2. 環 境 シ ス テ ム*

—研究の現状と課題—

平 泉 泰**

緒 言

日本の化学工業はほとんどが東京湾、伊勢湾、瀬戸内海を中心とする海岸線に集中している。これらの地理的条件の活用が今日までの発展をきずいたが、同時に現在の深刻な海的环境汚染の原因となったといえよう¹⁾。

プロセス設計、プロセス計画の立場からいえば、設計、計画の結果が、環境にどのような効果をおよぼすか、化学コンビナートが生態系にどのように影響するかを予め予測することが必要である。このことから、環境の制約に合わせてプロセスの設計、計画を変更して適正なものにすることができるし、一つにはプロセス自体がどう変わらなければならないかという、技術の発展方向、技術予測評価 (Technology Assessment) でいう規範的条件を求めることができる²⁻⁴⁾。

化学工学一般の立場からさらに積極的にいえば、環境問題自体が化学工学の対象である。環境問題は基本的には大量かつ大規模な物質・エネルギーの輸送、蓄積、化学変化の問題である。生物学的・生化学的領域でもあるから、化学工学だけでは解決されないが、化学工学が最も得意な、そして最も寄与できる分野ではないかといわれている⁵⁾。

環境の問題は大きくわけて、大気の問題⁶⁾、河川、湖沼、海の問題、人間社会の問題となる。これらの全体にわたってはすでに「環境工学」という立場からすぐれた総説が出ている⁵⁻⁷⁾。本論文ではとくに日本の化学工業に最も関連の深い海的环境問題について展望をこころみる。

1. 環境システムモデルの位置づけ⁸⁾

海的环境システムは物理的・化学的な側面の下に生態系と地理的要素を基礎としているから、構造はきわめて複雑である。そして生態系そのものの構造もよくわかっ

ていない。したがってわれわれの目的とする、プロセスシステムと環境システムの関係を明らかにすることも、直線的に明快にはゆかない。研究の方法として既存の知識をよせ集めて、モデル的な構成を表現を与えるというやり方では問題は全く前進しないし解決もしない。そこで研究方法としてつぎのようなステップに整理することが妥当であろう。

- (i) 調査収集による現象論的整理から、事実を発見し法則性を抽出する。
- (ii) これにもとづいて環境システムのモデル化を行なう。
- (iii) モデルにもとづいて、より複雑な現象の分析整理を行なって、事実・法則性を発見する。
- (iv) (iii) と同時に、環境・生態系についての変化の予測とシミュレーションを行なって、(i) にフィードバックし、問題点を明確にする。

2. 環境システムモデルの基本構成⁹⁾

環境モデルの構成は Fig. 1 のように整理してみるとよい。内容は生産・生活活動が環境にどのような負荷を与えるかという負荷モデル、その負荷によって環境の状態がどのような応答を示すかという環境モデル、環境変化によってどのような社会的影響があらわれ、その社会的費用がいくらになるかを見積もる社会的費用モデルからなる。

2・1 負荷モデル

これは生活生産系モデルと環境負荷モデルとからなる。生活生産系モデルは主として排水を出す産業活動や、生活活動が相互に関係し合いながらどのような規模になるかを予測するもので、化学工業が他の産業・生活とどのように関わりあっているかを明らかにできる。地域産業連関分析、公害産業連関分析がこれにあたる^{10,11)}。環境負荷モデルは生活・生産系の各単位規模の活動から、どのような負荷がどの程度出るかを予測することを目的とする。負荷としては化学工業においては排水量、排出有機物、栄養塩、重金属、ハロゲン化炭化水素など溶解性のものの他に、土砂、スラッジ、パルプか

* 昭和47年8月28日受理

** Yasushi Hiraizumi (正会員) 東京大学工学部化学工学科

す、プラスチック残渣、懸濁性固体などがある。

現在、まとめられている報告はきわめて不完全であって、生産活動とくに化学工業、製鉄、金属、パルプ工業、食品工業、繊維工業の一部について、その排出負荷と有機物排水について COD, BOD, 懸濁性固体成分 (SS), pH, 油分 (n -ヘキサン可溶成分), 濁度などの項目についてまとめたものがある程度である。

