

水環境を考慮した水価格*

Water Environment and Pricing Policy

萩原清子

1. はじめに

現在では、水資源は有限であるという考え方が支配的になりつつあるように思われる。市場における価格システムは、水を含む自然を内部化せず、自然とは乖離したシステムとして発展してきたようである。その結果、水資源の不足が問題となり、また、水環境汚染は大きな社会問題となってきた。水資源不足の深刻さは、大都市を中心とした地域で水があらゆる社会経済発展の制約要因とならざるを得なくなってきたことにも現われている。そこで、「水は国民全体の貴重な有限の資源であるとの認識に立脚して、公共水域の水質保全と水資源の高度利用を図るため、総合的な水管理システムを確立し、有限の水資源の効率的使用を図るとともに河川等の公共水域に清澄な水が豊富に流れる環境を実現しなければならない。」¹⁾と言われるようになった。

水の価格は、たとえば、公共料金の問題として資源配分の効率性あるいは所得分配の公正の面から論ぜられるときには最終消費財、すなわち、サービスとしての水の価格のみが独立に対象として考察されることが多い。サービスを生み、価格と供給量に影響を与える社会共通資本としての水資源量あるいは水質が考察されることはほとんどなかった。また、考察されるとしても、価格と水資源量あるいは水質の関連づけがなされることはきわめてまれである。

したがって、本考察では、水資源量ならびに水質を考慮したいくつかの水環境システムを構成し、このシステムに基づいた水価格について考察する。そのため、まず、セクション2では、利水の観点よりの水問題について概観する。次いで、セクション3では、上水道と下水道の費用と料金決定について現行制度を考察する。そして、セクション4で、水循環システムモデルに基づいた水価格形成を試みることにする。

2. 利水の観点からの水問題

2-1 水資源問題²⁾

わが国は降水量が多く水が豊富な国であると一般に考えられている。面積当りの年降水量の世界平均は750mmであるのに対してわが国は1736mmとなっており、確かに降水量としては多い。しかしながらこれは単位面積当りの降水量であり、人口1人当りの降水量ではない。1人当り利用可能な水資源量という点から1人当りの降水量を求めてみると日本は6500m³/人であり、アメリカの32300m³/人、中国の14000m³/人とは桁違いに小さく、フランスの8400m³/人、イギリスの4500m³/人、西ドイツの4900m³/人と同程度である。なお、ヨーロッパの大陸諸国は陸続きのため他国の降水量も利用可能であることを考慮に入れるとわが国の水資源量は諸外国に比べて必ずしも豊富であると言えない。

さらに、わが国の河川は勾配が急で流路延長も極めて短い。このため、流況の変動が大きく、利水面、治水面において極めて不利な状況にある。流況の良否を概略比較するのに河況係数というものがあり、日本は諸外国と比較すると河況係数はかなり大きい³⁾。河況係数とは年間の最大流量と最小流量との比であって、この数字が大きくなるほどその河川は荒れ川で流量が安定せず、利用するのに不利な河川である。

日本の河川の流況を概括して、自然の状態のままです総流出量の中、安定して上水道、工業用水等に利用可能の分は比較的流況の良い河川で20～30％程度、普通の流況のもので、10～20％程度、流況の悪いものでは10％以下である。これに加えてダム等の水資源開発施設による開発を行うとすれば、一般的に全流出量に対して利用可能の限度は50％位であると言われている。これに対して、全降水量に対する需要量の割合（蒸発量を除いた）は、かなり古い試算ではあるが、昭和60年に全国で23％であるが、関東地区では61％と予想されており、限界を越えたものとなっている。こうした状況を反映して、例えば、東京都水道局の場合、50年度末で日量 609万 m^3 の給水能力を持っているが、これに見合う水源は 471万 m^3 であり、「夏の最大需要期には「網渡り」的な原水操作を余儀なくされている」（都水道局）のが実態である。

さらに、新規開発にしても、河川にはいろいろな水利権が複雑に張りめぐらされており、簡単に今まで取水していた河川からの取水量を増やすことはできない。したがって、新しい水源は、消費地から遠く離れた山の中にダムを作るということになる。このため、大規模上水道の建設単価は昭和36年には6万円/ m^3 ・日 だったものが昭和51年には 17万円/ m^3 ・日 にもなっており、今後ますます高くなることは確実であると言われている。

また、最近の河川水質の悪化は、既存の水源の利用価値の低下をもたらしている。

2-2 上水道・下水道・再利用の問題¹⁾

全国の水道の年間給水量は、昭和50年度が約 125億 m^3 であるが、昭和55年度には 170億 m^3 、60年度には 210億 m^3 にも達すると厚生省は推定している。こうした水の需要増加をまかなうために新しい水源の確保が必要になるが、このために増大する費用は、セクション2-1の終りで述べたように上水道建設単価の大幅な上昇にはね返ってきている。さらに、このような水源の遠隔化に

よる動力費の増大も見逃せない。また、水源河川の水質汚濁による薬品費も昭和36年以降、急激に増加している。そして浄水場における公害防止の費用も大きな問題となっている。

下水道は一般に次のような役目を持っていると考えられている。第一は、雨水をスムーズに流し、住宅や工場が浸水の被害にあわないようにすること。第二は、生活や生産活動に伴って出てくる汚水を流し去ること。第三は、便所の水洗化を促進する役目。そして第4の役目は、水質の保全である。これを反映して1973年6月の都市計画中央審議会の答申においては、下水道の機能として、①生活環境の改善、②水質汚濁の防止を挙げており、さらに、③水資源の有効利用を挙げている。

