

# 水環境の施策展開と 環境システムの研究的な研究の歴史

細川恭史

正会員 工博 国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)  
E-mail:hosokawa-y92y2@ysk.nilim.go.jp

我が国の水環境に関する施策を概観し、施策実現に必要な技術に関する開発の展開を見た。技術課題も政策と同じように時代要請に伴い変化してきた。施策が大きく方向を変えるときには、従来型知見の精緻化といったアプローチのみではなく、新たな課題のシステムの理解と時空間の視野拡大を伴った新しい知識や手法が求められた。我が国の産業や社会のあり方と環境施策との結びつけの努力が、今後益々望まれてくる。さらに、干潟造成の研究開発の展開を概観した。社会的批判や疑念の指摘により研究課題が明確化し、解決が図られるという関係が示唆されるとともに、自然共生型社会実現という大きな目標の中で、研究が位置づけられる。

**Key Words :** water quality management, policy development, standard, rehabilitation, coastal tidalflat

## 1. はじめに

水環境の近代的な施策展開は、明治期の鉱毒対策に始まるとされている。日清・日露戦争後の工業化に伴い、工場廃水による河川の水質悪化が進展した。水質の悪化を介して、河川水の利用者である農民や漁民と排出源の工場との社会的対立として現れていた。第二次大戦下での軍需優先、本土空襲などにより廃水の管理は立ち後れ自然環境は荒廃し、敗戦を迎えた。敗戦後の復興は、再び工業化を通して行われた。高度経済成長期には、臨海工業地帯の整備が進みなお一層の沿岸都市への人口集中が進んだ。臨海部の工業化による産業振興という選択や、沿岸部への人口・資産の更なる集中と沿岸都市の発達の背景には、我が国の地理的な特性が影響している。

以下では、特に高度経済成長期以降の我が国の水環境施策の変遷と、施策を支える技術を見るとともに、今後の課題を考察した。

## 2. 施策展開の歴史

### (1) 環境施策の展開<sup>1)、2)</sup>

昭和30年の「経済自立5カ年計画」、昭和35年

の「国民所得倍増計画」、昭和37年の「全国総合開発計画」など、重工業を中心とした地域拠点の開発が始まった。高度成長期の昭和33年には水質保全法と工場排水規制法のいわゆる水質二法が制定された。ここでは、特定の水域に排水基準を設定し、工場などからの排水について基準を守らせる仕組みであった。基準の設定水域は、人の健康や生活環境などへの影響が生じた水域もしくははその恐れのある水域とされ、問題が生じるたびに指定をする「後追い行政」と呼ばれた<sup>1)</sup>。規制対象は有機物などであり、重金属類は含まれていなかった。

昭和44年に「新全国総合開発計画」が策定され、大規模開発が進められた。昭和43年、水俣湾と阿賀野川の周辺で水俣病が政府により公式に認められた。同年、神通川周辺でのイタイイタイ病が公害病として認定された。四日市の大気汚染とともに、四大公害訴訟となった。昭和42年、公害対策基本法が成立した。水質汚濁、大気汚染などの公害に対し、環境基準の設定などを柱とした対策が図られた。昭和45年の公害国会では、公害対策基本法の改正を始め、水質二法が統合され水質汚濁防止法が制定され全国一律の排水基準が制定された。海洋汚染防止法、廃掃法なども制定された。昭和46年、環境庁が設置された。基準値をもつての負荷の出口(エンド・オ

ブ・パイプ)での規制が中心的な環境行政であった。

昭和47年、閣議了解のもとづく環境影響評価が始まった。昭和48年の公有水面埋立法の改正等により、埋め立て時の環境影響評価や港湾計画時の環境影響評価が実施された。また、瀬戸内海環境保全臨時措置法が制定された。この年の第一次石油ショック以後昭和53年の第二次石油ショックを経てしばらくは、景気回復が行政の中心的な課題となった。昭和52年に「第三次全国総合開発計画」が策定され、国土の均衡ある発展が謳われた。昭和53年に、三大湾に対するCODの総量規制が導入された。閉鎖的な水域で富栄養化が進行し、赤潮の頻発が続いた。昭和57年には湖沼を対象に・平成5年には三大湾に対し窒素とリンの環境基準が定められた。水質悪化の被害者と加害者とが区別できにくくなり、多様な活動の複合として長期的で広域的な影響として表れるようになった。

