

下水排除方式の違いを考慮した 下水道事業の効率性評価

——パネルデータによるメタフロンティア分析——

北 村 友 宏

- I はじめに
- II モデルと分析方法
- III データと変数の定義
- IV 分析結果
- V 考察
- VI 結論と課題

I はじめに

日本における下水道事業は、人口の減少、節水志向の高まり、老朽化した設備の更新や自然災害への対処のための設備投資の必要性が増していることなどにより、今後、運営環境がより厳しくなるとされている。そのため、日本の下水道事業では、より効率的な運営が求められるようになるであろう。

日本の下水道事業に関して経済学的な実証分析を行った研究として、中山（2001）、寺田（2003）、川村他（2009）、北村（2020 a, b）などがある。中山（2001）の実証分析では、下水道事業における密度の経済性と投入物の代替性の存在を示したが、規模の経済性の存在は明らかにされなかった。寺田（2003）は、全体として人口の少ない地域において下水処理を行っている事業体ほど効率性が悪い傾向があるものの、処理人口が少なくても効率的な運営を行う事業体も存在することが示された。また、川村他（2009）の実証分析では、下水道事業に対する国庫からの補助金や一般会計からの資金繰入は事業体の資本を過剰に蓄積させること、お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が下水道事業の非効率的な運営をもららしていることを明らかにした。続いて、北村（2020 a）は、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、つまり「多様化の経済性」が存在することを明らかにした。さらに、北村（2020 b）は、「分流式下水管のみを採用している事業体グループの技術が費用最小化の観点から最適であり、その最適費用が「合流式下水管を採用している事業体グループ」の最適費用よりも

小さいことを示したものの、「分流式下水管のみを採用している事業体グループ」は、グループ内での最適状態に比べ、効率性が平均的に悪いことが明らかになった。

北村 (2020 a) のように、日本の水道事業と下水道事業の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) は、滋賀県の上下水道において規模の経済性が存在するか否かを検証したが、規模の経済性の存在は示すことができなかった。また、Kitamura (2019) の研究では、日本において上下水道を一体的に運営している事業体は、水道事業と下水道事業を別々に運営し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明らかになった。

事業の効率性を分析するには、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、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指標を求めるという流れが一般的である。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、誤った評価をする可能性がある。

フロンティアのグラフ上での位置や形状の変化・差異を考慮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ってい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し、指標を求めることにより、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。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は、北村 (2020 b) がメタフロンティア分析を行い、下水排除方式の違いに着目してグループ分けを行うことで、下水道事業体のより厳密な効率性評価を試みている。この、北村 (2020 b) の実証分析は、2016年度のみデータを用いた単年度の横断面分析である。本研究では北村 (2020 b) の分析をベースに、複数事業体・複数年度のパネルデータを用いてデータの観測値数を増やすことで、より精緻な分析を行うことを試みる。

日本で採用されている下水排除方式には、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管に流す方式であるのに対し、分流式は雨水と汚水を別々の下水管に流す方式である。日本では、都市部や一部の地方部では合流式下水管が整備されてきた一方、分流式下水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、分析期間の2001年度から2017年度において、分析対象の地方公営企業法適用公共下水道74事業体のうち、40事業体が合流式と分流式を併用しており、34事業体が分流式のみを採用している¹。合流式下水管には、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

1 地方公営企業法適用公共下水道事業体のなかで、2017年度現在、守口市と門真市（どちらも大阪府）が合流式下水管のみを採用している。ただし、データに欠損値が存在するため、両事業体は本稿の分析用データに含めていない。

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につながる。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。ただし、前述の合流式と分流式を併用している40事業体に関しては、この施行令改正後も、分析期間最終年度の2017年度までに合流式下水管を完全に廃止しておらず、分流式下水管のみの採用には移行していない。合流式下水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。そこで本稿では北村（2020b）と同様に、下水道事業の費用フロンティアの位置や形状が排除方式によって異なることを仮定した分析を行う。

本稿の構成は次のとおりである。まず第Ⅱ章ではメタフロンティアモデルと分析方法について、第Ⅲ章では実証分析に用いるデータについて、それぞれ述べる。続いて第Ⅳ章では分析結果について説明し、第Ⅴ章では得られた結果について考察する。そして、第Ⅵ章では本稿の結論と残された課題について説明する。

