

水道事業における費用効果分析 に関する考察

細井由彦¹・小池淳司²・増田貴則³・飯田奈穂⁴

¹正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目)

²正会員 博士(工学) 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

³正会員 博士(工学) 鳥取大学講師 工学部社会開発システム工学科

⁴正会員 修士(工学) 日本上下水道設計株式会社 (〒105-0022 港区海岸1-9-15 竹芝ビル)

水道事業においても費用効果分析の実施は重要な課題になってきている。すでに個別に効果の計測法が種々提案されている。しかし個別に計測法を考えているだけでは、集計の段階において効果の計測漏れや波及効果の二重計測が発生するおそれがある。そこで便益評価の理論的な枠組みを検討し、消費者行動、生産者行動をもとにした整合的な個別計測手法を提案した。発生ベースの便益を、家庭利用については消費者余剰変化で、事業活動、工業活動については利潤変化で計測するようにした。つづいて提案した手法による事例分析を試みた。

Key Words : *benefit incident matrix, cost effectiveness analysis, consumer surplus, domestic water, general equilibrium model, production function, water works*

1. まえがき

各種公共事業の実施効果を事前に評価し効率的に事業を進めることが必要とされている。そのために種々の分野において費用対効果の分析方法が検討され公表されてきている。水道においても平成13年9月に日本水道協会より「水道事業の費用対効果分析マニュアル(暫定版)」が取りまとめられている。同マニュアル¹⁾は国庫補助対象の事業についてそれぞれ個別に費用便益を評価する方法が具体的に記されており、簡単にすぐに利用できるものとなっている。基本的には事業が実施されなかった場合に発生した被害が実施により回避される場合にその回避された被害額と、事業の実施により軽減された給水費用により、事業の便益を計測する方法がとられている。例えば水源開発施設整備や耐震化事業の便益評価においては、もしその事業が行われなかったならば発生したであろう生活用水や業務用水の被害額により算定されている。他にも水道に関連するものとして異臭味改善の効果をCVMによって評価する研究も行われている^{2), 3)}。著者らも配水管更新事業を水圧改善、赤水改善、漏水防止、管破損防止の効

果により評価することを、また耐震化事業を地震後の復旧の迅速化による断水被害の回避効果により評価することを試みた⁴⁾。

これらは全て具体的な評価方法について述べているが、それらが個別の効果計測であるため、効果の集計段階において新たな問題が生じるおそれがある。すなわち水道事業の総括的效果計測という意味において、個別効果計測の集計値が効果の計測漏れ、あるいは波及効果の二重計算という問題を回避しているかどうかという点である。一方この問題に対して社会資本整備を明示した一般均衡モデルを構築し、その効果の発生から帰着まで解析的に記述し、論理的に整合のとれた効果の定義・計測手法が考案されつつある⁵⁾。水道事業における一般均衡モデルを構築し理論的に整合した効果の定義を行い、各種計測法の理論的位置づけを明確化することで、個別効果の整合的な集計方法を検討することが求められる。

また先の日本水道協会のマニュアルでは渇水対策事業の効果を回避被害額で計測しているが、業務用水の被害額は業種ごとの付加価値生産額や製品出荷額に、給水制限による影響率をかけて求められてい

る。また工業用水道の費用対効果分析においても地震対策により回避される被害額を、操業停止による付加価値減少額に工業用水道の寄与率として $1/8$ をかけるとされている⁶⁾。これについては工業生産に必須の要素は資本、労働等 8 つの要素があり、工業用水もその一つであるのでと説明されている。以上のように回避被害額を生産額に係数をかけることによって求めているが、その係数の根拠は必ずしも明確ではない。著者らの検討⁴⁾においても付加価値生産に対する水道の寄与率の算出根拠が必ずしも合理的であるとは言えなかった。

このような問題を踏まえ、本研究では水道事業におけるプロジェクトの実施効果を計測する方法について、まず便益評価法の理論的枠組みを構築した上で、個別計測手法による効果の整合的な集計手法を明確にする。つぎに消費者行動、生産者行動と整合的な各個別計測手法を提案し、実証分析を通じて計測手法の簡便性を確認することを目的とする。

2. 水道事業の便益の発生及び波及とその評価

水道は生活用水と工業用水として利用されている。生活用水は家庭用と都市活動用に分かれる。いまこれらがそれぞれ独立であるとする、家庭用に消費された水は直接家計に効用をもたらす。これに対して、都市活動や工業に利用された水はそれぞれの場において利潤をもたらす。完全競争のもとではこれらの企業利潤はさらに種々の経済活動を通して、最終的には家計の効用となる。

この様子を示したものが図 1 である。事業実施により水の一般化費用が変化した場合、その効果はまず需要水量の変化として発生する。この時点で水の需要関数から消費者余剰変化 (ΔCS) によって便益を計測するのが、発生ベースにおける便益計測となる。

いま財やサービスの消費量ベクトルを x 、その価格ベクトルを p 、所得を I として、家計の効用関数を $U(x)$ と表すと、効用最大化の問題を解くことでつぎのように間接効用関数 $V(p, I)$ が得られる。

$$\begin{aligned} V(p, I) &= \max_x U(x) \\ \text{s.t. } p \cdot x &= I \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) を解いて得られる通常の需要関数 $x(p, I)$ を用いて消費者余剰変化 ΔCS はつぎのように与えられる。

$$\Delta CS = \int_{p_2}^{p_1} x(p, I) dp \quad (2)$$

発生した便益は次々と経済活動を通して、最終的には全て家計の効用の変化に帰着する。これを計測するのが最終的な帰着ベースの便益計測となる。理

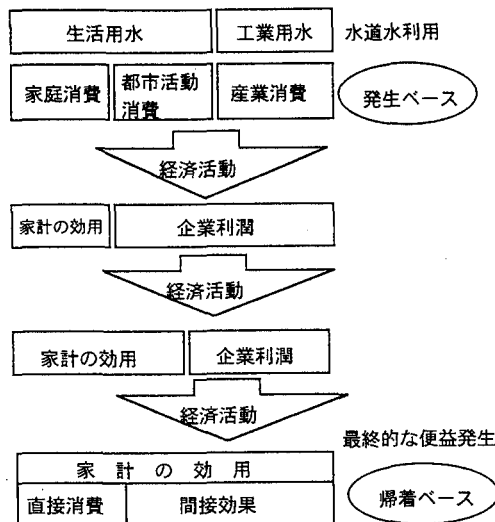


図 1 便益の発生と波及過程

論的には発生から最終的な帰着にいたるいずれの段階で計測しても、その段階における便益を全て漏れなく抑えることさえできればよいことになる。逆に発生ベースと帰着ベースの双方で計測するとダブルカウントになってしまうので注意が必要である。実際は波及するにしがたって計測が難しくなり、発生に近いところで計測する方が一般には容易である。問題は需要関数を求める適切な方法が存在するかどうかである。もし需要関数の推定が困難な場合は水の消費量による直接的な計測ではなく、それが波及したいずれかの段階において、水の消費により発生する便益をそれがない場合に同等の効用を得るために必要となる所得により計測する。具体的には同じ効用をもたらすと考えられる代替財の価格やアンケート調査による支払意思でこれを代替する。

