を上回る速度

7) 生物化学的酸素要求量、biochemical oxygen demandの略。水中の有機物を微生物が好氣的に分解する時に必要とする酸素の量。値が高いほど水中の有機物量が多く、水質が悪い。

で生物が絶滅している大量絶滅時代である。どの種が絶滅した場合にどのような影響が地域生態系やその周辺に及ぶかほとんど分からないままに、多くの生物が絶滅しつつある。我々人類は、自然環境の中に包含され、自然環境から多様な恩恵を受けて生存しているから、この大量絶滅は何としても食い止めなければならない。今や生物多様性の維持と保全は、全世界共通の最重要課題の1つである⁸⁾。そして生物多様性は、個別の地域における固有の種・亜種・個体群によって支えられているため、地域生態系、特に生物多様性の高い浅海域などの保全は、地球規模での生物多様性の維持・保全に直結している。

また干潟を含む浅海域に生息する底生動物の多くは、生活史の初期段階を浮游幼生として過ごす。このためある海域で干潟が減少すると、それらの干潟からの浮游幼生供給が途絶え、近隣の他の海域における種数・個体数が減少する可能性が指摘されている(風呂田、2005)。東京湾の干潟とそこに生息する底生動物の減少が、たとえば仙台湾の干潟における生物多様性にも影響を及ぼす可能性があることは、東京湾沿岸の住人としては心しておかねばならない。さらに、東京湾における干潟の減少は、東アジア・東南アジアで越冬し、シベリア、アラスカで繁殖する渡り鳥にも大きな影響を及ぼしている可能性がある。東京湾を含む本州沿岸域は、これらの渡り鳥の越冬地であると同時に、東南アジアから沖縄で越冬する渡り鳥の中継地点であり、食物の補給地点でもあるからだ(天野、2006)。

8) 1992年に締結された生物多様性条約には、2008年時点で日本を含む190ヶ国及びECが加盟しており、2010年秋には第10回締約国会議(COP10)が日本で開催される。

東京湾の有機汚濁軽減に向けて

今まで見てきたように、東京湾は有機汚濁の進行と埋立による浅海域の浄化機能の低下により、有機汚濁がさらに進行するという悪循環に陥っている。従って東京湾再生のために取り組むべき事柄の中の主要なものとして、浅海域の保全と再生が挙げられる。

現存する干潟・浅瀬の保全を行うことは最も重要な課題の1つである。東京湾沿岸では、神奈川県横浜市の野島干潟、東京都江戸川区の葛西沖干潟、千葉県浦安市から船橋市にまたがる三番瀬、市川市の江戸川放水路の干潟、習志野市の谷津干潟、木更津市の小櫃川河口干潟（盤洲）、富津市の富津干潟などが主な干潟・浅瀬であり、これらの場所における埋立や垂直護岸の建設は今後も行うべきではない。東京湾沿岸の埋立地には低未利用地が多く（国土交通省、2003）、土地の造成という意味においては、これ以上の埋立が不必要なことは明らかである。

また干潟・浅瀬の保全のためには、単にサンクチュアリに指定し、不可侵の状態にすれば良いわけではない。習志野市の谷津干潟は、かつては地域住民がアサリやアゲマキなどを自家消費用に採取していた場でもあったが、ラムサール条約登録湿地に指定されたため、調査等の目的以外での立ち入りが禁止され、地域住民と「切れた」関係になってしまった。谷津干潟を訪れる市民は主にバードウォッチャーであり、地域住民の中でも鳥に関心のない人にとっては、立ち入りを制限されている場所に過ぎない。そのような場も鳥の生息域として必要ではあるが、東京湾に残された干潟の中には、市民が自由に立ち入ることができ、干潟・浅瀬の生物と触れあう場もあった方が良い。知らないもの、見たこともないものに関心を持つことは困難であり、干潟・浅瀬の保全に住民の理解を得るには、まず干潟・浅瀬に関心を持ってもらう

ことが先決だからである。

また、一見したところ自然度の高い、かつての東京湾沿岸の原風景を保っている小櫃川河口干潟では、徐々に海波による底質の浸食が進行しつつある。生物多様性も減少しており、たとえば1980年代まで普通に見られた巻貝数は、すでに全く、あるいはほとんど発見できなくなっている(風呂田、2007b)。干潟等の底質浸食は、流入河川上流の状態から考える必要のある大きな問題なので、いずれ稿を改めたい。