生活廃水および廃棄物負荷については、現在ではかなりのデータが集積整理され、その信頼性は高まっている

る^{14,15)}。

排出物質についていえば、水域の富栄養化をもたらす赤潮などの原因となるといわれている窒素、リンの排出負荷については、都市生活廃水、家畜廃水、農業負荷などについては解析が進んでいる。この他化学工業をはじめ諸工業の排出負荷についても、プロセス解析、工業原単位調査、排水分析結果などが最近になって統合整理された¹⁶⁻¹⁸⁾。

このように都市・生活廃水を中心とする有機廃水の排出負荷データはかなりの精度で一般性をもってまとめられつつあるが、現代の生産活動、化学、製鉄、金属工業の排出負荷は、石油中の硫黄などを除いてよくわかっていない。例えば油分、重金属、DDT, BHC, PCB, その他の微量炭化水素など最近環境汚染物質として、蓄積性、永続性、非分解性について特に問題が注目され始めた物質は、排出負荷はもちろん、生産量、生産場所も明らかにできないものも多く、今後の研究において緊急の解明と総合的な整理がのぞまれている¹⁹⁾。

アメリカ科学アカデミーが1971年にまとめた海域環境の研究についての特別勧告 (Specific Recommendations) においても、「排出負荷についての組織的な研究を行なうべきであること。重金属、PCB, DDT, BHCのようなハロゲン化炭化水素などの非分解性で、蓄積性のある有毒物質の排出源および負荷を明らかにすること。その他未知の人工合成化学物質について調査と検討を行なうこと」と述べている²⁰⁾。

2.2 環境モデル

ここでは環境状態をとらえる指標の設定と、状態変化の原因となる素過程、この二つのモデル化問題が中心となる。ただしこの二つは相互に依存する関係にあるので、二つを切り離して考えることはできない。

生態系を中心とした沿岸海域の環境モデルは Fig. 2 のようになる⁹⁾。つまり生活・生産系から排出された汚染物質は拡散・移送して水質を形成する。

拡散 汚染排水の沿岸海域の拡散については、Joseph-Sender の古典的な式があるが、近年この方面の研究は格段に進歩した。まず乱流拡散係数であるが、通常拡散のスケール l に依存し、 $K=Al^n$ の形で表わされる。コルモゴロフの理論を適用すれば、 $n=4/3$ になる。染料投下実験や水理模型実験からも同様な結果が得られる²¹⁾。大洋での染料流し実験では1.1という結果もあり²²⁾、1.44~1.50という結果も得られている²³⁾。しかしながら、発電所温排水や工場の低塩分排水の場合には、排水分散域に温度成層、密度成層が生じ、見かけ上の水平方向拡散係数の指数は1.5~1.8と大きくなる。そして垂直方向拡散係数は分

Fig. 1 環境システムモデルの基本構成

Fig. 2 沿岸海域の生態系モデル

Fig. 3-1 水質保全システム・モデルの一つ

離すると、 $0.01 \sim 0.4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度になることが確かめられている²⁴⁾。

このように排水の分散では成層を考慮しなければならず、縦方向拡散係数を Richardson 数の関数として扱い、コンピューターシミュレーションを行なった報告があるが²⁵⁾、これはモデル化や解析・予測に適さない。さらに観測データを検討して、排水は排水口付近では下層水をまきこみ、ついで渦動拡散域に移るという考えもある²⁶⁾。しかしながら、いくつかの海域において現象を検討してみると、下層水まきこみ領域は小さく、かなり遠くまで厚さはほぼ一定で、安定成層化し、対流によって濃度が決まり、その先が拡散域になると考えられる。このような検討から、簡明な拡散方程式の解析解が最近得られている²⁷⁾。一方、実地の排水分散などについてパルプ工場排水の拡散面積と排水量の相関をとった経験式は、きわめて適用性、信頼性が高いことが知られているが²⁸⁾、上の解析解はこの式をもきれいに説明している。排水の分散の問題は、地形、潮流、吹送流などの海況、気象を水理模型、コンピューターシミュレーションによっておりこむことによって、ほぼ一般的な予測が可能な段階にあるといえる。

