



# 日本における下水道事業のメタフロンティア分析

北村, 友宏

---

**(Citation)**

国民経済雑誌, 222(4):59-72

**(Issue Date)**

2020-10-10

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCD0I)**

<https://doi.org/10.24546/E0042274>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/E0042274>



# 国民経済雑誌

日本における下水道事業の  
メタフロンティア分析

北 村 友 宏

国民経済雑誌 第222巻 第4号 抜刷

2020年10月

神戸大学経済経営学会

# 日本における下水道事業の メタフロンティア分析

北 村 友 宏<sup>a</sup>

本稿では、日本の下水道事業の効率性について、より厳密な定量的評価を行うことを試みる。具体的には、下水排除方式の違いに着目し、「合流式下水管を採用している事業体グループ」と「分流式下水管を採用している事業体グループ」の2グループを設定して、メタフロンティア分析を実行した。下水道事業体の個票データを用いた分析の結果、「分流式のみ採用グループ」の技術が費用面で最適であり、その最適費用が「合流式採用グループ」の最適費用よりも小さいことが明らかになった。ただし、実際の費用とグループ内の最適費用の乖離は「分流式のみ採用グループ」のほうが「合流式採用グループ」よりも大きく、前者のグループに属する事業体の費用効率性は、グループ内での最適状態に比べ、平均的に悪いことが示された。よって、分流式下水管のみを採用している下水道事業体は、投入物使用量の削減により、費用を削減する余地が大きい可能性がある。

キーワード 下水道，下水排除方式，メタフロンティア，効率性

## 1 はじめに

日本の下水道事業は、人口減少、節水志向の高まり、設備の老朽化対策や自然災害対策のための設備投資の必要性の増大などにより、今後経営環境が厳しさを増すとされている。そのため、日本の下水道事業においては、より効率的な運営を行うことが求められつつある。

日本の下水道事業について、経済学の視点から分析を行った研究として、中山（2001）、寺田（2003）、川村他（2009）、北村（2020）などがある。中山（2001）は、下水道事業においては密度の経済性と投入物の代替性が存在することを示したが、規模の経済性の存在は示されなかった。寺田（2003）の実証分析では、全体的に人口の少ない地域で下水処理を行う事業体ほど効率性が悪いものの、中には処理人口が少なくても効率性の高い事業体も存在することが明らかになった。また、川村他（2009）は下水道事業に対して国庫から補助金を交付することや一般会計からの資金繰入を行うことは事業体の資本の過剰蓄積を招くこと、お

---

a 神戸大学大学院経済学研究科，kitamura@econ.kobe-u.ac.jp

よび下水道未接続率、職員給与、市町村からの一般会計繰入金の高さによって下水道事業の非効率運営が引き起こされていることを示した。さらに、北村（2020）は、上下水道の一体的運営について「多様化の経済性」の観点から考察し、水道事業と下水道事業を別々の事業体が運営するよりも、1事業体での一体的運営を行ったほうが低費用での運営ができる可能性があることを示した。

他に、日本の上下水道両方を分析した研究としては、たとえば田平（1998）と Kitamura（2019）がある。田平（1998）の研究では、滋賀県の上下水道において、規模の経済性の存在は示されなかった。また、Kitamura（2019）は、上下水道の一体的運営について「労働生産性」および「全要素生産性」の観点から考察し、日本において上下水道の一体的運営を行っている事業体は、分離運営を行っている事業体より必ずしも生産性が高いわけではないことが示された。

効率性分析の流れとしては、まず現行技術の下での最適な費用を表すフロンティアを導出し、次に実際にかかった費用が最適な費用からどの程度乖離しているかを表す効率性を測定する。ここで、さまざまな要因によりフロンティアのグラフ上での位置や形状が変化する可能性があり、それを考慮せずに下水道事業体の効率性評価を行うと、誤った評価を下す恐れがある。

フロンティアのグラフ上での位置や形状の変化に対処して効率性分析を行う手法の1つに、メタフロンティア分析がある。この手法は、事業体が2つ以上のグループに分割され、産出技術がグループごとに異なる場合に用いられる（O'Donnell, 2018）。事業体グループごとにフロンティアを導出するもので、指標の導出により、どのグループの最適な費用が小さいかを検証することも可能である。しかしながら、効率的な運営を行うことが求められつつある日本の下水道事業体に対してメタフロンティア分析を行った研究はほとんど存在しない。そこで本研究では、メタフロンティア分析を日本の下水道事業体に適用し、下水道事業体のより厳密な効率性評価を試みる。その際に、下水排除方式の違いに着目してグループ分けを行う。

下水排除方式には合流式と分流式がある。合流式は雨水と汚水を同一の下水道管に流す方式で、分流式は雨水と汚水を別々の下水道管に流す方式である。日本においては、都市部や一部の地方部では合流式下水道管が整備されてきた一方、分流式下水道管が整備されてきた地域もある。本稿のデータに基づけば、2016年度時点では、分析対象の地方公営企業法適用公共下水道302事業体のうち、1事業体（大阪府守口市）が合流式のみを、193事業体が分流式のみをそれぞれ採用しており、残る108事業体は合流式と分流式を併用している。合流式には、処理能力を超えた量の汚水が未処理のまま河川や海に放流されるというデメリットがあり、これが水質汚濁や景観悪化などの問題を引き起こしている。そこで、日本では2003年

