

2018 年度（第 54 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 18-B-1

沿岸域の水環境の変遷と行政や研究の対応

横浜国立大学・教授

中村由行

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2018 年 9 月

沿岸域の水環境の変遷と行政や研究の対応

Shifts in coastal water environment and interactive responses of administrative strategies and related academic researches

中村由行

Yoshiyuki NAKAMURA

1. はじめに

沿岸海域の環境を考える上で、最近注目すべき法制度の改正や基準の追加が行われた。一つには、平成 27 年 10 月に瀬戸内海環境保全特別措置法が改正されたこと、もう一つは水質環境基準に底層 DO が平成 28 年 3 月に追加されたことである。これらはいずれも、これまで長年にわたって様々な行政施策が実施されてきたにも拘らず、依然として生物多様性および生産性の回復が十分に実感できていないこと、中でも夏期における底層貧酸素化が依然として生物生息にとって重大な障害となっているという現状認識が背景にある。さらに、特に瀬戸内法改正の中では「瀬戸内海の有する価値や機能が最大限に発揮された豊かな海とすること」という目標の考え方が明確にされている点に注目したい。沿岸環境に対するこのような施策の動向、つまり単なる水質や底質を超えて生物・生態系の保全・修復に重心を移す流れが鮮明になってきているのが、最近の特徴であると考えられる。本稿では、沿岸環境に関するこれまでの行政の取り組みやそれを支えてきた学術の歴史的流れを時系列的に振り返りながら、これまでの成果と今後の課題を著者なりに取りまとめてみたい。

2. 公害の発生とそれに対応した時代（1950 年～1970 年代ごろまで）

2-1. 点源からの汚濁発生と対策

集水域からの汚濁負荷は、言うまでもなく内湾の水質を規定する大きな要因である。環境基準が整えられ、総量規制などの諸対策が始まる以前には流域からの汚濁負荷量に関する信頼すべきデータはほとんどないが、それを反映している河川水質の記録はいくらか残っている。例えば、東京湾に注ぐ隅田川は、戦後まもなく「どぶ川」化し、悪臭を放っていたことはよく知られている。隅田川の汚濁は既に戦前にもそれなりに進行しており、1940 年において千住大橋で生物化学的酸素要求量 BOD が 10 mg/L という記録がある (Okada *et al.*, 2000)。文学作品から推定した河川水質もそれなりの汚濁を示しているという報告もある。ただし、汚濁負荷量が激減したと考えられる戦争末期と戦後直後においては泳げるほどに水質が回復したという確かな記録を考えると、当時の汚濁は可逆的で比較的短期間に回復可能な程度であったとみることができる。しかしながら、戦後の経済成長とともに隅田川の汚濁は急速に進行した。例えば、三河島地区では 1950 年度に BOD が約 10 mg/L であったものが以後急増し、最も汚濁が深刻であった 1964 年度では 63 mg/L という非常に高い値が記録されている (Okada *et al.*, 2000)。この間 1961 年には、名物の早稲田・慶応レガッタがあまりの水質悪化のために選手の健康を考慮して中止されるという事態が起きている。1964 年以後は、工場排水の規制や下水道の整備などの対策が進められ、1970 年代後半には、BOD の環境基準 (10 mg/L 以下) がほぼ達成されるようになっている。同様の傾向は、東京湾に注ぐ他の主要河川、すなわち荒川・中川・江戸川・多摩川・鶴見川でもみられる (Okada *et al.*, 2000)。多摩川の水質悪化は隅田川にやや遅れて始まったが、その後は類似の経緯をたどっている。このようなことから、東京湾に流入する汚濁の質としては、BOD や COD などの有機汚濁で見る限り、概ね 1960 年代から 70 年代初頭が最も悪化していたと思われる。1970 年代には多摩川の水面はいたるところ洗剤の泡で覆われていた。

この間、汚濁した河川水の影響を受け、海域の側でも例えば 1958 年に江戸川の本州製紙の工場排水による漁業

被害をめぐる事件がおこるなどの水質の問題が急激に生じていた。東京湾以外でも、1960年代の田子の浦を中心とした製紙工場排水によるヘドロの堆積が社会的に注目された。江戸川の水質問題を契機として1958年に「水質保全法」と「工場排水規正法」が制定され、これらは併せて旧水質二法とよばれる。1956年には水俣病が認定され、また神通川のカドミウム汚染によるイタイタイ病の発生があるなど、重金属汚染による重篤な健康被害が生じたのもほぼこの時代である。重金属のような健康被害やパルプ工場排水のような極端な水質悪化は、ほとんどが特定の工場排水による点源が原因であったため、対策もそれに即したものが主体であった。

旧水質二法によるいわば急ごしらえの対応を経て、現行の環境基準のベースとなる水質基準が、1967年に定められた「公害対策基本法」、および1970年の「水質汚濁防止法」が契機となって定められた。特に後者によって事業場等からの排水に対してCODを対象項目とした濃度規制が開始された。当時は、過度な有機性排水による公害が大きな社会問題となっており、水質汚濁の程度は極めて著しいものがあつた。海域で最も緩い基準値であるC類型はCODが8mg/L以下、DOが2mg/L以上に設定されたが、このDOは特に底層水を対象としたものではないことを考えると、当時生物が全く生息できない海域がかなりの程度広がっていたことを示唆する数値である。

