

# (27) 下水道整備計画に関するシステム論的研究 X

——とくに水環境汚染防止から利水へのシステムズ・アプローチ——

㈱日本水道コンサルタント 萩原 良 巳

他 9 名

## 1. はじめに

現在における環境問題は、経済活動の拡大が環境破壊をひきおこし、この両者がトレード・オフの関係になっていることに起因すると考えられる。日本Cの下水道整備計画に関するシステム論的研究グループは、上述の認識から、水環境計画策定の基本方針として（人間活動の結果としての）放出負荷量の自然システムへのインパクトを極力少なくし、地域経済活動計画と水環境計画を並列的に取扱うべきであるという立場より下水道計画を媒介として地域における水環境計画へ接近した。つまり、水環境計画の結果が地域経済活動計画の制約もしくは変更を要請する動機となりうることを評論家の立場ではなく土木技術者として、参考文献1)～9)で示されるモデルを通して実証しようと、この5年間、試みた。この種の研究は年々その領域が拡大していくものであり、終りもない。したがって、システム論的研究グループの代表として著者は、今までの研究を整理し、グループの考えを提示し、今後のシステム論的研究の発展のための準備を本稿で行なうこととする。このため、まず2.において、地域における治水を除く水環境計画プロセスの提案を行ない、ついで3.において、本システム論的研究I～Xの整理を行なう。そして、4.で本研究の結論を述べ、将来の展望について言及することとする。なお、以下において、対象としては地域を取扱うこととする。これは、土木工学が地域を構成する風土とそれにはぐくまれた人情を無視して考えられないためである。

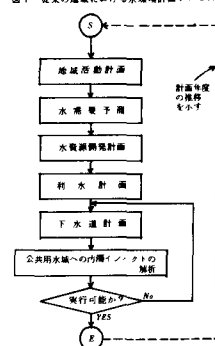
## 2. 地域における水環境計画プロセス<sup>19)</sup>

従来の地域・都市計画においては、経済成長を目的とし、水を自由財と認識してきたため、地域における水は計画要素というよりは、計画の入出力として取扱われてきた。つまり、計画入力としては十分な豊富さを仮定され、計画出力としては汚染物質、廃棄物の無限の器と仮定されつづけてきた。この結果は当然のことながら水環境のひどい汚染である。自然システムへの放出負荷量を最小あるいは自然の浄化力のうちに抑えるためには、必然的に水需要の抑制を考案しなければならない。自然システムへのインパクトを極力小さくするためには、地域の利水量を需要に応じて拡大するのではなく、その地域の公共用水域の容量（原理的にはこれは0）と水利システム、とくに下水道施設に関連させて拡大（もしくは縮小）しなければならない。したがって図.1に示すような、従来の地域活動レベルによる水需要予測の結果としての直列的な水資源開発計画や利水計画から、この需要予測と公共用水域の容量ならびに下水道整備（処理）レベルを同時に考慮した水資源開発計画や利水計画に転換していかなければならない。このとき、公共用水域の容量と下水道施設の容量により許容される利水量と需要量のギャップが当然予想される。こうしたとき、末石の提案するインプラント・サイクルなどを構築していくことが予想される。

こうして、公共用水域への汚濁インパクトを最小化する、あるいはその容量を十分越えないことを制約とした下水道整備計画の研究や下水道整備レベルをパラメータとした負荷あるいは水資源の地域配分計画の研究が要請されるようになってきた。そして、これらの研究の結果と地域活動予測レベルの結果としての水需要予測値を比較し、水資源開発を行なうべきか、水循環をもとにして地域構造を変革し、節水型に移行させるかなどの選択が重要な問題となってきた。こうして、これらの結果、利水計画がスタートすることとなる。

以上のことから、図.1にかかわる水環境計画プロセスとして図.2をうる。図.2の特長は、水計画あるいは水環境計画が、地域活動計画にフィードバックされ、水環境計画と地域活動計画とが相補的關係にあることを

