

ごみ処理・リサイクル費用の 効率性分析をめぐって

本間 聡

近年、リサイクルの推進が政策目標となっている。とはいえ、リサイクル率を100%に近づけていくにつれて実現のための費用はますます高くなっていくと考えられる。一方で、自治体が担うごみ処理プロセスに何らかの非効率が存在すると考えられる。環境面からは望ましいとされるリサイクルの促進であるが、費用効率性の視点も重要である。本稿では、環境経済学におけるごみ処理・リサイクルの費用に関する実証研究を概説し、確率フロンティア分析によるリサイクルの費用効率分析を紹介する。

キーワード：ごみ、リサイクル、効率性分析、確率フロンティア分析 (SFA)、包絡分析法 (DEA)

1. はじめに

ごみ（一般廃棄物）は、環境経済学において重要なトピックの一つとして研究されてきた。収集されたごみは、焼却や資源回収などを経て、最終処分場に埋め立てられる。2019年度では、4,274万トンのごみが排出され、840万トンがリサイクルされ（リサイクル率は19.6%）、380万トンが最終処分された [1]。既存の最終処分場の残りのスペースを現在と同じペースで埋め立てたときに満杯になる期間は残余年数とよばれる。2019年度のごみ最終処分場の残余年数は21.4年である。これは、あと22年程度でごみを捨てる場所がなくなることを意味するが、最終処分場の新規建設は容易ではない。そこで、天然資源の消費抑制や環境負荷の低減といった観点からだけでなく、最終処分量を減らすという観点からも、リサイクルの推進がごみ処理における重要な政策課題となる。

本稿では、この課題をめぐって二つの非効率要因に着目したい。一つは、効率性評価の分析でおなじみの経営上の非効率 (management inefficiency) である。ごみは廃棄物法によって市町村が処理責任を負っている。そこに、何らかの非効率性が存在すると考えるのが自然であろう。もう一つはリサイクル率である。ごみ処理過程において、リサイクル率を限りなく100%に近づけていくにつれて、技術的には可能であっても、実現のための費用は禁止的に高くなっていくと考えられる。一方で、環境保全や資源の有効利用を考慮すれば、

0%のリサイクル率が望ましくないことはいうまでもない。明らかに、社会的に最適なりサイクル率が0%と100%の間に存在すると推察できるが、現実のリサイクル率は最適なりサイクル率から乖離しているかもしれない。本稿では、以上の視点を踏まえて、環境経済学におけるごみ処理とリサイクルの費用に関する実証研究を概観し、効率性分析の応用例として、確率フロンティア分析 (stochastic frontier analysis; SFA) をわが国のごみ処理に適用した Honma and Hu [2] の結果を中心にごみとリサイクルの研究を論じたい。

2. ごみ処理・リサイクル費用の先行研究

本節では、環境経済学の中でごみとリサイクルに関してどのような実証分析が行われてきたのかを概説する。わが国の廃棄物統計は海外と比べて充実していることもあり [3]、ごみやリサイクルに関する実証分析が活発に取り組みられてきた [4-8]。そこで問われてきた中心的なリサーチ・クエスションは、ごみ有料化政策はごみ排出量を削減できたかどうかである。この点についてさまざまな角度から検討されてきた。たとえば、最近の研究をみると、都筑ら [7] では平成の大合併の影響を取り込んだ分析が行われており、野村と日引 [8] では隣接自治体の空間相関を考慮した分析が行われている。

上であげた研究は、有料化によってごみ処理サービス価格がゼロから正に引き上げられることによって、ごみ排出量が削減されるか否かを問う需要側の分析であるといえる。これらの需要側の分析と比べると、供給側の実証分析は相対的に少ない。

碓井 [9] は、容器包装リサイクル法の下での分別収集がごみ処理費用に与える影響を分析し、紙製容器包

ほんま さとし
東海大学政治経済学部
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1
honmasatoshi@tokai.ac.jp

