

# 廃棄物循環の線形経済モデル

中村慎一郎

1998年11月

No. 9802

中村慎一郎：早稲田大学政治経済学部 教授

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

<http://faculty.web.waseda.ac.jp/nakashin/>

初版 1998年9月

改訂 1998年11月

環境経済政策学会 1998年大会 (慶應大学 1998年9月26/27日)

報告論文

# 廃棄物循環の線形経済モデル

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

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

1998年10月

## 1 序

鉱物性資源枯渋よりも火急な持続可能性の制約条件として、人間活動による過大な環境負荷に伴う再生可能資源の希少化が問題視されてきている (Ayers (1996))。とりわけ、産業及び消費活動に伴う廃棄物の環境への過度の放出が環境負荷の最たる原因である。一般に、消費における家計の生産活動を含む、あらゆる生産活動において、残滓、排ガス、排水等の廃棄物が発生する。これはいわゆるリサイクル過程(廃棄物の再資源化過程)にも当てはまるから、Georgescu-Roegen(1979)が指摘した如く、廃棄物の完全な再資源化は不可能である。すなわち、リサイクルにより廃棄物を消滅することは出来ない。同様に、廃棄物中間処理/最終処分過程は、廃棄物の形状を変えているに過ぎない。

開墾、都市化、あらゆる土木工事は、表土の除去/移動を伴うので、その部分に存在する生態系を直接破壊することになるであろう。開発行為に伴う”総物質需要(TMR)”(Adriaanse et al. 1997)も廃棄物に含めるならば、経済行為による全ての環境負荷は、廃棄物発生によるとみなす事も可能である。

経済学的立場から、生産と消費に伴う廃棄物の発生/循環再利用/中間処理/最終処分、およびその”動脈部門”との連関を量的に把握することは、持続可能性の議論に資するところが多いと考える。また、”エコロジー神話”(植田敦 1998)に惑わされることなく、総合的な LCA の見地から、廃棄物処理方法の有効性を評価するためにも、かかる試みは重要である。

国民所得勘定に対応する、産業連関表形式の廃棄物循環勘定を提唱する。この勘定から一次近似として線形モデルを導き、その応用可能性を検討する。提唱した廃棄物循環勘定が、実際に作成可能な物であることを示すために、F市の公表データからこれを作製し、線形モデルによる分析を行った。

Nakamura(1998)は、廃棄物が所与のストックとして与えられた場合について再資源化/処理を考慮した線形モデルを示したが、本稿はこれを一般化して廃棄物発生を考慮しようとする物である。

廃棄物再資源化を理論モデルで扱う場合に重要なのが、Georgescu-Roegen (1979)が主張した、”資源散逸条件”である。鷲田豊明 (1992)は、線形モデルについて資源散逸条件を制約条件として導

\*データ収集や現地見学でご協力いただいた F 市職員の方々、有益な示唆を頂いた大平純彦氏(静岡県立大学)、鷲田豊明氏(神戸大学)、有吉範敏氏(熊本大学)及び神戸環境フォーラム(鷲田豊明氏主催 98 年 9 月 12 日) 参加者の方々に感謝する。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の助成を受けている。

いた。本稿でも線形モデルを扱うので、鷲田(1992)の結果は重用である。2節で、単純な4部門の場合について、”資源散逸条件”的持つ含意を検討する。特に、鷲田の設定と異なる設定の下で、この条件の持つ含意を導くことを試みる。この4部門モデルを拡張する形で、多部門モデルの場合の勘定体系を展開したのが3節である。4節では、以上の理論的な展開を実証的に裏付けるために、自治体(F市)の廃棄物データと地域産業連関表を用いた応用分析を行った。本稿の議論は数量モデルに終始し、双対としてあるべき価格モデルへの言及がない。5節は、価格(価額)モデルを巡る今後の課題を展望して本稿を結ぶ。

## 2 線形生産モデルにおける資源散逸条件

廃棄物循環を考える場合に無視できない条件が、Georgescu Roegenの指摘した資源散逸条件である。”いかなる物質も完全な循環再利用は不可能である”という資源散逸条件は、彼の提唱したいわゆる”熱力学の第4法則”から導かれる。もっとも、この”第4法則”は誤謬を含み、少なくとも地球単位では成立しないことが知られている(Cleveland and Ruth(1997))。従って、資源散逸条件を物理法則と見なすことは出来ない。しかしこの事は、現実においてきわめて多くの資源が散逸している事実の重要性を何ら減じるものではない。

