

都市用水における水経済構造分析

山本 勝・熊澤光正

経営工学科

(1978年9月25日受理)

The System Analysis of Urban Water Economic Structure by The Systems Dynamics Model

Masaru YAMAMOTO and Mitsumasa KUMAZAWA

Department of Management Engineering

(Received September 25, 1978)

In this paper we investigate the problems about The Urban Water Resource Service Systems in Japan. In accordance with the systems approach, we make these complex social problems clearer and analyze in detail from many aspects. Then it is shown that The Water Economic Subsystem will become more important in the future Urban Water Resource Service Systems. Hence, by applying the Systems Dynamics, we give the effective simulation model to assess the proposed water policy dynamically and totally. We apply the simulation model to the actual urban water resource service system in N-city. As the result, it is also shown that the total water dynamics model is proper and of use in deciding the ideal solutions for the future water economic problems.

1. はじめに

水は、人間を始めとしてあらゆる生物の生存にとって、欠くことの出来ない重要な資源である。地球は水の惑星と呼ばれるように、広範囲に水を存在させており、その中で水は自然界を循環し、その持つ多様な有効性が、我々の生活を維持していると言える。

水に対する人間の要求は、生理的なものからさらには農業への利用、エネルギー源としての利用、産業革命による経済への利用と拡大して来ている。近年、都市活動の増大、生活水準の向上・多様化によって水需要は飛躍的に増加しており、今後もこの傾向は続くものと予想される。このような水需要の増大に対して水供給は、自然流水の利用から、ダム等による高度利用化が進み、その需要をまかなって来たと言える。

しかしながら、一部の都市において水供給は、地理的にも経済的にも、その合理的限界を越えようとしている。また、大部分の都市においても、近い将来同様の事態が十分予想される。それにもかかわらず、この無秩序に増大する水需要に対して、水供給は公共性という名のもと

に、その経済性を無視し、数多くの環境問題・社会問題等を生じながらも、新たな水資源開発を進めようとしている。また、同様に水道料金に関しても、公共料金ゆえに低い水準におさえられていると言わねばならない。このため、各水道供給体は適正な経済バランスを失い、多額の負債を生じている。しかも、これらの諸問題はそれぞれが相互に関連しあった複雑な構造を、有していると言える。

本論文は、これらの水に関する諸問題に対して、全体的な立場より分析・評価を行うことを目的としている。そのため、まず2節においては、水資源の需給構造に関する諸問題について考察する。次に、これらの考察によって明らかにされた諸点に対して、3節において詳細な個別分析を行う。さらに4および5節において、今後最も重要になって来るとされる水経済問題に関して考察を行うと共に、本問題解決のための支援システムとして、ここでは、Systems Dynamics理論を用いたシミュレーションモデルを提案する。なお、これらの設計手順はFig. 1に示される。

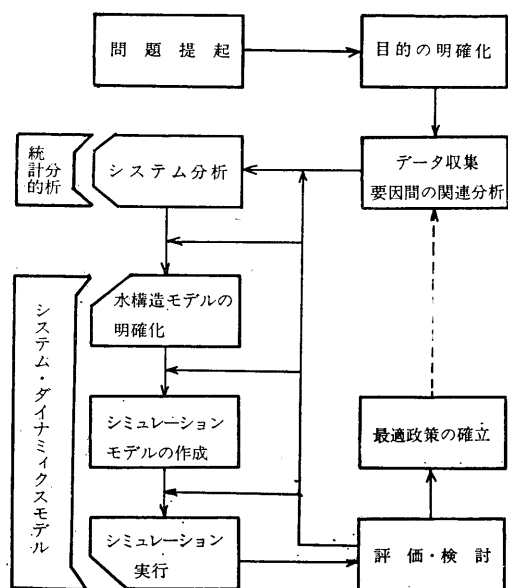


Fig. 1 The procedure of the system design for the regional water resource problems

2. 水の需給構造に関する諸問題

2-1 水資源利用における諸問題

昭和30年代以後の、急激な産業・経済の発展、人口の増大、生活水準の向上・多様化によって、水需要は急激に増大して来た。これに対して、供給側においては、ダム建設や水利用の合理化への指導を強めて来ている。この中で、工業用水および農業用水については、その水需要量は落ちつきを見せて来た。しかし、視点を生活用水に向けるならば、都市間の格差を伴いながらも、依然その増大傾向は変わっていない。

