

流域の取排水システムと水循環を考慮した  
水資源計画に関する考察A STUDY ON WATER RESOURCES PLANNING TAKING WATER  
BUDGETING SYSTEMS INTO CONSIDERATION

吉川 秀夫\*・吉川 勝秀\*\*

By Hideo KIKKAWA and Katsuhide YOSHIKAWA

## 1. はじめに

本論文では、流域水利用の基本となる取排水システムについて考察する。よく知られているように、わが国の利水の歴史は農業用水に始まり、農業用水のみの水利用が長く行われてきた。近年に至ってそれに水力発電や工業・業務・家庭といった都市用水が加わるようになり、その初期における農水の転用を経て、新規水資源開発（ダム・導水など）が行われるようになった。最近ではさらに再生水資源開発といった“水質の復元”による水開発が行われつつある。

一方、取排水システムについてみると、農業用水のみのシステムから、水利用の変遷（高度化）に伴って絶えず新しいシステム（上水道・工業用水道・下水道）を構築しながら変化してきているが、その変化の様式には一つのパターンを見出すことができる。そしてそれぞれの過程にあるシステムは、ある固有の特質をもち、それが水利用への要請にある時期には対応し、しかし新たな要請が台頭してくるとかえって不都合となる場合が見受けられる。

本論文では都市化流域の取排水システムを取り上げ、システムの類型化と特性の分析を行うことにより、流域の取排水システムを構築していくにあたり考慮されるべき事柄を明確にすることを試みた。筆者らが目指したものは、単に水道計画や下水道計画といった個別の計画を考えるのではなく、水利用率の上昇に伴い、流域全体としてのシステムを考えるべき時期にきているという問題意識のもとに、具体的な形としてそれを明確にすることである。

また、流域の取排水システムについて検討を進めていくと、流域内の水循環を明確に考慮することになり、水

資源計画における基本的かつ今日的な課題となっている水資源開発と水配分、水循環の問題、利水安全度の問題、特定用水の還元を見込まず、また新規開発はそれ以前の水秩序を乱さないとする現在の利水計画方式に関する問題、さらには河川維持流量の問題といった事柄を考えることになる。

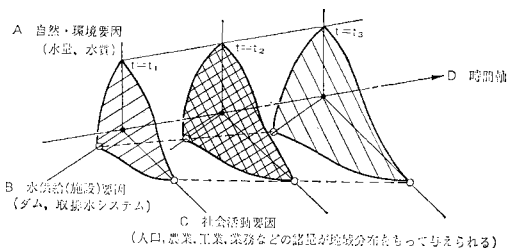
そこで、流域の水循環という観点から、これらの今日的な課題がどのような特性をもっているのかについて、取排水システムの特性分析における結果を用いて考察を加えた。

## 2. 従来の研究と本研究の基本的立場

本節では、まず流域の水資源計画の全体的なイメージと、その中において筆者らが着目しているポイントを明確にする。次に本論文で取り扱う問題に関連する従来の調査・研究について概観するとともに、本研究の位置づけを行う。最後に本研究を進める際の基本的な立場（方針）について述べる。

## (1) 適正水利用計画のイメージ

適正水利用計画の検討においては、種々の要因を取り扱う必要があり、それらは単純化すると図—1のように表現される（時間軸以外についても各要因を一つの軸で便宜的に示すものとする）。ここに、A. 自然・環境要



図—1 適正水利用計画の主要4軸

\* 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 建設省土木研究所 総合治水研究室研究員

因は水流量、流量・水質等の水環境を、B. 水供給要因はダム・導水・取排水システム等を、C. 社会活動要因は人口・農業・工業・業務などの諸量をそれぞれ表わしている。また、D. 時間軸は上述の諸量の経年的な変化を表現するためのものであり、これは流域の水利用率という軸に置き換えることもできる。

適正水利用計画では、水からみた種々の容量<sup>11,2)</sup>と社会活動量との適切なバランスを取ったうえで水利用を行うことを指向する。したがって、適正水利用計画における調査・研究としては、次のようなものが考えられる。

- ① A・B・Cの諸要因間の相互関係とトレード・オフを把握する<sup>11,2)</sup>。
- ② A・Bの諸要因が与えられた条件のもとで、Cの要因の適正状態を求める。
- ③ A・Cの諸要因が与えられた条件のもとで、Bの要因の適正状態を求める。
- ④ B・Cの諸要因が与えられた条件のもとで、Aの要因の適正状態を求める。
- ⑤ 上記①～④のもとで、時間軸上で発生する問題に対する適正状態を求める。

以上の調査を行う際の方法論としては、①～⑤をすべて内包する分析方法をとる場合と、上記のようにあるものを与件とし(ただし、その与件はある領域で変化し得るとする)、焦点を絞った分析を行う場合が考えられる。

前者の考え方のもとでの分析については、すでに参考文献1)、2)において、その際の手法と事例について報告した。それらの研究を通じて浮び上がってきた問題として、全体のバランスのもとで、個々の諸要因を定めるとする前者の考え方では、十分な結果を得ることが必ずしも容易でないということである。これは、総合化して考える場合に、現状では諸要因間に精度的なアンバランスがあることに起因している。したがって、方法的な検討は可能であっても、実務上の精度と対応しない場合がある。そのような問題の一つとして、水循環という観点からみた流域の水資源計画の検討がある。本研究では水循環に着目して、以下に示す課題を取り上げ、個別的な検討を行うことにした。

- ① 流域の水循環(取排水)システムの構築に関する基本的な問題(システムの特性分析)
- ② システム間の移行の問題(水質の復元による利水容量の増大)
- ③ 取排水システムと利水安全度の問題(構造的な利水安全度)
- ④ 還元を見込んだ利水計画と見込まない利水計画の問題

## (2) 本研究に関連する従来研究

流域の水循環を明確に意識した水資源計画に関する研究の歴史は比較的新しい。すなわち、流況把握に関する建設省の研究(1970)<sup>3)</sup>では、降雨の損失および流出、河道を中心とした水収支、河川水質に関する調査が行われている。岡本らの研究(1973)<sup>4)</sup>では、農業用水の循環に着目して、農業用水需要量の合理的な算定法(CB法)の提案と検証を行っている。総合的な水循環・水利用に関する吉川らの研究(1978～79)<sup>11,2)</sup>では、自然水、および用・排水を総合的に把握する手法(水資源連関表)を提案し、そのもとで総合的に水の配分・利用を考える手法について検討している。浜口・前田の研究(1977)<sup>5)</sup>では、水質の復元による再生水資源に関連して、都市の水循環と取排水システムのあり方について検討を進めている。都市の水代謝に関する科学技術庁の研究(1976)<sup>6)</sup>においても、浜口・前田らと類似の検討が独立に行われている。マクロ的な水循環に関する国土庁の研究(1976)<sup>7)</sup>では、大規模な流域における水循環と水利用の状況が把握されている。水循環と水利用に関する建設省の総合研究(1974～76, 1977～)<sup>8),9)</sup>では、水循環に関する精度の高い計測と、それを反映した適正水利用計画調査が進められている。これらの研究例のほかにも、たとえば市川の研究(1968)<sup>10)</sup>、金子の研究(1970～72)<sup>11)</sup>、奈良県の研究(1974)<sup>12)</sup>、土木研究所の研究(1979)<sup>13)</sup>なども興味深い。

いずれにしても、比較的近近になって調査・研究が始められたために、多くの課題が残されている。しかし、このような着実な調査・研究の傾向は高く評価されるべきであろう。

従来研究を概観して浮び上がってくる主要な研究テーマとしては、これらの水循環の把握結果に基づいて、それを明確に水資源計画に反映させる方法論の確立と、それらを応用して水資源をめぐる今日的な課題(たとえば利水安全度の問題、水利用率の上昇に伴う超過湯水の深刻化の問題)を解決していくことがあげられよう。

