

# 研究展望

## 今後の環境・衛生工学研究の課題と展望

### REQUIREMENTS FOR THE FUTURE RESEARCHES OF ENVIRONMENTAL AND SANITARY ENGINEERING

合田 健\*

By Takeshi GODA

#### 1. まえがき

昭和61年は、3月25、26日に学術会議・学協会連合主催の第1回環境工学連合講演会が開催され、共催17学協会から選ばれた12人の演者および近藤学術会議会長が、一群の基調講演と物質循環に関するシンポジウムとを行って<sup>1)</sup>、多角的に環境問題を論じた。自然科学系学協会連合の試みとしては初めてのもので、成果もさることながら今後に向けての意義が深かった。次に11月12~14日、文部省科学研究費特別研究「環境科学」班の総合成果発表という形で、「環境科学シンポジウム1986」が開かれ（東京、虎ノ門パストラル）、基調講演を含めて332件の研究発表が行われた<sup>2)</sup>。

前者は学術会議傘下の17学協会共催の形でスタートしたが、幹事学会は土木学会である。これに対し後者は、環境科学系の大学院専攻科を有する5大学一北大、筑波大、東工大、神戸大、広島大の共催の形で開催された（幹事校は筑波大）。環境工学連合講演会と環境科学シンポジウム1986とは一見共通点が多いようにみえて実際は少なく、内容的にもかなりの相違があり、環境分野の複雑さを示している。しかし、この両行事が踵を接して開かれたことで、結果的に1986年が環境学元年のような年になった。

環境工学連合講演会の行事も、環境科学シンポジウム1986も、形式その他に違いはあったが、1987年以降も継続拡大することを意図しているから、1) そのこと自

体は結構なことである、2) しかし、環境工学連合と環境科学とが別々に新たな学会をもつことの必然性はまだまだよく理解されていない、3) もし両者が joint するような形で、今後学会運営を行うのだとすると、その前にかなり厳しい議論が必要であろう。

環境工学関係学協会として、学術会議の環境工学研究連絡委員会が数え上げた22学協会のうち、20学協会が62年度連合事業への共催参加を表明している。しかし、「研連」内部でのテーマの調整とか、旧環境科学特研グループが主催する環境科学全国講演会（仮称）とのオーバーラップ、環境工学の独自性をめぐる議論は、十分なされたとはいえない。

一方の、環境科学シンポジウム1986が開催されて以後の、新学会設立や新事業実施に向けての論議は、本稿が世に出るまでの期間に若干の前進があり得るが、今は全く未知であり、いずれにしても今後の大きな課題である。ともあれ環境科学シンポジウム1986がどのようなものであったかをお伝えせねばならぬが、差し当たり、同シンポジウム1986の前刷集から、発表がどのようなジャンル別でなされたかを記す。

セッション別に内容を略記すると次のようである。  
大気環境 (1) 大気汚染、(2) 大気熱、降雨、酸性雨；人体影響 (1) 地域・生態モニタリング、変異原性物質等、(2) 遺伝毒性・神経、発生、生殖、毒性、(3) 呼吸器障害その他；改善技術 (1) 水処理・活性汚泥その他、分離技術 (脱ハロゲン、難分解性・農・畜産廃棄物)；都市環境 (都市環境と交通)、環境動態、植生・生態 (1) (2) 一般の植生・生態、土壌生態系と重金属、重金属の環境中挙動；環境理念 (1) 環境計画その他、(2) 環境経済、住民意識；環境計測 レーザーレーダー、

\* 正会員 工博 摂南大学教授 工学部土木工学科

(〒606 京都市左京区下鴨泉川町36)

Keywords: amenity, ecological dynamics, diversity index, consti-  
tion of water quality

リモートセンシング、計測法；水環境（1）一般の水環境、（2）湖沼の富栄養化、リン・化学物質の負荷；藻類・プランクトン・赤潮。

このような分け方は環境科学の体系とは必ずしも関係なく、いわば文部省科研費による実施研究のジャンルそのままといってよい。ただ、土木工学、あるいはその1分野としての衛生工学からこれをどうみるか、また、環境工学とどういうつながりになるかを考える素材にはなる。

## 2. 衛生工学者などの認識

前節に挙げた環境科学特別研究のジャンルをみると、工学科色が明確でない。むしろ薄弱であると認識する人が多いであろう。ここ十年以上の環境研究の推移をみると、不審なことだが工学科色が意識的に排除されてきたように思われる。たとえば、環境科学に関連した「目的研究所」になるはずであった環境庁国立公害研究所でも、そういうムードがあった。ところがこの十年間に、マイクロエレクトロニクス、ニューセラミックス、バイオテクノロジー等が国の科学技術を支えたわけで、それらの分野が眩目すべき進歩を遂げたのは皮肉なことである。

環境科学全体が、上に述べたような跛行的な進み方を続けるならば、その将来は憂うべきであり、先端技術や国策から遊離してしまい、環境研究の本来あるべき姿がゆがむことをおそれる。

こうした状況を反映して、衛生工学に携わる人々の環境科学への参加は、かなり「及び腰」になっている。その一方で、環境科学関係の基礎系の人々のうちには、環境科学は衛生工学もすっぱり包含している、と考えている人達がかかなりいる。それは違う、といたい向きも多いと思うが、その辺をとらえて論陣を張った文章にはあまりお目にかからない。

さて、環境工学の関連学会連合事業を健全に発展させたいと思う著者も、正直なところ、既述のようなわが国環境科学のムードをそっくり延長して、学会を統一化するといわれても、積極的に私などが入って行って本格的な研究成果を問う気にはなりにくい。その前に環境科学研究のとるべき軌道の見直し、修正、あるいは各界での研究実績を正しく踏まえた学際的協同態勢づくりが地道に、慎重に行われねばならない。ちなみにアメリカ合衆国のこの分野は、environmental science and engineering または environmental science and technology とよばれており、工学あるいは技術側の、対等な立場での参加なしの、独立した environmental science という術語はあまり使われていない。

ここで衛生工学専門の人々を例にとり、その意識や研究から、工学の側にも前記のような事態を惹起するに

至った、あるいはそうした環境科学の跛行的進行を黙過するような要因がなかったか振り返ってみたい。私見からすると、たとえば衛生工学者の大部分は基礎から離れすぎていた。特に一部の衛生工学者には、基礎分野の無視あるいは軽視、もしくはその方面の知識の欠如があったように思う。

私自身、衛生工学出身というに近い存在であるが、今日、衛生工学者と称せられる人の中には、自分たちは現象の数量的処理や記述さえできればよいとか、水処理の、割合新しそうなトピックさえ追っていれば無難だ、と思っている人もあるようにみえる。環境科学者グループで上下水道分野のことがほとんど話題にされないのはなぜだろう。それをやっている人たちが特殊グループ視されているせいだろうか？ また、廃棄物問題がその重要性にもかかわらずあまり脚光を浴びないでいるのはなぜか？ そうしたことをよく考えてみる必要がある。排除すべきは、環境科学や環境工学の論議、集会对岸の出来事とみたり、環境工学を真剣に発展させようとする動きにブレーキをかけたりすることで、それは結局、衛生工学の歴史的使命にもととり、テクノロジーの順調なべき進歩を遅らせることにつながる。

