

京都大学工学部 正 員 高 棹 琢 馬
 京都大学工学部 正 員 〇 池 淵 周 一
 大 林 組 正 員 園 淳 生

① はしごき 将来ますます増加していくことが予想される水需要に対応していくためには、一方では水資源の開発を進め、他方においては排水量の増加にともなう河川の水質汚濁を断ち切るという、質・量両面にわたるバランスのとれた調和のある水資源計画が必要となってくる。本研究ではこういった側面を重視し、特に問題となる工業用水のフローを中心として構成されるシステムを考え、システム・ダイナミックスの手法を用いることによっていくつかの政策変数を組み込んだモデルを作成した。そして、各種の場合を想定したシミュレーションを行なうことによって、将来の水供給構造を解明し、かつその動向を探り、そうした計画策定に際し必要となるいくつかの指針を与えようとするものである。

② システムの目的と範囲 その対象を、水資源問題を考えるうえで将来ともに特に問題となる工業用水のフローに限定し、それを中心として構成されるシステムを考え、水量の側面からは工業用水の供給源として重要性をもつと考えられる工業用水道の開発を、水質の側面からは河川の水質汚濁防止のカナメとなる下水道の整備を柱として、システム・ダイナミックスの手法を用い、いくつかの政策変数ともいえる外生変数を組み込んだモデル展開をおこなう。システムの目的は、それらの外生変数の変化にともなう水の供給構造や河川の汚濁状況、およびその変化過程に及ぼす影響を定量的に求め、その結果必要な工業生産を可能にし、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窺い出すことにある。もちろん、河川の汚濁といった複雑な現象を全て包含することは不可能であるので、ここではその代表的な指標と考えられる BOD 濃度のみを水質対象としており、解析の空間的・時間的スケールも資料の関係・システムの挙動を勘案して全国規模・年単位で考察している。

③ システム・ダイナミックスとその基本概念 上のような問題、いわば時間とともに変動する要因を考慮して意志決定する問題を解く一つの手法としてシステム・ダイナミックス(S.D)がある。S.Dはフィードバック・ダイナミックスを取り扱おう一群の理論と定義され、1)時間の流れを入れたダイナミックなとらえ方を、2)システムにおける関連部門の間の相関を有機的に表現する、3)システムがもつ動特性およびその影響をはっきりと見ることができ、などの特徴をもっており、その基本的な構造は1)システム内のフローの集積であるレベル(記号で□)、2)あるレベルの内容を他のレベルへ運ぶフロー(フローの通路は—で表わす)、3)レベル内のフローの大きさ(レイト)を決める意志決定機構(バルブの形○X)で表わす、4)意志決定機構とレベルを結ぶ情報の通路(…で表わす)、の4つのファクターからなっている。なお、計算の方法は時間の流れJ、K、Lにしたがって、解答時間DTごとに計算され、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し、レイト方程式は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のレイトを決める。

④ 水利用問題のシステム・ダイナミックスモデル モデルの作成にあたっては、本研究の主旨を十分に反映させるため、水供給部分・水需要部分・河川の汚濁過程に関する部分の3つのサブシステムを柱として、つぎの7つのレベルを導入した。①利用可能な開発水量(ADW)、②工業用水道による供給量(IWC)、③工業出荷額(IIP)、④上水道用水供給量(SU)、⑤下水道普及率(CSA)、⑥工場廃水の下水道流入率(TIR)、⑦下水の再利用による供給量(RUWI)。これらのレベルにはそのフローを決定するレイトが作用し、またフローが通