Ⅱ モデルと分析方法

本章では、北村（2020b）に基づき、メタフロンティア分析を実行するためのモデルとその推定方法を説明する。事業体グループの数を G 、グループ g に属する事業体の数を N_g として、下水道事業の可変費用関数を、

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

としよう。ここで、 c_{gi} はグループ g に属する事業体 i の可変費用、 y_{Sgi} はグループ g に属する事業体 i の処理水量、 y_{Pgi} はグループ g に属する事業体 i の下水管距離、 k_{gi} はグループ g に属する事業体 i の資本、 w_{Lgi} はグループ g に属する事業体 i の職員賃金、 w_{Ogi} はグループ g に属する事業体 i のその他投入物の価格、 z_{gi} はグループ g に属する事業体 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の値も負の値もとる、 u_{gi} は費用非効率性を表し非負の値をとる。

$c_g(\cdot)$ はグループ g の確定的フロンティアであり、この $c_g(\cdot)$ の値は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であり、そのフロンティアの位置がランダムに変化する。また、事業体 i がグループ g に属するとき、事業体 i の可変費用の、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、

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

のように表される。前述のとおり u_{gi} が非負の値をとることから、 CE_{gi} は1以上の値をとる。この CE_{gi} 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、効率性が良いことを示す。他方、 CE_{gi} の値が大きいほど最適な費用から離れており、効率性が悪いことを示す。

メタフロンティアは、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であり、 $c^M(\cdot)$ 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、

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

となる。ここで、 u_{gi}^M は非負の値をとり、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）からの乖離を表す。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、グループ g のフロンティア上の費用に占めるメタフロンティア上の費用の割合は技術ギャップ比と呼ばれる。グループ g に属する事業者 i の技術ギャップ比を TGR_{gi} とすると、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。この値が1であれば、「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」が一致している。他方、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）ものに近いことを示している。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に関する詳細は Abdul-

Majid et al. (2017) や北村 (2020 b) を、それぞれ参照されたい。

引き続き北村 (2020 b) に基づき、前述のメタフロンティアモデルの推定方法について述べる。(1) の関数形は未知であるため、トランスログ型で近似して推定する。(1) の両辺の自然対数を取り、マクローリン展開を適用すると、グループ g のトランスログ型可変費用関数は、

$$\begin{aligned}
 \ln c_{gi} = & \beta_{0g} + \beta_{YSg} \ln y_{Sgi} + \beta_{YPg} \ln y_{Pgi} + \beta_{Kg} \ln k_{gi} + \beta_{WLg} \ln w_{Lgi} + \beta_{WOG} \ln w_{Ogi} \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{YSSg} (\ln y_{Sgi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{YPPg} (\ln y_{Pgi})^2 + \beta_{YSPg} (\ln y_{Sgi})(\ln y_{Pgi}) \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{KKg} (\ln k_{gi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{WLLg} (\ln w_{Lgi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{WOOg} (\ln w_{Ogi})^2 \\
 & + \beta_{YSKg} (\ln y_{Sgi})(\ln k_{gi}) + \beta_{YPKg} (\ln y_{Pgi})(\ln k_{gi}) \\
 & + \beta_{YSWLg} (\ln y_{Sgi})(\ln w_{Lgi}) + \beta_{YPWLg} (\ln y_{Pgi})(\ln w_{Lgi}) \\
 & + \beta_{YSWOG} (\ln y_{Sgi})(\ln w_{Ogi}) + \beta_{YPWOG} (\ln y_{Pgi})(\ln w_{Ogi}) \\
 & + \beta_{KWLg} (\ln k_{gi})(\ln w_{Lgi}) + \beta_{KWOg} (\ln k_{gi})(\ln w_{Ogi}) + \beta_{WLOG} (\ln w_{Lgi})(\ln w_{Ogi}) \\
 & + \beta_{Zg} \ln z_{gi} + \frac{1}{2} \beta_{ZZg} (\ln z_{gi})^2 + v_{gi} + u_{gi}, \\
 v_{gi} \sim & N(0, \sigma_{vg}^2), \\
 u_{gi} \sim & N^+(0, \sigma_{ug}^2), \\
 g = & 1, 2, \dots, G, \\
 i = & 1, 2, \dots, N_g,
 \end{aligned} \tag{6}$$