装の分別回収が費用節約につながる一方で、缶、プラスチック、ビンの分別回収はこの順序で費用増加をもたらすことを示した。山本 [10] は、収集運搬費用に関して規模の経済が存在すること、民間委託は平均費用を減少させること、民間企業 1 社による独占は必ずしも費用を低下させないことを示している。Kinnaman et al. [11] はごみ処理の平均費用とリサイクル率の間に U 字型の関係が観察され、リサイクル率が 10% のときに費用が最小化されるという興味深い結果を示している。ただし、ここでの平均費用は自治体のごみ処理費用だけでなく、家計がリサイクルのために費やす費用、ごみ処分の外部費用を考慮したものである。Chifari et al. [12] はごみ処理費用を分析し、リサイクル率の上昇は総費用および収集運搬費用を増加させるという結果を示している。笹尾 [13] はリサイクル率の 1% 増加が収集運搬のトン当たり平均費用を 0.9%、最終処分のトン当たり平均費用を 0.01%、一人当たり平均費用を 0.007% それぞれ増加させることを示している。

以上、国内の自治体を対象とした研究を概観したが、海外でもごみ処理費用を被説明変数にとった実証分析は、Hirsch [14] や Stevens [15] を先駆けとして、多数の実証分析 [15–22] が蓄積されている。それらの研究では、ごみ処理費用がどのような要因に左右されるのかに関心がもたれている¹。いくつかあげると、Carroll [16] はウイスコンシン州のリサイクルプログラムにおいて、リサイクル費用は人口密度が高いほど減少し、自治体回収は民間企業委託回収よりもコスト高となることを示している。また、Callan and Thomas [17] はマサチューセッツ州ではリサイクルは費用を増加させることが統計的に有意であることを示し、追加的な 1 トンのリサイクルは 13.547 ドルだけの費用の増大を招いているとしている。Bohm et al. [20] は、米国リサイクルプログラムの調査データからリサイクル量と平均リサイクル費用の関係は U 字型で、最小値のリサイクル費用は 75.18 ドルであるという興味深い結果を示している。それとは逆に、Weng and Fujiwara [21] は、台湾ではリサイクル率は平均費用と負の相関関係にあるとしている。

以上で述べたように、ごみの実証分析ではごみ排出量やごみ処理費用を被説明変数にとって、それらがどのような要因によって影響を受けるのかを、説明変数と推定方法を工夫して実証分析するのが主流とってよいかもしれない。ごみ処理費用を被説明変数とした

¹ 海外の自治体を対象としたごみ有料化の研究も多数あるが、紙幅の都合でここでは省略することにする。

場合、自治体によるごみ処理サービスという「生産」を分析していることになる。この「生産」が無駄なく行われているとは考えづらい。そこで効率性評価の出番となる。

ごみやリサイクルの効率性評価の分析は、数は多くないが以下のような先行研究がある。国内では、根本と尾関 [23] は 110 の一部事務組合の効率性を評価して、包絡分析法 (data envelope analysis; DEA) では 24 組合が効率的であるのに対してマイクロ経済理論に基づくノンパラメトリック生産分析法では 48 組合が効率的であるとしている。本間 [24] では、Honma and Hu [2] と同じデータセットを用いて、部門別の統計が利用可能な、ごみを単独で処理している自治体に SFA を適用している。非効率性の平均値は収集運搬部門が 2.876 と高い一方で、中間処理部門が 1.080、最終処分部門が 1.203 であった。また、収集運搬部門と最終処分部門では、平均ごみ処理費用とリサイクル率が U 字型の関係にあることが観察されて、費用最小化するリサイクル率は収集運搬部門では 4.9%、最終処分部分では 10.0% であることが示される。