に下水道法施行令が改正され、合流式下水道の分流化や下水処理設備の改善などが推進されることとなった。合流式下水道管を採用している事業者と採用していない事業者では、下水管の総延長、下水処理対象人口、気候などの要因により、両者で下水処理の費用が異なっている可能性がある。そこで、下水道事業のフロンティアの位置や形状が排除方式によって異なると仮定した分析を行い、下水道事業体に対してメタフロンティア分析を行う手法について検討する。

本稿の構成は次のとおりである。第2節ではメタフロンティアモデルと分析方法について、第3節では分析に用いるデータについて、それぞれ説明する。第4節では分析結果について述べ、第5節では得られた結果について考察する。そして、第6節では本稿の結論と残された課題について述べる。

## 2 モデルと分析方法

### 2.1 メタフロンティアモデル

事業者グループの数を  $G$ 、グループ  $g$  に属する事業者の数を  $N_g$  として、下水道事業の可変費用関数を、

$$\begin{aligned} c_{gi} &= c_g(y_{Sgi}, y_{Pgi}, k_{gi}, w_{Lgi}, w_{Ogi}, z_{gi}) \exp(v_{gi}) \exp(u_{gi}), \\ g &= 1, 2, \dots, G, \\ i &= 1, 2, \dots, N_g, \end{aligned} \quad (1)$$

とする。ここで、 $c_{gi}$  はグループ  $g$  に属する事業者  $i$  の可変費用、 $y_{Sgi}$  はグループ  $g$  に属する事業者  $i$  の処理水量、 $y_{Pgi}$  はグループ  $g$  に属する事業者  $i$  の下水管距離、 $k_{gi}$  はグループ  $g$  に属する事業者  $i$  の資本、 $w_{Lgi}$  はグループ  $g$  に属する事業者  $i$  の職員賃金、 $w_{Ogi}$  はグループ  $g$  に属する事業者  $i$  のその他投入物の価格、 $z_{gi}$  はグループ  $g$  に属する事業者  $i$  の下水処理区域の人口密度である。また、 $v_{gi}$  は誤差を表すもので正負の値をとり、 $u_{gi}$  は費用非効率性を表し非負の値をとる。

グループ  $g$  の確定的フロンティア (deterministic frontier) は  $c_g(\cdot)$  であり、当該グループが採用している技術の下での最適な費用を表す。誤差  $v_{gi}$  の要因を含めたもの  $c_g(\cdot) \exp(v_{gi})$  はグループ  $g$  の確率的フロンティア (stochastic frontier) と呼ばれ、位置がランダムに変化する。また、事業者  $i$  がグループ  $g$  に属しているとき、事業者  $i$  の費用の、グループ  $g$  の確率的フロンティアからの乖離は費用非効率性 (cost inefficiency) と呼ばれ、

$$CE_{gi} = \frac{c_{gi}}{c_g(\cdot) \exp(v_{gi})} = \exp(u_{gi}), \quad (2)$$

のように表され、 $u_{gi}$  の定義より、1 以上の値をとる。これは、実際にかかった費用が (誤差を含む) 最適な費用からどの程度乖離しているかを表し、値が 1 に近いほど最適な費用に近

く（効率が良く）、値が大きいくほど最適な費用から離れている（効率が悪い）。

メタフロンティア（metafrontier）は、グループ1からグループGまでのフロンティアの下方包絡線と定義し、 $c^M(\cdot)$ とする。これは、利用可能なすべての技術のうち、最適な技術を採用した下での最適な費用を表す。グループgの確定的フロンティアとメタフロンティアの関係は、

$$c_g(\cdot) = c^M(\cdot) \exp(u_{gi}^M), \quad g=1, 2, \dots, G, \quad i=1, 2, \dots, N_g, \quad (3)$$

のように表される。ここで、 $u_{gi}^M$ は事業者iの費用の、メタフロンティア上の費用（利用可能なすべての技術のうち、最適な技術を採用した下での最適な費用）からの乖離を表し、非負の値をとる。また、任意のgについて、

$$c_g(\cdot) \geq c^M(\cdot), \quad (4)$$

である。

さらに、メタフロンティア上の費用とグループgのフロンティア上の費用の比率を技術ギャップ比（technology gap ratio）と呼ぶ。グループgに属する事業体iの技術ギャップ比は、その定義と(3)より、

$$TGR_{gi} = \frac{c^M(\cdot)}{c_g(\cdot)} = \exp(-u_{gi}^M), \quad (5)$$

が成立する。この指標の値がちょうど1の場合、「グループgが採用している技術の下での最適な費用」と「利用可能なすべての技術のうち、最適な技術を採用した下での最適な費用」が一致しており、この指標が1でない場合、両者が乖離していることが示される。また、技術ギャップ比が1に近いほど、採用している技術が最適な（費用を最小化する）ものに近いことを意味する。

