

廃棄物産業連関価格モデル：理論と試算

近藤康之 中村慎一郎

No.0106

2001年10月

廃棄物産業連関価格モデル：理論と試算*

近藤 康之

富山大学経済学部

〒 930-8555 富山県富山市五福 3190

ykondo@eco.toyama-u.ac.jp

中村 慎一郎

早稲田大学政治経済学部

〒 169-8050 東京都新宿区西早稲田 1-6-1

nakashin@mn.waseda.ac.jp

2001 年 10 月 12 日

1 序

我々は、ここ数年、財と廃棄物の循環を通じる動脈部門と静脈部門の間の相互連関関係を数量的に把握する手段としての廃棄物産業連関 (WIO) の開発、及びその改良と LCA への応用分析に努めてきた [1, 2, 3, 4]。ここで言う WIO モデルは数量モデルであり、LCA への応用においては廃棄物処理量、二酸化炭素排出量、最終処分場消費量、雇用量、及び産業別生産額への効果が評価の対象となっている。

環境負荷の観点から LCA 的に望ましいとされる再資源化を含む廃棄物管理計画であっても、これが持続的であるためには経済的整合性を持つ事が必要である。収支・採算を度外視した事業は持続的ではない。その一方で、経済的整合性の有無は背景となる制度に大きく依存しており、制度設計如何によって変化する可能性がある。換言すれば、LCA 的に望ましい廃棄物管理計画をして経済的整合性を持つことが出来るような制度設計の姿を模索する事が必要であると考えられる。

以上のような観点から、WIO 数量モデルの枠組みに対応する費用・価格決定図式 (WIO 価格モデル) を開発した。通常の産業連関モデルでは、数量モデルの双対として対応する価格モデルを得ることが出来る。しかし、WIO ではこの図式を単純に当てはめて価格モデルを得ることは出来ない。通常の産業連関モデルでは、各部門の単位費用は、本源的生産要素の価格を所与とすれば、自部門及び他部門の生産水準から独立に決定される。しかるに、廃棄物再資源化部門にとって、回収廃棄物の他部門への販売は重要な収益要素である。他部門への販売量は、回収廃棄物投入係数を一定とすれば、他部門の生産水準に依存する。すなわち、廃棄物再資源化部門の単位費用は、固定投入係数の下でも他部門の生産水準に依存するのである。

この様な理由から、WIO 価格モデルの導出は単なる演習問題の域を超えたものである。これを解説するのが本稿の目的である。第 2 節では、固定投入係数を前提し、費用定義式から価格モデルを導く。WIO モデルは産業連関モデルを基礎とする物であるが、廃棄物処理部門の持つ特性である受動的特徴を考慮してモデル全体は非線形であり、その解は反復計算によって求められる。この点を考慮し、非線形体系としてのモデル全体における数量と価格決定図式を整理したのが第 3 節である。第 4 節では、モデルのデータとの整合性を確認

*本稿は、環境経済・政策学会 2001 年大会 (2001 年 9 月 29-30 日、於 国立京都国際会館、京都市) において報告された論文を、加筆修正したものである。本研究の遂行にあたり、日本学术振興会科学研究費補助金 (基盤研究 (C) 11630019, 平成 11-13 年度) の補助を受けた。また中村の研究は早稲田大学特定課題研究費 (B001-01) の補助を受けた。

するために、幾つかの試算を行う。補論 A では、WIO モデルの計画問題への拡張の概略、輸入の取扱について述べる。補論 B では、収集・輸送の設定について、とくに処理対象物の重量と体積（および嵩比重）に依存したモデルの非線形を中心に解説する。

2 WIO 價格モデル

2.1 記号法

本稿では様々な添字を付した記号を用いるので、ここに列記しておく。動脈部門数を n^I 、静脈部門数を n^H 、 $n = n^I + n^H$ とし、部門を表す自然数の集合を $N^I := \{1, \dots, n^I\}$, $N^H := \{n^I + 1, \dots, n^I + n^H\}$, $N := N^I \cup N^H$ とする。同様に、廃棄物組成数を n^W とし、 $N^W := \{1, \dots, n^W\}$ とする。

部門 j ($j \in N$) の投入、产出、排出活動について、生産・活動量を x_j , 部門 i の生産物の投入量を X_{ij} , 廃棄物 k の排出量を W_{kj}^Θ , 廃棄物 k の投入量を W_{kj}^Θ , 本源的生産要素投入費用を V_j とし、各原単位を $a_{ij} := X_{ij}/x_j$, $g_{kj}^\Theta := W_{kj}^\Theta/x_j$, $g_{kj}^\Theta := W_{kj}^\Theta/x_j$, $v_j := V_j/x_j$ とする。同様に、家計の活動についても、 X_{iF} , W_{kF}^Θ , W_{kF}^Θ のように添字 F を付してあらわす。

部門 j ($j \in N$) の生産物（財、処理サービス）の価格を p_j , 廃棄物 $k \in N^W$ の価格を p_k^W とする。家計を含めた部門 $j \in N \cup \{F\}$ による廃棄物 $k \in N^W$ の排出量 W_{kj}^Θ のうち、他部門で投入された（再利用・再資源化された）ものを R_{kj} とする。廃棄物 $k \in N^W$ の経済全体での排出量 W_k^Θ , 投入量 W_k^Θ は、

$$W_k^\Theta := \sum_{j \in N \cup \{F\}} W_{kj}^\Theta, \quad W_k^\Theta := \sum_{j \in N \cup \{F\}} W_{kj}^\Theta,$$

で与えられ、処理対象量（純排出量）は排出量と投入量の差 $W_k := W_k^\Theta - W_k^\Theta$ である。この処理対象量 W_k のうち、静脈部門 $l \in N^H$ で処理される割合を s_{lk} とする。この s_{lk} を (l, k) 要素とする $n^H \times n^W$ 行列 S を配分行列と呼ぶ（配分行列の概念については [2] を参照のこと）。

2.2 費用定義式

廃棄物を考慮に入れた場合の生産費用が、これを考慮しない通常の産業連関分析における場合と大きく異なるのが、回収廃棄物の販売・購入の存在である。自動車解体業において顕著なように [5]、回収廃棄物の販売収益は廃棄物処理部門にとって重要な収入源である。又、セメントメーカーや高炉メーカー等の素材産業における原料・燃料としての他産業から排出された廃棄物の有償受け入れは、昨今、広く観察されるところである。

今、資本用役に対する対価である適正利潤が本源的生産費用に含まれるものとし、補助金や税金などを単純化のために無視すると、生産額（財価格 × 生産量）が適正利潤 = 生産費用 が成り立つ。所与の回収廃棄物価格を p_k^W とする。すると、部門 j ($j \in N$) の生産額は次式で与えられる。

$$p_j x_j = \underbrace{\sum_{i \in N^I} p_i a_{ij} x_j}_{\text{財投入費用}} + \underbrace{\sum_{l \in N^H} p_l \sum_{k \in N^W} s_{lk} (g_{kj}^\Theta x_j - R_{kj})}_{\text{廃棄物処理費用}} + \underbrace{\sum_{k \in N^W} p_k^W g_{kj}^\Theta x_j}_{\text{廃棄物投入費用}} - \underbrace{\sum_{k \in N^W} p_k^W R_{kj}}_{\text{廃棄物販売収入}} + \underbrace{V_j}_{\text{本源的生産要素費用}} \quad (1)$$

$$= \underbrace{\sum_{i \in N^I} p_i a_{ij} x_j}_{\text{販売しない場合の処理費用}} + \underbrace{\sum_{l \in N^H} p_l \sum_{k \in N^W} s_{lk} g_{kj}^\Theta x_j}_{\text{販売により節約された処理費用}} + \underbrace{\sum_{k \in N^W} p_k^W g_{kj}^\Theta x_j}_{\text{廃棄物投入費用}} - \underbrace{\sum_{k \in N^W} \left(p_k^W + \sum_{l \in N^H} p_l s_{lk} \right) R_{kj}}_{\text{販売により節約された処理費用}} + V_j. \quad (2)$$

廃棄物価格 p_k^w の水準は市況の影響を大きく受ける。ちなみに、昨今の鉄屑価格は戦後を通じて最低水準にある。とくにその符号条件自体も市況により激しく変動し、一定ではない。その符号により、 $p_k^w > 0$ のとき有価、 $p_k^w = 0$ のとき無償、 $p_k^w < 0$ のとき有償と呼ぶ。また、廃棄物価格の符号の如何に関わらず、廃棄物 k の他部門における利用 ($R_{kj} \geq 0$) を販売と呼ぶ。有価であれば廃棄物販売は純収益を生み、費用を低減する。無償または有償の場合には、販売はそれ自身では収益を生まない。しかし、(平均的な) 廃棄物処理費用よりも有償引取価格が低い限り、すなわち、

$$p_k^w + \sum_{l \in N''} p_l s_{lk} > 0 \iff |p_k^w| = -p_k^w < \sum_{l \in N''} p_l s_{lk}, \quad (3)$$