また、瀬戸内海では1972年に播磨灘を中心とした大規模赤潮が発生し、養殖ハマチ1400万匹の斃死と71億円の漁業被害が生じた。特定の海域を対象としたはじめての法律として「瀬戸内海環境保全臨時措置法(瀬戸内法)」が1973年に制定され、5年後には同特別措置法として恒久化された。この法律においては、有機物・栄養塩類などの流入負荷の削減と埋立て抑制が2本柱であった。当時は様々な排水が未処理のまま海域に流入し水質の悪化をもたらしていたとともに、埋立て用材や建設用材のために海底の土砂採取が盛んであり、瀬戸内海では岡山・広島・愛媛などの各県海域でそれぞれ延べ数億立方メートルもの土砂採取が無制限に行われていた。当時の瀬戸内海における濁りの主因はこの土砂採取によるものであると認定され、以後全面禁止に向かう契機となった。このような海底の掘削は東京湾などの他の海域でも無秩序に行われ、大規模な掘削跡地が窪地となって海底に存在しており、現在に至るまで底層水質の悪化を引き起こす負の遺産として残存している。

CODを中心とした水質基準の体系は、単なる水質ばかりでなくそれなりに生物・生態系への影響を考慮して設定されていたといえる。CODは酸素消費量の単位であるから、例えば3mg/LのCOD値を持つ海水はそれだけの量の酸素を消費するポテンシャルを持つといえる。夏季の海水の酸素濃度飽和量は約7mg/Lであるので、酸素で飽和した海水であっても、 $7-3=4$ mg/L程度まで酸素濃度が低下する可能性がある。その濃度はほとんどの生物にとっては生存可能な濃度であり、例えば水産用水基準では、夏季に漁場において最低限満たすべき濃度として4.3mg/Lと定めている。このことから考えると、B類型の海域でCOD値が3mg/L以下とされているのは、この目標海域ではたいていの水生生物の生存を可能とする濃度レベルといえる。さらにDO濃度が低下して恒常的に2mg/L以下になると、ほとんどの底生生物の生息がおぼつかない事実上酸欠の海域となる。先ほどと同じ換算をすると、対応するCODは5mg/L以上ということになる。東京湾のCODと貧酸素水塊の分布を比べると、夏季に表層のCODが5mg/Lを超える領域は川崎と木更津を結ぶアクアライン以北の湾奥部、および川崎から横浜沖に至る沿岸部海域に対応しており、これらの海域は、底層DO濃度が2ないし3mg/L以下となる貧酸素海域にほぼ一致していることは興味深い。なお、上述の議論はCOD構成物質が易分解有機物を主体としていることを前提としている。現在ではこの前提が崩れ、水中での難分解有機物の割合が増加しており、定量的な議論を難しくしていることも課題となっている。この現象は主要な湖沼においても共通に見られ、その成因をめぐって議論がなされている。

1970年の「水質汚濁防止法」制定当時以降現在に至るまで、基準設定時点での議論はともかく、ひたすら「水質」基準という目標値の達成に向けて、総量規制などの様々な対策がとられてきた。そうする意義は、もちろんかつては十分にあつたといえる。なぜなら、当時の水質の悪化があまりに激甚であつたため、水質改善によって生態系の極端な劣化も同時に改善され、生物の生息にも有利になると期待されたからである。すなわち、水質項目改善の方向性と生態系の修復の方向性についての人々の利害やねらいが概ね一致していたため、水質汚濁指標の削減に向けて、関係者がともに手を携えて努力をすれば良かったからである。

2-2. 水辺の利用面から見た東京湾（1964 年東京オリンピックまで）

年代的には 2-1. の公害時代に概ね重なるが、東京湾における人々の水辺空間の多面的な利用面から見たとき、一つの区切りとして 1964 年東京オリンピックを挙げる可以考虑。なぜなら、東京都内の水面においてものりなどの漁業活動が盛んに行われ、江戸前の豊かな幸を享受できていたのが、このころまでであったからである。江戸の風物誌として、アナゴ、（浅草）のりと佃煮、天ぷら、などは良く知られており、それらの起源のおおよそも推定されている。のりの養殖は東京オリンピック前年まで大森海岸で続いてきたが、その年に漁業権が放棄された。1960 年に撮影された航空写真に写るのりひびの分布を見ると、東京の前面海域一帯に広大に広がっていることに驚かされる。当時のひびが竹を舟から突き刺して作られたことを考えると、広大な浅瀬の存在を再認識することもできる。当時の様々な写真資料からは、東京都内の海域においても、平和島まで海水浴を楽しむ人々やカキの養殖などが羽田で行われていた様子がわかる。また、大量のはぜ釣りの漁船の賑わいやアオギスの脚立釣りの有様などは、浮世絵にも数多く残されている。このような江戸時代から連綿として続いた人々の海とのふれ合いが当時までは盛んにあったが、少なくとも東京都内海域では 1964 年を境にその歴史が断絶してしまったと言える。その後は、埋め立てられた浅瀬は臨海工場地帯や羽田空港・東京港などの空港港湾施設等に姿を変えた。一般の人々が利用してきた浅い海が高度経済成長のための土地に転換した時代であったといえる。以後現在に至るまで大規模な沿岸立地産業や物流・エネルギー施設等のために利用されてきた沿岸部は、人々を物理的に海辺から遠ざけるばかりでなく、人々の関心という心理面からも海から遠ざける要因となっているものと考えられる。

3. 富栄養化とその包括的対策の時代（1970 年台～2000 年台ごろ）

3-1. 水質汚濁対策強化の時代（1970 年代～1990 年代）

公害時代の汚濁負荷が、工場排水に代表される点源によるものが中心であったのに対し、その後の富栄養化による水質障害は生活排水に起因するものの割合が無視できない場合が多い。海域では赤潮が常態化し、貧酸素水塊の発達による無生物海域の出現、東京湾ではさらに無酸素水塊の湧昇にともなう青潮などの現象がしばしば報告されるようになった。