次に、土木工学界全体としてはどうであろうか。すでに都市の再開発、再々開発などで環境の整備、快適化、景観デザイン等、現実の事業の中にどんどん「環境工学」「環境設計」が入って来ている。土木事業の性格から、それらは概して環境創造面の仕事と受け取られることが多く、学理よりも実務が先行している感がある。携わっている設計者、技術者にも、“保全している”というより“創造している”意識の方が強いようにみえる。

長大橋を架設するにしても、それが自然を破壊する面より、新しい景観をつくり出す面をより評価したく思うのはある程度自然といってよいかもしれない。注意すべきは、いったん構造物、ひいては景観が出来上がってしまうと、仮にネガティブな評価があったとしても、つくりかえとか罰則適用がない。このことは「甘え」につながりやすく、反省とか事後アセスを無視しやすい。これは環境保全理念とは本質的に相容れないわけである。

土木学会の中にある環境問題小委員会は、従来衛生工学委員会内の小委員会という形をとっていたが、環境アセスメントのあり方を論じたり、環境計画論を展開していた時代から、今では1歩進んで、土木学会に共通した環境工学の研究委員会に成長しようとしている。この時期に、環境工学のテーマ展望、現時点での要望等を披瀝することも意義があると考え、次節以降、具体的に記述する。

### 3. 環境工学研究課題の展望と現状

前2節に論じたことから、土木工学界にとって、環境工学的な新しい諸研究の展開が不可欠であることが理解されよう。環境工学は学際性の強い分野であるが、これと取り組むことは一種の歴史的必然ともいえる。以下重点的に敘述し展望する諸テーマに共通していえることは、それらは必ずしも土木・衛生工学分野のみに課されたものではない、ということである。しかし、土木・衛生工学分野の人々がテーマ推進のリーダーシップをとることが本来望ましく、またその方が環境工学の、環境学全体の中での独自性を確立するうえで重要、かつ大きい意義を有すると考えられる。

#### (1) 環境の快適性について

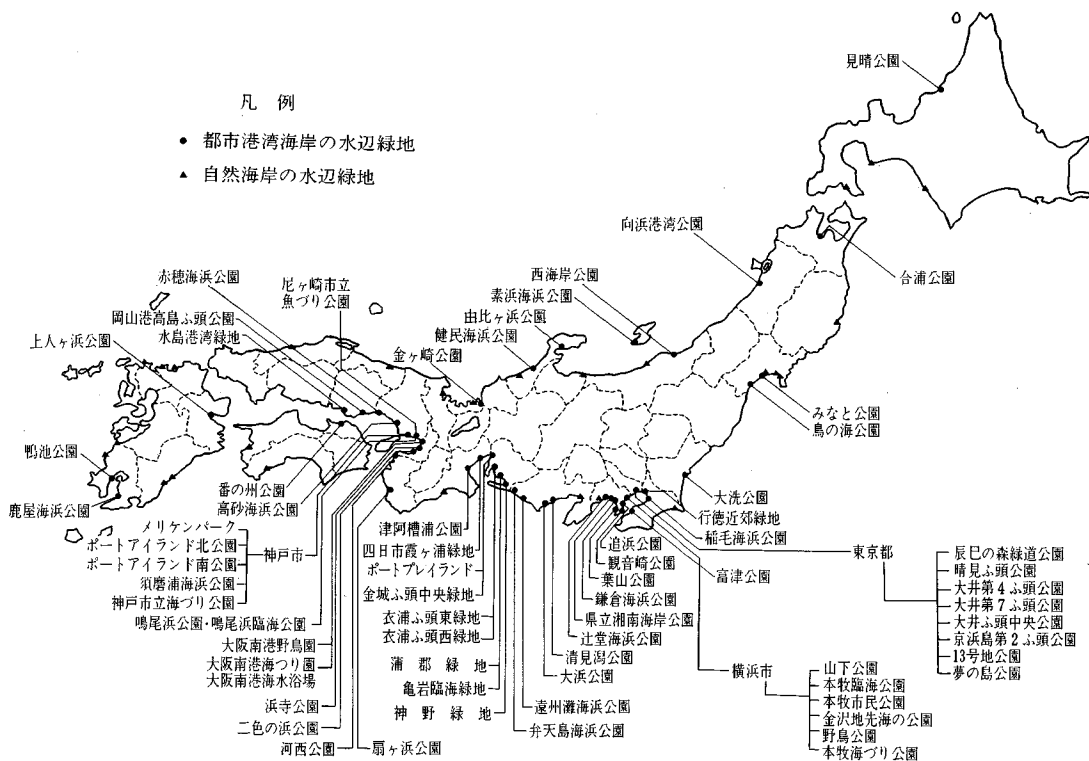
快適環境づくりは今や国家的プロジェクトといえる。国の補助の有無を問わず、都市全体、あるいは局所の環境快適化の計画、事業が全国的に進められており、また河川堤外地の公園化、レジャーランド化、さらには新しく芽生えつつあるスーパー堤防を兼ねた緑地帯・居住空間造成計画など、省庁・自治体ごとに目白押しに快適環境計画がひしめいている。まちづくりにみられる環境快適化は、たどれば歴史はかなり古いが、既成市街地の再開発が、しばしば居住者の非協力的に遭って、実現が長期

化する一方で、地下街は比較的自由に創造可能なことから、わが国でも、20年くらい前から地下に人工のせせらぎや泉を造る試みがあり、成果はそれなりの評価を得てきた。

水辺は特に人に親しまれるべき場所だから、水辺環境の創造、快適化は関係省庁、自治体でも重視している。この場合、単なる快適性 (amenity) の創造だけでなく、親しみやすさ (affinity) や近づきやすさ (accessibility) も満たされる必要がある。それでは快適性の評価や親水性、近づきやすさの評点・計量をどのようにすればよいのか、これは誰しも共通に感ずる問題意識で、相互比較の困難な問題である。

快適環境の評価は建築デザインのそれと似ていて、評価は、仮に複数の人々が参加しても、十分な客観性もち得たかどうか安心できない。このため意識調査や評点には多人数の参加が必要である。問題はアンケート等で得られた結果をどういう方向で分析するか、にある。たとえば東京都の行っている都内各所の快適さ、住みよさ、空気よさ等に関する一連の評価評点<sup>3)</sup>は、1つの好例といえようが、こうした評価の方法論の本格化はこれからの問題であろう。

われわれの通念でいう計測と、こうした評価評点がどこで結びつくだらうか？ たとえば、景観や水色、緑の



図一 全国の都市海岸・港湾の水辺緑地の分布 (吉村・芝原:文献5) 図153より)

内容、色彩等を、一方で被験者の官能刺激度を測定し、他方で明るさ、緑の濃さ、匂いの原因量（照度、クロロフィル濃度、発臭物質存在度）を測定し、両者を比較する方法が考えられる。ここにいう明るさ、匂い、色調などは、被験者の性格によって Weber-Fechner の法則か、Stevens の法則に従う<sup>4)</sup>とすれば、官能刺激値と原因物質質量あるいは濃度との間に、片対数紙または両対数紙で直線となる関係が見出し得るであろう。もしそのような解析ができるとしたら、快適性や景観の問題も別な進展をみせるかもしれない。