このため、各都市においては種々の問題が生じており、その深刻さは増大していると言わねばならない。これらの問題を整理するならば、以下の3点に集約されるであろう。

- (1) 水需給問題
- (2) 環境問題
- (3) 水経済問題

水需給問題は、その要因として i) 生活水準の向上・多様化、人口の増大、都市活動の拡大による需要の増大傾向、ii) 需要追従型の供給体制、の2点があげられる。

次に、環境問題について見るならば、生活用水の需要量の増大に伴う排水量の増大が、主たる要因となっている。これに対して、処理体制は市街地の拡大や処理要求量の増大と、膨大な建設あるいは処理コストのため、順調に進んでいるとは言い難い。このため、人口密集地域

においては、悪臭あるいは都市河川・港湾の汚染の問題を生じている。

最後に、水経済問題について見るならば、需要者側において従来の“水と空気はタダ”という概念から脱し切れず、水を公共料金として低水準におさえようとする圧力が強い。このような需要者側の考え方は、水資源供給における健全な運営・管理を妨げるものであり、この結果は水道事業の財政の悪化として顕著にあらわれて来ている。今後は、この水経済問題が各都市において、一層重要な課題となるものと思われる。

2-2 水経済構造における諸問題

水経済問題は、本論文においては、これを狭義にとらえる時は水財政問題をさし、広義においては、水にかかわるすべての問題解決のために必要とされる費用・投資を含む概念である。

現在、水道価格は公共料金体系の一部として位置づけられている。このため、水価格の決定にあたっては経済性以外に、政策および市民の水に対する意識が大きな要因を占めている。

このような体制のため、昭和50年度において日本の平均世帯における水支出は700円であり、全支出のわずか0.4%を占めているにすぎなかった。これに反して、水の供給者である各水道事業体は、Fig. 2からも明らかな

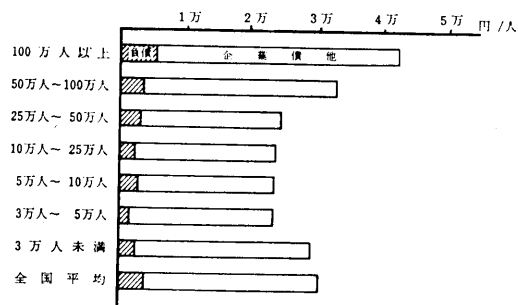


Fig. 2 The amount of debts per a head of water supply populations in the Water-Works Bureaus

ように、需要の増大の圧力を強くうけている大都市ほど大きな負債を生じている。このため、有収水量 1m^3 当りの平均費用68.79円（昭和50年）に占める支払利子は16.59円であり、減価償却費も含めれば原価全体の36.5%を占めている。また、水道原価自体も、人口100万人以上の都市では77.62円と平均をかなり上まわっている。

この原因として考えられるものとしては、前節において考察したように、無秩序に増大した水需要と、それに追従した供給体制がまずあげられる。それと同時に、水の「資源」としての有限性と有効性に対する認識の欠如

が、指摘されねばならない。これは、公共的であるべき水が、私的な利用に対して無制限な利用が、認められているためであると言える。

今日、水の利用にあたっては、その利用によって必然的に発生するであろう費用に対して、厳密に考察されねばならない時期に来ていると言わねばならない。

そのためには、各都市においては、水需要追従型の供給体制をあらため、市民参画による長期的・総合的および計画的な水需給計画作成が必要とされている。

3. 都市用水に関するシステム分析

水需給システムは、それ自身複雑な構造を有すると同時に、広汎な社会システムの一部を成している。そのため、この水需給システムを解析するにあたっては、前節において行った定性的分析と同時に、定量的な分析が不可欠である。従って本節においては特に、社会的要因・地理的要因・需要者の心理的要因について分析すると同時に、各都市固有の水経済問題について考察する。

3-1 水需要量の推移に関する分析

わが国における水需要量は、近年オイルショックの48年を除けば増大の一途をたどっている。昭和35年に給水人口3,649万人、一人一日当たり213 l (全国平均)であった供給量は、昭和45年には7,236万人、351 l 、更に昭和

50年には8,807万人、372 l と増大している。しかし、この増大傾向は全国一様なものではなく、大きな地域格差を伴っている。例えば、昭和45年および50年における一人当たりの供給量について見るならば、太平洋ベルト地帯の各都市が大きな値を示しており、また、緯度の高い都市ほど小さな値を示していることがわかる。しかし、このような傾向は一般的なものであり、各都市について見る場合、その固有の社会・環境・自然条件についても考慮する必要があるであろう。

3-2 都市用水における水需要量のパターン分析

都市用水需要の内容によって各都市を特徴別に分類するために、全国の53都市に対して主成分分析を用いて解析した。一般的に、水需要は家庭用水・業務用水等の10用途に細分されるが、本分析では、これに普及率・増加率等を加えて、以下の3つのケースにより分析を行った。