海外では、Worthington and Dollery [25] は 1993 年のオーストラリアニューサウスウェールズ州 103 地方自治体のごみ処理に DEA を適用して分析している。その結果、42 自治体が純粋技術的に効率的であるのに対して、37 自治体が規模効率的であるとし、投入が現状から 67.12% まで削減可能である一方で、規模効果による生産性の損失は投入の 15.47% に及ぶとしている。Hu et al. [26] は台湾の自治体に DEA を適用し、「資源回収四合一制度」の効率性を評価している。「四合一」とは住民、回収業者、地方政府、回収基金の 4 者が協力してリサイクルを促進することを意味する。彼らは人口当たりの環境保護予算額、清掃車台数、参加者数と 1 平方キロ当たり清掃員人数を投入に、人口当たりのリサイクル量とリサイクル率を産出にとって分析し、平均効率値は 1998 年の 0.762 から 2004 年の 0.900 に上昇したことを示した。また、トービットモデルで非効率の決定要因を分析することで、実質平均家計所得と高等教育を受けた人口の割合が高い自治体ほど効率的であるとしている。Huang et al. [27] も台湾の自治体のごみ収集サービスの効率性を DEA で分析し、共通ウェイト法 [28] で得られた効率性との比較を行っている。そこでは、産出に五つの政策に関する Key Performance Indicators (KPI)、投入に 1 (ダミー) が採用されている。彼らは、可変ウェイトを用いる DEA では評価で無視され得る KPI が生じるこ

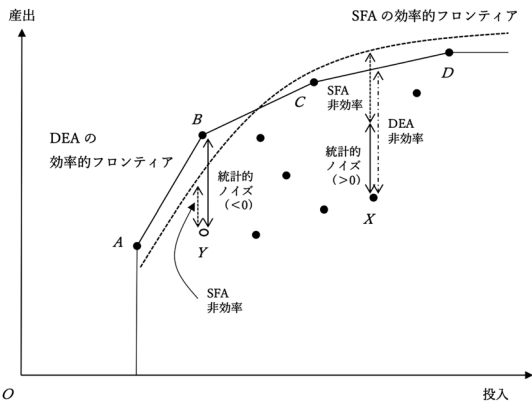


図1 SFAとDEAの効率的フロンティア(生産)
 出典: Nazarko and Chodakowska [34] (Fig. 1) を元に著者作成。

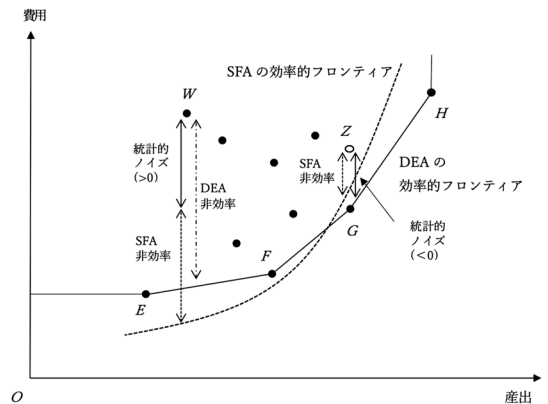


図2 SFAとDEAの効率的フロンティア(費用)
 出典: Nazarko and Chodakowska [34] (Fig. 1) を元に著者作成。

とから、共通ウェイトによる評価の方が実用的で自治体に受け入れられやすいとしている。Pérez-López et al. [29] は、長期の規模効率性を評価するための新たなDEAの手法を提案し、スペインの自治体に適用している。分析の結果、ごみの共同処理が効率性を高める効果があることが示される。

SFAを適用した研究として、Hu and Chang [30] はリサイクル率を産出に、予算、清掃車台数、マンパワーを投入にとって台湾のリサイクルの生産関数を推定している。分析の結果、実質平均家計所得、高等教育を受けた人口の割合および環境促進活動の頻度が大きいほど、リサイクル効率が高まるとしている。

3. SFAとDEA

3.1 効率的フロンティア

以下では、4節と5節で用いられるSFAについて、オペレーションズ・リサーチで一般的に用いられているDEA [31]と比較しつつ、効率性評価の考え方を説明していきたい。SFAはAigner et al. [32]とMeeusen and van den Broeck [33]によって考案されたパラメトリックな効率性評価手法である。

投入-産出について描かれた図1と産出-費用について描かれた図2を用いて、非効率の捉え方に関するDEAとSFAの違いを説明しよう²。

各図の黒丸は意思決定主体 (decision making unit; DMU) の活動を表す点である。ここでは、SFAとの比較の都合上、DEAに関しては出力指向でかつ規模に関して収穫可変のモデルを仮定する。DEAの下では、