であれば、費用低減に貢献する。配分行列の列和は 1 であるから、上右側の式の右辺は、処理割合に即して定義された処理価格の加重平均であることに注意されたい。

2.3 他部門投入廃棄物 R の展開

家計を含めた部門 j ($j \in N \cup \{F\}$) による廃棄物 k の排出量 W_{kj}^Θ うち、部門 i ($i \in N$) で投入された量を R_{kji} とすると、定義により、

$$R_{kj} = \sum_{i \in N} R_{kji}, \quad (4)$$

である。ここで、家計による再利用・再資源化は行われない ($W_{kf}^\Theta = 0$) と仮定している。換言すれば、家計による排出量 W_{kf}^Θ は、不用物発生量から自家処理量を控除した値である。このとき、廃棄物 k の部門 i による投入量について、

$$W_{ki}^\Theta = g_{ki}^\Theta x_i = \sum_{j \in N \cup \{F\}} R_{kji}, \quad (5)$$

が成り立つ。

部門 i による廃棄物 k の投入量 $W_{ki}^\Theta = g_{ki}^\Theta x_i$ がどの部門から排出されたかは、廃棄物がよく定義されている限りにおいて無差別である。このとき、家計を含めた部門 j 起源廃棄物の割合は、廃棄物 k の発生量 W_k^Θ に占める部門 j からの発生量 W_{kj}^Θ の割合に比例すると考えられよう。すなわち、

$$R_{kji} = W_{ki}^\Theta (W_{kj}^\Theta / W_k^\Theta), \quad (6)$$

が成り立つとの仮定は妥当であると思われる。(4) および (6) から、

$$R_{kj} = \sum_{i \in N} R_{kji} = \sum_{i \in N} W_{ki}^\Theta (W_{kj}^\Theta / W_k^\Theta) = W_{kj}^\Theta (W_k^\Theta / W_k^\Theta) =: W_{kj}^\Theta r_k,$$

を得る。ただし、 $r_k = W_k^\Theta / W_k^\Theta$ である。右辺第 2 因子 r_k は、廃棄物 k の再資源化率に他ならない。家計 ($j = F$) を除く動脈・静脈部門 ($j \in N$) に限れば、

$$R_{kj} = W_{kj}^\Theta r_k = g_{kj}^\Theta x_j r_k = g_{kj}^\Theta x_j \left\{ \left(\sum_{l \in N} g_{kl}^\Theta x_l + W_{kf}^\Theta \right) / \left(\sum_{l \in N} g_{kl}^\Theta x_l + W_{kf}^\Theta \right) \right\}, \quad (7)$$

である。すなわち、他部門での利用量 R_{kj} は再資源化率 r_k に依存し、それは、自部門の生産量 x_j だけでなく他部門の生産量 x_l ($l \neq j$) にも依存する。

2.4 価格式の導出

(7) を (1) に代入して次の費用式を得る :

$$\begin{aligned} p_j x_j &= \sum_{i \in N^I} p_i a_{ij} x_j + \sum_{l \in N^{II}} p_l \sum_{k \in N^W} s_{lk} (g_{kj}^{\oplus} x_j - g_{kj}^{\ominus} x_j r_k) + \sum_{k \in N^W} p_k^W g_{kj}^{\ominus} x_j - \sum_{k \in N^W} p_k^W g_{kj}^{\oplus} x_j r_k + V_j \\ &= \sum_{i \in N^I} p_i a_{ij} x_j + \sum_{l \in N^{II}} p_l \sum_{k \in N^W} s_{lk} g_{kj}^{\oplus} x_j + \sum_{k \in N^W} p_k^W g_{kj}^{\ominus} x_j + V_j - \sum_{k \in N^W} \left(p_k^W + \sum_{l \in N^{II}} p_l s_{lk} \right) r_k g_{kj}^{\oplus} x_j. \end{aligned}$$

通常の産業連関価格モデルと大きく異なるのが、技術の一次同次性（固定投入・排出係数）にも関わらず当該部門の単位費用が他部門の生産量にも依存する点である（再資源化率 r_k は他部門の生産量に依存して決定されている点に注意されたい）。仮に本源的生産要素がただひとつである（従って、全ての相対価格はこの要素投入量によって決まる）としても、最終需要の水準如何で相対価格が変化する。すなわち、この限定的な場合においても「代替定理」[6, 7] は成立しない。上式の両辺を x_j で除して以下の価格式を得る：

$$p_j = \sum_{i \in N^I} p_i a_{ij} + \sum_{l \in N^{II}} p_l \sum_{k \in N^W} s_{lk} g_{kj}^{\oplus} + \sum_{k \in N^W} p_k^W g_{kj}^{\ominus} + v_j - \sum_{k \in N^W} \left(p_k^W + \sum_{l \in N^{II}} p_l s_{lk} \right) r_k g_{kj}^{\oplus}. \quad (8)$$

次に、(8) の行列表記を考える。生産物価格ベクトルおよび本源的生産要素単位費用ベクトルを、 $p = (p_1, \dots, p_n)$, $v = (v_1, \dots, v_n)$ のように、 n 次行ベクトルとして定義する。同様に、廃棄物価格ベクトル $p^W = (p_1^W, \dots, p_n^W)$ を n^W 次行ベクトルとする。投入係数行列 A を a_{ij} を (i, j) 要素として持つ $n^I \times n$ 行列、廃棄物排出・投入係数行列 G^{\oplus}, G^{\ominus} を、それぞれ、 $g_{kj}^{\oplus}, g_{kj}^{\ominus}$ を (k, j) 要素として持つ $n^W \times n$ 行列とする。なお、 $p, v, A, G^{\oplus}, G^{\ominus}$ については、動脈・静脈部門を区別する必要があるときは、最初の n^I 列と後の n^{II} 列とに分割し、上添字 I, II を付して区別する。例えば、価格ベクトルについては、 $p^I = (p_1, \dots, p_{n^I})$, $p^{II} = (p_{n^I+1}, \dots, p_{n^I+n^{II}})$, $p = (p^I, p^{II}) = (p_1, \dots, p_n)$ である。以上の行列・ベクトルの定義を用いると、(8) の行列表記は、

$$p = p^I A + p^{II} S G^{\oplus} + p^W G^{\ominus} + v - (p^W + p^{II} S) D G^{\oplus} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} p^I & p^{II} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} p^I & p^{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^I & A^{II} \\ S(I - D) G^{\oplus I} & S(I - D) G^{\oplus II} \end{pmatrix} \\ &\quad + p^W \left(G^{\ominus I} - D G^{\oplus I} \quad G^{\ominus II} - D G^{\oplus II} \right) + \begin{pmatrix} v^I & v^{II} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

である。ただし、 $D = \text{diag}(r_1, \dots, r_{n^W})$ であり、 I は適切な次元の単位行列である。(9) を価格ベクトル p について解くことが出来るとしてこれを求めるとき、

$$p = \left\{ p^W (G^{\ominus} - D G^{\oplus}) + v \right\} \left(I - \begin{pmatrix} A \\ S(I - D) G^{\oplus} \end{pmatrix} \right)^{-1}, \quad (11)$$

を得る。

ところで、中村 [1, 2] による WIO 数量モデルの解は、

$$x = \begin{pmatrix} x^I \\ x^{II} \end{pmatrix} = \left(I - \begin{pmatrix} A \\ S(G^{\oplus} - G^{\ominus}) \end{pmatrix} \right)^{-1} \begin{pmatrix} X_F^I \\ S(W_F^{\oplus} - W_F^{\ominus}) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

として与えられる。ただし、 x は動脈・静脈部門の生産量・処理活動量の n 次列ベクトル、 X_F^I は動脈部門の生産物に対する最終需要の n^I 次列ベクトルである。(11) と (12) に現れる逆行列を比較すると、任意の配分行

列 S と任意の再資源化率 D に対して両者が等しいのは $DG^e = G^e$ の場合であり、全動脈・静脈部門が自部門で、

$$\text{廃棄物投入量} = \text{廃棄物排出量} \times \text{同廃棄物の経済全体での再資源化率}, \quad (13)$$

を満たすように再資源化を行っている状況に対応する。このような状況では、必要な廃棄物投入量を自部門の排出によって賄うことが出来るので、廃棄物の販売は行われない（実際には行われたとしても、金額の収支全体では行われないので同じことになる）。この場合には、(11) は、

$$p = v \left(I - \begin{pmatrix} A \\ S(G^e - G^e) \end{pmatrix} \right)^{-1}, \quad (14)$$