3. 便益の発生及び帰着に関するモデル

(1) 企業と家計の行動モデル

簡単なモデルにより都市活動や産業において水道の使用により発生する便益とその帰着について検討する。

企業 i は生産要素 x_{ji} と労働 l_i を用いて財 i を生産しているとする。企業の行動は次式で表される。利潤

$$\pi_i = p_i y_i - \sum_j w_j x_{ji} - w_l l_i \rightarrow \max \quad (3)$$

生産関数

$$y = f_i(x_{j1}, \dots, x_{jn}, l_i, z)$$

ただし p_i, w_j, w_l はそれぞれ財 i 、生産要素 x_{ji} 、労働 l_i の価格である。 z は生産要素として直接は利用

されないが、社会資本ストックのように生産構造に基本的に関わる要因を示している。

式(3)を解いて供給関数、利潤関数はつぎのように表される。

$$\begin{aligned} y_i &= S_i(x_{j,1}, \dots, x_{j,i}, \dots, l_i, z) \\ &= f_i(\dots, x_{j,i}(p_i, w_1, \dots, w_j, z), \dots, l_i(p_i, w_1, \dots, w_j, z)) \\ \pi_i(p_i, w_1, \dots, w_j, z) &= p_i S_i(p_i, w_1, \dots, w_j, z) \\ &\quad - \sum_j w_j x_{j,i}(p_i, w_1, \dots, w_j, z) - w_l l_i(p_i, w_1, \dots, w_j, z) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $x_{j,i}(p_i, w_1, \dots, w_j, z)$, $l_i(p_i, w_1, \dots, w_j, z)$ は部分均衡を考えるなら通常の需要関数、一般均衡を考えるなら一般均衡の需要関数となる。 S_i はこれらを生産関数に代入して得られる供給関数である。

式(1)で示したように家計は労働及び企業からの利潤配当から得られる所得から財 i を消費して効用を最大化する。再度示すと次式で示される。

$$\begin{aligned} V &= \max U(y, L) \\ \text{s.t. } yp &= w_l \sum_i l_i + \sum_i \pi_i \end{aligned} \quad (5)$$

ここで y , p はそれぞれ y_p , p_p を要素とする財ベクトル, 価格ベクトルである。 L は余暇時間で労働時間との間につぎの関係がある。

$$L + \sum_i l_i = T \quad (6)$$

したがって予算制約式はつぎのように書き直される。

$$yp + Lw_l = I, \quad I = Tw_l + \sum_i \pi_i \quad (7)$$

式(6)より間接効用関数と需要関数がつぎのように求まる。

$$V = V(p_i, w_l, I) \quad (8)$$

$$y_i = y_i(p_i, w_l, I) \quad (9)$$

$$L = L(p_i, w_l, I) \quad (10)$$

π_i の変化を調べるために、式(5)の全微分を求めるとつぎようになる。

$$d\pi_i = \frac{\partial \pi_i}{\partial p_i} dp_i + \frac{\partial \pi_i}{\partial z} dz + \frac{\partial \pi_i}{\partial w_l} dw_l + \frac{\partial \pi_i}{\partial w_i} dw_i \quad (11)$$

右辺第1, 3, 4項にHotellingの補題を適用してつぎのように変形される。

$$d\pi_i = S_i dp_i - x_i dw_l - l_i dw_i + \frac{\partial \pi_i}{\partial z} dz \quad (12)$$

つぎに効用の変化を見るために式(9)より間接効用関数の全微分を求める。

$$dV = \frac{\partial V}{\partial p_i} dp_i + \frac{\partial V}{\partial w_l} dw_l + \frac{\partial V}{\partial I} dI \quad (13)$$

Royの恒等式と所得の限界効用 λ を用いて変形すると次式となる。

$$\begin{aligned} dV &= -y \frac{\partial V}{\partial I} dp - L \frac{\partial V}{\partial I} dw_l + \frac{\partial V}{\partial I} dI \\ &= -\lambda y dp - \lambda L dw_l + \lambda dI \end{aligned} \quad (14)$$

したがって効用変化の金額表示はつぎのようになる。

$$\frac{dV}{\lambda} = -y dp - L dw_l + dI \quad (15)$$

以上の便益帰着関係を表1に示す。なお本構成表はプロジェクトの有無の比較により生ずる便益を示しており、経路依存性は考えていないので、微分形表示としている。生産物価格の変化は企業と家計の間でキャンセルアウトして社会全体で見た場合には0となる。生産要素価格変化及び生産構造変化による便益は企業にのみ発生するので横方向の合計としては残る。賃金変化や企業の利潤変化や家計の所得変化の和は式(7), (8)より0となる。これを通して企業に発生した便益は家計へと波及し結局

$\frac{dV}{\lambda}$ と $\sum x_i dw_i + \sum \frac{\partial \pi_i}{\partial z} dz$ は等しくなる。
 $\sum x_i dw_i + \sum \frac{\partial \pi_i}{\partial z} dz$ が企業における発生ベースの便益, $\frac{dV}{\lambda}$ が家計における帰着ベースの便益となる。

表1 便益帰着構成表

	・ ・ 企業 i ・ ・	企業計	家計	合 計
生産物価格の変化	・ ・ $S_i dp_i$ ・ ・	$\sum S_i dp_i$	$-y dp$	0
生産要素価格変化	・ ・ $x_i dw_i$ ・ ・	$\sum x_i dw_i$		$\sum x_i dw_i$
生産構造の変化	・ ・ $\frac{\partial \pi_i}{\partial z} dz$ ・ ・	$\sum \frac{\partial \pi_i}{\partial z} dz$		$\sum \frac{\partial \pi_i}{\partial z} dz$
賃金変化	・ ・ $-l_i dw_l$ ・ ・	$-\sum l_i dw_l$	$-L dw_l$	0 (式(7),(8)より)
	・ ・ $-d\pi_i$ ・ ・	$-\sum d\pi_i$	dI	
合 計	0 (式(13)より)	0	$\frac{dV}{\lambda}$ (式(16)より)	$\sum x_i dw_i + \sum \frac{\partial \pi_i}{\partial z} dz$