効率的フロンティアは図1(図2)の左上方(右下方)の点A, B, C, D (E, F, G, H)を結んだ線分と垂直・水平方向の延長線で構成される。一方、SFAの下では、一般にコブダグラス型生産(費用)関数やトランスログ型生産(費用)関数などの関数型を仮定してフロンティアが推定される。

DEAの効率的フロンティアが確定的なものとして捉えられるのに対して、SFAでは、効率的フロンティアは名称どおりに確率的に変動するものとして捉えられる。

3.2 非効率性の捉え方の違い

上で述べたような効率的フロンティアの捉え方の違いから、非効率性の捉え方も異なってくる。周知のように、DEAでは図1(図2)でDEAの効率的フロンティアの下(上)の黒丸は非効率なDMUとなり、たとえば図1(図2)で点X(点W)で表されるDMUは点X(点W)と効率的フロンティアの乖離が非効率とみなされる。一方、SFAでは効率的フロンティアは確率的なものとして捉えられることから、実際の活動を表す点X(点W)から効率的フロンティアまでの乖離は非効率と統計的ノイズから構成される。通常、統計的ノイズについては正規分布に従うと仮定される。図1(図2)で点B(点G)の活動はDEAでは効率的であるが、SFAでは効率的フロンティアよりも上部(下部)に位置している。この場合、統計的ノイズが負値で、点B(点G)から統計的ノイズだけ下がった点Y(上がった点Z)からSFAの効率的フロンティアまでの乖離が非効率となると考えられる。

Coelli et al. [35](p. 312)でも指摘されているように、DEAに対するSFAの長所は統計的ノイズを考慮

² 実際の実証分析には、DEAではデータが実数のまま用いられるのに対して、SFAでは対数変換したデータが用いられることが多い。ここでは、概念図として理解されたい。

できることと伝統的な仮説検定が可能であることである一方で³、短所は非効率項の分布や生産関数あるいは費用関数の関数型を仮定しなければならないことである。SFA に対する DEA の長所と短所は上記をそれぞれ入れ替えたものとなる。結局、DEA と SFA のそれぞれについて長所と短所は表裏一体であるといえる。

4. リサイクル費用の効率性評価

本稿で紹介する文献 [2] の推定モデルを説明しよう。3 節では生産関数モデルと費用関数モデルについて SFA の概念を説明した。ここでのモデルは後者の応用で、非効率要因を合わせて推定可能な Battese and Coelli [37] の技術的非効率効果モデルが適用される。ごみ処理費用関数の推定式は以下のとおりである。

$$\ln c_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln r_{it} + \beta_2 (\ln r_{it})^2 + \beta_3 \ln w_{it} + \beta_4 \ln \rho_{it} + \beta_5 \ln pd_{it} + v_{it} + u_{it} \quad (1)$$

ここで、 i は市町村番号、 t は期間、 c_{it} はトン当たりの平均ごみ処理費用、 r_{it} はリサイクル率、 w_{it} は賃金率、 ρ_{it} は燃料価格、 pd_{it} は可住地人口密度をそれぞれ示す。確率フロンティア分析では誤差項は通常の統計的ノイズ $v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2)$ と非効率項 u_{it} から構成される。前節の説明では非効率項は正規分布が通常仮定されると説明したが、Battese and Coelli [37] では生産/費用関数とともに非効率要因を説明する推定式が同時推定される。 u_{it} は非効率性を表す非負の確率変数として、環境変数に依存して以下の非効率方程式

$$u_{it} = \delta_0 + \delta_1 s_{it}^c + \delta_2 s_{it}^{nc} + \delta_3 s_{it}^r + \delta_4 f_{it}^{paper} + \delta_5 f_{it}^{metal} + \delta_6 f_{it}^{glass} + \delta_7 f_{it}^{PET} + \delta_8 n_{it} + \eta_{it} \quad (2)$$