事業体iがグループgに属しているとき、事業体iの費用の、メタフロンティアからの乖離を表す指標も存在する。これはメタ費用非効率性（meta cost inefficiency）と呼ばれ、

$$MCE_{gi} = \frac{c_{gi}}{c^M(\cdot) \exp(v_{gi})} = \frac{c_{gi}}{c_g(\cdot)} \cdot \frac{c_g(\cdot)}{c^M(\cdot) \exp(v_{gi})} = \frac{CE_{gi}}{TGR_{gi}}, \quad (6)$$

のように表される。なお、メタフロンティアモデルに関する詳細はHuang et al. (2014)を、とくに費用関数へのメタフロンティア分析の適用に関する詳細はAbdul-Majid et al. (2017)を、それぞれ参照されたい。

## 2.2 推定方法

(1)の関数形は未知のため、本稿の実証分析ではトランスログ型で近似して推定する。グループ  $g$  のトランスログ型可変費用関数は、

$$\begin{aligned} \ln c_{gi} = & \beta_{0g} + \beta_{YSg} \ln y_{Sgi} + \beta_{YPg} \ln y_{Pgi} + \beta_{Kg} \ln k_{gi} + \beta_{WLg} \ln w_{Lgi} + \beta_{WOg} \ln w_{Ogi} \\ & + \frac{1}{2} \beta_{YSSg} (\ln y_{Sgi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{YPPg} (\ln y_{Pgi})^2 + \beta_{YSPg} (\ln y_{Sgi}) (\ln y_{Pgi}) \\ & + \frac{1}{2} \beta_{KKg} (\ln k_{gi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{WLLg} (\ln w_{Lgi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{WOOg} (\ln w_{Ogi})^2 \\ & + \beta_{YSKg} (\ln y_{Sgi}) (\ln k_{gi}) + \beta_{YPKg} (\ln y_{Pgi}) (\ln k_{gi}) \\ & + \beta_{YSWLg} (\ln y_{Sgi}) (\ln w_{Lgi}) + \beta_{YPLg} (\ln y_{Pgi}) (\ln w_{Lgi}) \\ & + \beta_{YSWOg} (\ln y_{Sgi}) (\ln w_{Ogi}) + \beta_{YPOg} (\ln y_{Pgi}) (\ln w_{Ogi}) \\ & + \beta_{KWLg} (\ln k_{gi}) (\ln w_{Lgi}) + \beta_{KWOg} (\ln k_{gi}) (\ln w_{Ogi}) + \beta_{WLOg} (\ln w_{Lgi}) (\ln w_{Ogi}) \\ & + \beta_{zg} \ln z_{gi} + \frac{1}{2} \beta_{ZZg} (\ln z_{gi})^2 + v_{gi} + u_{gi}, \end{aligned}$$

$$v_{gi} \sim N(0, \sigma_{vg}^2),$$

$$u_{gi} \sim N^+(0, \sigma_{ug}^2),$$

$$g=1, 2, \dots, G,$$

$$i=1, 2, \dots, N_g,$$

(7)

のように表される。 $v_{gi}$  は誤差項、 $u_{gi}$  は非効率項と呼ばれ、 $\sigma_{vg}^2$  はグループ  $g$  の誤差項の分散、 $\sigma_{ug}^2$  はグループ  $g$  の非効率項の切断前の分散である。

ここで、事業者が費用最小化行動をとっていると仮定すると、可変費用関数は投入物価格に関して1次同次となる (Coelli et al., 2005)。投入物価格に関して1次同次の線形制約は、