Case-1) 10用途の使用量、一人一日当たり使用量および普及率、Case-2) 4用途に大分類し、その構成比と一人一日当たり使用量と普及率、Case-3) 4用途の一人一日当たりの使用量と普及率等。上記の3ケースの内、ここでは特に Case-3 について、Fig. 3にその結果を示す。これにより、都市用水における需要量の内容により、各都市が5つのパターン分類されることが理解される。

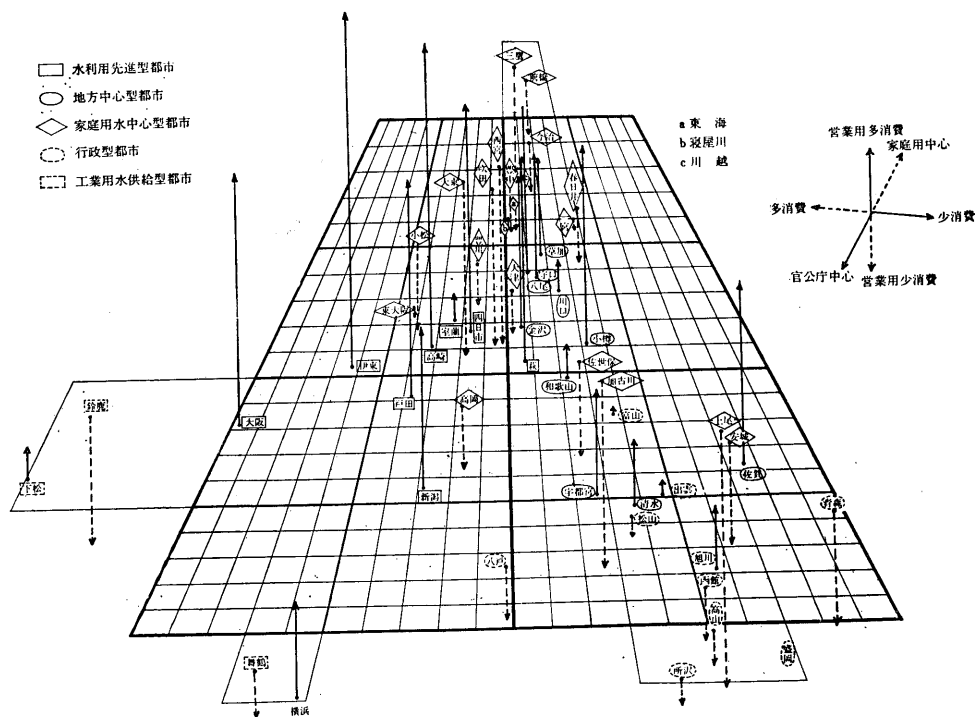


Fig. 3 The position of sampled cities about the pattern of water demand

3-3 水原価に関するパターン分析

前述したように、各上水道供給体は多額の企業債および一時借入金を持ち、その財務構造は年々悪化の傾向をたどっている。そこで、供給量 1m^3 当りに占める各原価に関して、主成分分析を用い、全国122都市*に対してパターン分類を行った。尚、この原価は、人件費・支払利子・減価償却費等の10項目より構成されている。

この結果より、全国の都市はFig. 4に示されるように4つのパターンに分類される。これにより、全国の都市は、その社会的環境および地理的要因等により、水道原価の内容が大きく左右されていることが理解されよう。

尚、ここでパターン(I)の都市は、大都市あるいは地方中核都市が中心となっており、パターン(II)の都市は、大都市周辺都市であり、また、パターン(III)は良水の少ない都市である。パターン(IV)の都市は、上記のいずれにも属さない標準的な都市である。

3-4 家庭用水の需要量要因分析

現在、生活用水需要量の65.9% (全国平均) は家庭用水が占めており、中には、家庭用水比率が80%を越える都市もいくつか存在する。今後、工業用水・都市活動用水の伸びが安定してゆく中で、この家庭用水の増大傾向は今後も続いていくものと思われる。そこで、実際にN