鷲田豊明(1992)は、廃棄物循環再利用のモデルにおける資源散逸条件の重要性を指摘し、線形生産モデルについてその含意を導いた先駆的研究である。そこで以下では、鷲田に沿って単純な4部門線形モデルについて資源散逸条件の含意を検討する。

鷲田と異なり、以下の議論では消費財と工業財部門を区別しない。産業(o), 天然資源(N), 再生資源(r), 廃棄処理(w), の4部門からなる単純な経済モデルを考える。産業部門/最終需要の活動により廃棄物が発生する。廃棄物の一部は再資源化部門で再資源化されて、産業/最終需要部門で需要されるが、残りの部分は廃棄処理部門で廃棄物として(最終的には埋め立て等により)処分される。

### 2.1 廃棄物発生

廃棄物発生因は、概ね次の3要素に分類できよう(排他的な分類ではない):

1. 結合生産(家計の生産活動を含む)
2. 非耐久的投入財
3. 耐久財の減耗/廃棄.

結合生産は明らかに生産/消費活動に比例するが、非耐久的投入財も投入水準が生産/消費活動に比例する限りにおいて、やはり生産/消費水準に比例すると仮定できよう。両者は共に経常的にフローとして発生する。耐久財の減耗は、定常的な状態においては、耐久財存在量の一定割合とみなす事が出来よう(例えば、オランダにおける毎年の廃車数は、登録車量の約1割である(Environmental Statisitcs of the Netherlands, 1993, p.58)。この場合、耐久財起源の廃棄物ははストックに依存して発生する。以下では、部門別廃棄物排出量を、その部門の活動水準と耐久財存在量の線形関数で近似する。

廃棄処理量  $x_w$  は、廃棄物発生量から再資源化される分を引いた残余である:

$$x_w = \sum_j w_j - a_{wr} x_r = g_o x_o + g_f f - a_{wr} x_r \quad (1)$$

ここで  $x_o, x_r$  は、それぞれ産業部門と再資源化部門の生産量、 $f$  は産業部門の生産物に対する最終需要、 $a_{wr}$  は、再資源化財 1 単位の生産に必要な廃棄物投入量である。又:

$$g_i = g_i^*, (i = o, r), \quad g_f = g_f^* + \sum_{j \in o, r, f} g_j^{**}.$$

$j$  部門の活動水準を  $x_j$ 、耐久財存在量を  $K_j$ 、廃棄物発生量を  $w_j$ 、として

$$w_j = g_j^* x_j + g_j^{**} K_j, \quad (2)$$

ここで  $g^*, g^{**}$  は、それぞれ活動水準 1 単位、耐久財存在量 1 単位当たりに発生する廃棄物の量を表すパラメーターである。

## 2.2 鷲田モデル

廃棄物循環再利用の分析においては、再生資源と処女天然資源との間の代替可能性の程度が極めて重要な役割を演じる。鷲田は、生産/消費過程で資源散逸が生じるために、仮に両者が完全に代替的であったとしても、定常経済の維持のために天然資源の投入が不斷に必要であるための条件を導いた。

この節では、鷲田に倣って廃棄物から得られる再生資源と処女天然資源が完全に代替的な場合を考察する。廃棄物を潜在的な資源として考えるならば、そこから得られる再生資源の量をもってその量を計測するのが適当であろう。実際、これが鷲田豊明 (1992) の用いた方法である。しかし、今日社会的問題となっている廃棄物処理の観点からするならば、再生資源の量ではなくて、再生不可能な部分をも加えたその総量で計測する方が適切かもしれない。以下では、先ず鷲田豊明の方法を踏襲してモデルを開拓し、その後で総量による計測を考えた場合を考察する。