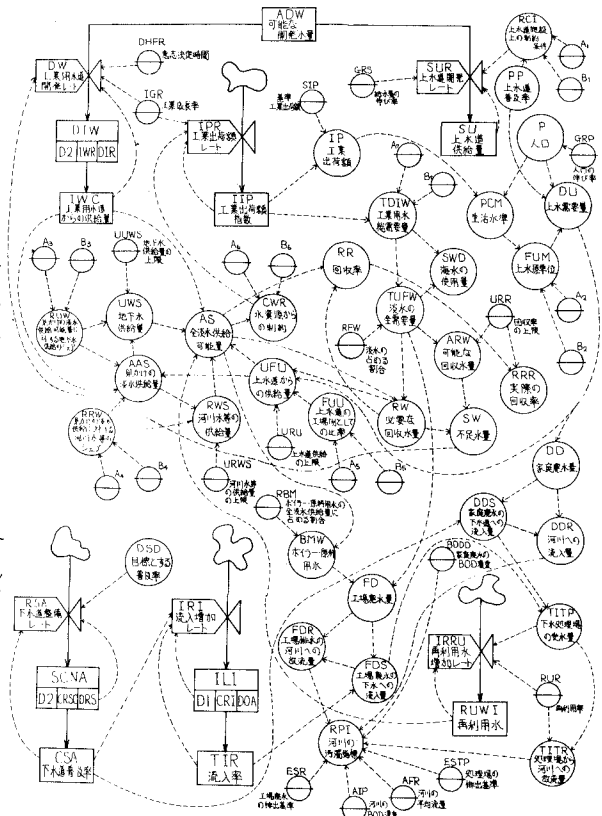
路を流れるときの遅れ,つまり意志決定から計画完成までの時間遅れと,1次・2次指標遅れなどで示される応答のパターンについても考慮する。下図は上記のレベルを組み込んで完成したトータルシステム図である。図中で種々の流れをつなぎ合わせて閉回路を構成しているのがインフォメーション・フィードバック・ループであり,システム全体の動きを決定するうえで重要な役割を果たす。また,図中の☁はレイトの源がシステムの範囲外にあること,○は補助変数,⊕はパラメータを意味し,遅れは $\frac{D1 \text{ or } D2}{D1+D2}$ フォットマトリ平均遅れ年数 で表現している。以下,代表的なレベル方程式,レイト方程式を示しておこう。

A. 水供給部分サブシステム: 1) 新規開採可能量 (ADW);

$ADW.K = ADW.J - (DT)(DW.JK + SUR.JK)$,
 なお,最大可能開採規模としては700億t/年を考えている。

2) 工業用水道による供給量 (IWC); $DW.KL = \text{Max} \left\{ \frac{(IGR) \cdot (IWC.K)}{DHFRR}, SW.K \right\}$, $DIW.K = DIW.J + (DT)(DW.JK - IWR.JK)$, $IWR.KL = \text{DELAY2}(DW.JK, DIR)$,

$IWC.K = IWC.J + (DT)(IWR.JK)$, 3) 工業出荷額指数 (IIP); $IPR.KL = \text{Min} \{ CWR.K, (IGR) \cdot (IIP.K) \} - IIP.K$, $IIP.K = IIP.J + (DT)(IPR.JK)$, $IP.K = (SIP)(IIP.K)$, 4) 水資源からの制約 (CWR); $CWR.K = A_6 + B_7 \cdot AS$, 5) 上水道供給可能量 (SU); $SUR.JK = \text{Min} \{ RCI.J, (GRS) \cdot (SU.J) \} - SU.J$, $SU.K = SU.J + (DT)(SUR.JK)$, $RCI.K = A_1 + B_1$, $PP.K, PP.K = 55.3 + 3.0 \cdot X$ (Xは昭和41年度を1とし以後1年毎に1を増す), 6) 工業用水への全淡水供給可能量 (AS); $AS.K = IWC.K + UFU.K + UWS.K + RWS.K + RUWI.K$, 7) みかけの淡水供給可能量 (AAS); $AAS.K = (IWC.K + UFU.K) / (1 - RUW.K/100 - RRW.K/100)$, 8) 地下水源よりの工業用水への供給可能量 (UWS); $RUW.K = A_0 + B_3 \cdot X$, $UWS.K = \text{Min} \{ UWS, (RUW.K) \cdot (AAS.K) \}$, 9) 河川水等よりの工業用水への供給量 (UFU); $FUU.K = A_2 + B_2 \cdot X$, $UFU.K = \text{Min} \{ URU, (FUU.K) \cdot (DU.K) \}$