このような事態に対応するため、水質総量規制に代表される対策が開始された。水質総量規制は、閉鎖性海域の水質汚濁を防止するための制度であり、1978 年に導入された。対象となる水域は、東京湾、伊勢湾及び瀬戸内海であり、それらの水域へ汚濁負荷のある集水域を指定地域として、汚濁の原因となる項目に対して、流入の総量を規制しようとするものである。当初、具体的な指定項目として化学的酸素要求量（COD）が定められていたが、水域内部での一次生産を抑制する必要があることから、2004 年度を目標年度とする第 5 次総量規制から、窒素及びリンが指定項目に追加された。従って、この時期は水質汚濁対策を強化していった時代であると言える。

海域での有機汚濁の原因が有機物の流域からの直接的な負荷によるものか、栄養塩の供給によって内部生産の結果生じたものであるかは、水域の COD 削減を前提としたときに規制対象物質の重点目標を定める上で重要である。当時そのための手法として、 Δ COD 法、クロロフィル法などが考案され施策に反映された。 Δ COD 法は季節的な COD 測定値の変動データをもとに、一次生産が低い冬季の COD 値を外部負荷の影響と見て、夏期の COD 値との差を内部生産とみなす簡易手法である。また、クロロフィルの測定値が得られる海域ではクロロフィル値と COD の相関関係から、クロロフィルがゼロの切片から COD 外部負荷量の寄与を推定し、そのからの差を内部生産の寄与分とする手法である。いずれも簡易手法であるが外部負荷と内部生産の相対的な寄与度を知る上で有効である。この手法により、たとえば東京湾をはじめとする閉鎖的な内湾の多くで栄養塩対策の重要性が強調され、窒素・リンの規制に進む理論的なベースとなった。また、原単位法による負荷量の積み上げ算定が実施され、生活排水、産業排水、山林などの自然（面源）による負荷の区分がされ、それぞれの寄与が算定されるようになった。その結果、瀬戸内海では相対的に工場排水の寄与が大きいのに対して、背後地に多くの人口を抱える東京湾などでは

生活排水の寄与が圧倒的であることも認識されるようになり、下水道の整備の重要性が強調され、陸域での負荷量削減に向けた対策が進展した。総量規制がその代表的なものである。

水質総量規制の効果として、三大湾の水質、特に表層の COD や全窒素・全リンなどは確実に改善傾向をみせた。図 1 は、第 5 次総量規制終了時点においてとりまとめられた、COD 発生負荷量と平均水質（表層の COD 観測値）の関係を整理したものである（中央環境審議会、2005）。図中には総量規制対象となっている各内湾において、5 ヶ年毎に目標が定められてきた総量規制の段階毎に、負荷量の減少量に応じて、相対的に水質が改善傾向にある様子が示されている。特に負荷量の大きな東京湾や大阪湾での削減効果が著しい。同じ海域で COD や TN、TP の水平分布を見ると、例えば東京湾において汚濁の進んだ湾奥部ほど水質の改善傾向は顕著である。反面、瀬戸内海では図を見る限りほとんど効果が現れていない。

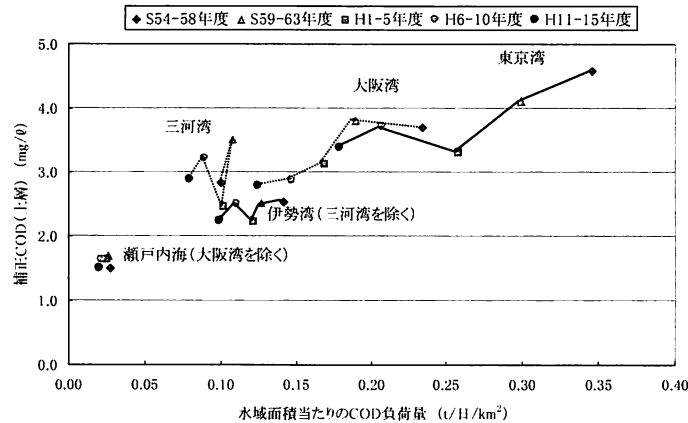


図 1 各内湾における COD 発生負荷量と表層水 COD 観測値の関係の変遷（中央環境審議会、2005）

このような内湾の水質改善の傾向は表層水質では明らかであり、赤潮の発生件数の減少や一部海域での透明度の増加、クロロフィル濃度の低下が報告されるようになった。一方で、底層水質特に貧酸素水塊の変化で見ると効果が現れておらず、また生態系劣化の解消にはつながらずほとんどの海域で漁獲量の低下傾向が継続した。そのためもあって、総量規制の有効性や在り方を巡っては、規制を受ける産業界、さらには海域の利用者としての水産関係者からも疑問の声が上がり始めた。かつては、悪化した水質や生態系の改善に向けて、水質基準を達成する方向性が合意されており、その時点では負荷量の削減こそが最重要課題であった。そのことの理由・意義は、上述したように当時は充分にあったが、対策が進むにつれ相対的に意味合いが変化している。さらに、削減単位量あたりに必要なコストも増大しているため、対策のコストパフォーマンスも低下し始める困難な時代が始まってきている。

