

水の需給構造に関するシステム・ダイナミクス論的研究

SYSTEM DYNAMICS APPROACH TO THE WATER RESOURCES SYSTEMS

高 棹 琢 馬*・池 淵 周 一**

By Takuma TAKASAO and Shuichi IKEBUCHI

1. はしがき

昭和30年以降の急激な産業・経済の発展、人口の都市集中、さらには生活水準の向上に伴って水需要は増大してきており、建設省の広域利水調査報告¹⁾では、昭和60年時点での需要量が一層増大するとしている。このことは水資源開発を緊急に進めることを要請しているが、開発拠点となるダムの適地は少なくなり、開発コストも高くつくようになってきている。こうした事情を反映して、最近では水利用の合理化が検討すべき問題として叫ばれており、具体的には回収率の向上、下水処理水の再利用、用水原単位の引き下げ、海水の淡水化等の方策が考えられている。

一方、こうした水需要が増加するなかで、必然的に排水量は増加の一途をたどり、河川・湖沼の公共水域の水質汚濁が進行して大きな社会問題を引き起こし、下水道の整備の遅れと相まってその影響はますます広がっている状況である。従来、公共用水域の水質汚濁は汚濁現象として単独に扱われることが多かったが、この水質汚濁の問題は水資源そのものの問題であり、汚染された水はもはや水資源ではないことを認識する必要がある、しかもその浄化処理には処理技術の開発コスト、薬品投入コストなど、いわゆる浄化処理コストの高騰を招き、われわれの負担増となつてはねかえてくる。

このようにみえてみると、水問題は需要・供給・排水汚濁が個々独立ではなく相互に関連しており、しかも量・質・コストの問題がこれらに階層的に関係しているとみななければならない。同時に、資源の有限性の認識のもとに、これら水問題は人間活動に対しても積極的制約要因として顕在化してきたといえる。こうした水と社会との緊密な干渉を考えれば、水の代謝構造を一つの社会シ

テムとしてとらえなければならない段階にあるといえよう。

さて、こうした社会システムの階層的フィードバック構造を分析し、そのダイナミックな特性を予測する有効な手法にシステム・ダイナミクス（以下、SDと略す）がある。このSDはもともと経営管理に端を発したものであり、大規模システムのサブシステムへの分割、フィードバック理論の採用、電子計算機によるシミュレーション技法など多くの特徴をもっている。ローマクラブの世界モデル²⁾で成功をおさめてからは社会システムへの適用もさかんに行われている³⁾。筆者らも数年前から水問題、特に水需給構造とその変化過程にこのSDを適用し、いくつかの水政策情報を見出してきたし^{4),5)}、岡田・吉川も水需給と地域活動の関連構造にSDを適用している⁶⁾。

本研究ではこれらの成果をふまえ、産業構造の代表的指標である工業出荷額の変化が、水とくに冷却水不足、土地とくに事業所敷地面積の不足、公共用水域の環境悪化とくにBOD指標等によって、それぞれ影響をうけると考え、水を中心としたSDモデルを作成するとともに、その適用にあたっては水需給構造の条件が一段ときびしい近畿圏を選んだ。このスケールはマクロ的に水の地域性を考え、また水利用のクローズド化をめざす上で分析しておくべき最大限のものと考えてよからう。なお、工業出荷額には水因子以外の影響が大きく作用することはもちろんであるが、本研究では水に関連した作用を重点的に把握するという立場からモデル展開をはかる。この場合、従来とられてきたような工業出荷額を工業成長率などで外生化し予測する手法では、水資源の有限性、水環境の悪化などで今日では適切を欠くと考えられるので、その内生化によるモデル化を行って、その分析・予測・評価への接近を主目的とした。

以下、本研究の内容を要約すると、2. ではSDの適用にあたってリアルシステムの観察・構造理解が重要で

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室

あるので、まず社会システムとしての水需給構造を概観し、モデル作成の手助けとする。3. ではモデル作成の手法となる SD についてその概要を述べ、4. では以上の知識を十分にふまえて、水需給構造をいくつかのサブシステムに分割し、フィードバック・ループを考慮しながら、具体的に SD モデルを構成する。最後に、5. ではいくつかの政策変数を組み合わせて各レベルのダイナミックな特性をシミュレートし、得られた結果を考察するとともに、将来の水政策に対する提言を試みる。

2. 社会システムとしてみた水需給構造

戦後の農業から重化学工業中心主義へ移っていった産業構造の変化は、大都市への人口および施設の集中をもたらし、都市構造の変化を引き起こした。そして都市は水の大量消費型に変質し、上水や工業用水の使用量が増加し、それが大量の都市排水を生み、水質汚濁を引き起こすこととなった。これら上水や工業用水の使用量増加は、地下水規制・水源開発の遅れ・開発コストの高騰などと相まって、水不足という量的問題を、また大量の都市排水は下水道整備の遅れ・排出規制の不明確さに助長され、水質汚濁という質的問題を顕在化させている。しかも公共用水域の水質汚濁は水源機能を低下させ、浄化処理コストを高騰させるとともに、水不足の遠因にもなっている。

こうした事実は、もはや水問題は需要・供給・排水汚濁を個々独立にとらえることはできず、それらの有機的な関連構造を量・質・コストの3側面を包含した形で総合的にとらえなければならないことを意味している。さ

らに、われわれ人間生活・産業活動にとって現況の水需給は量・質・コストの面で決して満足のいくものではなく、そのギャップを改善・緩和させるために講じた対策手段があるものは遅れを伴って、あるものはひずみをもって再びわれわれの生活・産業構造にはねかえっていき、時間の経過とともにこのプロセスが繰り返されるとみなければならない。

このように考えると、われわれは水需給構造を一つの社会システムとして体系的にとらえるべきであり、しかもそれらシステムの階層的フィードバック構造を正しく認識しなければならないことに気づくであろう。図-1はこうした考えのもとで需要・供給・排水汚濁の相互関係をフローチャートで示したものである。もちろん、水は人間生活のみならず自然の構成要因として重要な役割を担っているので、人間生活中心の考え方は水にとって危険側といわねばならないし、また社会・経済・技術の変容に水環境は鋭敏に反応し、それにより変化した環境が人間の生活や産業活動に影響を与えるということも注意しておかなければならない。このことを図中では環境基準という要素で概念的に考慮することになっている。

以上述べたことから明らかなように、水需給システムの広汎でかつ複雑な相互関係およびそれらのダイナミックな特性はもはや従来の解析的手法では取り扱える範囲を越えており、シミュレーション手法の導入が不可欠となってくる。ここに、システムの階層的フィードバック構造を組み入れたシミュレーション手法、すなわち SD の水需給構造への適用が考えられる。

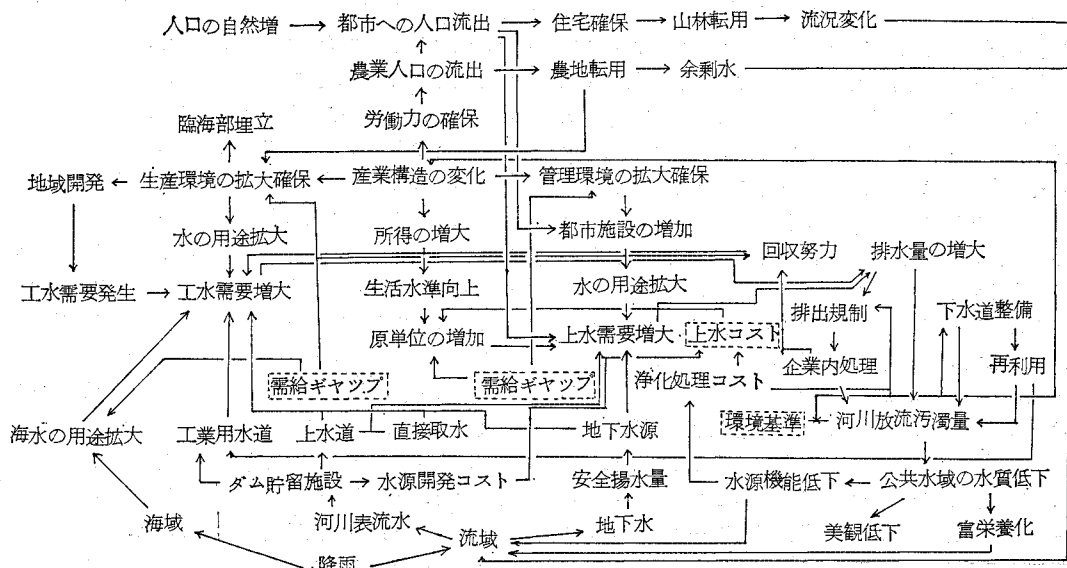


図-1 水需給構造のトータルフロー

3. システム・ダイナミクス (SD) とその基本概念

(1) SD とその特徴

J.W. Forrester 教授によって創始されたインダストリアル・ダイナミクス²⁾は、その後、企業・都市・世界などのダイナミックなメカニズムを解明する総称としてシステム・ダイナミクスとよばれるようになった。

SD は 1) 物、生物のみならず人間活動をも含んだ現象をシステムとして把握し、そのシステムにはインフォメーション・フィードバック・ループが存在するとみなしてシステム工学的なアプローチによってトータルシステムをいくつかのサブシステムに分解する、2) サブシステム間に作用する因子・要素の因果関係を解明してシステム方程式をたて、総合して数学モデルを作り、電子計算機によってシミュレートする、3) モデルの実証を経たのち、さまざまな条件下でテストし、意志・政策変数のメカニズムの解明に努める、という特徴を有する。

したがって、SD によれば、システム分析・モデル構成の過程でシステムの構造について理解を深め、シミュレーションによってダイナミックな挙動が定量的に把握できる。しかもインフォメーション・フィードバック・ループはフィードバックされた情報を目的値に対比して、偏差のあった場合にその偏差をなくすようにシステムの挙動をコントロールするメカニズムを内蔵するため、SD はそのコントロールのメカニズムの解明と理解にも役立つ³⁾。これらがとりもなおさず、従来の方法にない利点であり、SD が目的とするところでもある。

(2) SD モデルの基本的な構造

SD モデルは基本的には図-2に示すような制御されたフローによって相互に連結された蓄積の場(レベル)が交互に現われる構造をもつ。すなわち、次に述べる4つのファクターから成り立っている。

- i) レベル (□ で表わす)
 - ii) あるレベルの中味(内容)を他のレベルへ運ぶフロー (— で表わす)
 - iii) レベル間のフローの大きさ(レイト)を決める意志決定機構 (◇ で表わす)
 - iv) 意志決定機構とレベルを結ぶ情報の通路 (……で表わす)
- これらによって一見

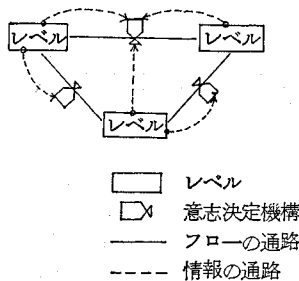


図-2 SD の基本構造

複雑に思える現象も SD によってモデル化が可能となる。

(3) 計算の方式(システム方程式)