下水道整備事業としては、昭和40年に「都市の基礎的な施設である下水道の緊急かつ計画的な整備を促進することにより都市の健全な発達と生活環境の改善を図り、もって国民生活の向上に資するため」の下水道整備第1次5ヶ年計画が実施されて以来、普及率の向上等がはかられてきた。昭和46年の第3次5ヶ年計画においては、「下水道整備の立遅れによる都市環境の悪化、特に公共用水域の水質汚濁に緊急に対処し、都市の基礎的な施設である下水道の緊急かつ計画的な整備を促進することにより、都市環境の改善を図り、もって都市の健全な発達と公衆衛生の向上とに寄与し、あわせて公共用水域の水質保全に資するように下水道を整備する」ことが目標とされた。この第3次計画では、第1次、第2次では見られなかった下水道整備による水質保全対策が明確化されている。こうして、昭和51年度末の下水道普及率は約24%（人口比）となったが、55年度末には40%を達成することを目標にした第4次下水道整備5ヶ年計画が昭和51年に決定された。この計画では、水質汚濁の悪化という現状に対応して、下水の処理、汚泥処分等に関する新技術の開発とその実用化を促進することが目標に加えられた。

しかしながら、処理システムには必ず限界があり、自然の浄化力を極限まで利用するのが理論的であり望ましいとされている。(第7回国際水質汚濁研究会議、パリ、1974年) このように、処理水準の高度化に対しては批判や反省があり、さらに処理水準が高められるに従って必要資源・エネルギーも増加し、かつ排出物も増加して二次汚染も生じてくる。汚泥処理の方法としては、脱水して埋立処分する方法と焼却する方法がある。しかし、海洋投棄による埋立処分では海域の汚染問題が生じ、焼却処分ときには大気汚染の問題が生じ、二次公害が問題となってくる。さらに、経済性の面で、処理水の精度を高くすることは壁に当たりつつある。

現在、終末処理場で処理される汚水は工場から下水に流れ込む産業排水、家庭から出る生活排水などをすべて混合してしまっている。そこで、大量にまとめて処理するのではなく、まだ汚れが混じり合っていない発生源で細かい単位ごとに処理をして川に戻してやろうという考え方も生まれている。たとえば、工場内で排水を処理してから放流することを義務づけ、下水道は生活排水のみを受け入れようとするものである。流量が減り、汚れきってしまった川が、流れを取り戻してよみがえり、本来、川が持っていた水の浄化作用を復活させるためにも、工場は水をなるべく汚さない生産工程を採用し、汚した水はきちんと処理すること、また家庭でも水を大事に汚さないように使うことが望まれる。

水の有効利用の面からは、下水の再利用が考えられている。再利用の様式としては、①開放循環系、②カスケード系、③閉鎖循環系がある。開放循環系は、排水→自然水系→取水利用というプロセスをとるものであり、湖沼周辺での水利用や河川の上下流での利水等はこれに属している。カスケード系は、排水を直接他用途に振り向けるものであり、用途としては、かんがい、リクリエーション、人工地下水、工業用水、飲用以外の都市用水、上水道等が考えられ

ている。閉鎖循環系としては、いくつかのビルや工場を単位とする地区循環や個別のビルや工場に設ける個別循環等がある。

下水の再利用については、一部で既に実施されてはいるが、安全を確保するため供給する水の質をどこまで高めるかという点と費用をいかに安くするかという点が今後の課題であろう。

3. 費用と料金決定の現状

利水のための費用には、セクション2で述べた水資源や水質の問題が大きな影響を与えている。本節では、上水道と下水道について費用と料金決定の現状をみることにする。

3-1 上水道

給水サービスに必要なとされる経費は、原水の取水から始まる浄水、給水等の直接生産費および業務費等の一般管理的経費と設備投資のための借入金利息ならびにその償還金または減価償却費等の資本費から成る。総括原価（資本費＋維持管理費）を年間有収水量⁹⁾で除したものが給水原価である。年度別給水原価の推移をみると⁹⁾、最も激しい伸びを示しているのは支払利息であり、施設拡張の結果が現われている。次に大きな上昇率を示しているのは薬品費であり、水道水源河川の汚濁傾向を反映している。

独立採算制を原則とする水道事業では、給水サービスに要する経費は料金として回収される。現在では、最低基本料金が決められている二部料金制度が広く適用されている。二部料金は、19世紀の終りにホプキンソンにより提唱された。二部料金制度は、総括原価を需要家費、固定費、変動費に分け、需要家費と固定費を利用者に基本料金として課し、変動費は従量料金として徴収するものである。

3-2 下水道²⁾

以下で費用を論ずる対象とする下水道とは、下水道法第2条の定義、すなわち、「主として市街地における下水を排除し、又は処理するために、地方公共団体が管理する下水道で、終末処理場を有するもの、又は流域下水道に接続するものであり、かつ汚水を排除すべき排水施設の相当部分が暗渠である構造」のものである。

下水道事業は、建設事業（拡張事業）と維持管理事業に大別される。前者は主として起債により、後者は主として料金によりまかなわれる建前になっている。

建設事業の費用構成は、①管渠敷設費、②ポンプ所建設費、③処理場建設費、④用地買収費、⑤施設購入補償費等事務費、である。これら下水道建設事業費を起債に依存しているのは、下水道の効用が現在および将来の住民に帰属するものであるからである。同時に、雨水排除、浸水防除、河川汚濁防止等、国にとっても奨励すべき公共の事業であるので、国庫補助もなされている。

維持管理費は、営業費用と営業外費用に区分される。営業費用は、直接費として、①管渠費、②ポンプ場費、③処理場費、一般管理費として、④総係費、⑤資産減耗費、⑥その他営業費用、直接営業費用として、⑦業務費、⑧排水設備費、資本費用として、⑨減価償却費の9項目から成っている。営業外費用は、資本費用として、①支払利息及び企業債取扱諸費、②繰延勘定償却の2項から成っている。この中、減価償却費は資本費用であり、維持管理事業の費用とはしない考えもあるが、東京都ではこれを、維持管理には当然必要な費用として維持管理会計の中に入れていた。

料金原価としての下水道事業原価は次のようになる。

現行原価（料金原価）＝汚水総原価－汚水利子分原価
ただし、

$$\text{汚水総原価} = \frac{\text{直接費} + \text{営業費} + \text{間接費}}{\text{排水汚水総量}} \times \frac{75}{100}$$