本研究で取り扱う取排水システムに関する研究は、以上のことを念頭においた研究の一環として行ったものである。

## (3) 本研究の基本的立場

取排水システムに関する検討においては、基本的に次のような考え方をとった。

- ① 流域の取排水システムはきわめて複雑に錯綜しており<sup>11,2)</sup>、その取り扱いが複雑にならざるを得ない。しかし、それを単純化し、しかも本質は内含するようにはさせることができる都市に関連する水循環シス

テムを考える。そして、農業用水や残流域流入量などを含めた形で取り扱い得るような方法を用いて検討を行う。

- ② 都市の取排水システムを現実の歴史的な変遷に基づいて基本的ないくつかのパターンに分類し、それらのシステムの特性を明確にする。
- ③ 常に時間軸を明確に意識して、流域の歴史的変遷に伴う取排水システムの移行を念頭におく。そしていくつかの流域において、それに伴って選定しつつあるシステムに本質的に付随した問題点を浮び上がらせる。
- ④ 取排水システムの特性をみる場合には、水供給容量、エネルギー消費、費用などの効率性に関する指標、水質や負荷量などの環境指標、水質事故や超過渇水に対する安全性に関する指標といった多角的な指標を選定する。
- ⑤ 以上の検討結果を応用することにより、水資源をめぐる次のような今日的課題へのアプローチを試みる。すなわち、(i) 取排水システムの移行（水質の復元による水開発）による水需要増への対応、(ii) システム間の移行による実質的な利水安全度の変化機構の解明、(iii) 用水の還元を考慮した場合としない場合の利水計画の特性についての検討を行う。
- ⑥ 以上の基本的なテーマについて調査を進める際に、ある条件下での最適解を求めるための手法を導入するという方法はとらない。シナリオ分析とそれに対するシミュレーション (simulation)、およびその結果に対する考察という研究方法を用いる。最適化 (optimization) 手法を用いた場合の研究には

合田ら (1966)<sup>14)</sup> に始まる長い歴史があり、筆者らもそのような研究を行ってきたが<sup>15), 16)</sup>、本研究ではそのような方法は用いない。これは、種類の異なる評価指標を、なんらかの方法により相対的価値を定めて比較することは、具体的な計画を立てる場合には必要であっても、本研究のようにシステムの特性をさぐる段階においては不要と考えるからである。

### 3. 流域の取排水システムの類型化と特性の分析

ここでは前述の主旨に従って、まず都市化流域の開放系としての取排水システムを、基本的なパターンに類型化する。そして、それぞれのシステムの特性を多角的な指標を設定して分析する。

#### (1) 取排水システムの類型化

一般に、流域の取排水システムを構成する要素としては、河川・地下・上水道・家庭・業務・工業・農業・下水道・流域・ため池・系外といったものが考えられる(表一)<sup>1), 2)</sup>。

しかし、ここでは単純化して都市活動用水に着目し、現在すでに実在しているいくつかのシステムをもとにして、さらに概念的に考えられるものを加え、図-2 に示すような8つの基本的なシステムを考える。

システムAは伝統的な開放系としての循環利用型である。システムBは流域下水道(公共水道)型であり、システムCは広域水道(公共下水道)型、システムDは広

表一 水資源関連要素とその機能<sup>1), 2)</sup>

水資源関連要素	概要	機能をもつ要素	水利用要素	降水受水要素	蒸発散要素	水質浄化要素	汚濁発生源要素	貯留要素
河川	河道・河川敷, ダム, 湖沼	○				○		○
地下	深層および浅層地下水帯	○				○		○
上水道	取水・導水・浄水・配水の各施設	○						
家庭	住宅		○			○		○
業務	主として第3次産業による業務地区		○			○		○
工業	工場	○	○			○		○
農業	水田・畑地および用・排水施設	○	○	○		○		○
下水道	下水道管路網と処理施設	○				○		
流域	農地や貯水池以外の地表面	○		○	○	○		○
ため池	ため池			○	○	○		○
系外	大気中							

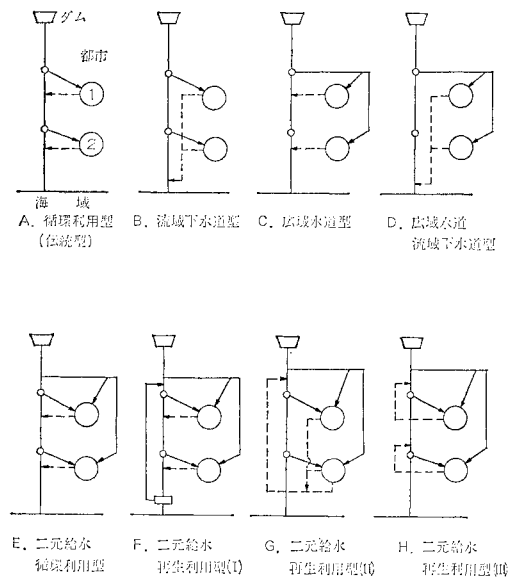


図-2 流域(都市)の取排水システムの類型化

域水道・流域下水道型である。システム E は二元給水循環利用型、システム F は二元給水再生利用型 (I)、システム G は二元給水再生利用型 (II)、システム H は二元給水再生利用型 (III) とよぶことにする。

システム A~E については、すでに多くの流域で実在している形態であり、歴史的にみると、A を経て B あるいは C, D, E へと移行していく場合が多い。システム B~D は、水質にはできる限り手を加えない (水質の積極的な利用ではない)、“水量消費” 型のシステムである。またシステム F~H についても、いくつかの流域でこの形態へ移行する計画が立案されつつある。システム F~H は、積極的に水質を回復させながら水利用を行う、“水質の消費と復元” 型のシステムである。以上のシステムは、都市における河川を介した開放系としての水循環を考えており、閉鎖系における循環やカスケード的な循環は除外している。

## (2) 取排水システムの評価指標

取排水システムの特性を明らかにするために、次の 10 の評価指標を設定した。

- ① 河川の流量
- ② 河川の水質
- ③ 海域 (停滞性水域) への汚濁負荷排出量
- ④ 利水関連費用
- ⑤ エネルギー消費量
- ⑥ 水質事故に対する安全性
- ⑦ 計画規模以上の (異常) 渇水に対する安全性
- ⑧ 水供給容量と利用効率
- ⑨ 単位水量当たりの利水費用
- ⑩ 単位水量当たりのエネルギー消費量

評価指標 ①~③ は、河川および停滞水域の環境に関するものであり、④、⑤ は、システムを建設・運営するために必要な経費およびエネルギーをみるものである。⑥、⑦ では、システムの安全性をみる。また、⑧ では最上流端での流量に対する水供給容量 (各システムにおいて上流端の流量を与えたときの水供給可能限度量) および利水効率 (開発効率) を算定する。⑨ および ⑩ では、④ および ⑤ で算定したシステム全体の値を単位利水量に換算する。

以上の指標は一般性を失わない範囲で単純化した次のような前提条件のもとで計算された。①~③ の指標については、計画流況時のみ (したがって、洪水時や豊水時は除く) を考える<sup>3), 9)</sup>。また、⑦ の指標の算定においては、(i) 安全度 (超過確率表示) でみる方法 (frequency method), (ii) 不足率およびその期間、あるいは %day (%-半日) といった不足状態でみる方法 (severity method), (iii) 渇水被害でみる方法 (damage method)

が考えられるが<sup>20)</sup>、本論文では (ii) の方法を用いた。さらに渇水評価の際の入力データとしては、(i) 実績水文量、(ii) 渇水持続曲線といった計画水文量、(iii) データ・ジェネレーション (data generation) による水文量が考えられるが、(i) を用いた。また、農水および残流域流入量は、水収支に関連する量であり、システム間の比較においてはそれを考慮した場合としない場合の結果において、“質的” な違いがないことから省略した。都市の規模は、各システムの比較を容易にするために、① 各システム共通とした場合、② システムの水供給容量いっばいの規模とした場合を考えた。そして、① の都市の規模を上流 0.3 m<sup>3</sup>/s、下流 0.4 m<sup>3</sup>/s とした場合には、下水道未完備時と完備時の 2 つのケースを考え、前者をケース 1、後者をケース 2 とした。また、② のシステムの極限容量に対応した都市規模を設定した場合をケース 3 とした。