連続的な時間の流れは、同一の長さの短い時間間隔 DT に分けられ、時間とともに変化するレイトは DT の間は一定であることを仮定する。

方程式は時間の流れ J, K, L にしたがって、解答時間 DT ごとに計算される。レベル方程式は J 時点のレベルと時間間隔 JK のレイトから K 時点のレベルを計算するプロセスを示す。たとえば、

$$L.K = L.J + (DT)(RI.JK - RO.JK)$$

のような形で表現できる。ここに、L.K: K 時点でのレベル, L.J: J 時点でのレベル, RI.JK: JK のインプットレイト, RO.JK: JK のアウトプットレイト, である。

こうして K 時点のレベルが計算された後で次のステップである時間間隔 KL のレイトが決められ、このレイトが次の時間のシステムのフローをコントロールすることになる。以後も同様のプロセスで時間が DT ずつ進むことによって次々とレイトとレベルが決定されていく(図-3)。

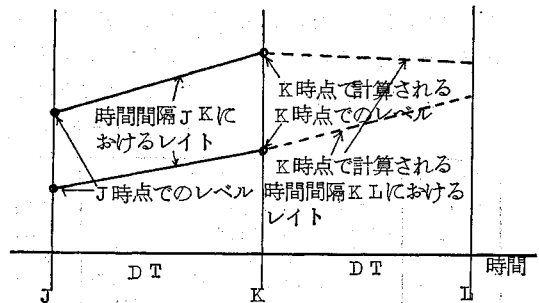


図-3 SD の計算方式

次にレイト方程式であるが、これは意志決定機構によって決定されたフローのレイトを数式化したもので、一般的な形で表現できないが、K 時点で計算され、次の時間間隔 KL 間のフローのレイトを決定するものである。

4. 水需給構造のシステム・ダイナミクス・モデル

(1) システム分析の目的とサブシステムへの分割

人間生活・産業活動にとって水が不可欠である以上、その向上・発展のためには水需要の増加は必須である。だが、水需給の現況から理解されるように、一方では有限な資源量、水質汚濁の悪化、諸コストの高騰、などの制約をうけて近い将来、水需給が破たんする危惧も予想

される。すなわち、現在、将来にわたる水需要の増加、それに伴う水質汚濁が必須と考えられる状況では、水の需給構造は上記のような制約のなかで決定されていくものと考えられる。

そこで本研究のシステム分析の目的としては必要な工業生産の拡大を可能にし、人間生活を営むのに十分なだけの水資源を確保しながら、しかも廃水の排出先である河川の環境基準を守っていくためには、どのような手段を用いて、いかなる政策ルールによって実施していけばよいのかを、システムの動向をみながら、その量的な目安を見出すことにある。このことは、水そのものの量的な動きが質、コストなどからのねかえりをうけて、どのように動くかといったことを追求することによって水政策の上で重要となる指標を求めることでもある。なお、河川の汚濁といった複雑な現象をすべて包含することは不可能であるので、ここでは一過性の有機質汚濁物質を代表的に取り上げ、その BOD 濃度のみを水質対象としており、蓄積性の汚濁物質、たとえば重金属や放射性物質などは考慮の対象外としている。

次にトータルなシステムをサブシステムに分割し、サブシステム内の構造ならびにサブシステム間の因果関係を明らかにしなければならない。本研究では図-1 のトータルフローを考えて、次の6つのサブシステムに分割して、モデルの内部構造をより詳細にさぐることにし

た。すなわち、

- i) 人口構造のサブシステム, ii) 土地構造のサブシステム, iii) 上水需給構造のサブシステム, iv) 工水需給構造のサブシステム, v) 水源開発構造のサブシステム, vi) 排水汚濁処理構造のサブシステム

以下では、水需給構造の条件が一段ときびしくなっている近畿圏（滋賀・京都・大阪・兵庫・奈良・和歌山の2府4県）を適用対象に、これらサブシステムを構成するシステム方程式を展開し、上記のシステム分析をはかる。なお、以下の記号についてはレベルには末尾に L を、レイトには R を付してある。

(2) 人口構造のサブシステム

このサブシステムでは人口の自然増加はもとより、産業活動に伴う1次、2・3次産業就業人口および他地域からの流入就業人口の増減を考えている。表-1 はこれらを具体的にシステム方程式で一括表示したものである。

(3) 土地構造のサブシステム

この部分では、1次産業就業人口の減少に伴い手離された耕地が事業所敷地および宅地へ転換されるプロセス、臨海埋立地が事業所敷地に付加されるプロセスを取り扱っている。表-2 はこの部分のシステム方程式を示

表-1 人口構造サブシステムのシステム方程式

| レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|------------|--|---|---|
| 人口構造サブシステム | $PL.K = PL.J + DT \cdot PR.JK$ $PR.JK = PL.J \cdot C19 : PL.J / (PIL.J + PAL.J) \leq C31$ $PR.JK = C31 \cdot (PIL.J + PAL.J) \cdot PWR.J : PL.J / (PIL.J + PAL.J) > C31$ | PL: 総人口 (人) PR: 総人口自然増レイト (人/年) PAL: 1次産業就業人口 (人) PIL: 2・3次産業就業人口 (人) PWR: 老令人口増などの要因で鈍化する と考えた就業人口自然増加率 昭和 40~49 年: 0.02 昭和 50~74 年: 0.01 昭和 75 年以降: 0.002 C19: 自然増加率 0.02 C31: 就業人口1人が扶養する人数 2.4 (人) | 国勢調査および日本統計年鑑より近畿圏の総人口、一世帯あたり平均人数を調べ、総人口の対前年増加率 0.02 および世帯主が扶養する平均家族数 2.4 人を得る。また PWR に関しては就業人口増に対する明白な資料がなかったため、国勢調査より、15~19 才人口と 60~64 才人口の差を求め、それが、その年度に引続く 5 年間に自然に増加する就業人口と考え、全就業人口との比から求めた。なお、50 年以降は老令人口の増加等の要因で、この増加率が鈍ると考え、これらの値を仮定した。 |
| | $PAL.K = PAL.J + DT \cdot (PAR.JK - PAIR.JK)$ $PAR.JK = PAL.J \cdot PWR.J$ $PAIR.JK = PAL.J \cdot C23 : WIL.K / WIL.J \geq C37$ $PAIR.JK = 0 : WIL.K / WIL.J < C37$ | PAR: 1次産業就業人口自然増加レイト (人/年) PAIR: 1次から2・3次への転業人口レイト (人/年) WIL: 工業出荷額 (百万円) C23: 0.0534 C37: 1.02 | 工業出荷額が対前年比 2% 以上の伸びを示したとき、転業人口があるとし、その値は1次産業就業人口の減少率から自然増加率 0.02 を差し引いた値 0.0534 を社会減率として転業するものとした。 |
| | $PIL.K = PIL.J + DT \cdot (PIR.JK + PAIR.JK + PIOR.JK)$ $PIR.JK = PIL.J \cdot PWR.JK$ $PIOR.JK = PIL.J \cdot \max(B9 - A9, 0)$ | PIL: 2・3次産業就業人口 (人) PIR: 2・3次産業就業人口自然増加レイト (人/年) PIOR: 流入人口レイト (人/年) B9: 0.0160 A9: 0.0023 | 2・3次産業就業人口増加率から自然増加率 0.02 と1次産業からの転業人口の2・3次産業就業人口に対する比を差し引いたものを他地域からの流入就業人口とみなした。この方法により流入人口は減少の傾向にあることがわかり、傾向直線をあてはめ各係数を求めた。なお、逆の流出は将来にも生じないものとした。 |

改善の方向: シミュレーション結果と50年実績値との比較では総人口および就業人口の自然増加率のさらなる鈍化を考慮した方がよい。

表一 土地構造サブシステムのシステム方程式

| レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|------------------|--|---|---|
| 耕地面積 AAL | $AAL.K = AAL.J - DT \cdot ACAR.JK$ $ACAR.JK = (PAL.I - PAL.J) \cdot C4$ | AAL: 耕地面積 (ha) ACAR: 耕地面積減少レイト (ha/年) C4: 0.1375 (ha/人) | 1次産業就業人口と耕地面積との間に直線的相関があるので、1次産業就業人口の変化数に一定の比0.1375 ha/人/人/年を乗じて与えた。これは転換可能面積としてストックされていく。 |
| 転換可能耕地面積 ACAL | $ACAL.K = ACAL.J + DT \cdot (ACAR.JK - AARR.JK - AAIR.JK)$ | ACAL: 転換可能耕地面積 (ha) AARR: 耕地から宅地への転換レイト (ha/年) AAIR: 耕地から事業所敷地への転換レイト (ha/年) | |
| 宅地面積 ARL | $ARL.K = ARL.J + DT \cdot AARR.JK$ $AARR.JK = \min(PIL.J \cdot A1 - B1 - ARL.J, ACAL.J \cdot ARL.J / (AIL.J + ARL.J))$ | ARL: 宅地面積 (ha) A1: 0.0178 (ha/人) B1: 34400 (ha) | 宅地の供給源を主に耕地の転用からとみなし、1,2,3次産業就業人口と宅地面積との直線的相関より各係数を求めた。一方、2,3次産業就業人口の変化とは無関係に耕地面積の減少にもなる転換可能耕地面積の値を従来の宅地・事業所敷地面積の比で配分した値を求め、この2者の小さい方の値をとることとした。前者は2,3次産業就業者の増加にもなる郊外地の宅地需要を意味し、後者は宅地供給の制約を意味する。 |
| 埋立可能面積 ASL | $ASL.K = ASL.J - DT \cdot ASIR.JK$ $ASIRX.JK = \min(ASL.J, (WIL.J \cdot WAI.J - AIL.J) \cdot (1 - C3))$ $ASIR.JK = \max(ASIRX.JK, 0)$ | ASL: 埋立可能面積 (ha) ASIRX: 補助変数 ASIR: 事業所用埋立レイト (ha/年) WAI: 工業出荷額あたりの事業所敷地面積 (ha/百万円) C3: 0.66 | 事業所敷地取得比が埋立地と田畑からとるので、昭和37~46年平均で34:66であるので、事業所敷地需要の34%を埋立地に要求することとした。しかし、埋立可能面積が0になると要求はなくなる。 |
| 事業所敷地面積 AIL | $AIL.K = AIL.J + DT \cdot (AAIR.JK + ASIR.JK)$ $AAIR.JK = \min((WIL.J \cdot WAI.J - AIL.J) \cdot C3, ACAL.J \cdot AIL.J / (AIL.J + ARL.J))$ WALK = WAI.J · C2 : 昭和45年以前 WAI.K = WAI.J · C24 : 45年以降 | AIL: 事業所敷地面積 (ha) AAIR: 耕地から事業所敷地への転換レイト (ha/年) C2: 0.918 C24: 0.99 | 事業所敷地は耕地、宅地、山林原野、埋立地などから供給されるが、本研究では耕地と埋立地を重要な要素と考え、宅地からの転用はその転換構造の不明確さのために、また山林原野もこのモデルの他の要素との関連が薄いとみなして置いた。そこで耕地からの転換量は以下のようにして決めた。すなわち、対前年工業出荷額と事業所敷地面積との比、AIL/WILは生産効率の向上に伴い、年々減少し、その減少比は昭和40~45年平均で0.918である。しかし、この減少割合はやがて鈍化すると考えられるので、昭和46年以降は昭和46年値に近い0.99を採用することとした。そして、事業所敷地取得の66%が耕地からの転換に要求されるとした。これと別に、転換可能面積に従来の宅地・事業所敷地面積比に配分されるとした値を与え、これを制約条件のようにして、2者の小さい方の値を耕地から事業所敷地への転換レイトであるとした。 |