産業、天然/再生資源、廃棄物の需要と供給を以下の不等式体系で表す。

$$x_o \geq a_{oo}x_o + a_{or}x_r + f \quad (3)$$

$$x_N + x_r \geq a_{ro}x_o \quad (4)$$

$$g_o x_o + g_f f \geq a_{wr} x_r \quad (5)$$

ここで  $a_{oo}, a_{or}, a_{wr}, a_{ro}, g_o, g_f$  は正のパラメーター。以下、 $f = 1$  と基準化する。 $x_N \geq 0$  として (3) と (4) から  $x_o, x_r$  の非負条件を求める

$$1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro} > 0. \quad (6)$$

この条件は、鷲田 (1992) の (7) 式に対応し、再資源化部門が稼動する場合の純生産条件を与える。同じように、(4), (5) から  $x_o, x_r$  の非負条件を求める

$$a_{wr}a_{ro} > g_o > 0. \quad (7)$$

この条件は鷲田の (8) 式に対応し、産業部門と再資源化部門の間の資源循環過程を通して資源の完全な循環再利用が行われていない事を意味する。(6), (7) は、次の条件に集約する事が出来る。

$$(1 - a_{oo})a_{wr} > a_{or}a_{ro}a_{wr} > g_o a_{or}. \quad (8)$$

(3), (4), (5)において等号が成り立つ場合(これは  $x_N \rightarrow \min$  に対応)について、解が存在するとしてこれを求める:

$$x_o = \frac{a_{wr} + a_{or}g_f}{(1 - a_{oo})a_{wr} - a_{or}g_o}, \quad (9)$$

$$x_r = \frac{(1 - a_{oo})g_f + g_o}{(1 - a_{oo})a_{wr} - a_{or}g_o}, \quad (10)$$

$$x_N = \frac{a_{ro}a_{wr} - g_o - (1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro})g_f}{(1 - a_{oo})a_{wr} - a_{or}g_o}. \quad (11)$$

(8) から  $x_o, x_r$  は正値をとる。一方、 $x_N$  の正値条件(資源散逸条件)は(8)と(11)から

$$a_{wr}a_{ro} - g_o - (1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro})g_f > 0. \quad (12)$$

この条件は、鷲田の(10)式に対応する。これは「1単位の工業製品の生産に間接的に必要な廃棄物量が、その生産によって生み出される廃棄物量よりも大きくなければならない事をあらわしているのである。すなわち、いいかえれば工業部門と再資源化部門の間の資源の循環過程を通して資源の完全な再資源化が行われていない事を意味している」(鷲田 1992 p.108)。廃棄物を再資源化して得られる資源量は、生産量維持のための必要資源量を下回るわけだから、天然資源の投入が不可欠となるのである。

(12) の下では、再資源化可能な廃棄物は、それを全て循環再利用に用いることによりゼロにする事が可能である。ちなみに、 $x_N \rightarrow \min$  の場合について(9), (10)から再資源化可能な廃棄物量を求めると

$$\begin{aligned} x_w &= g_o x_o + g_f - a_{wr} x_r \\ &= g_f - \frac{a_{wr}(-g_f + a_{oo}g_f - g_o) + (a_{wr} + a_{or}g_f)g_o}{a_{wr}(a_{oo} - 1) + a_{or}g_o} \\ &= g_f - g_f \frac{a_{wr}(a_{oo} - 1) + a_{or}g_o}{a_{wr}(a_{oo} - 1) + a_{or}g_o} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

しかし、これはあくまでも再資源化可能な廃棄物について言える事で、それ以外の分も含めた廃棄物がゼロとなる事を意味する物ではない。廃棄物の中には、さまざまな理由により再資源化されない物がある。特に、分子組成の劣化、分別再生技術上の問題から、技術的に再資源化不可能な部分が存在する(この点に関しての具体的な例については、Ayers (1996, p.250) を参照せよ)。再資源化されない廃棄物は必然的に(仮にそれが単に環境に放出されると言う形を取るにせよ)廃棄処理されるので、資源散逸とは廃棄処理される廃棄物量が正値をとる事と同義である。

