

沿岸域環境保全・回復システムの設計

Designing for the system of the coastal environment restoration / conservation

細川恭史*,

鈴木 武*

Yasushi HOSOKAWA*, Takeshi SUZUKI*

ABSTRACT: The national land planning is now directed toward the “harmony with nature”-type one based on the regional water circulation system. Applying this concept to the coastal planning in an inner bay, we find it necessary to understand the unique natural characteristics of the coastal area.

The transportation, and also the budget, of the substances in the coastal water are controlled by the hydraulic phenomena, which has the temporal and special hierarchy structure. Considering this hierarchy system with coastal self-purification activities, the authors pointed out a principle on the allocation of coastal tidal flats.

Distribution and trajectory analysis of the drifting larvae of short-necked clam in Tokyo Bay, show that there exists a kind of “ecological-network (connectivity by typical pathways) of the larvae in the bay” though the high capacity of natural dispersion. This network system for the larvae of benthos gives us a hint for the appropriate alignment of tidal flats along the coast.

Thus, Hierarchy and Network seem to be two important planning concepts for the system restoration of the coastal environment.

KEYWORDS: Coastal planning, Hierarchy, Network, Ecosystem restoration, Substance circulation

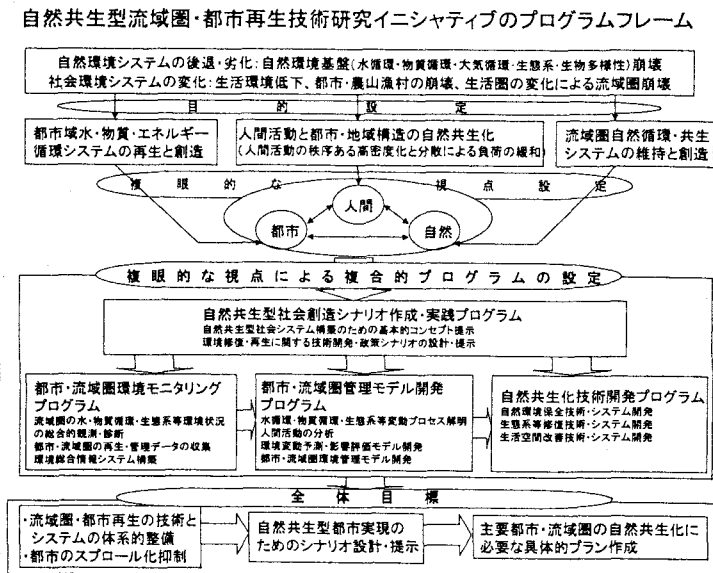
1. はじめに

日本の沿岸の特性は、①日本の国土の7割は山がちでまとまった平地は沿岸に限られる。②天然資源の貧しさから加工貿易が発達し港湾に沿って産業が立地してきた歴史がある。③沿岸の自然が厳しく、都市防災のための種々の施設・構築物が沿岸に配置されてきた。④大きな都市が沿岸に立地し、人口・資産が集中し、沿岸の海面利用も高密度で錯綜したものになっていた。⑤そのため、漁業権設定、港湾区域設定と港湾計画、生活環境基準の類型指定など利害調整の社会的仕組みが、それなりに整備されてきた。などとされる（井上ら、1986）。環境基本法の制定以降、河川法・海岸法・港湾法の改訂、有明海八代海特措法・自然再生推進法の制定など、沿岸にかかわる新たな環境施策が打ち出されてきている。循環型社会の形成・自然再生などの新しい目標に見合った総合的な施策展開が求められてきている。

内閣府の総合科学技術会議では、現在、重点4分野として「ライフサイエンス」「情報通信」「ナノテクノロジー・材料」とともに「環境」の研究領域を取り上げている。「環境」分野では、「自然共生型流域圏・都市再生イニシアチブ」が立ち上がり、シナリオ誘導型の研究を進めようとしている。都市の人間活動と自然環境とのバランスをとるため、水・空気・生き物で都市とつながっている森林・農地・河川・沿岸などとの統合・共生の視点を導入しようというものである。個別の環境研究は、循環型のまちづくりや国土づくり