また、種々のパラメーターの設定にあたってはそれを任意に与えるのではなく、できる限り現実に対応したものを採用するようにした<sup>17)</sup>。

設定した評価指標のうち、⑧ の水供給容量の増大は社会的な効用の増大に対応する。そして、そのような効用の増大には、④ および ⑨ で示される費用、⑤ および ⑩ で示されるエネルギー消費量といった支出を伴い、①、② の河川流況や水質の変化、③ 停滞性水域への汚濁排出量の変化、⑥、⑦ に示される水質事故や超過渇水時の安全性に変化が生じる。これらの指標を総合した社会的厚生関数は現在のところ定式化されておらず、以下では多くの流域におけるシステム間の移行とともに、各指標がどのように変化するかを個別に評価することを試みた。

## (3) 特性分析のための数値シミュレーション

設定したモデル流域 (仮想流域) は、図-3 に示すとおりである。各記号は次のように定義した。

$P_{ii}$ : 水量・水質のチェック・ポイント ( $i=0\sim6$ )

WT: 広域水道

W: 公共水道

ST: 流域下水道

S: 公共下水道

RK: 河口堰における取水場

R: 公共下水道の高度処理場

RS: 流域下水道における高度処理場

$P_i$ : 距離  $P_{ii}$  地点の水質

$l$ : 距離

数値シミュレーションで用いたおもな共通データを表-2 に示した。これらの共通データは、上流における単位流量に対応するように設定した (すなわち、上流流量

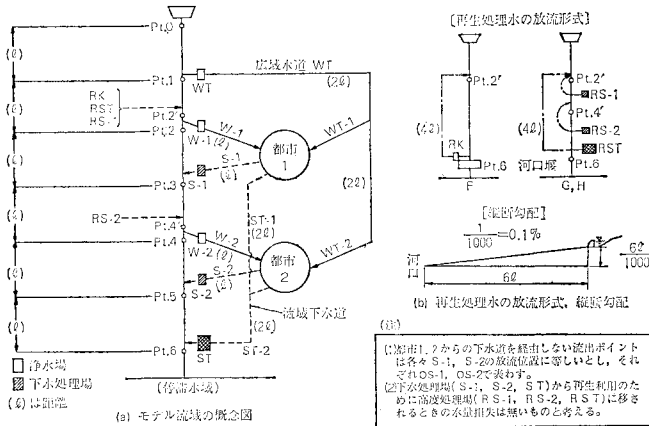


図-3 モデル流域の概念図 (記号等の定義含む)

を  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  としており、上流端の流量で無次元化した場合と同じである。

各指標の算定式の内容は表-3に示すとおりである。

表-3を補足する意味で指標の計算について若干の考察を加える。

① 流量の連続式

$$Q^{i+1} = Q^i - Q_W^i + Q_S^i + Q_R^i \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $Q^i : P_{ti}$  の流量、 $Q_W^i \cdot Q_S^i \cdot Q_R^i$  : それぞれ  $P_{ti}$  と  $P_{t(i+1)}$  の間の取水量・排水量・再生水放流量。した

がって、 $Q^0 = Q^*$  (上流端流量) である。

② 汚濁負荷量の連続式と水質

$$G^{i+1} = G^i - P_i \cdot Q_W^i + G_S^i + G_{OS}^i + G_R^i \dots \dots \dots (2)$$

$$P_{i+1} = G^{i+1} / Q^{i+1} \dots \dots \dots (2)'$$

ここに、 $G^i : P_{ti}$  の負荷量、 $G_S^i \cdot G_{OS}^i \cdot G_R^i$  : それぞれ下水放流水負荷量・下水を介しない放流水負荷量・再生放流水負荷量、 $P_i : P_{ti}$  の水質。

③ 停滞水域への排出負荷量  $q_s$  (計画流況時)

$$q_s = \int_0^t P^s \cdot Q^s dt \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $t$  : 対象期間。

④ 利水費用<sup>(2), (5), (6)</sup>

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \sum C + \sum M \\ &= \sum_j (C_j \cdot \delta_j + Cl_j \cdot l_j \cdot \delta_j) \\ &\quad + \sum_j (m_j \cdot Q_j + ml_j \cdot l_j \cdot Q_j) \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 $C_j$  : 単位水量当たりの建設費 (プラント等)、 $Cl_j$  : 単位水量・単位距離当たりの建設費 (配管等)、 $m_j \cdot ml_j$  : それぞれ  $C_j \cdot Cl_j$  に対応する維持・管理・運営費、 $\delta_j$  : 施設能力、 $Q_j$  : 供給水量、スケール・メリットを表現する場合には、たとえば  $C_j \cdot \delta_j$  は  $C_j \cdot \delta_j^\alpha$  ( $\alpha :$

表-2 基本共通データの例示 (ケース 1)

a) 基本共通データ				
$Q^*$	1.0 m <sup>3</sup> /s (自然流量 0.8 + タム開発水量 0.2)			
$Q_M$	0.3 m <sup>3</sup> /s (維持流量)			
$q_1$	0.3 m <sup>3</sup> /s (都市1の需要量, 取水量ベース)			
$q_2$	0.4 m <sup>3</sup> /s (都市2の需要量, 取水量ベース)			
$k = k_1 = k_2$	0.8 (還元率)			
$S_1$	0.5 (都市1の下水道整備率)			
$S_2$	0.7 (都市2の下水道整備率)			
都市1, 2とも、広域水道と各都市の公共水道が負担する比率は等しいとする。				
b) 都市の規模, 水需用量, 負荷量原単位				
	家庭	工業*	摘要	
水使用量 (排水量)	0.345 m <sup>3</sup> /日/人 (4.0 × 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s/人)	0.7 m <sup>3</sup> /日/百万円 (8.0 × 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s/百万円)		
汚濁負荷量	50 g/日/人 (0.6 × 10 <sup>-3</sup> g/s/人)	50 g/日/百万円 (1.2 × 10 <sup>-3</sup> g/s/百万円)		
都市1.	50,000人	12,500百万円/日	0.3 m <sup>3</sup> /s 使用	
都市2.	50,000人	25,000百万円/日	0.4 m <sup>3</sup> /s 使用	
* 化学工業を想定する				
c) 施設能力・水質・距離				
施設能力 (m <sup>3</sup> /s)	水質 (ppm)		距離 (km)	
$\delta_{WT}$	0.7	$P_0$	2.0	4l (20)
$\delta_{W-1}$	0.3	$P_{S-1}$	20.0	l (5)
$\delta_{W-2}$	0.4	$P_{S-2}$	20.0	l (5)
$\delta_{ST}, \delta_{RST}$	0.56	$P_{RST}$	(5.0) 20.0	l <sub>RST</sub> 4l (20)
$\delta_{S-1}, \delta_{RS-1}$	0.24	$P_{RS-1}$	(5.0) 20.0	l <sub>RS-1</sub> —
$\delta_{S-2}, \delta_{RS-2}$	0.32	$P_{RS-2}$	(5.0) 20.0	l <sub>RS-2</sub> —
$\delta_{RK}$	0.56	$P_{RK}$	$P_{ts}$ の水質	l <sub>RK</sub> —
d) 費用係数 (単位水量当たり)				
$C, m$	適用	データ (円/m <sup>3</sup> )	摘要	
$C$	タム	20	20 × $Q_N$ × 年間 = 126,144 百万円 すべてのタイプに共通	
$C, m$	WT, W-1, W-2	100 $m = 3P + 14^*$	取水, 導水, 浄水, 送水および給配水費用に広域水道と公共水道の差は考えない	
$C, m$	S-1, S-2	40 8	公共下水道の2次処理場	
$C, m'$	S-1, S-2	50 5	公共下水道の管渠等設備費	
$C, m$	RS-1, RS-2	35 25	公共下水道の3次処理場	
$C, m$	ST	30 6	流域下水道の2次処理場	
$C, m'$	ST	40 4	流域下水道の管渠等設備費	
$C, m$	RST	30 20	流域下水道の3次処理場	
$C, m$	RK	30 5	河口堰	
$Cl, ml$	RST, RS-1, RS-2, RK	0.5 円/m <sup>3</sup> /km 0.1 円/m <sup>3</sup> /km	再生水送水費	