となる。 v_{gi} は誤差項、 u_{gi} は非効率項となる。 σ_{vg}^2 はグループ g の誤差項の分散であり、 σ_{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、事業体の費用最小化行動を仮定すると、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)。本稿のモデルの場合、投入物価格に関して1次同次の線形制約は、

$$\beta_{WLg} + \beta_{WOG} = 1, \tag{7}$$

$$\beta_{WLLg} + \beta_{WLOG} = 0, \tag{8}$$

$$\beta_{WLOG} + \beta_{WOOg} = 0, \tag{9}$$

$$\beta_{YSWLg} + \beta_{YSWOG} = 0, \tag{10}$$

$$\beta_{YPWLg} + \beta_{YPWOG} = 0, \tag{11}$$

$$\beta_{KWLg} + \beta_{KWOg} = 0 \tag{12}$$

となる。これらの線形制約を課すため、(7)、(8)、(9)、(10)、(11)、(12) を (6) に

代入して整理すると,

$$\begin{aligned}
 \ln c_{gi}^* &= \beta_{0g} + \beta_{YSg} \ln y_{Sgi} + \beta_{YPg} \ln y_{Pgi} + \beta_{Kg} \ln k_{gi} + \beta_{WLg} \ln w_{Lgi}^* \\
 &\quad + \frac{1}{2} \beta_{YSSg} (\ln y_{Sgi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{YPPg} (\ln y_{Pgi})^2 + \beta_{YSPg} (\ln y_{Sgi})(\ln y_{Pgi}) \\
 &\quad + \frac{1}{2} \beta_{KKg} (\ln k_{gi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{WLLg} (\ln w_{Lgi}^*)^2 \\
 &\quad + \beta_{YSKg} (\ln y_{Sgi})(\ln k_{gi}) + \beta_{YPKg} (\ln y_{Pgi})(\ln k_{gi}) \\
 &\quad + \beta_{YSWLg} (\ln y_{Sgi})(\ln w_{Lgi}^*) + \beta_{YPWLg} (\ln y_{Pgi})(\ln w_{Lgi}^*) \\
 &\quad + \beta_{KWLg} (\ln k_{gi})(\ln w_{Lgi}^*) \\
 &\quad + \beta_{Zg} \ln z_{gi} + \frac{1}{2} \beta_{ZZg} (\ln z_{gi})^2 + v_{gi} + u_{gi}, \\
 g &= 1, 2, \dots, G, \\
 i &= 1, 2, \dots, N_g,
 \end{aligned} \tag{13}$$

を得る。ただし,

$$c_{gi}^* = \frac{c_{gi}}{w_{Ogi}}, \quad w_{Lgi}^* = \frac{w_{Lgi}}{w_{Ogi}}, \tag{14}$$

である。なお, トランスログ型関数は前述のとおり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して, 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段階推定を実行する。まず第1段階では, 各グループの標本を用い, (13) をグループごとに最尤法で推定して, 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,

$$\widehat{CE}_{gi} = E[\exp(u_{gi}) | \hat{e}_{gi}], \tag{15}$$

のように求める。ただし, \hat{e}_{gi} は $v_{gi} + u_{gi}$ の予測値である。

次に, 第2段階では, 第1段階で求めた予測値 $\widehat{\ln c_{gi}^*}$ を被説明変数として, 説明変数は第1段階と同じものを用いて最尤法で推定する。この推定により, 各グループのフロンティアの下方包絡線としての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,