失われた干潟・浅瀬の代替物として人工海岸を造成する試みは、東京湾でも行われている。ただし失敗例も多く、波によって砂が運び去られるため、浜を維持するために毎年砂を入れなければならない場所も存在する。一方で、千葉県市川市の人工潟湖である新浜湖では、比較的良好な干潟が保たれている。また、東京都大田区と神奈川県川崎市にまたがる多摩川河口、千葉県市原市の養老川河口では、干潟を造成していないにも拘らず干潟が自然に形成され、年々伸び広がっている(国土交通省・環境省、2004; 風呂田、2007c)。人工海岸(人工干潟も含む)の造成における失敗例・成功例や、自然状態における干潟形成の事例についても、他の水域とも比較しつついずれ稿を改めて検討したい。

おわりに

「東京湾の水質は良くなっているのでしょうか?」という質問を受けることは多い。確かに1970年代のように、硫化水素臭を放つ真っ黒などぶ川が海に直接流れ込むことはほとんどなくなっている。だが初夏から秋口まで東京湾奥部は常に赤潮状態であり、深場には貧酸素水塊が発生し、北風が吹けばすぐに青潮が現れて生物が死滅することには変わらない。湾奥には有名なテレビ局の建物もあるが、目の前で起きている「声なき惨劇」が報道される

ことは減多にない。また、家庭から出る生活排水中の有機物が東京湾の水質悪化に関わっていることを意識し、自分の行動様式（たとえば洗髪の頻度、洗剤の使用量など）を変えている市民も、残念ながらまだ少数派のようだ。

赤潮で褐色に濁った水に「親しむ」ことは困難である。潮干狩りの場である干潟もほとんどなくなってしまった。現在の東京湾は、湾奥部の東京都や千葉県都市部では特に、浅海域の持つレクリエーション機能が低下している。大量に増殖した緑藻のアオサが腐敗し、その臭気による悪臭被害もひどい。千葉名物だった「焼き蛤」の原料のハマグリは東京湾で20年以上漁獲されず、東京湾の千葉県沿岸では1987年の標本を最後に消滅したと言われてきた（黒住、2001）。上述したように小櫃川河口干潟でさえ、かつては普通にいた底生生物の中で、現在発見できないものもいる。東京湾の生物多様性は減少しつつある。

一方で、東京湾の生物はまだ死に絶えてしまったわけではない。青潮で生物が死滅した後の浅海域でも、数ヶ月以内に再び生物が現れる。移動能力の高いシャコや魚類の他、浮游幼生として入ってきた貝やカニ等の底生生物が着底して成育しはじめるのだ。浮游幼生の供給元は、青潮の被害に遭わなかった湾口部の浅海域の場合もあれば（風呂田、2005）、遠く三河湾や田辺湾の干潟の場合もあるかもしれない。また、一旦は東京湾では消滅したと考えられていたハマグリも、2000年以降小櫃川河口干潟などで稀にはあるが採集されるようになってきた。

東京湾は、再生可能な海である。その可能性を信じ、「豊穡の海」を次世代に手渡すために、研究者、行政、市民は力を合わせなければならない。

謝 辞

国立環境研究所の木下今日子博士は参考文献を送って下さった。また本学の矢頭典枝先生と阪田恭代先生からは、本稿タイトルについて有益なご示唆をいただいた。記して感謝する。