### 2.3 鷲田モデルと廃棄物処理

上の議論においては廃棄物を、含まれる再資源化可能な資源量で計測した。しかし、一般に廃棄物処理において問題となるのは、その含有資源量よりは総量である事が多いと思われる。そこで、以下では廃棄物をその含有資源によってではなく、総量で計測する。上の議論との関連を明確にするために、ある種類の廃棄物について  $\theta$  を、それが廃棄物化したときに技術的に可能な再資源化率の上限をあらわすパラメーターとする。“完全な循環再利用は不可能である”とするならば  $\theta \in [0, 1]$  である。この時(5)は、次式で置き換えられる

$$g_o x_o + g_f f > \theta(g_o x_o + g_f f) \geq a_{wr} x_r. \quad (14)$$

前節と同様に解を求める (  $f = 1$  を想起せよ )

$$x_o = \frac{a_{wr} + a_{or}g_f\theta}{(1 - a_{oo})a_{wr} - \theta g_o a_{or}}, \quad (15)$$

$$x_r = \frac{((1 - a_{oo})g_f + g_o)\theta}{(1 - a_{oo})a_{wr} - \theta g_o a_{or}}, \quad (16)$$

$$x_N = \frac{a_{ro}a_{wr} - (g_o + (1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro})g_f)\theta}{(1 - a_{oo})a_{wr} - \theta g_o a_{or}}. \quad (17)$$

$x_o, x_r > 0$  の条件 (8) は,

$$(1 - a_{oo})a_{wr} > a_{or}a_{ro}a_{wr} > \theta g_o a_{or}, \quad (18)$$

資源散逸条件 (12) は,

$$a_{wr}a_{ro} - (g_o + (1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro})g_f)\theta > 0, \quad (19)$$

になる。また、廃棄物処理量を求める  $x_N \rightarrow \min$  の場合にも、これは正値をとる。

$$\begin{aligned} x_w &= g_o x_o + g_f - a_{wr} x_r \\ &= a_{wr} \frac{(1 - a_{oo})g_f + g_o - \theta((1 - a_{oo})g_f + g_o)}{(1 - a_{oo})a_{wr} - \theta g_o a_{or}} \\ &= (1 - \theta)a_{wr} \frac{(1 - a_{oo})g_f + g_o}{(1 - a_{oo})a_{wr} - \theta g_o a_{or}} > 0. \end{aligned} \quad (20)$$

再資源化率の技術的上限を表すパラメーター  $\theta$  を導入する事により、完全な循環再利用が不可能であるとき、すなわち (19) が成立して資源散逸が生じているとき、廃棄処理量も正値をとる事 ((20)) が示された。

## 2.4 完全補完モデルにおける資源散逸

前節では、天然資源と再生資源が完全に代替的な場合を考察した。以下では、一方の極値であるところの完全補完の場合を考察する。具体的な例としては、製紙やアルミ製品で見られるように再生財混合率に上限がある場合を考えればよいだろう。

上の議論を引き継ぎ、廃棄物は再資源化不可能な部分も含んだ総量で計測する。(3),(4),(5) に対応する線形モデルは、等号が成立する場合に以下で与えられる:

$$x_o = a_{oo}x_o + a_{or}x_r + a_{ow}x_w + 1 \quad (21)$$

$$x_r = a_{ro}x_o \quad (22)$$

$$x_N = a_{N_o}x_o \quad (23)$$

$$x_w = g_o x_o + g_f - a_{wr} x_r. \quad (24)$$

このモデルは  $x_N$  の式を独立して扱っている他は (3), (4), (5) の特殊例とみなせるので、正値条件 (6),(7) が当てはまる。 $x_r, x_N$  を消去して  $x_o, x_w$  について解くと

$$x_o = \frac{1 + a_{ow}g_f}{1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro} + a_{ow}(a_{wr}a_{ro} - g_o)} \quad (25)$$

$$x_w = \frac{(1 - a_{oo} - a_{ro}a_{or})g_f + g_o - a_{wr}a_{ro}}{1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro} + a_{ow}(a_{wr}a_{ro} - g_o)} \quad (26)$$

(25) で分子は正だから、 $x_o > 0$  の条件は

$$1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro} + a_{ow}(a_{wr}a_{ro} - g_o) > 0. \quad (27)$$

