

# 水質汚濁の負の価値の推計に 関する研究

Study on estimate of negative value of water pollution

制度設計理論(経済学)

09M43098 氏名 落合正博 指導教員 日引聡

Economics Program

Masahiro Ochiai, Adviser Akira Hibiki

## ABSTRACT

The purposes of this paper are to estimate the inefficiencies of water supply industries and to compare the inefficiencies whether water pollution is considered or not. The inefficiencies were calculated by generalized cost function for the period from 2004 to 2007 in Japan. Moreover, this paper examines how much water service cost raised due to the increase of water pollution. Our main finding is that the inefficiency value when water pollution is not considered is calculated by about 10 excessive percent compared with the inefficiency value when considering it. Furthermore, we found that the water service cost increases by about 0.1 % when water pollution increases by 1 %, and about the 48% is due to the inefficiencies of the water supply industries.

## 1. 研究の背景と目的

水道事業は、公益事業であり、赤字を補助金によって補填してもらえらる等の理由により、経営を効率的に行う誘因がなく、非効率性が発生している可能性が高い。したがって、水道事業の費用関数の推定をする際には、非効率性を考慮した費用関数の定式化が必要である。ところが日本では、水道事業における非効率性を考慮した生産・費用関数の推計に関する先行研究は3つしかない。

まず高田(1997)は、1981年から1995年までの関東地方の22の末端給水広域水道事業体と茨城県内の79の単独水道事業体をあわせたデータを対象として、DEAを用いて技術効率性を計測した研究を行っている。分析の結果、1995年度における末端給水広域事業の技術効率性の平均値は44.6%、単独水道事業の市によるものの平均値は31.9%、町によるものの平均値は18.2%、村によるものの平均値は13.1%であることが示されている。また、Aida et al.(1998)は、1993年の108の関東地方の事業者についてDEAを用いて技術効率性を計測している。分析の結果、全ての事業者の技術効率性の平均値が約88%であった。そして中山(2001)は、1995年から1997年の687の関西地区の末端供給事業者を対象に一般化費用関数を用いて配分非効率性を計測している。その際、配導水管総延長をネットワーク変数として説明変数に加えることにより、規模の経済性も含めて分析をしている。その結果、配分非効率性が標本平均で約13%生じており、また、規模の経済

がないことを明らかにした。

しかし、これらの先行研究はいずれも、分析において水質汚濁が水道費用に与える影響を考慮していないことに問題がある。例えば、水質汚濁が激しい水源を持つ水道事業者が、水質汚濁を除去するために必要な薬品などの投入財を投入している場合であっても、水質汚濁(あるいは、水質改善)を明示的に考慮して分析していなければ、それらは過剰な投入量として計算されてしまう可能性がある。すると、本来、効率的に事業を実施している事業者が非効率的な事業者と判定されてしまう可能性がある。

本研究の目的は、以下の2点である。

- ①水質汚濁を考慮して水道事業の非効率性の計測をする。さらに、水質汚濁を考慮せずに水道事業の費用を分析した場合と比べて、先行研究がどの程度非効率性の推計を過大、あるいは、過小に評価していることを明らかにする。
- ②推計した費用関数を用いて、限界外部費用を推計する。

## 2. モデル

### 2.1 効率性の定義

非効率性はFarrell(1957)によると、技術非効率性と配分非効率性に分けられる。前者はある生産量を生産する時、その生産量を生産するために技術的に必要な生産要素の最小投入量よりも多くの生産要素を投入している場合に生じる非効率

であるのに対し、後者は生産については技術効率的であるが、費用を最小化するような生産要素の比率を選んでいない場合に生じる非効率性を指す。配分非効率性は経営主体が費用最小化行動をとっていないことが原因であり、赤字体質がはびこっている水道事業の現状や、補助金などで生産要素の市場価格と限界費用が乖離している可能性のあることを考えれば、配分非効率性を分析することが望ましいと考えられるので本論文では、配分非効率性に焦点を当てて分析を行う。

## 2.2 モデルの定式化

一般化費用関数は、非効率性を考慮した費用最小化問題として費用関数を推定する方法である。まず、生産要素のシャドープライス  $w^{sh}$  を  $w^{sh} = \theta w^{obs}$  と定義し、この  $w^{sh}$  のもとは、通常の費用関数と同様に扱うことができる。ただし、 $\theta$  は観測される価格とシャドー価格との乖離度を、 $w^{obs}$  は観測される生産要素価格をそれぞれ表している。