に帰着し、伝統的な産業連関分析の価格モデルと同様に、単位本源的生産要素投入 v に数量モデルにおける逆行列を乗じて価格が求められる。(13) は再資源化が全く行われない場合 ($D = 0$) を特殊例として含む。廃棄物処理部門の存在が WIO 価格モデルと通常の双対価格モデルとの相違を生じさせているのではない。このモデル構造上の相違の要因は、部門間での廃棄物売買を伴う再資源化である。

3 WIO における価格・数量決定

3.1 全体の図式

前節では固定投入・排出係数を仮定して価格モデルを解説した。先に指摘した如く、WIO モデルは産業連関モデルを基礎とする物であるが、廃棄物処理部門の持つ特性である受動的特徴を考慮してモデル全体は非線形であり、その数量モデルの解は図 1 が示すように反復計算によって求められる。受動的特徴とは、廃棄物処理部門が産業や家計から排出される廃棄物を基本的に全て受け入れ、これを環境基準等と整合をもつ状態に変換する役割を負っている事に由来する [2]。より具体的には、廃棄物処理部門の投入・排出係数が、受け入れ廃棄物の量・組成に依存することを指すのであるが、WIO ではこの関係を表すために工学モデル [8] を用いている。図 1 中の F_Z はこの工学モデルを表す。

前節で指摘したように、WIO 価格モデルでは固定投入・排出係数の下でも、価格は各部門の相対的生産水準に依存して決定される。従って、数量モデルが非線形であるので、価格モデルも当然非線形である。又、数量モデルの非線形性は、廃棄物処理施設の工学的特性に加え、廃棄物輸送関連の投入係数についても当てはまる。これは、廃棄物管理の方法によって各廃棄物処理部門に輸送される廃棄物の嵩比重が変化し、これが必要な車両数量・人員に少なからぬ効果を持つからである（補論 B.1 を参照されたい）。図 1 では、廃棄物輸送関連投入係数の持つ非線形性も含めて、工学モデル F_Z として表現している。図 2 は、これらの点を考慮してモデル全体での価格・数量決定を図式化した物である。要点は、WIO 数量モデルを解くために廃棄物純排出ベクトルについて反復演算を行うため、その過程で投入・排出係数が変化する可能性がある、と言う点である。最終処分場土地用役価格、回収廃棄物価格、賃金率、及び輸入財価格は外生扱いしている（輸入の扱いについては補論 A.2 を参照されたい）。

一般的相互依存関係を考慮した経済モデルでは、本来、数量と価格は同時決定されるべき物である。図 2 が示す WIO モデルの現状では、「数量 → 価格」方向の因果関係は考慮されているが、この逆は考慮していない。これを考慮するには、最終需要と価格の関係を取りあえず考慮しないとしても、価格を通じる技術選択問題と

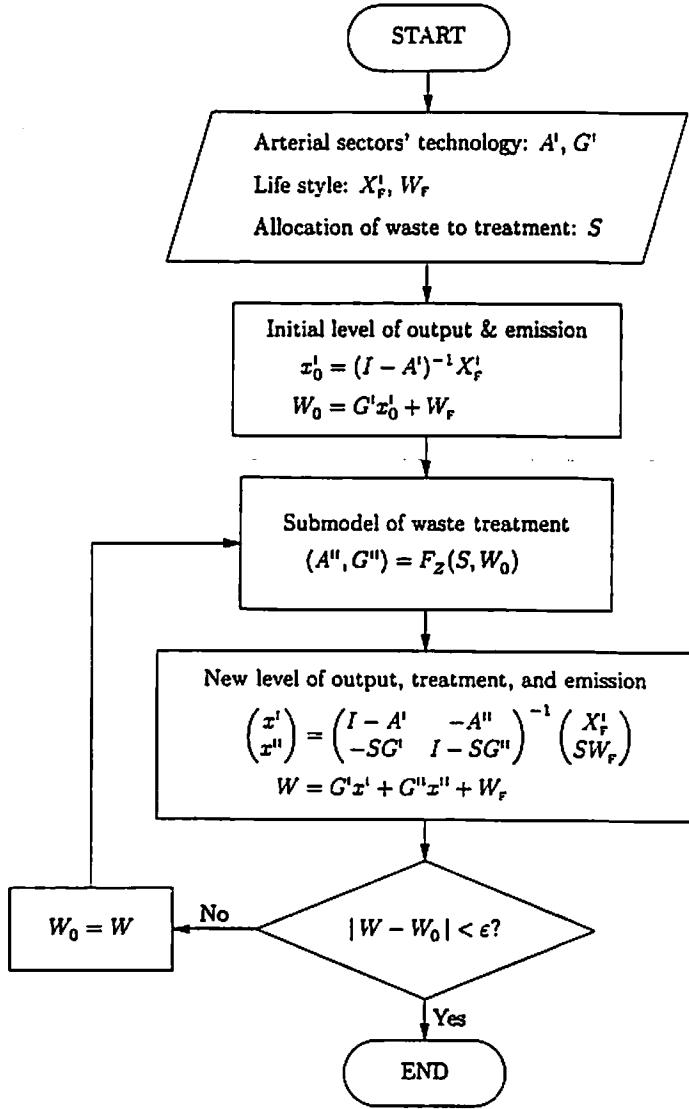


図 1: WIO 数量モデルの非線形性を考慮した繰り返し解法

してモデルを拡張することが必要である(補論 A.1 を参照されたい). ただし、投入・排出係数ベクトルが廃棄物組成に依存するので、最適化計画問題そのものが反復計算問題の入れ子となる。この点は今後の課題である。

3.2 数式による図式の解説

以下、具体的な数式を用いて上の図式を図 1 の数量決定から解説する。先ず、動脈部門の投入係数 A^I 、純排出係数 $G^I = G^{\oplus I} - G^{\ominus I}$ 、財最終需要 X_f^I より、動脈生産初期値 $x_0^I = (I - A^I)^{-1} X_f^I$ および 廃棄物純排出ベクトル初期値 $W_0 = G^I x_0^I + W_f^{\oplus}$ を得る。最終需要部門での再資源化は行われない($W_f^{\ominus} = 0$)としているので、 $W_f = W_f^{\oplus} - W_f^{\ominus} = W_f^{\oplus}$ である点に注意されたい。次に、廃棄物処理工学モデル F_Z にこの結果と所与の配分行列 S を代入し、廃棄物処理部門の投入・排出係数、