間接費 = 一般管理費 + 資本費

営業費 = 業務費 + 排水設備費

資本費用 = 減価償却費 + 支払利息 + 繰延勘定償却

$$\text{汚水利子分原価} = \frac{\text{支払利息}}{\text{排水汚水総量}} \times \frac{75}{100}$$

である。

経費の負担については、雨水排除施設については公費が、汚水の排除処理施設については利用者が、それぞれ負担すべきものとされている⁹⁾。

以上、上水道事業と下水道事業について費用と料金決定の現状をみてきたが、セクション2で考察した水資源問題や水質汚濁の問題は確かにこれらの事業の費用増大として表われているようである。たとえば、上水道事業においては、薬品費や動力費の上昇にあらわれている。また、下水道事業においては、下水道普及率がまだかなり低い事情もあって、下水処理がまだ後追いのところが強く、まだまだこれから費用は増大するものと考えられる。

しかしながら、水資源が有限であるとの認識に立てば、このような費用のみを利用者が負担するというような形の料金決定ではなく、水資源の状態を的確に把握し、将来を考えた料金決定がなされねばならないと考えられる。したがって、次節では、2と3での考察を十分に考慮した水価格形成モデルを提示することとする。

4. 水価格形成モデル

セクション3では、上水道と下水道の費用と料金決定の方法について概観したが、従来の水価格形成の際には、末端の消費財、すなわち、サービスとしての水価格のみが独立の対象として扱われているように思われる。水資源が有限

であるという考え方が支配的になってきており、さらに、水質汚濁が極度に進んできているという現状にありながら、水価格形成のさいに、水資源の有限性、水質が考慮されたことはなかったように思われる。「水は国民全体の貴重な有限の資源であるとの認識に立脚して、公共用水域の水質保全と水資源の高度利用を図るため、総合的な水管理システムを確立し、有限の水資源の効率的利用を図るとともに、河川等の公共用水域に清澄な水が豊富に流れる環境を実現」⁹⁾ するためにも水価格形成の見直しが必要であると考えられる。

本セクションでは、4-1で水資源の有限性、水質を考慮したいくつかの水循環システムを想定し、これらのシステムに対応した水価格形成を4-2、4-3で試みることにする。

4-1 水循環システムモデル

(1)-1 利水だけを考慮した場合——開いた系（モデル I-1）

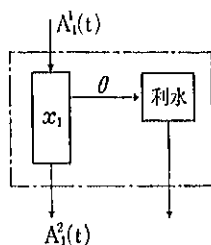


図1-1

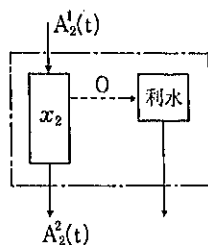


図1-2

図1-1は水量に関する水循環システムを、図1-2は負荷量に関する水循環システムを図示している。 θ の水量が公共用水域から導水され、利用された後システム外へ流出する状態が図1-1で示されている。負荷量についても同様であるが、利水される時には負荷量は0と仮定しているため¹⁰⁾図1-2において公共用水域から利水へは点線で示されている。しかしながら、利水された後には負荷量加わるので、利水された後システム外へ流出する線は実線で表

わされている。

なお、図1-1, 図1-2並びに以下で用いられる記号は次のとおりである。ただし、図において破線(矢印なし)は、システムの境界を表わしている。

記号

$\theta(t)$: 水需要量, t を省略して θ と書く, $\theta \ll x_1$,

r_1 : 下水道普及率 (量に対する),

r_2 : 再利用率,

λ_1 : 流出率 (水量),

λ_2 : 流出率 (負荷量),

l : 水消費負荷濃度,

ε : 下水処理水濃度,

$\bar{\delta}$: 再利用後濃度,

x_1 : 公共用水域の年平均水量,

x_2 : 公共用水域の負荷量,

x_3 : 汚泥量,

θ_2 : 下水量, $\theta_2 = r_1 \theta$,

θ_3 : 再利用水量, $\theta_3 = r_1 r_2 \theta$,

$A_1^1(t)$: 第1地区公共用水域へ流入する年間平均水量,

$A_1^2(t)$: 第1地区公共用水域より流出して第2地区へ流入する水量,

$A_1^3(t)$: 第2地区公共用水域より流出する水量,

$A_2^1(t)$: 第1地区公共用水域へ流入する負荷量,

$A_2^2(t)$: 第1地区公共用水域より流出して第2地区へ流入する負荷量,

$A_2^3(t)$: 第2地区公共用水域から流出する負荷量,

開いたシステム図1-1と図1-2の状態方程式は次のようになる。

$$\frac{dx_1}{dt} = A_1^1(t) - A_1^2(t) - \theta_1 = A_1 - \theta_1 \quad (1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = A_2^1(t) - A_2^2(t) = A_2 \quad (2)$$

(1)―2 利水だけを考慮した場合——閉じた系 (モデル I-2)¹¹⁾

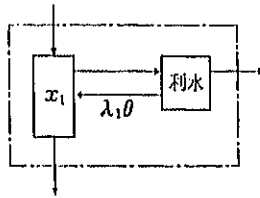


図 2-1

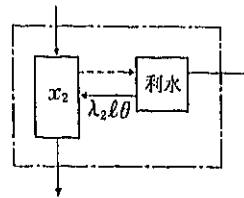


図 2-2

図 2-1 は閉じたシステムの水量の状態を、図 2-2 は閉じたシステムの負荷量の状態を示している。利用された後 $(1-\lambda_1)\theta$ の水量はシステム外へ流出する (蒸発する等)。負荷量については、利水される時に、 l で汚濁されるが、このうち $(1-\lambda_2)l\theta$ は、水量と同様にシステム外へ流出する。したがって、利水だけを考慮した場合、閉じたシステムの状態方程式は、

$$\frac{dx_1}{dt} = A_1 - \theta + \lambda_1\theta \quad (3)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = A_2 + \lambda_2l\theta \quad (4)$$

となる。

湖等に面した地区は、このような閉じたシステムで表わすことができる。

(2)―1 下水処理を考慮した場合——水量は閉じているが、負荷量は開いているシステム (モデル II-1)

図 3-1 と図 3-2 は利水に加えて下水処理をも考慮した場合の水量の状態 (図 3-1) と負荷量の状態 (図 3-2) を示している。下水処理を考えるとときには、下水道普及率が問題となるので、 γ_1 として表わされている。水量につい