* 国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部 Coastal & Marine Department, National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), 〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1

のシナリオによって位置づけられ、全体が大きな共通目標に向いて進んでゆく姿を想定している。都市・人間・自然の相互の関係性に対して配慮し、全体目標に対して複眼的な視点による複合的プログラムの設定が試みられている。すなわち、①基本コンセプトや政策シナリオ提示を目指す「自然共生型社会創造シナリオ作成・実践プログラム」、②総合的観測を行う「都市・流域圏環境モニタリングプログラム」、③予測や評価のモデル開発を目指す「都市・流域圏管理モデル開発プログラム」、④生態系修復技術の開発を目指す「自然共生化技術開発プログラム」の4プログラムが作られている（図－1）。



図－1 自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシアティブのプログラムフレーム

自然再生研究の状況を考えても、上記④に属する要素技術研究は近年広く行われるようになってきたが、どのような理念に基づいてどのような手順で現実の空間に適用してゆくのかの計画論に係る課題は、なかなか手が付けられなかったのが実状といえる。「自然共生・都市」イニシアチブでは、①の課題について、人文・社会科学的視点を取り入れる等の機軸が示されたが、その具体的な道筋については引き続き検討中である。

総合科学技術会議での議論の枠組みを、「従来の流域の水文現象あるいは環境問題に加えて、①基盤的な要素としての自然生態系の役割を考えようとする点、②社会経済的かつ環境側面からの持続可能性を組み込もうとする点、およびそれを③流域マネージメントの普遍的な性格と関連づけようとする点にある」と概括し、「都市再生の当面の課題との関連を含めて、学術的にもマネージメントの実践においても自然共生の流域圏を取り上げた環境システムの理念と手法を明らかにすること」が必要との指摘（盛岡,2003）がなされている。「基本コンセプトや政策シナリオ」のより一層の明確化と詳細検討につながる重要な指摘である。水の循環を機軸とした自然共生型の国土形成への指向を沿岸域に適応したときに、沿岸域独自の自然的社会的特性を踏まえた計画の枠組みが求められる。以下ではおもに内湾水域での自然特性から見た枠組検討を試みた。

2. 沿岸の持つ空間特性

2.1 階層性

ひとまとまりの水域として考えやすいのが、東京湾などの閉鎖性内湾である。内湾は複数の流入河川を持

っているおり、複合した影響を受ける。内湾を、陸上の活動を含めた沿岸域として総合的に見る場合、個々の河川流域をサブシステムとする水システムとして考える事ができる。一方、内湾の数百～千 km^2 ほどの水面に関しても、湾奥から湾口にかけて大きな分布を持ち単一の場合としては捉えにくい。内湾水面の環境構造は、ものの運ばれ方（水質変化の機構）を基礎に解析できる。

内湾の閉鎖性は、負荷に対する内湾総体としての水質の応答性に大きく関与している。閉鎖性は滞留時間で表現される。内湾に流入する淡水流入量（河川や下水道の流入量）から、貯水池と同様な押し出し流れを仮定して算定すると、算定滞留時間は実測よりもはるかに大きくなる。これは、流入淡水の押し出し流れよりも潮汐作用による流れの方が輸送に大きく寄与していることなどによる。湾内で水とともに移動する「もの」（溶解物や微少粒状物など）は、平均的な湾内移動には潮汐作用が重要になる。

もう少し局所的にものの運ばれ方を見てみる。ある程度の流量がある河川の河口付近では、上げ潮下げ潮に拘わらず主に河川流によってものが流される。波の寄せる海浜では、岸近くのゴミは波の周期で動いている。また、来襲波によって作られる沿岸流が目立つような浜では、碎波帯内では数十分程度で沖合数百m程度の循環系が形成される。様々な外力が物質の移動に寄与する内湾では、対象とする移動時間や移動の空間のスケールに応じて、卓越作用が交代してくる。時間スケール、空間スケールに対する卓越作用の大きさを3次的に表示したものが図-2（柳、1989）である。この図は、我が国の内湾におけるものの輸送に関わる現象を整理している。