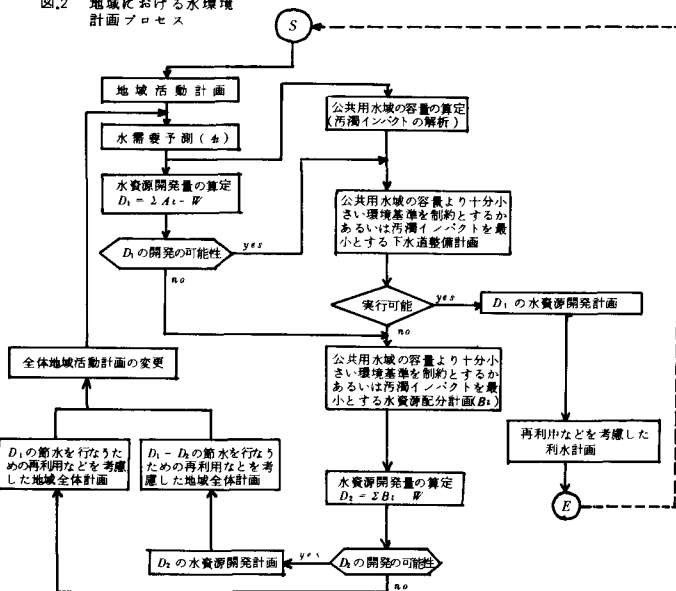
図1 従来の地域における水環境計画プロセス



示している点である。また、水資源配分計画は、公共用水域の容量より十分小さい環境基準を制約とすか、あるいは公共用水域への汚濁インパクトを極力小さくするという目的に沿って考え、利水計画もリサイクルを考慮して考案されるべきことを示している。

図.2のような水環境計画プロセスは利水計画に至るまでに地域活動計画へのフィードバックを有しているため、図.1のプロセスよりは安定である。そして、地域活動を、地域の水環境の中で閉じていると見なしている点が大きな特長である。本研究シリーズは、このような立場を基本として下水道計画を媒介に水環境計画への接近を試みたものである。

図.2 地域における水環境計画プロセス



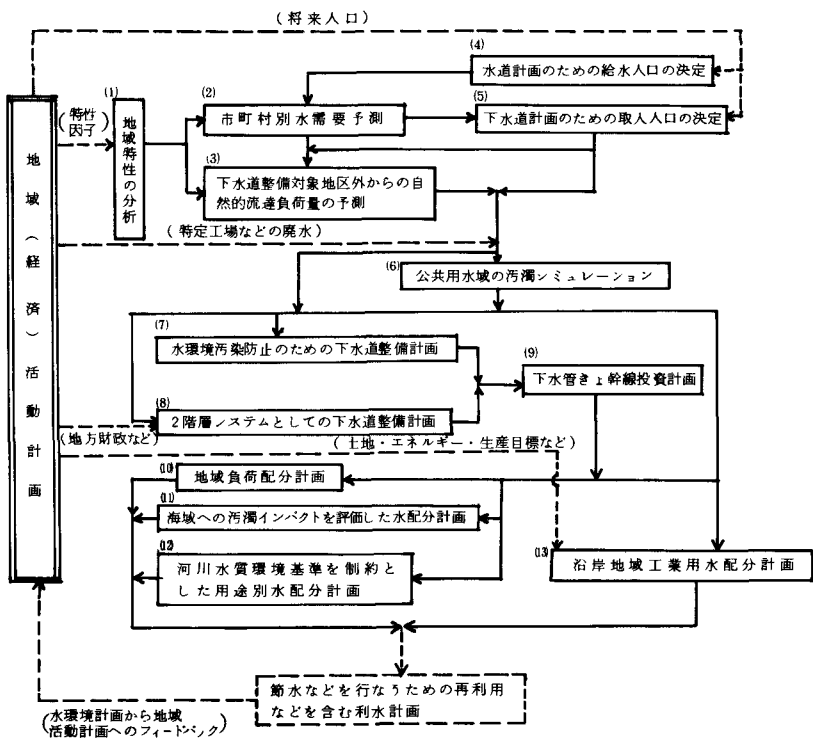
(注) ①は地域単位を表し、Bは現在までの水資源開発量を示すものとする。  
②から⑤への点線のフィードバックはある計画年度からある計画年度への時間の推移を示す。  
⑥水の再利用などの計画は、ある地域のみで考えられる場合も、複数の地域を対象として考えられる場合もある。