改善の方向: シミュレーション結果と実績値との比較では、耕地面積減少レイトがもう少し大きいようである。事業所敷地には宅地、山林原野からの供給があるわけであり、この部分は事業所敷地面積に占める耕地と埋立地の割合、それに宅地、山林原野からの転換量を加える方式の方が实际的であろう。

したものである。

(4) 上水需給構造のサブシステム

この部分では、上水需要を家庭用と業務用に分け、前者においては人口、生活水準、上水道普及率に、後者は工業出荷額に関連させて予測している。さらに昭和50年以降は水源開発や浄化処理などに伴う上水コストの上昇が需要を抑制する構造をも導入している。一方、上水

供給はダムなどの建設により開発供給される河川表流水と、従来からの地下水供給でまかなっている。表一3はこの部分のシステム方程式である。

(5) 工水需給構造のサブシステム

この部分では、工水を冷却・温調用水とその他工水(原料、ボイラー、洗浄・処理用水)に分け、それぞれの需要を工業出荷額に結びつけた弾性値予測法¹⁰⁾で与え

表-3 上水需給構造のシステム方程式

| レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|-------------------------------|---|---|--|
| 家庭用上水 需 要 量 HW | $HW.K = HWU.K + PL.K + BP.K$ $HWU.K = (D1/HH.K + D2^{29} + D3 \cdot HC.K) \cdot 10^{10 \cdot 89}$ $BP.K = \min(BP.J + C22, 0.99)$ $HH.K = HH.O \cdot C111 \cdot K$; $HH.K \leq 2.5$ $HH.K = 2.5$; $HH.K > 2.5$ $HC.K = HC.O \cdot C12 \cdot K$; 昭和 50 年以前 $HC.K = HC.J \cdot C33$; 昭和 50 年以降 | HW : 家庭用上水需要量 (m ³ /日) HWU : 家庭用上水原単位 (m ³ /日・人) BP : 上水道普及率 (%) HH : 一世帯あたり平均人数 (人/世帯) (HH.O は基準年度の値, 3.824) HC : 一人当たり車台数 (台/人) (HC.O は基準年度の値, 0.0259) D1 : 一世帯あたりの洗濯, 風呂, 掃除, 散水用原単位 (l/世帯) D2 : 一人あたり飲食, 手洗, 洗面, 水洗便所用原単位 (l/人) D3 : 車一台あたりの洗車用原単位 (l/台) C22 : 2% : 46 年以前 1% : 46 年以降 C111 : 0.981 C12 : 1.219 C33 : 1.027 | 民力および日本統計年鑑から近畿圏の昭和 38~48 年の一世帯平均人員および一人あたり車台数を調べ, それぞれの対前年度比から, 前者においては年率 1.9% で減少, 後者においては年率 21.9% で上昇する結果を得た。しかし, 一世帯平均人員は 2.5 人以下にはならないものと考えており, また一人あたり車台数の伸び率が減少してきていることを考え, 50 年以降は 2.7% でしか上昇しないとしている。 上水道普及率の上限は 99% と考え, その伸び率は上水道統計より, 年率 2% を与えている。しかし, 傾向としては, 施設建設の遅れともあいまっての伸び率が鈍化してきているので, 46 年以降は 1% としている。 一方, 水コストの高騰ともなう水需要の抑制に関してはデータもなく, 現在のような低廉価格では明確な反応がないことも指摘されているが, 今後の水コストの上昇は需要抑制効果をもち, またもたせるべきであるとの考えから, アメリカでの価格弾力性に関するデータ等を参照して D1, D3 にその効果を用いた。すなわち, D1 に関しては 50 年以前は 330, 50 年以降は上水コストが 10 円未満, 10~20 円, 20~30 円, 30 円以上に対してそれぞれ 330, 320, 310, 300 を仮定, D2 に関しては必要であるから全期間を通じ 94 (l/人), D3 に関しては, 50 年以前は 15, 50 年以降は D1 と同様, 上水コストによりそれぞれ 15, 14, 13, 12 を仮定する。 |
| 業務用上水 需 要 量 HNW | $HNW.K = (HS.K + HU.K + B5) \cdot D4$ $HS.K = A8 \cdot WIL.K + B8$ $HU.K = HU.J \cdot C26$ | HNW : 業務用上水需要量 (m ³ /日) HS : 都市施設面積 (m ²) HU : 業務用上水面積原単位 (m ³ /日・m ²) B5 : 2.0 × 10 ⁶ (m ³ /日) A8 : 2.04 (m ³ /百万円) B8 : 372 × 10 ⁶ (m ³) C26 : 1.01 D4 : 上水コスト高騰ともなう需要抑制係数 | 業務用水需要量と都市施設面積との直線的相関および都市施設面積と工業出荷額との直線的相関より各係数を求めるとともに, 業務用水の伸びを考慮して, 面積原単位に割増係数 1% を乗じている。また, 家庭用と同様, 上水コストの高騰ともなう需要抑制効果は大きいと考え, その抑制係数として 50 年以前は 1.0, 50 年以降は上水コストが 10 円未満, 10~20 円, 20~30 円, 30 円以上に対して, それぞれ 1.0, 0.98, 0.95, 0.90 を仮定した。 |
| 総上水需要 量 HWD と充足率 BSD | $HWD.K = HN.K + HNW.K$ $BSD.K = BWW.K / HWD.K$ $HNS.K = 1.0$, $HSS.K = 1.0$: $BSD.K \geq 1.0$ $HNS.K = BSD.K$, $HSS.K = 1.0$: $0.9 \leq BSD.K < 1.0$ $HNS.K = 0.9$, $HSS.K = \max(0.1 + BSD.K, C36)$: $BSD.K < 0.9$ $HNWW.K = HN.W.K + HNS.K$ $HWW.K = HW.K + HSS.K$ $HWD1.K = HNWW.K + HWW.K$ | HWD : 総上水需要量 (m ³ /日) BSD : 充足率 BWW : 上水供給量 (m ³ /日) HNS : 業務用充足率 (=1.0 - 節水率) HSS : 家庭用充足率 HNWW : 節水後の業務用水需要量 (m ³ /日) HWW : 節水後の家庭用需要量 (m ³ /日) HWD1 : 節水後の総上水需要量 (m ³ /日) C36 : 0.6 | 上水供給量を総上水需要量で除したものを充足率とし, それが 1.0 以下になったときには業務用と家庭用がそれぞれ節水を余儀なくされる。すなわち, 水不足が生じたとき, まず業務用の節水がなされ, この節水率は 10% を上限とし, それでも水不足が解消しなければ, 家庭用の節水がなされる。家庭用の場合, 飲食用, 手洗用など節水の困難な用途を省いた節水率で, 節水限界を 40% と考えている。 |
| 上水供給量 BWW | $BWW.K = BW.K \cdot (1.0 - C150) + C200$ | BWW : 上水供給量 (m ³ /日) BW : 浄水場受水量 (m ³ /日) C150 : 漏水率 C200 : 地下水依存量 | 地下水依存量は 40 年前後は 10 ⁶ m ³ /日近く使用していたが, 地盤沈下などの地下水規制および地下水保全の観点から減少しており, 今後も減少するものと考え, 55 年までは直線的に減少, 55 年以降は一定量 0.7 × 10 ⁶ m ³ /日と仮定している。 |

改善の方向：業務用水需要の算定においては，都市施設面積と販売額との関係を導入する方法が考えられる。水コストによる需要抑制効果は現在の水コスト程度ではないかもしれないが，将来的には，あるいは概念的にはあるものと考えられる。具体的なデータはないので，これらの仮定値の妥当性については検討できないが，今後，こうした方面の研究結果が得られれば導入していきたい。