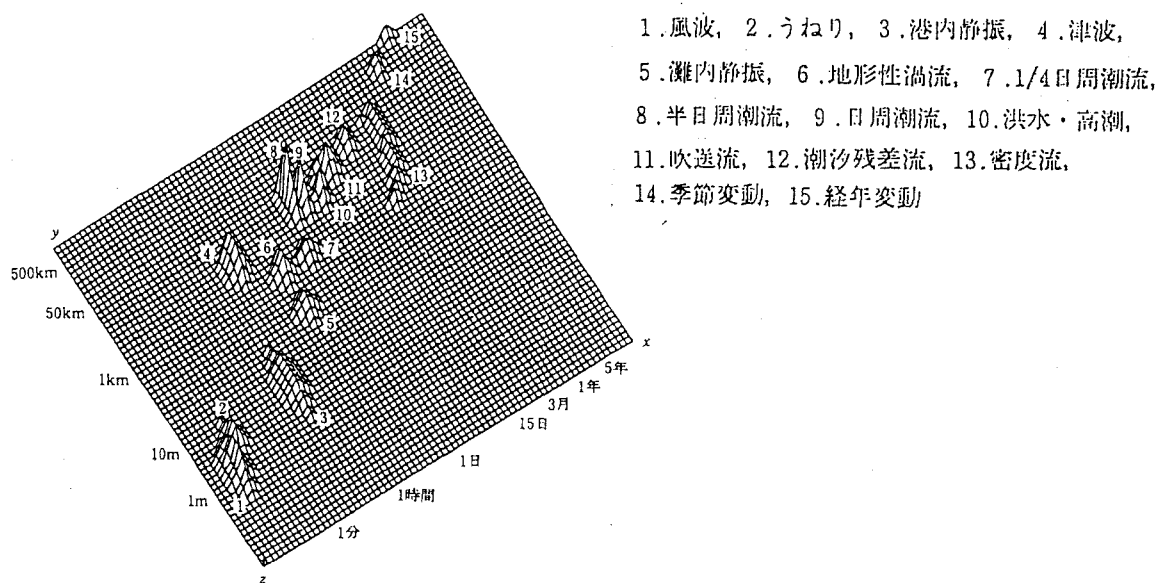


図-2 内湾でものを運ぶ作用の大きさ

図-2は、内湾海域における溶解性物質の輸送過程が階層性を持っていることを示している。また、滞留時間が長いと（閉鎖性が強いと）、沿岸海域での生物作用などによる栄養塩や汚染物質の粒状化と、底泥への沈積とが目立つようになる（生物作用の時間や生物地理的時間が水理的時間とパラレルとなってくる）。それぞれの時空間スケールに応じて特有の卓越外力あり、ものの輸送が構造を持っている。

つまり、沿岸域は複数の河川の流入を受け、沖合で外洋につながる海水面を持つ。陸上の流域では表層水・地下水・水道下水道などとして水の循環が把握されるが、外洋につながる広い沿岸海域では、潮汐作用の他、波・風・海流など様々の外力が構造をもって重合している。各時空間スケールに対応した重層的な計画（自

然共生型に循環を閉じる計画)を立てることが必要である。栗原(1998)は、内湾における環境改善には、岸からの沖への負荷の伝播に対し沖から岸への負荷のフィードバックのしくみが必要と説いている(図-3)。個別ツールの配置概念としては、例えば以下のようなゾーニングが考えられる。「自然の浄化力の応援」場は岸近く(負荷源近く)に配し生物体に転化された負荷は陸へとフィードバックする道筋を応援することがよい。少し沖では底泥管理が重要になる。さらに沖・湾口近くでは、清浄な外海水の導入を検討する。

