

廃棄物処理と再資源化の産業連関分析

中村慎一郎

WP9904

1999(平成 11)年 8 月

廃棄物処理と再資源化の産業連関分析

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

e-mail: nakashin@mn.waseda.ac.jp

1999年8月

1 はじめに

廃棄物は、産業の生産活動と家計の消費活動に伴って、不可避的に発生する。この「動脈部門」で発生した廃棄物を適正処理するのが、再資源化を含む廃棄物処理に関わる「静脈」部門の役割である。もとより、物質保存則からいかなる処理技術も廃棄物を「消滅」させる事は出来ない。廃棄物処理部門が行うのは廃棄物を「適正」に形状変換する事であり、その変換過程で独自の廃棄物を発生せしめる事も多いのが事実である。一方、廃棄物処理部門の操業に必要な装置・エネルギー・原材料等は動脈部門が供給しており、その生産過程でも当然廃棄物が発生する。このように動脈部門と静脈部門の間には財と廃棄物の循環を巡る複雑な相互依存関係が存在する。ある目的を持った廃棄物管理政策が実際にその目的達成に有効か否かを判断するためには、この相互依存関係を考慮しながら当該政策が経済全体に及ぼす波及効果を量的に評価することが重要であろう ([1], p.74)。

産業連関表・モデルは財の循環を通じる動脈部門内の相互依存関係を数量的に記述する優れた分析装置であり、我が国では世界最高水準の精度と規模を持った表が1950年代中葉から政府により定期的に作成公表されている。しかし、現行の産業連関表は廃棄物の循環を考慮していないから、動脈と静脈部門の相互依存関係を分析するために用いることが出来ない。筆者はこの相互依存関係を把握するべく産業連関表の概念を拡張した「廃棄物産業連関表」を独自に提唱し、経験的知見を得るために北海道の小自治体(F市)について同表を実際に推定し、これを用いて同市の廃棄物処理政策の評価分析を行って来た [2][3]。

F市の知見を踏まえた上で、更に全国水準の「廃棄物産業連関表」を推定した。この表は、製造業を中心とする52産業部門と複数の廃棄物処理部門(破碎・焼却・埋立・溶融)及び一般廃棄物と産業廃棄物から成る24種類の廃棄物で構成されていている [4]。本稿は、この廃棄物産業連関表を用いたいくつの分析結果を報告する。特に、広域化による焼却炉の大型化とごみ発電、可燃・不燃分別処理の変更、及び廃プラスチックの高炉還元利用 [5]について複数のシナリオを設定し、これらの経済活動水準・最終処分量・二酸化炭素排出量に及ぼす効果をモデルを用いて評価分析した。高炉還元は「物質リサイクル」の例、それ以外は「熱リサイクル」の例として取り上げた。先ず、2節で廃棄物産業連関表の概念とモデル分析の方法を解説し、それを踏まえて3節で分析結果を報告する。

*本研究は、鹿島学術振興財団、日本経済研究奨励財団、早稲田大学特定課題研究費(98A-008)の助成を受けている。

2 廃棄物産業連関表・モデル

2.1 廃棄物循環勘定としての廃棄物産業連関表

廃棄物産業連関表の基本的な性格を解説する。そのために、 $N > 1$ 種類の産業部門と家計・政府・外国などの最終需要部門から構成される雑形経済を想定する。廃棄物のうち、自然環境に直接放出される物を「環境負荷因子」、それ以外の物を「狭義の廃棄物」と呼ぶ。化石燃料消費や埋立処分場から放出される温暖化ガスや海洋投棄される汚泥は前者の例、溶融処理される煤塵やセメント材料として使われる鉱滓は後者の例である。経済活動の圈内に残って更に人の手が加えられる物を「狭義の廃棄物」、その圈外に出されて人の手を放れる物を「環境負荷因子」とするわけである。

鉱物資源の枯渇よりも、「環境負荷因子」の蓄積が持続可能性の制約条件として指摘されている([6],p.2)。埋立処分場の運営・管理は経済圏にあるが、占有する容積という意味では環境負荷因子である。以下、廃棄物とは「狭義の廃棄物」を指す。一般に、廃棄物の種類は処理方法の種類より多いと考えられる。 M 種類の廃棄物とこれを処理するために $K < M$ 種類の廃棄物処理部門があるとする。

表 1: 廃棄物産業連関表

	産業(投入)	廃棄物処理	最終需要	行和
産業(産出)	X_o	X_z	X_f	X
廃棄物(純排出)	W_o	W_z	W_f	W
付加価値	V_o	V_z	V_f	V
環境負荷因子(排出)	E_o	E_z	E_f	E

この雑形経済における財と廃棄物の循環を産業連関表の形式で表したのが表 1 である。 X は N 部門の財生産量ベクトル、 W は M 廃棄物の純排出ベクトル、 E は環境負荷因子の排出ベクトルである。例えば、産業 i の生産量は X_i である。排出量から有効利用量を差し引いたのが純排出量である。下付文字の o, z, f は産業部門、廃棄物処理部門、最終需要部門をそれぞれ表す。 $N \times N$ の行列 X_o の i 行 j 列要素 $X_{o:ij}$ は、産業部門 j で投入される産業部門 i の産出物を表す。 $M \times N$ 行列 $W_o = \{W_{o:ij}\}$ は産業部門における廃棄物の純発生量を表す。例えば鉄鋼部門を j とし鉱滓を i とすれば、鉄鋼における鉱滓排出は $W_{o:ij} > 0$ である。セメント部門 k が高炉セメントを生産するなら $W_{o:ik} < 0$ である。家計が排出する一般廃棄物は W_f に計上される。廃棄物再資源化部門は産業部門に含まれている物とする¹。