注) \*  $P$  : BOD 水質レベル ppm  
上段の  $C$  は建設費 (円/m<sup>3</sup>)  
下段の  $m$  は維持管理費 (円/m<sup>3</sup>)

表-3 共通事項および評価項目・評価方法 (ケース 1, 2 の例)

<p>共通事項</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>流量はダム直下流の量のみである。 <math>Q^* = Q_0 + Q_N</math> (<math>Q^*</math>: 計画流量, <math>Q_N</math>: 開発流量)</li> <li>流域には都市 1, 2 が存在し, おのおの家庭 (業務含む) と工場から構成されている。</li> <li>広域水道と公共水道が存在し, 広域水道の都市 1, 2 への給水比率は都市の規模に対応している。</li> <li>流域下水道あるいは公共下水道が存在する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>種々の計算ポイントは取水あるいは排水地点とする。</li> <li>河川の維持流量が存在し, それは優先的に確保される。</li> <li>下水道整備率は都市 1, 2 それぞれ 50%, 70% あるいは両者ともに 100% の場合を考える。</li> <li>都市で使用された水量が還元率 <math>k</math> で還元される。</li> <li>取水や水質処理による水量損失はないとする。</li> <li>下水道未整備の区域から河川に汚濁負荷量が流入するポイントは, 下水道からの放流位置と同じとする。</li> </ul>
<p>(1) 流量(変化)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取排水能力を都市の規模に応じて設定した。</li> <li>水収支式により流量を計算。</li> </ul>	<p>(5) エネルギー消費</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>下水処理のエネルギー (電力消費) の算定 (要求水質により処理方式を変え, スケール・メリットを考慮)。</li> <li>水を逆送するためのエネルギーの算定。</li> </ul>
<p>(2) 水質(変化)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダム位置から放流される水質は <math>P_0</math> (2 ppm)。</li> <li>処理場からの放流水質は 2 次処理レベル (BOD 20 ppm), 3 次処理レベル (同 5 ppm) の 2 種類。</li> <li>下水を介しない家庭・工場排水の汚濁負荷流達率はともに 0.3 (下水道は 1.0)。</li> <li>河口堰から上流に戻す際には, 新たな処理は行わない。</li> <li>汚濁負荷の収支計算。</li> <li>水質 = (負荷量フラックス) / (流量)</li> </ul>	<p>(6) 水質事故に対する安全性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>都市 1 あるいは 2 でコレラ・六価クロム・シアン等による水質事故が起こったとき, その影響はシステムにより異なる。</li> <li>ここでは水道の供給停止量および河川の汚染区間をみる。</li> <li>水フロー・ネットワークより汚染区域供給停止量を算定。</li> </ul>
<p>(3) 停滞水域の環境</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>流域へ流入する汚濁負荷量と定義し, 河川の最下流端における汚濁負荷量フラックスとして求める。</li> </ul>	<p>(7) 異常濁水に対する安全性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>超過濁水時の流況 (半旬単位) を想定し, 各システムごとの年間不足総量, 不足半旬数, 不足 % を求める。 % - 半旬 = <math>\sum</math> (確保量に対する不足 %) ここに, <math>i</math>: 不足半旬数。</li> </ul>
<p>(4) 利水費用</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建設費 (capital cost) と維持・管理・運営費 (running cost) を算定 (スケール・メリット考慮)。</li> <li>水処理コストは原水水質により変える。</li> </ul>	<p>(8) 水供給容量と水利用効率</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>各システムの理論的な水供給可能量 (システムの容量) を算定。</li> <li>容量と水質の関係の分析。</li> <li>限界状態で水利用効率, ダム開発水の効率 (水開発効率) を算定。</li> </ul>

定数) となるが, 本論文では線形式において費用係数を規模の経済を考慮して設定することにした<sup>17)</sup>。

⑤ エネルギー消費量  $E$

$$E = \sum E_1 + \sum E_2$$

$$= \sum aQ^b + \sum 0.245 \cdot Q \cdot (c \cdot H) \dots \dots \dots (5)$$

ここに,  $E_1 = aQ^b$ : 処理に必要なエネルギー,  $a \cdot b$ : 定数,  $E_2 = 0.245 \cdot Q \cdot (c \cdot H)$ : 逆送に必要なエネルギー,  $H$ : 高度差, 0.245: 換算係数,  $c$ : 損失等を考慮する係数<sup>17)</sup>。係数  $a$  は文献 16) に示される処理レベル 2 [レベル 1: 活性汚泥法 4 400 kW/(m<sup>3</sup>・s), レベル 2: 活性汚泥法+高度処理 11 200 kW/(m<sup>3</sup>・s)] とし, 規模の経済を示す  $b$  は 0.9 とした。

⑥ 水質事故に対する安全性

(水循環ネットワークより算定)

⑦ 計画規模以上の濁水に対する安全性  $SA$  (システム A, B, C, D について例示)

$$SA = \sum \frac{(Q^* - Q_M)}{Q_0} \times 100, \quad \left. \begin{array}{l} \\ A\{Q^* - Q_M | Q^* - Q_M < Q_0\} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

ここに,  $Q_0$ : 水利権量,  $Q_M$ : 維持流量,  $A$ : 供給可能量 < 水利権量の日数 (あるいは半旬) の集合。

⑧ 水供給容量  $Q_C$  と利用効率 ( $Q^* - Q_M$  の量が還元率  $k$  で循環した場合)

$$Q_C = (Q^* - Q_M) + k(Q^* - Q_M) + \dots$$

$$\div \frac{1}{1-k} \cdot (Q^* - Q_M) \dots \dots \dots (7)$$

$$\omega_0 = Q_C / Q^*, \quad \omega_N = Q_C / (Q^* - Q_M) \dots \dots \dots (8)$$

$\omega_0$  は最上流の流量に対する水利用量の比,  $\omega_N$  は開発水量が利用される回数であり, 水利用効率を示している。

式 (7) は完全に定常状態となったとき (無限回循環したとき) のものであるが, 通常はそのような定常状態を期待するのは危険であり, 1 回循環とみておいた方がより現実的である。表-4 には 1 回循環した場合 (式 (7) では第 2 項までとる) の値を示した。表-4 に示す最大容量のもので, B, C, D, F, G, H タイプでは, 上下流の都市に任意の割り振りが可能である。しかし, A, E タイプでは, 上流を ( $Q^* - Q_M$ ), 下流を  $k(Q^* - Q_M)$  としたときに最大容量となる。

表-4 各システムの容量と利用効率

システム	容量 (最大)	$\omega_0$	$\omega_N$
A	$(1+k) \cdot (Q^* - Q_M)$	$(1+k) \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$1+k$
B	$(Q^* - Q_M)$	$\frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	1
C	$(Q^* - Q_M)$	$\frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	1
D	$(Q^* - Q_M)$	$\frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	1
E	$(1+k) \cdot (Q^* - Q_M)$	$(1+k) \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$1+k$
F	$\frac{1}{1-k} \cdot (Q^* - Q_M)$	$\frac{1}{1-k} \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$\frac{1}{1-k}$
G	$\frac{1}{1-k} \cdot (Q^* - Q_M)$	$\frac{1}{1-k} \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$\frac{1}{1-k}$
H	$\frac{1}{1-k} \cdot (Q^* - Q_M)$	$\frac{1}{1-k} \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$\frac{1}{1-k}$

注: 1 回戻し (1 回循環) の場合の値であり, 無限回戻しの場合の定常値ではない。

⑨ および ⑩ 単位水量当たりの利水費用、エネルギー消費量  
 これらは、式 (4)、(5) で算定した値を、ケース 1~3 の水利用量で除することにより算定した。