(6),(7) から、この条件は常に成立する。これは廃棄物処理と再資源化を考慮に入れた場合の産業部門における純生産条件であり、2.2 節において得た正値条件(8)に対応する物である。後者を書き換えると：

$$1 - a_{oo} - a_{ro}a_{or} - g_o \frac{a_{or}}{a_{wr}} > 0. \quad (28)$$

ここで  $a_{or}/a_{wr}$  は、1 単位の廃棄物を再資源化するために必要な産業生産物の量を表す。前節のモデルにおいて廃棄物は全て再資源化可能だから、 $x_N \rightarrow \min$  のとき、再資源化は唯一の廃棄物処理方法でもある。この意味において  $a_{or}/a_{wr}$  は 1 単位の廃棄物を処理するために必要な産業生産物の量、すなわち(27)における  $a_{ow}$  に対応するものとみなす事が出来る。

(27) が(8)と根本的に異なるのは  $a_{ow}a_{wr}a_{ro}$  の項であり、これは廃棄処理部門の存在による。この項は、廃棄物を廃棄処理する代わりに再資源化することによって、廃棄処理部門において節約される産業生産物の投入量を表す。

次にこのモデルにおける資源散逸条件  $x_w > 0$  を検討する。(26) から：

$$(1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro})g_f - (a_{wr}a_{ro} - g_o) > 0 \quad (29)$$

(7) から、2 番目の () 内の項は正値をとる。従って、次の条件が成立しなくてはならない

$$(1 - a_{oo} - a_{or}a_{ro})g_f > a_{wr}a_{ro} - g_o > 0. \quad (30)$$

これは、(12) と符号条件が逆であり、1 単位の工業製品の生産に間接的に必要な廃棄物量が、その生産によって生み出される廃棄物量よりも小さくなければならない事をあらわす。すなわち、再資源化を行なっても廃棄物は純で発生し、従って廃棄処理部門が稼動しなくてはならないのである。モデルの設定が異なっているので、符号条件の逆転は理論的非整合性を示す物ではない。

### 3 多部門モデルへの拡張

#### 3.1 物量表

天然資源探掘/採取を含む  $N$  種類の財/サービス生産部門から成る産業部門 ( $o$ )、 $L$  種類の再資源化財生産部門 ( $r$ )、解体/破碎/選別/焼却/埋め立て等から成る  $K$  種類の廃棄物処理部門 ( $z$ ) と最終需要部門 ( $f$ ) から成る経済を考える。 $o, r, z, f$  の活動により  $M$  種類の廃棄物 ( $w$ ) が発生する。ここで廃棄物とは、再資源化、再利用、中間処理/最終処分の対象となり、そのままの形態では環境に放出されない物を指す。これに対して、直接環境に放出される物を環境負荷因子 ( $e$ ) と呼ぶ。環境に放出される排ガス/廃液/排水/処理残滓などが環境負荷因子の例である。廃棄物/環境負荷因子の量は発生量で計測する。

廃棄物が 1 種類の場合には、廃棄物とその処理部門は 1 対 1 対応している。しかし、廃棄物が複数存在する場合には、廃棄物  $w$  とその処理部門  $z$  を区別する必要がある。表 1 は、廃棄物が 1 種類の場合に準じて廃棄物発生を行に、廃棄物処理を列に各計上し、更に環境負荷因子発生行を加えた、財/サービス、廃棄物と環境負荷因子の連関表である。

$W_{wo}$  は  $M \times N$  の行列で、その  $i, j$  要素は  $j$  産業で純排出される  $i$  廃棄物の量をあらわす(同一事業所内での循環再利用を差し引いているので純排出となっている)。 $M \times L$  の行列  $W_{wr}$  についても、その各要素の意味は“産業”を“再資源化部門”で置き換えれば同様である。

$M \times K$  の行列  $W_{wz}$  は、廃棄物処理部門における廃棄物の流れをあらわすものである。処理部門は「中間処理」と「最終処分」に大別される。前者は、廃棄物を減量化する目的で、焼却した

	産業	資源再生	廃棄物処理	最終需要	行和
産業 ( $o$ )	$X_{oo}$	$X_{or}$	$X_{oz}$	$X_{of}$	$X_o$
再生資源 ( $r$ )	$X_{ro}$	$X_{rr}$	$X_{rz}$	$X_{rf}$	$X_r$
廃棄物発生 ( $w$ )	$W_{wo}$	$W_{wr} - X_{wr}$	$W_{wz}$	$W_{wf}$	$W_w$
本源的投入 ( $v$ )	$X_{vo}$	$X_{vr}$	$X_{vz}$		$X_v$
環境負荷因子 ( $e$ )	$W_{eo}$	$W_{er}$	$W_{ez}$	$W_{ef}$	$W_e$