主観的評価の問題を客観的評価の問題に切り換えるには全く発想を転換することが必要ではないか。たとえば、Shannon による情報理論の体系化以前には、情報の価値は受信者の主観に委ねられていた。ところが、受信情報の量を、情報の生起確率の対数、すなわち情報エントロピー尺度で表わすことにより、情報理論が体系化された。そのようにアメニティ問題が処理できるという保証は全くないけれども、そうした思い切った価値転換の発想がそのうち現われることを期待したい。

ところで、水辺環境の問題に絞ると、環境改善の諸例を通じて、対応の最も遅れているのは海辺環境ではないかという気がする。大都市地先や近くの海辺は、堤防、護岸、岩壁等港湾施設、臨海工業地帯などが永々と連なっていて、海岸線の大部分が無機体の連なりと化している。河川、湖沼、ダム湖などの周辺環境は整備しやすく、改造が進んでいるのと対照的に、海浜公園をつくり得るような場所はかなり特定されている。図-1 は、全国の都市の海岸、港湾の水辺緑地分布を吉村らの書<sup>5)</sup>から転載したもので、一見すると、太平洋ベルト地帯の人口密集地域に造成緑地が集中しているように見える。しかし、分布密度の大きい所は、実はそれだけ自然の海岸が乏しいことを意味している。

われわれの実感として、これらプロットされた緑地の存在を日常ほとんど意識していないし、海側からみた人口密集地の海岸は、港湾施設、工場あるいは工場用地などの連続のように映り、いたって味気ないものである。養浜による人工の渚や漁礁、野鳥の休み場所などがどの程度必要なものか、状況によってまちまちであろうが、計画者、研究者も真剣に日本の海岸のあるべき姿を考える必要がありそうである。

## (2) 環境指標、健康指標

望ましからぬ化学物質や音響、有害紫外線、振動などを人に伝達する媒体が大気、水、土壌であるが、媒体自体を浄化するか、暴露からの保護、表土への植栽等人為加工をすれば、環境浄化もある程度可能である。だが現在の社会はさらに進んでおいしい空気や水を求めている。また土壌には、安心できる新鮮な野菜、美しい花卉

などを期待している。化学物質による汚染は、決して一段落したというような状況ではない。次から次へと新物質が産生され、ケミカルアセスの網をくぐり抜けて来る化学物質に監視の眼を一層厳しくせねばならぬし、農業でも、微生物農業といった、新しく環境影響を検討せねばならぬ問題もある。したがって、そうした物質あるいは高等植物・微生物の存在度や分布自体が環境指標研究の重要な分野である。

ところで、媒体である大気や水のコントロールはどう考えるべきか。不完全で見直さねばならぬ点があるとはいえ、環境基準の存在そのものが環境浄化への大きなネゲントロピー (negentropy) である事実は変わらない。水の場合でいうならば、「それ以上悪くならないように」環境基準や規制基準が運用され、そこに多くの指標が使われてきた。そういう指標群の許容限界値を守ることすらまだまだ未達成であるが、一方でおいしい水、透明な水といった希求が顕在化してきた状況をどう考えるか。そうした状況では、指標が必ずしも水の汚れ度を示すものとしてはみず、好ましい味、匂いとのつながりがどうなるかも考えたい。

この問題は前項に述べた快適性希求のテーマと通じていて、指標による評価全体に主観性が強いことも (1) の場合と共通している。

系の秩序の整い方、乱れ方という見方では、エントロピー理念が重要で、これは環境過程の不可逆度をも数値的に示し得るものである<sup>6)</sup>。しかし、景観や土地の区画整理、都市再開発のように、眼に映ずる環境の秩序度に対しては、熱力学的なエントロピーよりむしろ情報エントロピーや多様性指数 (diversity index) の方が実用的であろう。

しかし、環境指標や健康指標のうちでも、環境あるいはシステムが人間にとって不都合な点を正しく、客観的に認識させるもの一たとえば系の中に人が暴露されては困るような、疫病の原因生物がどのくらい存在するか示すようなもの一が依然として重要である。衛生工学にも縁の深い次のような例がある。上水道と下水道とは、それぞれ慣用の水質管理指標をもって、管理日報に記載される項目は限られており、しかも両者共通ではない。たとえば濁度は水道プロパーの指標であって下水道ではこれを用いず、逆に浮遊物質濃度は水道では用いられない。このような水道と下水道とが、共通の河川から取水し、処理水を放流している。人口集中が進むと、取水点と放流点とは当然近接してくるし、放流点の方が上流側、取水点が下流側という、常識と逆の形もしばしば実在する。当然そこには上下水道共通の、水質管理指標が必要なのに、適切なものがない。こうした状況は淀川中・下流や荒川、江戸川のように身近な問題としてあるのに、

これまで放置されてきた感がある。とりあえず NH<sub>4</sub>-N や THMFPP (トリハロメタン生成能) のような管理指標があるが、より包括的な意義をもつ、河川水質管理とも関係の深い指標が考えられないだろうか。

水質指標でも生態系指標でもそうであるが、包括的な指標、特に総合的に状態の表現できる指標の考案が望まれており、これは国際的な要望でもある。ここで総合という意味はいろいろな解釈ができるが、特定の指標値の空間的、時間的積分値を求めれば総合化できる、といった考えではいけない。総合指標に求められるものには第一に、別々な意義をもった指標群を“include”し、あるいは“represent”するものが望まれる。

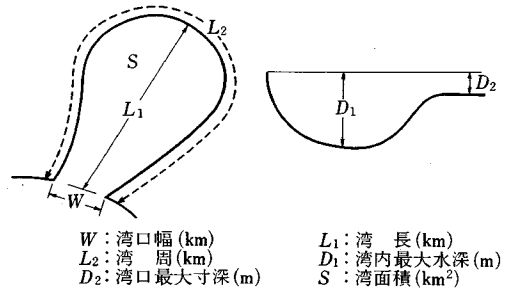
いま1つ、物理的指標、化学的指標のみにとらわれず、生物指標にも注目すべきである。つまり指標生物・微生物というものが考えられてよい。水域では、大腸菌群数や優占微生物—藻類、原生動物、昆虫—がそれなりの意義をもつが、植生や土壌の性格を表わすような生物指標も大切である。

(3) 内湾・内海の海水交換能と富栄養化の影響

わが国の沿岸海域に関する重要な環境工学的課題は、200海里専管時代、Marpol 条約(国際海洋汚染防止協定)批准後という新事態を迎えて、未解明の問題、緊急の問題が目白押しである。この海洋新時代を自信をもって乗り切るためには、まず沿海に関する重要課題との取組みが前提であろう。土木工学各分野で一番縁の深いはずの海岸工学で、沿岸海域のことがよく知られているようでも、たとえば閉鎖性内湾・内海水の更新率、あるいは外側海域との海水交換率という、環境工学上重要な基礎知見が不足している。たとえば瀬戸内海、外洋との海水交換率が判明すれば、内海中のたとえば播磨灘、燧灘、広島湾、あるいは大阪湾などの、外側海域との交換率を測定することに意味が出てくる。しかし、これが判明しないと、上掲のような二重の閉鎖性をもった内湾水の真の更新率はとうていわからない。陸側から供給される諸物質、特に N、P などの回転率 (turn-over rate) を知ることは、沿岸海域の特質、特にその富栄養化特性、湾奥水域水質改善の目途をつかむことにつながる。しかし、今のところそうした計算に使えるような具体的な研究があまりない<sup>7),8)</sup>。