$$\begin{aligned}
\widehat{\ln c_{gi}^*} &= \beta_{0g}^M + \beta_{YSg} \ln y_{Sgi} + \beta_{YPg}^M \ln y_{Pgi} + \beta_{Kg}^M \ln k_{gi} + \beta_{WLG}^M \ln w_{Lgi}^* \\
&+ \frac{1}{2} \beta_{YSSg}^M (\ln y_{Sgi})^2 + \frac{1}{2} \beta_{YPPg}^M (\ln y_{Pgi})^2 + \beta_{YSPg}^M (\ln y_{Sgi})(\ln y_{Sgi}) \\
&+ \frac{1}{2} \beta_{KKg}^M (\ln k_{gi})^2 + \beta_{WLLg}^M (\ln w_{Lgi}^*)^2 \\
&+ \beta_{YSKg}^M (\ln y_{Sgi})(\ln k_{gi}) + \beta_{YPKg}^M (\ln y_{Pgi})(\ln k_{gi}) \\
&+ \beta_{YSWLg}^M (\ln y_{Sgi})(\ln w_{Lgi}^*) + \beta_{YPWLg}^M (\ln y_{Pgi})(\ln w_{Lgi}^*) \\
&+ \beta_{KWLg}^M (\ln k_{gi})(\ln w_{Lgi}^*) \\
&+ \beta_{Zg}^M \ln z_{gi} + \frac{1}{2} \beta_{ZZg}^M (\ln z_{gi})^2 + v_{gi}^M + u_{gi}^M, \\
v_{gi}^M &\sim N(0, (\sigma_{vg}^M)^2), \\
u_{gi}^M &\sim N^+(0, (\sigma_{ug}^M)^2), \\
g &= 1, 2, \dots, G, \\
i &= 1, 2, \dots, N_g,
\end{aligned} \tag{16}$$

である。ここで、 $(\sigma_{vg}^M)^2$ は (16) における誤差項 v_{gi}^M の分散、 $(\sigma_{ug}^M)^2$ は (16) 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 は $\widehat{\ln c_{gi}^*}$ の予測上の誤差を含むため、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、確率分布の仮定に対して頑健な、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、技術ギャップ比を、

$$\widehat{TGR}_{gi} = E \left[\exp(-u_{gi}^M) | \hat{\varepsilon}_{gi}^M \right], \tag{17}$$

のように求める。ただし、 $\hat{\varepsilon}_{gi}^M$ 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) や北村 (2020 b) を参照されたい。

III データと変数の定義

本稿の実証分析では、2001年度から2017年度までの日本の法適用公共下水道事業体のパネルデータを用いる。変数は、「その他投入物の価格」を除き、2016年度のデータ

での横断面分析を行った北村 (2020 b) と同じものを用いた。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する。次に、産出量は、「汚水処理水量」および「污水管・合流管の総延長 (下水管延長)」の2種類を用いる。下水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 が行っている分析や北村 (2020 b) の分析と同様に、本稿では下水管延長を産出量の1つとして扱う。固定的投入物である資本としては、有形固定資産額を用いる。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。具体的には、職員賃金は職員給与と費合計を損益勘定所属職員数で除して職員1人当たり賃金を求め、それを用いる。その他投入物の価格については、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する。北村 (2020 b) では単年度の横断面分析のため、その他投入物の価格を全事業者について1として基準化していたが、本稿では複数年度のパネルデータ分析のため、物価水準をその他投入物の価格として用いた。さらに、コントロール変数として、事業者の下水処理区域での人口密度を用いる。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。これらの変数のうち、物価水準は日本銀行 HP の時系列統計データ検索サイトにて公表されている国内企業物価指数総平均 (2015年基準) を用い、それ以外の変数は、総務省『地方公営企業年鑑』(各年度版) からデータを入手して作成した。

なお本稿では、分析期間の途中で市町村合併を行った事業者は除外した。これにより、合流式下水管と分流式下水管を併用している事業者の数は40、分流式下水管のみを採用している事業者の数は34、両グループを合計した事業者の数は74となった。欠損値の事業者・年度を除けば、2001年度から2017年度までの17年間で、観測値数は1,227である。分析に用いる変数の、両グループにおける記述統計が第1表に、「合流式と分流式を併用している事業者グループ」における記述統計が第2表に、「分流式のみを採用している事業者グループ」における記述統計が第3表に、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管と分流式下水管を併用しており、規模の小さな事業者が分流式下水管のみを採用していることが分かる。

IV 分析結果

第4表に、第II章で述べた可変費用関数の推定結果が示されている。2列目は「合流式下水管と分流式下水管を併用しているグループ」と「分流式下水管のみを採用してい

第1表 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）	4,984,519.07	1,070,414.00	18,238.00	112,708,848.00	13,606,020.29
汚水処理水量（千 m ³ ）	72,539.05	13,677.06	0.39	1,370,659.75	180,930.46
下水管敷設延長（km）	1,428.33	580	19	14,294.00	2,239.55
有形固定資産（千円）	286,768,401.30	65,048,472.00	3,535,002.00	5,824,999,936.00	731,397,349.52
職員賃金（千円/人）	8,803.36	8,627.12	3,910.33	16,249.50	1,714.44
その他投入物価格（2015年=1）	0.97	0.98	0.92	1.02	0.03
人口密度（人/ha）	58.57	52.61	1.01	167.48	28.46