廃棄物処理部門は、産業部門から投入した化学製品やエネルギー等を用いて、受け容れた廃棄物の形状を変換する。前者を表すのが $N \times K$ 行列 X_z 、後者を表すのが $M \times K$ 行列 W_z である。部門 j を焼却部門とし廃棄物 i を焼却灰とすると、焼却部門で発生する焼却灰は $W_{z:ij} > 0$ に計上される。焼却灰が埋立処分されるならば、それは埋立部門の環境負荷因子として E_z に計上されるが、一部がセメント部門で原料として有効利用されるならば、それは W_o にマイナス投入として計上されることになる。

表 2 は、焼却灰の処理を例にとって廃棄物産業連関表の表記法を示す。焼却処理の結果 100t の焼却灰が発生し、そのかさ密度は 1、溶融による減量率は 0.9 とする。埋立容積 (m^3) を環境負荷因子として計上する。最上段の例 1 は、焼却灰が全て埋立処分される場合である。中段の例 2 で

¹[3] では再資源化部門を産業部門と別に計上している

は、焼却灰の一部 (60t) がセメント部門で有効利用されるために埋立量が 40t に減少している。最下段の例 3 では、更に残りの焼却灰を溶融スラグ化した後に路盤材生産部門で有効利用しているので、焼却灰の埋立量はゼロとなる。表中では示していないが、焼却灰の有効利用によってセメント部門への石灰石・粘土投入や路盤材生産部門への砂利・碎石投入、及び埋立部門へのエネルギー・薬品などの投入は減少する。セメント部門や路盤材生産部門が排出する廃棄物及びその処理も、同様に表示されていない。

表 2: 廃棄物循環表記の数値例

例 1		焼却 → 埋立		
		z 焼却	z 埋立	純排出
w 焼却灰 (t)		100		100
e 埋立 (m ³)			100	100

例 2		焼却 → 埋立+焼却灰有効利用		
	o セメント	z 焼却	z 埋立	純排出
w 焼却灰 (t)	-60	100		40
e 埋立 (m ³)			40	40

例 3		焼却 → 焼却灰有効利用+溶融スラグ化+スラグ有効利用				
	o セメント	o 路盤材	z 焼却	z 溶融	z 埋立	純排出
w 焼却灰 (t)	-60		100			40
w 溶融スラグ (t)		-36		36		0
e 埋立 (m ³)					0	0

2.2 廃棄物産業連関モデル

廃棄物産業連関表（表 1）は、国民経済における財と廃棄物の循環を巡る動脈部門と静脈部門の量的相互依存関係を記述する物である。表 2 が示したように、同表は廃棄物再資源化や廃棄物処理の記述方法として高い一般性を持っている。この表の大きな特徴は W_z が正方行列でない（行と列の数が等しくない）事であるが、これは廃棄物と廃棄物処理の間に一対一の対応関係が無く、一般に前者の種類の方が後者よりもはるかに多いことに因る。廃棄物産業連関表を実現した資料についての単なる記述に留めるならば、この行部門と列部門の非対称性は特に問題ではない。しかし、同表を分析的なモデルとして用いようとする場合に、この非対称性は不都合であり、対称性を持つように変換する必要がある。

そこで、[2] に従って、廃棄物を廃棄物処理過程に対応させる $K \times M$ の配分行列 $S := [s_{ij}]$ を考える。ある廃棄物を処理する場合に、どの処理方法を用いるべきか、その配分を考えるわけである。ここで s_{ij} は、処理過程 i で処理される廃棄物 j の割合を表す。定義から $\sum_{i=1}^K s_{ij} = 1, j = 1, \dots, M$ である。 S の要素は、当該時点における技術や制度（排出基準）によってかなりの程度規定されていると考えられる。以下、廃棄物処理部門の能力が制約条件とならないとして、 S の各要素は廃棄物処理量から独立なパラメーターと仮定する。

表 3: 廃棄物産業連関表: 対称表

	産業	廃棄物処理	最終需要	行和
産業	X_o	X_z	X_j	X
廃棄物処理	SW_o	SW_z	SW_j	SW
付加価値	V_o	V_z	V_j	V
環境負荷因子	E_o	E_z	E_j	E

以上の設定の下で、表 1 の廃棄物発生行の各要素の左側から S を乗じ、これを廃棄物処理必要量に変換する事ができる。この変換を施したのが表 3 である。各部門は廃棄物を純排出するのではなく、廃棄物処理部門の用益(処理量)を純投入する事に注意せよ。

表 4: 数値例に対応した配分行列 S

例 1・2	焼却灰	例 3	焼却灰	スラグ
埋立	1	埋立	0	1
溶融	0	溶融	1	0

表 2 の数値例を用いて、 S による変換を具体的に解説する。対応する S を表 4 に示す。廃棄物処理が行要素、廃棄物が列要素として計上されている。例 1・2 では焼却灰は埋立処分されるが、例 3 では溶融処理され、処理により発生する溶融スラグは埋立処分される。 S は、再資源化の有無に関わらず、廃棄物と廃棄物処理方法を対応させる物である。この S を用いて、表 2 の廃棄物行要素を廃棄物処理に変換したのが表 5 である。例 1・2 では、焼却灰が埋立に変換されている。これに対して、例 3 では焼却灰は溶融に、溶融スラグは埋立にそれぞれ変換されている。配分行列を用いた変換を施すと、廃棄物再資源化は廃棄物の代わりにその処理量を減らすものとして計上されるのである。

