



土木工法による漁場環境改善とその課題 - 松島湾の作濤を例として -

渡辺 競 (本研究会理事・東北緑化環境保全株式会社顧問)

はじめに

これまで、沿岸域においては土木技術を用いた環境改善が多数行われてきた。近年、開発行為に伴う影響を緩和するミティゲーション方策の重要性が指摘されるとともに、すでに悪化した沿岸域の環境修復が求められており、今後ますます土木技術による環境改善の重要性が高まるものと考えられる。

ここでは、過去に松島湾で行われた土木工法の一つである「作濤」を例に、環境改善を実施する上での課題について紹介した。

1. 立地の概要

- 1) 地形条件：松島湾は6水道で仙台湾と画された閉鎖水域で、東北10km、南北5km、面積35.3km²である。水深は水面下3.5mで、平らな海底は軟泥である。(図1)
- 2) 社会条件：湾に流入する河川には西に新町川と旧砂押川、北に高城川、東に東名運河があり、流域188km²にある2市9町1村には10.2千人が生活する。湾内の水面は水産養殖業に利用され、1989～'94年の水産統計によると、カキ養殖は329～365経営体で546～722トンのむき身生産、ノリ養殖では仙台湾で乾ノリ約5億枚を生産するための採苗と育苗、外に種ガキ採苗、コンブ、ワカメ養殖が行われる。一方、第3種漁港の塩釜魚市場への水揚量は1946年の2万トンから'70年の18万トンまで経年的に増加したが、その後減少し、'97年は約3万トンである。

- 3) 流入負荷量：日間の陸水流入量は $5.5 \times 10^5 \text{m}^3$ で、これによる流入負荷量は窒素が1.9トン、リンが0.3トンである。発生源別に見ると、最近の窒素では、生活系55%、事業場系15%、畜産系15%、農業・自然系5%、その他10%である。流入各河川水の水質を1973～'96年の平均値で見ると、DO飽和度63～83%、DIN1～6mg/l、NH₄-N/DIN(比)0.4～0.7で劣悪である。
- 4) 水理条件：朔望平均干満潮位差は湾内外ともに1.5mである。6水道の流量比(%)は金島65、石浜、代ヶ崎各13、寒風沢、鰐ヶ淵、潜ヶ浦各3である。潮汐過程に伴う海水交換率は 0.11 ± 0.02 で、これより湾内水の滞留日数は21日と計算されるが、実際の海水交換率には風の影響が大きい。

2. 養殖カキの大量へい死現象と土木工法による対策

種カキ採苗法と簡易垂下法の開発により現在のカキ養殖技術の基礎は1921年にできたが、発達したのは戦後である。生産統計によると、1948年の施設数462棚、むき身生産量125トンが、'59年に2621棚、1456トンに達し、しかもこの間に1棚当たりの生産量が234kgから610kgに増加し、身入りが良くなる環境条件が作られた。1961年夏に大量へい死が発生し、40～60%のへい死率が'69年まで続き、生産量は250トン(1200棚)にも減少した。

原因：水質調査の結果からはへい死の直接的な要因は見出せなかった。だが 魚市場への水揚量が1946年の2万トンから'62年の13万トンまで年々増加し、この内の47%を地元加工業者が処分して、無処理の廃水を排出したことから分かるように、有機汚染による湾内の富栄養化は年ごとに進行した。高水温期のこの環境水の中では、短期間の内にカキは性成熟して産卵する。産卵後の疲弊したカキの生理機構に代謝障害や生理活性の極度の低下等の異常が生じたことがへい死の原因であり、松島湾のカキへい死は富栄養的条件下に起きた特異的な現象である