つぎに本システム論的研究シリーズの目的と構成について述べることにする。

### 3. 下水道整備計画に関するシステム論的研究の目的と構成<sup>19)</sup>

本システム論的研究の基本的立場は、公共用水域の汚染をくいとめるためには、地域における水環境を開放型システムではなく閉鎖型システムとして認識することにある。そして本研究の目的は従来の地域活動計画→利水→水環境汚染防止という開放型の計画プロセスの流れを水環境汚染防止から利水あるいは地域活動計画という流れに変え、閉鎖型とし、このように計画プロセスを変革することが、真に水環境を保全するために必要であり、かつ重要であることを種々の数学モデルを通して実証することであった。そして、この目的に沿って、下水道整備計

図.3 本研究における水環境汚染防止から利水へのシステムズ・アプローチ



画に関するシステム論的研究Ⅰ～Ⅴの関連を示したものが図.3である。図.3は、本研究討論会で発表した論文のみに限定して作成した図であり、われわれは、これを完成した計画プロセスとは思っていないことを断わっておく。

図.3と図.2の考え方は基本的には、まったく同じであるが、異なる点は、後者に水資源開発計画と再利用などを含む利水計画が含まれていることである。これらの要素を組込んで、はじめて、われわれの考えている水環境汚染防止から利水、ひいては地域活動計画に至る計画プロセスが完成するものと思われる。

図.3では地域活動計画により将来人口、地域の特性因子、特定工場などからの廃水、地方財政、エネルギー制約などの入力を得る。そして、計画プロセスの構成サブ・システムより、自然システムの容量より十分小さい水質環境基準を制約とするか、この容量に対する汚濁インパクトを最小にする許容水資源配分結果あるいは負荷配分結果が得られる。この結果、将来の水需要量と水環境からみて許容できる水配分の大小あるいは負荷配分の大小を比較し、たとえば節水型地域活動計画をとるよう地域活動計画の変更を求めることとなる。以上が、地域活動計画と本研究の構成サブ・システムとの関連であるが、つぎに各構成サブ・システムならびにサブ・システム間の関連について言及することとする。

(1)地域特性の分析<sup>4) 11)</sup>：地域における水環境計画を策定するに際し、地域特性が鋭敏に反映されるのは計画の入力である。ところで一口に地域と言っても種々の地域があり、しかも地域の特性を表わす要因は非常に数多い。しかも、これらの要因間には独立したもの、相関をもつものが混在している。このため基準バリエーション法による軸の回転も含む主成分分析により互いに無相関な総合特性値を求め、これにより地域の分類、要因の分類を行なった。この分析結果は水資源配分計画における下水道整備レベル決定の情報を与える。

(2)市町村別水需要予測<sup>4) 17)</sup>：(1)の結果をうけて、分類した市町村群ごとに、分類された要因群から統計的検定などをもとにして説明変数を取捨選択し、水需要量の重回帰分析による構造式を作成した。水需要構造のこのような分析結果は下水道整備計画における発生活水量の予測のための情報を与え、水資源配分計画の結果と予測値を比較することにより節水型地域構造の変革を地域活動計画に要請することとなる。なお、本システム論的研究では水需要予測法の1例しか示さなかったが、われわれのグループでは、判別関数法を付加した場合<sup>13)</sup>、市町村間の影響をイクスプリシットにした場合<sup>14)</sup>、計量経済学的接近<sup>15)</sup>、システムダイナミックスによる接近、実態調査による方法<sup>16)</sup>などによる水需要予測法を考案している。

(3)自然的流達負荷量の予測<sup>4) 11) 17)</sup>：(1)と同様な分析結果をうけて、分類した支流域ごとに、説明変数を取捨選択し、重回帰分析による構造式を作成した。この分析は公共用水域の汚濁シミュレーションの入力情報となるとともに下水道整備計画、水資源配分計画、負荷配分計画における公共用水域での状態方程式の要素となる。目的にもよるが流達負荷量構造分析の物理モデルからの接近の重要性を強調しすぎることはない。

(4)水道計画のための給水人口の決定<sup>9)</sup>：地域における水環境計画を策定する場合、最初に問題となるのが対象とする地域における人口の取扱いである。これは人口が地域計画のフレームとして極めて重要な意味をもっているためである。ところで人口が人口学的方程式（人口( $t$ )=人口( $t-1$ )+自然増減+社会増減）によって予測されるにしても、この予測値を何ら評価することなく計画目標値として使用する場合は多く見受けられる。(2)(3)についても言えることであるが、予測は計画プロセスシステムの入力であり、入力情報として生かすためには予測値を計画目標にするための評価がともなわなければならない。したがって本サブ・システムでは計画人口決定のための評価モデルとして不完全情報下におけるゲーム論的モデルを提示した。