昭和60年代の経済のバブル期を経て、構造的な不況が続いた。平成4年リオサミットが開かれた。平成5年、環境基本法が制定された。「開発か保全か」と言った二者択一の議論から、「持続的発展」概念による高次の社会形成が謳われた。平成9年に河川法、海岸法、平成10年に港湾法の改正が続き、「環境」を整備目的に規定したり配慮事項に定めたりした。平成9年には環境影響評価法が制定され、京都において気候変動に対する京都議定書が採択された。平成10年に「21世紀の国土のグランドデザイン」が策定された。平成12年循環型社会形成推進基本法、平成14年自然再生推進法が制定された。水質の課題や対策が、他の環境上の課題や国土の計画や管理・地域や都市の計画や整備とも深く結びついて現れるようになった。

## (2) 施策を支える技術検討

初期の基準値型の施策は、有機物BODや酸素濃度DOの河川水系内での挙動解析に基づく施策検討として実施された。施策の適否判定は、基準値として示された濃度が守れるかどうかとして評価される。比較的少ない数の負荷源からの、比較的速い応答関係を調べるといった作業になる。有機物の分解挙動と不足酸素の溶解を一次反応型の微分方程式で記述すると、その解はStreeter-Phelps式となる。有機物の分解速度(すなわち酸素消費速度)・酸素供給速度・有機物負荷・各濃度の初期条件、が与えられると、溶存酸素の最低濃度値が求まる。速度値の測定や予測評価、河川流下過程の精緻化などが研究された。しかし、閉鎖性水域では富栄養化が進行し、有

機物の内部生産過程がより大きな課題となっていた。

富栄養化過程は、BOD-DOの挙動の時間スケールに比べて、より長期的広域的な時間空間での現象である。施策の適否判定も、一箇所の最低濃度での評価というわけにはいかなくなった。関与する過程も多く、植物プランクトンの生物過程も含めて必要速度パラメータの数は大幅に増える。水質変動に対する底泥の役割は大きく、かつ水質とは異なる時間スケールで寄与してくる。富栄養化現象に対しても、速度値と水理過程を含んだ数値解析モデルが良く使われる。一方で、モデルの枠組み・与える速度値・境界条件などに不明確な部分が残りがちで実測値によるモデルの検証が不可欠であり、モデルの複雑さが評価過程を分かりにくくしている。また、自然条件や負荷の強さは常に変動しており、代表的条件を選んで評価することの妥当性や、代表性に対して検討が必要である。複雑で精緻なモデルが、必ずしも妥当な政策評価結果を与えていない状況も起こる。そこで、研究は、モデルのより精緻化・速度値変動の詳細・境界条件変動や自然変動の把握などにむけられた。

しかし、富栄養化のような現象に対し、微分型のアプローチによる精緻化にはきりがなく、社会的な要請に対する答えを出すための方法としてより効果的な別の方法が望まれていた。BODは酸素消費の観点から見た統合濃度であり、また5日間の時間積分した酸素消費ポテンシャルを示す指標である。これになぞらえ、現場の積分型指標の導入と活用を検討試みられた<sup>3)</sup>。成果の一部は、富栄養化素過程の速度測定などにも活用されたが、 $\Delta$ CODやAGPといった指標が研究された。水質上の最大の問題は夏期の高い有機物生産に伴うものであり、季節変動といった時間スケール・内湾レベルの空間スケールでの水質変動を把握する指標として $\Delta$ CODが、植物プランクトンの増殖時間スケールでの水塊の増殖ポテンシャルを把握する指標としてAGPが、取り上げられた。

さらに、環境基準点ではなく空間規模での環境管理の意識が、環境の容量や総量規制といった概念の検討へ進んだ。対象水域や負荷発生域での操作性から、いくつかのレベルわけされた容量論が示された。例えば、日本の海岸線を境界に窒素の収支をとると、飼料や肥料の大量の輸入等による大幅な輸入超過の状況が把握できる。農耕地での窒素の蓄積が飽和すれば(容量を超えれば)、陸上で保持できなくなった余剰窒素は沿岸水系に出てくることになる<sup>4)</sup>。エンド・オブ・パイプ型の富栄養化対策では限界が見えてくることになり、自国農業のあり方や施肥など農業手法などとリンクした施策が必要になってくる。