対策：富栄養化の進行を防ぐため、1964～'65年に湾東部の潜ヶ浦に仙台湾と連結する新水道の掘削、1970～'72年に金島・石浜水道から湾中央部への作濤による海水交流・交換の改善事業が行われた。新水道は平均水面下の通水断面積100m²(幅30m)、延長2kmである。1潮汐周期間で朔望期に $(22 \pm 6) \times 10^5 \text{m}^3$ 、(8±2)×10⁵m³の交流量が生まれた。作濤事業の規模は幅70～150m、掘削深1.5～2.3m、延長8975mである。結果として水路内では表層流動に対する底面の摩擦効果が小さくなるために流速が増大し、同時に流速の空間勾配

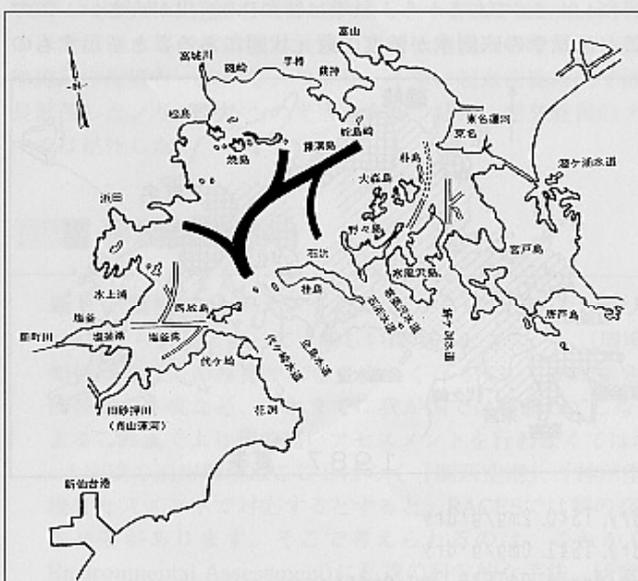


図1 松島湾

も大きくなり、水路付近の海水交換は増大する。

一方、陸地排水に対しては1974年から特定事業場への排水規制処置、'78年以降は下水道整備が進められた。

3. 対策事業後のカキへい死状況および水環境の変化

養殖カキ：1970年以降はへい死率が減少し、停止した'73年には600トンのむき身生産があり、現在に続く。

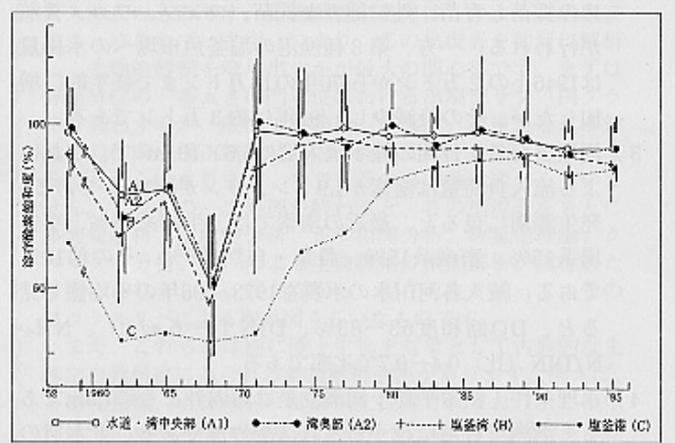


図2 溶存酸素飽和度の経年変化

水質：水域類型区分を参考にして湾内を塩釜港(C)、塩釜湾(B)、水道・湾中央部(A1)、湾奥部(A2)に分画し、宮城水試の定点水質調査結果(20点、毎月)と県公共用水域水質測定結果を用い、4区画表層のDO飽和度を3年間との通年平均値として1952年6日から'97年3月までの経年変化を図2に示した。DO飽和度は1960年ころから減少し、1967~'69年には全湾的に50%まで低下したが、作濤事業により塩釜港とその近隣を除く水域では直ちに90%台を回復し、現在までそれを維持している。DIN濃度は昭和30年代(1955年~)を通して高くなり、1965~'69年にピークに達した。作濤後は経年的に減少し、A1域では1975年以降0.1mg/l以下、B域では'80年以後0.2mg/l以下の定常状態にある。