表-4 工水需給構造のシステム方程式

| レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|---|---|---|---|
| 冷却・温調 用水需要量 WCD | $WCD.K = WCD.O$ $*(WIL.K/WIL.O)**C7$ $RCWU.K = WCD.K/WIL.K :$ $WC.K \leq 10^6$ $RCWU.K = WCD.K/WIL.K*0.9 :$ $WC.K > 10^6$ | WCD : 冷却・温調用水需要量 (淡水+海水) (m ³ /日) RCWU : 冷却・温調用水需要原単位 (m ³ /日・百万円) WC : 冷却・温調用水最終不足量 (m ³ /日) C7 : 1.0 | 参考文献10)より“用水量の比は出荷額 の比の α 乗である”とされているので、 工業統計表(用地・用水編)データより $\alpha=1.0$ を得、これをC7とした。なお、 WCD.OおよびWIL.Oは基準年度の値 を意味する。 |
| その他工水 需要量 WID | $WID.K = WID.O$ $*(WIL.K/WIL.O)**C8$ $RIWU.K = WID.K/WIL.K$ | WID : その他工水需要量(淡水) (m ³ /日) RIWU : その他工水需要原単位 (m ³ /日・百万円) C8 : 0.3 | 上式と同様に工業統計表データより $\alpha=$ 0.3を求め、これをC8とした。海水の工 水への用途としては冷却用が46年度で97 %以上を占めているので、冷却用のみを考 慮した。 |
| 上水道から の工水供給 量 BWS | $BWS.K = \max(BWSX.K, O)$ $BWSX.K = \min(BWW.K$ $*BIP.K, BWW.K - HWD.K)$ $BIP.K = BIP.J * C32$ | BWS : 上水道からの工水供給量 (m ³ /日) BWSX : 補助変数 BIP : 上水道供給量に占める工業用供給 量の割合 C32 : 0.97 | 上水道供給総量に占める工業用の割合は わずかではあるが、減っている、また、上 水の供給先である家庭用、業務用の需要量 に対して供給量に余裕がある場合のみ工 業への供給があると考え、実績値との比較 によって、その小さい方を上水道からの工 水供給量と考えた。 |
| その他水源 からの工水 供給量 WIE | $WIE.K = WIE.O * (1.0 - 0.025 * K) :$ $WIE.K \geq 0.7 * WIE.O$ $WIE.K = 0.7 * WIE.O :$ $WIE.K < 0.7 * WIE.O$ | WIE : その他水源(地表水・伏流水・地 下水からの直接取水量)からの工 水供給量 (m ³ /日) | その他水源からの工水供給量は年々わず かであるが減っている。しかし、工水需要 においては将来ともこうした水源からの直 接取水には依存すると考えられ、基準年度 の70%を確保水量とした。 |
| 工業用水道 供給量 WI | $WI.K = 3.249 * 10^6 / (1 + 2.4136 * e^{-0.0079 * K}) * K :$ $WA.K > WLK + BW10.K$ $WI.K = \max(WA.K - BW10.K, O) :$ $WA.K \leq WLK + BW10.K$ | WI : 工業用水道供給量 (m ³ /日) WA : 河川表流水開発量 (m ³ /日) BW10 : 上水道取水量 (m ³ /日) | 工業用水道供給量は順調にのびており、 今後とも望まれるが、地方自治体、企業に にとってはその財政負担・コスト増などに よって必ずしも満足しているわけではない。 ここでは、河川表流水の開発量が十分 ある場合には、工業用水道供給量に関する 既往データから求めたロジスティック曲線 値で、そうでない場合は開発量から上水道 取水量を差し引いた分だけしか供給されな いと考えた。 |
| 工業用水全 淡水供給量 WIS と冷却・温 調用淡水一 次供給量 WCFS | $WIS.K = WI.K + BWS.K + WIE.K$ $WCFS.K = \max(WIS.K - WID.K, O)$ | WIS : 工業用水全淡水供給量 (m ³ /日) WCFS : 冷却・温調用淡水一次供給量 (m ³ /日) | 冷却用は海水・回収水など直接の淡水源 のみに頼らなくてもよいが、その他工水は 淡水源に依存しており、とにかく淡水源で その他工水需要を満たし、残りを冷却用に 供給し、冷却用不足分は海水と回収水で補 うと考える。 |
| 冷却・温調 用海水供給 量 SWSL | $SWSL.K = SWSL.J + DT * SWSR.JK$ $SWSR.JK = A2 * WIL.J + B2 - SWSL.J$ | SWSL : 冷却・温調用海水供給量 (m ³ /日) SWSR : 冷却用海水供給量増加レイト (m ³ /日) A2 : 0.26 (m ³ /日・百万円) B2 : 1.76 * 10 ⁶ (m ³ /日) | 冷却用海水の利用量は出荷額との間に直 線関係があるので、最小二乗法で係数を 決定した。 |
| 回収水量 RWSL | $RWSL.K = RWSL.J + DT * RWSR.JK$ $RWSR.JK = \max(RWS.J * WCFS.J /$ $(1 - RWS.J) - RWSL.J, O)$ $RWS.K = \min(WCSS.K / WCC.K, C10)$ $WCSS.K = \max(WCD.K$ $- WCFS.K - SWSL.K, O)$ $WCC.K = \max(WCD.K - SWSL.K, O)$ | RWSL : 回収水量 (m ³ /日) RWSR : 回収水量増加レイト (m ³ /日) RWS : 回収率 (%) WCSS : 冷却用淡水一次不足量、すなわち 回収努力をする前の不足量 (m ³ /日) WCC : 冷却用淡水需要量 (m ³ /日) C10 : 0.95 | 冷却用不足量と冷却用淡水需要量の 比を回収率と考え、回収率がその値をとれ ば、冷却用不足の需要は満たされるわけだ が、技術上の制約により、95%を上限度 とした。 |
| 冷却用淡水 供給量 WCF と冷却用工 水利用量 WCS | $WCF.K = WCFS.K / (1 - RWS.K)$ $WCS.K = WCF.K + SWSL.K$ | WCF : 冷却用淡水供給量 (m ³ /日) WCS : 冷却用工業水利用量 (m ³ /日) | |

工
水
需
給
構
造
サ
ブ
シ
ス
テ
ム

| | レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|--------------|--------------|--|--|---|
| 工水需給構造サブシステム | 冷却用水最終不足量 WC | $WC.K = \max(WCD.K - WCS.K - WWW.K, O)$ $WWW.K = TITP.K + RUU$ $TITP.K = SWW.K + SL.K$ $SWW.K = \max(WID.K + WCC.K - WIS.K \cdot 0.06 - RWSL.K, O)$ | WC: 冷却用最終不足量 (m ³ /日) WWW: 下水再利用水 (m ³ /日) TITP: 下水処理場流入量 (m ³ /日) SWW: 工場排水量 (m ³ /日) SL: 下水道普及率 (%) RUU: 再利用率 | 工業用水として取水された用水は、工場内で循環使用されるものと完全消費されるものを除けば、工場外へ排出される。すなわち排水量は全用水量から回収水、ボイラー、原料用水等を差し引いた値として与えることができる。過去のデータを調べるとボイラー・原料用水が全淡水供給量に占める割合はほぼ6%前後の値を示している。 |

改善の方向：今後は、生産効率の向上に伴う単位出荷額あたりの水使用量の減少が考えられるので、その効果を導入していく必要がある。また、冷却用水最終不足量算定の部分はかなり概念的であるので、データの収集をはかっていくとともに、その実証が必要である。

表-5 水源開発構造のシステム方程式

| | レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|--------------|---------------------|---|--|---|
| 水源開発構造サブシステム | 水源開発量 WA | $WAR.JK = C100 - WA.J - LEV1.J - LEV1.K$ $LEV1.K = LEV1.J + DT \cdot (WAR.JK - LEV1.J) / (0.5 + DWS)$ $WAS.JK = DELAY2(WAR.JK, DWS)$ $WA.K = WA.J + DT \cdot WAS.JK$ $WA1.K = WA.K / 86400$ $COST1.K = WA1.K \cdot 1.2 / 24$ | WA: 水源開発量 (m ³ /日) WA1: 補助変数 WAR: 目標開発レイト (m ³ /日) LEV1: 現在事業実施中でまだ完成していない開発量 (m ³ /日) WAS: 開発量増加レイト (m ³ /日) C100: 開発量の上限値, 8,904,546 (m ³ /日) DELAY2: 二次指数遅れ DWS: 遅れ定数 (年) COST1: 水源開発コスト (円/m ³) | 水源開発の目標は、開発可能な水量から既開発量および現在事業実施中でまだ完成していない開発量を差し引いたものに向けられるが、ダム・堰などの建設は年数を要する事業であるので当然開発の遅れがある。昭和46、47年頃までは順調に伸びてきたが、今後はダム適地の枯渇、水没補償、水源開発関連費の高騰などにより開発は遅れ、開発コストも上昇していくことが予想される。なお、開発の上限値および開発量とコスト関係は広域利水調査報告の近畿ブロックの値を参照して与えてある ¹⁴⁾ 。 |
| | 上水道浄水量 BW | $BW.K = BW.J + DT \cdot BWR.JK$ $BWR.JK = \min(BWR1.J, BX)$ $BWR1.J = \max(HWD.J / HWD.I + BW.J - BW.J, HWD.J - BW.J)$ $BX = \max(RC.J / RC.I \cdot BW.J - BW.J, O)$ $RC.K = RC.J + C13$ | BW: 上水道浄水量 (m ³ /日) BWR: 浄水量増加レイト (m ³ /日) BWR1, BX: 補助変数 RC: 上水管路延長 (m) C13: 年間の上水管路延長増 (m) | 上水需要量ののび率に比例した供給量と、上水需要量に対して不足量を補う意味の項を考え、その大きい方をとり、さらに管路延長増に見合う分しか給水できないという施設上の制約を考えている。 |
| | 上水道取水量 BW10と環境水量 WE | $BW10.K = BW.K \cdot 1.1$ $WE.K = WA.K - (WIK + BW10.K)$ $WA.K > WIK + BW10.K$ $WE.K = 0: WA.K \leq WIK + BW10.K$ | BW10: 上水道取水量 (m ³ /日) WE: 環境水量 (m ³ /日) | ダム・堰などで開発された水は取水されるが、取水から浄水場に行くまでに漏水があり、既往データでは平均して10%の損失がある。なお、開発量が上水道・上水道供給量を上回る場合は、環境容量ともいふべき水量を考え、河川流量の増加に寄与し、生物環境の改善、水質自浄作用の促進に貢献するとしている。 |

改善の方向：ダム開発による段階的増加特性を考慮していくとともに、流入量の平均値だけでなく、その確率特性の導入も必要となってこよう。

ている。また、冷却・温調用水は海水、淡水供給量でまかなわれるが、不足する場合は回収率の向上、さらには下水処理水の再利用をはかり、それでも不足する場合には工業出荷額の増加にブレーキがかかると考えられている。表-4がこの部分のシステム方程式である。

(6) 水源開発構造のサブシステム

この部分では、湖沼水・河川表流水をダム・堰などの建設によって開発し、上水道、工水道に供給する。なお、水源開発にはダム適地の枯渇、水没補償などの問題があり、開発の遅れおよび開発コストの上昇がみられるので、モデルではこれらの点も考慮している。表-5はこれらのシステム方程式である。

(7) 水質汚濁・処理構造のサブシステム

上水道用水および工業用水は利用後、湖沼や河川に排出され、公共用水域の水質汚濁を悪化させている。ここでは、それを防止すべく処理技術の向上、下水道の普及、さらには排出規制をはかっている。また、水質汚濁は浄化処理コストにはねかえってくるので、コスト面からの汚濁原単位の減少も考えている。なお、先述したように、ここでの水質汚濁現象は一過性の有機質物質 BOD で代表しており、蓄積性の汚濁物質は考慮の対象外にしていることを断っておく。表-6はこの部分のシステム方程式である。