本研究では、水道事業者は労働、資本、その他投入財の3つの投入財を投入し、有収水量を産出すると仮定する。また、ネットワーク変数 (N) として配導水管総延長を追加すると、シャドー費用関数は以下のように表せる。

$$C^{sh} = C^{sh}(y, w_1^{sh}, w_2^{sh}, w_3^{sh}, N)$$

さらにシャドー費用関数をトランスログ型に特定化すると以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \ln C^{sh} = & \alpha_0 + \alpha_y \ln y + \frac{1}{2} \alpha_{yy} (\ln y)^2 + \sum_{i=1}^3 \beta_i \ln w_i^{sh} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln w_i^{sh} \ln w_j^{sh} + \sum_{i=1}^3 \delta_{yi} \ln y \ln w_i^{sh} \\ & + \gamma_N \ln N + \frac{1}{2} \gamma_{NN} (\ln N)^2 + \gamma_{Ny} \ln N \ln y + \sum_{i=1}^3 \eta_{Ni} \ln N \ln w_i^{sh} \end{aligned}$$

上記の式においては、以下のようなパラメーターの対称性の制約とシャドー費用に対するシャドー価格についての1次同次の仮定をあらかじめ課す。

$$\beta_{ij} = \beta_{ji} : i \neq j; i, j = 1, 2, 3$$

$$\sum_{i=1}^3 \beta_i = 1, \sum_{i=1}^3 \beta_{ij} = \sum_{j=1}^3 \beta_{ji} = 0, \sum_{i=1}^3 \delta_{yi} = 0, \sum_{i=1}^3 \eta_{Ni} = 0$$

また、シャドーコストシェアを求めると以下のようになる。

$$S_i^{sh} = \beta_i + \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln w_j^{sh} + \delta_{yi} \ln y + \eta_{Ni} \ln N, \quad i = 1, 2, 3$$

さらに、観察される費用を導くと以下のようになる。

$$\ln C^{obs} = \ln C^{sh} + \ln \left[ \sum_{i=1}^3 \theta_i^{-1} \left( \beta_i + \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln(\theta_j w_j^{obs}) + \delta_{yi} \ln y + \eta_{Ni} \ln N \right) \right], \quad i = 1, 2, 3$$

また、観察されるコストシェアを導くと以下のようになる。

$$S_i^{obs} = S_i^{sh} \theta_i^{-1} / \sum_{k=1}^3 \theta_k^{-1} \left( \beta_k + \sum_{j=1}^3 \beta_{kj} \ln(\theta_j w_j^{obs}) + \delta_{yk} \ln y + \eta_{Nk} \ln N \right), \quad i = 1, 2, 3$$

推計は上記の観察される費用とコストシェア式2本を用いて非線形のSUR推計を行う。コストシェア式と一緒に推計することで推計の効率を高めることが目的である。

なお、コストシェア式は全部で3本だが、それらを合計すると1であるため、1本落として推計を行った。

次に、汚濁指標(E)を説明変数に加えた場合について考える。汚濁指標を説明変数に加えない場合と同様にして、シャドー費用関数を以下のように定式化する。

$$\begin{aligned} \ln C^{sh} = & \alpha_0 + \alpha_y \ln y + \frac{1}{2} \alpha_{yy} (\ln y)^2 + \sum_{i=1}^3 \beta_i \ln w_i^{sh} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln w_i^{sh} \ln w_j^{sh} \\ & + \sum_{i=1}^3 \delta_{yi} \ln y \ln w_i^{sh} + \gamma_N \ln N + \frac{1}{2} \gamma_{NN} (\ln N)^2 + \gamma_{Ny} \ln N \ln y + \sum_{i=1}^3 \eta_{Ni} \ln N \ln w_i^{sh} \\ & + \varepsilon_E \ln E + \frac{1}{2} \varepsilon_{EE} (\ln E)^2 + \varepsilon_{Ey} \ln E \ln y + \sum_{i=1}^3 \varphi_{Ei} \ln E \ln w_i^{sh} + \varepsilon_{EN} \ln E \ln N w_i^{sh} \end{aligned}$$

また、パラメーターの制約式も同様にして以下のようになる。

$$\beta_{ij} = \beta_{ji} : i \neq j; i, j = 1, 2, 3$$

$$\sum_{i=1}^3 \beta_i = 1, \sum_{i=1}^3 \beta_{ij} = \sum_{j=1}^3 \beta_{ji} = 0, \sum_{i=1}^3 \delta_{yi} = 0, \sum_{i=1}^3 \eta_{Ni} = 0, \sum_{i=1}^3 \varphi_{Ei} = 0$$