閉鎖性の海湾に対して、図-2に示すような閉鎖度指標が検討されたことがあるが、これは海湾の閉鎖度を幾何学的に比較するにとどまっている。海域の研究は地球物理学分野でも未知のことが多く、外海側と内海側とを画する前線 (front) の位置すら、あまりはっきりしていない。

海域の富栄養化は一体どういう意義を有するのか。たとえば赤潮は富栄養化が原因で惹起されると考えてよい



W: 湾口幅 (km)                      L<sub>1</sub>: 湾長 (km)  
 L<sub>2</sub>: 湾周 (km)                      D<sub>1</sub>: 湾内最大水深 (m)  
 D<sub>2</sub>: 湾口最大寸深 (m)              S: 湾面積 (km<sup>2</sup>)

- 1) 西田幸男の閉鎖度指標 (1978)
- 2) 環境庁が試算した閉鎖度指標 (1982~1983)

$$I = \frac{S \times D_1}{W \times D_2}$$

$$I' = \frac{\sqrt{S} \times D_1}{W \times D_2}$$

図-2 湾の閉鎖度の評価例

のか? 富栄養化は海面漁業、海面養殖業にとってプラスなのかマイナスなのか? それらの判断には膨大なフィールドデータとそれらによる基本データベースおよび複雑な分析を必要とするはずだが、それらは残念ながら不十分である。このことは、環境庁の窒素・リン等水質目標検討会で4年以上の歳月を費やし確認された。結局、ある程度明確なのは、陸側から排出される窒素・リンが湾奥部に滞留する場合、必然的に周期的、あるいは永続的な藻類増殖をもたらす、その藻類が分解沈降することにより、海底近くで酸欠、すなわち貧酸素水塊を生ずること、また、そういう状況下では底層が嫌氣的になりやすいから、底質中の硫化物の増加、底生動物の低級化の傾向がみられることである。

図-3は最近における瀬戸内海での漁獲量の推移を示すが、漁獲量の増加には漁法近代化の影響も大いに考えられ、結局、富栄養化が漁業政策上どういう意義をもつかを明確にすることができない。陸上から排出される N、P の規則を強化する理由はどこにその名分を求めたらよいのか、また、水産資源の多様性が今後とも内湾や内海で維持できるのかどうか、そうした一連の疑問に答えを与える必要がある。こうしたテーマ解明に共通して望ましいのは、水産資源などの現存量を漁業統計に依存しないで、できるだけ科学的な調査に基づく推定を行いたいことである。

締めくくりとして、海域の富栄養化について、さまざまな角度からメスを入れ、われわれはどこまで静観していてよいのか、静観できないとすれば陸上、海域でどういう施策があるか、その答えを出すのは決して農林水産畑だけの問題ではなく、重要な環境工学的課題だと考えられる。

(4) 生態系の動態・運命解析

前項に述べたような問題の解明には、最終的に生態動

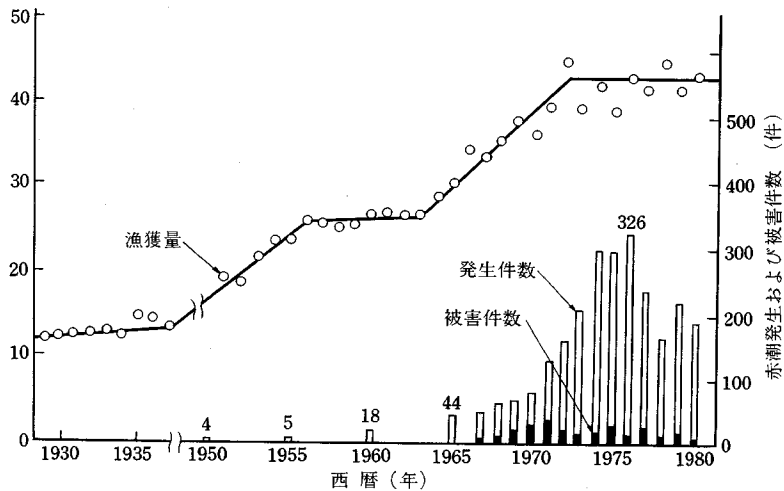
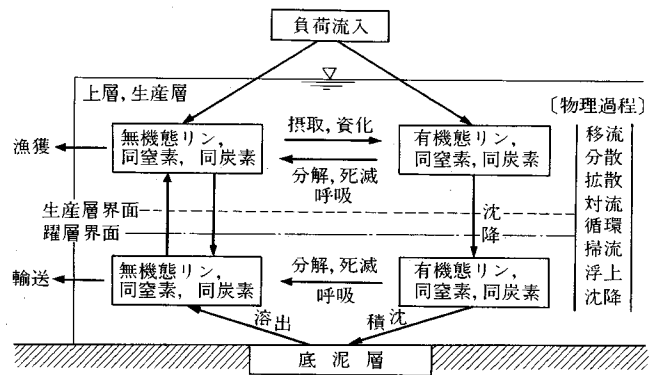


図-3 瀬戸内海全体の海面漁業生産と赤潮・同被害発生の推移  
出典

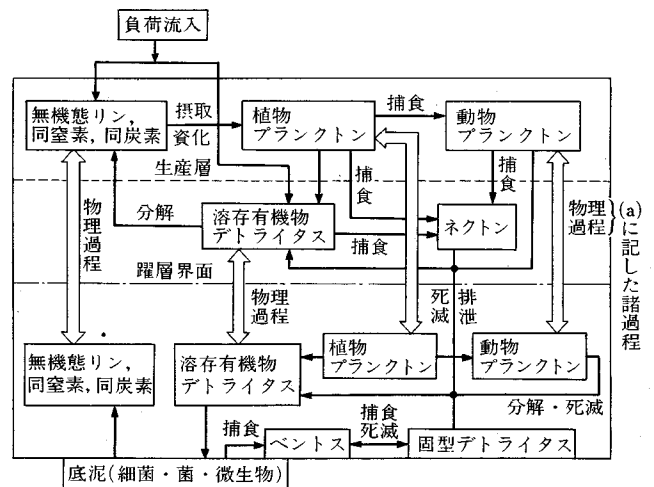
漁獲量：多々良（1982），中国四国農政局資料

赤潮：水産庁瀬戸内海漁業調整事務所「瀬戸内海の赤潮」

力学モデル解析 (ecological model analysis, ecological dynamics) が必要となる。従来、生物学分野では、変数、因子数の多い現象の説明には一般的な統計手法か、せいぜい多変量解析を試みる程度であった。エコロジカル・モデリングは、ここ10年くらいで急速に発展した解析手法で、生態系 (ecosystem) を構成する諸量間の依存関係、収支関係、被・捕食関係、種 (または属) ごとの生物の増殖・成長・減衰に関する法則などを、一群の常微分方程式で表わし、これに運動量、物質などの保存則、あるいは流動条件を与え、コンパートメント分割で対象領域を区切り、コンピューター解析を行う方法である。現象に関与する気象・水文因子、生物間の種間競争関係等も当然、モデル諸式に考慮され、関連する多くのパラメーターを定数あるいは関数として扱う。エコロジカル・モデリングは従来、湖沼、湿地、草原、森林などの生態系挙動をなるべく簡単なモデル式で解析するため用いられてきたが、変数数1000近い大規模なものが湖沼解析に用いられたり (LK Ontario Model)、湖沼のプランクトン消長などの解析が特にポピュラーであった。しかし、海域のような複雑な生態系、あるいは陸域の社会経済的諸現象、人間生態系の解析、さらに微生物コミュニティの挙動、化学物質の運命予測等にも応用対象は広がり、研究・実用は活況を呈している。