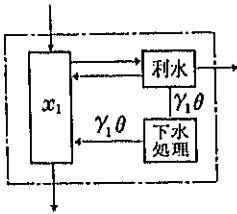


図 3-1

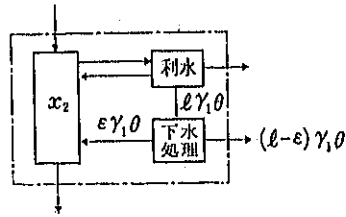


図 3-2

ては図 3-1 より、利水された後、下水道を通して処理場へ入る水量は $\gamma_1 \theta$ であり、残りの $(1-\gamma_1)\theta$ のうち $(1-\lambda_1)(1-\gamma_1)\theta$ はシステム外へ流出し、 $\lambda_1(1-\gamma_1)\theta$ は下水処理場を経由せずに直接公共用水域に流入する。負荷量についても図 3-2 より、水量と同様に図示されているが、下水処理場を通っても $\epsilon \gamma_1 \theta$ だけの負荷量は取り除かれなまま公共用水域に戻ってくることとなる。

この場合の状態方程式は、

$$\frac{dx_1}{dt} = A_1 - \theta + \lambda_1(1-\gamma_1)\theta + \gamma_1\theta \quad (5)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = A_2 + \lambda_2 l(1-\gamma_1)\theta + \epsilon \gamma_1 \theta \quad (6)$$

で表わされる。

(2)-1 下水処理を考慮した場合——水量も負荷量も閉じたシステム (モデル II-2)

モデルの概念図は図 3-1 と図 3-2 で示される。負荷量を示す図 3-2 において、下水処理されるときに生ずる汚泥 $(l-\epsilon)\gamma_1\theta$ を処理することを考える。処理の方法としては、2-2 で述べたように、埋立処分の方法と焼却処分の方法がある。この場合、汚泥量の状態方程式をも考える必要があるが、この状態方程式は、

$$\frac{dx_3}{dt} = (l-\epsilon)\gamma_1\theta_1 \quad (7)$$

で表わされる。

(3) 再利用を考慮した場合 (モデルⅢ)

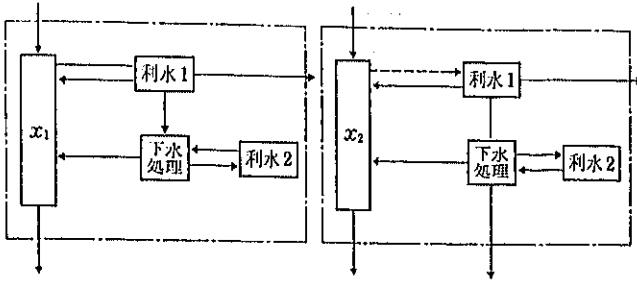


図 4-1

図 4-2

図 4-1 と図 4-2 より、再利用を考慮した場合の水量と負荷量の状態方程式は、次のようになる。

$$\frac{dx_1}{dt} = A_1 - \theta + \lambda_1(1 - \gamma_1)\theta + \gamma_1\theta \quad (8)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = A_2 + \lambda_2 l(1 - \gamma_1)\theta + \varepsilon \gamma_1\theta \quad (9)$$

なお、利水 1 での下水道の普及率は γ_1 であるが、利水 2 での下水道の普及率は 100% であるとしている。下水処理された後、 $\gamma_2\gamma_1\theta$ の水量が再利用されることを図 4-1 は表わしている。

さらに、汚泥量の状態方程式は、

$$\frac{dx_3}{dt} = (l - \varepsilon)\gamma_1\theta + (\delta - \varepsilon)\gamma_2\gamma_1\theta \quad (10)$$

となる。つまり、利水 1 よりの汚水を処理することにより生ずる汚泥 $(l - \varepsilon)\gamma_1\theta$ と再利用 (利水 2) による汚水を処理することにより生ずる汚泥 $(\delta - \varepsilon)\gamma_2\gamma_1\theta$ の和となっている。

4-2 水価格形成 1 —— 単独地区の場合

4-1 の各水循環システムに対応した水価格を考えてみることにする。その

ために、まず、水需要関数を設定する。

水需要関数¹²⁾の逆関数を

$$P(t) = P[\theta(t)], \quad t=1, \dots, T \quad (11)$$

とする。ただし、 $\partial P/\partial \theta < 0$ である。また、 P は水価格である。

上水道の費用関数を

$$C_1(t) = C_1(\theta, x_2/x_1), \quad t=1, \dots, T \quad (12)$$

とおく。セクション3で概観したように、上水道の費用はいくつかの要素から構成されているが、ここでは、利水量 θ と公共用水域の水質の関数とする。利水量が増えれば、浄水費用は増大すると考えられる ($\partial C_1/\partial \theta > 0$)。また公共用水域の水質は、 x_2 を一定とすれば水量 x_1 が増えれば良くなり、浄水費用は減少すると考えられるから、 $\partial C_1/\partial x_1 < 0$ と仮定する。一方、公共用水域の負荷量が増えれば、薬品費などが増大すると考えられるから $\partial C_1/\partial x_2 > 0$ とする。

下水道の費用関数は

$$C_2(t) = C_2(\theta, \gamma_1, l, \varepsilon), \quad t=1, \dots, T \quad (13)$$

と表わせる。下水処理の費用関数は、まず量 $\gamma_1 \theta$ の関数であり、さらに、処理水中の負荷量 l と処理後濃度 ε との関数である。 $\gamma_1 \theta, l$ が増えれば下水処理の費用は増大 ($\partial C_2/\partial \gamma_1 \theta > 0, \partial C_2/\partial l > 0$) するが、処理後濃度を小さくすることは費用の増大となると考えられるから、 $\partial C_2/\partial \varepsilon < 0$ とする。

汚泥処理の費用関数は、汚泥量の関数であり、

$$C_3(t) = C_3(x_3), \quad t=1, \dots, T \quad (14)$$

とおく。

また、再利用のための費用関数は

$$C_4(t) = C_4(\theta, \gamma_1, \gamma_2, \varepsilon), \quad t=1, \dots, T \quad (15)$$