3-2. 水生生物の生息に着目した法制度の整備や考え方が展開した時代（1990 年代～2000 年代）

1993 年には環境基本法が成立し、1994 年には環境基本計画が閣議決定した。従来の環境基準の体系は新しい環境基本法のもとで位置づけられるようになるとともに、水生生物の保全の観点が環境基本法にも明記された。環境基本計画の目標のひとつに共生が取り上げられ、健全な生態系を維持・回復し自然と人間との共生を確保することとしている。1995 年には生物多様性国家戦略が策定され、2002 年の同改訂では、保全の強化、自然再生、持続可能な利用という 3 方針が掲げられた。水生生物の減少や多様性の喪失には、生物生息場の破壊・喪失、化学物質の影響、外来種の侵入が考えられる（須藤、2004）。この時代にはこれらの課題に対してそれぞれ法制度の整備が行われた。

まず生物生息場の回復を促す法制度として、2002 年に自然再生推進法が成立し、地域の多様な主体による自然再生を推進するための枠組みや手続きが定められた。全国一律の規制ではなく、個々の内湾の特性や地方の実情に合わせた自然の再生の取組が推奨されるようになった。

表 1. 1990 年代以降約 10 年余り時期における環境施策と沿岸域の環境動向

年	沿岸域の環境動向	国内の環境動向	国際的な環境動向
1992 (H4)			地球サミット開催（リオデジャネイロ）持続可能な開発）生物多様性条約の採択
1993 (H5)		生物多様性条約締結 環境基本法制定	生物多様性条約が発効
1994 (H6)	新たな港湾環境政策<エコポート>策定	環境基本計画を閣議決定 （環境基本法に基づく）	
1995 (H7)		生物多様性国家戦略の策定	
1997 (H9)		環境影響評価法策定 河川法改正（河川環境の整備と保全）	温暖化防止条約京都議定書の採択
1999(H11)	海岸法改正（海岸環境の整備と保全）		ラムサール条約締結国会議
2000(H12)	港湾法改正（環境の保全への配慮を規定）		生物多様性条約バイオセーフティー議定書採択
2001(H13)	「海の再生」が都市再生プロジェクトに決定（東京湾再生推進会議立ち上げ）	21世紀「環」の国づくり会議報告 （「自然再生型公共事業」を記述）	
2002(H14)		新・生物多様性国家戦略の策定 自然再生推進法成立	地球サミット開催（ヨハネスブルク）
2003(H15)		水生生物保全のための環境基準設定（亜鉛の基準化）	
2004(H16)		外来生物法の施行	

次に化学物質の影響に対しては、水生生物保全のための環境基準が設けられた。まず2003年に亜鉛が指定され、以後ノニルフェノール、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩が追加された。現状ではこれらの基準は生活環境項目の一つとして位置づけられているが、本来的には生態系保全項目などのような設定が必要であるという議論がある（須藤、2004）。

外来種対策に関連した法制度としては、環境省の答申「移入種対策に関する措置の在り方について（答申）」を受け、外来生物法が2005年に施行された。

このように、2000年代に入り生物の生息環境にも政策の目が向けられるようになってきた。これらの法制度の

整備に伴い、実務の面でも法制度の精神を活かし、より具体的に保全を進めるための技術開発が行われ始めた。例えば生物生息場作りの技術として干潟・浅場整備があり、また化学物質影響を調べるための手法として生物試験法（バイオアッセイ）技術などがある。干潟・浅場整備は、1980年代に東京湾奥部の葛西臨海公園、横浜金沢海の公園等の先駆的ななぎさ整備事業に始まり、東京港や大阪港野鳥園、中山水道航路事業の浚渫土砂を利用した三河湾浅場・干潟造成、瀬戸内海の五日市干潟造成、尾道糸崎港干潟造成などの事例が積み重ねられた。当初は人工的な干潟造成の効果に対して懐疑的な意見も多かったが、試行錯誤を重ねるうちに次第に造成技術のノウハウや手順・手法の知見が集積し、整理されるようになってきており、現在では環境修復に欠かせない代表的な技術の一つとみなされるようになった。環境修復の基本的な考え方である「順応的管理」手法もこの時期に次第に定着し、事業当初から順応的管理手法を取り入れた環境整備が、例えば岡山県日生地区のアマモ場造成などに活かされるようになってきている。また、環境修復による効果を定量化する手法として、HEPやWETなどの生態系評価手法も広く使われるようになった。

4. きれいな海から豊かな海への模索の時代（2000年代以降）

4-1. 負荷量削減を中心とした施策の限界の認識

総量削減に代表される施策によって、内湾の水質が改善される傾向は表層水質で見ると限り明らかであり、赤潮の発生件数の減少や一部海域での透明度の増加、クロロフィル濃度の低下が報告されるようになった。一方で、底層水質特に貧酸素水塊の変化で見ると効果が現れておらず、また生態系劣化の解消にはつながらずほとんどの海域で漁獲量の低下傾向が継続した。そのこともあって、総量規制の有効性や在り方を巡っては、規制を受ける産業界、さらには海域の利用者としての水産関係者からも疑問の声が上がり始めた。かつては、悪化した水質や生態系の改善に向けて、水質基準を達成する方向性が合意されており、その時点では負荷量の削減こそが最重要課題であった。そのことの理由・意義は、上述したように当時は充分にあったが、対策が進むにつれ相対的に意味合いが変化している。さらに、削減単位量あたりに必要なコストも増大しているため、対策のコストパフォーマンスも低下し始める困難な時代が始まってきていたといえる。