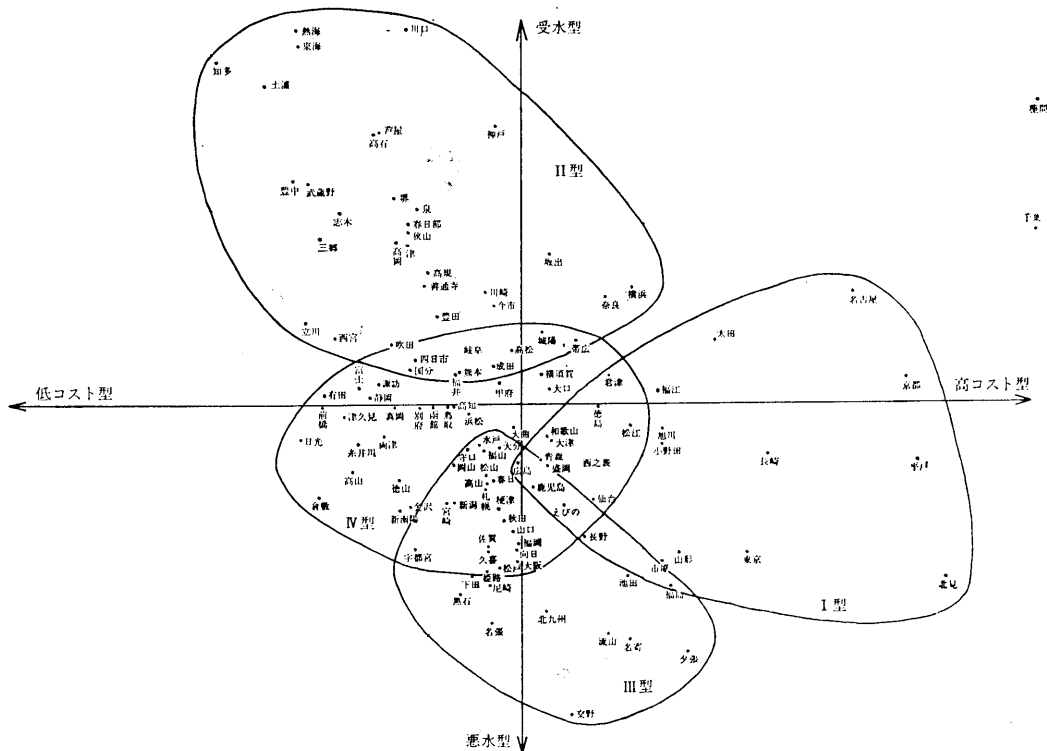


Fig. 4 The position of sampled cities about the pattern of water cost

市**, M市***の2都市に対して、数量化I類を用いて家庭用水の需要量の要因分析を行った。

この結果は、Fig. 5およびFig. 6に示される。これにより、家庭用水の需要量に関する特徴として、次の2点を挙げる事が出来る。まず第1には、家族とくに主婦の節水意識あるいは家庭における水の再利用方法が、需

要量に対して大きな影響を与えていることである。次に、第二点としては、当然のことながら下水道普及によって予想される、需要量の増大である。今後は、この他にも家庭における水浪費型機器の普及、あるいは核家族化等による需要量の増大にも、注目する必要があるものと思われる。

*参考文献[10]により、特徴のある都市を抽出した

**太平洋ベルト地帯に属する中心都市である

***山陰地方に属する地方中核都市である

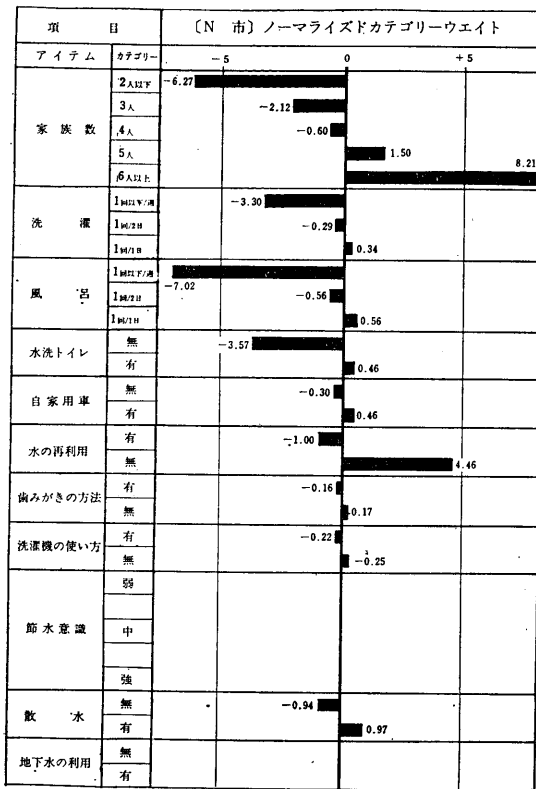


Fig. 5 The primary factors contributed to the demand for the home water and their normalized category weight in the case of N-city