表 3 の産業と廃棄物処理の各列の要素を対応する生産・活動量で除して生産・活動原単位当たりの投入・(純)排出係数表(表 6)を得る。ここで、 A は通常の産業連関分析における投入係数行列、 G は廃棄物純排出係数、 e は環境負荷因子排出係数、 v は付加価値率である。 A_o の i 行 j 列要素 a_{ij}^o は、産業 j の生産物を 1 単位生産するために投入される産業 i の生産物を与える。同様に、 G_z の k 行 l 列要素 g_{kl}^z は、廃棄物処理部門 l の 1 単位の処理活動により純排出される廃棄物 k を表す。

通常の産業連関分析にならって A , G , e は、生産・活動水準から独立の固定係数である。しかし通常の場合と異なり、廃棄物処理部門の係数はその受け容れる廃棄物組成に依存している。従ってこの組成を大きく変更させるような再資源化や排出形態の変更が行われる場合には、少なくとも廃棄物処理部門について固定係数の仮説が妥当しなくなる点に留意しなくてはならない。

上で求めた投入係数表を用いて、表 3 における生産と廃棄物処理についての恒等式(需給均等式)を以下のように行列表記することが出来る

$$\begin{pmatrix} A_o & A_z \\ SG_o & SG_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_j \\ SW_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

表 5: 配分行列を用いた変換の例

例 1		焼却 埋立			
	○セメント	z 焼却	z 埋立	純排出	
z 埋立	0	100			100

例 2		焼却 埋立 焼却灰有効利用			
	○セメント	z 焼却	z 埋立	純排出	
z 埋立	-60	100			40

例 3		焼却 焼却灰有効利用+溶融スラグ化+スラグ有効利用				
	○セメント	○路盤材	z 焼却	z 溶融	z 埋立	純排出
z 溶融	-60		100			40
z 埋立		-36		36		0

表 6: 投入係数表

	産業	廃棄物処理	最終需要	生産量・活動量
産業	A_o	A_z	X_J	X
廃棄物処理	SG_o	SG_z	SW_J	Z
付加価値	v_o	v_z	V_J	
環境負荷因子	e_o	e_z	E_J	

投入・排出係数と最終需要が所与であるとして、(1) を X と Z について解いて以下を得る²

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} I - A_o & -A_z \\ -SG_o & I - SG_z \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_f \\ SW_f \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} B_{oo} & B_{oz} \\ B_{zo} & B_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_f \\ SW_f \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

$B_{oi}, i \in \{o, z\}$ は産業連関分析でレオンチエフ逆行列として知られているが、 $B_{zi}, i \in \{o, z\}$ は廃棄物産業連関モデルに固有の物である。 B_{zz} のある要素 $b_{zz:ij}$ を考えると、これは廃棄物処理部門 j の活動に対する 1 単位の最終需要を満たすために、直接間接に必要な廃棄物処理部門 i の活動量を表す。 $B_{zi}, i \in \{o, z\}$ の各要素は、投入・排出係数で表された所与の技術・制度の基で最終需要部門の財需要 X_f と廃棄物排出 W_f で表される「ライフスタイル」を実現させるために必要な廃棄物処理量を表すものである。

こうして X と Z が求められると、それに応する環境負荷因子排出量を表 6 の係数を用いて求める事が出来る

$$E = e_o(B_{oo}X_f + B_{oz}SW_f) + e_z(B_{zo}X_f + B_{zz}SW_f) + E_f. \quad (3)$$

(3) 式は、 B, e, S で表された所与の技術・制度の下で、 X_f, W_f, E_f で表された所与のライフスタイルを実現するために必要な環境負荷因子の排出水準を表す。民主主義社会においてライフスタイルを政策的に変更する事は容易ではないが、廃棄物再資源化や廃棄物処理に関しては政策的な管理・誘導がかなりの程度可能であると考えられる。そこで、廃棄物再資源化・廃棄物処理についてシナリオを設定し、それを投入・排出・配分係数の数値として表現すれば、(3) を用いてその環境負荷効果を数量的に評価することが出来るであろう。

2.3 廃棄物産業連関表の推定

平成 2 年度産業連関表を基に、その他の文献情報・業界資料等を用いて我が国の廃棄物産業連関表を推定した。表 7 と表 8 は、推定した廃棄物産業連関表で用いた産業部門と廃棄物の分類を表す。産業連関表(基本分類表)の分類を 52 部門分類に統合し、これに破碎・焼却・埋立・溶融からなる廃棄物処理部門を加えて 60 産業部門とした。廃棄物は一般廃棄物と産業廃棄物を統合して溶融スラグを加えた 24 種類とした。廃家電や廃自動車などの粗大廃棄物については、組成に基づいて 5 種類に分類し、破碎によってプラスチック・鉄屑などの表 8 にある廃棄物に分解される物とした。廃棄物種類は表 8 の 24 種類とし、同一種類に属する物については産廃・破碎・一廃の起源に関わらずに同質と仮定した。更なる推定の詳細については [4] を参照されたい。