(5)下水道計画のための取入人口の決定<sup>10)</sup>：(4)と同様。ただし、(4)(5)は浄水場、下水処理場の規模決定問題を解いていることとなる。とくに(5)では計画の安全率を貨幣価値で評価しうることも示した。

(6)公共用水域の汚濁シミュレーション<sup>5) 8)</sup>：地域活動計画の結果、多くの廃水が公共用水域に放出される。そして、公共用水域で自浄作用がある場合、普通には一次反応形式の状態方程式が作成される。しかし計画の安全側より自浄作用がないと考えれば、質量保存則が成立し河川の汚濁状態は上流より下流への汚濁物と流量の積分比で表現することができる。しかし沿岸海域では潮汐現象などによる潮流変化が激しく分子拡

散より移流拡散が卓越する。このため地域活動計画の結果としての沿岸海域への汚濁インパクトを検討・吟味しておくことが必要となる。以上のことから、本サブ・システムでは渦度・流れ関数・渦方程式・連続式そして拡散方程式を用いた潮流・汚濁シミュレーションを行なった。このとき、ある投入点から単位負荷量を投入したときのある基準点に対するインパクトマトリックスも作成した。以上の結果、沿岸海域の容量を0とすれば、当然のことながら地域活動計画の実現は不可能となる。つまり、自然保護と活動がトレードオフの関係になる。しかし、すべての活動を停止することは不可能であるので、沿岸海域の容量より十分小さな投入負荷が考えられるものとする。こうして、本サブ・システムは水配分計画や負荷配分計画の制約条件となる。また、負荷配分計画の結果、ある流域河口の放出負荷量が計画値以下に抑えうることがわかっている場合、海域への汚濁インパクトを最小化する行為も考えられる。

(7)水環境汚染防止のための下水道整備計画<sup>1)</sup><sup>17)</sup>：下水道施設は水環境汚染防止のためだけでなく都市施設として衛生上必要なものである。しかし、最近の公共用水域の汚染には目に余るものがあり、ここでは水環境汚染防止に力点をおく。まず(6)より計画目標年度における対象流域河川の河口での海域への放出許容負荷量が与えられており、河川上のいくつかの基準点を通過する負荷量が指定されているものとする。そして、計画初年度の基準点の水質状態が実測されているとし、下水道整備レベルと河川の汚濁負荷量を結合した状態方程式を作成した。そして種々の制約条件と評価関数を提示し、下水道整備レベルの年次計画モデルを制御プロセスとして定式化し、最大原理により実際河川を対象として解いた。なお、状態方程式の作成にあたって、(2)(3)の結果が情報として活用されている。こうして、計画目標年度に水質環境基準を満足するためには、いつ、どの地域に、どの程度の下水道整備を行なうべきかを明らかにした。

(8)2階層システムとしての下水道整備計画<sup>3)</sup>：(7)では、都市（あるいは地域）間の下水道整備における競合、調整の議論を行なわなかった。ここでは、広域な都市群を対象として、個々の行政体では不可能な下水道計画の統一・調整を記述する2階層システムモデルを提案した。このためまず、用途別地区を考慮した下水道整備計画を線形計画法によって定式化した。ただし、このモデルの目的関数は水質保全効果を最大にすることで決定変数は各行政体の用途地区別下水道整備レベルである。そして制約条件は各行政体固有のものと広域な全行政体にかかわる補助金の総額とした。ついで、このモデルを分解原理で解き、各行政体とその上位の行政体との間の情報交換を明らかにし、意志決定プロセスの模式的シミュレーションを行なった。

(9)下水管きょ幹線投資計画<sup>2)</sup>：(7)(8)は下水道整備のとくに面的整備に注目している。そこで(7)(8)の結果を入力として下水管きょ幹線投資計画を行なうことになる。とくに(7)で河川へのインパクトが境界条件となっているため、ここでは、投資効果指数という概念を定義し、幹線投資配分アルゴリズムを示した。

(10)地域負荷配分計画<sup>8)</sup>：このサブ・システムは本来(6)(7)(8)(9)の結果をうけて、つまり、下水道整備率と沿岸海域の許容水質状態を制約として、規定されるものであるが、問題点を明確化するため(9)の結果のみ使用し、生活ならびに工場の発生負荷量を決定変数とし、河川水質環境基準ならびに海域の水質環境基準そして、発生負荷量は現況以下という制約条件のもとに負荷配分問題を線形計画法で解いた。この結果、地域活動計画の水環境汚染の限界を提示する。