底質：水産用水基準ではCOD20mg/g・dry、TS0.2mg/g・dryが汚染の始まり、それぞれの30mg/g・dry、1mg/

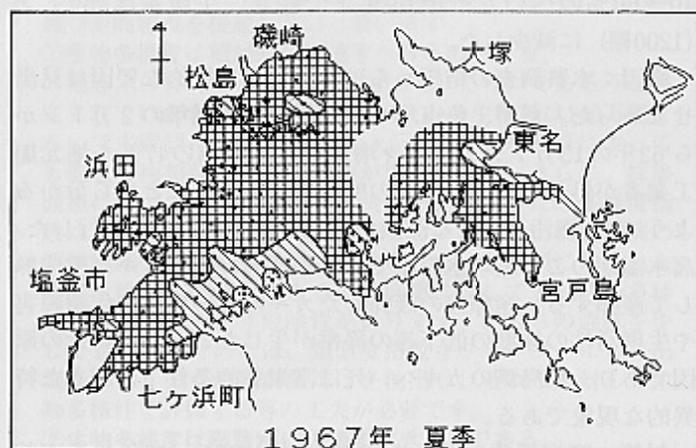
g・dry以上が汚染泥である。最も汚染が進行した1968年と作濤事業後15年を経た'87年の調査結果を、この基準と比較したのが図3である。約20年間に湾奥では有機汚染と還元化が進んだが、これ以外では汚染泥域が縮小した。これは作濤で浮泥層が流出し、その下の分解の進んだ底堆積層が露出したことを示す。水質に影響する底質は、底面境界層で浮上、沈降、再懸濁しつつ分解する新生堆積物であるが、その性状と挙動は明らかでない。

底生生物：多様性指数は図3の正常泥域とその隣接域で高いが、湾奥等の作濤領域外では極度に低水準にある。

4. 水環境における最近の問題点

1970年以後のDOや、1975年以降のCODとpHは全湾的に水産用水基準値や類型別環境基準値を満足したが、更に1979年以降のTN、TPは塩釜港で水産2級、その他で水産1級の基準値を満たしている。それにもかかわらず、1979年には隆盛を極めたノリ養殖が突然消滅し、同じころ湾内の簀立てなどの漁業も姿を消した。このことは、月1回の定期的な水質調査結果で環境変化の実態を知ることが難しいことを示す。一方、1970年代末以後の水質には次のような特異的性状が認められる。

塩釜港を除く湾内表層のNH₄-N/DINの3年毎の平均値は、1964~'69年の過栄養期の0.58が作濤で0.19に減少したが、1979年以後は0.47で、再び還元状態を強くしている。一方、表層水質の季節変化では、1~6月はpH、DO飽和度が高く、DIN濃度が低くて生産期に該当し、9~10月は反対にpH、DO飽和度が低く、DIN濃度が高くて分解期に当たる。9~10月にはTN、TPも増加するが、陸域からのN、P負荷量は季節で変化しないので、この増加は海底からの溶出によると判断される更に表層水のNP比は4~6月に7.7~8.7、9~10月に4.8~5.6であるから、秋季は特にPの溶出が大きい。このことは秋季の底層水が強度の還元状態にあることを示すもので、この状態ではPの外にNH₃、Fe等の溶出、H₂Sの生成等があり、底層水質は悪化している。環境悪化による諸現象はこれを源泉に発現したと思われる。



	正常泥域	COD<20mg/g・dry, TS<0.2mg/g・dry
	汚染泥域	COD≥30mg/g・dry, TS≥1.0mg/g・dry
	遷移泥域	30>COD≥20mg/g・dry, 1.0>TS≥0.2mg/g・dry