発熱量・灰分・かさ密度等は、焼却・埋立などの廃棄物処理の投入・排出係数を決定する基本的パラメータであるが、これは廃棄物の組成に大きく依存している。更に、焼却においては小規模なバッチ炉から大規模な発電付き全連続型炉や直接溶融炉に至るまで多種の技術が存在し、それぞれ異なる投入・排出係数を持っている。前出基本パラメータや破碎から溶融までの廃棄物処理関連部門のモデル化については、一部を除いて [7] の詳細な研究を用いた。環境負荷因子としては埋立容積と化石燃料・石灰石起源の二酸化炭素排出、及び厨芥の嫌気性分解から発生するメタンの二酸化炭素換算量を考慮した。廃棄物焼却起源の二酸化炭素排出、及び埋立容量と埋立起源のメタン排出については [7]、産業部門での二酸化炭素排出については [8] を用いた。

² 正値解の存在を巡る点については [3] を参照せよ

表 7: 産業部門分類

産業部門			
1	農業(除く畜産)	31	輸送用機械器具製造業
2	畜産農業	32	精密機械器具製造業
3	林業	33	その他の製造工業
4	漁業	34	建設業
5	その他鉱業	35	公共事業
6	窯業原料鉱物	36	電気業
7	砂利・採石	37	ガス業
8	食料品製造業	38	熱供給業
9	飲料・飼料・たばこ産業	39	水道業
10	繊維工業	40	下水道業
11	衣服・その他の繊維製品製造業	41	各種商品卸売業
12	木材・木製品製造業	42	小売業飲食店
13	家具・装飾品製造業	43	その他のサービス
14	パルプ	44	鉄道業
15	紙・板紙	45	道路輸送業
16	紙加工品製造業	46	上記以外の運輸・通信業
17	出版・印刷・同関連産業	47	公務
18	化学工業	48	学術研究機関
19	石油製品・石炭製品製造業	49	医療業
20	プラスチック製品製造業	50	自動車整備業
21	ゴム製品製造業	51	事務用品
22	なめし革・同製品・毛皮製造業	52	分類不明
23	ガラス	53	破碎:粗大繊維類
24	セメント	54	破碎:木製家具
25	その他の窯業・土石製品	55	破碎:自転車ガスレンジなど
26	鉄鋼業	56	破碎:家電
27	非鉄金属製造業	57	破碎:自動車
28	金属製品製造業	58	焼却
29	一般機械器具製造業	59	埋立
30	電気機械器具製造業	60	溶融

表 8: 廃棄物分類

	廃棄物種類	起源	
		一廃	産廃
1	厨芥	○	
2	紙類	○	○
3	繊維類	○	○
4	廃プラスチック類	○	○
5	鉄屑	○	○
6	非鉄金属屑	○	○
7	生き瓶	○	
8	ガラス屑	○	○
9	陶磁器類	○	
10	ゴム類	○	○
11	動植物性残渣(含草木)	○	○
12	煤塵		○
13	焼却灰		○
14	鉱滓		○
15	木くず		○
16	有機汚泥		○
17	無機汚泥		○
18	廃油		○
19	廃酸		○
20	廃アルカリ		○
21	建設廃材		○
22	動物のふん尿		○
23	動物の死体		○
24	溶融スラグ		

3 シナリオ設定と分析結果

3.1 焼却の現状

表9は、我が国における焼却施設の状況を示す。一般廃棄物焼却施設における全連続炉の割合は施設数では20%に過ぎないが、処理量では42%を占めている。全連続炉の内、発電付きの施設は施設数では8%だが処理量では27%を占めている。発電付き施設の平均処理量が480 t/日なのに対して、非連続型施設は36t/日にすぎない。

産業廃棄物焼却施設の平均規模は一般廃棄物よりも小さくて28 t/日に過ぎない。これは自社内処理の原則によるところが多い。しかし、こと発電付き施設に限れば処理量は507 t/日であり、一般廃棄物の場合を上回るほどの規模である。産業廃棄物焼却施設にしめる発電付き施設の割合は数では1%を占めるに過ぎないが、処理量では18%を占めている。

焼却炉に関しての我が国の特徴は、小規模焼却施設が多数存在することである。ちなみに、我が国の1炉当たりの年間(一般廃棄物)処理量が約1万6千トンであるのに対して、米国は9万1千トン、ドイツは13万トン、スイスでも5万トンである([9], p.43)。この相違は制度的要因に基づくところが多い。ちなみに、我が国では廃棄物の自区内処理が原則であり焼却を最優先するのに対して、米国やドイツでは焼却よりも発電が主体であり、火力発電所と組み合わせて廃熱ボイラの高温高圧化が行われている([9], p.32)。

ごみ発電には100 t/日以上が必要で、発電を積極的に行うには600 t/日以上が望ましいとされる([10], p.125)。一般廃棄物焼却施設の平均規模は98 t/日であるが、これを発電付き施設の平均規模で置き換えると、施設数は現在の29%に当たる667で十分である。今、仮に平均規模500t/日の発電付き施設で一般廃棄物と産業廃棄物の統合処理を行うとすると、一般廃棄物焼却施設数は73%減の636施設、産廃焼却施設数については95%減の280施設で済む事になる。

表9: 一廃と産廃の焼却施設:施設数・規模・発電

一般廃棄物 1995年		発電容量 572,390kWh		
	焼却施設数	割合	能力 t/日	割合
全連続	445	0.191	133072	0.419
内発電施設	181	0.078	86231	0.271
内発電なし全連続	264	0.114	46841	0.147
準連続	379	0.163	30438	0.096
機械化バッチ	813	0.350	20009	0.063
固定バッチ	243	0.105	1326	0.004
非全連続計	1435	0.617	51773	0.163
計	2325	1.000	317917	1.000
産業廃棄物 1993年		発電容量 178,873kWh		
	焼却施設数	割合	能力 t/日	割合
発電付き施設	50	0.010	25332	0.181
発電なし施設	5006	0.990	114780	0.819
計	5056	1.000	140112	1.000