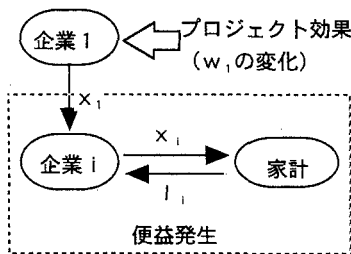


図2 事業実施による要素価格変化と波及モデル

表2 要素価格変化モデルによる便益帰着構成表

企業	家計	計
$-x_{1,i}dw_1$		$-x_{1,i}dw_1$ (発生ベースの便益)
$S_i dp_i$	$-y_i dp_i$	0
$-x_{j,i}dw_j$		0
$-l_i dw_l$	$-L dw_l$	$-T dw_l$
$-d\pi_i$	dI	$dI - \sum_i d\pi_i$
計	0	$\frac{dV}{\lambda} = -x_{1,i}dw_1$
	帰着ベースの便益	

以上のように式(3)から式(15)までの展開と表1により一般均衡モデルの枠組みを示した。なお注意すべきは表1に示される本モデルの枠組みの中では水道事業体はモデルの外におかれている。もし水道事業体も完全競争下にある表1内の企業の一つとして記述するならば、第2行の「生産要素価格変化」は水道事業における同項とキャンセルアウトし、第4列の「合計」列の第2行は0となる。その

代わり生産要素価格変化分は水道事業体の利潤変化となり、最終的には dI の変化を通して家計へと帰着する。しかしながら水道事業は完全競争下にある事業体とは言い難く、ここでは外生的に一般均衡モデルのフレームに影響を及ぼすとして扱っている。

図1に示したようにプロジェクト便益の発生を家庭とそれ以外に区分し、家庭については発生ベースの消費者余剰で、それ以外については表1の第6行第4列の「合計」に示される生産要素価格変化と生産構造変化で計測することを試みる。以下、家庭消費分の消費者余剰による推計を4で述べる。それ以外の消費分の推計については、プロジェクトが企業における「水」という生産要素価格を変化させると考えるモデルを次項の(2)a)で、企業の生産構造を変化させると考えるモデルを(2)b)で展開する。5ではそれらのモデルでは計測できなかったと考えられる外部効果について、可能なものを検討する。6では以上の検討をもとに事例研究を行う。

(2) 給水改善事業による都市活動用水・工業用水の便益評価

a) 生産要素価格変化モデル

図2に示すように、給水改善事業は生産要素である水の価格を変化させると考える。水を要素財1で表し、図の企業1は水道事業体を示している。企業1は水とその他の生産財 j を使用して財 x_1 を生産するので、企業1は新たな均衡のもとで生産を行う。生産関数の z による変化はないとしているので式(13)はつぎのようになる。

$$d\pi_i = S_i dp_i - x_{1,i}dw_1 - x_{j,i}dw_j - l_i dw_l \quad (17)$$

式(16)、(17)および式(8)より、便益帰着関係は表2のようになる。最終的に家計に帰着される便益は、企業における発生ベースの便益で計測す

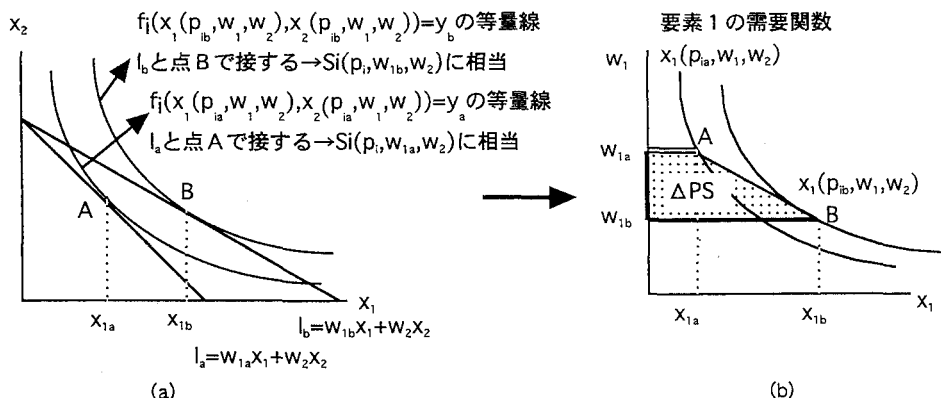


図3 財1の価格変化にともなう生産量の変化と要素需要の変化

ればよいことになる。具体的には生産財である水に対する需要曲線を求めて、その生産者余剰の変化を求めればよい。事業実施のない場合とある場合の水の一般化価格と消費量から需要関数を推定することが必要になるが、現実的にはこれは容易ではない。各業種で使用されている水をその要求される水質から2種類に区分し、上質なものをボトルウォーターで、低質なものを工業用水道で代替しそれぞれの価格により給水便益を評価する試みを行った⁴⁾。これは代替物により需要曲線を推定する一つの試みと解釈できるが、2区分しかなされていないこと、代替物の適切さなどから考えてやや問題も残る。

そこで直接的な水の需要の場合ではなく、CV、あるいはEVの近似値としての利潤変化を用いる方法を考える。水以外の生産要素 x_{ji} と労働 l_i をまとめて x_{2i} とし、これらの価格は変化しないとする。企業 i は x_{2i} と水 x_{1i} を用いて財 i を生産しているとすると、事業実施前、すなわち水の価格が $w_{1,a}$ のときは図3(a)で生産関数 $y_i = f_i(x_{1i}, p_{1,a}, w_{1,a}, w_2)$ 、 $x_{2i}(p_{1,a}, w_{1,a}, w_2)$ の等量曲線と費用線Iaが接する点Aで生産をしている。これは供給量 $S_i(p_{1,a}, w_{1,a}, w_2)$ に相当する。事業実施後は水の価格が $w_{1,b}$ に変化するために点Bにおいて生産することになる。これに応じて水の需要は $x_{1,b,i} = x_{1,i}(p_{1,a}, w_{1,a}, w_2)$ から $x_{1,b,i}(p_{1,b}, w_{1,b}, w_2)$ に変化する。これが図3(b)の $w_{1,a}ABw_{1,b}$ で表され、便益発生時における企業の生産者余剰変化すなわち利潤変化に等しくなる。