で推定される。ここで、 $s_{it}^c, s_{it}^{nc}, s_{it}^r$ はそれぞれ可燃ごみ、不燃ごみ、資源ごみの民間企業などへの委託率、 $f_{it}^{paper}, f_{it}^{metal}, f_{it}^{glass}, f_{it}^{PET}$ はそれぞれ紙、金属、ガラス、PET ボトルの週当たりの回収頻度、 n_{it} は分別数を示す。 η_{it} は $-\delta_0 - \delta_1 s_{it}^c - \delta_2 s_{it}^{nc} - \delta_3 s_{it}^r - \delta_4 f_{it}^{paper} - \delta_5 f_{it}^{metal} - \delta_6 f_{it}^{glass} - \delta_7 f_{it}^{PET} - \delta_8 n_{it}$ で切断された切断正規分布 $\eta_{it} \sim N(0, \sigma_\eta^2)$ に従う。式 (1) と (2) は最尤法で同時推定される。

ごみ関係のデータはすべて環境省「一般廃棄物処理実態調査」の各年度版から取得した⁴。分析期間は 2011 年

度から 2018 年度までである。

5. 実証分析

5.1 パラメータの推定結果

推定結果は表 1 のとおりである。

(1) はサンプル全体の結果、(2) は一部事務組合を形成して近隣の自治体とごみ処理を共同で行う自治体（以下、共同処理と言及）のサブサンプルの結果、(3) は単独で処理を行う自治体（以下、単独処理と言及）のサブサンプルの結果である。(1)–(3) のすべての列でリサイクル率対数値の係数が 1 次は負、2 次は正であることから、トン当たりの平均ごみ処理費用とリサイクル率の間には U 字型の関係が存在することが示唆される。可燃ごみ・不燃ごみ・資源ごみの各委託率の係数の符号は負となっており（ただし有意なのは (1) と (3) の可燃ごみと資源ごみ）、自治体が収集運搬を民間企業などに委託することがごみ処理費用の削減に寄与することが示唆される。また、サンプル全体の結果である (1) では、一部事務組合ダミーの係数が 1% 水準で有意に負となっており、複数の自治体が一部事務組合を形成して共同でごみを処理することが費用削減につながることを示されている。(1)–(3) の各回収頻度の係数をみると、ガラスの回収頻度は費用を増加させる要因である一方で、紙の回収頻度は費用を減少させる要因であるといえる。

推定された係数から費用最小化のリサイクル率を計算すると、全体では 7.6%、共同処理では 6.9%、単独処理では 6.8% であった。しかしながら実際のリサイクル率は例年 20% で推移しており（サンプル平均では 21.7%）、政策目標としては 27% が掲げられている。費用効率性に限って言えば、現実のリサイクル率はむしろ高すぎるといえる。

5.2 リサイクル率と平均費用の関係

平均非効率性は、全体では 1.816、共同処理では 1.051、単独処理では 1.059 であった。このことは、全体では 81.6%、共同処理では 5.1%、単独処理では 5.9% だけの費用が余分に生じていることを示している。全体の非効率性がサブサンプルの非効率性よりもかなり高いことから、以下では控えめな数字である後者を中心に考察したい。図 3 と図 4 は分析の結果から示唆されたリサイクル率と平均費用の関係が視覚的に明らかになるように描いたものである。図 3 と図 4 の点 A はサンプル平均のリサイクル率と平均費用を表しており、図 3 の共同処理では 34,521 円、図 4 の単独処理では 39,612 円である。点 B は、リサイクル率はサンプ

³ 上述の説明は DEA と SFA の基本的な性質について述べたものであり、DEA の中でも Simar and Wilson [36] のようにバイアスや効率値の信頼区間などを扱うモデルもある。