と表わされ、量が増えれば費用は増大すると考えられるから $\partial C_4/\partial \gamma_1 \gamma_2 \theta > 0$ 、 ε が大きくなれば費用は減少する ($\partial C_4/\partial \varepsilon < 0$)。

以上より、4—1の各モデルに沿って、水価格形成を試みることにする。

本考察の目的である水量・水質を考慮した水価格を考察する前に、従来の水価格形成をモデル I—1 とモデル I—2 について考えてみる。従来の水価格形成の際には、水量や負荷量の状態は一切考慮されていないのであるから、目的関数を

$$L = \int^{\theta} P(\theta) d\theta - C_1(\theta, x_1, x_2) \longrightarrow \max. \quad (16)$$

とにおいて、

$\partial L / \partial \theta = 0$ となるのが最適であり、このときの水価格は

$$P(\theta) = \partial C_1 / \partial \theta$$

となる。すなわち、モデル I—1 においてもモデル I—2 においても望ましい水価格は、上水道の限界費用に等しくすればよいこととなる。

モデル I—1

社会にとっての最適化は、(1)、(2)の状態方程式のもとで次の目的関数を最大化することである。

目的関数は、社会的余剰を計画期間を通して最大化することであり、

$$S = \int_0^T \left[\int^{\theta} P(\theta) d\theta - C_1(\theta, x_1, x_2) \right] dt \longrightarrow \max. \quad (17)$$

とする。ただし、 T は計画期間を示している。なお、積分値は有限値をとると仮定する。

$$\frac{dx_1}{dt} = \int^{\theta} P(\theta) d\theta - C_1(\theta, x_1, x_2)$$

とおくと¹³⁾、ハミルトン関数は、

$$H = Z_1(A - \theta) + Z_2 A_2 + Z_4 \left[\int^{\theta} P(\theta) d\theta - C_1(\theta, x_1, x_2) \right]$$

となる。補助ベクトルの要素は次のように定義される。

$$\frac{dZ_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = Z_4 \frac{\partial C_1}{\partial x_1},$$

$$\frac{dZ_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = Z_1 \frac{\partial C_1}{\partial x_2},$$

$$\frac{dZ_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = 0, \quad Z_1(T) = 1, \quad \therefore Z_1(t) = 1$$

したがって、ハミルトン関数は

$$H = Z_1(A_1 - \theta) + Z_2 A_2 + \left[\int^{\theta} P(\theta) d\theta - C_1(\theta, x_1, x_2) \right]$$

となり、最適操作量は

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} = -Z_1 + P(\theta) - \frac{\partial C_1}{\partial \theta} = 0$$

となる。

$$\therefore P(\theta) = \frac{\partial C_1}{\partial \theta} + Z_1 \quad (18)$$

ただし、

$$\frac{dZ_1}{dt} = \frac{\partial C_1}{\partial x_1}$$

である。

$\partial C_1 / \partial x_1 < 0$ だから、 $Z_1(t) > 0$ である。

(18) 式は、水の価格は上水道の限界費用に水量のシャドウ・プライス¹⁴⁾、 $Z_1 (= \partial S / \partial x_1)$ を加えたものとなることが望ましいことを表わしている。

モデル] - 2

(3), (4) の状態方程式のもとで、(17) 式を最大化する。

これより、

$$P(\theta) = \partial C_1 / \partial \theta + (1 - \lambda_1) Z_1 - \lambda_2 Z_2 \quad (19)$$

となる。ただし、

$$\frac{dZ_1}{dt} = \frac{\partial C_1}{\partial x_1}, \quad \frac{dZ_2}{dt} = \frac{\partial C_1}{\partial x_2}$$

である。

$\partial C_1/\partial x_2 > 0$ だから、 $Z_2(l) < 0$ である。

(19) 式により、モデル I—2 (閉じたシステム) の場合、水の価格は、上水道の限界費用に水量のシャドウ・プライス、 Z_1 に $(1-\lambda_1)$ を掛けたものと、負荷量のシャドウ・プライス、 Z_2 に $\lambda_2 l$ 掛けたものを加えたものとなる。 λ_1 は、 $0 < \lambda_1 < 1$ であるから、 $1-\lambda_1 < 1$ である。したがって、モデル I—1 の場合の水量のシャドウ・プライスより (19) 式の $(1-\lambda_1)Z_1$ は小さな値となっているが、これは、モデル I—2 が閉じたシステムとなっているためである。つまり、使われた水のうち $\lambda_1 \theta$ は再び公共用水域に戻っているため公共用水域の水量の減少は、モデル I—1 のときより少ないからである。その反面、負荷量は増えるため、負荷量のシャドウ・プライス、 $Z_2 (= \partial S/\partial x_2)$ に $\lambda_2 l$ 掛けた分だけ価格が高くなることになる。 $Z_2 < 0$ となるが、汚染責任料のようなものと考えればよい。水の使用の仕方を変えれば l を小さくすることも出来るから、この項 $\lambda_2 l Z_2$ は小さくすることが使用の仕方により可能である。

モデル II—1

状態方程式 (5), (6) 式のもとで、次の目的関数を最大化する。

$$S = \int_0^T \left[\int_0^{\theta} P(\theta) d\theta + \int_0^{\theta_2} P(\theta_2) d\theta_2 - C_1(\theta, x_1, x_2) - C_2(\theta_2, l, \varepsilon) \right] dt \rightarrow \max. \quad (20)$$

これより、

$$P(\theta) = \partial C_1/\partial \theta + (1-\lambda_1)Z_1 - \lambda_2 l Z_2 \quad (21)$$

$$P(\theta_2) = \partial C_2/\partial \theta_2 - (\varepsilon - \lambda_2 l)Z_2 - (1-\lambda_1)Z_1 \quad (22)$$

を得る。

モデル II—1 は、水量については閉じているから、上水道の水価格は、利水だけを考慮した閉じたシステム (モデル I—2) と同じ結果である。下水道の水価格 ($P(\theta_2)$) は、(22) 式より、下水処理の限界費用に $(\varepsilon - \lambda_2 l)Z_2$ を加え