参考文献

〈日本語文献〉

- 青井 透 (2000) 「上流域都市内河川水質に及ぼす下水処理水の影響」『環境施設』80巻、68-73頁。
- 青山裕晃、今尾和正、鈴木輝明 (1996) 「干潟域の水質浄化機能 — 一色干潟を例にして —」『月刊海洋』21巻、178-188頁。
- 秋山章男 (2000) 「シギ・チドリ類の摂食行動 (一宮川河口周辺における調査)」『海洋と生物』22巻、332-339頁。
- 天野一葉 (2006) 「干潟を利用する渡り鳥の現状」『地球環境』11巻2号 (干潟特集)、215-226頁。
- 上野公輔、古賀庸憲 (2006) 「和歌川河口干潟におけるチュウシャクシギ *Numenius phaeopus* の採餌行動」『自然科学』(和歌山大学教育学部紀要) 第56集、21-26頁。
- 上原伸二、清水 誠 (1999) 「東京湾におけるイシガレイの成熟とそれに伴う肥満度・摂食強度等の変化」『日本水産学会誌』65巻2号、209-215頁。
- 環境省自然環境局生物多様性センター・(特活)日本国際湿地保全連合編 (2007) 『第7回自然環境保全基礎調査 浅海域生態系調査 (干潟調査) 報告書』
- 黒住耐二 (2001) 「ハマグリ」千葉県環境部自然保護課 編『千葉県の保護上重要な野生生物 千葉県レッドデータブック — 普及版 —』、117頁。
- 小池裕子、斎藤 徹、小杉正人、柿野 純 (1992) 「東京湾小櫃川河口干潟におけるアサリの食性と貝殻成長」『水産工学』29巻、105-112頁。
- 国土交通省 (2003) 「東京湾沿岸の現状と今後の展望」『首都圏整備に関する年次報告書 (首都圏白書)』平成15年版、第1章、第4節。
http://www.mlit.go.jp/hakusyo/syutoken_hakusyo/h15/images/h15syutoken_008.pdf
- 国土交通省港湾局・環境省自然環境局 (2004) 『干潟ネットワークの再生に向けて、東京湾の干潟等の生態系再生研究会報告書』

- 木幡邦男（2000）「海域保全のための浅海域における物質循環と水質浄化に関する研究」『国立環境研究所ニュース』18巻6号、5-6頁。
- 櫻井 泉、柳井清治（2008）「カレイ未成魚による森林有機物の利用」山下洋、田中克 編『森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産』（74-88頁）恒星社厚生閣。
- 佐々木克之（1998）「内湾及び干潟における物質循環と生物生産 26. 干潟・浅場の浄化機能の定量的評価」『海洋と生物』115巻、132-137頁。
- 佐藤正典（2006）「干潟における多毛類の多様性」『地球環境』11巻2号、191-206頁。
- 社団法人日本下水道協会「下水道の仕組」（2010年1月22日閲覧）
http://www.jswa.jp/05_arekore/03_shikumi/index.html
- 鈴木輝明（2000）「三河湾の干潟と水質浄化機能」『海洋と生物』129巻、315-322頁。
- 東京湾環境情報センター「東京湾を取り巻く環境 赤潮・青潮」（2010年1月30日閲覧）
<http://www.tbeic.go.jp/kankyo/akashio.asp>
- 千葉県水産総合研究センター「貧酸素水塊速報、2009年の貧酸素水塊（まとめ）」（2010年1月30日閲覧）
<http://www.pref.chiba.lg.jp/laboratory/fisheries/04jouhou/04tkod/04tkodflame.html>
- 富永 修、牧田智弥（2008）「沿岸域の底生生物生産への陸上有機物の貢献」山下洋、田中 克 編『森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産』（46-58頁）恒星社厚生閣。
- 内藤正明、竹下俊二、木幡邦男（1996）「閉鎖性海域における水界生態系機構の解明及び保全に関する研究」『国立環境研究所特別研究報告』20巻、30-31頁。
- 沼口勝之（2001）「アサリ漁場の餌料環境としてのセジメント」『水産工学』37巻、209-215頁。
- 風呂田利夫（1987）「東京湾における青潮の発生」『水質汚濁研究』10巻、470-474頁。
- （2005）「内湾ベントスにおける地域個体群間ネットワークの重要性」『水産総合研究センター研究報告』別冊第3号（平成17年3月）、37-46頁。
- （2007a）「生物と人との関係づくりと東京湾の環境回復」『River Front』58巻、8-11頁。
- （2007b）「第3章 海域ごとの生物相と干潟の現状・過去との比較 東京湾」『第7回自然環境保全基礎調査 浅海域生態系調査（干潟調査）報告書』