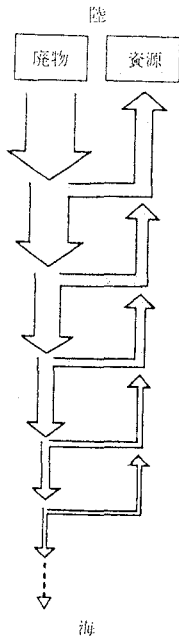


図-3 海-陸リサイクルの概念

の生態系構成生物は流出したり死亡したりする。こうしたリセットの後、生物は徐々に回復してくる。

干潟生態系に登場する主要な生物は、生産者としての底生藻類、消費者としての二枚貝類・多毛類・腹足類・甲殻類、分解者としてのバクテリアであり、来訪者として鳥や魚・プランクトンなどである。無生物の有機粒子(デトリタス)も食物として重要である。干潟の食物網の概念を図-4(桑江ら、2002)に示す。

2) 自己修復と自律能

干潟地形が海辺に造成された後、そこに干潟生物がうまく加入・定着するのかどうか、という検討が、屋内メソコスム実験装置により検討された。十分風乾した(メイオペントス・マクロペントスを死滅させた)底泥を実験水槽に敷き、自然海水を無処理でポンプ導入し、水槽内に干出・水没を半日ごとに定期的に起こした。運転開始後一年経たないうちにバクテリア・底生藻類・メイオペントス(1mm のふるいを通過する動物)・マクロペントス(1mm のふるいの上に残るやや大型の動物)から構成される生態系が自然に形成された。生物グループ毎の個体数密度も自然干潟の値によく似ている。生物グループ別の生息個体密度のグラフを図-5に示す(細川ら、1997)。また、生態系形成後に底泥面を鍬で耕耘し攪乱を与えたところ、直後は生息生物量・種数が激減したが、半年ほどで回復を見た(桑江ら、2002)。自然海水とともに水槽に導入され

沿岸における輸送の特徴的現象として、イベントの効果知られている。低頻度で生起する現象ではあるが極めて大きな輸送を生じさせるものがある。その輸送効果は広域で長期にわたることも多い。晴れが続いたあとの大きな降雨による河川からの負荷はきわめて大きい。湾口から中・底層に貫入する黒潮の波及も湾内循環に大きな変化を与える。階層的な輸送に比べイベントは、制御・管理が難しい。

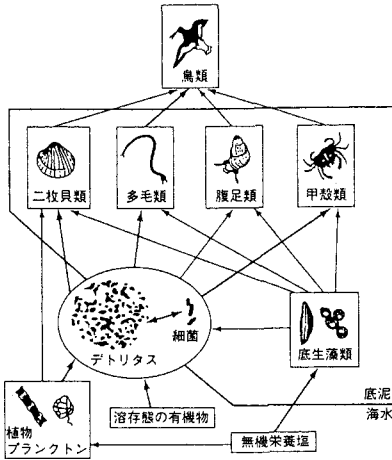
2. 2 連結性

1) 沿岸生態系の形成

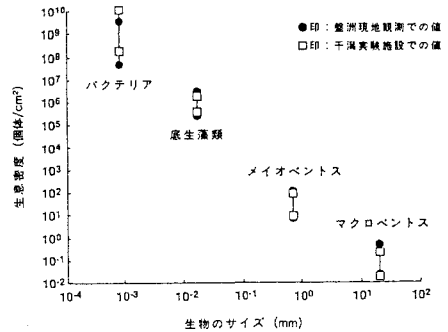
沿岸の生態系は、①潮汐変動、②波・流れの作用、③気象変化や季節変動、④日照などの日周変動、を受ける環境変動の大きい系である。また、背後地からの流入や沖合からの波や潮汐作用によるものの輸送が起こる。その場だけで閉じているわけではなく、外部周縁との行き来の上に成り立つフロー型の生態系を形成する。こうした場では、多産短寿命で復元力の強い生物(r戦略の生物)が主役となった生態系を作ることが多い。復元力の強い系では、人の手による地形の改変にも追従しやすく、人の介入の余地がある(栗原、1998)とされている。干潟生態系もこうしたシステムに分類されている。沿岸干潟では、潮汐変動などに加え、台風などによる大きな擾乱を時々受けることになる。擾乱により、その場