$$(A^{II}, G^{II}) = F_Z(W_0, S), \quad (15)$$

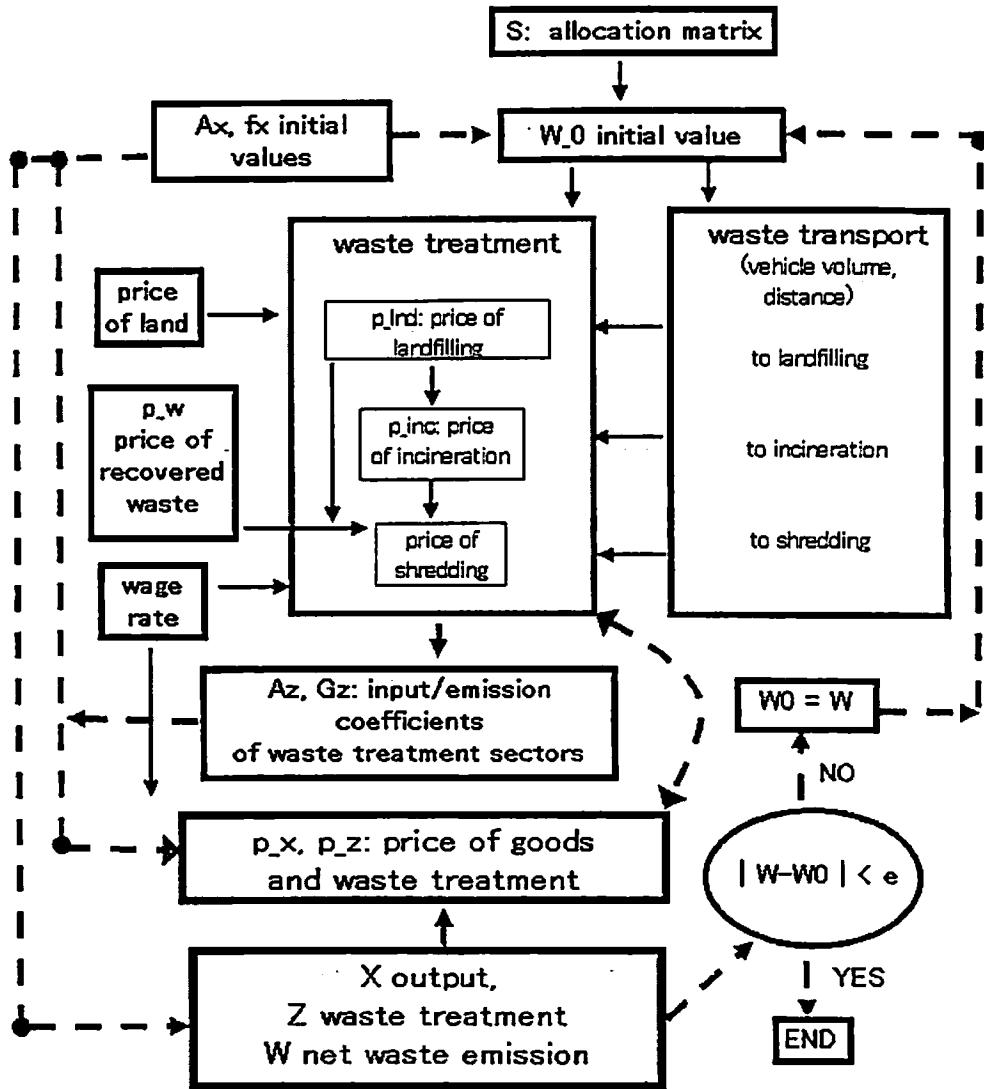


図 2: WIO モデルにおける財・処理価格の決定の流れ

を得る。こうして全部門の投入・排出係数が得られたので、

$$\begin{pmatrix} x^I \\ x^{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I - A^I & -A^{II} \\ -SG^I & I - SG^{II} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_F^I \\ SW_F^\oplus \end{pmatrix}, \quad (16)$$

から全部門の生産水準を求める。加えて、この生産水準に対する廃棄物純排出ベクトル $W = G^I x^I + G^{II} x^{II} + W_F^\oplus$ を求め、これを W_0 と比較して、 $|W - W_0| < \epsilon$ ならば終了。これが満たされない場合は $W_0 = W$ として (15) 以降の計算を再度行う(ただし、 ϵ は許容される誤差を表わす所与の定数である)。

次に価格決定図式に移る。(9) が示すように、価格モデルは再資源化率 r_k を通じて全部門の総体生産水準に依存している。すなわち、 r_k を対角要素として持つ行列 D を生産水準と投入・排出係数行列の関数 D として、

$$D = D(x^I, x^{II}; A, G)$$

である。 D が与えられると、廃棄物価格 p^W と単位本源的生産要素投入 v を所与として、(11) から全部門についての価格を得る。

4 試算結果

WIO 価格モデルのデータとの整合性を確認するため、我が国の廃棄物産業連関表 [9] に基づいて、幾つかの試算結果を示す。以下では、先ず廃棄物処理に関する主な設定について述べ、その後、現状に対応する基準解、焼却広域化による価格変化、家電リサイクル処理価格についての試算結果を報告する。

最終処分場土地用役価格、賃金率、及び輸入財価格は外生扱いとする。最終処分場は山間地に設置され、1 平米あたり地価は 1,000 円であるとし、土地用役価格は、地価と利子率を乗じて求めた。利子率には貸出約定平均金利（長期・新規、1995 年）3.087% を用いた。静脈部門の賃金率は一律に 1 人あたり年間 7 百万円とした。WIO 表における動脈部門生産物は円価値単位（1 単位 = 基準時価格評価 100 万円相当量）で測られている。外生扱いとする輸入財価格も同様に見なし、1.0 で一定とした。

廃棄物価格は、金属屑と紙屑について次の方法により求めた。総務庁による産業連関表の屑・副産物表から得られる「鉄屑」、「非鉄金属屑」、および「古紙」の発生額を、WIO 数量モデルの解として得られる鉄屑、非鉄金属屑、紙屑の排出量で除して、廃棄物価格の推計値とした。得られた推計値は、鉄屑 8.4 千円、非鉄金属屑 28.6 千円、紙屑 0.5 千円である（いずれも 1 トン当たりの価格）。我々の用いた廃棄物分類の集計水準で、正值価格を持つ（有価）と見なされる回収廃棄物はこの 3 種類であった。「動物のふん尿」については、大部分が堆肥化されているため、堆肥化部門での收支が均等するように -1.3 千円/トンとした（同部門の設定の詳細は補論 B.2 を参照されたい）。その他の廃棄物については十分な資料が得られないため、処理単価の加重平均に一致すると仮定する（詳しくは、補論 A.3 を参照されたい）。

廃棄物処理部門（焼却、埋立、破碎、堆肥化）すべてに共通に、収集・輸送に関して、片道距離 12 km とする。1 日あたり作業時間は、焼却と埋立については 5 時間、破碎と堆肥化については 6 時間とする。平均輸送速度は、焼却と破碎について時速 30 km、埋立と堆肥化について時速 40 km とする。輸送車両容積は、焼却、破碎および堆肥化について 8 m³（4 トン車）、埋立について 16 m³（8 トン車）とする。ただし、廃自動車は破碎施設まで自走するものとし、収集・輸送費用は考慮しない。

焼却施設は、1 日あたりの処理能力が 500 トン、180 トン、26 トンの 3 種類があり、それぞれが焼却処理対象物総重量の 34.3%、14.4%、51.3% を受け入れるものとする。最大規模の施設では廃棄物発電を行い、余剰電力は電気業（事業用電力）を競合部門として販売されるとする。すなわち、焼却部門による発電は、他部門における副産物の扱いと同様に電気業の行にマイナス投入方式で計上する。ただし、実際の販売価格の差異には注意を要する。総務庁産業連関表付帯表の物量表から得られる動脈の電気業部門の単価が約 21 円/kWh であるのに対し、焼却施設による発電単価は 7 円/kWh であり、両者のあいだには 3 倍程度の差異がある。そこで、

$$\text{電気業部門単価} = \text{焼却部門発電単価} \times 3$$

と仮定して、計算価格を求める。具体的には、価格モデルの演算においては、該当する投入係数が負値の場合には、それを 3 分の 1 倍した値に置き換える。ただし、数量モデルの繰り返し演算においては、百万円価値単位での物量投入係数を用いる。

資料の制約により、静脈部門の一般管理費、法人税、賃金以外の労務費、営業余剰などを考慮することは出来なかった。この意味では、静脈部門の計算価格 p^H は過小推定になる。また、ほとんどすべての部門は廃棄物を排出し、静脈部門の処理サービスを投入するので、動脈部門の計算価格 p^A も過小推定になる傾向がある。

4.1 基準解

動脈部門生産物の数量は円価値単位で測られているため、現実価格の値は 1.0 である。WIO 価格モデルのデータとの整合性を確認するため、先ず、モデル解が 1.0 (に十分近い) か否かを見る。図 3 は計算結果を示す。計算価格 p^I と 1.0 との差 (の絶対値) が 0.1 より大きい部門は、全 80 部門中でセメント部門のみであり、その計算価格は 0.78 であった。セメント部門は、多岐に渡る廃棄物を原料・燃料として大量に受け入れて再資源化を行っている。この中には有償・有価のものが混在していると考えられる。鉱滓の内、高炉スラグは高炉セメントの原料としての利用が確立しているが、その他の起源の鉱滓については有償で受け入れているものもあると考えられる。しかし、我々が用いている現状の廃棄物分類では起源による相違を考慮していない。その結果、実際には有価取り引きされている廃棄物についても、一律に有償としている結果、単位費用の過小推定が生じていると考えられる。この様な場合に対処するには、起源による廃棄物分類の細分化が必要であろう。

セメント部門と同様に土木部門も煤塵、焼却灰、鉱滓などの大口再資源化部門であるが、土木部門の計算価格は 0.96 であり 1.0 に近い。両部門の主たる相違は、セメント部門が (重量ベースで) 排出総量の 30 倍近くの廃棄物を再資源化しているのに対して、土木部門は大量の建設廃材を排出し、排出総量の 1.5 倍程度の廃棄物を再資源化しているに過ぎない点にある。

静脈部門の計算価格は、同部門の活動量を処理対象重量 [トン] で測っているため、1 トンあたりの処理単価に対応する。計算された 1 トンあたり処理単価は、焼却 9.3 千円、埋立 6.5 千円、粗大ごみ破碎 20.0 千円であった。焼却単価をより詳しく見ると、1 日あたりの処理能力が 500 トンの発電付き焼却施設での単価は 6.0 千円、能力 180 トンで 12.2 千円、能力 26 トンで 10.8 千円であった。能力 500 トンの処理単価が高いのは、規模の経済性と売電収益に因る。能力 180 トンの方が能力 26 トンの施設よりも処理単価が高いのは、後者が、焼却炉運転とその他を同一の従業者が兼務可能なほどに極めて小規模な施設であることに因る。