いま生産関数をコブ・ダグラス型で考える。企業は労働 L と資本 K と水道 W を投入して付加価値 Y を生産しているとすると、コブ・ダグラス型生産関数はつぎのように示される。

$$Y = \mu K^\alpha L^\beta W^{1-\alpha-\beta} \quad (18)$$

ただし

$$\alpha = \frac{K}{K+L+W}, \quad \beta = \frac{L}{K+L+W} \quad (19)$$

事業実施による付加価値生産額の変化は次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta Y &= \frac{\partial Y}{\partial W} \Delta W = \mu K^\alpha L^\beta (1-\alpha-\beta) W^{-\alpha-\beta} \Delta W \\ &= (1-\alpha-\beta) \frac{\Delta W}{W} Y \end{aligned} \quad (20)$$

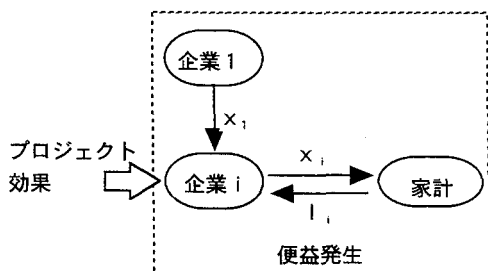


図4 事業実施による生産関数変化と波及モデル

すなわち事業実施前の付加価値生産額と水道投入額、そして実施後の水道投入額の変化を代入することにより付加価値生産額の変化を求めることができ、これをプロジェクト実施時の便益とする。

生産関数としてレオンティエフ型を考えた場合は企業の付加価値生産額はつぎのように表される。

$$Y = \min \left[\frac{K}{a_1}, \frac{L}{a_2}, \frac{W}{a_3} \right] \quad (21)$$

ここで a_1, a_2, a_3 は投入係数である。水道投入額が W_0 に減少した場合の付加価値生産額 Y_0 はつぎようになる。

$$Y_0 = \frac{W_0}{a_3} \quad (22)$$

渇水等が発生したときは生産額が Y_0 に減少していたものが改善事業によりそれが回避され生産額 Y になるとし、回避された被害額を便益と考える。すなわち ΔY はつぎようになる。

$$\Delta Y = \min \left[\frac{K}{a_1}, \frac{L}{a_2}, \frac{W}{a_3} \right] - \frac{W_0}{a_3} \quad (23)$$

都市活動用水の場合には水道以外の要素でもある程度代替が可能と考えられ、レオンティエフ型生産関数を仮定するのはやや過大評価になる可能性がある。一方工業用水でとくに原料用水などに使用されている場合は代替が不可能であり、レオンティエフ型の仮定は妥当であると考えられる。

なおCES型生産関数を考えるのが一般的ではあるが、データの得やすさなど計測上の実用性を考えてここではコブ・ダグラス型とレオンティエフ型を取り上げた。

b) 生産関数変化モデル

ここでは図4に示すように事業実施による給水状況の改善は社会資本整備のように生産構造そのものを変化させると考える。例えば水の供給価格が変化するのではなく、供給の安定性が向上することにより、企業の生産体制が強化されるような場合を考え

表3 生産関数変化モデルにおける便益帰着構成表

企業	家計	計
$p_i \frac{\partial S_i}{\partial z} dz$		$\sum_i p_i \frac{\partial S_i}{\partial z} dz$ (発生ベースの便益)
$S_i dp_i$	$-y_i dp_i$	0
$-x_{1,i} dw_1$		0
$-x_i dw_i$		0
$-l_i dw_i$	$-L dw_i$	$-T dw_i$
$-d\pi_i$	dI	$dI - \sum_i d\pi_i \} 0$
計	0	$\frac{dV}{\lambda} = \sum_i p_i \frac{\partial S_i}{\partial z} dz$
		(帰着ベースの便益)

表4 生活用水の代替物による評価

用途	使用量	代替物	1日当たり	水量当たり	累積
飲料水	2L	ボトルウォーター	200円/日	100円/L	200円
台所用水	70L	持ち帰り弁当(3食)	1500円/日	21.43円/L	1700円
風呂用水	80L	銭湯	300円/日	3.75円/L	2000円
洗濯用水	55L	コインランドリー	200円/日	3.63円/L	2200円
水洗便所用水	43L			3.63円/L	2356円

る。上と同様に水道を要素1で表し、水道事業体である企業1は企業1に水を供給しているが、プロジェクトにより企業の生産関数が変化し新たな均衡による生産体制のもとでの給水が実施される。

式(13)は生産関数を使ってつぎのように書き改められる。

$$d\pi_i = S_i dp_i - x_{i,1} dw_1 - x_{i,j} dw_j - l_i dw_l + \left(p_i \frac{\partial S_i}{\partial z} - w_j \frac{\partial x_{i,j}}{\partial z} - w_l \frac{\partial l_i}{\partial z} \right) dz \quad (24)$$

上式右辺第5項の括弧内第2, 3項は需要関数が変化することによる費用の変化を示しているが、ここでは実際の計算の都合上、生産関数の説明変数である資本と労働の水準は事業実施前後においてその変化は微小であると仮定し、企業による $x_{i,j}$, l_i の需要関数形は z によっては変化しないとする。式(24)はつぎようになる。

$$d\pi_i = S_i dp_i - x_{i,1} dw_1 - x_{i,j} dw_j - l_i dw_l + p_i \frac{\partial S_i}{\partial z} dz \quad (25)$$

便益帰着関係は表3のようになる。a)の場合と異なり、要素1については系内でキャンセルアウトされ、発生ベースの便益は生産力の増加となる。コブ・ダグラス型生産関数を用いるとつぎのように表される。

$$Y_i = \eta_i K_i^{\alpha_i} L_i^{1-\alpha_i} \quad (26)$$

水道については生産関数を変化させる外力として考えるためa)の場合とは異なって生産要素の中に入っておらず、係数 η を投入可能水量 Q の関数としてつぎのように表す。

$$\eta_i = \mu_i Q_i^{\gamma_i} \quad (27)$$

事業の実施により同じ環境下で投入可能水量が $Q_{i,0}$ から $Q_{i,1}$ に変化したとすると、次式で生産力の変化が計算され、これを事業の便益として計測する。

$$\begin{aligned} p_i \frac{\partial S_i}{\partial z} dz &= \mu_i Q_{i,1}^{\gamma_i} K_{i,0}^{\alpha_i} L_{i,0}^{1-\alpha_i} - \mu_i Q_{i,0}^{\gamma_i} K_{i,0}^{\alpha_i} L_{i,0}^{1-\alpha_i} \\ &= \mu_i Q_{i,0}^{\gamma_i} K_{i,0}^{\alpha_i} L_{i,0}^{1-\alpha_i} \left\{ \left(\frac{Q_{i,1}}{Q_{i,0}} \right)^{\gamma_i} - 1 \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