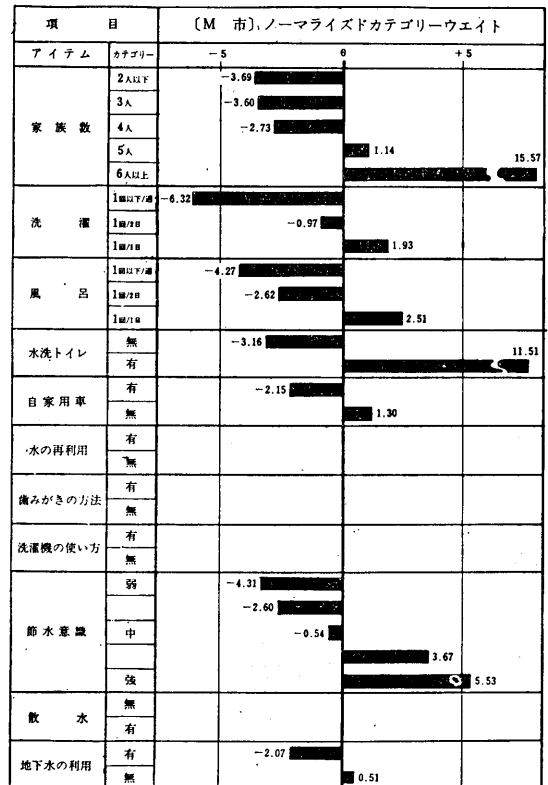


Fig. 6 The primary factors contributed to the demand for the home water and their normalized category weight in the case of M-city

4. 水経済モデルのフレーム・ワーク

4-1 水経済モデルの目的

前節の分析により、水問題は社会構造全体の変化の中で生じた、一つの社会問題であることが理解されるよう。そのため、水需給システムは社会システムの一部として存在し、その内部においても相互に関連しあう多様な諸要素を含む複雑な構造を成している。このような状況において、今後とも望ましい水需給関係を維持してゆくためには、水需給システムの解明と長期的な視野に立った政策が必要とされていると言わねばならない。

このため、本節においては今後の水政策に対する支援システムとして、Systems Dynamics 理論を応用した水経済モデルを提案する。

4-2 水経済モデルの概要と特色

本節では、今後増大が予想される水需要に対して、1) 必要とされる供給能力の拡大を可能とする設備投資の方法、2) 投資費用の回収方法、および3) 適切な水道価格の決定方法に関して考えられるいくつかの水政策を、事前

評価するための水経済モデルを提案する。この水経済モデルの構造は、Fig. 7に示されるような構成要素から成り立っている。尚、便宜上本節においては水経済モデルを、Ⅰ) 水需要セクター、Ⅱ) 水財政セクター、Ⅲ) 社会・環境セクター、Ⅳ) 水政策セクター、Ⅴ) 水供給セクターの、5つのセクターに分割する。また、これらの各セクターは必要により、Table 1に示される13のサブセクターに分割される。さらに、これらの各セクターを構成する要素ならびに相互関連は、Fig. 8のトータルフローに示される構造を有する。

この時、水経済モデルは、一般都市モデルとしての汎用性を有するために、次のような特色を有している。

- 1) ある目的によって作成される、可変的な政策方程式あるいは政策変数を有すること
- 2) 人口・世帯数等、外部よりシナリオとして与えられる変数あるいは方程式を有すること

上記の考え方、および前節の個別分析の結果を考慮して、各種の方程式・定数ならびにパラメータが決定され

得るもの、2) 外部より、その対象地域の固有の条件によって与えられるもの、3) 水政策によって与えられるもの、などの3種類に類別される。また、4) モデルの検証、あるいは政策の有効性の尺度として、本モデルにおいてはいくつかの評価変数が用いられている。

この中で、1) は、モデル方程式あるいは定数として表わされている。2) については、その都市における特有の定数、あるいはデューブル関数として与えられている。尚、これには、i) 人口・世帯数のシナリオ、ii) 各種設備コスト等のシナリオ、iii) 都市活動の増大、あるいは市街地の増大等のシナリオ等が含まれる。

次に、3) の水政策に関しては以下の2つのシナリオが必要とされる。

A) 財務政策意思決定シナリオ

システム分析において明らかにされたように、各都市において水道財政は今日まで悪化の一途をたどっている。このような状況の中で、水道財政政策の一つとして料金の決定方法は重要な問題となっている。この中で、各都市あるいは試案に共通する部分、また料金改定に伴う諸問題に対して、以下の4シナリオを考えモデル化している。

- i) 料金と需要の関係に対するシナリオ
 - ii) 基本料金の取り扱い等に関する料金システムシナリオ
 - iii) 都市活動用水料金シナリオ
 - iv) 料金決定の時期等に関するシナリオ
- #### B) 生活用水需給政策シナリオ