環境省自然環境局生物多様性センター・(特活)日本国際湿地保全連合編。21-29頁。

———— (2007c) 「干潟観察講座：東京湾と多摩川河口の干潟生物観察」於東邦大学医学部、5月10日開催。

http://www.tbeic.go.jp/haneda-iinkai/view/news/Download/20080517/higata_1.pdf

山尾 理 (2004) 「強成層期の東京湾奥における水質の短期変動に対する海上風の影響」『海洋情報部技報』22巻、78-84頁。

山口敦子 (2003) 「有明海のエイ類について — 二枚貝の食害に関連して — 」『月刊海洋』35巻、241-245頁。

山口啓子 (2009) 「環境モニタリングツールとしてのヤマトシジミ殻体と成長線」2009年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会(於函館、北海道大学水産学部)口頭発表。10月18日、講演番号519。

山田佳昭 (1992) 「東京内湾域における貧酸素水の季節的消長」『神奈川水産試験場報告』13巻、65-72頁。

和田恵次 (2000) 『干潟の自然史 砂と泥に生きる動物たち』京都大学学術出版会。

<外国語文献>

Bengtson, S-A. & Svensson, B. (1968) Feeding Habit of *Calidris alpina* L. and *C. minuta* Leisl. (Aves) in Relation to the Distribution of Marine Shore Invertebrates. *Oikos* 19, pp. 152-157.

Iwamatsu, S., Suzuki, A. & Sato, M. (2007) Nereidid Polychaetes as the Major Diet of Migratory Shorebirds on the Estuarine Tidal Flats at Fujimae-Higata in Japan. *Zoological Science* 24(7), pp. 676-685.

Kasai, A., Horie, H., & Sakamoto, W. (2004) Selection of Food Sources by *Ruditapes philippinarum* and *Macra veneriformis* (Bivalva: Mollusca) Determined from Stable Isotope Analysis. *Fisheries Science*, 70, pp. 11-20.

Kaspar, H. F. (1983) Denitrification, Nitrate Reduction to Ammonium, and Inorganic Nitrogen Pools in Intertidal Sediment. *Marine Biology*, 74, pp. 133-139.

Kikuchi, E. (1986) Contribution of the Polychaete, *Neanthes japonica* (Izuka), to the Oxygen Uptake and Carbon Dioxide Production of an Intertidal Mud-Flat of the Nanakita River Estuary, Japan. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 97, pp. 81-93.

Kinoshita, K. (2002) Burrow Structure of the Mud Shrimp *Upogebia major* (Decapoda: Thalassinidea: Upogebiidae). *Journal of Crustacean Biology*, Vol.22 (2), pp. 474-480.

- , Nakayama, S. & Furota, T. (2003a) Life Cycle Characteristics of the Deep-Burrowing Mud Shrimp *Upogebia major* (Thalassinidea: Upogebiidae) on a Tidal Flat along the Northern Coast of Tokyo Bay. *Journal of Crustacean Biology*, Vol.23, pp. 318-327.
- , Wada, M., Kosuge, K. & Furota, T. (2003b) Mud Shrimp Burrows as Dynamic Traps and Processors of Tidal-Flat Materials. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 247, pp. 159-164.
- , Wada, M., Kosuge, K. & Furota, T. (2007) Microbial Activity and Accumulation of Organic Matter in the Burrow of the Mud Shrimp, *Upogebia major* (Crustacea: Thalassinidea). *Marine Biology*, Vol. 153(3), pp. 277-283.
- Knowles, R. (1982) Denitrification. *Microbiological Reviews*, 46(1), pp. 43-70.
- Polte, P., Schanz, A. and Asmus, H. (2005) The Contribution of Seagrass Beds (*Zostera noltii*) to the Function of Tidal Flats as a Juvenile Habitat for Dominant, Mobil Epibenthos in the Wadden Sea. *Marine Biology*, Vol. 147 (3), pp. 813-822.
- Subramaniam, S. P. (1990) Chawaka Bay (Zanzibar, East Africa) as a Nursery Ground for Penaeid Prawns. *Hydrobiologia*, Vol. 208 (1-2), pp. 111-122.
- Tsuchiya, M. & Kurihara, Y. (1979) The Feeding Habits and Food Sources of the Deposit-Feeding Polychaete, *Neanthes japonica* (Izuka). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 36:79-89.
- Yokoyama, H., Tamaki, A. Koyama, K., Ishihi, Y., Shimoda, K. & Harada, K. (2005) Isotopic Evidence for Phytoplankton as a Major Food Source for Macrofauna on an Intertidal Sandflat in Ariake Sound, Japan. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 304, pp. 101-116.