$(1-\lambda_1)Z_1$ を引いたものから構成される。 εZ_2 は下水処理をしてもなおかつ公共用水域に流入する負荷量に対する汚染責任料であるが、 $-\lambda_2 l Z_2$ は、下水道の普及率が100%でないため下水道を通らずに公共用水域に流入した分に対する免除料と考えられる。さらに、 $(1-\lambda_1)Z_1$ は、利水の際にシステム外へ漏れる水量に対しての免除料と考えられる。

(21) 式と (22) 式をくらべてみると、上水道価格については水の汚し方を減らすことにより価格の上がるのを抑えられるが、下水道価格については逆となっている。しかし、 l が大きくなれば、(13) 式の性質より、 $\partial C_2/\partial \theta_2$ は大きくなり、(22) 式において単純に l を大きくすれば価格が低くなるとは言えない。

モデルⅡ—2

状態方程式 (5), (6), (7) 式のもとで、次の目的関数を最大化する。

$$S = \int_0^T \left[\int_0^{\theta} P(\theta) d\theta + \int_0^{\theta_2} P(\theta_2) d\theta_2 - C_1(\theta, x_1, x_2) - C_2(\theta_2, l, \varepsilon) - C_3(x_3) \right] dt \longrightarrow \max. \quad (23)$$

これより、

$$P(\theta) = \partial C_1 / \partial \theta + (1-\lambda_1)Z_1 - \lambda_2 l Z_2 \quad (24)$$

$$P(\theta_2) = \partial C_2 / \partial \theta_2 - (1-\lambda_1)Z_1 - (\varepsilon - \lambda_2 l)Z_2 - (l-\varepsilon)Z_3 \quad (25)$$

が求められる。ただし、 $dZ_3/dt = \partial C_3/\partial x_3$ である。 $\partial C_3/\partial x_3 > 0$ だから、 $Z_3(t) < 0$ となる。

上水道価格はモデルⅡ—1と変わらないが、下水道価格は、汚泥量のシャドウ・プライスを考慮した分 $(l-\varepsilon)Z_3$ だけ高くなることとなる。

モデルⅢ

再利用を考慮した場合には、(8), (9), (10) 式のもとで次の目的関数を最大化することになる。

$$\begin{aligned}
S = & \int_0^T \left[\int_0^{\theta} P(\theta) d\theta + \int_0^{\theta_2} P(\theta_2) d\theta_2 + \int_0^{\theta_3} P(\theta_3) d\theta_3 \right. \\
& - C_1(\theta, x_1, x_2) - C_2(\theta_2, l, \varepsilon) - C_3(x_3) \\
& \left. - C_4(\theta_3, \varepsilon) \right] dt \longrightarrow \max. \quad (26)
\end{aligned}$$

これより,

$$P(\theta) = \partial C_1 / \partial \theta + (1 - \lambda_1) Z_1 - \lambda_2 l Z_2 \quad (27)$$

$$P(\theta_2) = \partial C_2 / \partial \theta_2 + (1 - \lambda_1) Z_1 - (\varepsilon - \lambda_2 l) Z_2 - (l - \varepsilon) Z_3 \quad (28)$$

$$P(\theta_3) = \partial C_4 / \partial \theta_3 - (\delta - \varepsilon) Z_3 \quad (29)$$

を得る。再利用水の価格は (29) 式より、再利用のための限界費用に再利用により生ずる汚泥量に相当する汚泥責任料 $(\delta - \varepsilon) Z_3$ が加えられたものとなっている。

以上より、閉じた水循環システムとするときには、上水の水価格は、どのような状態、すなわち、下水処理のある・なし、汚泥処理のある・なし、再利用のある・なしにかかわらず、 $P(\theta) = \partial C_1 / \partial \theta + (1 - \lambda_1) Z_1 - \lambda_2 l Z_2$ とすべしということになる。

4-3 水価格形成 2 —— 2 地区の場合

セクション 4-2 では単独地区についての水循環システムモデルを想定し、それに対応した水価格形成を試みたが、本セクションでは、2 地区からなる地域での水循環システムモデルを設定し、これに対応した水価格形成を考察することとする。2 地区は、一つの河川に沿っており、上流の地区を第 1 地区、下流の地区を第 2 地区とする。

(1) 開いたシステム (第 1 地区) + 閉じたシステム (第 2 地区) の場合 —— 下水処理なしのとき (モデルⅣ)

概念図は、図 5-1, 図 5-2 のとおりである。上付き添字は地区番号を示している。

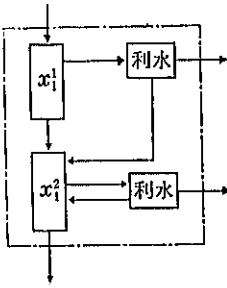


図 5-1

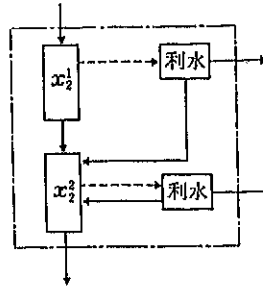


図 5-2

水量についての状態方程式は

$$\frac{dx_1^1}{dt} = A_1^1 - \theta^1 \quad (30)$$

$$\frac{dx_1^2}{dt} = A_1^2 - \lambda_1 \theta^1 - \theta^2 + \lambda_1 \theta^2 \quad (31)$$

で表わせる。

負荷量についての状態方程式は

$$\frac{dx_2^1}{dt} = A_2^1 \quad (32)$$

$$\frac{dx_2^2}{dt} = A_2^2 + \lambda_2 l(\theta^1 + \theta^2) \quad (33)$$

となる。

目的は、2つの地区からなる対象地域の社会的余剰を最大化することである。したがって、この地域の目的関数は次のようになる。

$$S = \int_0^T \left[\int_0^{\theta^1} P(\theta^1) d\theta^1 + \int_0^{\theta^2} P(\theta^2) d\theta^2 - C_1^1(\theta^1, x_1^1, x_2^1) - C_1^2(\theta^2, x_1^2, x_2^2) \right] dt \rightarrow \max. \quad (34)$$