(a) 無機・有機態物質と物理過程, 生物・化学過程



(b) 栄養摂取・死滅・分解・排泄形態

図-4 海域生態系の模式図

歴史的に古い、lake behavior model, 特に生態系の1次生産を担う植物プランクトンの population dynamics は早く1930年代に研究がスタートしたが、しばらく戦時中断があり、その後 Vollenweider (1965)<sup>9)</sup>の研究などが隆盛のきっかけとなっている。わが国の陸水学分野では、生物・生態学者の基礎研究が永らく大きい比重を占めていて、数理生態学者あるいは工学者によるエコロジカル・モデリングが例年発表されるほどには至っていない。しかし1984年、第4回国際生態モデリング学会 (ISEM) が筑波の国立公害研で開かれたことが、最近の国内研究に大きい刺激を与えた<sup>10)</sup>。

湖沼や湿地に関するモデリングに比べると、海域のそれはかなり複雑である。たとえば物理量の扱い方一つをとっても、かなり思い切った仮定を必要とするし、また生物相互間の披・捕食関係には、プランクトン、ネクトン(遊泳生物)、ベントス(底生生物)に加えて高等植物(macrophytes)も関与するので、湖沼ほどには簡単に運ばない。従来、わが国では湾域を含め海域生態力学モデルにほとんどみられるべきものがなかった。これは(3)に述べたように、内海と外海との水量、塩分交換機構がはっきりしないとか、外海と内海とを区切る前線の位置や、そこでの物理・化学・生物学的境界条件が明確でないこと、海流、潮流、残差流などがからみ合っているうえ、密度流や循環流、成層条件などの規模がたえず変化するため、定常モデルの形で整然とした力学モデルが組み立てにくかったことが主原因と考えられる。しかし、200海里時代に入り、日米、日ソなどの漁業交渉には、海産資源量変化が予測でき、十分説得力のあるモデルが必要なようで、このことは海域生態力学モデルの開発を刺激する有力な材料になっている。

海産資源の消長をエコロジカルモデルで説明し予測することは、遠洋漁業は別として近海漁業や栽培漁業、海域富栄養化機構解明にとっても重要である。そこで重要なのは、生物の種ごとの個体数よりむしろバイオマス(biomass)であるから、従来から用いられてきた多様性指数の式

$$DI = -\sum \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \dots\dots\dots (1)$$

( $n_i$ :  $i$ 種生物の個体数,  $N$ : 全種生物の個体数)を用いるより、バイオマスを基礎とした

$$DI_{mass} = -\sum \frac{b_i}{B} \log_2 \frac{b_i}{B} \dots\dots\dots (2)$$

( $b_i$ :  $i$ 種生物のバイオマス,  $B$ : 全種生物のバイオマス) または、 $DI_{mass}$  に  $B$  を乗じた

$$DI'_{mass} = B \cdot DI_{mass} = -\sum b_i \log_2 \frac{b_i}{B} \dots\dots\dots (3)$$

を用いるべきだと著者は考える。図-5に示すのは広島湾底質の汚染度を示す化学的指標 TS(全硫黄)に対し、同湾海底各点のベントスに対する  $DI'_{mass}$  をプロットしたもので<sup>11)</sup>、 $DI'_{mass}$  あるいは  $DI_{mass}$  が海域汚染で有する意義を示す一例である。

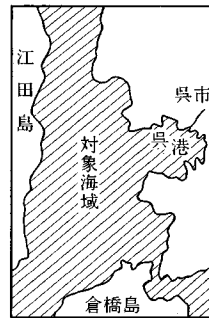
バイオマス多様性指数はエコロジカル・モデリングとどう結びつくか。典型的なモデル原式を書いてみよう。以下、植物プランクトンの  $i$  種のもの単位体積中質量を  $PH_i$ 、動物プランクトンを  $Z_k$ 、ネクトンを  $N_m$ 、ベントスを  $B_j$  として、それぞれの現在量変化を基本方程式に記し、焦点となる問題を浮彫りにしてみる。水理学的現象はここでは単純化して、仮に移流と拡散のみの系として記す<sup>12)</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(PH_i) = & A(PH_i) + (G_i^{PH} - R_i^{PH} - W_i^{PH})PH_i \\ & - \sum_j f_1(PH_i, PH_j) - \sum_k f_2(PH_i, Z_k) \\ & - \sum_l f_3(PH_i, F_l) \dots\dots\dots (A群) \end{aligned}$$

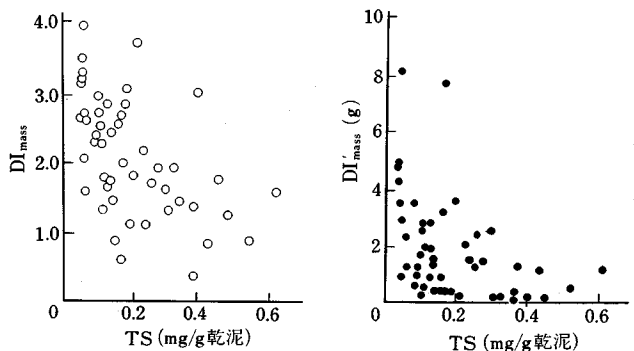
( $i \neq j$ )

$$A = -\nabla \cdot (C_i^{PH} V) + \nabla \cdot (A_H \nabla C_i^{PH})$$

A群の式の右辺第1項は移流拡散による植物プランクトン  $i$  の増加率を表わす。 $G_i^{PH} \cdot PH_i$  は増殖による  $i$



(a) 広島湾内対象海域



(b)  $DI'_{mass}$ ~底泥の全イオウ (c)  $DI_{mass}$ ~底泥の全イオウ

図-5 広島湾海底ベントスに関する  $DI'_{mass}$ ,  $DI_{mass}$  と底泥全イオウ量との相関

種プランクトンの増加率， $-R_i^{PH}$ は呼吸・死滅による減少率， $-W_i^{PH}$ は沈降による減少率， $-f_i$ は*j*種プランクトンによる*i*種プランクトンの増殖抑制（競合あるいはアレロパシーによる）の寄与度， $-f_2$ は，*k*種動物プランクトンの摂食による*i*種植物プランクトンの減少率， $-f_3$ は*l*種の食植性魚（plankton-feeder fish）による*i*種植物プランクトンの減少率である。