図3 正常泥域と汚染泥域の分布

5. ノリ養殖の発達と消滅

養殖力キのへい死発生を契機としてノリ養殖が急速に発達し1962～'78年の間、全国の総生産数量の平均7%（年により10～15%）を生産した。施設設置は年々過密化した。作漥による生産力の増強は更に超過密化を促し、1973年には航路を除く水面に1ha当たり180柵の割合で353×10³柵が設置された（1柵21.8m²）。しかし、1979年以降は毎年10月に幼葉がすべて脱落したのでノリ生産は消滅し、湾内は仙台湾で養殖するノリの種付けに短期間利用されるだけとなった。幼葉体の脱落原因究明のために、気象、海況、水質、病害、品種適性、管理技術など、多面的に検討が行われた。その結果、強い風や流れによって底層水が浮上し、これが潮流によって湾内を移動するときに葉体が脱落することが現象としては判明した。だが、この中で直接脱落させる物質ないし溶藻微生物等の特定は今後の研究課題として残されている。

6. 湾の自浄機能の劣化

作漥後10年以内に底層水を中心に水質が悪化したのは、河口域とアマモ場の消滅などこの間の自浄機能の喪失による。河口域の消滅は、県が湾北の手樽浦128haを1958～'68年に干拓して100haの水田を造成し、4～8月の間、高城川のほぼ全水量を灌漑用水に使用後、銭神排水機場から排水した結果である。それで、河口と河川水拡散域で水の浄化と魚類への豊富な餌料供給に寄与した多毛類や埋在性二枚貝等の生物相が消滅した。更に、流域の畜産業振興はTN総流入負荷量の15%に上る畜産排水で高城川の水質を悪化し、生物相の消滅を早めた。

1955年頃は湾内全域の海底にアマモが繁茂していた。湾西部から減少し始めたが、1965年の坪刈調査では、繁茂最盛期の5月の現場量が乾燥重量で1万トン、枯死流出後の10月に1.7千トンであった。これが1968年と'74年に段階的に減少し、'79年には湾東に1部を残して消滅した。消滅区域は、湾奥では灌漑用水等の拡散域と一致するが、湾内一帯ではノリ養殖施設の配置と一致する。つまり、冬季に超過密施設内で徒長繁茂したノリが下方への光透過を断つ結果、発芽直後のアマモは枯死した。

アマモ場の浄化機能は葉と根による栄養塩の吸収、

酸素生産、硝化と脱窒作用の促進である。窒素を例にとると、5月の現場量の内、秋季までに藻場から抜け出した草体の30%は湾外に流出するので、草体の窒素含有量2.2%dryから計算すると、68トンの窒素が外洋に流去する。一方、服部¹⁾による万石浦アマモ場の脱窒素量33mgN/m²日を用いると、藻場面積24.7km²で脱窒素量は298トン/年となるから、合計値の364トン1965年の藻場での窒素浄化量と見積られる。この量は現在の窒素負荷量692トン/年の52.6%当たる。更にアマモが光合成作用で産出した酸素は葉から根茎、根系を経て泥中に放出され、底泥を酸化した効果を考慮すると藻場消滅の意義は重大で、1979年以後の水質悪化はこれと軌を1にしたと判断される。

湾の再生計画では、藻場が海水と海底土間の物質循環に関与し、かつ高い生産性をもって豊富な付着動物と底生動物の群落を維持し、魚類資源を涵養したことを認識し、その修復を河口域の復元、河川水の浄化と併せて目標の第一義に掲げるべきであろう。

7. 松島湾リフレッシュ事業に配慮すべき事項

県は1990年から15年の予定で環境改善事業を開始した。過去の経緯を他山の石として、計画は従来の縦割り行政の弊害を避けて、庁内関係組織全体で策定された。事業内容は 流入負荷量削減、溶出、巻き上げ量削減、海水交換促進 浄化能力向上を対象としている。

事業への一私見として、環境の多様性と物質循環に根ざした浄化力と生産力の回復状態を的確に定量評価する方法と基準を策定し、それによって事業が目的とする河口、藻場、干潟、浅瀬、湾口等の各域生態系の改善程度を確認しつつ、湾全体としての修復状況をモニターすることを望む。特に水産の分野では、短期的な利益追求の中で無用と思うものを見捨ててきた体質が藻場とその生態系を荒廃させ、ひいてはノリ養殖を消滅させ、漁業を衰退させたことを思考の原点として、生態系に調和して持続的な生産を可能とする長期展望に立つ漁場の適正行使を願う。

文献

- 1) 服部明彦(1991): 藻場の物質循環, Ecosystem Engineering, 創刊号, P92.