出所 [11]

3.2 広域化の設定

小規模な非連続炉による単純焼却の代わりに、大規模な全連続型炉でごみ発電を行う廃棄物「熱リサイクル」をシナリオとして設定し、その効果を定量分析する。炉の大型化を実現するためには、廃棄物自区内処理の原則に代わって広域化処理が必要である。

表10は、焼却施設におけるごみ発電のシナリオ設定を表す。表9にある発電付き全連続・発電なし全連続・非連続処理の処理能力割合を現状シナリオA(コントロール)とする。これに対してシナリオBでは、全ての一般廃棄物を500t/日規模の発電付き全連続炉で処理する。シナリオCでは、一般廃棄物の広域化処理についての極限的仮想例である。シナリオCでは、これを更に進めて産業廃棄物をも加え、産廃・一廃を問わずに全て500t/日規模の発電付き全連続炉で処理されるとする。

廃熱利用の形態は発電のみとし、シナリオA・Bで施設規模が100t/日以下の場合には発電が行われないとした。焼却炉から発生する煤塵と焼却灰の処理に関しては、発電付き全連続炉では両方とも溶融スラグ化、発電無し炉では煤塵のみ溶融スラグ化とした。溶融エネルギーとしては電力のみを用いる。燃焼ガス冷却方式としては、全連続型ではボイラ、非連続型では水噴射によるとした。これらの設定は、何れも[7]に依拠した物である。

広域化による集中処理の結果、廃棄物の焼却炉までの輸送量は増加する。以下では、一廃広域化の場合に輸送距離が現状値の2倍、一廃・産廃統合処理の場合には4倍に増加すると仮定した。しかし、焼却炉から最終処分場への距離は何れの場合も変わらない物とした。実際の計算では、産業連関表にある廃棄物処理業(公営)の道路輸送と鉄道輸送からの投入係数を現状値とし、それを2倍・4倍してシナリオB・Cに対応させた。

表10: ごみ発電に関する現状とシナリオ設定

	施設規模 t/日	能力 t/日	能力比率	施設数
A	現状値			
発電付き全連続	483	111563	0.343	231
発電無し全連続	177	46841	0.144	264
非連続	26	166553	0.513	6441
計		324957	1.000	6936
B	一般廃棄物の広域化処理			
発電付き全連続	500	210177	0.647	420
非連続(産廃)	23	114780	0.353	5006
計		324957	1	
C	一般廃棄物と産業廃棄物の統合広域化処理			
発電付き全連続	500	324957	1	650

3.3 可燃物と不燃物の分別

ある廃棄物が可燃性を持つか否かは、化学的な問題である。これに対して、当該廃棄物が実際に焼却処理されるか否かは、この他に炉の仕様・排ガス処理基準・収集分別方法等の技術・制度・社会的要因によるところが多い。実際、プラスチックは可燃物であるが、東京都を含む全国の約3分の1の自治体では焼却されずに埋立処分されている。一方で、不燃物である金属・ガラス・陶磁器

製容器の一部が排出者及び処理者の分別不徹底によって可燃廃棄物と混合して排出・焼却されているのも事実である。同様の理由に因り、プラスチックを埋立処分している自治体でも、プラスチックの一部が焼却廃棄物として混入排出され、焼却処分されるている。この種の不完全分別処理は、家計が主たる排出者である一般廃棄物において特に顕著であると思われる。

[7]は、一般廃棄物についての S を「ごみ種間の配分率」として、複数の自治体の資料に基づいて推定している。表11の S^0 は、これに産廃の排出を加えた物である。産廃起源の廃棄物は完全分別されるとして、可燃分の有無によって焼却と埋立とに配分した。産廃としての排出が無いのは、厨芥と生き瓶及び陶磁器屑である。ただし、廃プラスチックについては文献値 [13] を直接用いた。特定管理一般廃棄物である煤塵は、溶融固化されたとした。

表 11: 配分行列 S :現状値と完全分別シナリオ

	S^0 不完全分別 (現状)			S^1 完全分別 (想定)		
	焼却	埋立	溶融固化	焼却	埋立	溶融固化
厨芥	0.900	0.100	0	1	0	0
紙類	0.931	0.069	0	1	0	0
繊維類	0.929	0.071	0	1	0	0
廃プラスチック	0.590	0.410	0	1	0	0
鉄屑	0.007	0.993	0	0	1	0
非鉄金属屑	0.003	0.997	0	0	1	0
生き瓶	0.000	1.000	0	0	1	0
ガラス屑	0.035	0.965	0	0	1	0
陶磁器類	0.095	0.905	0	0	1	0
ゴム類	0.554	0.446	0	1	0	0
動植物性残渣	0.978	0.022	0	1	0	0
煤塵	0	0	1	0	0	1
焼却灰	0	1	0	0	1	0
鉱滓	0	1	0	0	1	0
木くず	1	0	0	1	0	0
有機汚泥	0	1	0	0	1	0
無機汚泥	0	1	0	0	1	0
廃油	1	0	0	1	0	0
廃酸	1	0	0	1	0	0
廃アルカリ	1	0	0	1	0	0
建設廃材	0	1	0	0	1	0
動物のふん尿	1	0	0	1	0	0
動物の死体	1	0	0	1	0	0
溶融スラグ	0	1	0	0	1	0