表-6 水質汚濁・処理構造のシステム方程式

| レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|-------------------------------------|---|---|---|
| 生活汚濁量 SPH | $SPH.K = PL.K \cdot SU.K$ $SH.K = SH.J + B6$ $SU.K = SH.K + B7$ | SPH: 生活汚濁量 (g/日) SH: 雑排水汚濁原単位 (g/人・日) SU: 生活汚濁原単位 (g/人・日) B6: 雑排水汚濁原単位の増加量 0.6 (g/人・日) B7: し尿汚濁量 13 (g/人・日) | 参考文献12)によれば雑排水による分は昭和40年で13.5 (g/人・日)、昭和55年で23 (g/人・日)と予測しており、しかもこれらの値が直線的に増加するものとしているので年々0.6 (g/人・日)の増加がある。一方、し尿による分は通常13 (g/人・日)といわれているので、その値を採用している。なお、46年以降浄化処理コストCOST2により雑排水汚濁は抑制されるべきであると考えられる場合には、そのコストが10円未満、10~20円、20円以上に対し、SHを0.6、0.5、0.4に仮定し、その効果を調べている。 |
| 工業汚濁量 SPI | $SPI.K = WIL.K \cdot SIU.K$ $SIU.K = B10$: 排水規制なしの場合 $SIU.K = \max(B10 - A10 \cdot K, 30)$: 46年以降、排水規制を実施した場合 | SPI: 工業汚濁量 (g/日) SIU: 工業汚濁原単位 (g/日・百万円) B10: 112.7 (g/日・百万円) A10: 8.14 あるいは 4.0 (g/日・百万円) | 工業汚濁原単位は、生産技術の向上、排水一律規制などにより変化が生じると推定され、とりわけ減少すると考え、大和川流域負荷原単位の予測値 ¹⁹⁾ を参照して求めた。なお、B10の値は、業種別工業汚濁原単位を昭和46年の近畿の業種別出荷額比に応じて比例配分して求めたものである。A10の値は排水規制の厳しい場合を8.14で、緩い場合を4.0で与えている。 |
| 生活排水の河川放流汚濁量 SPOH | $SPOH.K = SPH.K \cdot SP.K \cdot C1$ $- SA.K) / PL.K + TP.K \cdot 13$ $\cdot (1 - TPA.K) + (PL.K - SP.K$ $- TP.K) \cdot 13 \cdot (1 - TA.K)$ $+ (PL.K - SP.K) \cdot SH.K \cdot SS.K$ $SP.K = PD.K \cdot SL.K$ $PD.K = \min(PD.J \cdot C21, PL.K \cdot C29)$ $SPP.K = SP.K / PL.K$ $TP.K = \max(PL.K \cdot C15 - SP.K, 0)$ $TA.K = 0.6$ $TPA.K = 0.85$ $SS.K = 0.6$ $SA.K = \min(SE.J / SPH.J / 10$ $+ SA.J \cdot C20)$ | SPOH: 生活排水の河川放流汚濁量 (g/日) SP: 下水処理人口 (人) PD: DID 人口 (人) SPP: DID 人口に占める下水処理人口比 (%) TP: し尿処理人口 (人) TA: 農村還元によるし尿処理効率 (%) TPA: し尿処理場での処理効率 (%) SS: 雑排水汚濁の河川流出率 SA: 下水処理場処理効率 (%) SE: 過剰汚濁量 (g/日) C21: 1.037 C29: 0.9 C15: 0.9 C20: 0.88 | 第1番目の式の第1項は下水処理後の生活排水による河川放流汚濁量、2項はし尿処理後のし尿による河川放流汚濁量、3項は農村還元後のし尿による河川放流汚濁量、4項は自然除去後の雑排水による河川放流汚濁量であり、これらの合計量を生活排水の河川放流汚濁量と考えている。 下水道は人口集中地区を中心に整備されると考え、DID人口に下水道普及率を乗じたものを下水処理人口とした。DID人口は既往データより年率3.7%で増加しているため、その値を採用し、その他の処理効率、流出率については参考文献12)の値をそのまま用いた。ただし、下水処理場処理効率については過剰汚濁量の大小によって効率が促がされるとしている。 |
| 工業排水の河川放流汚濁量 SPOI | $SPOI.K = (SI.K \cdot (1 - SIA.K)$ $+ (1 - SI.K) \cdot SSI.K) \cdot SPl.K$ $SIA.K = \min(SE.J / SPl.J / 10$ $+ SIA.J \cdot C16)$ $SI.K = SL.K$ $SSI.K = 0.6$ | SPOI: 工業排水の河川放流汚濁量 (g/日) SI: 汚濁物の処理場流入率 (%) SSI: 未処理汚濁物の河川流出率 (%) SIA: 下水処理場処理効率 (%) C16: 0.8 | 工業汚濁物を処理場に流入するものと、しないものに分け、それぞれの効率を乗じ、河川放流汚濁量を求めた。その他については家庭排水の場合と同様の考えをとっている。 |
| 河川放流汚濁量 SPL と浄化処理コスト COST2 | $SPL.K = (SPOH.K + SPOI.K) \cdot 0.9$ $WE.K < 10^6$ $SPL.K = (SPOH.K + SPOI.K) \cdot 0.8$ $WE.K \geq 10^6$ $SPLI.K = SPL.K / 43\ 401\ 915$ $COST\ 2.K = 1.5 \cdot SPL\ 1.K - 3.0$ $SPL\ 1.K \geq 2$ $COST\ 2.K = 0$: $SPL\ 1.K < 2$ | SPL: 河川放流汚濁量 (g/日) SPL1: 補助変数 COST2: 浄化処理コスト (円/m ³) | 生活排水および工業排水の放流汚濁量は河川に流入した後、河川の自浄作用をうけて幾分減少する。もちろん、その減少割合は流量が大きいほど大きいわけで、先に求めた環境水量がこれに作用する。43 401 915 (m ³ /日)は河川便覧からとった近畿の河川全体の平均低水量である。なお、浄化処理コストとBODの関係には適当な資料がなかったため、多摩川の玉川浄水場でのデータ ²⁰⁾ を参照に関係式を求めた。 |
| 環境基準 ED と過剰汚濁量 SE | $ED.K = 13.02 \cdot 10^7$ (3 ppmに相当) あるいは $86.8 \cdot 10^7$ (20 ppmに相当) $SE.K = \max(SPL.K - ED.K, 0)$ | ED: 環境基準あるいは水質基準 (g/日) SE: 過剰汚濁量 (g/日) | EDの値は近畿の河川全体の低水流量に環境基準BOD濃度(厳しい場合を3 ppmで、緩い場合を20 ppmで代表)を乗じて求めたものである。河川に放流された汚濁量が環境基準汚濁量を上回っているとき、その差を過剰汚濁量と定義し、河川の汚濁の程度を判断するとともに、処理効率増への要請として用いる。 |

| | レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|----------------|--------------|--|---|--|
| 水質汚濁 サブシステム | 下水道普及率 SL | $SR, JK = C18 - SL, J - LEV, 3, J$ $LEV, 3, K = LEV, 3, J + DT \cdot (SR, JK - LEV, 3, J / (0.5 \cdot DEL))$ $SDR, JK = DELAY, 2(SR, JK, DEL)$ $SL, K = SL, J + DT \cdot SDR, JK$ | SL: 下水道普及率 (DID 人口に対して%) LEV 3: 現在事業実施中でまだ完成していない下水道容量 (%) SDR: 下水道普及率増加レイト (%) DELAY 2: 二次指数遅れ DEL: 遅れ定数 (年) C18: 0.9 | 下水道普及率は目標とする下水道普及率から既設普及率および現在事業実施中で、まだ完成していない普及率を差し引いたものに向けられる。そして下水道建設は年数を要する事業であるので、当然建設の遅れがある。なお、目標とする下水道普及率には第三次下水道財政研究委員会の提言などを参考に DID 人口に対して 90% を仮定している。 |

改善の方向: 工業汚濁量の算定において、大和川流域負荷量原単位の予測値を近畿圏全体に代用することはやや問題がある。また、この部分はより厳密には、業種別工業汚濁原単位とその出荷額との積の和で、工業汚濁量を評価すべきである。BOD 値は近畿圏全体の平均値ということであるが、実際には、河川流量の変動、各河川の流量とその河川での排水量との間で、これらの算出をして、たとえば、流域面積で除すとかの手順をふむべきである。し尿処理と下水処理、家庭排水処理と工業排水処理、これらの合成処理および分離処理の実態を考慮していく必要がある。本モデルでは分離処理を望ましい処理法として採用しているが、

表-7 工業出荷額のシステム方程式

| | レベル名 | レベル方程式およびレイト方程式 | 記号の説明 | 備考 |
|------------|--------------|--|--|--|
| 工業出荷額の変化構造 | 工業出荷額 WIL | $WIL, K = WIL, J + DT \cdot WIR, JK$ $WIRX, JK = \min((AIL, J \cdot WIL, J / AIL, J) \cdot WU, J - WIL, J, WIL, J \cdot SL, J / SL, J \cdot X1 - WIL, J)$ $WIR, JK = \min(WIRX, JK, WIL, J \cdot WCS, J / WCS, J \cdot X2 - WIL, J)$ $X1 = 1 : SPOI, J / ED, J \geq 1$ $X1 = \infty : SPOI, J / ED, J < 1$ $X2 = 1 : WC, J \geq 10^6$ $X2 = \infty : WC, J < 10^6$ | WIL: 工業出荷額 (百万円) WIRX: 補助変数 WIR: 工業出荷額変化レイト (百万円) WU: 技術レベル向上にともなう土地原単位割増係数 | WU は単位面積当り出荷額の増加を示す係数で、技術レベルの上昇を意味している。これには昭和 40~45 年の平均値 1.113 と昭和 46 年以降は昭和 46 年値にほぼ等しい、やや鈍化した値 1.05 を与えた。なお冷却水不足がどの程度になると、工業出荷額増を抑制するかという問題は難しいが、大よその目安として、毎秒 1 m ³ を想定した。 |

改善の方向: 工業出荷額変化レイトが、これらの因子によって影響を受ける程度がもっとも問題となる。すなわち、これらの抑制が直接、工業出荷額増に影響を及ぼすかである。実績値の増減を十分検討し、より実際のな内生化をはかっていく必要がある。どうしても困難とならば工業成長率といった、いわゆる外生変数的取扱が必要になってこようが、それでは水資源そのものが、従来とあまりかわらない評価づけに甘んじなければならないことになる。

(8) トータルシステム

以上、各サブシステムの構造をシステム方程式で構成したが、これらサブシステムを結ぶもっとも重要なレイトは工業出荷額変化レイトである。これには以下のような 3 つの値を求め、そのうち最小のもので意志決定した。すなわち、1 番目は事業所敷地面積に対する出荷額で、土地原単位をもとにして求めるが、土地原単位も技術レベルの向上で変化する。2 番目は水質汚濁による出荷額へのフィードバックで、特に昭和 50 年以降は水質基準許容汚濁量を工業の河川放流汚濁量が上回ると制約として働き、出荷額は下水道普及率の伸び以上には伸びなくなるとする。3 番目は冷却用水の不足が生じると制約として効いてくるもので、冷却用水供給量ののび以上には伸びなくなると考える。このことは、工業用水で出荷額増と関連して伸びてくる用途は冷却用であり、また冷却用の他の用途と違い、回収や海水の利用が可能であるので、新規水源の確保が他の用途に比べて容易である。つまり出荷額と結びつきが強く、しかも新規利水に柔軟性のある冷却用水を重視したわけである。

したがって、工業出荷額のレベル方程式およびレイト方程式は表-7 で与えられる。

以上、述べてきたサブシステムを一つにまとめたものがトータルシステムになるわけで、フローダイアグラムで示すと図-4 のようになる。なお、定数の記入は図をはん雑にするので省いている。図中で種々の流れをつなぎあわせて閉回路を構成しているものが SD でいうインフォメーション・フィードバック・ループであり、重要なものを図の下に列挙しておく。