事務局通信

新しい環境アセスメントとこれからの研究のシナリオ

今年から法律によって「新しい環境アセスメント(環境影響評価制度)法」が施行されます。これからの「開発」は如何に生態系の維持や影響を少なく行っていくかが重要なカギになります。そのためには、情報の公開、住民参加、代替案の作成など、これまでに我が国では経験してこなかった事柄を実行に移す必要があります。そこでは専門家によるこれまでより質の高いアセスメントを行わなくてはならないことを意味します。

大阪湾の沿岸環境はここしばらく「関西空港」、「神戸空港」、「舞洲」などの大型開発が続きます。これらを新しい環境アセスメントで対応するとすると、RACESでは質の高い提案型の研究をして、これまで以上の新たな活動を展開する必要があります。そこで考えられるのは、これから討議されるであろう戦略的アセスメント(SEA; Strategic Environmental Assessment)に私達の科学的な手法、研究成果をいかに結び付けていくかがRACESにとって重要な課題である様に思います。(出版・広報部会長, K.I)

F r e e k i c k

生態系研究のバラタイム (その3: 生物多様度とその周辺)

トレンド

工学部門の環境問題の中に生物的視点を取りあげられて来たのは、ここ10年くらいです。そして、今日では開発行為に対して何らかの生物調査が必須の調査項目となっていることをご存じのことと思います。しかし、これらの調査データの解釈はどのようにされているのか考えてみる必要があります。多くの場合、最初はサンプルの分類学的整理(ソーテング)に基づく出現表の作成から始まると思います。これは横軸が地点番号で、縦軸が種類になっているマトリクス形式のもので、生物調査の結果はこのような出現表にまとめられています。つまり、この出現表を如何に解析し、生物的情報を取り出すかが最大の関心事です。まずは分類単位の一番大きい門単位における出現グラフ(円グラフで表わすのが一般的で種類数、個体数、湿重量などが対象)の作成や優占種の時間的空間的変動を要領よく整理することから始まります。今でもその必要性は変わっていません。これらの一次処理が終わると、この出現表をもとに多変量解析(主成分分析、正準相関分析、数量化理論、クラスター分析、...)による生物群集の構造解析が流行った時期もありました。残念ながら、現在も生き残っているのはクラスターによる樹系図くらいなもの。

また、これらとは別に陸上生物を対象として古典的な生態学の教科書にみられる群集解析手法があります。例えば、多様度指数(diversity)は10以上提案されており、この中ではShannon-Weaver関数H'を使ったものが比較的多くみられます。この他にも類似度指数、面積-種類における相似則、出現順位-個体数の級数則...等それぞれ、多様な生物学的パラメータが既に提案されています。そして、これらの生物学的パラメータは全て出現表から算出可能ですが、何故か多様度指数以外はあまり使われておりません。

プロブレム

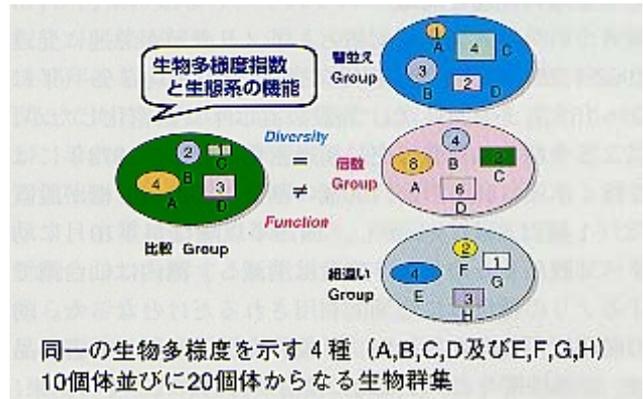
現在、生物群集の状態量を計測する手段や解析手法については、昨今のブームにも影響されてか専門、非専門の学会誌、専門雑誌にみられるように種々雑多に提案されている。最近では生物多様性の問題が特に複雑系(単なるComplicateではなく、内的秩序を伴うComplex現象を取り扱う学問領域)の主要なテーマにもなっていると聞いておりますが、内容は抽象的で高度な数学的論議が多く意味不明。ここでは、生物多様度を巡る使用上の条件について、幾つか問題点を提起したいと思います。