なお、動脈部門全 80 部門のうち、計算価格 p^{II} が 1.0 より高い部門は僅か 3 部門であり、残りの 77 部門では 1.0 より低い計算価格を得た。図 3 からは、およそ 0.96 を中心に計算価格が散らばっていることが分かる。既に指摘した如く、静脈部門の一般管理費、法人税、賃金以外の労務費、営業余剰などを考慮できていないことが、この過小推定傾向の主因であると思われる。この点を改善することは、今後の重要な課題である。

4.2 焼却広域化

焼却処理を広域化することは、多数の小規模施設を廃し、少数の大規模施設で置き換えることに対応する。その結果として、収集対象地域は広くなり、輸送距離が増加する。ここでは、焼却広域化の処理単価への影響について試算するために、[2] に倣って表 1 のようなシナリオを作成した。

3 つのシナリオの内、シナリオ A は前節で基準解を求める際に利用したもので、現状の焼却施設構成に対応する。シナリオ B は一般廃棄物の焼却を大規模施設 (処理能力 500 トン/日、焼却付き) で置き換える広域化に対応する。産廃はシナリオ A と同様に、小規模施設 (処理能力 26 トン/日) で処理されるものとする。シナリオ C は一般廃棄物に加えて産業廃棄物をも大規模施設で置き換える産廃・一廃統合広域化に対応する。産廃は小規模施設 (処理能力 26 トン/日) で処理されるものとする。現状 (シナリオ A) における収集・輸送距離は、既に述べた如く 12 km とする (大規模施設は人口集中地域で用いられ、小規模施設は非人口集中地域で用いられることに対応する)。

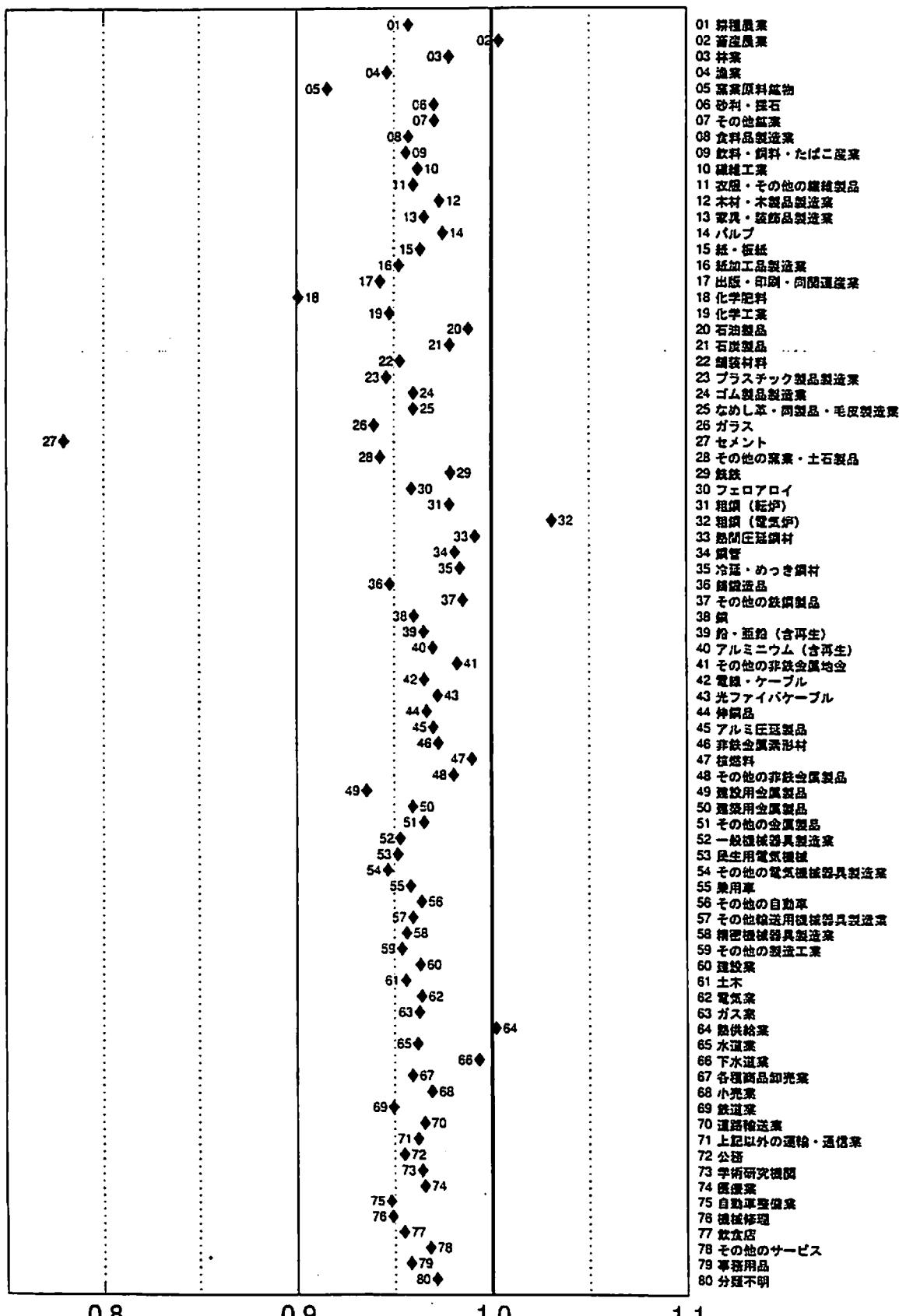


図 3: WIO 価格モデル：基準解

表 1: 焼却広域化シナリオ設定 (焼却施設能力別施設数)

施設能力 [トン/日]	発電	A. 現状	B. 一廃広域化	C. 統合広域化
500	あり	145	274	423
180	なし	169	0	0
26	なし	4,177	2,876	0

出典 [2]

表 2: 焼却広域化による焼却部門の処理単価と投入原単位の変化

シナリオ	A. 現状	B. 一廃広域化	C. 統合広域化
焼却処理単価 (計算価格) [千円]	9.3	8.4	6.0
投入原単位 [10^{-3} 百万円価値単位]			
化学工業	0.887	0.887	0.887
石油製品	0.069	0.113	0.195
一般機械器具製造業	1.577	1.659	1.982
電気業	-1.458 (0.690)	-5.142 (-1.091)	-9.394 (-3.131)
水道業	0.116	0.103	0.072
自動車整備業	0.209	0.342	0.591
付加価値	5.356	7.515	11.568

電気業の括弧内は、負値の投入係数を 3 分の 1 倍して求めた投入係数。

広域化に伴う輸送距離の増加は、次のように考慮した。シナリオ A において中規模施設 (処理能力 180 トン/日) へ輸送されていた焼却対象物は、すべて大規模施設へ輸送される。規模が $500 \div 180 \approx 2.78$ 倍の施設で代替され、同じ倍率で収集対象地域の面積が大きくなったものと見なす。輸送距離は収集対象地域面積の平方根に比例すると仮定すれば、 $12 \text{ km} \times \sqrt{500/180} = 20 \text{ km}$ へと延長される。同様に、シナリオ A において小規模施設へ輸送されていた焼却対象物の輸送距離は $12 \text{ km} \times \sqrt{500/26} \approx 52.6 \text{ km}$ へと延長される。

以上の設定に基づき、表 2 の通り試算結果を得た。1 トンあたり処理単価は、シナリオ A で 9.3 千円、シナリオ B で 8.4 千円、シナリオ C で 6.0 千円である。数量で見た売電原単位 (電気業のマイナス投入原単位) は、シナリオ A で -1.458×10^{-3} である。シナリオ B では -5.142×10^{-3} でありシナリオ A の約 3.5 倍、シナリオ C では -9.394×10^{-3} でありシナリオ A の約 6.4 倍である。一方、廃棄物発電の売電単価が動脈の電気業単価の 3 分の 1 であることを考慮して得られた価値で見た原単位は、シナリオ A で 0.690×10^{-3} 、シナリオ B で -1.091×10^{-3} 、シナリオ C で -3.131×10^{-3} である。広域化をしない現状では、大規模施設の売電収入を中小規模施設の電気投入が上回り、全体としては収益を生んでいないが、広域化による売電収入原単位の増大は、処理単価を下落させる効果を持つ。逆に、広域化は、輸送距離延長を通じて処理単価を上昇させる効果を持つ。シナリオ B, C における輸送関連投入原単位 (石油製品、自動車整備) は、それぞれシナリオ A の 1.64 倍、2.83 倍である。また、人件費 (付加価値 = 本源的生産要素) 投入原単位についても、規模の経済性の効果によって効果は緩和されているが、1.40 倍、2.16 倍となっている。これらの効果の総和として、現状から一廃広域化、さらに産廃・一廃統合広域化への移行は処理単価を下落させる。ただし、収集輸送の設