また、シャドーコストシェアを求めると以下のようになる。

$$S_i^{sh} = \beta_i + \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln w_j^{sh} + \delta_{yi} \ln y + \eta_{Ni} \ln N + \varphi_{Ei} \ln E, \quad i = 1, 2, 3$$

さらに、観察される費用を導くと以下のようになる。

$$\ln C^{obs} = \ln C^{sh} + \ln \left[ \sum_{i=1}^3 \theta_i^{-1} \left( \beta_i + \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln(\theta_j w_j^{obs}) + \delta_{yi} \ln y + \eta_{Ni} \ln N + \varphi_{Ei} \ln E \right) \right], \quad i = 1, 2, 3 \quad (*)$$

また、観察されるコストシェアを導くと以下のようになる。

$$S_i^{obs} = S_i^{sh} \theta_i^{-1} / \sum_{k=1}^3 \theta_k^{-1} \left( \beta_k + \sum_{j=1}^3 \beta_{kj} \ln(\theta_j w_j^{obs}) + \delta_{yk} \ln y + \eta_{Nk} \ln N + \varphi_{Ek} \ln E \right), \quad i = 1, 2, 3$$

推計は汚濁指標を考慮しない場合と同様にして行った。

## 3. データ

上水道事業は末端供給事業と用水供給事業に分類でき、前者は主に用水供給事業者から受水し、消費者へ配水する業務が主であるのに対し、後者は取水、浄水、末端供給事業への送水を行う。本研究では、水質汚濁が費用に与える影響を考察することを研究目的の1つとしているため、浄水業務を主として行っている用水供給事業者を分析対象に選んだ。

したがって、本研究で費用関数の推定に用いたサンプルは2004年度から2007年度までの日本における上水道事業の用水供給事業である。建設中の事業所を除いた4年合計延べ274事業所のうち、欠損データを除く254サンプルを用いた。

水道事業者は労働、資本、その他投入財の3つを投入し、1つの産出を得るものとする。さらに、ネットワーク変数として配導水管総延長を変数として追加した。費用は労働費用、資本費用、その他投入財の費用の和である。費用の数値は、『地方公営企業年鑑』から得ている。労働費用は職員給与費、資本費用は支払利息、減価償却費の和、その他投入財の費用は動力費、光熱水費、通信運搬費、修繕費、材料費、薬品費、路面復旧費、委託費、受水費、受水費からその資本費相当分を除いたもの、その他の和である。これらは、有収水量1m<sup>3</sup>当りの金額に年間総有収水量を乗ずることにより数値を得ている。また、産出には年間総有収水量を用いている。

さらに、生産要素価格は以下のようにして求めた。まず労働の価格は労働費用を職員数で割ることにより求め、資本価

格は資本費用を有形固定資産額で割ることにより求めている。また、その他投入財の価格については、『国民経済計算年報』のGDEデフレーターを代理変数としている。

また、水質汚濁のデータについては、『水道水質データベース』の用水供給事業者の原水における水質基準項目の中から、一般細菌のデータを採用した。その際、各浄水場の汚濁状況の平均値のデータをそれぞれの1日平均浄水量で重み付けし、事業者ごとのデータに換算して用いた。

#### 【一般細菌】

水中に存在する細菌の総数を表すものではなく、特定の培養条件下で集落を形成する細菌数を表したものを指す。し尿、下水、配水等による病原生物に汚染されると、その数が著しく増加する傾向にある。一般細菌は生活廃水によって増殖する水質汚濁指標のひとつであり、消毒に費用がかかる。基準値は1mlの検水で形成される集落数が100以下であること。

一般細菌は、水質基準項目(51項目)の中でも、重要な指標であるため、本研究の汚濁指標に採用した。

なお、推計に際して全ての変数をそれぞれの平均値で除したものをを用いることにした。

以下に主要データの記述統計を表にして示す。

表1：主要データの記述統計

変数	平均	標準誤差	最小値	最大値
費用(百万円)	6,145	10217706	176	51,911
有収水量(千m <sup>3</sup> )	70,235	134026	2,676	671,529
労働の価格(千円)	8,255	1629	3,140	13,165
資本の価格	0.0499	0.0276	0.005	0.29
導送配水管総延長(千m)	160.43	169.26	0.40	774
一般細菌(個)	1,587	3171	0.50	16,377