$$\beta_{WLg} + \beta_{WOg} = 1, \quad (8)$$

$$\beta_{WLLg} + \beta_{WLOg} = 0, \quad (9)$$

$$\beta_{WLOg} + \beta_{WOOg} = 0, \quad (10)$$

$$\beta_{YSWLg} + \beta_{YSWOg} = 0, \quad (11)$$

$$\beta_{YPLg} + \beta_{YPOg} = 0, \quad (12)$$

$$\beta_{KWLg} + \beta_{KWOg} = 0 \quad (13)$$

である。これらの線形制約を課すため、(8)、(9)、(10)、(11)、(12)、(13)を(7)に代入して整理すると、

$$\begin{aligned}
\ln c_{gi}^* &= \beta_{0g} + \beta_{YSg} \ln y_{Sgi} + \beta_{YPg} \ln y_{Pgi} + \beta_{Kg} \ln k_{gi} + \beta_{WLg} \ln w_{Lgi}^* \\
&+ \frac{1}{2} \beta_{YSSg} (\ln y_{Sgi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{YPPg} (\ln y_{Pgi})^2 + \beta_{YSPg} (\ln y_{Sgi}) (\ln y_{Pgi}) \\
&+ \frac{1}{2} \beta_{KKg} (\ln k_{gi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{WLLg} (\ln w_{Lgi}^*)^2 \\
&+ \beta_{YSKg} (\ln y_{Sgi}) (\ln k_{gi}) + \beta_{YPKg} (\ln y_{Pgi}) (\ln k_{gi}) \\
&+ \beta_{YSWLg} (\ln y_{Sgi}) (\ln w_{Lgi}^*) + \beta_{YPWLg} (\ln y_{Pgi}) (\ln w_{Lgi}^*) \\
&+ \beta_{KWLg} (\ln k_{gi}) (\ln w_{Lgi}^*) \\
&+ \beta_{Zg} \ln z_{gi} + \frac{1}{2} \beta_{ZZg} (\ln z_{gi})^2 + v_{gi} + u_{gi}, \\
g &= 1, 2, \dots, G, \\
i &= 1, 2, \dots, N_g,
\end{aligned} \tag{14}$$

となる。ただし、

$$c_{gi}^* = \frac{C_{gi}}{w_{Ogi}}, \quad w_{Lgi}^* = \frac{w_{Lgi}}{w_{Ogi}}, \tag{15}$$

である。なお、トランスログ型関数は未知の関数形をマクローリン展開して導出されるため、各変数を幾何平均で除して基準化することで、対数変換後の平均値を近似点であるゼロに調整する。

メタフロンティア分析では、2段階推定を行う。まず第1段階では、各グループのサンプルを用い、(14)をグループごとに最尤法で推定し、各グループの確定的フロンティア上の可変費用（をその他投入物価格で除したもの）の対数値  $\widehat{\ln c_{gi}^*}$  を予測値として得る。また、事業体  $i$  の費用非効率性を、

$$\widehat{CE}_{gi} = E[\exp(u_{gi}) | \hat{\varepsilon}_{gi}], \tag{16}$$

のように計測できる。ただし、 $\hat{\varepsilon}_{gi}$  は  $v_{gi} + u_{gi}$  の予測値である。

続いて、第2段階では、 $\widehat{\ln c_{gi}^*}$  を被説明変数として、説明変数は第1段階と同じものとして最尤法で推定する。これにより、各グループのフロンティアの下方包絡線であるメタフロンティアが導出される。第2段階で推定する式は、

$$\begin{aligned}
\widehat{\ln c_{gi}^*} &= \beta_{0g}^M + \beta_{YSg}^M \ln y_{Sgi} + \beta_{YPg}^M \ln y_{Pgi} + \beta_{Kg}^M \ln k_{gi} + \beta_{WLg}^M \ln w_{Lgi}^* \\
&+ \frac{1}{2} \beta_{YSSg}^M (\ln y_{Sgi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{YPPg}^M (\ln y_{Pgi})^2 + \beta_{YSPg}^M (\ln y_{Sgi}) (\ln y_{Pgi}) \\
&+ \frac{1}{2} \beta_{KKg}^M (\ln k_{gi})^2 + \beta_{WLLg}^M (\ln w_{Lgi}^*)^2 \\
&+ \beta_{YSKg}^M (\ln y_{Sgi}) (\ln k_{gi}) + \beta_{YPKg}^M (\ln y_{Pgi}) (\ln k_{gi}) \\
&+ \beta_{YSWLg}^M (\ln y_{Sgi}) (\ln w_{Lgi}^*) + \beta_{YPWLg}^M (\ln y_{Pgi}) (\ln w_{Lgi}^*)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +\beta_{KWLg}^M(\ln k_{gi})(\ln w_{Lgi}^*) \\
& +\beta_{Zg}^M \ln z_{gi} + \frac{1}{2}\beta_{ZZg}^M(\ln z_{gi})^2 + v_{gi}^M + u_{gi}^M, \\
v_{gi}^M & \sim N(0, (\sigma_{vg}^M)^2), \\
u_{gi}^M & \sim N^+(0, (\sigma_{ug}^M)^2), \\
g & = 1, 2, \dots, G, \\
i & = 1, 2, \dots, N_g,
\end{aligned} \tag{17}$$

のように定式化される。ここで、 $(\sigma_{vg}^M)^2$  は(17)における誤差項  $v_{gi}^M$  の分散、 $(\sigma_{ug}^M)^2$  は(17)における非効率項  $u_{gi}^M$  の切断前の分散である。ただし、 $v_{gi}^M$  には  $\widehat{\ln c_{gi}^*}$  の予測上の誤差が含まれるため、互いに独立で同一な分布には従わない。しかしながら、確率的フロンティア分析では  $v_{gi}^M$  が互いに独立で同一な正規分布に従うと仮定し、最尤法で推定するため、誤った確率分布の仮定に基づいて尤度関数が構築されることになる。そこで、第2段階の推定（メタフロンティアの導出）においては、係数の標準誤差として疑似最尤法の標準誤差を計算する。なお、本稿では、第1段階の推定（グループ別のフロンティアの導出）の際にも、誤差項や非効率項の確率分布の仮定が誤っている可能性を考慮し、疑似最尤法の標準誤差を計算する。