生物多様度は相対的に評価すべきものである。

地球上に存在する現存種は107か108くらいであろうと推定されていますが、実際確認されている生物種は140万種くらいで未確認種が圧倒的に多い。また、採集道具によっても取れる種類数に大きな制限が加わります。さらに、採集面積についても面積-種類数関係が作用するため多様度指数はレパテブでアバウトです。なお、H'は出現種類別の個体数配分問題を取り扱っているため、参考図に示したように生態学的機能の異なる生物群集に対しても同値の多様度を算出してしまいう危険性があります。これらの混乱を少しでも避けるためには、類似度指数をフィルターにして出現種をよく似た生物群集だけを抽出し、それらに対して生物多様性を評価する等の工夫が必要です。

生物多様度は階層別に評価すべきものである。

つまり、生物多様度は各階層レベルに限定して評価を行うべきです。ここで、階層的という意味は二通りあります。第一は食物連鎖上での階層的構造(生産者、下位消費者、上位消費者、分解者)で、第二は遺伝子レベル(種内)、種レ



ベル(種間)、生態系レベル、ランドスケープレベル(地域間)などの階層的構造を指します(注、後の2つの定義は曖昧)。

生物多様度は仮想的なものである。

生物群集の動力学的解釈として生物多様度(D)の時間的変化 $dD/dt = f(E, B) + M$ を環境動態(E)と生物作用(B)及び人第的インパクト(M)から定式化して、将来の環境影響評価のモデルとして使いたいと考えている人も多いかと思えます。そうすれば、煩わしい個々の個体群動態を経由せずスマートに生物群集全体の変動特性を予測できるかもしれない!しかし、冷評に生物多様度の属性を考えると、構成要素である各個体群の動態により、結果的にその時々生物多様度が決定されています。つまり、生物多様度が実在性のあるもので、独自のダイナミクスを有しているものではなく、パーチャル的存在であることが理解できます。

ビジョン

さて、トレンドでも述べたように生物群集の状態量を評価する指標は多様度だけではありません。ただ、多様度を含め、先に紹介した各種のパラメータは例外なく静的な状態量を示すものですが、系の安定性や復元性といった動的な評価指標について、納得いく提案はあまりありません。

例えば、洪水など大きな外乱を受けた河川生態系における、生物群集の回復過程を示す力学モデルやそれに基づく復元指標などはあまり見あたりません。また、一部では数値シミュレーションの結果から、「生物多様度の大きい生物群集がより、小さい多様度の生物群集より必ずしも安定性に優れているとは云えない」との結果が得られ、生物的多様度が群集の安定性機能に与える効果について疑問的な意見も出ていますが結論は得られていません。構造と機能の関係は生態学の古典的問題であり、応用面においても重要な研究課題といえます。いずれにせよ、生態系の動的特性を評価する何らかの指標が必要になる訳ですが、この新たな指標には次に示す属性が求められます。

- 1) 生態系の構造だけでなく、浄化、生産性、復元性などの機能を評価する指標であること。
- 2) 評価対象は生物群集だけでなく、生態系を構成する物質のフローや循環などの環境動態を含めた指標であること。

RACESでは 大阪湾のヨシエビ研究で使用している「低次生産モデル」の物質循環スキームなどを土台にして、この新しい生態系指標作りを模索しております。そして、新指標による役に立つ生態系評価が一日でも早く実現できるように頑張っております。

(中村義治: 本研究会幹事・水産庁水産工学研究所 水産土木工学部環境分析研究室室長)