た浮遊幼生や卵などが加入・定着したものとされる。

現在、1995年1月の本格運転開始から丸8年経過した。徐々に優占種が遷移しながらも、特定種のみが一時的に圧倒したり、生物量が急増・急減したりといった系の不自然な不安定現象は見られていない。地形造成が適切で沖合海水が干潟面に導かれるのなら、半年から数年で典型的な干潟生物の加入・定着がすすみ、その系は長期的に遷移・変動しながらも自律的に維持されうることが実験的に示された。干潟・遠浅地形や浅海部の形成は、適切な位置選定や造成・管理のもとでは沿岸生態系修復の役目を果たすであろう。



図一4 干潟における食物網の模式図



図一5 生物グループ毎のサイズ別個体数密度

(●：盤州干潟 1993.12～1995.12、□：干潟実験施設 1995.11～1995.12)

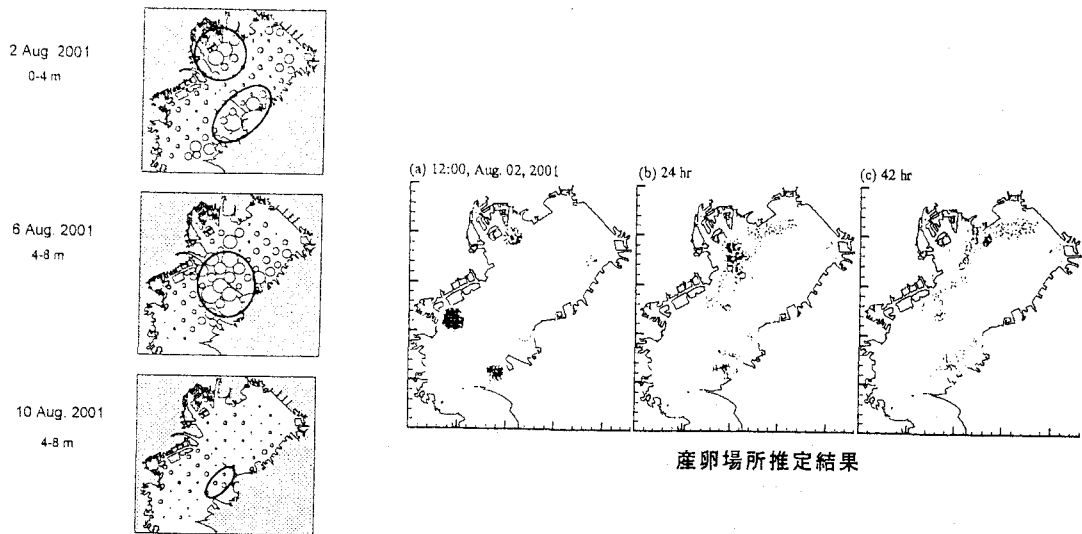
3) アサリの世代戦略と海水の流れ

干潟的な地形を提供できたとしても、底生生物の浮遊幼生や卵が底泥上に持ち込まなければ、生物の加入定着は起こらない。浮遊幼生や卵は、何処にいるのだろうか。アサリの幼生を代表に、2001年8月に東京湾内65点で幼生分布を詳しく調べてみた。結果の例を図一6(粕谷ら,2003)に示す。三枚洲などを供給源とした幼生は湾内奥部水域に広く分布し、おおむねこの沿岸でもアサリ幼生の供給が期待できそうである。