第2段階において推定した係数を用い、技術ギャップ比とメタ費用非効率性をそれぞれ、

$$\widehat{TGR}_{gi} = E[\exp(-u_{gi}^M) | \widehat{\varepsilon}_{gi}^M], \tag{18}$$

$$\widehat{MCE}_{gi} = \frac{\widehat{CE}_{gi}}{\widehat{TGR}_{gi}}, \tag{19}$$

のように計測できる。ただし、 $\widehat{\varepsilon}_{gi}^M$  は  $v_{gi}^M + u_{gi}^M$  の予測値である。なお、メタフロンティアの計量経済学的手法による導出に関する詳細は、Huang et al. (2014) を参照されたい。

### 3 データと変数の定義

本稿の実証分析では、2016年度における日本の法適用公共下水道事業体の横断面個票データを用いる。データは総務省『地方公営企業年鑑』（2016年度版）から入手した。

まず、可変費用は、費用合計から固定費用に相当する支払利息と減価償却費を引いたものとした。次に、産出量としては、汚水処理水量および污水管・合流管の総延長（下水道管延長）の2種類を用いる。下水道管延長はネットワークの大きさを表す変数と考えることもできるが、イギリスの規制当局 Ofwat が行っている分析と同様に、本稿では下水道管延長を産出量変数の1つとして扱う。固定的投入物である資本としては有形固定資産を用いた。可変的投入物の価格は職員賃金およびその他投入物の価格とする。職員賃金は職員給与費合計を損益勘定所属職員数で除して職員1人当たり賃金の変数を作成した。その他投入物の価格

表1 変数の記述統計（全観測値）

変数名	平均値	中央値	最小値	最大値	標準偏差
可変費用（千円）	1,903,080.37	634,691.50	31,455.00	105,837,144.00	6,823,556.60
汚水処理水量（千 m <sup>3</sup> ）	29,467.65	8,940.86	299.69	1,298,482.50	94,376.99
下水管敷設延長（km）	708.57	352.00	23.00	14,294.00	1,261.67
有形固定資産（千円）	101,267,970.31	33,369,483.00	2,475,018.00	5,112,232,448.00	341,213,782.17
職員賃金（千円／人）	7,830.96	7,752.61	3,417.00	15,136.33	1,533.69
人口密度（人／ha）	50.57	42.90	7.97	165.92	26.99

（注）観測値数は302である。

表2 変数の記述統計（合流式採用）

変数名	平均値	中央値	最小値	最大値	標準偏差
可変費用（千円）	4,244,790.14	1,920,966.00	151,598.00	105,837,144.00	10,975,181.20
汚水処理水量（千 m <sup>3</sup> ）	67,076.73	30,065.09	2,375.82	1,298,482.50	149,741.27
下水管敷設延長（km）	1,381.41	884.00	29.00	14,294.00	1,876.47
有形固定資産（千円）	224,370,399.64	91,583,408.00	3,535,002.00	5,112,232,448.00	546,562,024.49
職員賃金（千円／人）	8,057.98	8,027.30	3,417.00	12,302.61	1,231.26
人口密度（人／ha）	63.04	53.32	22.10	165.92	29.56

（注）観測値数は109である。

については、本稿では2016年度の横断面分析を行うため、すべての事業者が同一年度において同じ価格に直面していると仮定し、その他投入物の価格を全事業者について1として基準化した。さらに、事業者の下水処理区域における人口密度をコントロール変数として用いる。我が国下水道事業における広域化・共同化および官民連携の取り組みに関する生産性・効率性の計測共同研究体（2020）によれば、人口密度は費用に影響を与え、具体的には人口低密度地域と高密度地域では費用が高く、人口密度が中程度の地域では費用が安いと考えられる。本稿においても、この人口密度と費用の関係を想定する。

用いる変数に欠損値のある事業者は除外した。また、一部の変数の観測値が異常値となっている事業者も除外した。これにより、合流式下水道管を1mでも採用している事業者グループの観測値数は109、分流式下水道管のみを採用している事業者グループの観測値数は193、両グループを合計した観測値数は302となった。分析に用いる変数の、両グループにおける記述統計が表1に、「合流式採用グループ」における記述統計が表2に、「分流式のみ採用グループ」における記述統計が表3に、それぞれ示されている。これらの表によれば、規模の大きな事業者が合流式下水道管のみを採用、または合流式と分流式下水道管を併用しており、規模の小さな事業者が分流式下水道管のみを採用していることが分かる。

表3 変数の記述統計（分流式のみ採用）

変数名	平均値	中央値	最小値	最大値	標準偏差
可変費用（千円）	580,560.35	423,892.00	31,455.00	3,689,257.00	605,787.88
汚水処理水量（千 m <sup>3</sup> ）	8,227.29	4,884.13	299.69	63,394.26	9720.31
下水管敷設延長（km）	328.57	246.00	23.00	2,177.00	335.68
有形固定資産（千円）	31,743,800.38	21,284,274.00	2,475,018.00	213,038,896.00	32,026,998.63
職員賃金（千円／人）	7,702.75	7,607.25	4,160.00	15,136.33	1,670.03
人口密度（人／ha）	43.53	35.96	7.97	124.40	22.64