5. シミュレーション結果の考察および水需給構造の将来の展望

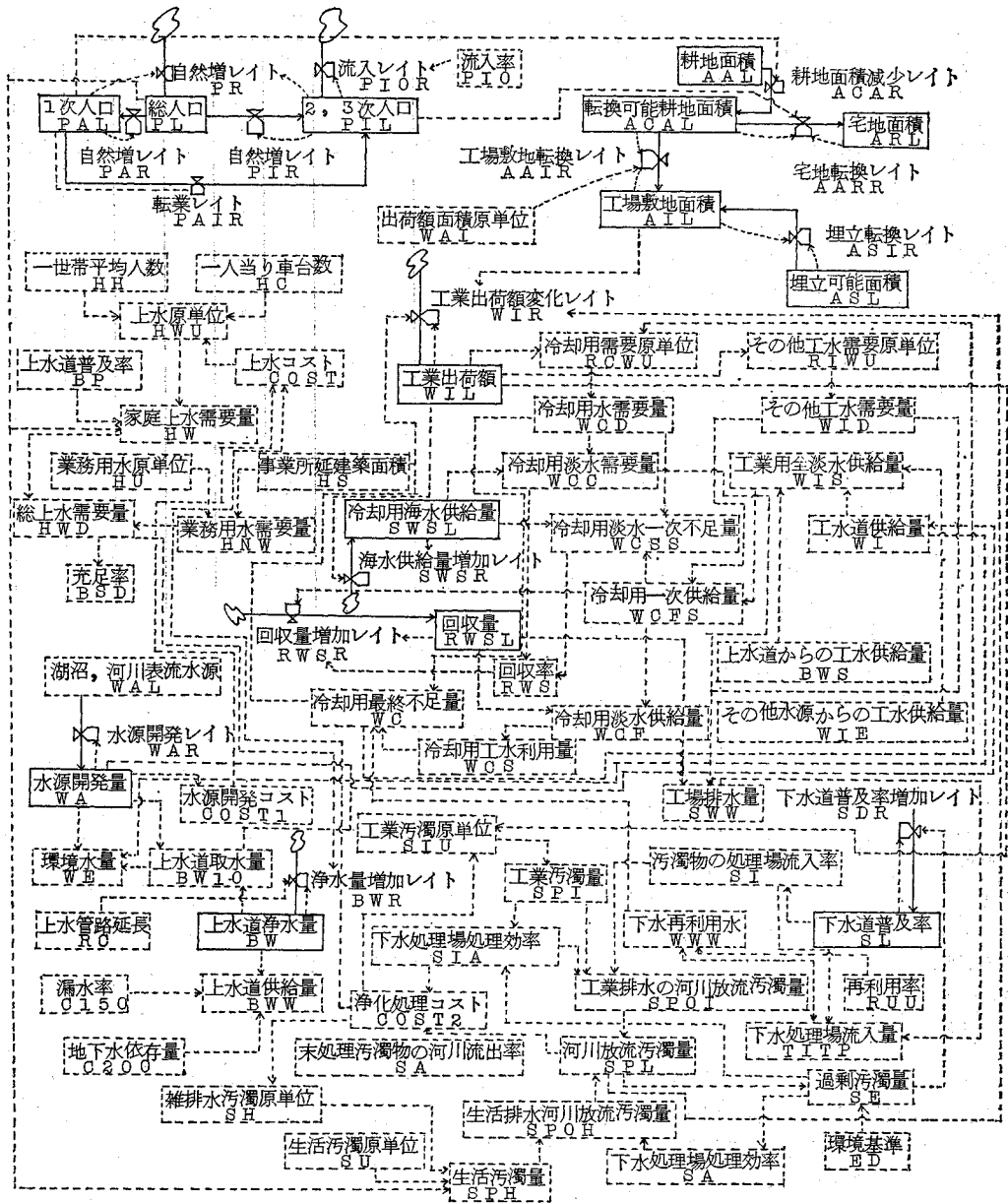
(1) 政策変数

まず、シミュレーションに際して与えてやるべき政策変数をまとめて記しておく。

a) 水源開発の進捗度 (DWS)

ダム適地の枯渇、補償問題などに伴い水源開発は遅れ、そのコストも上昇している。ここではこれらの効果を水源開発遅れ定数 DWS に集約させ、未開発可能量 C 100 を 30, 50, 100 年の年月を要して開発すると考えた。

b) 下水道普及の進捗度 (DEL)



記号の説明：□ レベル, [] 情報, ⊗ レイト, — フローの通路, - - - 情報の通路

- 1) 上水原単位 → 上水需要 → 下水道普及率・処理効率 → 浄化処理コスト
 ↓ 節水率
 供給促進 → 水源開発コスト → 上水コスト
- 2) 工業出荷額 → 工業汚濁原単位 → 工業汚濁量 → 河川放流汚濁量 → 浄化処理コスト
 ↓ 排出規制
 ↓ 水質基準との比較
 下水道普及率・処理効率 → 過剰汚濁量
- 3) 工業出荷額 → 冷却用原単位 → 冷却用需要量 → 下水処理水再利用
 ↓ 海水利用促進
 ↓ 回収努力 → 最終不足量
- 4) 工業出荷額 → 土地原単位 → 工場敷地面積

図-4 水需給構造のSDモデル

下水道普及も緊急を要する問題であるが、現実には困難をきわめている。この進捗度を下水道普及率遅れ定数 DEL で表現し、目標普及率 C 18 に達するのに 30, 50, 100 年を要するとしている。

c) 上水管敷設の進捗度 (C 13)

過去のデータは 2000 km/年の上水管路延長を示しているが、47 年はその延長距離が短くなっている。ここでは今後とも 2000 km/年で伸ばすべき、今後は 1000 km/年で伸びていく、の 2 ケースを考え、上水供給をはかっている。

d) 環境基準あるいは水質基準 (ED)

公共用水域の水質悪化は種々の被害をもたらしているが、ここでは BOD 指標で代表させ、46 年以前は 20 ppm, 47 年以降は厳しく 3 ppm にする場合と、緩い 20 ppm の両者を考えた。

e) 再利用率 (RUU)

下水処理場からの再利用水は今後の処理技術の向上に伴い、慢性的な水不足の対症療法的な手段として脚光をあびているが、現実には抵抗感も強い。ここでは今後とも再利用は行われぬ、段階的に再利用が進められる (50~55 年:10%, 55 年以降:20%) の 2 ケースを考える。

f) 漏水率 (C 150)

多額の投資をして開発された水も、取水・浄水・配水システムの過程で漏水する。水の合理的利用を考える以上、漏水防止策は必要であるが、完全には防止できないであろう。ここでは今後とも 20% の漏水はある、防止策を講じて段階的に漏水率を減らす (50~55 年:15%, 55 年以降:10%) の 2 ケースを考えている。

g) 企業努力・行政指導による汚濁原単位の減少 (SIU)

企業の種類、規模などによって汚濁原単位は多種多様であるが、公共用水域の水質汚濁の根源といわれている以上、何らかの形で汚濁原単位の減少をはからなければならない。ここでは今後とも汚濁原単位は減少しない、46 年以降は企業努力、行政指導などにより原単位を厳しく減らす (年減少割合 8.14 g/年)、緩いが減らす (年減少割合 4.0 g/年) の 3 ケースを考えた。

h) 企業努力による用水原単位の減少 (RCWU)

冷却・温調用水に限り、不足量が 10 万 m³/日以上になると企業努力によって用水原単位が 10% 減ると考えた。

i) 上水コストによる上水原単位、汚濁原単位の減少 (D 1, D 3, D 4, B 6)

企業が海水利用、回収率の向上、下水処理水の再利用などによって用水需要をまかなう一方、汚濁原単位も減らす努力をしている以上、上水需要者も何らかの形で水不足、水質汚濁に対処しなければならない。ここでは水

表-8 シミュレーション No. (政策変数の組合せ)

| シミュレーション No. | 水源開発 | 下水道普及 | 上水管路延長 | 水質基準 | 再利用 | 漏水防止 | 工原水単汚濁減 | 工水原単位減 | 上効水コスト果 |
|--------------|------|-------|--------|------|-----|------|---------|--------|---------|
| 1 | 遅 | 遅 | 遅 | 厳 | × | × | × | × | × |
| 2 | 遅 | 遅 | 遅 | 緩 | × | × | × | × | × |
| 3 | 遅 | 急 | 遅 | 緩 | × | × | × | × | × |
| 4 | 遅 | 急 | 急 | 緩 | × | × | × | × | × |
| 5 | 遅 | 急 | 遅 | 厳 | × | × | × | × | × |
| 6 | 急 | 急 | 急 | 厳 | × | × | × | × | × |
| 7 | 遅 | 遅 | 遅 | 緩 | ○ | ○ | 厳 | ○ | ○ |
| 8 | 遅 | 遅 | 遅 | 厳 | ○ | ○ | 厳 | ○ | ○ |
| 9 | 急 | 急 | 急 | 厳 | ○ | ○ | 厳 | ○ | ○ |
| 10 | 遅 | 遅 | 遅 | 厳 | ○ | ○ | 緩 | ○ | ○ |
| 11 | 遅 | 遅 | 遅 | 厳 | ○ | ○ | 厳 | ○ | ○ |
| 12 | 急 | 急 | 急 | 緩 | ○ | ○ | 緩 | ○ | ○ |
| 13 | 早 | 早 | 早 | 厳 | × | × | × | × | × |
| 14 | 早 | 早 | 早 | 緩 | × | × | × | × | × |
| 15 | 早 | 早 | 早 | 厳 | × | × | × | × | × |
| 16 | 早 | 早 | 早 | ○ | ○ | ○ | 厳 | ○ | ○ |
| 17 | 早 | 早 | 早 | ○ | ○ | ○ | 緩 | ○ | ○ |
| 18 | 早 | 早 | 早 | ○ | ○ | ○ | 緩 | ○ | × |
| 19 | 早 | 早 | 早 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

注) 遅: 建設年数 100 年 早: 同 50 急: 同 30 厳: 厳しい基準・規制
緩: 緩い基準・規制 ○: 採用 ×: 不採用

源開発コスト、浄化処理コストなどに伴う上水コストの上昇により需要者が原単位を減らす努力をする、しないの両者を考えてシミュレートした。

以上の政策変数を組み合わせれば、非常に多くのシミュレーション・ランが可能であるが、本研究では特徴的な水需給構造の将来をさぐる意味で、表-8 に示す 19 通りのシミュレーション・ランに限定して考察した。

(2) モデルの実証

次にシミュレーション・ランにあたっては、各レベルおよび補助変数の初期値を与えなければならない。モデルの構成上、初年度の昭和 40 年のみの値と、昭和 39 年と 40 年の両年の値を必要とするものがあり、これらの値を一括して表-9 に示す。

このように初期値が与えられ、シミュレーションの単位時間 DT が 1 年にとられると、4. で構成した SD モデルによって、各レベルの値が 1 年ごとにシミュレートされる。この場合、シミュレーション結果が少なくともデータの存在する期間で実測値と合致するように SD モデルの構造および定数を修正し、モデルそのもの実証をはかる必要がある。本モデルでは昭和 40~46 年をこの実証期間とし、この期間モデルの改善をはかり、すでに 4. で述べたシステム方程式および各定数を採用したわけである。