⁴ データについての詳細は Honma and Hu [2] を参照。

表 1 推定結果

変数	(1) 全体	(2) 共同処理	(3) 単独処理
費用関数			
定数項	23.691*	21.329***	27.779***
	[12.204]	[1.122]	[1.427]
ln リサイクル率	-0.428***	-0.377***	-0.361***
	[0.042]	[0.058]	[0.056]
(ln リサイクル率) ²	0.110***	0.103***	0.101***
	[0.007]	[0.010]	[0.010]
ln 賃金率	-1.033***	-0.819***	-1.297***
	[0.074]	[0.091]	[0.116]
ln 燃料価格	0.026	0.026	-0.004
	[0.042]	[0.052]	[0.064]
ln 可住地人口密度	-0.091***	-0.081***	-0.100***
	[0.003]	[0.004]	[0.005]
非効率方程式			
定数項	0.886	1.589***	0.439**
	[12.170]	[0.252]	[0.204]
可燃ごみ委託率	-0.142***	0.066	-5.793**
	[0.021]	[0.642]	[2.589]
不燃ごみ委託率	-0.003	-2.95	0.244
	[0.022]	[6.719]	[0.360]
資源ごみ委託率	-0.090***	-5.764	-1.367**
	[0.022]	[9.836]	[0.543]
紙回収頻度	-0.007**	-0.399***	-0.207*
	[0.003]	[0.089]	[0.124]
金属回収頻度	0.002	-0.314**	-0.611***
	[0.006]	[0.125]	[0.215]
ガラス回収頻度	0.024***	0.318***	0.600***
	[0.006]	[0.119]	[0.201]
PET 回収頻度	0.003	0.122*	-0.136
	[0.004]	[0.071]	[0.087]
分別数	-0.003***	-0.143***	-0.006
	[0.001]	[0.026]	[0.014]
一部事務組合ダミー	-0.147***		
	[0.009]		
平均非効率性	1.816	1.051	1.059
対数尤度	-6607.795	-5151.018	-1219.547
観測数	11,265	8,073	3,192
費用最小化リサイクル率	7.6%	6.9%	6.8%

(注) カッコ内は標準偏差を表し, ***, **, * はそれぞれ 1%, 5%, 10%水準で有意であることを示す。

(2) は一部事務組合を形成して近隣の自治体とごみ処理を共同で行う自治体のサブサンプルの結果,

(3) は単独で処理を行う自治体のサブサンプルの結果である。出典: Honma and Hu [2] (Table 2)。

ル平均で維持したままで、非効率を除去した場合に実現すると考えられる平均費用で、図 3 の共同処理では 32,849 円、図 4 の単独処理では 37,422 円である。点 C は、費用最小化リサイクル率と最小平均費用の組み合わせを表している。計算上の最小平均費用は、共同処理では 28,198 円、単独処理では 31,624 円である。

6. おわりに

本稿では、環境経済学におけるごみ処理とリサイクルの費用に関する実証研究を概説し、効率性分析による政策評価の応用例として、SFA によるリサイクル費用分析 [2] を紹介した。

環境面からはリサイクルの促進が重要であることは

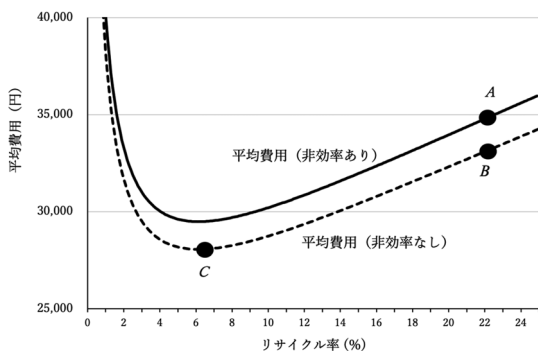


図3 共同処理の平均ごみ処理費用
出典：Honma and Hu [2] (Fig. 5).

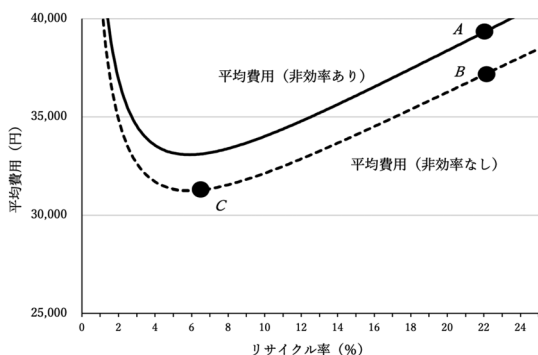


図4 単独処理の平均ごみ処理費用
出典：Honma and Hu [2] (Fig. 6).