表 1: 財/サービスと廃棄物の産業連関

り、また再利用のために解体/破碎/選別などの処理を施す過程を指す。「最終処分」とは、埋め立て、海洋投棄などにより、廃棄物を生活環境の外に排出する行為を指し、「処理」操作と区別して使われる<sup>1</sup>。我々の勘定体型は、廃棄物処理は廃棄物の形状/組成変換過程に他ならない、という事実を率直に反映したものである。

具体例として、家計が排出した可燃ゴミが、清掃工場で焼却(中間処理)され、その残滓が「安定型」処分施設で埋めたて処分(最終処分)される場合を考える。まず、自治体などによって収集される家計の可燃ゴミは  $W_{wf}$  に計上される。焼却部門はこれを焼却残滓に変換し、それが  $W_{wz}$  に計上される。もし、埋め立て処分場が管理型で、排水などの処理を要する廃棄物を発生するならば、それは  $W_{wz}$  に計上される。焼却、埋立によって発生し、そのまま大気中に放出される二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )、メタン( $\text{CH}_4$ )、亜酸化窒素( $\text{NO}_2$ )等は  $W_{ez}$  に計上される。又、家計による廃棄物の不法投棄は、我々の定義によれば環境負荷因子なので  $W_{ef}$  に計上される。

焼却部門の活動量は焼却したゴミの量、埋めたて部門の活動量は埋めたてた焼却残滓の量である。中間処理部門は廃棄物の形状を変化させるが、処理後の廃棄物は、その产出としてではなく、中間処理部門の廃棄物として計上する。これに対して、廃棄物処理部門が処理した廃棄物の量を、その活動量(生産量)として計上する。

いわゆる環境勘定の一つとして見るならば、上の勘定形式は廃棄物/環境負荷因子を物量表示している点で、オランダ統計局の NAMEA (Haan and Keuning 1996) と同じ形式であり、そのひとつと見なすことができる。廃棄物発生 × 部門の行列は、各部門の生産活動において如何なる廃棄物の発生が必要かを表すから、SNA における make matrix に対応する物である。Green GDP 等の議論に比較して、本勘定体系は環境負荷の価値評価を含まない単純な物かもしれない。しかし、敢えて価値評価の問題を避けて物量に徹している故に頑健であること、更に、次節で見るよう公表資料から比較的容易に作成可能であること、は有利な点として挙げられよう。

表 1 は、廃棄物処理の行を持たないので、このままでは廃棄物発生と処理を内生化したモデルを作製することができない。廃棄物を関連する廃棄物処理に対応させて、廃棄物行を廃棄物処理行に変換する作業が必要である。そこで、廃棄物の再資源化が全くなされないとして、各廃棄物を特定の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。ここで  $s_{ij}$  は、廃棄物の再資源化が行われないときに、 $j$  廃棄物が  $i$  処理過程で処理される割合を表す。例えば、廃棄物処理が焼却( $i = 1$ )と埋立( $i = 2$ )の 2 過程のみ( $K = 2$ )の時、 $j$  廃棄物が可燃ならば  $s_{1j} = 1, s_{2j} = 0$ 、不燃ならば  $s_{1j} = 0, s_{2j} = 1$  となる。定義から  $\sum_{i=1}^K s_{ij} = 1, j = 1, \dots, M$  である。 $S$  行列は各廃棄物の廃棄物処理部門への配分を表すから、SNA との関連では use matrix に対応する。ある時点において、ある廃棄物に適用される処理/処分方法は、そのかなりの部分がその時点における技術や制度によって規定されているとする。以下、廃棄物処理部門の能力が制約条件とならない場合

<sup>1</sup>廃棄物処理の方法は、例えば、久保田/松田 (1995) に詳しい。

を考えて、 $S$  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。

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 2 である。資源再生部門は、廃棄物を投入するのではなく、廃棄物処理部門の負荷を減らす事に注意せよ。ここで  $X_z := SW_w$  は  $K \times 1$  の廃棄物処理量ベクトルである。