このようにして数値シミュレーションを行った結果を、図-4 に模式化して一覧できるようにした。

図-4 に示す ① 流量変化、② 水質変化における実線は、都市規模を上流 0.3 m<sup>3</sup>/s、下流を 0.4 m<sup>3</sup>/s とし、下水道が未完備時のもの(ケース 1)を示しており、破線は同様の場合に下水道が完備された場合(ケース 2)を示す。一方、点線はケース 3 についてのものであり、上下流の都市が極限状況の水利用を行うとした場合(容量内で任意に取水可能な B, C, D, F, G, H タイプでは上下流の取水比率を 3:4 とした)を示している。また③ 停滞水域の環境、④ 利水費用、⑤ エネルギー消費、⑥ 水質事故に対する安全性、⑦ 汚濁規模を超える取水に対する安全性、⑧ 容量と利用効率、⑨ 単位水量当たりの利水費用および ⑩ 単位水量当たりのエネルギー消費では、左端にケース 1、中央にケース 2、右端にケース 3 の結果を示している。各指標は次のように表示されている。① 流量変化、② 水質変化は、河川の各地点の水量・水質値を横軸にとっている。③ 停滞水域の環境、④ 利水費用、⑤ エネルギー消費については、縦軸にその大きさをとって示した。⑥ 水質事故に対する安全性では、上流および下流で水質事故が発生した場合(×印で示される)の供給停止量、および汚染河道区間を示している。数値はケース 2 に対応している。ケース 1, 3 では供給停止量は変わるが水利用の阻外状況は定性的に同様なので省略し

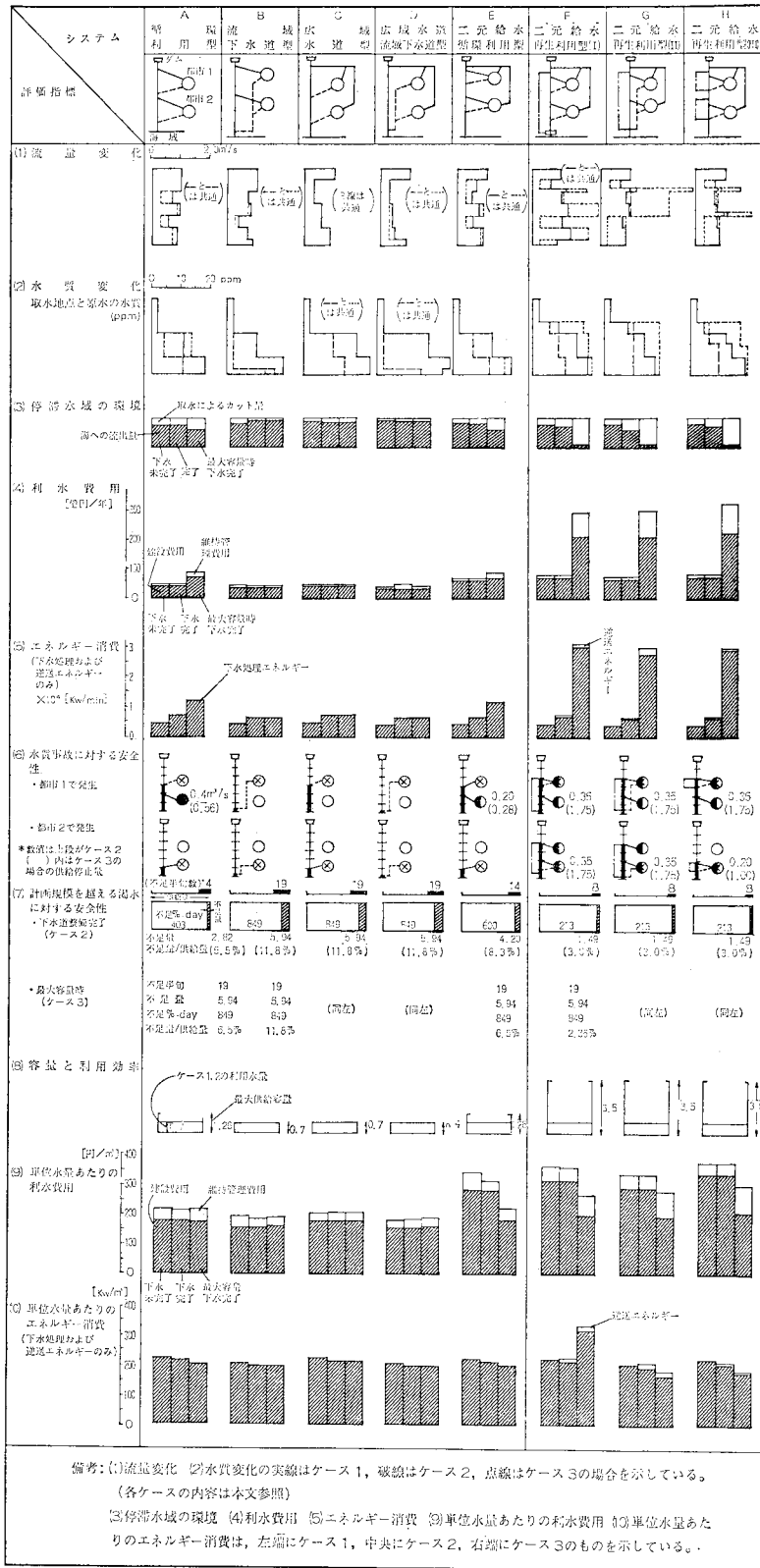


図-4 シミュレーションの結果

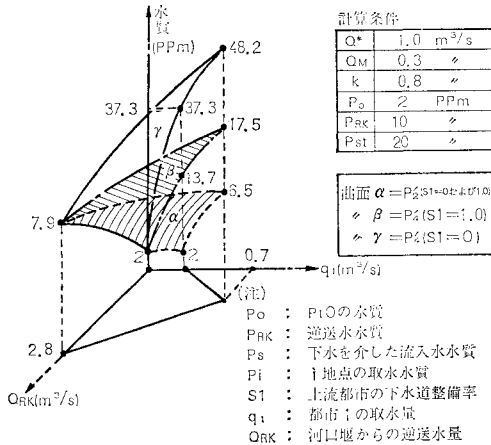


図-5 容量と水質の関係 (システムFを例として)

た. ⑦ 計画規模を超える湯水に対する安全性では, 都市水需要量に対する不足半句数 (上段), および 劣半句を示しており, 年間の総需要量に対する不足の相対的な程度を知ることができる. ⑧ 水供給容量はコップのボリュームで示しており, その横に極限利用状態 (ケース3) における利用効率  $\omega$  を数値で与えた. ⑨ 単位水量当たりの利水費用および ⑩ 単位水量当たりのエネルギー消費は, ④, ⑤ と同様に表示した.

図-4 の計算においては, 各指標間の相互関係 (トレード・オフ) の分析を行った. 一例として水供給容量と水質とのトレード・オフの関係を 図-5 に示す. 同図は, システム F における上流都市の取水量  $q_i$  と河川水質の関係を示している. システム F では, 都市 1 は 0~1.94 m<sup>3</sup>/s まで取水することができる. そのとき 0~0.7 m<sup>3</sup>/s までは水質の悪化を伴わずに取水可能である. しかし, 0.7 m<sup>3</sup>/s を超えて 1.94 m<sup>3</sup>/s まで取水量を増すと, それとともに水質  $P_i$  は 2 から 17.5 ppm (ただし, 上流の下水道整備率は 100%) まで悪化し, 取水量と取水水質の間にトレード・オフが生じていることがわかる.

図-4 は前述の 3 つのケースの都市規模を設定しており, ケース 1, 2 ではシステム F~H については可能な量はすべて逆送とするとしている. したがって, ケース 1, 2 においてシステム A~E は純粋な比較計算であるが, F~H については, 前提条件が異なっている. また, ケース 3 は極限水利用状態での比較を行ったものであり, そのような条件下で各システムの比較が可能である.