水需給政策を考える場合に、その前題として、水需給に影響を与える要因について整理する必要がある。

ここでは、この要因として次の4要因を考える。すなわち、1) 取水施設の建設、2) 漏水率の減少、3) 節水指導、4) 再利用の促進である。

これらを受けて、水供給側の取り得る政策として以下の3政策が考えられる

- i) 水需要の変動により供給量を変化・対応させる政策
 - ii) 再利用等の促進より、供給量の変化を少なくさせる政策
 - iii) ii) 案に加え、一般家庭に対して節水指導等を行うことによって、需要の変動をさらに少なくする政策
- 尚、これらの3つの政策は、後述の評価変数に基づいてモデルの中で可変的に選択される。

4) の、評価変数は、政策の実施の前提あるいは、採用された政策の有効性の尺度として、以下の6変数を用いている。

- i) 社会的総費用（水のために支出されるすべての金額）
- ii) 水道料金
- iii) 水道財政貸借対照表
- iv) 水道財政損益計算書
- v) 設備量（含漏水率）
- vi) 水使用量

5. シミュレーションの実施および結果

5-1 実施

前節で述べた、シナリオおよびモデル方程式*により、DYNAMO 言語を使用して、以下のシミュレーションを実施した。ここでは、具体例としてN市を対象とし、シミュレーション開始1975年度、DT=0.1年で50年間実施した。このため、各レベル量の初期値として、昭和50年度のN市の実績値を与えるものとする。また、各定数・テーブルは、N市において昭和40～50年度のトレーニング期間において検証したのちに各モデル方程式に与えられている。同時に、政策については、料金決定政策シナリオを中心として、次の3つのシナリオを考える。

A) 料金システムの決定方法シナリオ

水道料金システムは、現在標準化されたものではなく、各都市において独自の体系を有している。このため、ここではN市の例と、代表的と思われる2つの案、計3案についてケース分けを行う。

- 1) 案 N市の方式に近い方法（固定費のうち、維持管理費を負荷率により、従量料金に配賦する）
 - 2) 案 固定費を準備料金に負荷する方法
 - 3) 案 固定費を負荷率により従量料金に配賦する方法
- #### B) 料金値上げ政策シナリオ

公共料金体制の一部として、水道料金は一般的に低い水準におさえられている場合が多く、かつその値上げの幅にも、社会的な制限が設けられている。そこで、水道料金値上げの上限に対して、以下の3案が考えられる。

- 1) 案 1年間の料金値上げの上限を10%とする
- 2) 案 1年間の料金値上げの上限を30%とする
- 3) 案 1年間の料金値上げの上限を100%とする

C) 財務政策シナリオ

水財務問題の中で、中心的課題は1) 借入金の増大、2) 先行投資による企業債発行残高の膨張の2点であると言える。この中で、1) については、各都市においても一様に減少させる政策を行っており、本モデルにおいても同様の政策を採用している。

次に、2) の企業債等の取り扱いについては、以下の3つの案が考えられる。

- 1) 案 現行に近い案（企業債の返還は再起による）
- 2) 案 料金収入によって余剰を生じた場合に、企業債を返還する

* 水経済モデルは、DYNAMO 言語を用いてプログラミングされている。

3) 案 企業債を計画的に返還する。この場合、返還計画により、a) 案：徐々に返還を行う、b) 案：かなり急速に行う

5-2 シミュレーションの結果

上記の3シナリオにおいて、36通のシミュレーション結果が各指標について得られる。ここでは、その中で特徴的と思われる結果について考察する。

i) 各設備量・給水量

まず、各設備量・給水量について見るならば、量的には若干の差が見られるものの、動きについては同様の傾向を示している。この各設備量・給水量は、この値が低水準の場合増大しているが、一定限界に近づくと収束を始め、再利用設備量は増大する傾向が見られる。

ii) 水道価格

水道料金の差が特徴的に見られるのは、他のシナリオを固定した場合の、シナリオAにおける1・3案と2案の差である。現在水道料金は、家庭用水に対して、この基本料をなるべく低い水準におさえる政策をとっている。これに対して、A-2案はこれを経済的に合理化し、口径から流量比を求め、固定費をこれにより、各需要者に負担させる方法である。このため今後、需要の増大により多額の設備投資を行った場合、各世帯の負担額は増大するものと思われる。ここでは、B-1案・C-1案を採用した時の、A-1・2・3案の結果についてFig. 9に示す。