添え字0は事業実施前の値を示し、水以外は事業の

実施前後で変わらないとしている。

γ_i が求めれば、事業を行わない場合の投入水量と事業実施により改善される投入水量と γ_i より式(28)の $\{ \}$ 内を計算して現状の生産額にかけることによって生産量変化すなわち便益の計測が可能になる。

4. 生活用水の便益評価

家庭において用いられている生活用水に対する便益の評価についても、3と同様に家計における生産関数を推定して、事業実施が及ぼす家計の生産力変化より便益を計測する方法も検討されている⁷⁾。しかし理論的な検討が中心であり、具体的に生産関数を推定するには至っていない。そこでより直接的に需要関数を推定して消費者余剰を計測することにする。

生活用水の用途を上質の水質が要求される順に飲料水2L、台所用水70L、風呂用水80L、洗濯用水55L、水洗便所用水43Lとする。そしてその価値を代替行動により評価するとし、飲料水をボトルウォーター、台所用水を中食、風呂用水を銭湯、洗濯用水をコインランドリーの価格で、水洗便所用水については適切な代替物がないので洗濯用水と同等と評価するとし、小売物価統計をもとに表4のように考えた⁴⁾。これより各用途の水量当たりの

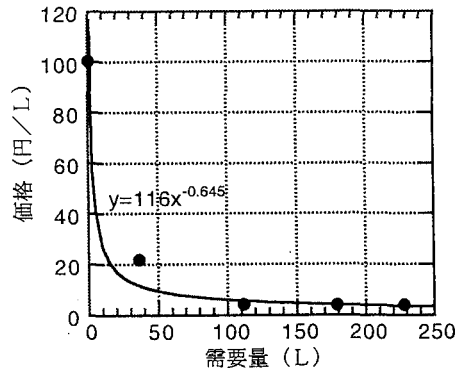


図5 推定された生活用水に関する需要曲線

価値を同表第6列のように評価し、需要曲線を図5のように推定し次式を得た。

$$y = 116 x^{-0.645} \quad (29)$$

ただし中食、銭湯、コインランドリーの便益が全て水によりもたせている訳ではなく、これらの価格が水道の便益に完全に一致していると考えするには問題も残り、今後さらに検討する必要がある。

5. 外部効果の検討

通常の市場を介さない効果として外部効果があり、このような効果は一般均衡でのフレーム以外で計測する必要がある。事業の実施により給水費用が軽減される場合、軽減された費用も事業によりもたらされた便益と考えられる。その場合に直接金額には現れない外部的な費用についても考慮することが、事業の効果を正に評価することにつながる。水道事業の場合の外部費用としては、環境に対する影響がまず考えられる。

事業により何らかの施設を建設する場合には、その施設建設による資材やエネルギーの消費により直接発生する環境負荷と、それらのライフサイクルを通して発生する環境負荷がある。給水事業を続ける上での施設の運転や管理の上で消費される資材やエネルギーについても同様である。さらに発生する廃棄物の処理、処分を通して同様の環境負荷が発生する。これらを可能な限り定量的に把握しておくことが必要である。6の事例研究では地球環境の観点に立ち、原単位が得られたエネルギー消費と二酸化炭素排出を計測項目として採用しているが、個別事例ごとに発生している環境問題をできるだけ取り込んでいくことが必要であろう。

環境負荷のような負の外部効果に対し、正の外部効果として消火用水による便益が考えられる。消火用水が無かった場合の被害額を消火用水に対する支払意思額、消火用水がある場合の被害額を実支払額と考えると、両者の差は消火用水という水の消費そのものに対する便益を発生ベースにおける消費者余剰で計測することになる。

消火活動をともなわない場合の出火箇所からの延焼速度は本道系、耐火系につきそれぞれつぎのように表される⁸⁾。

木造系

$$A_1 = \frac{G + n\varepsilon}{1 + \exp(-a_1(t - c_1))} - \frac{G + n\varepsilon}{1 + \exp(-a_1 c_1)} \quad (30)$$

$$n = (1.39 - 2.82 \times 10^{-4} G)$$

$$\times \exp \left\{ (5.16 \times 10^{-2} + 3.29 \times 10^{-4} G - 2.18 \times 10^{-7} G^2) v \right\}$$

$$\varepsilon = G / (1 + \exp(a \cdot c))$$

$$a = (0.175 + 0.0245v^{1.62}) \cdot (176 / G)^{0.582 \exp(-0.146v)}$$

$$c = \left[\ln(0.980 a^{1.40} G) \right] / a$$

$$a_1 = (0.175 + 0.0245v^{1.62}) (176 / G + n\varepsilon)^{0.582 \exp(-0.146v)}$$

$$c_1 = \left[\ln(0.980 a_1^{1.40} (G + n\varepsilon)) \right] / a_1$$

耐火系

$$A_2 = \frac{G + n\varepsilon}{1 + \exp(-a(t - c))} - \frac{G + n\varepsilon}{1 + \exp(-ac)} \quad (31)$$

$$\varepsilon = G / (1 + \exp(a \cdot c))$$

$$a = 4.36G^{-0.365}$$

$$c = 4.98G^{0.137}$$

ただし A_1, A_2 : 焼損面積 (m^2), t : 出火からの経過時間 (分), G : 1棟の建築面積 (m^2)

上式を用いて対象地域の火災発生数から焼損面積を求めそこにある世帯数と従業者数を求め次式で焼損被害額を求める。

[焼損被害額]

= [面積当たり家屋資産] × [焼損面積]

+ [家庭用品資産] × [世帯数]

+ [従業員当たり事業所償却・在庫資産]

× [従業員数] (32)

消火活動を行った場合についても、火災統計より対象地域の火災1件当たりの焼損面積を求め式(32)より焼損被害額を求める。

最後に両焼損被害額の差を求め、消火用水の便益を計測する。ただし消防水利を水道だけに依存していない場合もあり、その場合には本計測法は消防用水便益を過大に評価するという問題も残されている。また実際は消火用水に対しても水道料金は支払われており、市場取引の対象とも考え得るが、前節までの検討の中で支払意志額に消火用水が組み込まれているとは考えにくいので、外部効果として考慮した。

6. 事例による検討

(1) 給水事業そのものの費用便益

これまでの考え方に従って具体的な計算を試みる。ある給水事業を例として取り上げ、まず平常時の給水事業そのものの費用便益を求め、つぎにあるプロジェクトを実施した場合の便益を求める。

a) 対象とした水道事業

事例研究の対象としてA市の給水事業を取り上げる。本水道事業は市内を流れるB川を水源としている。給水人口は約110万人、給水能力は約65万 m^3 である。当市にはK, U, M, Fの4つの浄水場がある。給水能力はそれぞれ20万 m^3 , 11万 m^3 , 20万 m^3 , 2万7千 m^3 、浄水方法はK, U, Mが急速ろ過、Fが緩速ろ過法である。各浄水場の給水区域の