汚泥は中間処理後の物を指す

出所:一廃についての推定結果 ([7] 表 3-2) に産廃を加えた

表の右半分 S^1 は、単純に可燃分の有無に基づいて焼却と埋立に配分したものである。以下では、この配分を完全分別シナリオと呼ぶ。これに対して、表の左半分で与えられる配分を不完全分別シ

ナリオと呼ぶことにする。現状の配分は不完全シナリオに対応する。表下半分を占める一廃起源を持たない廃棄物については、シナリオ間で配分の相違は無い。

S の値を変更すると、発熱量・焼却残渣量・かさ密度等の廃棄物処理における基本的パラメータが変化し、焼却・埋立の投入・排出係数が変化する。完全分別シナリオでは、プラスチックが混合焼却されるために発熱量が上昇する。現実には、これが設計量を超える場合には焼却量低下をはじめ様々な技術的問題が生じるが ([12],p.32)、本稿ではこれは適切に対処されている物として特に考慮しない。

3.4 廃プラスチックの高炉還元利用

唯一の「原料(マテリアル)リサイクル」として、廃プラスチックの高炉還元利用を考慮した。この技術は、前処理を施して粒状化した廃プラスチックを高炉に吹き込み、微粉炭の代替材として鉄鉱石の還元に利用する物である ([5])。

前処理設備が存在して不純物や PVC の混入がない廃プラスチックが十分に確保できるとすれば、この技術を用いて高炉で微粉炭を使用していた量だけの廃プラスチックを処理する事が可能であると考えられる。しかし、実際には高炉の立地により廃プラスチックの輸送問題等が生じるので、以下では年間 200 万トンが高炉還元利用されるとした。

廃プラスチックの高炉還元利用により、銑鉄・粗鋼部門の微粉炭投入が減少する。これはモデルでは、同部門の石炭・石油製品投入係数が代替分だけ減少する事で表される。更に、プラスチックと微粉炭では炭素分が異なるので、代替の結果、二酸化炭素排出原単位も変化する。表 12 は、モデルにおける高炉還元利用に関連した設定の詳細を示す。高炉還元利用のためには、廃プラスチックの前処理や輸送が必要であるが、これらに関連する投入・排出係数は考慮していない。

廃棄物処理部門で処理・処分される廃プラスチックの減少は廃棄物組成を変更し、同部門の投入・排出係数を変化させる。そこで、本シナリオの評価に際しては、[7] を用いてこの変化した組成に対応する係数を推定した。

表 12: プラスチック高炉還元利用における数値設定

		t, t-c	額 (100 万円)
A	銑鉄粗鋼生産		26,679,224
B	廃プラスチック高炉還元利用	2,000,000	
C	微粉炭投入 (廃プラスチック投入前)	34,757,847	697,169
D	微粉炭代替 = B	2,000,000	40,116
E	石炭・石油製品投入係数 (代替前)		0.03814
F	石炭・石油製品投入係数 (代替後) = E - D/A		0.03664
G	廃プラスチック投入係数 = B/A		0.07496
H	プラスチック炭素分 t-c/t	0.72880	
I	微粉炭炭素分 t-c/t	0.88560	
J	CO ₂ 純減 (t-c) = (I-H) × B	-313600	
K	CO ₂ 純減 (原単位) = J/A	-0.01175	

出所：産業連関表(投入产出)、[7](炭素分)

3.5 結果

主な計算結果を基準値に対しての変化率として表したのが、表13である。上段は広域化と分別処理に関わる結果を示し、中段はこれに廃プラスチックの高炉還元利用を追加した結果を示す。最下段は、上段と中段の結果を加工した物である。

3.5.1 広域化

先ず、上段の広域化の結果から見ることにする。粗付加価値発生合計額は産業部門の生産活動水準を表すが、現状処理・完全分別シナリオ A1(0.01%の微増)を除く全てのシナリオにおいて、その合計は -0.02% から -0.05% の幅を持って微減する。これは、ごみ発電による電力業の生産減少から生じる負の生産誘発効果に因ると考えられる。広域化に伴う廃棄物輸送量の増加は正の生産誘発効果を持つが、それはこの負の生産誘発効果を相殺するほどは強く無い。ちなみに、統合広域処理・不完全分別シナリオ (C0) では輸送距離の増加を反映して、道路輸送が 0.53% 増加し、石油・石炭製品の生産も 0.02% 増加するが、総合効果においては粗付加価値は 0.04% 減少するのである³。

生産活動が減少するから、二酸化炭素排出量や廃棄物埋立量が減少するのは当然である。しかし、広域化の結果で注目すべきは、後者の減少率が生産の減少率を大きく上回っていることである。表13の最下段は、この「生産活動変化を差し引いた純効果」を二酸化炭素と埋立について示す。不完全分別シナリオ (B0,C0) では、二酸化炭素純減 (-.17%, -.33%) が埋立純減 (-.08%, -.19%) を上回っているが、完全分別シナリオ (B1,C1) では後述する理由で逆に後者 (-5.8%, -5.9%) が前者 (-.05%, -.32%) を遙かに上回っている。

すなわち、広域化の結果として、発生付加価値単位当たりの二酸化炭素排出量及び埋立量が純減するのである。二酸化炭素排出が純減するのは、単純焼却されていた廃棄物がごみ発電に利用され、その分電力業の化石燃料消費が減少するのが主な理由である。埋立量が純減するのは、電力業からの煤塵と焼却灰の排出が減少するのと、全連続焼却炉が焼却灰を溶融スラグ化して減量化するためである。