## 4. 推計結果

表2：推計結果

変数	汚濁指標なし	汚濁指標あり
	推定値	推定値
(定数項)	0.103**	0.119**
(有収水量)	0.745***	0.658***
(有収水量) × (有収水量)	0.188***	0.199***
(労働価格)	0.951***	0.892***
(資本価格)	-0.002	-0.013
(その他投入財価格)	0.051	0.121
(労働価格) × (労働価格)	-0.038	0.002
(資本価格) × (資本価格)	0.004	0.003
(その他投入財価格) × (その他投入財価格)	-0.180***	-0.170***
(労働価格) × (資本価格)	-0.073***	-0.088***

(労働価格) × (その他投入財価格)	0.111**	0.086*
(資本価格) × (その他投入財価格)	0.069***	0.085***
(ネットワーク変数)	0.343***	0.388***
(一般細菌)		0.070***
(一般細菌) × (一般細菌)		0.026**
(一般細菌) × (有収水量)		-0.035
(一般細菌) × (労働価格)		-0.021
(一般細菌) × (資本価格)		0.008**
労働価格にかかるパラメータ	0.852***	0.837***
資本価格にかかるパラメータ	0.121***	0.134***

注)\*\*\*は有意水準1%、\*\*は有意水準5%、\*は有意水準10%で有意であることを示している。

表2は、推計に際して汚濁を考慮に入れずに一般化費用関数の推計を行った場合の推計結果と、考慮に入れた場合の結果の一部を並べて表したものである。

両推計とも概ね同様な結果が得られた。まず、注目すべき点として、観測される価格とシャドー価格との乖離を表すパラメーターがいずれの推計でも有意となったことが挙げられる。この結果と配分効率性の検定結果もふまえると、労働、資本、その他投入財の間にそれぞれ配分非効率性が生じており、また、労働価格と資本価格の乖離パラメーターの推定値がいずれも1より小さいことから、その他投入財に比べて労働、資本ともに過剰投入となっていることが明らかになった。また、汚濁指標として一般細菌を入れて推計を行った場合に、汚濁の1次の項、2次の項、そして汚濁と資本価格の交差項が正で有意となった。

#### [配分効率性の検定]

全ての生産要素において、乖離パラメーターが1であれば、費用最小化状態にあり、絶対的価格効率性が達成されていると言う。しかし、一般化費用関数の理論の枠組みでは、同時推定する $C^{obs}$ と $S_i^{obs}$ が $\theta_i$ について0次元同次なので、生産要素の観測される価格とシャドー価格との乖離パラメーター $\theta$ を絶対的な値として求めることができない。そこで、乖離パラメーターのうちのどれか1つを1と基準化することになる。すなわち、相対的価格効率性の検定は行うことができる。本研究では、その他投入財価格の乖離パラメーターを1とした。 $\theta_i = \theta_j$ が成立すれば、第i生産要素と第j生産要素の間の相対的価格効率性が達成されるので、それについて検定する。検定にはWald検定を用いた。検定結果の結果は以下のようになり、いずれの検定結果も有意ではなく、相対的価格効率性が満たされていないことが分かる。

表3：配分効率性の検定

帰無仮説	$\theta_1 = 1$	$\theta_2 = 1$	$\theta_1 = \theta_2$	$\theta_1 = \theta_2 = 1$
統計量	27.19***	2904.86***	373.04***	3001.57***

注) \*\*\*は有意水準 1% で有意であることを示している。

## 5. 考察

### 5.1 配分非効率性の計測

配分の非効率性がどの程度発生しているかを Eakin(1991) で示されている以下の指標 AI を用いて計算した。

$$AI = \frac{C^{obs} - C^{min}}{C^{min}}$$

$C^{obs}$  は説明変数に観測値を代入することによって求められた値を表し、 $C^{min}$  は説明変数に観測値を代入し、 $\theta_1 = \theta_2 = 1$  として求められた値を示している。汚濁の考慮の有無による AI を標本平均で評価し比較すると以下ようになる。

表 4 : AI の比較

	AI
汚濁を考慮しない場合	0.206
汚濁を考慮した場合	0.187

したがって、汚濁を考慮しない場合は 20.6% の配分非効率性が発生しているのに対し、汚濁を考慮した場合は 18.7% の配分非効率性が発生していることが明らかになった。このことから、汚濁を考慮しない場合の配分非効率性は、汚濁を考慮した場合を基準にすると約 10% 過大に推定されていることが明らかになった。

$$\frac{0.206 - 0.187}{0.187} * 100 = 10.1\%$$

これは、水質汚濁を考慮して分析しない場合、汚濁度合いの高い水を洗浄する目的で、薬品費などの投入財を多く投入しているにも関わらず、単に投入財を非効率に（過大に）投入したように扱われてしまうため生じたものと解釈することができる。