アサリ幼生は、受精後二週間程度の浮遊期があり、最初の数日で変態し形状を変える。流れの観測や数値計算と組み合わせ初期幼生の運搬経路を解析し、日令から放卵場所も逆推定できた(日向ら、2002)。東京湾の西側沿岸では岸沿いの運搬経路が示唆され、点する干潟相互の結びつきが示唆された。東岸側では放卵場所近くを漂っていることが多いようである。幼生の浮遊経路から海上のエコロジカルネットワークを解析し、生息地管理の道具とする試みは、グレートバリアリーフでのサンゴ礁保全などで有名である。生息場相互の結合性によるグループ化、上・下流関係による保全区指定や効果的配置などが検討されている。

2. 3 再生の原則

このように、①ものの循環構造や②浮遊生物の移動における相互のつながり、と言った自然特性からの沿岸海域の空間の構造化ができそうである。①は水質や底質と言った指標(もしくは、負荷物質の陸域へのフィードバックという指標)での環境改善領域に対応し、②は生物生態系や自然修復の領域での改善に対応する。循環型社会に対応した沿岸、あるいは、生物多様性改善に対応した沿岸という目標が設定でき、目標実現プロセスを誘導するシナリオや評価モデルについての道筋が見え始めた。



図—6 アサリ幼生（D型幼生と殻頂期幼生）の湾内分布（上から、2001年8月2日の0-4m層、8月6日の4-8m層、8月10日の4-8m層での値）および産卵場所の逆推定計算

我が国沿岸の殆んどが、多かれ少なかれ人為影響を受けている。都市化の進行により昔の条件が崩れてしまった場所では昔通りの自然再生は極めて困難である。負荷を減らすべく、背後の土地利用を規制し変えてゆくことで、昔の立地条件に近づける余地もあろう。しかし、人口圧が高く高度に利用が進んだ海域では、「失われた自然と全く同じ機能の即時回復」という考えを各地域ごとに厳密に適応しようとすることは現実的ではないことがある。「対象海域の自然」や「地域社会の将来像」に加え「手持ちの環境技術」を考えた上で、目標を定めて自然の再生・修復をしようと決めるのはまずは地域の意思であろう。総合的な計画では、内湾における各地域の位置づけを与え・内湾全体での段階的再生シナリオを与えることが必要になる。自然の摂理や歴史的な展開変遷をふまえたシステム的な空間計画アプローチとなろう。

特に極めて人工化が進んだ内湾の海岸線などの場合には、上記に見たように、生息場の人為的な供給努力は意味のあることと思われる。自然変動の中では生態系や地形も変動している。環境条件が変動する中で、地形や生態系の修復を引き出し応援するような適用（例えば、セルフ・デザインングやアダプティブ・マネジメントなどの「自然の自己修復を人が手助けする手法」の適用。）が図られるべきであろう。米国では湿地造成後の生態系回復の予測シナリオが必ずしもうまく描けず、予測と違った事態が起きつつ生態系の成熟が進むことが指摘されている。そこで、自然の中での変動を理解した上で、アダプティブ・マネジメント（順応的管理）の適用をはかるほうが、より効果的であるとの議論が出てきている（Zedler, 2001）。生態系の変化（遷移）がある程度予測できることを前提にしたアセス制度の考え方とは少し異なるアプローチである。修復・再生事業や環境管理への市民寄与の機運の中で、注目されている。順応的管理においても、人の働きかけと自然の応答の知見や現場実験の方法論は必要で、技術として進歩させるべき課題である。

3. おわりに

東京湾においては、都市再生本部第3次決定（海の再生）を受けて、内閣府・環境省・農林水産省・国土交通省・湾岸7都県市から構成される「東京湾再生推進会議」が2002年2月に発足した（岩滝ら、2002）。