動物プランクトンに関しては次式で表現できる。

$$\frac{d}{dt}(Z_k) = A(Z_k) + (G_k^Z - R_k^Z)Z_k - \sum_{\alpha} f_{\alpha}(Z_k, Z_{\alpha}) - \sum_{l} f_l(Z_k, F_l) \dots \dots \dots (B群)$$

( $k \neq \alpha$ )

式中の  $A(Z_k)$  は，A群式の  $A(PH_i)$  と同意義の項， $G_k^Z$ ・ $Z_k$  は増殖による *k* 種動物プランクトンの増加率， $-R_k^Z$ ・ $Z_k$  は呼吸死滅による *k* 種動物プランクトンの減少率， $-f_{\alpha}$  は  $\alpha$  種動物プランクトンの摂食による *k* 種動物プランクトンの減少率， $-f_l$  は  $l$  種動物プランクトンの摂食による，*k* 種動物プランクトンの減少率， $-f_3$  は *l* 種ネクトンの摂食による *k* 種動物プランクトンの減少率である。

遊泳動物  $N_m$  について次のようになる。

$$\frac{d}{dt}(N_m) = (G_m^N - R_m^N)N_m - F_0 C_m^N - \sum_{\beta} f_{\beta}(N_m, N_{\beta}) \dots \dots \dots (C群)$$

( $m \neq \beta$ )

$N_m G_m^N$  は *m* 種ネクトンの増殖によるバイオマス増加率， $-N_m R_m^N$  はその種の死滅による減少率， $-F_0 C_m^N$  は  $C_m^N$  を *m* 種ネクトンの濃度として，漁獲による減少率， $-f_{\beta}$  は  $\beta$  種の魚食性ネクトンの摂食による *m* 種ネクトンの減少率である。最後にベントスについては，

$$-\frac{d}{dt}(B_{\gamma}) = (G_{\gamma}^B - R_{\gamma}^B)B_{\gamma} - F_0 C_{\gamma}^B - \sum_{\delta} f_{\delta}(B_{\gamma}, N_{\delta}) - \sum_{\sigma} f_{\sigma}(B_{\gamma}, B_{\sigma}) \dots \dots \dots (D群)$$

( $\gamma \neq \delta$ )

$G_{\gamma}^B \cdot B_{\gamma}$  は  $\gamma$  種ベントスの増殖成長による増加率， $-R_{\gamma}^B \cdot B_{\gamma}$  は  $\gamma$  種ベントスの死滅による減少率， $-f_{\delta}$  はベントス食性魚の摂食による  $\gamma$  種ベントスの減少率， $-f_{\sigma}$  は  $\delta$  種ベントスの摂食による  $\gamma$  種ベントスの減少率を表わす。

現実の計算では，方程式数，パラメーター数をできるだけ少なくしたい。A群式にみられる  $f_i(PH_i, PH_j)$  のような，種間競合に関する項などは，生物学的にもほとんど未解明の問題を含んでいるから，現実には，マイクロコズムのような単純な系での実験結果から逆にその関数形，あるいは項の定性的特徴を求めることも重要な意義がある。

(5) 水域環境容量，環境基準

この問題もすでに著者が61年3月の環境工学連合講演会で詳しく述べている<sup>13)</sup>。ただいまの，環境基準や排水規制を主体とする環境行政では，湖沼—河川—湾—沿海という水域のつながりを上→下流方向にたどって，環境基準の類型指定をそれほど矛盾なく定めている。しかし理論的には，本来河川，湖沼，地下水，湾・内海および外海のそれぞれにふさわしい，維持さるべき水質像があるはずで，それから求まる各水域の負荷容量に依じて環境容量が定められ，それが項目ごとの環境基準につながるべきものである。

また，上流から下流に向けて流水基準を定めていくのは，本来逆であると思われる。最下流の内海または外海を，便宜上いくつかの水域に分け，個々の水域相互間での，水量や物質の交換形態が把握されたうえで，漁業や水浴，観光，リクリエーション等を考慮して，水域コンパートメントごとの水質環境容量をまず定める。それと矛盾しないよう上流側の湾，河川感潮部，さらにそれにつながる河川の許容負荷量が定まる，というのが本筋である。この意味で，(3)に述べた水の更新率，局所的な海水交換能を明らかにする必要が痛感される。

環境容量が明らかになれば，当然それにあわせて再検討されねばならないのが各水域の環境基準である。それは基準項目そのものの選択を含めて見直されねばならない。現今，河川・湖沼についてそれぞれの有機汚濁度を代表する立場にあるのがそれぞれBOD，CODであり，これに全窒素，全リンが富栄養化関係項目として加わっている。しかし，ある河川区間のBOD許容最大値（現在は75%値）がたとえば3ppmだといっても，それでTOC(全有機炭素)値がすぐ予測できるほど，データベースも統計も出来上がっていない。同じように，全窒素(TN)の最大値が指定されても， $NH_4-N$ の値をそれから予想することは難しい。こうした点の明確化も今後の研究に望まれる。

(6) 河川の水質構成，非点源汚濁，雨天時負荷

河川や湖沼の水質を改善し，あるいは保全することは，人口集中の著しい都市河川，水源河川にとって面倒な課題である。対策としてとられてきた各種下水道の普及とか工場排水処理だけで，はたして河川水質を好ましいレベルに引き上げることができるだろうか。また，PPPの原則から，他の汚染源の寄与度を不確かなまま放置しておいてよいだろうか。ただ今河川などに望まれている水質像の議論や施策の費用負担論は，どうもこの種の理論的詰めを欠いたままなされているように見える。

河川の任意断面の，任意時点での水質は，一体どうして構成されているのか。この基本的命題に対して研究調査が不足している。たとえば近畿圏では，いま淀川中・下流において，上流側に処理下水の放流があり，下流側



で上水取水を行う形となっているが、昨今の都市化の進展で、この逆転された上下流関係がますますシビアなものになりつつあり、対応策をどうとるかが緊急の課題になっている<sup>14)</sup>。上流での処理汚水量の増大によって、下流側水道にかかる  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TOC、THMFP 等の負荷がさらに大きくなろうとしているが、一方では現今の水道水のまずさや臭いが指摘されており、こうした諸問題を解決する効果的な方策、費用負担原則に関する基礎研究が待望されているのである。

この課題への対処法としては、結局河川水質を、低水、平水、豊水、豪雨時等水文条件に応じて、オリジン別構成で示すことが前提になる。そもそも河川水質が劣悪になるのは、生活排水や工場排水のみのためとはいきれない。農業排水、畜産排水、工業統計に入らない事業排水、そしてノン・ポイントの流出、雨天時の自然負荷等が大きい寄与をしていることを忘れてはならない。農業排水の基本となる農業用水は、推定日量（かんがい、非かんがい期を平滑化して）1.75 億  $\text{m}^3/\text{日}$  で、わが国の日平均総水利用量の 6 割近い<sup>15)</sup>のに、その排水の性質はよくつかめていない。

一方、雨天時に非点源から大きな COD、N、P 負荷が加わることは、霞ヶ浦流入河川のケーススタディで実証されている<sup>16)、17)</sup>。こうした傾向が全国の河川ではどうか、究明する必要がある。都市域などの非点源負荷については、多くの研究者がその実態を究明しつつあるが、研究の歴史が浅く、実用にできるデータが少ない。