水質 水質は物理的水質と化学的水質にわけられる。物理的水質の一つの要素はにごりであり、水中懸濁物 (SS)、溶存有色物質、プランクトンが原因になる。にごりの発生は SS の排出、埋め立て、しゅんせつによる土砂のまき上げ、富栄養化によるプランクトンの大発生、油濁、凝集・吸着作用の結果などによる。デトリタスとなって魚類などのえさになるものの他、凝集沈降して底泥を形成する場合、嫌気性分解によって栄養塩を溶出させる。時によっては、硫化水素発生、無酸素層出現によって、海域の富栄養化→赤潮の発生→ベントスの被

Fig. 3-2 負荷モデルの構造

害→魚のえさの減少→漁業減少をもたらす。また一般ににごりは海中の光量を減らすから、植物プランクトン・藻場の一次生産に直接的な打撃を与え、現実には藻場の破壊、漁業資源の減少をもたらしている。

SS の水中での形成については、パルプ廃水などの場合について若干の観測があるが²⁹⁾、デトリタスなどについては定性的議論の域を出ていない³⁰⁾。SS の水中での挙動は温度密度躍層での停滞や海底での移動などのため、複雑であり偏在がみられることもあり、これが海中の照度・底泥の形成と関係する。また SS と照度との関係について従来多くの研究があるが³¹⁾、SS の性状、物質組成によって異なり、十分には解明されていない。

化学的水質として今日問題になるのは、BOD, COD

などの分布と分解、それに関係する溶存酸素、富栄養化に現われる栄養塩の過剰存在、重金属・石油系炭化水素の広がりであり、それらの移動・生成・分解・溶出・蓄積・凝集などの過程である。河川における BOD 負荷に対する自浄作用の時間的変化、酸素吸収速度、それらと溶存酸素の関係を示すものとして、Streeter-Phelps の式がある。自浄係数そのものが河川の生物相、流域の状態、BOD 物質の性格によって決定されるものであるが、河水表面の酸素吸収速度定数（再ばっ気係数）には液表面張力が関係する³²⁾。ところが最近になって、吸収定数には表面の流動状態が変わることが原因となって液表面の汚染が深く影響することがわかり、いくつかの炭化水素を使って実験的に酸素吸収速度定数への液表面の汚染の影響が調べられた³³⁾。

今日、沿岸海域汚染の大きな原因に、アンモニア・硝酸・亜硫酸塩・リン酸塩などの窒素・リン化合物が排出されることに依る富栄養化がある。このために年々赤潮・青潮の大量頻発、漁業資源のへい死を招いている。原因については化学的・物理的水質、生態学的・生化学的立場から総合的に研究されているが、機構が解明され、モデルが確立されるまでに未だ至っていない。ただ、底質悪化と無酸素底層水の出現、栄養塩の増加、ビタミン類の増加、微量金属、特定の気象・海況条件などいくつかの条件が関与していることが明らかにされつつある³⁴⁾。

もう一因は油濁である。油汚染のケースは原油・重油・潤滑油・軽油と物質による相違、タンカー積荷であるかバラスト水か、ビルジかまたは工場排水中のエマルジョンとしてか、その形態によって異なるが、漏出油の油帯は、表面張力と粘性によって広がり、ある程度の時間を経て、パッチ状に分裂し、一部はボール状になり、一部はエマルジョンとして海水中に分散する。その間に揮発・重合・酸化して組成、比重などに変化をもたらすという過程は一応明らかになっている^{35,36)}。そして海況にもよるがかなりの部分は沈降して底質の汚染を招き、それは緩慢に、しかし著しく拡大する傾向があること、永く継続することが確かめられている^{37,38)}。

このような環境状態の変化と生態系の変化は相互に関係し合っているが、海中の照度、透明度と一次生産の関係の対応は、海域によって条件が若干異なるが、一応ついている³⁹⁾。

一般に水域では、環境の生態系の健全さを「種数多様性指標」(Species Diversity Index, S. D. I.) を目安として、平衡がどの程度ずれているかで見える。これによれば、自然な環境では、生物の種類・量ともに少なく、過栄養のときは種類豊富で総量も多いが、富栄養化という汚染状態が進むと、汚染優勢種が残り種類は少なくな