(11)海域への汚濁インパクトを評価した水配分計画<sup>7)</sup>：ここでの入力情報は(6)(7)(9)である。これらの入力をもとにほぼ(7)と同様な河川の汚濁負荷量、流量と水配分量とを結合した状態方程式を作成した。そして制約条件、評価関数を明らかにし、いつ、どの地域に、どれだけの水を配分するかという問題を制御プロセスとして定式化した。ついで、このモデルの最大原理による解法について言及し、このモデルの有効性を実証するため具体的な流域を対象とした事例研究を示した。

(12)河川水質環境基準を制約とした用途別水配分計画<sup>6)</sup>：ここでの入力情報は(11)とほぼ同じであるが(11)では河川の水質環境基準には触れなかった。そして、(11)では、どの用途の水が、どの地域に、どの程度配分されたか明らかにされていない。このため、需要量と許容配分量のギャップを再利用などを考慮した給水サイクルを計画して需要量を少なくすることによって、うめようとしても、どのような目的の給水サイクルを計画

してよいのか明らかでない。そこで、地域の用途別土地利用を考慮し、河川の水質環境基準などを制約として、水の各用途地区への配分問題を線形計画法によってモデル化した。そして、このモデルの有効性を実証するため、(Ⅱ)と同様(Ⅰ)の結果をうけた下水道整備レベルをパラメータとして実河川への適用を試みた。しかしながら、下水道整備レベルが100%にならないければ、水配分が行なえない流域を事例研究の対象として選んでしまった。この結果、下水道整備が完備していない地域には水配分を行なうべきでないことを強調するとともに、地域活動計画の結果のみの給水計画を行なうべきでないことを示唆した。

(Ⅲ)沿岸地域工業用水配分計画<sup>8)12)</sup>：ここでは(Ⅵ)の結果をうけて、沿岸部における工場立地と工業用水配分計画を考察した。これは、従来の計画が、地域経済活動計画の経済的最適化の結果として策定され、これを受けて、環境インパクトアセスメントを行なうという、どちらかと言えば水環境面が後手に回っていることを批判し、水環境面の経済活動への制約化もしくは内部化を主張するためのモデルである。このため、エネルギーや土地、あるいは給水可能量、生産目標などの制約とともに沿岸海域の水質環境基準を制約として地域所得の最大化を目的として複数業種の立地と水配分問題を線形計画問題として取扱った。

以上のサブ・システムの負荷量は河川ではBOD、海域ではCODを用いている。

#### 4. 下水道整備計画に関するシステム論的研究の結論

すでに述べたように、本システム論的研究の目的は、地域活動計画策定後の利水から水環境汚染防止という開放型の水環境計画プロセスの流れを、下水道を媒介として、水環境汚染防止から利水そして地域活動計画策定という流れにかえ、閉鎖型とし、このように計画プロセスを変革することが、真に地域水環境を保全するために必要であり重要であることを実証することである。こうして図3に示すような水環境汚染防止から利水へのシステムズ・アプローチを本討論会で発表した論文のみに限定して提案した。この結果、自然システムの容量を原理的に0とすることはできても、現実的には不可能であるので、これに対する汚濁インパクトを最小化もしくは一定値以下におさめる水資源配分計画や負荷配分計画あるいは工場立地計画がモデル上実行可能であることが実証できた。こうして地域活動計画への水環境計画からのフィードバックが可能であることを示唆できた。ただ残念なことには(Ⅰ)～(Ⅲ)の研究の事例対象地域が同一でないこと、(Ⅶ)(Ⅷ)の研究では数学的制約がきつくと、たとえば原理的に解けても実際に解けない場合が多かったこと、さらに(Ⅱ)では時間軸上における最適性が保障されなかったことを断わっておく。また、本研究では、地域活動計画への具体的な働きかけの方法が明確ではない。したがって、われわれのグループは必然的に一方は水の流れ場の現象面へ、また一方は社会工学あるいは経済学へ接近することとなる。なお、われわれ土木技術者の取扱うシステムは、入力ならびにかく乱項の制御がきわめて困難で、このことが他の工学で取扱うシステムと著しい差異をなす。このため地域の風土・人情を今後強調していく必要がある。