一般に、水質保全費用の配賦問題を考えるとき、合理的な負担原則を明らかにすることは都市河川などで特に重要であり、図-6 に示すような水質構成を基礎とすることが望ましく、同じ原理で湖沼や内湾の水質保全の問題も考えることができる。

(7) 水処理の課題一般

いろいろな目的の浄水・水処理操作を通じて研究課題

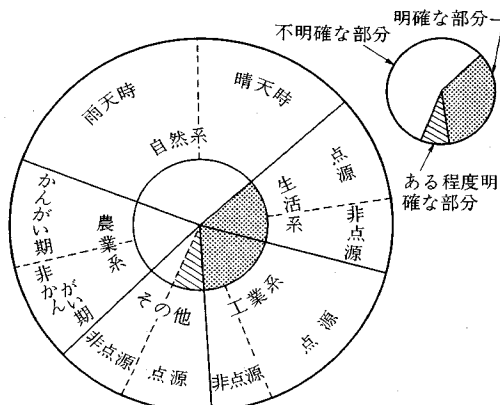


図-6 河川水質の origin 別構成概念図

を代表的に挙げてみたい。水処理操作は全体としてよりコンパクトかつ高効率化をねらい、これまで不可能視されていた課題にも挑戦すべきである。現行の一部の技術はハイテクノロジーと位置付けることもできよう。以下、要望研究を3つのジャンルに分けて展望する。

(イ) 生物処理：生物膜その他の方法

富栄養化対策で排出窒素・リン量をさらに低くし、しかも施設費、運転費を抑え得る方法が相変わらず指向される。生物学的には硝化菌、脱窒菌、脱リン菌等をなるべく高効率で機能させるべく、嫌気・好気条件をどう組み合わせるのが最適か摸索する方向で進める。下水処理であれば、排出 TN が通常 20 ppm 前後であるが、これを 1~2 ppm かそれ以下にする技術の開発が要請されている。立地条件からして、そういう三次処理施設は半地下、もしくは立体化構造にする等、敷地の制約を克服する発想が必要と考えられる。一方、小規模汚水処理にも課題は多い。合併浄化槽も 501 人以上の規模のプラントが多くなりつつあり、処理施設は思い切ってコンパクトな構造が必要であろう。これに対し、雑排水 (gray water) のみの小規模処理は、ここ 10 年近い実績と動向からみて、全国的に普及するにはメリットが少ない感がある。

上水でも、生物膜処理などを浄水工程に組み入れた方式が模索され、同時に塩素注入法の再検討もなされている。これは、 $\text{NH}_4\text{-N}$  やかび臭物質に対しては一定の効果が期待されようが、たとえばおいしい水の生産につながり得るかは全く別な問題である。上水の高度処理に関する各国の研究成果からすると、付加処理の行きつくところは、多分 BAC 方式を含む粒状活性炭吸着とオゾン処理あたりであり、それ以上の高度処理は造水経費などの理由でおおむね敬遠されている。しかし、おいしい水の希求がさらに切実なものとなると話は別で、限外汚過、膜法も含めさらに検討が必要である。これまで匂い、味、色といった要素は、指標では TON、TTN などの官能刺激度指数によって議論されていたが、たとえばかび臭物質の検知で TON 値 10~20 のレベルは、原因物質濃度 (ジオスミン、2 MIB 基準で) でほぼ  $10^4$  ppt のレベルであり、十分計測可能であるから、改めて原因物質濃度で評価し、除去率や対策を検討する方向を考えるべきではなかろうか。

(ロ) 物理化学的処理、オートメーションなど

かつてフェライトによる重金属含有排水処理が目されたが、磁鉄鉱粉末や磁力を用いる分離方式、紫外線、オゾンの酸化力、殺生物力を利用することも見直されてよい。1  $\mu\text{m}$  内外の微生物やコロイドは、限外汚過や逆浸透膜法の発達によってすでに日常的に処理可能である。1 桁下がつて  $10^{-1}$   $\mu\text{m}$  前後の微粒子でも、膜技術によって除去可能となっている。膜自身の強度や耐性、材

質の改良によって、造水コストはさらに下がることが期待される。これに関して (ハ) で再論する。

活性汚泥法などのオートメーション化は、水質指標と操作因子間の法則、データベースが、多くの操作実績によってオートメーションになじむものになってきたので、全体的にこうしたプラントは計算制御の方向に向かっていく。生物処理プロセスのオートメーションは、先進諸国共通の研究テーマでもある。一方、自動制御化になじまない処理場作業には、各種のロボットの利用が考えられる。ロボットの利用はプラント外にも考えられ、管渠の清掃作業から採集試料の分析操作に至るまで対象となり得る。

#### (ハ) 造水処理の高度化、二元給水、リサイクル

マイクロエレクトロニクスにおける、スーパーコンピュータ用超 LSI 製造などに、超純水が必要であるが、そのスペックでは、微粒子数として極少数から 150 個/cm<sup>3</sup>、TOC で 0.05~1 ppm、微生物数 0.01~1/cm<sup>3</sup> 等が示されている<sup>19)</sup>。こうした要求はさらにシビアになると考えられ、そうした規格に合格する水の製造自体も一種のハイテクノロジーとなっている。たとえば微生物個体数で 10 個/l 以下というのは、今日の水道が定めている水質規定より桁も高度である。市民ニーズに応じて、有害化学物質やかび臭原因物質などの一切に対し安全な水の供給がそれだけ身近になったことを意味している。今後たとえば水道の既成通念—清浄、豊富、低廉—を、水のおいしさへのニーズ等を考慮して見直し、二元化給水の具体的方法などが研究されてしかるべきであろう。

一方、バイオテクノロジーの発達もめざましいものがある。従来の生物処理、物理化学処理で克服し得なかった難分解性化学物質等に対しても、それに見合った細菌（土中から発見されることが多い）、酵素が分離され、合理的な費用で大量培養・生産されれば、処理実務に利用でき、問題は解決し得る。しかし、この方面の核心となる技術は、環境・衛生工学畑の人はなかなかリーダーシップをとりにくい。多分この場合の環境工学者の 1 つの役目は、どの問題にどの種の新技術が必要かを的確に見分け、関係学者、技術者とのよき協力関係をつくることであろう。

排水、廃棄物のリサイクルは、外部の系へ放出するエントロピーを極小にできる点が魅力的である。工業用水でいえば、工水の循環回収率はただ今 75% 前後であり、ほとんど冷却用水が主体となっている。しかし、生活用水のリサイクル率は、統計の上ではまだきわめて低い。通常程度の汚れの排水を雑用水化する場合、膜技術を応用すれば、5 万 m<sup>3</sup>/日規模で造水促進センターの計算では、59 年度末で 80 円/m<sup>3</sup> くらい<sup>19)</sup>、現在はこれが

60 円/m<sup>3</sup> 近くになっていると予想される。おそらく、クローズドシステム化の問題においても、最近の先端的な膜を中心とする水処理技術が役立ち得るであろう。