B. 水需要部分サブシステム: 1) 工業用水総需要量 (TDIW); $TDIW.K = A_7 + B_7 \cdot IIP.K$, $TUFW.K = (RFW) \cdot (TDIW.K)$, $SWD.K = TDIW.K - TUFW.K$, 2) 回収水量 (RW); $RW.K = TUFW.K - ARW.K$, $RR.K = RW.K / (RW.K + AS.K)$, $ARW.K = (URR) \cdot (TUFW.K)$, $SW.K = RW.K - ARW.K$, $RRR.K = \text{Min} \{ RRR.K, URR \}$, 3) 上水道用水需要 (DU); $DU.K = (FUM.K) \cdot (PP.K) \cdot (P.K)$, $FUM.K = A_2 + B_2 \cdot (PCM.K)$, $PCM.K = IPR/P.K$, $EWR.K = DU.K / SU.K$, 4) 人口 (P); $P.K = (GRP) \cdot (P.J)$,

C. 河川の汚濁過程に関するサブシステム: 1) 下水道着及率 (CSA); $RSA.KL = DSD.K - CSA.K - SCNA.K$, $SCNA.K = SCNA.J + (DT)(RSA.JK - CRSC.JK)$, $CRSC.KL = \text{DELAY2}(RSA.JK, DRS)$, $CSA.K = CSA.J + (DT)(CRSC.JK)$, 2) 工場排水の下水道への流入率 (TIR); $IRI.KL = CSA.K - TIR.K - ILI.K$, $CRI.KL = ILI.K / DOA$, $ILI.K = ILI.J + (DT) \cdot (IRI.JK - CRI.JK)$, $TIR.K = TIR.J + (DT) \cdot (CRI.JK)$, 3) 工場排水量 (FD); $FD.K = TUFW.K - RW.K - BMW.K$, $BMW.K = (RBM) \cdot (AS.K)$, 4) 下水の再利用 (RUWI); $TITR.K = (1 - RUR) \cdot (TITP.K)$, $IRRU.KL = (RUR) \cdot (TITP.K) - RUWI.K$, $RUWI.K = RUWI.J - (DT) \cdot (IRRU.JK)$, 5) 河川の汚濁指標 (RPI); $DD.K = DU.K$, $DDS.K = (CSA.K) \cdot (DD.K)$, $DDR.K = DD.K - DDS.K$, $FDS.K = (TIR.K) \cdot (FD.K)$, $FDR.K = FD.K - FDS.K$, $TITP.K = FDS.K + DDS.K$, $RPI.K = (BDDD) \cdot (DDR.K) + (ESR) \cdot (FDR.K) + (ESTP) \cdot (TITP.K) + (AIP) \cdot (AFR) / (AFR + DDR.K + FDR.K + TITR.K)$ 。なお,上記方程式の各記号は図中に記されており,また,各パラメータ定数は昭和41~47年の関係資料から最小二乗法より求めた値を採用している。

⑤ シミュレーション結果の考察ならびに将来の展望 ④のモデルを用いて、外生変数を変化させることにより、各種の場合を想定したシミュレーションを行なった。右表はそのシミュレーション・ランを示しており、この他につきのような総量規制によるシミュレーションも行なった。すなわち、環境基準値5PPMを固定し、工場廃水の排水基準をやはり60PPMと強化したうえで、