(4) 取排水システムの特性に関する考察

数値シミュレーションの結果 (図-4) について, まず各評価指標ごとに考察し, 次にそれらを全体的かつ歴史的観点から総括する.

a) 各評価指標についての考察

① 河川流量

図-4 (1) 流量変化よりわかるように, 伝統的システムから主として水質 (取水水質および河川水質) を確保するために広域水道・流域水道を導入するシステム B~D に移行するにつれて, 河川内の水量は減少する. 河川維持用水が定められていない河川では, 極端な場合には無流量状態が出現する可能性があり, 河川環境面からみると望ましくない状況が生じる. 一方, 高度な開放系としての再利用システムである F~H (システム A も実質的には再利用システムと見なせる) では, 水を逆送すれば河川の水量は確保される. 河川流況の保全のために下水処理水を導入する事例は, このような特質に着目したものと考えてよい.

② 河川水質

河川水質についてみると, 図-4 (2) 水質変化に示されるように, 水処理後の水質レベルを固定すれば, 水量とは逆にシステム B, D は最も良好である. 取水水質を確保するために, この特質に着目してシステム B, D が導入された事例も多い. 循環利用型であるシステム A, F~H は, 現況の下水処理レベルでは水質的には悪くなる. したがって, ①, ② より水量と水質の間にトレード・オフの関係があることがわかる.

③ 停滞水域への汚濁負荷排出量

② と同様に, 水処理レベルを固定すると, 循環利用型システム (A, F~H) では, 水利用に関連する処理による分だけ多くの負荷量が削減されることになり, 排出負荷量は減少する.

④ 利水費用

図-4 (4) 利水費用では, 施設建設関連費用 (capital cost) と維持・管理・運営費用 (running cost) を示したが, 高度の再利用型システムでは, 逆送する水の分だけ総経費は高くなる. また極限容量を供給すると仮定して, 公企業が総支出=総収入となるように水コストを定めるとすれば, 通常の場合には高度の再利用型システムでは若干水コストが高くなる. その場合の結果を, 図-4 (9) の単位水量当たりの利水費用として示した. なお利水費用の計算においては, 規模の経済および水質悪化による処理費用の上昇を考慮し得るように諸定数・係数を設定している<sup>17)</sup>.

⑤ エネルギー消費量

各システムごとのエネルギー消費量としては, 下水処理および逆送のエネルギーのみを算定し, 利水のための (浄水場での) 処理エネルギー等は除外している. 計算にあたり, 下水処理水の再利用を行うシステムでは, 再利用しないシステムより, より高度な処理をするものとして計算を行った. 図-4 (5) エネルギー消費量よりわ



かるように、高度の再利用型システムほどエネルギー消費量は大となる。これに利水のための処理エネルギー等を加えると、さらにこの傾向は強まる。図-4 (10) には、単位水量当たりのエネルギー消費量を示した。

⑥ 水質事故に対する安全性

図-4 (6) に示されるように、循環利用型システム (A, E~H) では、水質事故に対する安全性は低い。また逆送システムである F~H では、下流の都市で水質事故が発生すると、上流での供給が阻害される事態が生じ得る。

⑦ 計画規模以上の渇水に対する安全性

図-4 (7) には上段に供給が必要を下回る半旬数、中段に不足量および不足 % (半旬)、下段に総不足量 (%) および (不足量総量) / (供給総量) を示している。これより、ケース 1 および 2 では、開放系として再利用を行うシステムほど、量的にみた安全性は高いことがわかる。しかし、ケース 3 では各システムの安全性はほぼ同じである。ただし、この計算においては、ケース・スタディを実施しつつある猪名川の実流況 (計画渇水年) より流量波形を定め、渇水流況を与えた。確率評価された計画流況 (渇水持続曲線、累加流量曲線) を用いた検討も行っているが、ほぼ同様の結果を得ている。図-6 には、上流端流量  $Q^*$  と各システムでの水不足量との関係を示した。横軸が上流端流量  $Q^*$ 、縦軸に  $Q^*$  のもとで各システムが水利用に供給し得る水量  $Q_c$  を示している。たとえば、システム B, C, D では、計画水需要量  $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$  を供給するためには、 $Q^*$  が  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$  以上 (このうち  $0.3$  は維持流量  $Q_M$ ) が必要であることを示している。

⑧ 水供給容量と利用効率

上流端流量を 1 単位 ( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) としたときの水量のみでみた供給可能限度量は、理論的には式 (7) で示される等比級数の和 (繰返し利用量の算定) として表わされる。図-4 (8) 容量と利用効率には、現実の利水実態に基づいて、1 回戻しの場合の容量をコップのボリュームで示している。これより高度の再利用型システムでは、

理論的な容量はきわめて大となることがわかる。しかし、図-4 (2) および (5) に示すように、水質や費用・エネルギーは悪化あるいは増大していく。極限利用状況での利用効率  $\omega$  を数字で示したが、一過型のシステム (B, C, D) から伝統的システム A およびシステム E の  $1.26$ 、高度の再利用システム (F, G, H) の  $3.5$  まで変化する。新規開発効率もこの値に一致する。表-4 に、1 回戻しの場合についての各システムの極限容量および利用効率の算定式を対比して示した。

以上の考察においては、各指標間のトレード・オフ (たとえば水量的には十分であっても水質的には利水の対象にならず、したがって、多元給水を行ってもその全量を利用できないといったような事柄) についての詳細な分析と考察は省略したが、開放系としての各種取排水システムの特性が浮び上がってきたと思われる。

b) 総括的な考察

図-4 に示した結果を総括するにあたり、考察を容易にするために、次のような作業仮説を設定する。

- (i) 流域の取排水システムは、自然発生的なシステム A から始まり、水質 (取水水質、河川水質) 制約の台頭により、B あるいは C を経て D, E に移行する。システム B, C は一過型のシステムであり、実質上“水質の消費”と水の“量的な消費”が等価と見なされる。
- (ii) さらに利用率の向上した状況下では、水量の確保という要請 (水需要の増大などによる水需給のひっ迫) により、“水質の消費と復元”を指向したシステム F~H へと移行する。

以上の仮説に従ってながめると、河川水量については一度悪化した後 (システム D まで)、再び改良されていく。逆に河川水質 (ケース 2) でみると、一度よくなった後に (システム D まで) 再び悪くなる。汚濁負荷の排出量は河川流量と同じ経緯をたどる。利水関連費用についてみると、システムの移行に伴い、新規施設の capital cost と running cost は、規模の経済のために経済的になった後再び費用増となる。ただし、システム間の移行の際に施設を廃棄する場合には、トータルの費用はまったくこれとは異なる。このとき、容量いっばいに水を供給するとして水コスト (= 総費用 / 総供給量) を求めると、処理費の増大などによりコスト高となる傾向にある。水質事故に対する安全性は、高くなった後再び低くなる。したがって総括的にいえば、伝統的システムから水質制約のための一過型のシステムを経て“水質の消費と復元”を指向するシステムに移行するにつれて、費用増・エネルギー消費増・水質事故に対する安全性の低下という犠牲のもとに、水供給容量・利水安全度・河川水量の増大が生じることになる。

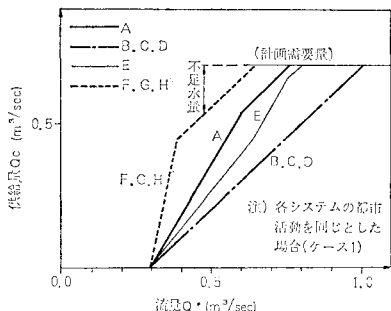


図-6 上流端流量  $Q^*$  と供給可能量との関係

以上は、水利用率の上昇とともに、開放系として循環再利用型のシステムに移行していくときにみられる基本的な特質である。

本節では河川を介した開放系のシステムに限定して分析を行ってきたが、開放系におけるカスケード的な水利用や、閉鎖系としての循環利用をも考慮に入れて、両者の利点を生かした形での総合的な流域のシステム作りが今後要請されると考えられる<sup>31)</sup>。