#### 5. おわりに

下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅰ～Ⅹの共同研究者は代表である萩原良巳を除いて以下に示す9名である。日水C：堤武・平野栄一・小泉明・中川芳一・上田育世・高橋邦夫・辻本善博、イリノイ大学大学院：中村正久、上智大学大学院：萩原清子

本研究の遂行にあたり有形・無形の御指導ならびに御教示をうけた以下に示す諸先生方に謝意を表します。京都大学工学部土木工学教室：岩佐義朗教授・吉川和広教授、同衛生工学教室：住友恒助教授、同化学工学教室：高松武一郎教授、大阪大学工学部環境工学教室：末石富太郎教授、国立公害研究所：内藤正明先生とくに吉川教授からは全体の御指導をうけ、岩佐教授からは水に対する土木技術者の立場、そして末石教授からは環境に対する観点の御教示をうけたことを断わっておきます。

最後に、本研究は、当社専務取締役 工博 海潤養之助先生の温かい御理解のもとで、はじめて遂行できたことを明らかにしておきます。

## 参考文献

- 1)堤武・萩原良巳・中村正久：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅰーとくに河川汚濁と面整備についてー，土木学会第9回衛生工学研究討論会講演論文集，1973
- 2)堤武・平野栄一・中村正久・萩原良巳：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅱーとくに線整備についてー，土木学会第9回衛生工学研究討論会講演論文集，1973
- 3)萩原良巳・萩原清子：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅲーとくに国の調整機能の計量化と各都市のフィードバック情報についてー，土木学会第11回衛生工学研究討論会講演論文集，1975
- 4)萩原良巳・小泉明・中川芳一・高橋邦夫：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅳーとくに地域分析とマクロの計画入力についてー，土木学会第12回衛生工学研究討論会講演論文集，1976
- 5)萩原良巳・上田育世・中川芳一：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅴーとくに海の扱いについてー，土木学会第12回衛生工学研究討論会講演論文集，1976
- 6)萩原良巳・中川芳一：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅵーとくに水環境からみた流域水配分について，土木学会第12回衛生工学研究討論会講演論文集，1976
- 7)萩原良巳・中川芳一・辻本善博：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅶーとくに下水道整備率をパラメータとしたときの流域水配分についてー，本討論会で発表予定
- 8)萩原良巳・中川芳一・上田育世・辻本善博・萩原清子：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅷーとくに水質環境を考慮した地域負荷配分についてー，本討論会で発表予定
- 9)堤武・萩原良巳・小泉明・中川芳一・高橋邦夫：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅸーとくに計画人口の決定についてー，本討論会で発表予定
- 10)住友恒・山田淳・和田安彦・萩原良巳・中村正久：水道施設における余裕度の評価と分析，土木学会第6回土木計画学シンポジウム，1972
- 11)萩原良巳・中川芳一：地域における水環境計画のための流達負荷量の構造分析法に関する研究，土木学会第4回環境問題シンポジウム，1976
- 12)Hagihara, K. and Hagihara, Y. : *Water Resource Allocation Considering With The Impact On The Coastal Sea*, Proc. 13th Conf. The Japan Section of the Regional Science Association, 1976
- 13)西沢常彦・萩原良巳・小泉明：水需要予測モデルに関する考察(2)ー構造変化を考慮した場合ー，土木学会第31回年次学術講演会，1976
- 14)中川芳一・萩原良巳・小泉明：水需要予測モデルに関する考察(1)ー市町村間の影響を考慮した場合ー，土木学会第31回年次学術講演会，1976
- 15)萩原良巳・中川芳一・辻本善博・堀雅文・西沢常彦：水需給要因の統計解析とシミュレーション(未発表)
- 16)萩原良巳・小泉明・中川芳一・堀雅文・小玉桂子・黒川和美：アンケート調査をもとにしたミクロの上水の需要構造の分析，NSC研究年報 Vol. 4 No. 1，日水C，1976
- 17)堤武・萩原良巳：下水道整備計画システムに関する方法論的研究，NSC研究年報 Vol. 2 No. 2，日水C，1974
- 18)萩原良巳・小泉明・中川芳一：水利用計画に関するシステム論的研究，NSC研究年報 Vol. 4 No. 2，日水C，1976
- 19)萩原良巳：地域における水環境計画に関するシステム論的研究(未発表)