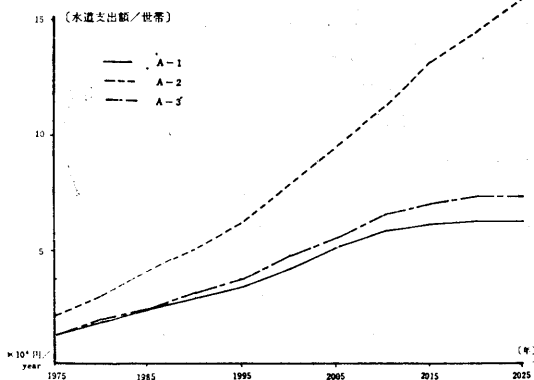


Fig. 9 The transition on the water expenditure per household in every case of the policy-A by setting the case B-2 and C-2

次に、シナリオBについて見た場合、各案においてあまり差が生じていない。これは、値上げの幅と同時に、値上げの時期あるいは遅れに、問題があるためと思われる。

最後に、シナリオCにおいては、各案の間に相当のひらきが見られる。この中で、他のシナリオを固定した場合、C-1案は初期においては、他の案よりも一世帯当り

の支出額が、低い水準で変化している。しかし、その後他の案を越えて最大の支出額を示している。ここでは、A-1・B-2案を採用した場合の、C-1・2・3(a)・(b)案の一世帯当りの支出額を、Fig. 10に示す。また、Fig. 11において明かなように、水に対する社会的総費用について見た場合も同様の結果が得られている。

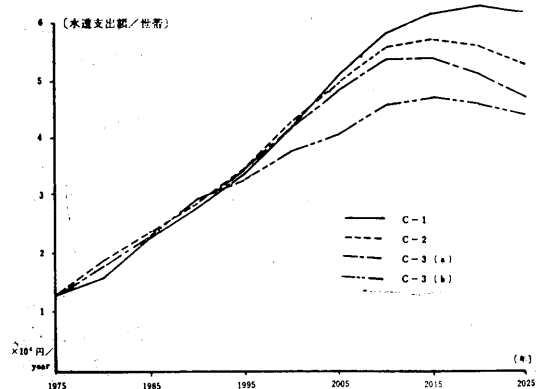


Fig. 10 The transition on the water expenditure per household in every case of the policy-A by setting the case B-2 and C-2

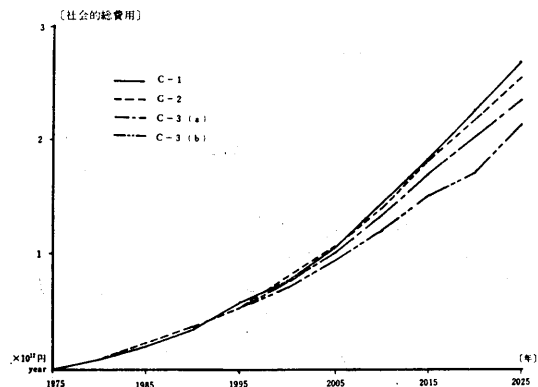


Fig. 11 The transition on the social total expenditure in every case of the policy-C by setting the case A-1 and B-2

iii) 水財務構造

N市においては、今後水需要の増大に伴って、設備投資額・必要経費共に増大する傾向にある。ここでは、その代表的な場合として、A-1案・B-2案を採用した場合の、Cの各案について、企業債の発行残高をFig. 12に示す。このシミュレーション結果からも明かなように、企業債の返還方法により、その残高には大きな差が生じており、C-1案では特にこの値が大きい。この企業債の残高の増加が、C-1案においてii)で見られた水道価格の上昇に悪影響を及ぼしているものと思われる。

5-3 今後の水経済構造の改善方法

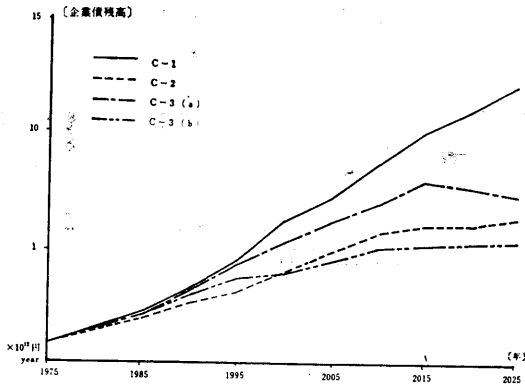


Fig. 12 The transition on the bonds issued by the Water-Works Bureau in every case of the policy-C by setting case A-1 and B-2

以上のシミュレーション結果にあらわれた、動向の全体像をとらえるならば、以下のような水経済構造の改善方向が得られるであろう。

すなわち、単独の政策では、1)供給量の確保、2)水財政の長期的安定と健全化、3)水価格の安定と家庭の負担の軽減は、得ることが出来ないことが明らかにされた。また、個々の政策について見た場合、短期的には有利あるいは差異が少なく見えても、長期的に見て水経済モデルのフィードバック構造により、大きな差が生じていることが理解される。