#### 4. 分析結果の水資源をめぐる今日的課題への応用

多くの流域において、水利用の高度化・複雑化に伴って、取排水システムの改変がすでに行われてきている。今後も種々の事情により、この傾向は避けることができないように思われる。すなわち、たとえば用水の水質を確保するために取水位置を上流とする広域水道の導入、河川水質をよくするための流域下水道の導入、さらには積極的な水質の復元による再生水資源開発計画などにより、新たなシステムの構築が行われるものと考えられる。

以下では、そのようなシステムの改変に付随した問題を取り上げ、上述の結果をもとにして2, 3の考察を行ってみたい。

システム間の移行に伴う問題としては、次のようなものが挙げられる。

- ① システム間の移行方式の選択、および他の代替水資源開発との費用便益比較。
- ② システム間の移行に伴う利水安全度の構造的な変化。
- ③ 特定用水の還元を見込まない現在の利水計画方式から見込む方式に移るとした場合の問題。
- ④ 水利用率の向上に伴って超過渇水が構造的に深刻化することが知られており<sup>13), 21)</sup>、計画時点で超過渇水をあらかじめ考慮しておくことがますます重要となってきた。したがって、耐渇水法を取排水システムの評価に関する問題。

①の分析では、図-4(4) 利水費用、(8) 容量と利用効率の指標に主として着目する。  
 ②の分析では 図-4(7) 計画規模を超える渇水に対する安全性の指標に主として着目し他の指標については周辺条件として考慮す

る。

③の分析では 図-4(1) 流量変化の指標に主として着目する。また、④の分析は、①~③の分析を考慮に入れて、耐渇水性の取排水システム形態を定めようとするものであり、平常時と超過渇水時の諸量を同時に取り扱う費用便益分析を行うことを最終目標としている。

①~③の分析については、上述の分析結果を用いることにより検討が可能であり、以下にその結果を述べる。④の分析については渇水被害等の別途の検討が必要であり、これについては利水安全度の見方とあわせて次の機会に独立させて報告することにした。

#### (1) 水需要増に対処するためのシステム間の移行方式(水質の復元による水開発)

水質の復元による水資源の開発(たとえば下水処理水を工業用水として供給したり、農水や河川維持用水を振り替えることにより都市用水を開発することなど)が議論され始めており、わが国においてもいくつかの事例がある。また今村(1979)ら<sup>18), 30)</sup>により、諸外国の実例が紹介されている。以下では、そのような問題をシステム間の移行による水資源の開発という観点からとらえてみる。

図-7に水需要の増大と水供給容量との関係を模式化して示す。通常の水供給容量の増大は、図-7(a)に示すような複数の施設(ダム・導水・再生水資源など)によって、段階的な規模の拡張が行われる。①の分析で考察する事柄は“代替施設の選択”、および“水供給容量の増大方式”である。水供給容量の増大方式には、段

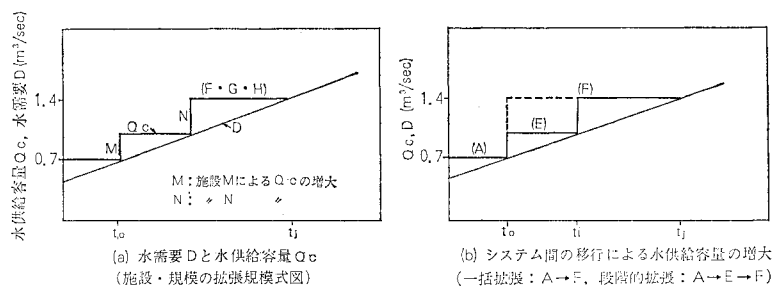


図-7 施設・規模の拡張(システム間の移行)

表-5 システム間の移行形式

(a) 現状の施設を捨てずに移行	(b) 現状の施設を捨てて移行
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 二元給水・再生利用で供給量増加 新設される施設</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 一元給水一回利用が循環利用に転化することで供給容量が増加。</li> </ul>
① A → E → F WT, RK	⑦ B → (A) (ST → S-1, S-2)
② A → E → H WT, RS-1	• システムの構造の変化(たとえば都市1と2の比)により供給容量が増加。
③ B → G WT, RST	⑥ E → (A)
④ C → E → F W-1, W-2, RK	WT-2の水量の減少によりシステム全体の供給容量が増加。
⑤ C → E → H W-1, W-2, RS-1, RS-2	
⑥ D → G W-1, W-2, RST	

階的な拡張と一括拡張方式がある(図-7(b)参照)。

表-5には、水供給容量の増大を取排水システムの改変のみによとした場合に、現状の施設を生かしながら移行する方式を示した。たとえば、A→E→Fというシステム間の移行には、施設の廃棄はない。

水開発手段としてダム等の施設によるか、あるいはシステム間の移行によるかを比較する方法として、効率性の面からは費用便益分析が用いられる。同様に、AからFのシステムに移行するとして、A→E→Fという段階的な拡張と、A→Fという一括拡張があり、この場合にも費用便益分析を用いることができる<sup>29)</sup>。

(2) システム間の移行による構造的な利水安全度の変化

取排水システムの形態、および水利方式と利水安全度の関係について考察する。これは、一つには各取排水システムの水供給容量の違いを明らかにしたいためである。さらに、最近では計画超過渇水が地域社会に大きなインパクトを与えており、利水安全度についても整理しておくことが重要と考えられるからである。利水安全度の評価方法は種々のものがあるが、ここではそのような方法の一つである水不足 %・day (あるいは %・半月) 指標により、システムの利水安全度(耐渇水性)について考察を加えることにする。

各システムの利水安全度については、図-4(7)計画規模を超える渇水に対する安全性において、水利形態をケース2,3として算定した結果を示した。その結果から、極限容量に対応する水利用時(ケース3)には、計画超過渇水に対する安全度は各システム共通となることが知られた。しかし、現実の水利用は、必ずしも各システムの極限容量での取水は行われていないことから、各システムの利水安全度に差異がある。そして、この利水安全度の差異は、容量と取水量の差によっており、現状の安全度を保持するか、安全度を現状より下げて供給量を増すかといった検討も、取排水システムと利水を考えるうえで重要と考えられる。

図-8には、各システムの水供給容量と水利用量の関係を示した。同図では、都市の規模は共通(ケース1,2)としているが、各システムの極限容量(最上流端における必要確保流量を示す図-6から考えればよい)は異なっていることが示されている。

図-8より、次のようなことが明らかになる。

- ① 各システムのもので、都市の規模を同じとすると、各システムの水供給容量から取水量と河川維持流量を引いた量として定義される構造的な利水安全度に差が生じる。したがって、このために各システムごとに超過渇水の深刻さの程度が異なる。

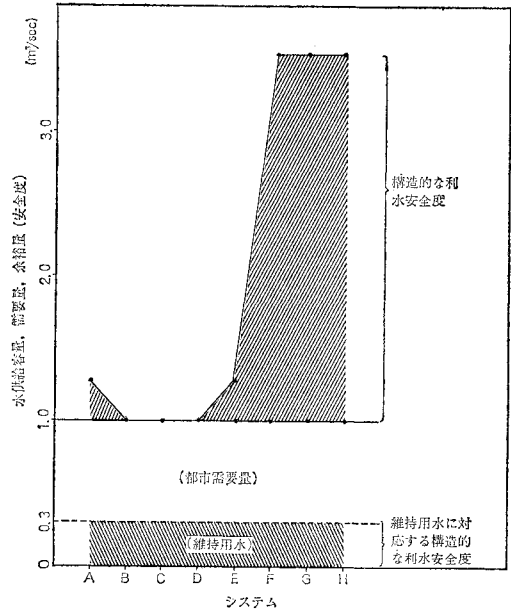


図-8 構造的な利水安全度

- ② たとえば、システムAでは、供給容量が1.26 m³/sであるが、都市の規模を各システム共通の0.7 m³/sとすれば、その差分だけの構造的な利水安全度が高いことになる。一方、システムB,Cでは、このような利水安全度は有していない。またシステムD~Hについても、同様な利水安全度を有している。
- ③ 各システムの極限容量に対応した都市の規模のもとで水利用が行われ、そのような条件下での渇水の深刻さを %・day 指標 (severity method) でみるとすべて同じとなる。
- ④ ただし、③については“severity method”でみた場合であるが、渇水被害による方法でみた場合には、その程度は異なる。これは水不足 %・日と渇水被害が非線形の関係にあることによる<sup>30)</sup>。
- ⑤ 以上の考察では、超過渇水時に河川維持用水を他の用水に振り向けることを考えていないが、これを行った場合には、維持流量に相当した構造的な利水安全度の上昇が期待されることになる。