言うまでもないが、一般廃棄物処理を担っている自治体の財政が(とりわけ地方では)逼迫していることを考慮すれば、経済面からは費用効率性も求められる。効率性評価を通じて、環境面と経済面とでバランスが取れたリサイクルを実現していくことが社会的に求められる。本文中で述べたように、ごみとリサイクルの実証分析ではDEAやSFAといった効率性評価による分析はどちらかといえば少数派である。逆に言えば、今後この分野の研究で効率性評価によるアプローチが貢献できるポテンシャルは大きいともいえるのではないだろうか。

謝辞 本研究はJSPS科研費19K01659の助成を受けた成果の一部である。

参考文献

[1] 環境省, 「一般廃棄物の排出及び処理状況等(令和元年度)について」, https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r1/index.html (2021年7月25日閲覧)
[2] S. Honma and J. L. Hu, “Cost efficiency of recycling and waste disposal in Japan,” *Journal of Cleaner Production*, **284**, pp. 1-11, 2021.
[3] 環境省, 「一般廃棄物処理実態調査結果」, <https://www>.

[env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html](https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html) (2021年7月25日閲覧)

[4] 碓井健寛, “有料化によるごみの発生抑制効果とリサイクル促進効果,” *会計検査研究*, **27**, pp. 245-261, 2003.
[5] T. Suwa and T. Usui, “Estimation of garbage reduction and recycling promotion under the containers and packaging recycling law and garbage pricing,” *Environmental Economics and Policy Studies*, **8**, pp. 239-254, 2007.
[6] T. Usui and K. Takeuchi, “Evaluating unit-based pricing of residential solid waste: A panel data analysis,” *Environmental and Resource Economics*, **58**, pp. 245-271, 2014.
[7] 都筑研哉, 横尾英史, 鈴木綾, “有料化によるごみ排出量の抑制効果—「平成の大合併」の影響—,” *廃棄物資源循環学会論文誌*, **29**, pp. 20-30, 2018.
[8] 野村魁, 日引聡, “従量制によるごみ排出有料化の排出削減効果に関する実証研究,” *DSSR Discussion Papers*, **8**, pp. 1-23, 2020.
[9] 碓井健寛, “廃棄物処理費用のパネルデータ分析,” *廃棄物学会論文誌*, **18**, pp. 417-425, 2007.
[10] 山本雅資, “一般廃棄物の収集運搬費用の経済分析,” *環境経済・政策研究*, **2**(1), pp. 39-50, 2009.
[11] T. C. Kinnaman, T. Shinkuma and M. Yamamoto, “The socially optimal recycling rate: Evidence from Japan,” *Journal of Environmental Economics and Management*, **68**, pp. 54-70, 2014.
[12] R. Chifari, S. L. Piano, S. Matsumoto and T. Tasaki, “Does recyclable separation reduce the cost of municipal waste management in Japan?” *Waste Management*, **60**, pp. 32-41, 2017.
[13] 笹尾俊明, “一般廃棄物の収集運搬・処理費用に関する計量経済分析—市町村と一部事務組合等の違いを考慮して—,” *廃棄物資源循環学会論文誌*, **31**, pp. 75-87, 2020.
[14] W. Z. Hirsch, “Cost functions of an urban government service: Refuse collection,” *Review of Economics and Statistics*, **47**, pp. 87-92, 1965.
[15] B. J. Stevens, “Scale, market structure, and the cost of refuse collection,” *Review of Economics and Statistics*, **60**, pp. 438-448, 1978.
[16] W. Carroll, “The organization and efficiency of residential recycling services,” *Eastern Economic Journal*, **21**, pp. 215-225, 1995.
[17] S. J. Callan and J. M. Thomas, “Economies of scale and scope: A cost analysis of municipal solid waste services,” *Land Economics*, **77**, pp. 548-560, 2001.
[18] E. Dijkgraaf and R. H. Gradus, “Cost savings of contracting out refuse collection,” *Empirica*, **30**, pp. 149-161, 2003.
[19] G. Bel and X. Fageda, “Empirical analysis of solid management waste costs: Some evidence from Galicia, Spain,” *Resources Conservation and Recycling*, **54**, pp. 187-193, 2010.
[20] R. A. Bohm, D. H. Folz, T. C. Kinnaman and M. J. Podolsky, “The costs of municipal waste and recycling programs,” *Resources Conservation and Recycling*, **54**, pp. 864-871, 2010.
[21] Y. C. Weng and T. Fujiwara, “Examining the effectiveness of municipal solid waste management systems: An integrated cost-benefit analysis perspective with a financial cost modeling in Taiwan,” *Waste Management*, **31**, pp. 1393-1406, 2011.
[22] G. Greco, M. Allegrini, C. Del Lungo, P. G. Savel-