昭和60年代からの実践蓄積のもと、平成4年には「河川における多自然型工法」導入の通達が、平成6年には港湾におけるエコポート政策が示された。その後、河川法・海岸法・港湾法が改正され、整備目的に環境が加えられた。公共事業側からの環境施策は、環境資源としての川や海の諸機能や役割と言った視点から、生物生息や生態系の保全と活用が意識された。当初は、一部護岸の生物生息の回復努力や自然浄化能の向上努力であったが、水系生物の生息がひとまとまりの系(生態系)として成立していることから、次第に生態系の修復努力として意識され始めた。現場護岸での実験や屋内/屋外型の一部開放系切り出し模型による実験など、生物生息と物理場の整備との結びつきなどの技術検討が実施されてきた<sup>5)</sup>。また、多様な主体の協働や参加、地域固有の自然や歴史に配慮した整備といった方向で、河川協議会の設立など実施体制の整備が行われてきた。

環境施策は我が国の産業や社会のあり方とも大きく関わっている。将来の国のあり方と結びついた総合的な環境施策は、実効性のある具体的計画としてはまだ確立されていない。基準値型の施策から始まった戦後の水環境施策は、我が国の社会の成熟につれて時代とともに変遷してきた。従来型の水質汚濁の現象とは異なる事態が顕著に生じたり、従来型の施策に対する社会的批判が高まったりすることで、施策の展開が起きてきた。新しい施策の実現には、それに見合う技術的検討や科学的知見の獲得が必要であった。技術課題も時代要請に伴い変化してきたが、施策が大きく方向を変えるときには、従来型知見の精緻化といったアプローチのみではなく、新たな課題のシステムの理解と時空間の視野拡大を伴った新しい知識や手法が求められた。我が国の産業や社会のあり方と環境施策との結びつけの努力が、今後益々望まれてくる。以下では、沿岸干潟を巡る議論として、施策展開と技術開発の関係・今後の検討課題の展開方向をみてみる。

### 3. 干潟修復・再生の技術検討の展開と課題

#### (1) 藤前干潟における議論

平成14年の自然再生推進法が成立し、干潟の修復も自然再生の重要な実現手段と考えられている。しかし、平成10年末から翌年にかけて社会的に注目を浴びた藤前干潟の埋立計画撤回議論の中では、人工干潟を巡る技術評価は、これとはかなり異なったものであった。ここでは、技術の評価に焦点を絞るこ

ととし、当時議論されていた代償措置の妥当性や手続きの正当性などに関しては扱わない。

名古屋市は藤前地区の干潟の一部をゴミの処分場として埋め立てる計画を持っていた。市の要綱に基づき、事業者である名古屋市(環境事業局)は環境影響評価の手続きを開始し、その中で市環境影響評価審査委員会の審査を受けた。審査会は平成8年に審査報告を出し、「鳥類にとってより棲みやすい生息環境等を新に創出するために、人工干潟の造成、既存干潟の部分的嵩上げなどを検討すべきである。

(後略)」と要請した。これを受けて、「損なわれる環境の代償措置として、既存干潟の嵩上げを含めた干潟の改良を行っていききたい」旨の事業者見解が示された。市の内部での技術検討が進む中、平成10年12月、環境庁内は内部検討会の中間報告文書「藤前干潟における干潟改変に対する見解について(中間とりまとめ)」<sup>6)</sup>を公表し、市に手交した。ここでは、表-1のような表現で人工干潟の技術への疑念が強く示されている。名古屋市が藤前の埋立を取り下げた後、マスコミ各社は干潟造成技術が環境庁によって「科学的に」否定されたという報道をした。

表-1 「見解について(中間とりまとめ)」第4章に見られる人工干潟批判の主な論理

- ・日本最大のシギ・チドリ類の渡来地であるという一事をもって、人工改変を避けるべき理由として十分。
- ・従来の自然干潟と同等の機能を再生する人工干潟の造成技術は、未だ確立されていない。
- ・人工干潟の機能は自然干潟と比較すれば何らかの形で必ずマイナス面が生じ、自然の修復能力によっても回復されず、自然干潟と同等の生態系を持つ成功事例はない。
- ・浚渫土砂による人工干潟の造成はシルト・粘土分の流出と局地的堆積により、周辺に残存する健全な干潟や浅場にも悪影響を及ぼす恐れがある。
- ・干潟の嵩上げは、下に埋もれる干潟生物への影響が大きく、少なくともアサリでは10~20cm、ゴカイやヤマトオサガニでは50cmの覆土で死滅する。
- ・持ち込んだ土砂に含まれていた生物が表面に出ることによって一時的に底生生物が豊富になったように見えたり、一過的な底質の変化により特定の種が短期的に大量発生したりすることが過去の例においても見られるが、このような現象も一時的なものであり、いずれ底質環境が定まってくると元の生態系以下の貧相な生態系となっている。