2004年度までの水質汚濁に関する環境基準の達成状況や総量規制の効果、水質汚濁の機構などが議論された結果、2005年5月に「第6次水質総量規制のあり方について（答申）」がなされた（中央環境審議会、2005）。答申の中では、「東京湾、伊勢湾及び大阪湾においては、環境基準達成率が低く、しかも大規模な貧酸素水塊が発生しているので、さらに水質改善を進める必要があると考えられる」とされた。一方で、「瀬戸内海（大阪湾を除く。）の水質は他の指定水域に比較して良好な状態であり、環境基準をほぼ達成した窒素及びリンに関しては、現在の水質を維持することが適当である」と述べられている。瀬戸内海では、関係府県が定める指定物質削減方針によって、1980年度から他の水域に先駆けてリンの削減の取り組みが行われてきたが、ここにきて富栄養化対策に一定の区切りがなされたことになる。

汚濁が未だ深刻であるとされた、東京湾、伊勢湾、大阪湾では、行政主導で湾域毎に再生に関する取り組みが始まった。まず、東京湾では関連する国や周辺自治体が一体となって「東京湾再生推進会議」が発足し、東京湾再生の目標とそのための施策について、2003年に「東京湾再生のための行動計画」が策定された（東京湾再生推進会議）。再生目標として、「快適に水遊びができ、多くの生物が生息する、親しみやすく美しい『海』を取り戻し、首都圏にふさわしい『東京湾』を創出する。」と謳われ、目標を達成するための施策が議論された。なお、計画期間である10年後には目標の評価及び見直しがおこなわれ、2013年からスタートした二期目の東京湾再生目標では「『江戸前をはじめとする』多くの生物が生息する」と修正された。豊かな海への志向がさらに強まったものと言えるであろう。

同様な取り組みは、大阪湾でもなされており、大阪湾再生推進会議が、2004年に大阪湾再生の目標を「森・川・海のネットワークを通じて、美しく親しみやすい豊かな『魚庭（なにな）の海』を回復し、京阪神都市圏として市民が誇りうる『大阪湾』を創出する。」と定めている（国土交通省近畿地方整備局ほか、2005）。伊勢湾、広島湾

にも再生のための試みが広がっている。

ここで注目したい点は、様々な関係機関の合意目標である再生の目標に、美しい海という表現とともに、「多くの生物が生息する」（東京湾）、「豊かな『魚庭（なにな）の海』（大阪湾）」という表現が見られることである。伊勢湾や広島湾においても、同様な表現を入れた目標策定に向けての努力が現在なされているようであり、「美しさ」とともに、「豊かさ」が共通目標としての比重を増してきたと考えられる。

以上のような状況から判断すれば、2000年代以降、人々が求めるこれからの海のあり方の目標像が、「美しい海」あるいは「きれいな海」から、「豊かな海」へと転換しつつある時期に入ったといえそうである。目標をかなえるための沿岸域管理についても、単なる COD 目標を柱とした水質管理から、生態系管理へシフトする必要がある。そのための指標は何かが求められる。あるいは、水質管理を行うにしても何のための水質管理かが常に問われる時代になったと言えるのではないだろうか。

このような流れを受け、総量規制の意義や今後の規制の在り方について見直しの議論が始まった。環境省は、第6次総量規制答申後に、有識者による「今後の閉鎖性海域対策を検討する上での論点整理」（今後の閉鎖性海域対策に関する懇談会、2007）を行い、従来の水質指標の見直しと共に、状態指標として新たに底層の溶存酸素濃度 DO と透明度を追加する方向で議論がなされた。単なる水質から、より直接的に生物の生息状況を反映できる指標へと転換が模索され始めたといえる。この時代の議論が契機となり、最終的には平成 28 年 3 月に底層 DO が環境基準に追加され、同時に「沿岸透明度」を地域環境目標とすることにつながるのである。

4-2. COD 指標の有効性の限界

「論点整理」が行われた時期には、COD の指標としての有効性や栄養塩負荷量削減に対する疑問の声も上がるようになっていた。

まず、COD の変質の問題がある。1970 年前後からみれば、東京湾での COD や全窒素・全リンの濃度レベルはかなり改善しており、また負荷量を容易に削減できる場所は少ない状態にある。同じ負荷量（例えば一日何トンかの COD）を減らすとしても、それにかかるコストが以前とは比べものにならないくらい高価になっている。また、質的には、例えば規制開始時点での COD 3 mg/L と、現在の 3 mg/L では、生態系に与える影響の意味が違ってきている。陸域からの有機物負荷は、かつてはすぐに酸素を消費する易分解の汚濁物質が主体であった。ところが、様々な水処理を経て海域に有機物が流入する現在では、相対的に難分解性有機物（COD）の寄与率が増加しており、例えば以前と同じ COD 値であっても貧酸素化にはつながりにくい。

標準的に使われている COD は過マンガン酸カリウムによる酸素消費量であり、有機物の分解性が中途半端であることなどから、精密な物質収支（炭素や酸素収支）の議論には不向きであり、研究者の間ではどちらかと言えば評判が悪い指標である（上述した貧酸素化との関連はあくまで概念的なものである）。特に、経年的に海水中の有機物の質が変化しているとすれば、COD 値にも影響を与えているはずであり、長い年月にわたる COD 値の経年変化や、基準達成率の変化を議論する際には注意が必要である。

次に、栄養塩（窒素、リン）の沿岸生態系での重要性の問題がある。生物生存のためには窒素やリンは必須な元素であり、人為的に合成された有害化学物質の取扱いとは異なることに注意が必要である。すなわち、海域への適度な流入は生物生産のためには有効であるが、過度な流入負荷はむしろマイナスとなる（同じことは有機物でも言え、適度であればむしろ生物生産には有効である）。