（注）観測値数は193である。

#### 4 分析結果

表4は、第2節で述べた確率的フロンティア可変費用関数の推定結果を示している。2列目はすべてのグループの全観測値をプールして推定した結果、3列目と4列目はそれぞれ、「合流式下水管を採用しているグループ」と「分流式下水管のみを採用しているグループ」について個別に、メタフロンティア分析の第1段階として推定した結果である。また、5列目にはメタフロンティア分析の第2段階として、各グループのフロンティアの下方包絡線であるメタフロンティアの推定結果が示されている。

この表から、全観測値をプールして推定したモデルと各グループを個別に推定したモデルでは、係数推定値に差が見られることがわかる。また、どのモデルにおいても、産出量である処理水量と下水管延長、および可変的投入物価格である職員賃金の1乗項の係数はいずれも正で、conventionalな有意水準で統計的に有意にゼロと異なる。有形固定資産の一乗項の係数も正で、合流式採用グループを除き、conventionalな有意水準で統計的に有意にゼロと異なる。さらに、どのモデルにおいても、人口密度の一乗項の係数は正、二乗項の係数は負となり、一乗項の係数はconventionalな有意水準で統計的に有意にゼロと異なる。二乗項の係数は、メタフロンティアモデルのみ有意水準1%で統計的に有意にゼロと異なる。

続いて、可変費用関数の係数推定値を用いて、各事業体の費用非効率性指標、メタ費用非効率性指標、技術ギャップ比を計測した。これらの指標の、「合流式下水管を採用しているグループ」における記述統計が表5に、「分流式下水管のみを採用しているグループ」における記述統計が表6に、それぞれ示されている。費用非効率性指標（全観測値使用）は、すべてのグループをプールして、全観測値を用いて導出されたフロンティアを基準とした、実際の費用と最適な費用との乖離を表している。また、費用非効率性指標（「合流式採用」観測値使用）は、合流式下水管を採用しているグループの観測値を用いて導出されたフロンティアを基準とした、実際の費用と最適な費用との乖離を表している。同様に、費用非効率性指標（「分流式のみ採用」観測値使用）は、分流式下水管のみを採用しているグループの観測

表4 モデル推定結果

変数名	全観測値	合流式採用	分流式のみ採用	メタフロンティア
処理水量 (対数)	0.454*** (0.044)	0.240** (0.082)	0.429*** (0.066)	0.480*** (0.015)
下水管延長 (対数)	0.260*** (0.056)	0.454*** (0.118)	0.288*** (0.070)	0.248*** (0.020)
有形固定資産 (対数)	0.207*** (0.041)	0.156 (0.085)	0.175** (0.059)	0.197*** (0.014)
職員賃金 (対数)	0.230** (0.076)	0.473** (0.163)	0.231* (0.118)	0.245*** (0.030)
1/2×処理水量 (対数) 二乗	0.069 (0.076)	0.483* (0.189)	0.085 (0.124)	0.041 (0.024)
1/2×下水管延長 (対数) 二乗	0.154 (0.199)	0.425 (0.429)	0.233 (0.328)	0.137* (0.067)
処理水量 (対数)×下水管延長 (対数)	0.030 (0.105)	-0.000 (0.193)	-0.051 (0.190)	0.022 (0.035)
1/2×有形固定資産 (対数) 二乗	0.288* (0.142)	0.799 (0.411)	0.145 (0.201)	0.209*** (0.057)
1/2×職員賃金 (対数) 二乗	-0.971** (0.353)	1.336 (0.721)	-1.540** (0.477)	-1.348*** (0.124)
処理水量 (対数)×有形固定資産 (対数)	-0.090 (0.104)	-0.335** (0.127)	-0.120 (0.135)	-0.051 (0.036)
下水管延長 (対数)×有形固定資産 (対数)	-0.183 (0.127)	-0.499 (0.390)	-0.036 (0.183)	-0.147** (0.045)
処理水量 (対数)×職員賃金 (対数)	0.067 (0.182)	-0.689 (0.568)	0.146 (0.211)	0.101* (0.046)
下水管延長 (対数)×職員賃金 (対数)	-0.213 (0.234)	0.601 (0.381)	-0.162 (0.302)	-0.237* (0.108)
有形固定資産 (対数)×職員賃金 (対数)	0.167 (0.190)	-0.013 (0.595)	0.039 (0.198)	0.185** (0.070)
人口密度 (対数)	0.156*** (0.042)	0.320*** (0.090)	0.125* (0.055)	0.125*** (0.013)
1/2×人口密度 (対数) 二乗	-0.139 (0.080)	-0.332 (0.350)	-0.204 (0.111)	-0.188*** (0.021)
定数項	-0.168** (0.051)	-0.125 (0.105)	-0.203*** (0.054)	-0.245*** (0.007)
誤差項標準偏差	0.160*** (0.025)	0.119*** (0.045)	0.148*** (0.035)	0.027*** (0.004)
非効率項標準偏差	0.199*** (0.061)	0.162** (0.098)	0.248*** (0.068)	0.101*** (0.010)
ベイズ情報量規準	-8.381	-10.644	42.216	-708.321
観測値数	302	109	193	302