### 5.2 水質汚濁が水道費用に及ぼす影響

最後に、水質汚濁の増加によって生じる水道費用の増加（限界外部費用）について考察する。

(\*)式の両辺を  $\ln(E)$  で偏微分すると以下ようになる。

$$\frac{\partial \ln C^{obs}}{\partial \ln E} = \frac{\partial \ln C^{sh}}{\partial \ln E} + \sum_{i=1}^3 \theta_i^{-1} \varphi_{Ei} \left/ \sum_{i=1}^3 \theta_i^{-1} \left( \beta_i + \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln w_j^{sh} + \delta_{yi} \ln y + \eta_{Ni} \ln N + \varphi_{Ei} \ln E \right) \right.$$

上式の右辺第 1 項は最も効率的に経営をしている場合の費用に、水質汚濁が 1 単位増えることで発生する追加的な費用を、また、右辺第 2 項は非効率な経営であるために水質汚濁が 1 単位増えることで追加的に発生する費用の増分をそれぞれ表している。以下では前者を A、後者を B と表記し、それぞれサンプル平均における数値を評価することにする。すると

$$A = \frac{\partial \ln C^{sh}}{\partial \ln E} = \varepsilon_E + \varepsilon_{EE} \ln E + \varepsilon_{Ey} \ln y + \sum_{i=1}^3 \varphi_{Ei} \ln w_i^{sh} + \varepsilon_{EN} \ln N = 0.056$$

$$B = \sum_{i=1}^3 \theta_i^{-1} \varphi_{Ei} \left/ \sum_{i=1}^3 \theta_i^{-1} \left( \beta_i + \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln w_j^{sh} + \delta_{yi} \ln y + \eta_{Ni} \ln N + \varphi_{Ei} \ln E \right) \right. = 0.052$$

とそれぞれ計算により求まる。

よって水質汚濁が水道費用に与える影響は

$$\frac{\partial \ln C^{obs}}{\partial \ln E} = 0.056 + 0.052 = 0.108$$

となった。そのうち A は約 52%、B は 48% を占めていることが明らかになった。すなわち、水質汚濁を 1% 削減するには、水道費用が約 663 万円増加するが、そのうち、最も効率的に経営をしている場合であっても生じる費用増加は、約 345 万円であり、非効率な経営に起因する無駄な費用増加が約 318 万円であることが明らかになった。

## 6. 結論と今後の課題

一般化費用関数を用いた用水供給事業の費用関数の推計を通じて、労働、資本、その他投入財の間にそれぞれ配分非効率性が生じていること、すなわち、その他投入財に比べて労働、資本ともに過剰投入となっていることが明らかになった。さらに、サンプル平均では、汚濁を考慮しない場合の配分非効率性は、汚濁を考慮した場合を基準にすると約 10% 過大に推定されていることが明らかになった。したがって、従来の水質汚濁を考慮しない一般化費用関数の推計では、配分非効率性を誤って計測してしまう恐れがあることが明らかになった。

また、水質汚濁が水道費用に与える影響について計算した結果、水質汚濁を 1% 削減するには、水道費用が約 663 万円増加するが、そのうち、最も効率的に経営をしている場合であっても生じる費用増加は、約 345 万円であり、非効率な経営に起因する無駄な費用増加が約 318 万円であることが明らかになった。

最後に今後の課題について言及する。まず、本研究では水質汚濁の指標として一般細菌のデータを用いたが、除去に最も費用がかかるのは、かび臭であり、その原因物質のデータが十分に得られるのであれば、それを汚濁指標に用いて分析を行うのが望ましい。また、今回の研究では非効率性として配分非効率性に焦点を絞り、技術非効率性については扱わなかったが、技術非効率性とともに議論をすることができれば、より良いだろう。

## 7. 主要参考文献

- [1] 中山徳良(2001)「水道事業の一般化費用関数の推定」、日本経済政策学会年報 第 49 巻 p124-131
- [2] 中山徳良(2003)『日本の水道事業の効率性分析』多賀出版
- [3] B. Kelly Eakin(1991) "Allocative Inefficiency in the Production of Hospital Services", Southern Economic Journal, Vol.58, No1, pp.240-248