水質基準が設定された当時は、まさに海域へ過度な有機物や栄養塩類の負荷があり、赤潮の頻発に見られるような表層での極端な内部生産（COD の海域での増加）の増大や、底層での大きな酸素消費と貧酸素化・無酸素化につながっていた。つまり、人にたとえれば、特に栄養塩についてはいわばダイエットが必要な状態にあったといえる。しかしながら、これからもダイエットを継続する必要があるのだろうか。

特に沿岸域の水産をめぐる栄養塩管理については、単なる負荷削減に対して厳しい声が上がっている。沿岸の水産については、特に戦後の沿岸部の開発によって次第に漁労海域が狭められ、漁獲対象種も変化してきた

といえる。例えば、水産業全体傾向としてのりの養殖へのシフトが見られるが、これは高い栄養塩負荷を前提として沿岸漁業が適応してきた結果とも言える。しかしながら、近年、栄養塩負荷が削減され、海域での栄養塩濃度が低下傾向になると、のりの養殖に必要な栄養レベルが限界に近づき、気象条件等によっては植物プランクトンと競合して不足してしまうという現象も顕在化しはじめている。今後は、ふさわしい沿岸漁業とは何かを問いながら、陸域からの栄養塩負荷が生物生産にうまくつながる様な工夫をする、栄養塩管理を行うべき時代に入っているといえる。

このように、栄養塩類は生物生産には必要な物質である。これからは、栄養塩の一方向的な削減ではなく、生物生産への持続可能な利用に向けた管理が必要な時代である。これらを受け、播磨灘や三河湾では下水道の管理運転が試行的に行われ始めている。そうすると、下水処理場の技術はすでに海域で窒素やリンの削減のみを一方向的に行うための技術ではなく、それが生物生産にどのように役立てられるかが常に問われる時代になりつつあるといえる。

4-3. 沿岸域生態系の多様な価値が認識された時代（2010年代以降）

生物多様性条約第10回締約国会議が2010年10月に名古屋で開催され、遺伝資源の取得の機会（Access）とその利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分（Benefit-Sharing）に関して、名古屋議定書が採択されるとともに、「生物多様性戦略計画2011-2020及び愛知目標」が採択された。会議では、「SATOYAMA イニシアティブ」としてわが国独自の取組みとしての「里山・里地・里海」の考え方が広く世界に発信された。これは、2000年に国連が提唱したミレニアム生態系評価に伴い、2006年から始まった日本の里山・里海と生態系サービスを評価し、その保全や持続的利用・管理に向けた科学的検討がなされた結果を発信したものである。環境省ホームページには里海のページも開設され、沿岸域の人の利用こそが生物多様性を確保・増大させる意義が強調されている。里海については、瀬戸内海を主たる場として研究や実践活動を積み重ねてきた研究者の長年の努力に負うところが大きい。

これらの流れを受け、沿岸域の生態系が持つ多様な価値が整理され、例えば生態系サービスとして経済表かを加える試みが開始された。

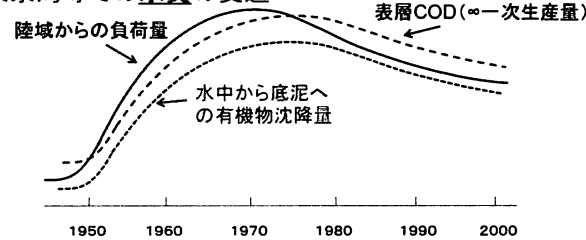
5. 今後の展望

5-1. 水質や生態系の改善を妨げる理由の整理

沿岸海域の水質、特に表層水のCODや全窒素・全リンは次第に改善傾向にあるが、東京湾・伊勢湾を対象とした研究事例によれば、生物生息に強く影響する貧酸素水塊（夏季の底層DO濃度が低い海域）の規模や発達時期などは、あまり改善が見られていない。底質の有機汚濁の傾向もほぼ同様である。今後採用すべき水質基準項目として、底生生物の生息に直接影響を与える底層DOが採りあげられたのも、このような背景がある。貧酸素水塊の発達の程度や底質の傾向が、最近の表層水質の改善傾向に一致しない点については、今のところこの現象を十分に定量的に説明した研究例はなくパラドックスとなっている。この点に関し、底質は過去の汚濁履歴を累積的に保存した性質を有することから、著者は水質と底質の相互作用の観点から図-2のように概念説明を試みている。つまり、汚濁が進んでいない時代には底質へ沈降した有機物量は大部分が好氣的に分解され、これは自然浄化として系外から有機物除去される。しかしながら富栄養化が進行すると好気分解は一部にとどまり沈降有機物は嫌気分解されるか残りが蓄積される。嫌気分解されても有機物は等価な酸素消費物質に転換されるため、酸素消費量（要求量）としては変わらない。そのため、底泥には次第に酸素消費物質が蓄積することになり、海域外部から負荷量が減少してもその傾向が続く。そのため、負荷削減後も底質の汚濁やその影響を受けた貧酸素水塊の発達が継続することになる。