3.5.2 完全分別

可燃廃棄物と不燃廃棄物を完全分別すると、焼却処理される廃棄物の灰分が低下して、単位重量当たりの発熱量が上昇する。その一方で、埋立処分される廃棄物のかさ密度 (容積当たり重量) が増加する。その結果、現状焼却での分別導入 (A1) によって焼却量は約 10% 増加するが、焼却灰、埋立量、埋立容積はそれぞれ 0.9%、5.7%、13% 減少する。焼却量が増加する上に、ごみ単位当たりの発熱量も上昇するので、一廃広域化の場合 (B1) でも、不完全分別状態での一廃・産廃統合広域化 (C0) にほぼ等しい電力業生産減少効果 (ごみ発電量) が得られる。焼却廃棄物の灰分低下に加えて、電力業から発生する煤塵・焼却灰の減少が、全体的な埋立量を不完全分別シナリオに比べて更に減少させるのである。又、プラスチックはかさ密度が小さいので、これを焼却に廻すことが埋立容積を減少させる。

現状焼却施設のもとでの完全分別 (A1) は、粗付加価値と二酸化炭素排出量の両方が増加する唯一のシナリオである。これは焼却量が増えるために炉の管理・運転に関する需要が増加する一方で、ごみ発電を積極的に行わないため、熱エネルギーが有効利用 (化石燃料を代替) されないため

³発生付加価値が減少すれば、最終需要規模も減少するはずであるが、産業連関モデルの性格から、この点は考慮していない

表 13: シナリオ分析の結果 (対基準値変化率)

シナリオ	A0 (基準値)	B0	C0	A1	B1	C1
広域化 (1) 分別	×	○	◎	×	○	◎
高炉還元 (2)	×	×	×	×	×	×
粗付加価値	1.00	-0.0003	-0.0004	0.0001	-0.0002	-0.0005
石油・石炭製品	1.00	-0.0002	0.0002	-0.0002	-0.0007	-0.0004
電気業	1.00	-0.0066	-0.0142	-0.0032	-0.0132	-0.0246
道路輸送業	1.00	0.0011	0.0053	0.0000	0.0012	0.0058
CO ₂ (3)	1.00	-0.0019	-0.0037	0.0023	-0.0007	-0.0036
焼却量	1.00	-0.0000	0.0000	0.1021	0.1021	0.1021
埋立量	1.00	-0.0011	-0.0023	-0.0570	-0.0583	-0.0597
埋立容積	1.00	-0.0011	-0.0023	-0.1328	-0.1340	-0.1353
焼却灰	1.00	-0.1818	-0.3931	-0.0090	-0.1876	-0.3952
溶融スラグ	1.00	0.1110	0.2401	0.0417	0.1486	0.2732
シナリオ	A0P	B0P	C0P	A1P	B1P	C1P
広域化 (1) 分別	×	○	◎	×	○	◎
高炉還元 (2)	○	○	○	○	○	○
粗付加価値	-0.0032	-0.0035	-0.0036	-0.0031	-0.0034	-0.0036
石油・石炭製品	-0.0033	-0.0034	-0.0030	-0.0033	-0.0035	-0.0030
電気業	-0.0003	-0.0063	-0.0132	-0.0008	-0.0080	-0.0162
道路輸送業	-0.0001	0.0010	0.0051	-0.0000	0.0011	0.0056
CO ₂ (3)	-0.0021	-0.0038	-0.0054	0.0005	-0.0016	-0.0035
焼却量	-0.0237	-0.0237	-0.0237	0.0620	0.0619	0.0620
埋立量	-0.0109	-0.0119	-0.0131	-0.0593	-0.0604	-0.0616
埋立容積	-0.0109	-0.0119	-0.0131	-0.1349	-0.1359	-0.1370
焼却灰	-0.0102	-0.1872	-0.3930	-0.0256	-0.1958	-0.3935
溶融スラグ	-0.0218	0.0864	0.2125	0.0061	0.1094	0.2296
粗付加価値変化を差し引いた純効果						
シナリオ	B0	C0	A1	B1	C1	
CO ₂ (3)		-0.0017	-0.0033	0.0021	-0.0005	-0.0032
埋立量		-0.0008	-0.0019	-0.0571	-0.0580	-0.0592
埋立容積		-0.0008	-0.0019	-0.1329	-0.1337	-0.1348
シナリオ	A0P	B0P	C0P	A1P	B1P	C1P
CO ₂ (3)	0.0012	-0.0004	-0.0018	0.0037	0.0018	0.0001
埋立量	-0.0077	-0.0085	-0.0095	-0.0562	-0.0570	-0.0580
埋立容積	-0.0077	-0.0085	-0.0095	-0.1318	-0.1325	-0.1334

(1) : ○ 一廃広域化処理、◎ 一廃産廃統合広域化処理

(2) : ○ 廃プラスチック高炉還元利用 200 万トン/年

(3) : メタン換算値を含む

である。

3.5.3 プラスチック高炉還元利用

最後に、廃プラスチック高炉還元利用(200万トン/年)の効果(末尾にPを付したシナリオ)に転じる。広域化や分別に関わらず粗付加価値は0.3%減少する。これはこれまで検討したシナリオに比べて一桁大きな効果である⁴。この生産活動減少には、プラスチックによる石油・石炭製品の直接的な代替が大きく寄与していると考えられる。これに対して、ごみ発電を通じる石油・石炭製品の代替経路は、発電部門を経由するので間接的である。

高炉還元利用は、不完全分別シナリオにおいて焼却と埋立を減少させる効果を持つが、これは単純焼却・埋立されていたプラスチックの一部が還元剤として有効利用されるためである。これに対して、統合広域・完全分別シナリオ(C1)ではプラスチックは既に全て発電に利用されているので、高炉還元利用の効果はあるとしても限界的なものに過ぎない。