図-5, 6 は代表的なレベルについて、40~46 年を training 期間、47~50 年を checking 期間とみなして、シミュレーション結果と実績値を比較したものである。

表-9 シミュレーションに用いた初期値

| 変数名 | 記号 | 単位 | 初期値 |
|------------------|------|-------------------|-------------|
| 人口 | PD | 人 | 10 109 769 |
| 1次産業就業人口 | PAL | 人 | 943 449 |
| 上水道普及率 | BP | % | 71.4 |
| 上水の工水供給割合 | BIP | % | 13.0 |
| 総上水需要量 | HWD | m ³ /日 | 2 760 652 |
| 管路延長 | RC | m | 17 248 000 |
| その他の水源からの工業用水供給量 | WIE | m ³ /日 | 2 873 000 |
| 工場敷地面積 | AIL | ha | 13 998 |
| 工業出荷額 | WIL | 百万円 | 6 933 996 |
| 冷却用水利用量(淡+海) | WCS | m ³ /日 | 6 640 842 |
| 家庭雑排水 BOD 負荷 | SH | g/人日 | 13.4 |
| 生活汚濁量 | SPH | g/日 | 404 400 000 |
| 下水道普及率 | SL | % | 17.9 |
| 家庭排水下水処理効率 | SA | % | 73.0 |
| 工業汚濁量 | SPI | g/日 | 781 461 000 |
| 人口 | PL | 人 | 15 776 266 |
| 1次産業就業人口 | PAL | 人 | 909 862 |
| 2,3次産業就業人口 | PIL | 人 | 6 737 565 |
| 宅地面積 | ARL | ha | 82 100 |
| 耕地面積 | AAL | ha | 378 500 |
| 工場敷地面積 | AIL | ha | 13 854 |
| 埋立可能面積 | ASL | ha | 3 547 |
| 転換可能面積 | ACAL | ha | 4 300 |
| 工業出荷額 | WIL | 百万円 | 7 236 007 |
| 冷却用水需要量(淡+海) | WCD | m ³ /日 | 7 820 881 |
| その他工水需要量 | WID | m ³ /日 | 3 223 618 |
| 工業用水道供給量 | WI | m ³ /日 | 1 183 775 |
| 上水道からの工水供給量 | BWS | m ³ /日 | 471 959 |
| 冷却用海水供給量 | SWSL | m ³ /日 | 3 506 812 |
| 回収水利用量 | RWSL | m ³ /日 | 2 717 057 |
| 上水道供給量 | BWW | m ³ /日 | 2 724 032 |
| 浄水場受水量 | BW | m ³ /日 | 2 969 208 |
| 既水源開発量 | WA | m ³ /日 | 3 794 183 |
| 下水道普及率 | SL | % | 19.7 |
| 1人当り車台数 | HC | 台/人 | 0.0259 |
| 1世帯平均人数 | HH | 人/世帯 | 3.824 |

training 期間についていえば、両者はほぼ合致している。実際には近畿圏といえども、その内部では各レベルともかなり地域分布性を有しているが、モデルでは平均操作をしている。また、システム方程式を構成する各パラメーターの決定に際しては必然的に回帰誤差が伴っており、これら平均操作に伴う誤差および回帰

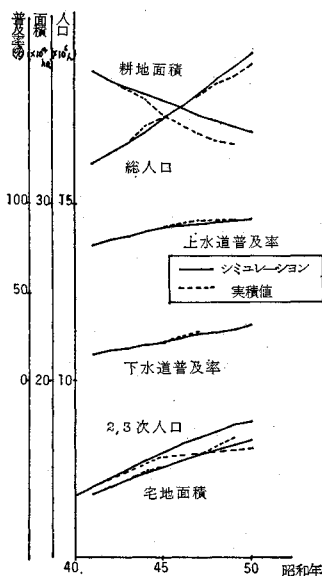


図-5 モデルの実証例

誤差などを考えると、training 期間での実証性は十分高いと判断できる。一方、checking 期間においては傾向特性は再現しているが、絶対値評価でみると、シミュレーション結果と実績値の乖離の大きいレベルがいくつか見受けられる。特に工業出荷額ののびは鈍化しておらず、世にいう安定成長、環境破壊に対する抑制、これらの効果をモデルで強調したきらいがあるし、工業出荷額の水需給構造による内生化には、現時点ではまだ問題があるようである。

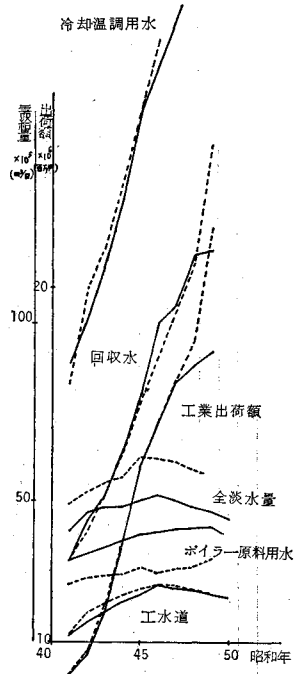


図-6 モデルの実証例

しかし、複雑な水需給構造とその挙動をマクロ的に把握・予測するという立場、量・質・コストからくるフィードバック機構の導入はいままではあまり効かなかったが、今後 50 年以降は効いてくるであろうし、効かすべきであるという立場、システム方程式構成の際介入してくる誤差の是認、これらの立場をとるならば、本モデルによるシミュレーション結果の分析は、今後の水需給構造を展望するうえで大いに意義あるものと考えられる。

なお、以下のシミュレーションの中で重要な役割を占める工業出荷額については、卸売物価指数を用いて 45 年価格に換算した実質額を採用している。また、シミュレーションは昭和 70 年までとしている。70 年以降の遠い将来の経済活動、技術革新などの予測にはいままでも以上に多くの不確実性が介在しており、本研究で展開したシステム方程式の構成および内容の信ぴょう性がさらに問題になると考えたからである。

(3) シミュレーション結果

19 通りのシミュレーション結果が各レベルについて得られるが、紙面の都合上、特徴的なシミュレーションとして No. 1 と No. 9 のみの結果を図-7, 8 に示し、他のシミュレーション結果とあわせた考察は 5. (4) で述べる。ここに No. 1 は水源開発、下水道普及、上水管路延長とも遅々として進まず、しかも企業や個人も水原単位、汚濁原単位を減らす努力をしない場合のシミュレーション・ランで、水質基準は 46 年以降 3 ppm に

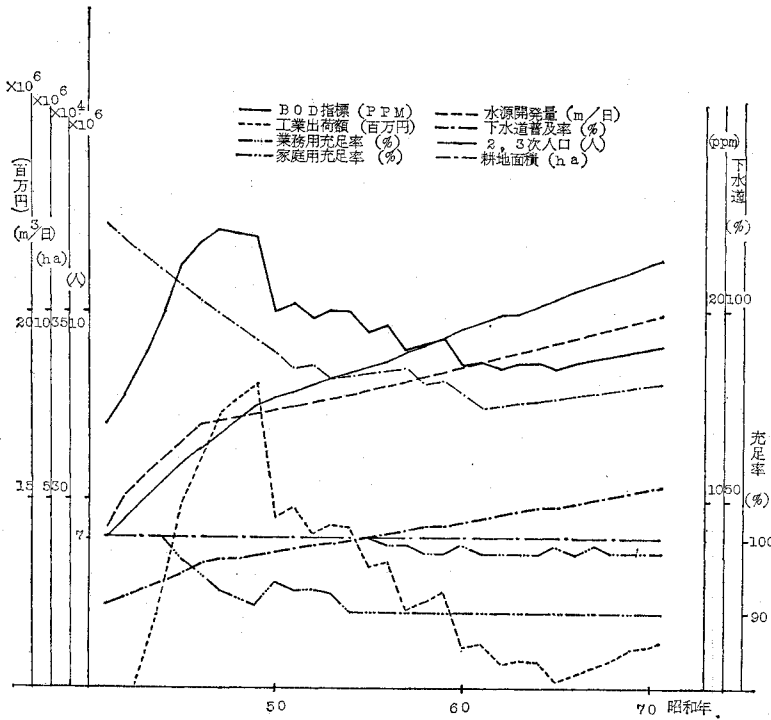


図-7 シミュレーション結果の一例 (No. 1)

おさえてある。また、No. 9は水源開発、下水道普及、上水管路延長とも46年までの状況と同様、順調に進捗し、しかも再利用、漏水防止がはかられ、用水原単位・汚濁原単位を減らす努力も払われる場合で、もちろん水質基準は厳しく3ppmにおさえている。

(4) 結果に対する考察

他のシミュレーション結果ともあわせ、工業出荷額、充足率、BOD指標の変化を中心に考察する。

a) 工業出荷額

水源開発の速度がかなり出荷額パターンに影響を及ぼしている。すなわち、遅々として進まない出荷額は50年以降で減し、その減は60年半ばまで続き、その後は徐々に増加する。水源が昭和70年くらい

で開発し尽くされる、いわゆる開発が急ピッチで進められる場合には、49年に若干の落込みはあるが、50年代は急上昇し、60年代に入ると全体的に増加して増減の振幅が激しい不安定成長を呈している。両者の中間の開発速度で開発し尽くされる場合には、50年以降上昇し、しかもその上昇傾向はその後も続き、比較的安定した成長を示している。

環境基準あるいは水質基準も工業出荷額に影響を及ぼしている。すなわち、水質基準が厳しいと出荷額レイトにフィードバックする傾向が強く、緩いと規制が働かない。したがって他の条件が同一であれば、水質基準の緩い方が工業出荷額の増加に寄与しているが、環境の悪化を代償にしての出荷額増であることはまぬがれない。

そのほか、漏水防止、再利用、企業努力による用水・汚濁原単位の減少、コスト作用による用水原単位減少も用水不足、水質汚濁を緩和させることを通じて、出荷額増に寄与している。ただ、これらの寄与率は水源開発、水質基準に比べると小さい。

また、下水道普及率は上限に達してしまうと水質規制の厳しさともあいまって、出荷額を停

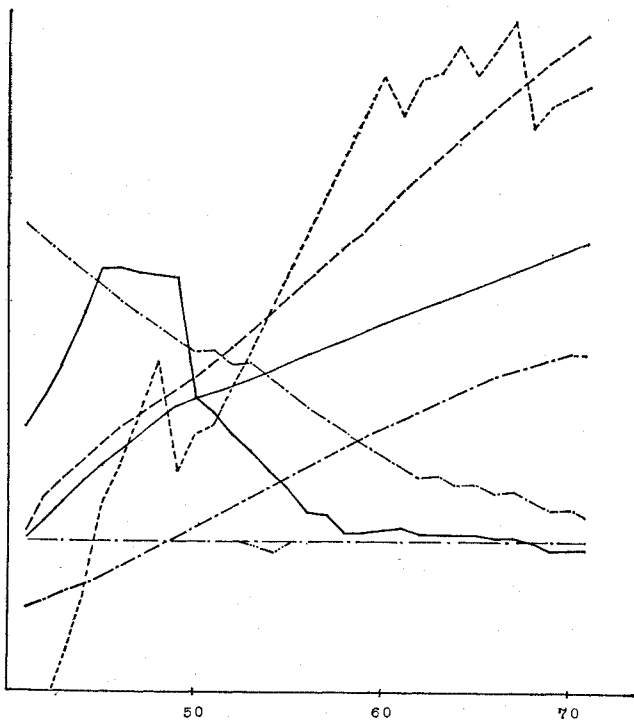


図-8 シミュレーション結果の一例 (No. 9)