定(とくに処理施設立地と輸送距離、複数種類の車両を組み合わせた中継輸送など)について、今後の精緻化が必要である。

4.3 家電リサイクル

家電リサイクル制度に関して、特に WIO 価格モデルによる計算価格と現実の家電処理費用との比較に注目して、試算を行う。表 3.A は、家電 4 品目の排出量と素材構成を表わす。表 3.B は、シナリオ設定(I: 埋立、II: 従来型シュレッダ破砕、III: 一貫リサイクル)を表わす。家電リサイクル法施行以前は、廃家電の大半は埋立て処分されていたと言われる。また、前処理として破砕される場合においても、素材の回収歩留まりは、(鉄をのぞけば)現在の一貫リサイクルよりも低いものであった。家電リサイクル法施行以前には、シナリオ I と II が混在していたのである。一方、シナリオ III は家電リサイクル制度化の一貫リサイクル [11] に対応する。輸送設定(輸送距離、速度、車両容積)は、いずれも法施行前後それぞれの状況に対応する典型的な値を用いる。回収廃棄物販売価格は、金属屑については既述のとおり、鉄屑 8.4 千円、非鉄金属屑 28.6 千円とする。

一貫型リサイクル(シナリオ III)における 1 トン当たり処理費用は、テレビ 53.39 千円、冷蔵庫 47.13 千円、洗濯機 46.27 千円、エアコン 40.83 千円であった。各家電の 1 台当たり重量を、テレビ 20–40 kg、冷蔵庫 50–80 kg、洗濯機 20–40 kg、エアコン 40–65 kg 程度とすると、1 台当たり処理費用は、テレビ 1.07–2.14 千円、冷蔵庫 2.36–3.77 千円、洗濯機 0.93–1.85 千円、エアコン 1.63–2.65 千円である。代表的家電メーカの現実のリサイクル料金は、テレビ 2,700 円、冷蔵庫 4,600 円、洗濯機 2,400 円、エアコン 3,500 円であるので、WIO 価格モデルによる試算結果はこれを一様に過小推定している事になる。これは先に指摘した本稿における

表 3: 家電排出量と素材構成、シナリオ設定(回収歩留まりと輸送距離等)

表 3.A: 排出量と素材構成比

	テ レ ビ	冷 蔵 庫	洗 濯 機	エ ア コン
排出量 [1000 トン] ^a	226	240	113	154
素材構成(重量比率, %)				
プラスチック	16	43	35	18
鉄	10	49	56	46
銅	2	3	3	19
アルミニウム	0	1	1	9
その他の金属	1	1	1	2
ガラス	62	0	0	0
ガス	0	1 ^b	0	2 ^c
プリント基板	8	0	2	3
その他	1	1	3	3

^a 2000 年推計値

^b CFC11 70% CFC12 30%, ^c CFC12 100%

表 3.B: シナリオ設定

シナリオ	I	II ^a	III ^b
素材別回収歩留まり (%)			
プラスチック	0.0	0.0	48.5 ^c
鉄	0.0	99.0	99.9
銅	0.0	0.0	89.9
アルミニウム	0.0	0.0	92.2
その他の金属	0.0	0.0	0.0
ガラス	0.0	0.0	99.0
CFC11	0.0	0.0	90.0
CFC12	90.0	90.0	90.0
輸送設定			
片道距離 [km]	12	12	75
輸送速度 [km/h]	30	40	30
車両容積 [m ³]	8	16	8

^a [10], ^b [11], ^c [11, Fig. 1.1.1].

る計算価格が過小推定傾向を持つことと整合的である。過小推定の程度が如何ほどかは今後の精査を待たねばならないが、計算価格が実際の料金を超えていない点は注目に値するのではないだろうか。この結果は、家電リサイクル制度が、現状において家電メーカーの費用負担を著しく増加し、その結果家電製品の価格を上昇させる形での消費者への費用転嫁を行う必然性がないことを示唆すると考えられる。ただし、静脈部門の一般管理費、法人税、賃金以外の労務費、営業余剰などを考慮すべく資料を整備した上で、精査が必要である事は言うまでもない。

5 結語

本稿では、廃棄物産業連関（WIO）価格モデルを開発し、幾つかの試算結果を示した。WIO 価格モデルの主な特徴は、静脈部門の受動的特性により WIO 数量モデルと同様に非線形であること、固定投入・排出係数を前提としても価格が数量に依存して決定されること、の 2 点である。また、伝統的な産業連関モデルと異なり、数量モデルと価格モデルの逆行列が共通でない。これらの特徴は、廃棄物排出の内で他部門で投入される（再資源化される）ものは廃棄物価格で評価され、処理されるものは処理価格で評価され、かつ廃棄物価格と処理価格とが必ずしも等しくないことに起因する。

WIO 価格モデルのデータとの整合性を確認するため、幾つかの試算（現実に対応する基準解、焼却広域化の影響評価、家電リサイクル費用の評価）を行った。試算の結果、WIO 価格モデルは概ねデータと整合的である。しかし、さらなる資料整備（特に静脈部門の粗付加価値に関して）の必要性も明らかとなった。これは今後の重要な課題である。

WIO 価格モデルを開発したことにより、「数量 → 価格」方向の因果関係を考慮可能となった。モデルの開発に関して残された課題は、補論 A.1 に述べた方法により、逆の「価格 → 数量」方向の因果関係を考慮することである。

補論 A WIO モデルの拡張可能性

A.1 計画モデルの概略

WIO 数量モデルの解 (12) は、数量均衡式 (x^I, x^{II} についての線型方程式系)，

$$x^I = A^I x^I + A^{II} x^{II} + X_F^I, \quad (17a)$$

$$x^{II} = SG^I x^I + SG^{II} x^{II} + SW_F, \quad (17b)$$

を x^I, x^{II} について解く事により得られたものである。方程式系の解の一意性を仮定し、解を \bar{x}^I, \bar{x}^{II} と書く。ここで、任意の n^I 次行ベクトル π^I と n^{II} 次行ベクトル π^{II} に対して、 x^I, x^{II} を変数とする線形計画問題 (LP)，

$\begin{aligned} &\text{minimize} && \pi^I x^I + \pi^{II} x^{II} \\ &\text{subject to} && x^I = A^I x^I + A^{II} x^{II} + X_F^I \\ & && x^{II} = SG^I x^I + SG^{II} x^{II} + SW_F \end{aligned}$	(18)
--	--------

を考える。LP (18) の制約と方程式系 (17) は同一であるから、(17) の解は (18) の最適解である。

これまで、各動脈部門は投入・排出係数の組 (A^I, G^I) で表わされていた。今、各動脈部門が 2 通りの技術 (A_1^I, G_1^I) および (A_2^I, G_2^I) を選択可能であるとする。それぞれの技術で生産される生産量を x_1^I, x_2^I とする。需

要者にとっては異なる技術で生産されたものであっても同一の生産物であれば無差別である。また、複数の技術が選択可能になったとしても、廃棄物種類の数が変化した訳ではない。したがって、方程式系(17)を構成する方程式の数は不变であり、

$$x_1^I + x_2^I = A_1^I x_1^I + A_2^I x_2^I + A^{II} x^{II} + X_F^I, \quad (19a)$$

$$x^{II} = SG_1^I x_1^I + SG_2^I x_2^I + SG^{II} x^{II} + SW_F, \quad (19b)$$

と書ける。選択可能な2通りの技術 $\langle A_1^I, G_1^I \rangle, \langle A_2^I, G_2^I \rangle$ のうち、前者を現実の技術 $\langle A^I, G^I \rangle$ とすれば、すなわち $\langle A_1^I, G_1^I \rangle = \langle A^I, G^I \rangle$ とすれば、この方程式系(19)は、 $x_1^I = \bar{x}^I, x_2^I = 0, x^{II} = \bar{x}^{II}$ という自明な解を持つ。この解を $\bar{x} = (\bar{x}_1^I, \bar{x}_2^I, \bar{x}^{II}) = (\bar{x}^I, 0, \bar{x}^{II})$ と書く。(19)に基づいて、 x_1^I, x_2^I, x^{II} を変数とするLP、

	minimize $\pi_1^I x_1^I + \pi_2^I x_2^I + \pi^{II} x^{II}$
subject to	$x_1^I + x_2^I \geq A_1^I x_1^I + A_2^I x_2^I + A^{II} x^{II} + X_F^I$
	$x^{II} = SG_1^I x_1^I + SG_2^I x_2^I + SG^{II} x^{II} + SW_F$
	$G_1^I x_1^I + G_2^I x_2^I + G^{II} x^{II} + W_F \geq 0,$
	$x_1^I \geq 0, x_2^I \geq 0, x^{II} \geq 0$