## (2) 研究の方向と成果

疑念は代償措置としての技術に対してであって、悪化した干潟の再生などに対するものではないとの意見もあろう。しかし、現地で行う行為は類似なものになる。こうした疑念に対して、どう技術検討がなされたのかを見てみる。干潟生態系では、①. 潮汐変動・波・流れの作用・気象条件による塩分変化を受け、日照や温度などの昼夜の変動や季節変動を受けている。変動の大きい系である。また、②. 流入負荷や沖合から上げ潮に乗って運ばれる負荷にも依存し、生物の幼生・卵・孢子・種子などは沖合からやってきたり沖合に流れたりしている。外部周縁環境との行き来の上に成り立つフロー型の系を形成する。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とされている<sup>7)</sup>。

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。干潟の食物連鎖の概念図を図-1に示す<sup>8)</sup>。

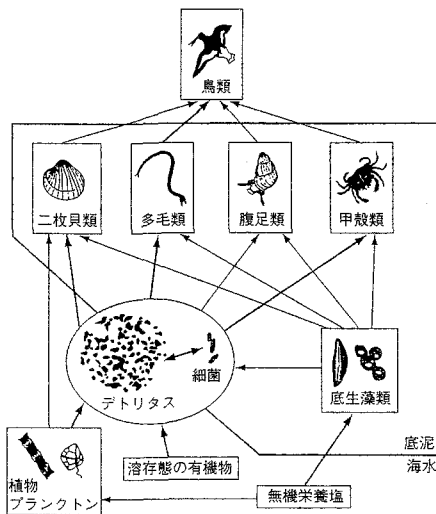


図-1 干潟における食物網の模式図

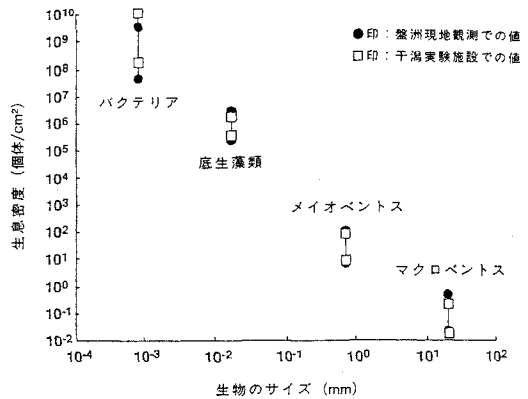


図-2 生物グループごとのサイズ別個体数密度 (●: 盤州干潟の値、□: 干潟実験施設メソコスムの値)

干潟地形が造成され底生生物がいない干潟地形が海辺に出現した後、①干潟生物がうまく加入・定着するかどうか、②加入してきたとして普通の干潟に見られるような生産者・消費者・分解者の構成を持っているか、③普通の干潟と類似の構成ができたとしてそこでは普通の干潟に見られるような栄養塩や有機物のやりとりが行われているのか、④構成も活動も普通の干潟のように形成されたとして、この系（システム）が人のお世話なしに自律的に数年間（大きな擾乱の来襲期間程度）は継続してくれるか、という検討が、メソコスム実験により検討された。室内の20m<sup>2</sup>規模の3水槽に干潟泥を敷き、東京湾口に近い久里浜湾内水を無処理で導入し、干潟を与えた。運転開始当初は、干潟の底生生物は見られず、開始後も人為的な生物の持ち込みをしなかった。数ヶ月で泥表面が底生藻類で着色し、1年経たないうちに、バクテリア・底生藻類・メイオベントス(1mmのふるいを通過する消費者を中心とした生物グループ)・マクロベントス(1mmのふるいの上に残るやや大型の消費者を中心とした生物グループ)から構成された生態系が形成された。各生物グループ毎の個体数密度も自然干潟(東京湾盤州干潟)で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-2に示す<sup>8)</sup>。現在、1995年1月の本格運転開始から丸9カ年経過しているが、特定種のみが一時的に卓越したり、生物量が急増したり急減したりといった現象は見られていない。少しずつ卓越種を変え、種数を増やしながらか成熟に向かっている<sup>9)</sup>と思われる。上載水と底泥との栄養塩のやりとりを調べると、自然干潟での値によく似た移動速度が見