滞させている。

b) 充足率

全期間、業務用・家庭用とも充足されるのは No. 9, 16, 18, 19 の4ケースであり、水源開発および下水道普及が少なくとも30年あるいは50年のピッチで、また上水管路延長もそれに相応して進められることが必要である。しかし、こうした施設の建設だけでは両者の充足は難しく、厳しい水質基準、漏水防止、再利用の促進、企業の用水・汚濁原単位減少、コスト作用による用水原単位減少、などの補完があってはじめて可能である。ちなみに水源開発が急ピッチであっても、水質規制が甘いと工業出荷額の急激な増加をまねき、業務用需要を増大させ、最終的には節水を余儀なくされている。また、水源開発が遅々として進まない場合には家庭用にまで節水を課しているが、漏水防止、再利用の促進、企業努力およびコスト効果の採用は家庭用だけは充足させている。しかも、これらの規制・努力は節水率を緩和させる方向に作用している。

c) BOD 指標

いずれのシミュレーション結果も3ppmを下回ることにはなかったが、いくつかの変化を示している。BOD指標の変化には下水道普及率、水質基準および企業努力・行政指導による排出規制が大きく影響している。水源開発も環境用水を生み出すほど開発されると自浄効果を発揮するが、一方では工業出荷額を増加させることから汚濁物を多量に河川に放出する負の効果ももっている。もちろん、これらが有機的に組み合わせられると、BOD指標はもっとも好転し、10ppmを下回る。

水質基準の厳しいことが出荷額へのはねかえりを通じてBOD指標を低く抑えるようであり、下水道普及は処理効率に、排出規制は汚濁原単位減に、水源開発は環境用水の自浄効果にそれぞれ作用してBOD指標の低下に寄与しており、その寄与率は水質基準がもっとも大きいように思われる。しかし、下水道普及、排出規制の効果もあるので、従前以上に努力をしなければならない。ちなみに排出規制をやや緩和すると、50年代、60年代のBOD低減を緩めることになっているし、さらにこれら4条件が最悪に組み合わせられると、たえず20ppmを越える事態も招きかねない。

(5) 今後の水需給構造の改善方向

以上のシミュレーション結果にあらわれた動向をふまえるならば、以下のような水需給構造の改善方向が描けよう。

すなわち、単独の政策手段によっては、1) 産業の生産・管理環境の拡大、2) 工業出荷額の長期的かつ安定的成長、3) 家庭・業務用水の充足、4) 公共用水域の水

質指標の改善、これらすべてを満たすことはできない。個々の手段はそれなりに個々の目的を達成するように貢献はするが、決して究極的な解決策とはならない。本モデルで考察した限りでは、究極的な解決策とはいえないまでも、水源開発・下水道普及および上水管路延長にみられる諸施設の建設をすみやかに進めるとともに、水質基準を厳しく敷き、漏水防止、下水の再利用、企業努力・行政指導による用水・汚濁原単位の減少、上水コストによる用水原単位の減少、これらすべてを組み合わせることが現時点で講じるべき水需給政策の基本であろうと思われる。

ただ5.(4)でも考察したように、水源開発を急ピッチにし、水質基準を緩くしても出荷額の上昇は期待されるが、50年、60年代で上昇し尽し、それ以降の増加が鈍化したり、水質指標そのものが悪化したりする。また、これら諸施設の進捗度は早い方が遅いよりもいいが、これらのいずれかが早かったり遅かったりでは施設間の有機的な連係が保持されず、かえって悪い結果をもたらしかねないので、これらの点を考慮しながら施設建設を進めていかなければならない。

なお、下水の再利用が叫ばれているが、本モデルでは工業用水を対象とし、その再利用率も20%にとどめているのでその効果は顕著に現われていない。今後は水洗便所用水・洗車用水などに家庭下水処理後の中質水を配水することも考えられ、量的には多くなるだろうが、一方では2元配水による多額の投資、嫌悪感、再利用水が工業出荷額を通じて循環的に汚濁排水源になること、などを考えると問題点も多い。

また、企業努力・行政指導による汚濁原単位の減少は今後とも厳重にはかられるべきであり、上水原単位の減少も企業の回収努力、用水原単位減少努力を考えるならば、上水コストで強制しなくても浪費をいましめるべきである。ここでは上水コストによる用水原単位の減少効果を考えており、モデルに導入した定数はかなり概念的なものではあるが、その効果が水需給構造に少なからず作用している。このことは施設群によるハード効果はもちろん、こうしたソフト効果も水需給構造に作用させていかなければならないことを意味していよう。

最後に、ソフト効果でも水質基準の設定は大きな効果を及ぼしている。出荷額の急激な上昇を環境悪化を代償にしてうよりは、両者の調和した発展を確保する意味でも水質基準は厳しくされるよう万全を尽すべきである。

6. あとがき

本研究は水需給構造を一つの社会システムとしてとら

え、その階層的構造の把握・予測にシステム・ダイナミクスを適用したものである。すなわち、水需給構造を人口、土地、上水需給、工水需給、水源開発、排水汚濁・処理構造の各サブシステムに分解し、フィードバック機構を考慮したシステム方程式を組み立て、いくつかの政策変数を組み合わせたシミュレーションを行うことによって、水を中心とした社会構造の将来を探ったものである。以下、本研究で得られた成果を要約すると次のようである。

(1) 工業用水とくに冷却・温調用水の供給は将来ますます回収水、海水に依存する傾向を示し、工水道、上水余剰水、その他水源などによる淡水供給量はボイラー、原料、洗浄・処理水をまかなうにすぎない。したがって、回収水、海水の利用・拡大がなければ工水不足をまねき、工業出荷額の停滞さらには減少をまねこう。

(2) 工業成長が続くかぎり、1次産業就業人口は減少し、それが2・3次産業就業人口を増加させるとともに、耕地面積の減少を通じて宅地面積、事業所敷地面積の増加をもたらす。だが、工業成長が停滞気味になると、企業の技術レベルの向上で単位面積あたりの工業出荷額は増加するものの、事業所敷地の確保が停滞気味になり、再び工業出荷額の増加が抑制される。

(3) 水源開発の進捗度は工業出荷額の増加に大きな影響をもたらすが、安定した成長を継続させるためには急ピッチでありさえすればよいというものではなく、下水道普及、上水管路の建設と関連させて開発すべきであり、しかも厳しい水質基準の設定が आवश्यकである。

(4) 工業出荷額の増加、上水需要の充足、水質指標の改善をあわせはかるためには、水源開発・下水道・上水管路延長といったハードな施設群のすみやかな建設はもとより、厳しい水質基準、漏水防止、下水再利用、企業努力・行政指導による用水・汚濁原単位の減少、上水コストによる用水・汚濁原単位の減少といったどちらかといえばソフトな面での努力も必要である。

そのほか、いくつかの成果が得られたが、結局、健全な水需給の発展をはかるには、個々の政策変数がシステム全体に及ぼす影響を十分に認識した上で、それらのシステム内における有機的な関連性を追求することによって、はじめて最適な政策が生み出されるといえる。こうした意味で、本モデルでの政策提言として、

(5) 回収努力、海水利用の促進はもとより、水源開発、下水道普及、上水管路延長にみられる諸施設の有機的関連のもとでの建設促進、厳しい水質基準、漏水防止、下水の再利用、企業努力・行政指導による用水・汚濁原単位の減少、上水コストによる用水・汚濁原単位の減少、これらすべてを組み合わせた政策手段を講じるこ

とが、工業成長の安定的かつ長期的な発展の維持、工水不足の緩和、上水の充足 100%、水質指標の 10 ppm 以下への改善、これらすべてを満たしてくれよう。もちろん、低成長、節水、環境悪化をある程度許すならば、これらすべての厳しい組合せは幾分緩和されよう。

なお、今後の検討課題としては、

(1) システムをコントロールするレイトやフィードバックループに関してさらに研究し、システムの改善に努力することにより精度の向上をめざす。改善の方向については表1~7中に一部併記している。

(2) 水資源のクローズドシステム化を追求する一つの方法論を展開することに重点をおいたので、大胆な仮定やマクロ的な計算法を用いたが、それらに対する妥当性の検討を行う必要がある。Training data, Checking data との比較・考証を通じて一部検討しているが、データの蓄積ともあいまって、今後とも検討していきたい。

(3) 近畿圏をさらに地域分割し、地域内部およびそれら地域間相互の水需給構造についても議論を進展させたい。

最後に、本研究を進めるにあたり、資料収集、モデル構成、計算の実行など多大の助力をいただいた大林組園淳生氏ならびに国鉄 藤岡繁樹氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省河川局：広域利水調査第二次報告書，昭 48.8.
- 2) Forrester, J.W. 著，小玉陽一訳：ワールド・ダイナミクス，日本経営出版会，1972.
- 3) 小玉陽一・内海武士・合田周平ら：システム・ダイナミクス，共立出版，pp. 200~323，昭 48.6.
- 4) 高棹琢馬・池淵周一・園 淳生：水の水需給構造とその変化過程に関する研究，土木学会第 29 回年講，II-83，昭 49.10.
- 5) 高棹琢馬・池淵周一・藤岡繁樹：近畿圏の水需給構造とその変化過程に関する研究，土木学会第 30 回年講，II-109，昭 50.10.
- 6) Okada, N. and K. Yoshikawa: System Dynamics Approach to the Water Resource Management Related to the Regional Development, Pacific Regional Conference, 1975.
- 7) 渡辺一司・坂倉省吾：インダストリアル・ダイナミクス，東洋経済新報社，昭 40.3.
- 8) 前出 3)，pp. 697~699.
- 9) 近畿地建企画課 および 建設技術研究所：水利用システムに関する調査業務報告書，pp. 50~61，昭 49.3.
- 10) 前出 9)，pp. 32~49.
- 11) 前出 1)，pp. 78~80.
- 12) 近畿地建：淀川流域の都市開発と河川汚濁，昭 46.3.
- 13) 近畿地建大和川工事事務所：大和川流域環境容量からみた土地利用計画報告書，昭 49.3.
- 14) その他資料として
日本統計年鑑：総理府統計局編，日本統計協会，毎日新聞社。
- 15) 民力：朝日新聞社編。
- 16) 工業統計表，用地・用水編：昭和 40 年度版~46 年度版。
- 17) 公共下水道統計，昭和 40 年度~46 年度版。