(注1) 表中の \*\*\*, \*\*, \* はそれぞれ有意水準 1%, 5%, 10% でそれぞれ統計的に有意であることを表す。

(注2) カッコ内はモデルの定式化に対して頑健な、疑似最尤法の標準誤差である。

値を用いて導出されたフロンティアを基準とした、実際の費用と最適な費用との乖離を表している。

表5と表6から、「合流式採用グループ」に関しては、両グループをプールして導出された費用非効率性指標の平均値のほうが、当該グループの観測値のみを用いて導出された費用非効率性指標の平均値よりも大きいことが分かる。他方、「分流式のみ採用グループ」に関しては、当該グループの観測値のみを用いて導出された費用非効率性指標の平均値のほうが、両グループをプールして導出された費用非効率性指標の平均値よりも大きい。また、実際の

表5 費用非効率性指標・メタ費用非効率性指標・技術ギャップ比の記述統計（合流式採用）

指標名	平均値	中央値	最小値	最大値	標準偏差
費用非効率性指標 (全観測値使用)	1.184	1.167	1.071	1.427	0.080
費用非効率性指標 〔合流式採用〕観測値使用)	1.144	1.127	1.042	1.437	0.078
メタ費用非効率性指標	1.302	1.260	1.051	1.833	0.154
技術ギャップ比	0.886	0.905	0.598	1.009	0.079

(注) 観測値数は109である。

表6 費用非効率性指標・メタ費用非効率性指標・技術ギャップ比の記述統計（分流式のみ採用）

指標名	平均値	中央値	最小値	最大値	標準偏差
費用非効率性指標 (全観測値使用)	1.180	1.149	1.053	1.717	0.103
費用非効率性指標 〔分流式のみ採用〕観測値使用)	1.234	1.187	1.053	1.985	0.149
メタ費用非効率性指標	1.291	1.245	1.051	2.067	0.162
技術ギャップ比	0.956	0.953	0.856	1.114	0.032

(注) 観測値数は193である。

費用とメタフロンティアの乖離を表すメタ費用非効率性指標の平均値は、合流式下水道管を採用しているグループのほうが大きい。さらに、メタフロンティア上の費用と当該グループのフロンティア上の費用の比率である技術ギャップ比の平均値は、「分流式のみ採用グループ」のほうが大きく、1に近い値となっている。

## 5 考 察

前節で述べたとおり、全観測値をプールして推定した可変費用関数のモデルと各グループを個別に推定したモデルでは、係数推定値に差が見られた。このことから、下水道事業者は採用している下水排除方式によって費用構造が異なっており、それぞれのグループのフロンティアの傾きや位置が異なっている可能性がある。また、産出量と職員賃金の1乗項の係数が正で統計的に有意にゼロと異なっているので、これらの係数については経済理論と整合的である。しかしながら、有形固定資産の一乗項の係数は正となった。この係数は、経済理論上は負となる必要があるが、下水道事業をはじめとする公益事業においては、投入物市場が長期均衡から乖離しているため、この符号条件が満たされない場合が多い。よって、有形固定資産の一乗項の係数が符号条件を満たさないことは、公益事業の実証研究においては深刻な問題ではないと考えられる。さらに、人口密度の一乗項の係数は正、二乗項の係数は負となった。これは、人口低密度地域および高密度地域では費用が安く、人口密度が中程度の地

域では費用が高いことを表しており、第3節で述べた仮説とは異なる結果となった。これについては、モデルの定式化の再検討が必要であると考えられる。

費用非効率性指標に関しては、両グループをプールして計測された指標と当該グループの観測値のみを用いて計測された指標では差が生じた。具体的には、「合流式下水管を採用しているグループ」では、両グループをプールして計測された指標のほうが非効率性について厳しく判定されている傾向にあり、「分流式下水管のみを採用しているグループ」では、当該グループの観測値のみを用いて計測された指標のほうが非効率性について厳しく判定されている傾向にある。このことから、実際の費用とグループ内のフロンティア上の最適費用の乖離は「分流式のみ採用グループ」のほうが「合流式採用グループ」よりも大きく、前者のグループに属する事業体の費用効率性は、グループ内での最適状態に比べ、平均的に悪いことが示された。

また、メタ費用非効率性指標の平均値は、「合流式採用グループ」のほうが「分流式のみ採用グループ」よりも大きく計測された。第2節で述べたとおり、メタ費用非効率性指標は利用可能なすべての技術のうち、最適な技術を採用した下での最適な費用であるメタフロンティアからの実際の費用の乖離を表す。この結果から、「分流式下水管のみを採用している事業体のグループ」の技術が最適であり（最適な費用が小さく）、合流式下水管を採用している事業体は、可変費用がその最適水準から大きく乖離していると考えられる。技術ギャップ比に関しては、第2節で述べたとおり、技術ギャップ比が1に近いほど、採用している技術が最適なものに近いことを意味する。技術ギャップ比の平均値は「分流式採用のみ採用グループ」のほうが1に近い値となったことから、「分流式下水管のみを採用している事業体のグループ」の技術のほうが最適であることが分かる。