られた。無機の栄養塩に対しては生態系の形成期によく見られるような、高い吸収速度も観測された。

地形の造成が適切で沖合海水が干潟面に導かれるのなら、1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ることが実験的に示された<sup>5)、9)</sup>。干潟・遠浅な地形や浅海部の形成は、適切な管理のもとでは十分に沿岸生態系の修復の役目を果たすであろう。人の手で造成された干潟で造成後経過年数の長いものもあり、船橋海浜公園地先の干潟や広島港似島等のように干潟生物が定着し地域になじみ利用されている事例<sup>10)</sup>もある。

こうして、社会的な疑念の指摘が解明すべき課題を明確化させ、研究開発が進展したともいえる。このためには、社会的な言葉を科学や技術の言葉として理解し直す必要があり、研究企画に際しては社会状況の理解が不可欠である。

### (3) 干潟相互の結びつきから見た配置論

それでは、干潟生態系を取り戻す地形の提供技術ができたとして、どこにその場所を作ったら良いのであろうか。メソコスム実験からは、浮遊幼生や卵や種子が海水にのって運び込まれることが、生物の加入定着にとって重要と思われた。そこで、東京湾において、干潟生物のひとつであるアサリを対象に、浮遊幼生の浮遊拡散状況を観測した。

アサリは、受精後、幼生として数日ごとに体の形を変えながら数日間浮遊し、適切な場所を見つけて着底する。アサリの遺伝子のみを染色する技術が開発され、体型が変化してもアサリ幼生を短時間で判別・計数できるようになってきた。東京湾内をほぼ3 kmメッシュで65地点の採水地点を設定し、表層～中層の3層で海水を採取し含まれている幼生の殻長分布と個体数とを計測した。採水は、2001年8月2、6、10日の3回行った。発生後1～2日を経たD型幼生と、さらに数日経過した殻頂期幼生との個体数分布を図-3に示す<sup>11)</sup>。幼生は湾奥部に広く分布することがわかる。8月2日には表層でD型幼生が湾奥の東京港沖と東岸の盤州干潟で多く見られた。6日には、D型幼生は急減し、殻頂期幼生は増加し羽田から盤州にかけて見られた。10日には、殻頂期幼生は極めて少なくなった<sup>11)</sup>。三枚洲や盤州干潟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。

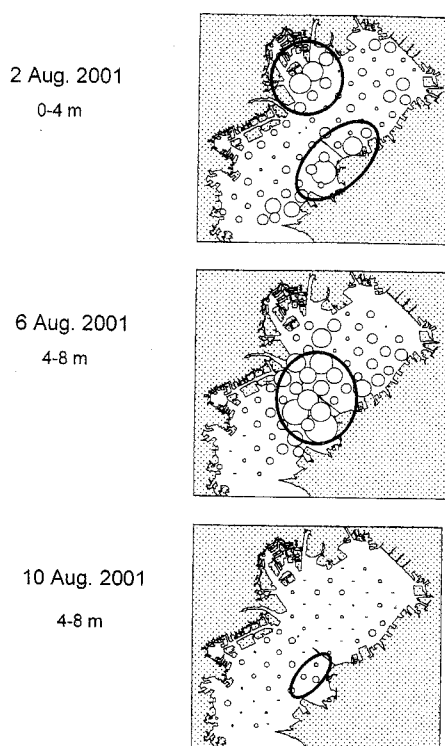


図-3 アサリ幼生の湾内分布 (上から、H13.8.2の0-4m層、8.6の4-8m層、8.10の4-8m層での値)