負荷量が減っているのに、なぜ貧酸素化や底質は回復しない？

東京湾等での水質の変遷



東京湾等での底質の応答

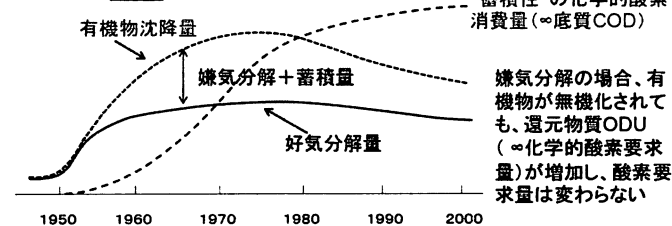


図-2 東京湾における水質の変遷と底質の長期的応答

東京湾ではもともと底生系の役割が大きく、底質の悪化や貧酸素化の進行の悪影響は顕著に生態系の劣化につながりやすいと考えられる。生態系については、少なくとも東京湾で顕著な改善傾向は見られていない。その最大の原因としてあげられているのは、埋め立て等による沿岸地形や海底地形の改変に伴い、干潟・浅場等の活発な生物生息場（底生生態系）が喪失したことである。類似の影響と底生二枚貝による水質浄化効果、貧酸素水塊への軽減効果は三河湾で強調されている（中田，2007）：鈴木，2015）。

現状では、かつては広大に広がっていた干潟や浅場などの生物（特に底生系）の生息場が、過去数十年にわたって、極端にかつ単調に減少してしまっている状況にある。埋め立て等による干潟・藻場や浅場の喪失とともに、埋立て用材として海底の土砂が採取された結果、海域に海底窪地が残存していることや、航路・泊地の建設による海底地形の改変、などの影響も懸念される。さらに、沿岸地形を保全してきた陸からの土砂供給も減少している可能性がある。

このような地形的な要因は、放置していてもかつての状態には決して復元しない。むしろ、干潟・浅場の積極的な拡大が必要な状態であると考えられる。東京湾などの内湾再生において、負荷量削減の役割は次第に終わりつつあり、生物生息場につながる海域の修復の重要性が増しているといえる。

このような議論に根拠を持たせるため、生態系モデルによる解析が有効である（相馬ほか，2008；Sohma *et al.*, 2008）。モデル解析の結果、東京湾において生物生産の「豊かな海」を再現するためには干潟・浅海域を修復することが不可欠であり、単に負荷量の削減を継続しても課題の解決にはなりにくいことを示している。

5-2. 今後の対策技術メニューの在り方（浚渫と覆砂の比較）

以上述べてきたように、今後の内湾での水質や生態系回復に向けた対策メニューの在り方としては、生物生息にどれだけ役立つか、生態系の回復にどう寄与するのか、と言う視点や評価が必要である。そのために、生物生息場の拡大、あるいは生物生息に直接影響する酸素環境や光環境を改善する技術が体系化される必要がある。

豊かな海を実現するために必要な技術とは何かについて、ここでは浚渫と覆砂を例に具体的に整理してみたい。浚渫と覆砂は、いずれも、富栄養化対策（底質汚濁対策）のメニューとして候補に挙げられ、また実地にも適用されてきた対策であるが、その効果は短期的で持続しない、などの批判も共通の課題として指摘されてきた。しかしながら、豊かさの実現に向けた効果を考えると、両者の意義はかなり異なると思われる。

覆砂は（ほとんどの）生物生息に有利な砂質土を用いることから、直接に生物生息場作りに寄与している。一方

で、浚渫は汚濁物質の除去に主眼が置かれており、水質や底質改善の（短期的な）目標達成のための施策である。浚渫によって粘土地盤がむき出しの状態となる現場もあり、内部負荷削減や底泥による酸素消費削減対策としてはそれなりに意味があっても、生物生息場の拡大にはつながらないことが多い。底生生物の増加が見られないとすると、生物作用による浄化作用があまり期待できないため、富栄養化した海域での効果（酸素消費速度の低減、栄養塩類や COD 溶出速度の低減）の持続性も覆砂に劣るとみてよい。対策コストが高価であることを加味すれば、富栄養化対策としての浚渫は原則として停止すべき時期にある。

一方で覆砂の効果を見てみると、海域での実証試験でも、覆砂域では10年以上の長期にわたって効果が持続している例が多数報告されている（堀江ほか，1996；福岡市港湾局，2004）。特に生物生息場作りには有効であり、今後も必要な対策メニューとして残すべきである。最新のモデル解析の結果からは、岸辺から比較的浅い部分までの海底地形の復元と、それをベースにした底生系と水中の系（浮遊系）の相互作用の復活がどれくらいできるかが、生態系復活の鍵になると考えられる。そのため、覆砂対策を施す海域としては、貧酸素の影響が少なく、かつ光の透過も期待できる浅い沿岸部での覆砂を優先すべきである。これらの努力は相互補完的に機能し合い、生態系回復のヒステリシスの幅を狭め、応答時間を速やかにすることにも寄与すると期待できる。

覆砂では、干潟等の生物生息場作りと共に、場の造成に必要な砂質またはそれに替わる代替材料の確保が重要である。将来的には陸からの無理のない土砂供給を促す仕組みが必要となる。但し、このような流域土砂総合管理に基づく土砂の十分な供給の回復には時間がかかるものと思われる。さしあたって、短期的には、浚渫土砂やリサイクル材料等、砂の代替材料の開発が重要である。これらの候補となる材料の安全性を確認しつつ、海域に利用する技術開発が望まれる。

5-3. 今後の指標や評価の在り方について

従来までは、水質基準の達成こそが内湾環境管理の目標であり、干潟の造成などもそのための対策メニューの一つとして位置づけられ、干潟の COD や窒素・リン浄化力を原単位で表現する工夫などもなされてきた。確かに干潟や浅場は生物活動を通した浄化力に優れ、その寄与は大きいと考えられる。しかしながら、生物生息場の確保や造成が効果を挙げるためには一定の栄養の供給が前提であり、従来のやり方はいささか主客転倒した議論をしてきた様に思われる。今後の内湾環境管理の目標像としては、多様で豊かな生物生産をあげるべきであり、そのための手段として干潟・浅場の修復を位置づけること、さらにはそれを通した底生系の回復と浮遊系との物質循環の円滑さの復活を図ることは、本来の干潟・浅場の生物生息場としての中心的な機能に主眼を置くものであり、より合理的であるといえる。