り、総量はある程度まで増える。さらに汚染が進行すると、優勢種も消滅してしまうことになる。瀬戸内海などで、汚染の進行につれて、高級魚類の漁獲が減り、汚染優勢種の比率が高まっているとよくいわれるが、汚染と漁獲量の関係は必ずしも直線的に明らかになってはいない。特定の海域において、単純に底質 B. O. D. 値と S. D. I. の関係を求めた研究もある⁴⁰⁾。同じく燐灘海域でパルプ工場の生産量ののびと、底質の C. O. D. が 30 mg/g 以上に汚染された面積の拡大が完全に比例すること、その地域の底質にはベントスはいてもゴカイ程度になっていることが明らかにされ、排出負荷一環境状態変化一生態系変化の現象的な整理で相関がついた⁴¹⁾。この事実はシステム解析によって因果関係が証明された⁴²⁾。水中油分濃度と油臭魚の発生⁴³⁾、油濁とプランクトンにおける S. D. I., 精油所排水の間潮帯への影響^{37,44)} についても研究されている。

以上のような現状をふまえて、環境モデルを構成するために、現在必要とされている研究の方向、目標はどのようなものになるであろうか。

NAS の研究方向に関する勧告²⁰⁾ では、輸送・拡散の問題に関して、「汚染水域での沈降に注目し、沈降粒子の汚染に果たす役割を調べること。そのために特定の水域を選び、化学・沈降学的な共同研究を行えば、汚染物質の海域環境への輸送について重大なことがわかるだろう」と述べながら、「しかし沈降による汚染物質の移送、蓄積は複雑で、単純なアプローチは許されない。しかし沿岸における汚染について解明し、対策を講ずるには、沈降の挙動の解明を、全力を挙げてやるより他はない」と指摘している。

化学的水質の面で、「海水中での汚染物質の限界基準の確立、それら物質の海水中での化学平衡を明らかにすること。また海表面の薄層における有機汚染物質、特に石油などの場合について、レベルを清浄海面のそれと比して解明する研究計画を確立すること。これらの物質の表面薄膜への濃縮、薄膜と海水中の物質移動係数を決定すること」を重点として指摘している。また沈降物・懸濁固体の化学的側面については、「海洋環境において重金属・石油分・農薬などの汚染物質が金属粒子、その酸化物、有機質デトリタスのような粒子との間にどのように分配するかを解明すること。この二相間の移動に果たす物理学的・化学的・生物学的過程の比重を解明すること」を主張し、生化学的には痕跡物質・痕跡有機物の生物学的変換過程、分解速度を研究する必要」を指摘している。

この他とくに「新しく海洋環境に入ってくる可能性のある物質、人工合成化学物質には十分監視し、それらを収集しておくこと、その蓄積・濃縮効果に十分注意を払

うこと」が必要であると述べている。

さらに NAS は人工合成物質が、海洋環境に放出されて、これからも増えてゆく状態についてつぎのような勧告をしている。

- (1) これらの物質の移送、拡散速度を調べること。
- (2) 現在、水中・生体内・底質にどの程度存在するかを調査すること。
- (3) 化学的・生物学的な反応機構と速度を明らかにし、分解するものについては分解生成物を究明すること。

特に石油については、

- (4) 代表的成分の分解速度。
- (5) 水中・生体内・底質における主な成分の分布。
- (6) 輸送・拡散・固着・蒸発という各過程を追究すること。PCB のような塩素炭化水素については
- (7) 分解速度と海洋環境での生体内作用。
- (8) 生物を通して、あるいは単独での沈降機構と速度。
- (9) 海表面での挙動、特に石油油膜がある時とない時の相違、海水、底質間での移動速度。

重金属では、

- (10) 海洋環境に入るときの物理学的・化学的形態。
- (11) 食物連鎖において、主な生体を通してこれらの物質の移動と通常の輸送過程の機構。

が解明されることが緊急事であるとしている。

同様の勧告はアメリカ化学会においてもなされている⁵¹⁾。

2・3 社会的費用モデル⁵⁾

このモデルは環境変化にともなう社会的影響の諸側面を認識するモデルと、それを何らかの方法で費用として見積もるモデルからなる。社会的影響は漁獲量低下から全滅の破壊にいたる水産資源被害のごとき典型的な直接的影響と、赤潮発生、藻場喪失のような間接的影響にわけられる。しかし、リクレーションの場の喪失、価値の低下のような生活環境破壊など、環境の不可逆的变化を含めて、すべてが何らかの費用におきかえられるものではなく、社会的費用の算定可能部分という下限値を推定するにすぎない。具体的には、変化不可避ということであれば、漁場転換、資源転換、水源転換といった代替とその影響に対する費用を計上することである。もう一つは、環境を保持するベースラインを定め、その場合のベースラインの保持・回復費用をプロセス転換・汚染防除費用、間接的にもたらされる社会的影響の費用などで、産業連関的に算出する場合である。