#### (8) その他の環境工学的課題

要望課題の主たるものを (1)~(7) に挙げたが、その他の問題で将来性のあるものを付加的に挙げておく。

「廃棄物に関する研究」では、廃棄物の減容、輸送、焼却、リサイクル、処理処分法選択の判断基準等のテーマが今後も重要であることはいうまでもない。「リモートセンシング情報処理による環境評価および環境保全の研究」では、ランドサット衛星写真による地表の植生、水面のクロロフィル a 分布、水温分布、広域環境評価、ローカル環境特性など、種々の研究を展開できる。

「赤潮の発生機構および集積、消滅に関する研究」は、海域環境の基礎課題である。たとえば国立公害研では、赤潮生物のライフサイクルのモデル化にある程度成功した。また、生態化学的なテーマであるが、「湖沼、内湾、内海における有害化学物質の生物濃縮」に関しては、海域などでの現場研究よりも、メゾコズム規模の生態系を用いる基礎研究からスタートする方がやりやすい。最近注目されているのが「高等植物の水質浄化機能」で、ホテイアオイに限らず各種雑草の水質浄化への有効利用の研究が進み始めた。

#### 4. おわりに

表記に環境・衛生工学の今後の課題を掲げたので、基礎科学のテーマはあまり記さなかった。しかし著者の考えるところ、熱力学第 2 法則は 21 世紀の環境研究においてきわめて重要な存在となるであろう。自由エネルギーは、通常扱われるエネルギーや質量、運動量などと同様に、保存則に従う量であるが、自由エネルギーの偏微分値であるエントロピーはそうではない。実際の環境過程は不可逆であり、そこでは散逸関数 (dissipation function) が重要な意義をもち、この散逸関数を求めることにより過程の不可逆度を知ることができる。いろいろな環境過程での増加エントロピー、あるいは有効エネルギー (エクセルギー) のロスが求められ、比較され評価されるようになる日も遠くはあるまい。このため非平衡熱力学の、環境工学分野での開拓が望まれる。この問題をもう少し工学的にみよう。工学系では、増加エントロピーを計算する代わりにエクセルギー収支を計算することでシステムの熱効率、経済性を評価する方法が近づきやすい。エクセルギーは、最近になって各種の物質における標準状態の値が求められ<sup>20), 21)</sup>、種々の化学・生物化学的变化に利用できるようになった。また、Tai 等<sup>22)</sup> は、水質評価の常用指標である BOD, COD, TOD, TOC などとエクセルギー値との関係を研究して、従来

の水質学, 水質工学を最新の熱力学, 熱工学とつないだ。1つの展望が拓けたといえるであろう。

さて, 大学における衛生工学の研究は, 永い間水処理関係に偏る傾向があったが, 最近数年, テーマにバラエティが目立つようになった。これは好ましい変化といえるべきだろう。本稿では3.(1)~(6)に, 社会的にみても重要な要望課題を取り上げたが, これらはすべて水処理とあまり関係がない。たとえば, 衛生工学畑の研究者にもっと関心をもってもらいたい分野として, 生態系の挙動, その調節ないしは運命ということがある。

最後に, 本稿では微量化学物質の問題, 先端的バイオテクノロジーの応用, ウィルスの問題, 毒物の変異原性, がん原性といった分野について言及しなかった。これは環境・衛生工学者のバックグラウンドあるいは従来の研究実績から考えて触れなかつたに過ぎない。今後, 若い研究者のテーマ選択は当然多岐にわたるであろうし, 上記のような分野へ進出されることは歓迎すべきことといえよう。

#### 参考文献

- 1) 日本学術会議環境工学研究連絡委員会: 第1回環境工学連合講演会講演論文集, 83 pp. 1986. 3.
- 2) 環境科学シンポジウム組織委員会: 環境科学シンポジウム1986講演報告集, 661 pp. 1986. 11.
- 3) 東京都環境保全局水質保全部(株)野村総合研究所: 水域環境総合評価手法開発のための調査, 委員会配布資料, 105 pp. 1986. 11.
- 4) Right, W. H.: Science of Smells, 菊池訳; 匂いの科学, 173 pp. みすず書房, 1976.
- 5) 吉村元男・芝原幸夫: 水辺の計画と設計, p. 140, 鹿島出版会, 1985.
- 6) 合田 健: 水質環境科学, 第2章 pp. 47~130, 丸善, 1985.
- 7) 小坂淳夫ほか編: 瀬戸内海の環境評価のための総括的な研究, 文部省特別研究「環境科学」pp. 46~66, 1985. 3.
- 8) 高橋・茶田・市川・前田・桜井: 湾口を通しての汚染水の交換機構, 文部省特別研究「沿岸における汚染海域の広がり」と変動に関する研究, 1982.
- 9) Vollenweider, R. A.: Calculation Models of Phytoplankton-Depth Curves and Some Implications Regarding Day Rate Estimates in Primary Production Measurements, Mem. 1st. Ital. Idrobiol., 18 (Suppl) pp. 425~457, 1965.
- 10) ISEM: Ecological Modeling Vol. 31, 374 pp. Special Issue, 1986, Ecological Modelling Vol. 32, 242 pp. Special Issue, 1986.
- 11) 合田 健・平岡喜代典: 広島湾底質の汚染度とベントスの多様性指数, 日本水処理生物学会第22回大会講演集(水処理生物学会誌), 1985. 11.
- 12) 合田 健: 水環境問題の今後, 第1回環境工学連合講演会講演論文集, pp. 45~46, 1986. 3.
- 13) 合田 健: 12)と同じ, pp. 41~44.
- 14) 土木学会水質管理小委員会: 河川の水質保全と下水処理調査研究, 昭和60年度報告書, 1986. 3.
- 15) 山本荘毅: 水文学総論, 第6章, 水文学講座1, 共立, 1972.
- 16) 海老瀬潜一: 陸水域の富栄養化に関する総合研究(V), pp. 14~108, 国立公害研究所研究報告第21号, 1981. 3.
- 17) 同: 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(I), pp. 41~102, 国立公害研究所研究報告第50号, 1984. 3.
- 18) 浜田敏義: 超純水の微粒子測定, 水質汚濁研究, 第9巻12号, p. 4, 1986. 12.
- 19) (財)造水促進センター: 昭和59年度, 膜法による下水再生利用技術開発実験報告書, p. 80, 1985. 3.
- 20) 吉田・山内: 熱力学に基づくエネルギー評価に関する研究, 茅陽一編, 文部省科学研究費成果報告書 pp. 84~87, 1982.
- 21) 吉田・山内: 同上, pp. 15~17, 1981.
- 22) Tai, S., Matsushige, K. and Goda, T.: Chemical Exergy of Organic Matter in Wastewater, Inter. J. Envir. Studies, Vol. 27 3/4 pp. 301~315, 1986.
- 23) OECD: The State of the Environment. Annual Report, 1985.
- 24) OECD: Environmental Data Compendium, 1985.
- 25) Dickson, W.: The Acidification of Swedish Lakes, Rep. Inst. Freshwater Research, Drottingholm, 54, pp. 8~20, 1975.
- 26) Irwin, J. G.: Acid Rain in the United Kingdom, Paper Reference No. W-85001, 1985.

(1987.1.23・受付)