注 観測値数は1,227である。

出典：筆者作成

第2表 変数の記述統計（合流式・分流式併用）

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）	8,609,641.36	2,623,592.50	127,235.00	112,708,848.00	17,694,250.56
汚水処理水量（千 m ³ ）	125,559.08	39,214.64	1.85	1,370,659.75	232,868.14
下水管敷設延長（km）	2,309.37	1,215.50	28.00	14,294.00	2,712.71
有形固定資産（千円）	498,147,377.27	158,740,592.00	3,535,002.00	5,824,999,936.00	943,637,092.85
職員賃金（千円/人）	9,274.98	9,133.32	5,597.60	15,642.69	1,552.04
その他投入物価格（2015年=1）	0.97	0.98	0.92	1.02	0.03
人口密度（人/ha）	65.95	55.82	27.18	167.48	30.82

注 観測値数は664である。

出典：筆者作成

るグループ」の両方の全観測値をプールして推定した結果を示している。また、3列目と4列目はそれぞれ、「合流式・分流式併用グループ」と「分流式のみ採用グループ」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。さらに、4列目はメタフロンティア分析の第2段階として、両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を示している。

この表から、両グループ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、そしてメタフロンティアを導出するモデルでは、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、有意水準1%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は、合流式・分流式併用グループのモデルでは負の値で、統計的に有意にゼロと異なるとはいえない結果となった。他方、それ以外のモデルでは、有形固定資産の一乗項の係数は正で、有意水準1%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、人口密度の一乗項と二乗項の係数は正となった。どちらの係数も、分流式のみ採用グループのモデルを除き、conventional な有意水準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、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、「合流式と分流式を併用

第3表 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)	709,064.00	436,127.00	18,238.00	3,704,998.00	809,289.35
汚水処理水量 (千 m ³)	10,007.44	5,504.60	0.39	64,062.47	14,193.54
下水管敷設延長 (km)	389.24	250.00	19.00	2,185.00	511.36
有形固定資産 (千円)	37,468,863.03	24,462,790.00	3,672,970.00	202,631,824.00	37,991,791.00
職員賃金 (千円/人)	8,247.13	8,068.80	3,910.33	16,249.50	1,731.36
その他投入物価格 (2015年=1)	0.97	0.98	0.92	1.02	0.03
人口密度 (人/ha)	49.87	50.04	1.01	132.25	22.50

注 観測値数は563である。

出典：筆者作成

しているグループ」での記述統計が第5表に、「分流式下水管のみを採用しているグループ」での記述統計が第6表に、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て、実際の費用が最適な費用からどの程度乖離しているかを表している。また、費用非効率性指標（「合流式・分流式併用」観測値使用）は、合流式下水管と分流式下水管を併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て、実際の費用が最適な費用からどの程度乖離しているかを表している。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値を用いて導出されたフロンティアを基準として、実際の費用が最適な費用からどの程度乖離しているかを表している。

第5表と第6表から、「合流式・分流式併用グループ」に関しては、全観測値を用いて（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、全観測値を用いて（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、実際の費用がメタフロンティアからどの程度乖離しているかを表すメタ費用非効率性指標の平均値は、「分流式のみ採用グループ」のほうが、「合流式・分流式併用グループ」に比べて大きい。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。