(3) 還元を見込んだ利水計画の特性

用水の還元を見込んだ場合と見込まない場合の利水計画の特性を、システムA, B, C, Dを例として考察する。

この分析は、図-4(1)河川流量、(7)計画規模を超える渇水に対する安全性および(8)水供給容量に着目することにより可能であり、これらをもとにして次のようなことが明らかとなる。

- ① 都市用水の還元量を見込まなければ、計画上は、

システム A は B~D と等価な利水安全度を有する形態と見なされる。

- ② しかし、ダムからの放流がある基準点での確保流量に基づいて行われる場合には、上流都市からの還元がその基準点で観測されるために放流量が少なくすみ、システム A はその基準点までに還元する水量に相当する分だけシステム B~D に比較して余裕がある。このために、現実の利水安全度はシステム B~D に比較して高い。
- ③ システム A では、用水の還元量を見込む利水形態への移行が可能であるが、B~D については、水が河川をバイパスするために、それが可能ではない。すなわち、システム A では還元を見込む利水計画に移行することにより、新たな水が計画論上生み出されることになる。しかし、システム A においてすでに還元水を見込んで水管理が行われ、それに相当する需要が発生している場合にはこの限りでない。
- ④ 以上よりわかるように、現行の利水計画においては、河川維持用水を設定し、また還元量を見込まないことにより、利水の安全度が確保されている。したがって、単に効率性といった限られた観点からこれを否定することは必ずしも適切ではないと考えられる。

## 5. 結 語

流域内の取排水システムの特性分析を行い、取排水システムのデザインのための基本事項を整理し、各種システムの特質を明らかにした。本論文の主要な検討事項と結論は以下のとおりである。

- ① 流域の取排水システム（特に都市用水に着目）を 8 つの基本的なタイプに類型化した。
- ② 8 つの基本的システムの特性を多角的な指標を用いて分析した。
- ③ 各取排水システムが本質的に内包する特性を明らかにし、システムの改変（システム間の移行）に伴って生じる利害得失を明らかにした。
- ④ システム間の移行による（水質の復元による）水資源の開発方式、それに伴う利水安全度の変化、還元を見込んだ利水計画といった今日的な課題について考察し、定量的な知見を得た。

本論文では、基本方針として流域内の水利用は流域内でクローズすることが望ましいとする立場をとったが、多くの流域ですでに広域利水が行われている。また、多様な水供給施設が存在している。そのような流域における水資源計画については、筆者らの文献 1), 2), 5) を参照していただきたい。

今後の課題としては、開放系・閉鎖系の取排水システムの比較分析、さらには両者におけるカスケード的な水利用を考慮した分析、超過渇水を考慮した水資源計画についての検討、渇水被害の計測についての検討、水開発における先発・後発の問題とそれらのもとの水管理についての検討などがあり、これらについては現在検討中であり、次の機会に報告する予定である。

最後に、本文で述べた取排水システムの研究に対して、土木研究所下水道部の中村・大島・酒井研究員にお集りいただいてご議論をお願いし有益なご指摘をいただいた。また、水資源開発研究室の今村室長、中村・大内研究員、ダム水工研究室 石川研究員、総合治水研究室 山口室長(当時)、建設省の水循環・水利用に関する研究グループの方々からご指導と助言をいただいた。さらに、本調査は建設省近畿地方建設局河川計画課・企画課との共同研究であり、調査の便宜を図っていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 吉川勝秀ほか：流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究，土木学会論文報告集，No. 269, 1978.
- 2) 吉川勝秀・関 正和：流域の総合的な水資源の管理に関する研究，土木学会論文報告集，No. 287, 1979.
- 3) 建設省土木研究所ほか：利水計画における流況把握の研究，第 23 回建設省技術研究会報告，1970.
- 4) 岡本雅美：水田農業用水の計画需要量の推定法，水利科学，No. 91, Vol. 17, 1973.
- 5) 浜口達男・前田 諭：再生水資源開発に関する基本的考察，第 30 回建設省技術研究会報告，1976.
- 6) 科学技術庁資源調査所：都市における水代謝系の構造と容量，同所資料第 47 回，1977.
- 7) 国土庁水資源局：水資源賦存量調査について，1976.
- 8) 建設省河川局：河川の流水管理システムに関する研究，第 30 回建設省技術研究会報告，1976.
- 9) 建設省河川局：水循環と水利用に関する研究，第 32 回建設省技術研究会報告，1978.
- 10) 市川正己：流域の水収支について，地理，No. 10, 1968.
- 11) 金子 良：水収支特性の地形別類型 (I)~(IV)，水利科学，No. 73~75, 77~79, 1970~72.
- 12) 奈良県：奈良盆地の地下水資源，1974.
- 13) 建設省土木研究所：渇水時の水管理に関する計画学的研究，土研資料第 1508 号，1979.
- 14) 合田 健ほか：工業用水計画における水量・水質配分について，土木学会論文報告集，No. 134, 1966.
- 15) 山口高志・吉川勝秀・興石 洋：河川の水質・汚濁負荷量に関する水文学的研究，土木学会論文報告集，No. 293, 1980.
- 16) Robert, E.B. and R.M. Hagen (吉里・齊藤訳)：Explore the "Energy Economics" of Waste Water Treatment and Reuse, California Water Pollution Control Association, 1980 (月刊下水道 Vol. 2, No. 1, 1978).
- 17) 建設省土木研究所：流域の取排水システムに関する調査，総合治水研究室資料，1977.
- 18) 土木学会編：下水道の今日的展望，土木学会誌，No. 64-7, 1979.
- 19) 友野勝義：水道における拡張事業規模の経済，水道協会雑誌，No. 519, 1977.

- 20) 山口高志・吉川勝秀・角田 学：治水計画の策定および評価に関する研究（I），土木研究所報告（投稿中）。
- 21) 浜口達男：利水安全度からみた貯水池容量の決定方法に関する考察，第 31 回建設省技術研究会報告，1977。
- 22) 広瀬利雄：水資源開発における利水の安全度について（1），（2），水温の研究，Vol. 14, No. 5, 6, 1971。
- 23) 建設省近畿地方建設局：阪神圏における再生水資源開発に関する調査報告書（その 2），1976。
- 24) 末石富太郎：用途別給水計画の研究，水道協会雑誌，No. 436, 1971。
- 25) 建設省関東地方建設局：広域水機構管理調査報告書，1976。
- 26) 丹保憲二：都市・地域水代謝システムの構造と容量，水道協会雑誌，No. 497, 1976。
- 27) 建設省近畿地方建設局：都市排水の質的制御システムに関する調査報告書，1975。
- 28) 山口高志・吉川勝秀：流域の取排水システムに関する 2, 3 の考察，土木技術資料，Vol. 21, No. 9, 1979。
- 30) 建設省土木研究所下水道部：アメリカ合衆国における下水処理水再利用の現状，土木研究所資料第 1161 号，1976。
- 31) 加藤 進：資源からの発想，中公新書，1979。
- 32) 藤吉三郎：利水の安全度に関する二，三の考察，土木学会誌，Vol. 56-11, 1971。
- 33) 広田泰久：利水の安全度について，第 24 回建設省技術研究会報告，1972。
- 34) 中川芳一：利水安全度の評価について，NSC 年報，Vol. 6, No. 2, 1979。
- 35) 科学技術庁資源調査会：水資源の利用における水質問題と水資制御に関する調査報告，同所報告第 72 号，1975。
- 36) 建設省近畿地方建設局：低水管理と利水計画に関する調査，1977。

（1979.9.25・受付）