シミュレーション No.	工業成長率 (IGR)	各種の下水道普及率 (USD)	再利用率 (RUR)	定常決定時間 (CDTR)	工場廃水の排水基準 (EER)
A	常に年率12%の伸び	常に年間15%の伸び	0	3年	120 PPM
B	初期の10年間は5%の伸び、それ以後は6%の伸び	初期の10年間は15%の伸び、それ以後は16%の伸び	0	3年	120
C	Bと同じ	初期の10年間は15%の伸び、それ以後は16%の伸び	0	5年	120
D	初期の10年間は5%の伸び、それ以後は6%の伸び	Bと同じ	常に0.5	3年	120
E	Bと同じ	Bと同じ	10年ごとに段階的に進む	3年	60

逆算によって許容される工場廃水量(AFDR)を設定し、これと実際の工場廃水量(FDR)との差を過剰廃水量(DFDR)として求め、さらに工業用淡水供給可能量(AS)との差を総量規制にともなう供給量決定レイト(RRAS)として用いることにした。これによって決まるレベルが総量規制による淡水供給許容量(RAS)であって、水資源上の制約条件を決定する(CWR)への情報として送られることになる。以上のシミュレーション結果を考察し、将来の展望について述べればつきのように要約されよう。1)まず、水の需給構造から見ていくと、工業用水についていはいずれのシミュレーションにおいても、今後回収水の大幅な増加が見込まれ、工業用水源としての依存率はますます高まるばかりである。また工業用水道による供給に関しては政治的な要素(つまり工業成長率といった外生変数)に大いに影響されるが、ある程度の工業生産を維持していくためには、回収水につぐ供給量を賄ってくれる工業用水道を確保する必要がある。それ以外の水源については多少の量的な変動はあるにせよ、いずれも同様のパターンで限界に達していくと考えられる。2)工業生産についても概して工業成長率の与える影響はきわめて大きい、システム内からのフィードバックである水資源からの制約条件がかなり有効に働いたため工業成長率に一致するような大きな増加はなかった。しかし再利用による水供給へのフィードバックが考慮されたときには多少成長率が低、押えられても水供給量がそれ以上に確保できるため水資源の制約がかなり緩和され工業生産が促進される結果となった。さらにこの再利用のフィードバック・ループの構造からすれば、その影響は当然廃水量の増加にもつながる。つまり再利用を進めることは水源保持の面からなるとは必ずしも水資源の合理的利用を促し、工業生産への容量を増加させることができるが、必ずしも河川の汚濁指標を減少させるという一方的な方向には働かないことに注目すべきである。このことは重要で、下水の再利用をすれば汚濁が防止されるという従来の考え方は必ずしも成立しないことになる。もう一点、再利用に関して着目すべきことは回収率の向上が促進されることである。このことはとりもなおさず、フィードバックの経路から判断して、波及的な効果としての技術革新が進行することを意味するものである。3)次に、生活水準も工業出荷額指数によって決定される以上、工業成長率と密接な関係を有している。そこで問題なのは、工業生産の拡大が生活水準を向上させ、それが汚濁を増加させるという一連の関係と、汚濁防止のため例えば排水総量を規制した場合に工業生産、生活水準が下がるという逆の関係との矛盾にいかに対処するかということであろう。しかしながらこれらは必ずしも二者択一の問題ではなく、その結びつきを緩和することによって両者の利害を一致させていく方向に向けることが望ましいことだと考えられる。その手段としてすでに述べたように再利用を進めることにも、排出基準を強化すること、あるいは排水総量を抑えることなどが必要となる。4)また下水道整備の問題をみると、確かに整備の進行状況によって河川の汚濁指標が鋭敏に影響されることがわかったが、これも汚濁防止の究極的な解決策とはなりえなかった。5)これらのシミュレーションを通じてシステム内のフィードバック構造および外生変数がそのシステム全体の変動にきわめて大きな影響をもつことが認識され、とくに水質面からのフィードバックは水の需給構造、工業生産規模の動向に重大な役割を果たし、このシステムを支配する重要な要因と考えられる。

今後は、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、システムの改善をはかるとともに、他水利をも包含したシステムの拡大に努め、水資源全体のフローズシステム化をめざす。