第4表 モデル推定結果

変数名	全観測値	合流式・分流式併用	分流式のみ採用	メタフロンティア
処理水量（対数）	0.335*** (0.022)	0.159*** (0.026)	0.462*** (0.047)	0.403*** (0.010)
下水管延長（対数）	0.471*** (0.027)	0.734*** (0.037)	0.288*** (0.032)	0.402*** (0.014)
有形固定資産（対数）	0.140*** (0.020)	-0.011 (0.036)	0.242*** (0.060)	0.194*** (0.009)
職員賃金（対数）	0.376*** (0.039)	0.504*** (0.058)	0.287*** (0.088)	0.304*** (0.018)
1/2×処理水量（対数）二乗	0.109*** (0.007)	0.050*** (0.008)	0.151*** (0.013)	0.128*** (0.005)
1/2×下水管延長（対数）二乗	0.227*** (0.057)	0.321*** (0.123)	0.376*** (0.083)	0.099*** (0.032)
処理水量（対数）×下水管延長（対数）	-0.087*** (0.014)	0.021 (0.018)	-0.159*** (0.038)	-0.124*** (0.007)
1/2×有形固定資産（対数）二乗	0.229*** (0.047)	0.372*** (0.081)	0.506*** (0.141)	0.053 (0.033)
1/2×職員賃金（対数）二乗	-0.145 (0.274)	0.083 (0.385)	-0.193 (0.314)	-0.149** (0.070)
処理水量（対数）×有形固定資産（対数）	-0.035*** (0.011)	-0.056*** (0.017)	-0.018 (0.040)	-0.024*** (0.007)
下水管延長（対数）×有形固定資産（対数）	-0.146*** (0.050)	-0.313*** (0.098)	-0.303*** (0.106)	0.031 (0.029)
処理水量（対数）×職員賃金（対数）	-0.134*** (0.034)	-0.203*** (0.045)	-0.091 (0.056)	-0.131*** (0.021)
下水管延長（対数）×職員賃金（対数）	-0.140 (0.086)	0.007 (0.121)	-0.215* (0.113)	-0.113** (0.048)
有形固定資産（対数）×職員賃金（対数）	0.352*** (0.072)	0.176 (0.116)	0.373*** (0.123)	0.294*** (0.042)
人口密度（対数）	0.190*** (0.035)	0.684*** (0.039)	0.008 (0.043)	0.101*** (0.016)
1/2×人口密度（対数）二乗	0.247*** (0.024)	0.210** (0.101)	0.165 (0.029)	0.218*** (0.010)
定数項	-0.463*** (0.023)	-0.167*** (0.017)	-0.540*** (0.037)	-0.552*** (0.004)
誤差項標準偏差（対数）	-3.555*** (0.127)	-3.529*** (0.059)	-3.710*** (0.263)	-7.043*** (0.266)
非効率率項標準偏差（対数）	-2.671*** (0.170)	-15.295*** (3.715)	-2.268*** (0.232)	-3.071*** (0.114)
ベイズ情報量規準 観測値数	7.196 1227	-335.157 664	131.217 563	-1592.247 1227

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。

出典：筆者作成

第5表 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・分流式併用)

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)	1.240062	1.197753	1.057580	3.381801	0.1501199
費用非効率性指標 (「合流式・分流式併用」観測値使用)	1.000381	1.000381	1.000379	1.000382	0.0000005
技術ギャップ比	0.806235	0.826815	0.143335	1.170773	0.1110961

注 観測値数は664である。

出典：筆者作成

第6表 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)	1.260070	1.207189	1.051513	2.095730	0.1800697
費用非効率性指標 (「分流式のみ採用」観測値使用)	1.317900	1.247615	1.060315	2.937347	0.2396947
技術ギャップ比	0.917521	0.934020	0.672602	1.036256	0.0663190

注 観測値数は563である。

出典：筆者作成

V 考 察

前章で述べたとおり、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る結果となった。このことから、採用している下水排除方式によって、下水道事業の費用構造が異なっており、各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。この点は、2016年度のみデータを用いて横断面分析を行った北村(2020b)と同様である。また、産出量(処理水量と下水管延長)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。これも、北村(2020b)と同様の結果である。しかしながら、有形固定資産の一乗項の係数が正の値として推定されることや、それが負の値であっても統計的に有意にゼロと異なるとはいえない判断になる結果が見られた。この係数は、経済理論上は負となる必要がある。北村(2020b)の横断面分析では、有形固定資産の一乗項の係数がすべて正となっていた。この点に関して、北村(2020b)でも述べられているように、下水道事業をはじめとする公益事業では、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や、満たしていても統計的に有意にゼロと異なるとはいえないことは、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、人口密度の一乗項と二乗項の係数は正であり、「分流式のみ採用グループ」を除いて統計的に有意にゼロと異