社会的費用の算出、その分担は公害産業連関表で計算される¹¹⁾。ただし、このモデルは現在硫酸塩化物を中心にしたものができるにすぎない。同様に燃料油の低硫酸化問題を取り上げて、各種低硫酸化対策と、その経済的效果を LP モデルで解明している。制約式として、原油の種類・需給・投資・輸入関係の他に環境基準を入れてあり、結論としていくつかの対策を提案してい

る^{45,46)}。

水域についてはこれまで河川の水質、特に BOD、DO の基準を維持しながら、経済最適な下水処理場、放出口、上水道取水口を配置するという問題が多く扱われている(文献(7)に総説がある)。

これらはほとんど DP で問題を扱っているが、溶存酸素量を示す酸素たわみ曲線(Oxygen Sag Curve)を制約条件式群にして問題を線形モデル(Linear Model)で定式化し、LP で解いた報告がある⁴⁷⁾。また負荷排出側での代替方法も含めて費用を評価するシステムも提案されている⁴⁸⁾。(Fig. 3)

社会的費用の概念は、Kapp によって経済学の体系に含まれるべきだとしてはじめて提唱されたが、その基本的な発想は「進歩と成長とが、その対価に値するか否かは要した全費用についての知識をもったあとにはじめて、決定しうる」という立場から出ている⁵²⁾。現在このような考え方は経済学一般のものとなりつつあり、Mishan に代表されるように一歩進めて、「有害な外部効果」を制限条件として前提した上に、社会的費用賦課の具体的なあり方が議論されている⁵³⁾。現実の社会政策についても英国の最近の交通政策の中に一部とり入れられており、1971 年の米国の「環境教書」は色濃くこの立場をとっている⁵⁴⁾。さきにあげた、わが国の公害産業連関分析は現在のところ社会的費用を必ずしも適正な構成として組みこむようにはなっていないし、そのために資源の配分という観点にたてば、意味のある結論は導びきえない。海域環境の問題は従来、外部経済の問題として全く放置され、わずかに漁業補償において、部分的に検討されていたにすぎない。この中から、社会的費用をどのように規定してゆくかは目下焦眉の問題となっている。

3. 環境のシステム解析

システム解析はとにかく一般的な形でモデルを完備して、はじめてできるのだという考え方がある。しかし環境とは本来縫い目のない織物のようなものであり、その構造の複雑性もあり、現象がすべて解明されるということ、モデルが充分そろうということとはありえない。事実一般性のあるシステムモデルを作っておいてそれをもとにあらゆる問題を扱おうという試みはほとんど成功していない。環境システムはつねにその基盤が地理的条件であり、気象・海況である。このような基本的性格を軽視して一般的に環境の数式モデルを標榜している論文のほとんどが有益な知論を引き出していない。

一方、環境の問題はつねに緊急なものとして存在しており研究もまたその期待からのがれることはできない。提起された問題に的確に一応の解答と結論を出すことを迫られている。

Fig. 4 ニューヨーク湾とテムズ河口のデータから作成した溶存酸素と BOD 負荷の関係

このように複雑で困難な課題を背負った環境システムの研究は、対象が複雑であり、それぞれ特有の基盤をもっていることを十分に考慮して問題の核心をまずおさえるような研究方法、オペレーションズリサーチまたはマクロ解析によって意外に効果的な解明ができる場合が多い。ここではそのような例を数例紹介する。