以上より、日本の下水道事業に関して、下水排除方式では「分流式のみ採用グループ」の技術が最適であり、その最適費用が「合流式採用グループ」の最適費用よりも小さいことが明らかになった。ただし、前述のとおり、「分流式のみ採用グループ」は、そのグループ内の最適費用と実際の費用との乖離が平均的に大きく（費用効率性が悪く）計測されていることから、投入物の削減により、所与の産出量の下で可変費用を削減する余地が大きい可能性がある。ただし、「合流式下水管を採用しているグループ」に属する事業体は規模の大きな事業体が多く、処理水量や下水管延長に対して職員などの投入物を多く使用しており、元々可変費用が相対的に高い可能性がある。よって、本稿の分析結果をもって、合流式下水管を分流式下水管に交換すれば費用が削減されるとは限らないことに注意する必要がある。

## 6 結論と課題

本稿では、今後経営環境が厳しさを増すとされ、より効率的な運営が求められる日本の下

水道事業について、2016年度の横断面個票データを用いた効率性分析を行った。その際に、下水排除方式に着目し、「合流式下水管を採用している事業者グループ」と「分流式下水管のみを採用している事業者グループ」の2グループを設定して、メタフロンティア分析を実行した。

分析の結果、「分流式下水管のみを採用している事業者のグループ」の技術が費用面で最適であり、その最適費用が「合流式下水管を採用しているグループ」の最適費用よりも小さいことが明らかになった。ただし、実際の費用とグループ内の最適費用の乖離は「分流式のみ採用グループ」のほうが「合流式採用グループ」よりも大きく、前者のグループに属する事業者の費用効率性は、グループ内での最適状態に比べ、平均的に悪いことが示された。よって、分流式下水管のみを採用している下水道事業体は、投入物使用量の削減により、費用を削減する余地が大きい可能性がある。

本稿の分析にはいくつか課題が残されている。まず、最適な費用を表すフロンティアの位置に影響を与える要因と、非効率性に影響を与える要因を区別する必要があると考えられる。本稿では、フロンティアの位置に影響を与える要因を下水排除方式の違いと仮定し、非効率性に影響を与える要因は考慮しなかった。両方の要因を厳密に区別することができれば、下水道事業の費用構造の解明につながる可能性がある。次に、今回は単年度の横断面分析を行ったが、今後は複数年度のパネルデータ分析を行うことで、分析の精緻化を図る必要があると考えられる。以上を今後の課題としたい。

#### 注

\* 本研究は国土交通省による下水道技術開発（GAIAプロジェクト）の助成を受けたものである。

#### 参 考 文 献

- Abdul-Majid, Mariani, Manizheh Falahaty, and Mansor Jusoh. 2017. "Performance of Islamic and Conventional Banks: A Meta-frontier Approach." *Research in International Business and Finance* 42: 1327-35.
- Coelli, Timothy J., D. S. Prasada Rao, Cristopher J. O'Donnell, and George E. Battese. 2005. *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, second ed., Springer, New York, NY, USA.
- Huang, Cliff J., Tai-Hsin Huang, and Nan-Hung Liu. 2014. "A New Approach to Estimating the Metafrontier Production Function Based on a Stochastic Frontier Framework." *Journal of Productivity Analysis* 42(3): 241-54.
- Kitamura, Tomohiro. (2019) "Productivity Analysis of Vertical Integrated Management of Water and Sewerage Industries in Japan." *International Public Economy Studies* (『国際公共経済研究』) 30: 67-77.
- O'Donnell, Christopher J. 2018. *Productivity and Efficiency Analysis: An Economic Approach to Measuring and Explaining Managerial Performance*, Springer, Singapore, Singapore.

- 川村顕・大平邦明・吉田あつし（2009）「公共下水道事業の効率性と補助金」Department of Social Systems and Management Discussion Paper Series 1236, University of Tsukuba.
- 北村友宏（2020）「上下水道事業における多様化の経済性」Discussion Papers 2005, Graduate School of Economics, Kobe University.
- 田平正典（1998）「滋賀県下市町村の上・下水道事業の費用分析：生産関数による接近」『彦根論叢』311: 95-116.
- 寺田守正（2003）「下水道事業評価における包絡分析法（DEA）適用可能性」『同志社政策科学研究』4(1): 123-42.
- 中山徳良（2001）「下水道事業の費用構造」『公益事業研究』53(2): 23-31.
- 我が国下水道事業における広域化・共同化および官民連携の取り組みに関する生産性・効率性の計測共同研究体（2020）『我が国下水道事業における広域化・共同化および官民連携の取り組みに関する生産性・効率性の計測共同研究体 評価書』（令和2年2月版）.