表5 事例計算の対象とした浄水場の給水区域特性

浄水場	K	U	M	F
給水人口	336,144	204,605	540,545	51,119
付加価値生産額 (百万円)				
農林水産業	977	438	955	0
鉱業	743	101	319	0
建設業	146,675	111,097	218,432	9,944
製造業	280,329	187,328	261,410	101,396
電気・ガス・ 熱供給・水道業	44,184	40,985	35,666	1,551
運輸・通信業	124,979	101,204	132,515	4,527
卸売・小売業, 飲食店	388,663	310,751	623,773	27,250
金融・保険業	45,594	42,021	49,954	1,208
不動産業	53,563	48,649	89,018	3,167
サービス業	325,355	255,490	417,499	21,201

特性を表5に示す。

b) 日常の給水のもたらしている便益

家庭用水に関する便益について、給水による家計の消費者余剰を求める。4で求めた水の需要曲線を水量0から250Lまで積分すると2335円となる。これから当水道事業の給水区域内の平均の水道料金を引くと、給水による消費者余剰は1人1日当たり2320円となる。これに各浄水場の給水区域の人口をかけることで、それぞれの浄水場に関わる家庭用水便益が求められる。

消火用水に関するものを計算するに当たり、まずA市の統計書より年間の平均風速、木造系、耐火系それぞれの建物1棟当たりの建築面積を求めた。なお式(30)、(31)は横軸に出火後経過時間、縦軸に焼損面積をとるとS字上の曲線となり、ある時間を超えると焼損面積は一定値となるので、出火後経過時間は ∞ として計算した。当市では木造系が40%、耐火系が60%であったので比例配分し、消火活動をともしない場合の焼損面積は240 m^2 となった。

つぎに焼損面積に存在する平均世帯数と従業者数を求め、さらにA市の存在する県の統計書より、県内の家屋資産、家庭用品資産、事業所償却・在庫資

表6 コブ・ダグラス型生産関数における $1-\alpha-\beta$ の計算結果

製造業	0.002397
建設	0.001246
電力・ガス	0.002958
商業	0.000433
金融・保険	0.000817
不動産	0.000492
運輸	0.003500
通信・放送	0.001425
サービス	0.006791

産を求めて式(32)に代入し消火活動をともしない場合の焼損被害額を計算した。消火活動をともしない場合の焼損面積は火災統計より1件当たり39.5 m^2 を得たので、これを用いて同様に被害額を求めた。

都市活動用水、工業用水については、3(2)a)で示したコブ・ダグラス型生産関数を用いた事業実施の便益評価方法と同様の方法で、給水量が0から通常の水量になったとして、現在の給水事業の便益を評価することにする。式(20)を適用する上で各業種における $1-\alpha-\beta$ を求めることが必要になる。 $1-\alpha-\beta$ は全投入額に対する水道の投入額の割合であるので、産業連関表より大分類の業種ごとにこれを計算した結果が表6である。これと式(20)における ΔW を W とおくことにより、現給水事業の便益を計測できる。

一方レオンティエフ型の生産関数を用いる場合には式(23)で $W_0=0$ とおくから、付加価値生産額全額で便益を評価することになる。

以上述べてきた方法で各浄水場が給水区域にもたらしている便益を計算した結果が表7である。各値の後の()内は家庭用水に対する比を示している。この表からも分かるように生産関数としてコブ・ダグラス型を使う場合とレオンティエフ型を使う場合には結果に大きな違いがある。レオンティエフ型は付加価値生産と水道投入量が直接関係してお

表7 各浄水場の給水便益の計算結果

浄水場	家庭用水	消火用水	都市活動用水		工業用水	
			コブ・ダグラス型	レオンティエフ型	コブ・ダグラス型	レオンティエフ型
K	284,646	8,837 (0.031)	3,341(0.012)	1,179,899(4.2)	749(0.0026)	312,236(1.1)
U	173,259	6,402 (0.037)	2,688(0.016)	960,433(5.5)	526(0.0030)	219,235(1.3)
M	405,613	11,041 (0.027)	3,775(0.009)	1,472,167(3.6)	606(0.0015)	252,610(0.6)
F	43,288	806 (0.019)	191(0.004)	68,848(1.6)	243(0.0056)	101,396(2.3)

(単位：百万円/年、()内は家庭用水に対する比)

表8 各浄水場の直接費用

浄水場		K	U	M	F
電力		236,061	226,456	250,983	68,127
薬品	硫酸バンド	9,855	3,012	1,250	
	PAC	3,327	868	1,189	
	再生バンド			6,009	
	苛性ソーダ	4,590	1,395	3,490	
	塩素	9,722	2,652	9,662	
	次亜塩素酸ソーダ				736
	小計	27,493	7,926	21,600	736
汚泥	投棄料	6,282	1,809	4,854	
	運搬委託料	8,795	2,533	6,795	
	小計	15,077	4,342	11,648	
オイル		11	9	35	
合計		278,643	238,733	284,266	68,863

(単位：千円/年)

り、他財による水道の代替を全く認めておらず、給水便益を過大に評価していると考えられる。

やや郊外を中心とした給水区域を持つKおよびM浄水場では都市活動用や工業用より家庭用水便益の割合が高く、資産の集中する市の中心部を給水区域にするU浄水場では、消火用や都市活動用の便益の割合が他浄水場に比べて高い。給水区域内に大きな工場を有するF浄水場では工業用の便益の割合が他の浄水場と比べて高い。

c) 日常の給水による費用

日々の給水により必要とされている費用を、とくに事業実施により改善されると考えられる変動費用に関連する部分を中心に検討する。ここでは電力、薬品、機械に使用するオイル、汚泥処分を取り上げ、それらに関する直接的な費用と、環境に対する負荷を取り上げる。

直接費用として平成12年データによる実績費用を表8に示す。緩速濾過であるF浄水場では薬品の使

用が無く、汚泥の発生も無視できる。

環境負荷に関する外部費用については資源枯渇の面からエネルギー消費、地球温暖化の面から二酸化炭素排出を取り上げる。表9に示すようなLCAをもとにした環境負荷原単位にそれぞれの使用量をかけることにより計算した。

汚泥処分に関しては運搬による負荷のみを取り上げた。10tトラックにより処分地まで運搬されているので、発生汚泥量と、浄水場から処分地までの往復距離、10tトラック1台あたりのエネルギー消費量 $1.439\text{Mcal/台/km}^{(1)}$ 、と二酸化炭素排出量 $106.3\text{g-C/台/km}^{(1),(2)}$ より計算した。