(その1)⁴⁰⁾ 感潮河川が都市廃水の負荷を受け入れたとき、環境条件がどのように変わるかをしらべるために、New York の Hudson 河、East River の観測点で 1850 年から 100 年間にわたって観測した溶存酸素量 (DO)、生物学的酸素要求量 (BOD) を整理した。その結果 New York 市の人口 (つまり BOD 負荷量に対応する) の増加とともに流入河川の単位面積あたり BOD 負荷量が一日当たり約 15 ポンドに達するまでは DO も変わらず本来の水域生態系が維持され、自浄作用も働いていた。負荷がその量をこすと DO は急激に減少し、第二の平衡点に落ちこむ。ここからは生態系は全く変わり藻類の繁殖によって BOD は増加してもしばらくは DO のレベルは維持される。London の Thames 河の観測値を重ね合わせてみると、BOD 負荷量が一日当たり 100 ポンドを越えると、そのような藻類を中心とした DO レベルの維持すらできなくなることが解明された。魚種の消長などもチェックされており、BOD 負荷を指標にして水質変化と生態系変化の関係がほぼ定量化された。本研究の特色は巨視的な相関関係を引き出した点相関関係を否定する因子を、因子分析的に排除して、関係を法則性として裏づけた点にある。疫学的方法とでもいうべきシステム解析の典型であろう。

(その2)⁵⁰⁾ 諏訪湖を浄化するためには汚濁に貢献している流入負荷をつきとめる必要がある。BOD、窒素リンなどの栄養塩、の各排出源からの負荷量とその経年変化を調べ、簡単な物質収支をとりながら、湖内でおこる諸過程をしらべて行方を追跡した。その結果、諏訪湖の富栄養化は窒素の過大な流入に由来すること、原因は流

入河川上流での施肥の流亡にあるらしいことをつきとめた。この解析では化学工学の一般的な手法が、問題解決に大きな役割を果たした。

(その3)⁵¹⁾ 北米の五大湖はそれぞれが水路でつながり、沿岸には人口も多く、各種産業が盛んである。そのために五大湖、とくに Erie 湖の汚染がはなはだしい。そこでどの湖のどの排出源が五大湖の汚染に最も影響が大きいかをしらべるため、排出負荷中に普遍的に存在する塩素イオンを指標とした。湖内の移送・分散が湖間のそれに比して早いことから、五大湖はそれぞれ完全混合とし、投入負荷と湖内濃度を一次の微分方程式で記述し、簡単なタンク連絡モデルとして五大湖の状態をシミュレートできる。負荷については各湖ごとに 1900 年から 1960 年にわたる産業、人口、道路、農業ごとの経年変化を相関式にまとめて使った。これに五大湖の水質観測値にみる状態変化を合せてみると、シミュレータは的確に状態変化を予測していた。また Erie 湖の汚染の最大の原因は工場排水であることもつきとめた。簡単なシミュレーションにより、負荷に対する水質変化を予測できたという点でこのマクロアナリシスは成功した。

(その4)^{41,42)} 前述したが、瀬戸内海燧灘におけるパルプ工場排水負荷と底質汚染水域の面積、生態系変化の程度の関係が定量的にかなりはっきりした。この関係は理論的にも証明された。

以上の研究の例は巨視的システム解析ともいうべきものであり、すくなくとも設定された問題の第一次の解として「事実の発見」と「法則性」の抽出がある。その意味でこの方法は成功し有効であった。この結論を一般化し、普遍化するためには、解析の道程で切り捨てた諸過程との関係を解明し、理論的に跡づけなければならない。その意味で巨視的システムの解析の結論をもとにして 2 章に示したモデルビルディングに一度戻る必要が出てくる。

要 約

臨海型工業として発達し、今後そうするように宿命づけられている日本の化学工業にとってプロセス計画、コンビナート建設、技術予測いずれの場合をとっても、沿岸水域の環境問題を回避することはできない。また学問的方法論としても、環境システムは化学工学の貢献できる分野である。

環境システムは物理的、化学的、生物的なあらゆる側面をかね備えており、システムモデルを構成するにあたりわからない点ばかりである。それらを一つ一つ追究し機構を解明してゆく努力は支払われなければならない。しかし、環境システムは本来、その場その場の地理的条

件、気象・海況という基礎に立つものであり、一般的な総合モデルというものを実現することは、きわめて困難である。

一方環境問題はつねに緊急に解明することを迫られていることが多い。したがって研究を進めるにあたっては、問題が環境システムの基本的条件に立脚していることをまず認識して、問題のポイントをおさえ、OR的なアプローチによって問題をはっきりおさえた解析をすすめモデルを作ることが必要である。