(20)

を考える。第1制約の不等式は(19a)に基づき、最終需要充足という意味を保ちつつ緩和したものである。第2制約の等式は(19b)と同一であり、廃棄物についての物質収支の条件である。第3制約の不等式は廃棄物純排出量についての非負条件(資源散逸条件)を表している[12]。最後の3つの不等式は、生産量・活動量についての非負条件である。方程式系(19)には資源散逸条件が含まれていないが、現実の活動水準に対応するを自明な解 \bar{x} はこの条件を満たす。目的関数設定の如何により、 \bar{x} 以外の可能解が最適解となり得る。

以上、WIOモデルの計画問題への拡張の概略を紹介した。目的関数に関しては任意のベクトルとして述べたが、(i) 環境負荷因子排出係数を目的関数ベクトルとした環境負荷因子最小化問題、(ii) π_1^I を十分大きい正数とした代替的技術を優先的に操業する問題、(iii) WIO価格モデルの解を目的関数とした国内生産額最小化問題¹など、政策目的等に即した興味深い応用分析の可能性がある。

A.2 輸入の取り扱い

伝統的な産業連関分析の数量モデルでは、数量に関する均衡式、

$$x = A_D x + f_D + e_D,$$

に基づいて分析が行われる。ここで、 A, f, e はそれぞれ投入係数行列、国内最終需要ベクトル、輸出ベクトルを表わす。添字 D は国産品に対する需要であることを表わす。以下では、添字 D を M に置き換えたものは輸入品に対する需要を表わす。ただし国産品と輸入品を区別した詳細なデータを得るのが困難なことから、

$$A = A_D + A_M, f = f_D + f_M, M = \text{diag}(A_M x + f_M) \{ \text{diag}(Ax + f) \}^{-1}, A_M = MA, f_M = Mf,$$

とする。これを用いて数量均衡式を、

$$x = (A - A_M)x + (f - f_M) + e_D = (I - M)Ax + (I - M)f + e_D,$$

¹最終需要を所与としているので、経済全体の生産性最大化問題に対応するものと解釈できる。

と書き換えた上で、

$$x = \{I - (I - M)A\}^{-1} \{ (I - M)f + e_D \},$$

をモデルの解とする。WIO 数量モデルについても輸入を同様に扱うことにより、モデルの解は、

$$\begin{pmatrix} x^I \\ x^{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I - (I - M)A^I & -(I - M)A^{II} \\ -SG^I & I - SG^{II} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (I - M)X_F^I + X_E^I \\ SW_F^\oplus \end{pmatrix},$$

となる。ただし、 X_F^I は動脈生産物に対する国内最終需要であり、 X_E^I は動脈生産物の輸出である。

伝統的な産業連関価格モデルの均衡式は、

$$p_D = p_D A_D + p_M A_M + v,$$

であり、これを行列 M を用いて書き換えて、

$$\begin{aligned} p_D &= p_D (I - M)A + p_M M A + v, \\ p_D &= (p_M M A + v) \{ I - (I - M)A \}^{-1}, \end{aligned}$$

のように国産品価格 p_D に関するモデルの解が得られる。WIO 価格モデルの均衡式、

$$\begin{pmatrix} p_D^I & p_D^{II} \end{pmatrix} = p_D^I A_D + p_M^I A_M + p_D^{II} S(I - D)G^\oplus + p^w(G^\oplus - DG^\oplus) + v,$$

に関しても輸入を同様に扱うと、

$$\begin{pmatrix} p_D^I & p_D^{II} \end{pmatrix} = p_D^I (I - M)A + p_M^I M A + p_D^{II} S(I - D)G^\oplus + p^w(G^\oplus - DG^\oplus) + v,$$

のように書き換えられる。これを国産品価格に関して解いて、WIO 価格モデルの解、

$$\begin{pmatrix} p_D^I & p_D^{II} \end{pmatrix} = \{ p_M^I M A + p^w(G^\oplus - DG^\oplus) + v \} \begin{pmatrix} I - (I - M)A^I & -(I - M)A^{II} \\ -S(I - D)G^{\oplus I} & I - S(I - D)G^{\oplus II} \end{pmatrix}^{-1},$$

を得る。以上の展開では廃棄物資源の輸出入が無いとした。しかし、現実には古紙や金属屑は輸出入されているので、この点を考慮することも今後の課題として残されている。

A.3 追加的仮定の下での廃棄物価格の決定

第2節で解説したWIO 価格モデルにおいては、廃棄物価格 p^w を外生扱いしている。廃棄物排出量・投入量の多寡とともに、廃棄物価格 p^w の水準は、価格 p^I, p^{II} に影響を与える。また、(3)に示したように、ベクトル $p^w + p^{II}S$ の各要素の符号に応じて、(廃棄物価格は負値で有償であっても) 各廃棄物の販売自体が費用低減に貢献し得る。

現実には、廃棄物の有償引取りと委託処理との境界が(少なくとも排出者にとっては)曖昧な場合もある。そのため、廃棄物価格 p^w と静脈価格(処理価格) p^{II} とのあいだに一定の関係があると仮定することが妥当な場合もある。両者間のモデル化は今後の課題とし、ここで深くは立ち入らないが、便宜的に、

$$p^w = p^{II}C + c, \quad (21)$$

とする。ただし C, c は、それぞれの要素が p^l, p^u に依存しない $n^u \times n^w$ 行列と n^w 次行ベクトルである。
(21) を (9) に代入し、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} p^l & p^u \end{pmatrix} &= p^l A + p^u S G^\Theta + (p^u C + c) G^\Theta + v - (p^u C + c + p^u S) D G^\Theta \\ &= p^l A + p^u \{ S(I - D) G^\Theta + C(G^\Theta - D G^\Theta) \} + c(G^\Theta - D G^\Theta) + v, \\ p &= \{ c(G^\Theta - D G^\Theta) + v \} \left(I - \begin{pmatrix} A \\ S(I - D) G^\Theta + C(G^\Theta - D G^\Theta) \end{pmatrix} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (22)$$

を得る。 (21) の特殊な場合として、任意の処理価格 p^u に対して、廃棄物の販売が費用に影響しない場合 ($p^w + p^u S = 0 \iff C = -S, c = 0$) を考える。この場合には (22) は、

$$p = v \left(I - \begin{pmatrix} A \\ S(G^\Theta - G^\Theta) \end{pmatrix} \right)^{-1},$$

に帰着する。このとき、既に指摘した如く、財・処理価格 p は廃棄物価格 p^w から独立に決定され、逆行列は WIO 数量モデルと共通である。また、配分行列 S の列和は 1 に等しいことから、条件 $p^w + p^u S = 0$ は、廃棄物有償単価（の絶対値） $|p^w|$ が処理単価 p^u の加重平均に一致することと同値である。加えて、配分行列は処理対象量計を各処理部門に配分するものなので、ここで言う加重平均は、実際の処理状況に即して定義された平均価格に対応する。

WIO 価格モデルによる実際の分析を、制約 $p^w + p^u S = 0$ を（全部または一部の要素について）課して行うこと、その結果を制約を課さない場合と比較することなどは、それ自体興味深い情報を提供するであろう。また、廃棄物価格の資料収集が困難な場合に、入手できない廃棄物の価格を補完するための一方法ともなり得よう。

補論 B 廃棄物処理に関する諸設定

B.1 廃棄物の収集・輸送

廃棄物処理に係る収集・輸送設定には、[8] を本稿の目的に即して簡単化したもの用いている。本節では、その概略を解説する。

車両台数と輸送距離 W_j を廃棄物 j の年間純排出重量 [ton/年]、 ρ_j を廃棄物 j の嵩比重 [ton/m³] とすると、処理 i (第 i 駆駆部門) へ配分される廃棄物の平均嵩比重 ρ^i [ton/m³] は、

$$\rho^i = \sum_{j \in N^w} s_{ij} W_j / \sum_{j \in N^w} (s_{ij} W_j / \rho_j) = \text{処理対象重量 [ton]} \div \text{処理対象体積 [m}^3\text{]},$$

として（各廃棄物嵩比重の加重調和平均として）与えられる。処理毎に輸送車両は異なり、複数の処理に関する輸送が同一車両によって行われることはないとする。処理 i のための輸送に用いられる車両容積を V_c^i [m³]、処理 i の処理施設への片道輸送距離を L^i [km]、輸送平均速度を s_H^i [km/h]、週当たり輸送日数を 6 日、廃棄物 j の 1 日あたり純排出量を $w_j := W_j / 365$ [ton/日]、処理 i に配分される 1 日あたり年間純処理対象重量 $w^i = \sum_{j \in N^w} s_{ij} w_j$ [ton/年] とすると、1 輸送日当たり総輸送時間 t_1^i [h/日] は、

$$t_1^i = \frac{2L^i}{s_H^i} \frac{7w^i/6}{\rho^i V_c^i} = \frac{\text{往復輸送距離 [km]}}{\text{平均速度 [km/h]}} \times \frac{1}{\text{輸送日当たり処理対象重量 [ton/日]}} \frac{7w^i/6}{\text{車両積載可能重量 [ton]}},$$