「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。」との共通目標を確認し、翌年3月に行動計画を策定した。施策の集中的な実施をはかることで湾の環境改善を図ろうとしている。湾奥沿岸を中心に、重点エリアと7箇所のアピールポイントを定め、①陸域からの負荷削減（合流式下水道の改善・農業集落排水施設整備・合併処理浄化槽・河川浄化・治山など）や、②海域での対策（汚泥浚渫・覆砂・干潟整備・自然エネルギー活用型工法など）さらに、③モニタリング（観測・データ共有化・情報発信・赤潮監視・市民参加型監視など）を計画している。使える技術や制度を効果的に活用し、重要な水域から目に見える効果を発現していこうとするものである。上記で検討した沿岸の空間階層やエコロジカルネットワークとも方向性は似ている。自然再生には長い時間が必要で、干潟造成などの事業も10～20年かけて行われている。将来を見通した検討が必要と思われる。

本論文では、①沿岸防災や土地利用転換期における沿岸経済と環境修復との水際線の処理を通じた調整やバランスに関する議論、②沿岸地域の社会変遷の歴史を踏まえた、地域における「自然と社会のあるべき結びつき」の議論、③国全体での沿岸における「都市と自然の棲み分けと結び付け方」の議論、などはできていない。本論は、土木学会第16回環境システムシンポジウム（細川,2003a）、日本学術会議水循環シンポジウム（細川,2003b）での議論を基に再構成したものである。

参考文献

- 井上聡志・石渡友夫(1986)：港湾の空間計画に関する基礎的考察、港湾技術研究所報告(25)4、57-101
- 岩滝清治・日笠弥三郎(2002)：港湾における沿岸域の環境施策の取り組み、海洋開発論文集第18巻、65-70
- 粕谷智之・浜口昌巳・古川恵太・日向博文(2003)：夏季東京湾におけるアサリ (*Ruditapes Philippinarum*) 浮遊幼生の出現密度の時空間変動、国土技術政策総合研究所報告 No.8、国土技術政策総合研究所、13p.
- 姜 閔求・高橋重雄・奥平敦彦・黒田豊和(2001)：自然および人工干潟における地盤の安定性に関する現地調査、海岸工学論文集第48巻、1311-1315
- 栗原康 (1998)：共生の生態学、岩波新書546、235p.+4p.
- 桑江朝比呂・三好英一・小沼晋・中村由行・細川恭史(2002)：干潟実験生態系における底生動物群の6年間にわたる動態と環境変化に対応する応答、海岸工学論文集49巻、1296-1300
- 国総研海洋環境研究室ホームページ：<http://www.ysk.nilim.go.jp/kankyo/main.html>
- 日向博文・戸簾幸嗣・古川恵太・粕谷智之・浜口昌巳・石丸隆・柳哲雄(2002)：夏期東京湾におけるアサリ浮遊幼生の移流拡散過程に関する数値計算、2002年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、日本海洋学会
- 風呂田利夫(2000)：内湾の貝類、絶滅と保全、東京湾のウミナガの衰退からの考察、月刊海洋/号外20、74-82
- 細川恭史・桑江朝比呂(1997)：干潟実験施設によるメソコスム実験、土木学会誌(82)8、12-14
- 細川恭史(2002)：沿岸における自然共生型技術適用のあゆみと干潟造成技術、海洋開発論文集第18巻、59-64、
- 細川恭史(2003a)：沿岸域環境保全・回復システムの課題、第16回環境システムシンポジウム「沿岸域の賢明な利用に向けた複眼的アプローチ」、土木学会環境システム委員会、1-10、
- 細川恭史(2003b)：沿岸域の賢い利用と総合的な管理、水循環シンポジウムー21世紀の研究課題と展望一、日本学術会議、73-76
- 盛岡 通(2003)：(私信：第31回環境システム研究論文発表会企画セッション提案書)
- 柳 哲雄(1989)：沿岸海洋学、海の中でものはどう動くか、恒星社厚生閣
- Zedler, J.B.(2001): Handbook for Restoring Tidal Wetlands, CRC Press, 439p.