環境負荷の計算結果を貨幣評価することは難しいが、便益や直接費用との比較の目安とするために問題も残るが貨幣価値に換算を行った。国民総生産と国民消費エネルギーの比によりエネルギーの単位当たりの価値を求める方法⁽³⁾により、1998年の統計値をもとに計算すると140円/Mcalを得た。二酸化

表9 環境負荷原単位^{(2),(3)}

		エネルギー消費量	二酸化炭素消費量
電力		2.442 Mcal/kwh	0.12 kg-C/kwh
薬品	硫酸バンド	4.6 Mcal/kg	0.299 kg-C/kg
	PAC	0.58 Mcal/kg	0.034 kg-C/kg
	苛性ソーダ	7.23 Mcal/kg	0.137 kg-C/kg
	塩素	9.54 Mcal/kg	0.56 kg-C/kg
	次亜塩素酸ソーダ	0.899 Mcal/kg	0.052 kg-C/kg
オイル		10.021 Mcal/L	0.78 kg-C/L

表10 給水にともなう環境負荷

浄水場	エネルギー消費		二酸化炭素排出	
	(Mal/年)	(千円/年)	(kg-C/年)	(千円/年)
K	57,389,975	8,034,596	2,623,532	6,296
U	39,542,757	5,535,986	1,945,299	4,669
M	48,175,909	6,744,627	2,381,246	5,715
F	11,772,681	1,648,175	583,531	1,400

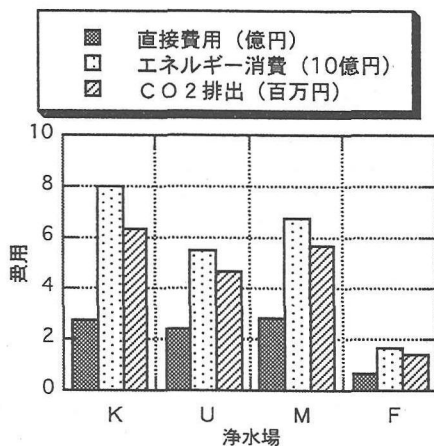


図6 各浄水場の給水費用

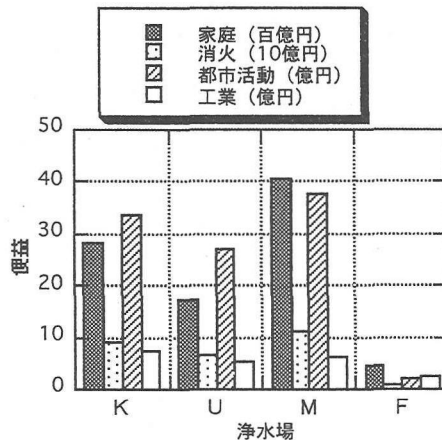


図7 各浄水場の給水便益

炭素排出による被害の費用について種々の研究があるが¹⁴⁾、平均的な値として20ドル/t-Cとし、120円/ドルで換算して2400円/t-Cとする。

以上の計算結果を表10に示す。

浄水場の給水にともなう費用と便益の計算結果を図6、7に示す。都市活動用水、工業用水の便益計測にはレオンティエフ型生産関数では過大評価であると考えられるのでコブ・ダグラス型を用いた結果を使用した。各項目が同じ図上で比較できるように単位を変えている。

環境負荷の金額換算には問題も残るが、両図を見る限り給水便益は給水費用をはるかに上回っている。K浄水場はUおよびM浄水場に比べて直接費用に対するエネルギー消費に関する費用が大きい、これは取水、送水に関する電力消費が大きいためである。緩速濾過であるF浄水場も浄水に関するエネルギーは少ないが送水に関するエネルギーが大きくなっており、相対的にエネルギー消費に関する費用が大きい。

(2) 渇水対策事業の便益の計測

a) 事業概要

水源開発などによる渇水対策を実施する場合のその事業便益について検討する。具体的な事業は設定

していないので、事業費用については計算を行わず、それによりもたらされる便益についての評価方法を示す。

事例対象としているB川で過去に起こった最大の渇水では上水道が最大で27%の取水制限を受けた。取水制限の率が必ずしもそのまま給水制限に直結するとは限らないが、ここでは最悪の場合を考え、渇水により給水量が30%低下するものとする。渇水対策事業によりこれが回避される、すなわち給水量が70%から100%に改善されるものとする。

b) 生活用水便益

1人1日当たりの給水量が70%から100%になった場合の消費者余剰の変化で便益を計測する。本来は図8に示す需要曲線のABDCの部分为消费者余剰変化になる。すなわち渇水時は消費者が水を得るための一般化費用がCからAに上昇して消費量がBとなると考える。しかし渇水時には費用はCのままで各消費者が自発的に使用量を70%まで節水すると考える方が自然であるので、消費者余剰の変化を図のBDEで求める。

式(29)を1人1日当たり使用量250Lの70%である175Lから250Lまで積分し(図8のBDGF)、75L分の水道料金(図8のEDGF)を差し引くことで1人1日当たり273円を得る。

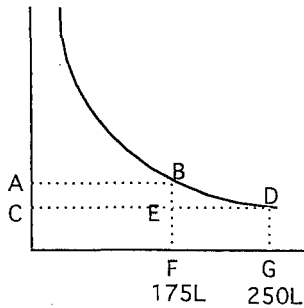


図8 生活用水の消費者余剰

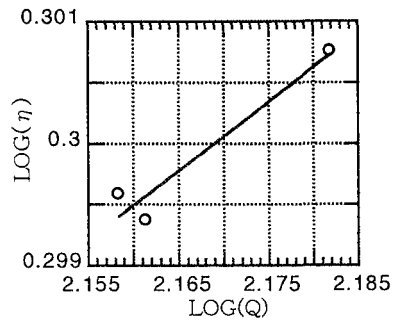
消火用水については給水制限中でも優先的に得られるものとして、事業実施前後で変化はないものとした。

c)生産要素価格変化モデルによる都市活動・工業用水の便益評価

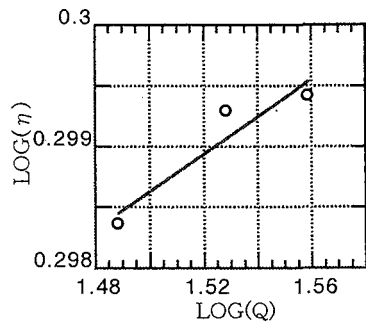
コブ・ダグラス型生産関数を用いる場合は、式(20)において W が渇水時には通常時の0.7であったものが、対策事業により通常時の0.3だけ増加するとしてこれらの値を代入して、各浄水場給水区域内の業種ごとに計算を行う。レオンティエフ型を用いる場合は式(23)より、通常時の付加価値生産額に0.3をかけたものが対策事業により回避される被害額で事業便益となる。