同時期に観測した湾内広域流動観測値から流れを水理モデルで再現し、浮遊幼生の浮遊経路を計算してみた。その結果、湾の東岸側では発生場所を中心に浮遊するのに対し、湾の西岸では千葉から横須賀にかけて大きく移動し、また一部は湾奥部に広く分布する様子が示された<sup>12)</sup>。西岸側の干潟は相互に結びつき、海の上の生態系ネットワークを形成していることが示唆された。干潟相互が結びついていることから、上手・下手の離れた干潟を一体として管理し整備することが効果的であると思われた<sup>13)</sup>。平成14年に策定された東京湾再生行動計画<sup>14)</sup>でも、このネットワークは意識され、西岸部沿岸を「重点エリア」としてゾーン区分された。内湾域に対する「空間の階層構造」や「時間経過に伴う影響の伝播構造」などの解析に基づく、生態系や環境の視点からの構造化作業のひとつである。

### (4) 自然共生型流域圏・都市再生イニシアチブ

内閣府の総合科学技術会議は、科学技術研究の重

点4分野を決めた。そのうちのひとつである環境分野では、地球温暖化研究やゴミゼロ型・資源循環型技術研究とならんで、「自然共生型流域圏・都市再生技術研究」が政府内の横断的な研究分野として作られた。ここでは、シナリオ誘導型の研究が指され、次の4つのプログラムで構成されることになった。①環境把握のためのモニタリング、②管理モデルの開発、③自然共生化の技術開発、④自然共生型社会を作り出すためのシナリオ作成と実践。干潟の再生技術の開発にとっても、上記①～④の分野が必要である。しかし、自然共生型社会をイメージしその実現を図るときには、干潟再生は海辺で実施されるひとつの手法であり、河川や都市内におけるその他の様々な施策と相俟って、目標実現に寄与することになる。こうしたプログラム分類では、従来の自然科学が不得手としてきた④の分野の充実が求められる。

干潟の研究から得られた「自然の自己デザイン」・「隣接生態系同士の相互依存やネットワーク」・「空間的な階層性を持ったものの移動」と言った生態系などの知見や「順応的な管理手法」などの管理概念が、実践を支える仕組みとして具体化されることが次の技術課題となろう。今後、経験したことのない人口減少（少子高齢化）や近隣諸国からの経済的追い上げの中で、都市と自然との関連、産業や社会と環境との新しい関係、そこでの生活の仕方、など、総合的な視点での研究が望まれている。

#### 参考文献

- 1) 倉阪秀史：環境政策論、信山社、363p., 2004
- 2) (社) 日本水環境学会編：日本の水環境行政、ぎよ

- うせい、284p., 1999
- 3) 末石富太郎・環境計画研究会：環境計画論、森北出版、320p., 1993
- 4) 岡田光正ら編著：環境保全・創出のための生態工学、丸善、1999
- 5) 細川恭史：内湾・内海の環境管理と自然再生、平成14年度港湾空港技術特別講演会 in 広島、国総研・中部地整・独法港空研、1-17, 2002
- 6) 環境庁検討会文書：藤前干潟における干潟改変に対する見解について（中間とりまとめ）、1998
- 7) 栗原康：共生の生態学、岩波新書 546、139-151, 1998
- 8) 細川恭史・桑江朝比呂：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, 1997
- 9) 桑江朝比呂ら：干潟実験施設における底生物群集の動態、港湾技術研究所報告(36)3、3-35, 1997
- 10) 海の自然再生ワーキンググループ編：海の自然再生ハンドブック—その計画・技術・実践—、ぎょうせい、p. 107&p. 138, 2003
- 11) 粕谷智之ら：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、13p., 2003
- 12) 日向博文ら：夏季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、2002
- 13) 国土交通省港湾局・環境省自然保護局編：干潟ネットワークの再生に向けて、国立印刷局、118p., 2004
- 14) 東京湾再生推進会議：東京湾再生のための行動計画（最終とりまとめ）、東京湾再生推進会議事務局、21p., 2003

## POLICY DEVELOPMENTS ON WATER ENVIRONMENT AND HISTORY OF ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH

Yasushi HOSOKAWA

Policy developments on water environment and the history of environmental system research are reviewed briefly. Research topics were moved associated with the policy developed. When the policy changed drastically, system research was requested with deep insight on the new concept of the new policy. Also, the scope of the research was enlarged on the spatial and temporal scale. Such research is more essential now as connects environmental policies with national social/economic development policy. The construction technology of coastal tidalflats is chosen as an example for the relationship between social criticism and technical development. Social criticism sometimes points out clearly the research theme left unsolved. Research has the possibility to develop under the interaction with social criticism, if researchers have keen eyes on it.