である。これを 1 輸送日当たり作業時間 H^i [h/日] で除して、輸送のために必要な車両台数 q_c^i ,

$$q_c^i = \frac{t_1^i}{H^i} = \frac{2L^i \times 7w^i}{6s_H^i \rho^i V_c^i H^i}$$

を得る。年間走行距離 d_c^i [km/年] は、年間作業日数を 310 日として

$$d_c^i = 310 s_H^i t_1^i = 310 s_H^i \frac{2L^i \times 7w^i}{6s_H^i \rho^i V_c^i} = 310 \times \frac{2L^i \times 7w^i}{6\rho^i V_c^i},$$

である。

用役・費用 第 i 处理部門で必要とする車両台数 q_c^i が与えられると、1 台当たり年間雇用・整備関連投入原単位 a_j^i 、年間単位価格 p_j を用いて年間費用 C_{T1}^i が求められる：

$$C_{T1}^i = q_c^i \sum_{j \in J_1} p_j a_j^i = \frac{2L^i \times 7w^i}{6s_H^i \rho^i V_c^i H^i} \sum_{j \in J_1} p_j a_j^i.$$

燃料消費などの走行距離 d_c^i に比例する年間費用 C_{T2}^i は、

$$C_{T2}^i = d_c^i \sum_{j \in J_2} p_j a_j^i = 310 \times \frac{2L^i \times 7w^i}{6\rho^i V_c^i} \sum_{j \in J_2} p_j a_j^i.$$

年間収集・輸送費用合計は

$$\begin{aligned} C_T^i &= C_{T1}^i + C_{T2}^i \\ &= \frac{2L^i \times 7w^i}{6s_H^i \rho^i V_c^i H^i} \sum_{j \in J_1} p_j a_j^i + 310 \times \frac{2L^i \times 7w^i}{6\rho^i V_c^i} \sum_{j \in J_2} p_j a_j^i \\ &= \frac{2L^i \times 7w^i}{6\rho^i V_c^i} \left(\frac{1}{s_H^i H^i} \sum_{j \in J_1} p_j a_j^i + 310 \times \sum_{j \in J_2} p_j a_j^i \right), \end{aligned}$$

で与えられる。重量当たりの単位収集・輸送費用 c_T^i は、

$$\begin{aligned} c_T^i &= C_T^i \div (356w^i) \\ &= \frac{2L^i \times 7w^i}{6\rho^i V_c^i} \left(\frac{1}{s_H^i H^i} \sum_{j \in J_1} p_j a_j^i + 310 \times \sum_{j \in J_2} p_j a_j^i \right) \div (356w^i) \\ &= \frac{2L^i \times 7}{6\rho^i V_c^i \times 365} \left(\frac{1}{s_H^i H^i} \sum_{j \in J_1} p_j a_j^i + 310 \times \sum_{j \in J_2} p_j a_j^i \right), \end{aligned}$$

である。

B.2 家畜糞尿の堆肥化技術

家畜糞尿（動物のふん尿）の堆肥化に関して、[13] から得られる*****ある施設の操業実績???? ***** 資料に基づいて原単位を設定する。また、この設定および収支が均等するとの仮定により、廃棄物としての家畜糞尿の販売単価（引取単価）を求める。

当該施設での年間の堆肥生産量 12.8 千トンの糞尿処理量 29.7 千トンに対する比率から、堆肥化収率を 0.43 とする。厨芥との混合処理は行わず、したがって前処理（分別破碎と乾燥）は不要とする。炭素・窒素比（C/N 比）

表 4: 家畜糞尿堆肥化の原単位

項目	原単位
生産費 (処理費)	6.158 千円/堆肥トン
化学工業	0.138
一般機械器具製造業	3.027
電気業	1.526
水道業	0.104
付加価値	1.364
輸送費	0.840 千円/堆肥トン
石油製品	0.091
自動車整備業	0.094
付加価値	0.656
糞尿投入	2.324 トン/堆肥トン
二酸化炭素	1.257 kg-C/堆肥トン

や水分調整のための副資材としては、農家によって稻わらなどが自己調達されるものと想定するが、市場で取引されない稻わらが相当量に上ると予想されるため、モデル演算用の原単位設定には反映させない。

堆肥化工程(吸送用・脱臭用プロワ、脱臭装置付付属機器、トロンメル)および廃水処理工程での電力需要額は21.1百万円である。廃水処理工程での水道需要額は1.4百万円、薬品需要額は1.9百万円である。また、工程全体での人件費は10.3百万円(1.47人)、修理・補修費は2.1百万円、地代は8.6百万円、定額法による設備の減価償却費は39.7百万円である。設備稼働率を100%としたときの年間堆肥生産量13.8千トンを基準生産量とする。電力需要額を電気業、水道需要額を水道業、薬品需要額を化学工業、修理補修費と減価償却費を一般機械器具製造業、人件費と地代を付加価値(本源的生産要素費用)に割り当て、基準生産量で除したものと投入原単位とする。

以上の設定に、収集・輸送関連費用を加算する。4節で述べた如く、片道距離12km、1日あたり作業時間6時間とし、荷箱容積8m³の4トン車で平均時速40kmで輸送を行うものとする。B.1節で述べた方法によって、車両整備費、輸送関連人件費、燃料(軽油)使用量および額を求める。軽油使用量当たり二酸化炭素排出量を0.7212kg-C/L-軽油として二酸化炭素排出量を求める。以上の設定をまとめたのが表4である。

堆肥販売単価は4千円/トンであり、糞尿投入原単位は堆肥化収率の逆数で $1/0.43 = 2.324$ 糞尿トン/堆肥トンである。したがって、糞尿の引取単価が、

$$\text{引取単価} = (\text{生産費} + \text{輸送費} - \text{堆肥販売単価}) \div \text{糞尿投入原単位} \approx 1.29 \text{千円}$$

であれば收支が均等する。

参考文献

- [1] Nakamura, Shinichiro. "Input-Output Analysis of Waste Cycles," *First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Proceedings*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, pp. 475-480, 1999.

- [2] 中村慎一郎. 「廃棄物処理と再資源化の産業連関分析」『廃棄物学会論文誌』第 11 卷 2 号, pp. 84–93, 2000.
- [3] 中村慎一郎, 近藤康之, 平井康宏. 「厨芥処理の LCA: 廃棄物産業連関の応用」『都市清掃』第 54 卷 241 号, 2001.
- [4] 中村慎一郎. 「ライフサイクル戦略の経済性」シンポジウム『製品特性に応じたライフサイクル設計: 多様な循環型ライフサイクル・シナリオ』2001 年精密工学会春季大会.
- [5] 外川健一. 『自動車とリサイクル: 自動車産業の静脈部に関する経済地理学的研究』東京: 日刊自動車新聞社 (2001).
- [6] Samuelson, P. A. "Abstract of a Theorem Concerning Substitutability in Open Leontief Models," In T. C. Koopmans (ed.) *Activity Analysis of Production and Allocation*. New York: Wiley, pp. 142–146 (1951).
- [7] 森嶋通夫. 『産業連関論入門』東京: 創文社 (1956).
- [8] 田中信寿, 松藤敏彦. 「都市ごみの総合管理を支援する評価計算システムの開発に関する研究」北海道大学大学院工学研究科廃棄物資源工学講座廃棄物処分工学分野, 1998.
- [9] 近藤康之, 高瀬浩二, 中村慎一郎. 「廃棄物産業連関表 (1995 年全国表) の推計」Working Paper Series No. 0103, 早稲田大学現代政治経済研究所, 2001.
- [10] T. Yoshida, Y. Otsuka, K. Ueno, and A. Sunami. Life cycle assessment on recycling of electrical home appliances: Prediction and results through operation. In *Proceedings of the Fourth International Conference on EcoBalance*, pp. 551–4, Tsukuba, Japan, 2000.
- [11] (財) 家電製品協会. 「廃家電品一貫処理リサイクルシステム開発」平成 10 年度成果報告書 (概要版), 1999.
- [12] 中村慎一郎. 「廃棄物循環の線形経済モデル」『三田学会雑誌』第 92 卷 2 号, pp. 86–107, 1999.
- [13] (財) 食品産業センター. 『平成 12 年度資源循環型食品産業モデル展開事業報告書』