今後、内湾の環境修復においては、干潟・浅場のように岸辺に近い部分の対策努力が報われるような指標化も必要となる。例えば、湾域全体での施策効果を表す指標として貧酸素水塊の面積や体積を選んだ場合には、広範な、湾中央部の貧酸素化した海域が対象となるために、環境施策の効果が過小に評価される恐れがある。貧酸素水塊の形成がその時々気象や海象の影響に敏感であり、効果が抽出されにくいと言う問題もある。生物生産としては、沖合よりもむしろ浅い海域での酸素環境の変化の方が重要であるため、そのような浅海域での酸素環境改善効果を検討する方がより直接的であり、合理的であるといえる。

生物生息の程度を間接的に表現する指標として、まず生物生息が可能な場所としての浅場の面積が考えられる。定量的な議論が可能なように浅場を定義する方法としては、例えば光環境の尺度としての透明度を利用することが考えられる。透明度の約 2 倍の水深までの浅海域は光合成による生産が呼吸による消費を上回る水深とされており、その様な「浅場」は高次の生物活動を保証する好適な酸素環境が維持できる尺度である。このように浅場を定義すれば、干潟・浅場の造成による直接的な浅場の増加として評価したり、様々な環境施策の効果を、透明度の増加を通した浅場の増加効果として表現することが可能となると思われる。現在、水質管理上有用な水質項目として、底層 DO と並んで沿岸透明度が地域環境項目に指定されたが、以上のような尺度を用いれば、測定された透明度の有効活用にもつながると思われる。

6. 終わりに

本稿では、過去約 60 年以上あまりにわたる沿岸海域の水環境の変遷に関し、それぞれの時代における水環境の中心的な課題とされた事項や行政、研究面の対応について簡単に振り返った。時代区分は著者独自の見解に基づくものでありそれについては異論も多いものと思われる。また、ページ数に限りがあるが沿岸海域の再生の目標像やそのための指標についても著者なりに焦点を絞って記述した。そのため、より具体的な個々の対策要素技術については述べることは出来なかった。各種要素技術に関心のある方は関連の文献を参照頂きたい(例えば、中村, 2006)。また、水質汚濁をもたらす物質として、ダイオキシン類や TBT などの微量有害化学物質の影響やその環境環境・評価技術、マイクロプラスチックや福島原子力発電所事故後の放射性核種による汚染などの話題に触れることができなかった。さらには、近年活発に行われている気候変動の緩和策や対応策との関連研究、なかでもブルーカーボン研究のご動向についても記述することができなかった。なお、本稿は著者の過去の著作(中村, 2009)をもとに、修正を加えたものであることとお断りしておく。

参考文献

- Okada, M. and Peterson, S. A., Water, 2000: pollution control policy and management: the Japanese experience, Gyosei. Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., and Walker, B., 2001: Catastrophic shifts in ecosystems, *Nature*, Vol.413, 591-596.
- 国土交通省近畿地方整備局ほか, 2005: 平成 16 年度大阪湾の環境改善方策(海域)検討会報告書。
- 今後の閉鎖性海域対策に関する懇談会, 2007: 今後の閉鎖性海域対策を検討する上での論点整理。
- 鈴木輝明, 2015: 海洋理工学会顕功賞を受けて一内湾生態系の理解と再生に関する私的思考の変遷一, *J. Advanced Marine Science and Technology*, Vol.21, pp.3-7.
- 須藤隆一・野口裕司, 2010: 水環境対策の歴史と今後の方向, *環境研究* 2010 No.159, pp. 45-54.
- 須藤隆一, 2004: 水生生物保全環境基準策定の背景と今後の展望, *水環境学会誌*, Vol.27, pp.8-13.
- 相馬明郎・関口泰之・桑江朝比呂・中村由行, 2008: 東京湾の底生系における酸素消費メカニズムー内湾複合生態系モデルの解析ー, *海岸工学論文集*, Vol.55, pp.1206-1212.
- Sohma, A., Sekiguchi, Y., Kuwae, T., and Nakamura, Y., 2008: A benthic-pelagic coupled ecosystem model to estimate the hypoxic estuary including tidal flats –Model description and validation of seasonal/daily dynamics, *Ecological Modelling*, Vol.215, pp.10-39.
- 中央環境審議会, 2005: 第 6 次水質総量規制の在り方について(答申)。
- 福岡市港湾局, 2004: エコパークゾーン香椎地区(御島)シーブルー事業効果把握調査報告書。
- 堀江毅・井上聰史・村上和男・細川恭史, 1996: 三河湾での覆砂による底質浄化の環境に及ぼす効果の現地実験, *土木学会論文集*, No.533/II-34, pp.225-235.
- 中田喜三郎, 2007: 三河湾における貧酸素水塊形成過程に関する研究, *伊勢湾再生研究シンポジウム開催報告書*, pp. 1-10.
- 中村由行, 2006: 沿岸海域の環境修復の成果と課題, *安全工学*, Vol.45, pp.432-438.
- 中村由行, 2009: 海の再生の目標像と目標達成のための技術, *海洋調査協会報*, 97 号, pp.8-15.
- 東京湾再生推進会議事務局ホームページ,
http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/SAISEI/council/council_index.htm.