このため、今後、水政策を進めるにあたっては、従来の形式にとらわれず、長期的な展望に立ち、期に応じた政策を進めることが重要とされるであろう。

N市について見た場合、今後需要量の増大に伴って、供給の上限に近づくまで設備投資が行なわれる。この額は、かなり大きな値を持つことが予想される。このため、N市において、企業債発行残高の処理は重要な課題となるものと言わねばならない。シミュレーション結果によれば、長期的な展望に立ち、最も経済的な政策を考えた場合、設備増大に必要とされる投資額を、なるべく早く費用化し、償却する政策が望ましいことが理解される。現状の政策を継続させることは、現在および近い将来において、家庭の負担は若干少なくすむが、長期的に見て、上記の政策に比して大きな負担をもたらすものと予想される。以上、本論文におけるシミュレーション結果を総合すると、N市においては、将来における投資を含んだ形での料金体系が、短期的には若干の高負担をもたらすが、長期的に見て公共性にかなうものと思われる。これにより、N市に関しては、このような料金体系の採用と、これに対する市民の理解を得るような改善方向が望ましい。

今日、水財政及び、再利用化も含む水供給政策は、各

都市とも根底においては共通の課題を持ちながら、表面的にはその都市のおかれた社会的要因、あるいは地理的要因により異なった問題となっている。

従って、本論文で提案する水経済モデルを他都市に適用するに際しては、その都市の水に対する特異性あるいは、問題点を本論文で示した個別分析を利用しながら解析することが必要である。

6. おわりに

本論文は、近年の著しい水需要の増大によって、各都市において表面化して来た水問題が、いかなる構造のもとに生じ、また、それに対していかなる政策が望ましいかを事前評価するために、水にかかわる個別問題を分析すると同時に、政策評価支援システムとしての、水経済モデルを提案した。ここでは、とくにN市において実証的研究を行ったものである。

本論文の内容を要約すると、以下の通りである。

- 1) 水需要の増大によって生ずる諸問題に対して、この構造を明らかにすると同時に、今後この中で重要性を増すと思われる、水経済問題について考察した。
- 2) 個別分析を行うことにより、各都市がその固有の社会的条件および地理的条件によって、異なった水問題を有することが理解された。また、家庭用水の需要要因分析により、家庭の主婦の水に対する節水意識が、水需要量に大きな影響を与えていることが明らかとなった。
- 3) 水需給問題の解決をはかるために、水経済を重視する立場から、各要因間の関連を明らかにして、水経済モデルを作成した。このモデルを、N市を例として実施することにより、今後の水経済政策の改善方向を示すと共に、水問題解決のための支援システムとしての水経済モデルの有効性が実証された。

謝辞 本研究を進めるにあたり、数々の貴重な資料を提供して頂いた、名古屋市水道局企画係池田英昭氏、同利水係長芳村好明氏を始め関係者各位に、深く感謝します。

参考文献

1. 山本荘毅; 水文学講座 水文学総論, 共立出版, 1972
2. J.W. Forrester; Industrial Dynamics, The M.I.T. Press, 1961
3. 国土庁計画調整局編: 人と国土, 別冊第三次全国総合開発計画, 第一巻, 1978
4. 石川義夫他; 一般家庭における水道水の利用実態, 水道協会雑誌, 第525号, p. 2~17, 1978
5. 高棹池淵; “水の需給構造に関するシステム・ダイナミクス論的研究”, 土木学会論文報告集, 第

- 259号, p. 55~70, 1977
- 6) 鈴木康他; “地方中核都市モデル”, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 20, 9号, p. 13~21, 1975
- 7) 島田俊郎; “S.D.の歴史と S.D. モデルの信頼性”, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 21, 3号, p. 122~128, 1976
- 8) 日本水道協会; 水道統計 35年~50年
- 9) 東洋経済; 昭和53年版地域経済総覧, 1978
- 10) 自治省編; 地方公営企業年鑑 第24集, 1976~1977
- 11) 熊澤, 山本; “生活用水を中心とした水利用構造分析—第1報” 日本経営工学会秋季研究発表会 (名古屋地区) 予稿集, 1977
- 12) 熊澤, 山本; “生活用水を中心とした水利構造分析—第2報” 日本経営工学会秋季研究発表会 (名古屋地区) 予稿集, 1978
- 13) 島根県企画部, 昭和51年度国土庁委託水利用システム調査報告書, 1977