なる結果となった。人口密度の変数は正の値をとるため、これは、「分流式のみ採用グループ」を除いて、人口高密度地域ほど費用がより高くなることを表している。また、「分流式のみ採用グループ」に関しては、人口密度と下水道事業の可変費用に相関関係があるとはいえないことが示された。よって、人口密度の係数に関しては、第Ⅲ章で述べた仮説とは異なる結果となった。北村（2020 b）の横断面分析では、人口密度の一乗項の係数が正で、二乗項の係数が負となっており、これも仮説に反する結果であった。本稿において観測値数を増やしたパネルデータ分析を行っても、人口密度の係数について仮説に反する結果が得られたため、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、全観測値を用いて（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・分流式併用グループ」では、全観測値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り、「分流式のみ採用グループ」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フロンティア上の最適費用との乖離は「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。この点は、2016年度の横断面分析を行った北村（2020 b）と定性的には同様の結果である。

また、技術ギャップ比に関しては、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に近い値となり、これは北村（2020 b）と整合的な結果である。第Ⅱ章で述べたとおり、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。よって、技術ギャップ比で見れば、「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「合流式下水管と分流式下水管を併用している事業体のグループ」の技術に比べ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・分流式併用グループ」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）計測されているため、所与の産出量の下で、投入物の削減により可変費用を削減する余地が大きいと考えられる。ただし、「合流式・分流式併用グループ」に属する事業体は、大都市など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や設備などの投入物を多く使用しており、元々、可変費用が「分流式のみ採用グループ」に比べ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しなければならない。この結論は、2016年度のみデータのより横断面分析を行った北村 (2020 b) と同様の結論である。

VI 結論と課題

本稿では、今後運営環境がより厳しくなることが予想され、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、2001年度から2017年度までのパネルデータを用いた効率性分析を行った。その際に、北村 (2020 b) と同様に、下水排除方式に着目し、「合流式・分流式下水管を併用している事業体グループ」と「分流式下水管のみを採用している事業体グループ」の2グループを定義し、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体グループ」の技術が費用面で最適であり、その最適費用が「合流式・分流式下水管を併用している事業体グループ」の最適費用よりも小さいことが示された。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明らかになった。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と考えられる。この結論は、単年度の横断面分析を行った北村 (2020 b) と同様の結論であり、本稿で観測値数を増加させて複数年度のパネルデータ分析を実行しても、横断面分析と同様の結論が得られたことになる。

本稿の分析にはいくつか課題が残されている。まず、本稿では分析期間中に市町村合併を行った事業体を除いて分析したため、結果にバイアスが生じている可能性がある。日本では、2005年に「平成の大合併」と呼ばれる、大規模な市町村合併が全国的に行われ、その前後の年度にも市町村合併が行われた事業体が多い。よって、データセット作成の際に、合併によって存続した事業体と消滅した事業体を適切に処理したうえで、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。次に、これは北村 (2020 b) からの課題であるが、本稿においても、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ていない。フロンティアの位置を変化させる要因と、効率性を改善させたり悪化させたりする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ことを期待される。以上を今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（20K13483）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Abdul-Majid, M., M. Falahaty, and M. Jusoh. (2017) "Performance of Islamic and Conventional Banks: A Meta-frontier Approach." *Research in International Business and Finance* Vol.42: 1327-35.
- [2] Coelli, T. J., D. S. P. Rao, C. J. O'Donnell, and G. E. Battese. (2005) *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, second ed., Springer, New York, NY, USA.
- [3] Huang, C. J., T. Huang, and N. Liu. (2014) "A New Approach to Estimating the Metafrontier Production Function Based on a Stochastic Frontier Framework." *Journal of Productivity Analysis* Vol.42, Issue.3: 241-54.
- [4] Kitamura, T. (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』) Vol.30: 67-77.
- [5] O'Donnell, C. J. 2018. *Productivity and Efficiency Analysis: An Economic Approach to Measuring and Explaining Managerial Performance*, Springer, Singapore, Singapore.
- [6] 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.
- [7] 北村友宏 (2020 a) 「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.
- [8] 北村友宏 (2020 b) 「日本における下水道事業のメタフロンティア分析」『国民経済雑誌』第 222 巻 4 号：59-72.
- [9] 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』第 311 巻：95-116.
- [10] 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』第 4 巻 1 号：123-42.
- [11] 中山徳良 (2001) 「下水道事業の費用構造」『公益事業研究』第 53 巻 2 号：23-31.
- [12] 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）.