ただし、 θ^1 は第1地区、 θ^2 は第2地区の水需要量を示し、 C_1^1 は第1地区の上水道費用関数を C_1^2 は第2地区の上水道費用関数を表わしている。

これより、第1地区の水価格は

$$P(\theta^1) = \partial C_1^1 / \partial \theta^1 + Z_1^1 - \lambda_1 Z_1^2 - \lambda_2 I^1 Z_2^2 \quad (35)$$

第2地区の水価格は

$$P(\theta^2) = \partial C_1^2 / \partial \theta^2 + Z_1^2 - \lambda_1 Z_1^2 - \lambda_2 I^2 Z_2^2 \quad (36)$$

となる。

(35)式を単独地区のときの開いたシステムモデルに対応する上水道価格(18)式と比べてみると、(35)式の方に $(-\lambda_1 Z_1^2 - \lambda_2 I^1 Z_2^2)$ だけ(18)式に加えられている。 $|\lambda_1 Z_1^2| < |\lambda_2 I^1 Z_2^2|$ の場合には、単独地区のときより2地区のときの方がこの第1地区の上水道価格は高くなる。また、(35)式より、第1地区の水価格の構成要素に第2地区の公共用水域の水量と負荷量のシャドウ・プライスが含まれているが、これは第1地区の水循環システムは開いており、水量・負荷量とも第2地区へ流入しているので、第2地区の公共用水域に対する補償費に相当するものと考えられる。第2地区の上水道価格の構成要素である上水道の限界費用は、原水の汚染により薬品費などが増大し、第1地区の限界費用にくらべて高くなっているものと考えられる。したがって、その場合には、第2地区の水価格の方が第1地区の水価格より高くなると考えられるから、第1地区で集められた補償費 $(-\lambda_1 Z_1^2 - \lambda_2 I^1 Z_2^2)$ を第2地区へまわすことによって両地区の水価格の格差を小さくできるであろう。

また、第1地区の汚染濃度 I^1 を小さくすれば、第2地区の公共用水域への影響が小さくなるから、 $\lambda_2 I^1 Z_2^2$ は小さくなる。したがって、第1地区で価格を低くするためには、 I^1 を小さくすることによって可能である。

(2) 開いたシステム(第1地区)+閉じたシステム(第2地区)の場合——
両地区に下水処理場があるとき(モデルⅦ)

図6—1は対象地域の水量に関するシステムをまた図6—2は負荷量に関するシステムを示している。この地域は、上流の地区は開いたシステムを成し、

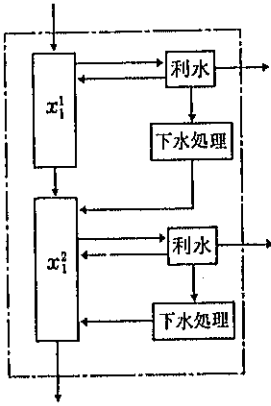


図 6-1

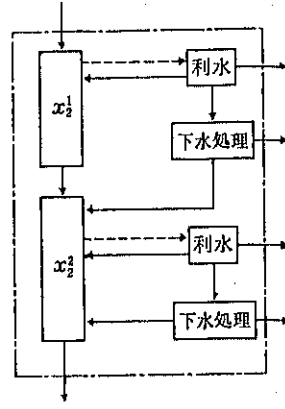


図 6-2

下流の地区は閉じたシステムを構成している。第1地区より第2地区の公共用水域へ放流される水は下水処理を行ってから放流され第2地区へ流入する。したがって、この場合の両地区の状態方程式はそれぞれ次のようになる。水量について

$$\text{第1地区: } \frac{dx_1^1}{dt} = A_1^1 - \theta^1 + \lambda_1 \theta^1 - \lambda_1 \theta_2^1 \quad (37)$$

$$\text{第2地区: } \frac{dx_1^2}{dt} = A_1^2 - \theta^2 + \theta_2^1 + \lambda_1 \theta^2 - \lambda_1 \theta_2^2 + \theta_2^2 \quad (38)$$

であり、

負荷量について

$$\text{第1地区: } \frac{dx_2^1}{dt} = A_2^1 + \lambda_2 l \theta^1 - \lambda_2 l^1 \theta_2^1 \quad (39)$$

$$\text{第2地区: } \frac{dx_2^2}{dt} = A_2^2 + \epsilon \theta_2^1 + \lambda_2 l^2 \theta^2 - \lambda_2 l^2 \theta_2^2 + \epsilon \theta_2^2 \quad (40)$$

となる。

同様に、この場合の各地区の上水、下水価格は各々、次のようになる。

第1地区

$$\text{上水価格：} P(\theta^1) = \frac{\partial C_1^1}{\partial \theta^1} + (1 - \lambda_1)Z_1^1 - \lambda_2 l^1 Z_2^1 \quad (41)$$

$$\text{下水価格：} P(\theta_2^1) = \frac{\partial C_2^1}{\partial \theta_2^1} + \lambda_1 Z_1^1 - Z_1^2 + \lambda_2 l^1 Z_2^1 - \varepsilon Z_2^2 \quad (42)$$

第2地区

$$\text{上水価格：} P(\theta^2) = \frac{\partial C_1^2}{\partial \theta^2} + (1 - \lambda_1)Z_1^2 - \lambda_2 l^2 Z_2^2 \quad (43)$$

$$\text{下水価格：} P(\theta_2^2) = \frac{\partial C_2^2}{\partial \theta_2^2} - (1 - \lambda_1)Z_1^2 - (\varepsilon - \lambda_2 l^2)Z_2^2 \quad (44)$$

第2地区の上水価格と下水価格は、単独地区のモデルⅡ-1の結果と変わらない。(42)式より、第1地区の下水価格は、単独地区のとき下水処理があって開いたシステムモデルのときの結果、 $P(\theta_2) = \partial C_2 / \partial \theta_2 + \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 l Z_2$ と比べると $|Z_1^2 + \varepsilon Z_2^2|$ だけ高くなる。これは、第1地区の下水処理場より放流された水が第2地区の公共用水域に入りこむため、 $|Z_1^2 + \varepsilon Z_2^2|$ もモデルⅦの場合と同様に、第2地区への補償費用と考えられる。