d)生産関数変化モデルによる都市活動・工業用水の便益評価

式(26)、(27)における各パラメータ値を求める必要がある。生産構造はA市も全国も同じであるとして、全国産業連関表より付加価値生産 Y_i に占める資本投入量 K_i 、労働投入量 L_i の割合より α_i を求める。つぎに求めた α_i 及び Y_i 、 K_i 、 L_i を式(26)に代入して η_i を求める。 η_i と使用水量 Q_i の関係より式(27)から μ_i 、 γ_i を求める。投入水量 Q_i のデータとして、製造業とサービス業の2分類でしか得られなかった。そこで業種はこの2分類とし、製造業データより工業の生産関数を、サービス業より都市活動の生産関数を求める。 η と Q の関係を示したものが図9である。直線で近似しその切片と傾き



(i) 製造業における η と Q の関係
(1980～1990年データによる)



(ii) サービス業における η と Q の関係
(1970～1980年データによる)

図9 生産関数パラメータの決定

よりそれぞれ μ_i 、 γ_i を求める。

渇水対策により事業実施前の生産構造を変化させると考えるので、実際は上記パラメータ推定には、給水制限下における生産状態のデータを用いる必要がある。しかし現実的にそのようなデータを得ることは不可能であるので、通常時の生産状況よりパラメータの推定を行った。そこであくまで計算方法を示すという目的で、渇水対策により使用可能水量が30%増加するとして式(28)の $Q_{i,t}$ を $1.3Q_{i,0}$ とおくことにする。

表11 事業実施による便益の計算結果

浄水場	家庭用水	都市活動・工業用水		
		要素価格変化モデル		生産関数変化モデル
		コブ・ダグラス型	レオンティエフ型	
K	91,373	4,802	1,226,412	25,963
U	55,881	3,774	969,598	19,708
M	129,530	5,144	1,417,625	26,786
F	14,019	510	139,927	4,925

(単位：千円/日)

e)計算結果

事業実施による便益の計算結果を表11に示す。要素価格変化モデルでレオンティエフ型生産関数を用いる場合以外は、事業便益は家庭用水の方に大きいという結果になった。レオンティエフ型生産関数を用いた場合はかなり過大に評価することになるが、コブ・ダグラス型生産関数あるいは生産関数変化モデルを用いた場合、両者の都市活動・工業用水に関する便益の計測結果は数倍の違いであり、今後改良の余地があると考えられる。

7. あとがき

本研究では水道事業における費用効果分析を行う上で計測の漏れや二重計測を行うことがないよう、効果の発生と波及過程、外部効果に関する検討を行うとともに、具体的な計測方法についてもいくつかの提案を行った。前半部では水道による給水事業に関する一般均衡モデルの枠組みを考察し、水道におけるプロジェクト実施時における便益評価の実用的な方法を検討した。後半部では事例を取り上げて具体的な検討を行った。基本的な枠組みについて示すことはできたと考えられるが、具体的な計測においては、得られるデータの制約もあり、できるだけ基本的枠組みに沿いつつ、現実的適応と個別的な修正を加えることで精度を高めるよう試みた。今後さらに精度がよく、かつデータ等の得やすい利用しやすい方法を検討していくことが求められる。

また本研究で対象とした効果は、災害時における被害の回避効果のみであった。この効果は災害時に限定されたものであり、他の公共事業の評価とそのまま比較することは不可能である。この問題に対しては不確実性下の便益定義¹³⁾にしたがい、被害の発生確率を考慮すること、さらに、オプション価値を考慮することが必要となる。

本研究は(財)水道技術研究センター「高効率浄水技術開発研究」の一部として行われた。

参考文献

- 1) (社)日本水道協会：水道事業の費用対効果分析マニュアル(案)一暫定版一、2001。
- 2) 平松登志樹・肥田野登：水道水質に関する住民選好の一考察、水道協会雑誌、61巻、5号、1992。
- 3) 山本秀一・岡敏広：飲料水リスク削減に関する支払い意思調査に基づいた統計的生命価値の推定、環境科学会誌、7巻、4号、1994。
- 4) 細井由彦・城戸由能・飯田奈穂：水道における事業実施効果の評価法に関する検討、環境システム研究論文集、Vol.28,2000。
- 5) 森杉壽芳：社会資本整備の便益評価—一般均衡理論によるアプローチ、勁草書房、1997。
- 6) 通商産業省環境立地局：費用対効果分析実施細目—工業用水道事業における費用対効果分析—、1999。
- 7) 岡田憲夫・多々納裕一・小林潔司・並河光夫：渇水時の水消費行動のモデル分析、京都大学防災研究所年報、第34号、B-2、pp.127-144、1991。
- 8) 保野健治郎・早川哲夫：火災と水道—火災を知り防災機能としての水道の役割を考える—、(財)水道技術研究センター、2001。
- 9) 鶴巻峰夫・野池達也：LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究、土木学会論文集、No.643/VII-14、pp.11-20、2000。
- 10) 田井慎吾：エネルギーと環境制約下における水システム、水資源シンポジウム、1982。
- 11) 鶴巻峰夫：環境調和性を考慮した排水処理システムの評価手法に関する研究、東北大学学位論文、1998。
- 12) (財)環境情報普及センター：Monthly News OCTOBER97、<http://www.eic.or.jp/eic/mail/97oct.html>
- 13) ピーター・ネイカン普著、藤岡明房他監訳：環境経済学の理論と応用、勁草出版サービスセンター、1985。
- 14) (財)日本総合研究所：道路投資の評価に関する指針(案)、1998。
- 15) 上田孝行：防災投資の便益評価—不確実性と不均衡の概念を念頭において—、土木計画学研究・論文集、pp.17-34、1997。

A FEW CONSIDERATIONS ABOUT COST EFFECTIVENESS ANALYSIS OF WATERWORKS

HOSOI Yoshihiko, KOIKE Atsushi, MASUDA Takanori, IIDA Naho

The cost effectiveness analysis is necessary for projects of social infrastructures. Methods to evaluate effectiveness of various projects in water works have been proposed. However, there are problems of double count of repercussion effect and omission of some effectiveness. In order to remove these problems, frame of benefit evaluation was theoretically examined from the point of general equilibrium analysis and methods to evaluate project benefit were derived based on behaviors of consumer and producer. Case studies to apply proposed methods were carried out.