それが最も有効な方法であることをいくつかの研究報告は示している。しかし同時にこれでえられるのは一次解であり、ここで発見された事実や相関関係は、理論的に解明されて本質的なもの、法則性として位置づけられ他の諸過程との関連が説明されることによってはじめてモデルの一部となり、一般性を獲得する。

したがって二つの研究法を、交互に進めることによって、現実の要請に答えながら環境システムの研究は正しく発展してゆくことができるだろう。

引用文献

- 1) 矢野恒太記念会編：「日本国勢図会」（1972年版）国勢社
- 2) ヤンツ：「技術予測」（上）、（下）、マネージメントセンター（1968）
- 3) 西村肇：「ケミカルエンジニアリング」、1971年4月号5頁
- 4) 西村肇、平泉泰：「自然」、1971年1月号
- 5) 内藤明：「システムと制御」、15、（4）330（1971）
- 6) *ibid.*, 15、（5）404（1971）
- 7) *ibid.*, 15、（6）483（1971）
- 8) 高松武一郎他：「化学工学」、35、（1）7（1971）
- 9) 西村肇他：「通産省エコロジー研究会報告書」1972年4月
- 10) W. Leontief：「Environmental Repercussions and the Economic Structure an Input Output Approach」（1971, Tokyo）
- 11) 通産省：「公害産業連関分析表」（1970）
- 12) N. L. Nemerov：「Liquid Waste of Industries—, theories, practice, and treatment」, Syracuse University（1971）
- 13) H. R. Jones：「Environmental Control in the Organic and Petrochemical Industry」, N. D. C.（1971）
- 14) 環境庁：「水質汚濁法に基づく排水基準設定の参考資料」（昭和46年9月）
- 15) 建設省：「日米下水処理委員会資料」No. 2（1971）
- 16) 浮田正夫、中西弘：「用水と廃水」、13、（11）1355（1971）
- 17) 浮田正夫、池迫成志、今池修二、河野一郎、中西弘：「公害と対策」、8、（5）477（1972）
- 18) 中西弘、浮田正夫、池迫成志：「第8回衛生工学研究討論会講演論文集」、土木学会（1972）
- 19) W. H. Mathews and E. D. Goldberg：「Man's Impact on Terrestrial and Oceanic Ecosystems」, M. I. T. Press（1971）
- 20) National Academy of Science, 「Marine Environmental Quality」（1971）（以下39ページに続く）

3. プロセスシステムの最適構成*

市川 惇 信**

はじめに

化学プロセスは、原料物質を受け入れてこれに化学的および物理的変換を施すことにより目的とする物質あるいはエネルギーを生産し、これによって付加価値を生みだす生産システムの一つである。化学技術者の最も重要な役割の一つは、原料、資本、労働力、利用可能な技術、という各種の資源の束縛のもとで、経済的環境、社会的環境および自然環境から規定される制約を満足しながら最も効率の高いプロセスシステムを作り上げることである。いわゆる「プロセス合成」の活動を遂行することである。一般に、上記の束縛および制約を満足し、目的とする製品を生産するプロセスシステムの形態は無限に存

在する。これらのなかから何らかの意味で「最適な」プロセスが選定され建設・運用される。

最適なプロセスの合成は、1) 原料、製品および生産量の決定。2) 原料から製品への変換の過程の決定。3) 変換の過程のつながりと、それを実現する操作の構成（プロセスフロー）の決定。4) 単位のプロセスの操作設計。5) プロセス機器の詳細設計。6) 建設・運用。などの多階層の最適決定過程により実現される。電子計算機のハードウエア、ソフトウエア両面での急激な発展、とくにプロセスシミュレーション、最適設計の分野で投入された莫大な研究量は、上述の階層の4) 以下、すなわちプロセスの構成が与えられたのちの最適設計、を実用的な技術として完成に近づけてきた。これに対して、3) の階層、すなわちプロセスフローの最適決定問題（以後プロセスの最適構成問題という）に対する論理的接近は

* 昭和47年8月19日受理

** Atsunobu Ichikawa（正会員）東京工業大学工学部経営工学科