5. おわりに

本考察では、水資源量ならびに水質を考慮した水価格形成を試みた。セクション2-2では、水問題に関して現状把握を行なった。水資源量については、わが国は地形、降雨量等の面から決して豊かではないことがわかった。さらに、水質の悪化も水資源量に大きな影響を及ぼしていることがわかった。このような水資源の状態に対応して、上水道事業では、水源の遠隔化や浄水費の上昇が問題になっている。下水道事業においては、生活環境の改善という従来の目標に加えて、最近では水質汚濁の防止や水資源の有効利用が目標としてあげられるようになってきていることをみた。しかしながら、処理技術の面では、技術的、経済的な壁も厚く、水を大事に汚さないように使用し、公共水域を汚さな

いようにすることが望まれていることがわかった。そして、水の有効利用という点からも、経済的な水の再利用の研究や実施が現在の課題であることをみた。

セクション3では、利水のための費用と料金決定の現状をみた。そして、上水道料金については、現在広く二部料金制度が採られていることをみた。また、下水道料金については、汚水の排除処理施設については利用者が負担すべきであるという見解があり、これに基づいて料金原価が定められているのがわかった。

セクション2で水資源量の有限さや水質汚濁が問題となっていることがわかったにもかかわらず、セクション3での料金決定には何らこれらの事情が明示的に反映させられていないことが明らかとなった。そこで、セクション4では、水資源量と水質を考慮した水価格形成をいくつかの水循環システムに基づいて試みた。水循環システムは、対象地区に応じて種々想定されるものであるから、水価格形成も各地区に対して一律に決められるものではなく、種々の水循環システムに対応して決められるべきものであると考えられる。

本考察では、水価格形成がどのようになされるべきかを考察するのが目的であったため、モデルはいくつかの点で単純化されている。たとえば、費用関数については、キャパシティを決めるということを考慮すれば、建設費用と維持管理費用とに分けて考えることが必要となるであろう。また、水需要関数についても需要の不規則変動を考慮すれば、需要関数の中に確率変数を入れることが必要となるであろう。しかしながら、これらの点を考慮しても、結果が多少複雑になるだけで、水価格形成の方法を試みるという点では違った結果は得られないものと考えられる。

注

- 1) 第三次下水道財政研究委員会報告
- 2) 2-1は、参考文献〔10〕、〔1〕に依るところが多い。

- 3) たとえば、参考文献〔10〕の表-3によると紀ノ川が3740、天龍川が1010と非常に大きく、利根川484、荒川745、淀川105等となっているのに対し、オハイオ川で364、ミシシッピー川が119の他、諸外国の河川の河況係数は二桁であり、テムズ川は8となっている。
- 4) 2-2は参考文献〔4〕、〔11〕、〔8〕に依るところが多い。
- 5) 年間有収水量=1日最大取水量 \times 0.93 \times 有収率 \times 365日、ただし、0.93=配水量/取水量である。
- 6) 詳しい数値は、参考文献〔4〕のP.20表1.9を参照されたい。
- 7) 3-2は参考文献〔4〕に依るところが多い。
- 8) 費用負担に関する荻田報告については参考文献〔4〕、P.37を参照されたい。
- 9) 第3次下水道財政研究委員会報告。
- 10) 浄水過程で負荷量を取り除いて公共水域へ戻していると考え。したがって、利水時の負荷量は無視しうる程小さいと考え、0とみなすと仮定する。
- 11) このモデルは、2-2で述べた再利用の様式の①開放循環系に対応している。以下に出てくる再利用の様式はしたがって、②あるいは③の様式のことをいう。
- 12) 各期の需要関数は独立であるとみなし、将来需要の確定性が仮定されている。
- 13) 解法は参考文献〔12〕に依る。
- 14) 補助変数の経済学的解釈については参考文献〔7〕を参照されたい。また、幾何学的解釈については、参考文献〔9〕を参照されたい。

参考文献

- 〔1〕 国川建二、「水道事業における水資源諸問題」、『日本水道協会雑誌』、第436号、日本水道協会、1971
- 〔2〕 末石富太郎、『都市環境の蘇生』、中央公論社、1975
- 〔3〕 末石富太郎、「公共水システムの復権」、『経済評論』、1976年5月号、日本評論社、1976、pp.18-37
- 〔4〕 東京都首都整備局、『水のコスト分析——各種水源についての経済的側面からの分析——』、東京都首都整備局企画部、1972
- 〔5〕 東京都首都整備局、『水のコスト分析(Ⅱ)』、東京都首都整備局、1973
- 〔6〕 東京都首都整備局、『水のコスト分析(Ⅲ)』、東京都首都整備局、1974
- 〔7〕 Dorfman, R., "An Economic Interpretation of Optimal Control Theory," American Economic Review, 59, 4-5, Sept.~Dec. 1969
- 〔8〕 日経新聞記事、「けいざいレポート、上水道、中水道、下水道」、日本経済新聞、

7月7日, 7月8日, 7月9日, 1977

- [9] 萩原良巳, 萩原清子, 「河川水質水量状態方程式と地域水配分計画」, 『地域学研究』, 第8巻, 日本地域学会, 1978
- [10] 松村賢吉, 「日本の水資源問題」, 『日本水道協会雑誌』, 第436号, 日本水道協会, 1971
- [11] 丸田哲也他, 「特集・下水道——現状と課題」, 『ジュリスト』, No. 545, 有斐閣, 1973
- [12] L. T. ファン著, 中谷貴寿, 和泉陽平共訳『最大原理とその応用』, コロナ社, 1968
- [13] 安井正巳, 『水の経済学』, 日本経済新聞社, 1975

* 本考察作成にあたり, 有益な御助言を与えて下さいました小山昭雄教授(学習院大学), 坂下昇教授(筑波大学), 萩原良巳氏(㈱日本水道コンサルタント)に感謝いたします。