- lini and L. Gabellini, “Drivers of solid waste collection costs. Empirical evidence from Italy,” *Journal of Cleaner Production*, **106**, pp. 364–371, 2015.
- [23] 根本二郎, 尾関淳哉, “非パラメトリックな一般廃棄物処理事業組合の効率性分析とその経済学的基礎,” *会計検査研究*, **34**, pp. 181–192, 2006.
- [24] 本間聡, “リサイクル率とごみ処理費用の部門別分析,” *中央大学経済研究所年報*, **53**, 2021 (印刷中).
- [25] A. C. Worthington and B. E. Dollery, “Measuring efficiency in local government: An analysis of New South Wales municipalities’ domestic waste management function,” *Policy Studies Journal*, **29**, pp. 232–249, 2001.
- [26] J. L. Hu, T. P. Chang and C. H. Kao, “Four-in-one waste recycling performance of local governments in Taiwan,” *Journal of Resources, Energy and Development*, **5**, pp. 83–94, 2008.
- [27] Y. T. Huang, T. C. Pan and J. J. Kao, “Performance assessment for municipal solid waste collection in Taiwan,” *Journal of Environmental Management*, **92**, pp. 1277–1283, 2011.
- [28] D. K. Despotis, “A reassessment of the human development index via data envelopment analysis,” *Journal of the Operational Research Society*, **56**, pp. 969–980, 2005.
- [29] G. Pérez-López, D. Prior and J. L. Zafra-Gómez, “Temporal scale efficiency in DEA panel data estimations: An application to the solid waste disposal service in Spain,” *Omega*, **76**, pp. 18–27, 2018.
- [30] J. L. Hu and T. P. Chang, “Regional recycling efficiency in Taiwan with time-varying effects of determinants,” *Journal of Solid Waste Technology and Management*, **37**, pp. 83–90, 2011.
- [31] A. Charnes, W. W. Cooper and E. Rhodes, “Measuring the efficiency of decision making units,” *European Journal of Operational Research*, **2**, pp. 429–444, 1978.
- [32] D. Aigner, C. K. Lovell and P. Schmidt, “Formulation and estimation of stochastic frontier production function models,” *Journal of Econometrics*, **6**, pp. 21–37, 1977.
- [33] W. Meeusen and J. van Den Broeck, “Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error,” *International Economic Review*, **18**, pp. 435–444, 1977.
- [34] J. Nazarko and E. Chodakowska, “Labour efficiency in construction industry in Europe based on frontier methods: Data envelopment analysis and stochastic frontier analysis,” *Journal of Civil Engineering and Management*, **23**, pp. 787–795, 2017.
- [35] T. J. Coelli, D. S. P. Rao, C. J. O’Donnell and G. E. Battese, *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, Springer Science and Business Media, 2005.
- [36] L. Simar and P. W. Wilson, “Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes,” *Journal of Econometrics*, **136**, pp. 31–64, 2007.
- [37] G. E. Battese and T. J. Coelli, “A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data,” *Empirical Economics*, **20**, pp. 325–332, 1995.