一廃広域・不完全分別に高炉還元を加えたとき(B0P)に、二酸化炭素が最も減少する(-0.38%)。しかし、ごみ発電でプラスチックが既に「完全有効利用」されている場合(C1)には、それを一部高炉還元に振り向けても二酸化炭素は減少しない。石炭と比してプラスチックの方が焼却によって発生する二酸化炭素は少ないが、発電に利用されている場合にも石炭の代替をしているから、その二酸化炭素削減効果に差はないのである。

表最下段の経済活動水準の変化を差し引いた純効果で見ると、他のシナリオと比べて、高炉還元利用は二酸化炭素純減には効果がないことがわかる。不完全分別の場合には相対的に埋立を純減させる効果を持つが、完全分別の場合には他のシナリオと比べて特筆すべき効果が無い。高炉還元の効果は、経済活動単位当たりで見ると量で見た場合よりも限定的である。

3.5.4 分析結果のまとめ

本稿で考慮した環境負荷因子は埋立容積と二酸化炭素である。埋立容積を最小にするシナリオはC1P、二酸化炭素を最小にするそれはC0Pである。どの環境負荷因子を重視するかに依存して、最適なシナリオは異なるのである。しかし、C1PとC0Pの間の二酸化炭素減少率の相違が1.5倍なのに対して、埋立減少率の差は10倍以上であることから、総合的にはC1Pが望ましいと考えられよう。もっとも、生産される付加価値単位当たりの環境負荷因子最小化と言う観点からすれば、プラスチック高炉還元無しのC1の方が望ましいことになる。

然るに、実行可能性の観点からすると、一廃と産廃の統合処理は制度的・歴史的背景からかなり難しそうである。従って、実現可能なシナリオABの中から選ぶとすれば、C1Pに準じた埋立減少率を持つ一廃広域化・完全分別・高炉還元利用(B1P)が望ましいと言うことになろう。B1Pでは、現状よりも溶融スラグが10%ほど増加する。この溶融スラグを建設資材として安定的に有効再利用出来るならば、埋立処分量の更なる削減を計ると共に、河川等における天然系砂利碎石の採取を減少させることで環境負荷を軽減することが出来るであろう。

⁴しかし、この計算では廃プラスチック受け容れに伴う高炉メーカーでの付加価値率上昇を考慮していないので、過大推定の可能性が否定できない。

4 今後の課題

本稿のモデルでは、廃棄物排出と生産・消費活動水準の間に単純な線形関係を仮定した。この設定は産業廃棄物、厨芥、容器包装廃棄物等の発生については有効であるが、粗大ごみや建築廃材等の如く、数年間の使用を経て耐久財が廃棄物化する事による廃棄物発生を記述するには適当でない。又、廃棄物に関しては物質収支を考慮しているが、財については価額のみを用いており、財と廃棄物の間の物質収支は把握していない。耐久財の廃棄物化過程を扱うには、この点についても表形式とモデルの拡張が必要であろう。

本稿では専ら数量モデルを扱った。単位生産費用が単純に価格に転嫁されると前提すれば、数量モデルに対応する物として価格モデルを導くことが出来る。しかし、一般廃棄物の処理・処分が自治体予算で賄われている事に如実に表されているように、廃棄物処理に関しては費用が製品価格に全て転嫁されると言った単純化は出来ない。ちなみに、(2)における逆行列係数 B_{z_i} は各部門において必要な処理部門の活動量を表してはいるが、これは必ずしも分担する処理費用を表すものではない。これが実際に分担する処理費用に対応するのは、排出者が処理費用を全て分担する場合のみである。実証分析に耐え得る価格モデルを導くためには、「容器包装リサイクル法」や「家電循環再利用法」等に代表される処理費用分担制度を廃棄物産業連関表に反映して行く事が必要である。

数値資料としての廃棄物産業連関表の精度向上と共に、これらの諸点は今後の研究課題である。

参考文献

- [1] Jackson, Tim : Material Concerns, Routledge, London (1996).
- [2] 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).
- [3] 中村慎一郎：廃棄物循環の線形経済モデル、三田学会雑誌(慶應大学経済学会)92巻2号(1999).
- [4] 中村慎一郎：廃棄物産業連関表:全国表の推定について、早稲田大学現代政治経済研究所 WP9903 (1999).
- [5] 根本謙一、家元勲、関根真也: 廃プラスチック高炉原料化リサイクルシステム、環境技術 26巻 第12号(1997).
- [6] Ayres, Robert U. and Laslie W. Ayres : Industrial Ecology, Edward Elgar, Cheltenham (1996).
- [7] 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：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、文部省科学研究費報告書(1998).
- [8] 近藤美則、森口裕一: 産業連関表による二酸化炭素排出原単位、地球環境研究センター、国立環境研究所(1997).
- [9] 石川禎昭: ごみ処理の最先端プラント技術と灰溶融、日報(1997).
- [10] 石川禎昭: これからの廃棄物処理と地球環境、中央法規(1992).

- [11] (社)日本機械工業連合会(社)日本産業機械連合会:環境ビジネスのエンジニアリング化基礎調査-廃棄物処理システムの高度化に関する調査研究(1996).
- [12] プラスチックごみ最適処理技術研究会:プラスチックごみの原料化とリサイクル、日報(1995).
- [13] (社)プラスチック処理促進協会:プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況(1993).