	産業	資源再生	廃棄物処理	最終需要	行和
産業 ( $o$ )	$X_{oo}$	$X_{or}$	$X_{oz}$	$X_{of}$	$X_o$
再生資源 ( $r$ )	$X_{ro}$	$X_{rr}$	$X_{rz}$	$X_{rf}$	$X_r$
廃棄物処理 ( $z$ )	$SW_{wo}$	$S(W_{wr} - X_{wr})$	$SW_{wz}$	$SW_{wf}$	$X_z$
本源的投入 ( $v$ )	$X_{vo}$	$X_{vr}$	$X_{vz}$		$X_v$
環境負荷因子 ( $e$ )	$W_{eo}$	$W_{er}$	$W_{ez}$	$W_{ef}$	$W_e$

表 2: 財/サービスと廃棄物の産業連関：廃棄物発生と処理

### 3.2 線形モデル

表 2 で  $o, r, z$  からなる内生部門の各要素を対応する活動量(生産量または処理量)で除して、表 3 の投入/排出係数表を得る。ここで  $G_{wi}^*$ ,  $i \in \{o, r, z, f\}$  は、2.1 節における廃棄物発生係数  $g_i$  を

	産業	資源再生	廃棄物処理
産業 ( $o$ )	$A_{oo}$	$A_{or}$	$A_{oz}$
再生資源 ( $r$ )	$A_{ro}$	$A_{rr}$	$A_{rz}$
廃棄物処理 ( $z$ )	$SG_o^*$	$S(G_r^* - A_{wr})$	$SG_z^*$
環境負荷因子 ( $e$ )	$G_{eo}$	$G_{er}$	$G_{ez}$

表 3: 廃棄物発生と処理を含んだ投入係数表

多部門の場合に一般化したもの、 $G_{ei}$ ,  $i \in \{o, r, z, f\}$  は環境負荷因子発生係数行列である。

今、 $G_i := SG_{wi}^*$ ,  $i \in \{o, r, z, f\}$ ,  $A_{wr} := SA_{wr}^*$  とおく。また、 $G_f X_{of} = SW_{wf}$  となるように  $G_f$  を定義する。廃棄物が 1 種類の場合と異なり、 $G_i$  の各要素は列部門の 1 単位の活動に伴う廃棄物発生量ではなくて、その処理に必要な廃棄物処理部門の活動量を表すのである。また、 $X_{of}$  と  $X_{rf}$  の比率を係数行列  $H$  で表して、 $X_{rf} = H X_{of}$  とする。すると、恒等条件を次のように表す事が出来る：

$$\begin{pmatrix} A_{oo} & A_{or} & A_{oz} \\ A_{ro} & A_{rr} & A_{rz} \\ G_o & (G_r - A_{wr}) & G_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ X_r \\ X_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{0f} \\ H X_{of} \\ G_f X_{of} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ X_r \\ X_z \end{pmatrix} \quad (31)$$

これを解いて

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_r \\ X_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I - A_{oo} & -A_{or} & -A_{oz} \\ -A_{ro} & I - A_{rr} & -A_{rz} \\ -G_o & -(G_r - A_{wr}) & I - G_z \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_{0f} \\ H X_{of} \\ G_f X_{of} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} B_{oo} & B_{or} & B_{oz} \\ B_{ro} & B_{rr} & B_{rz} \\ B_{zo} & B_{zr} & B_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{oj} \\ HX_{oj} \\ G_j X_{oj} \end{pmatrix} \quad (32)$$

$B_{zz}$  のある要素  $b_{zz;jj}$  を考えると、これは  $j$  廃棄物処理部門の活動に対する 1 単位の最終需要を満たすために、直接間接に必要な  $i$  廃棄物処理部門の活動量を表す。 $B_{zi}, i \in \{o, r, z\}$  の各要素は、所与の技術、制度、嗜好のもとで、最終需要  $X_{oj}$  を実現させるために必要な廃棄物処理必要量を表すものである。

前節では単純な 4 部門モデルについて資源散逸条件 (30) を導いたが、(31) で与えられる一般的な場合について、これを係数についての単純な制約条件として導くことは出来そうもない。ちなみに、投入係数行列は負の要素を含むから、我々は非負行列についての二階堂 (1960) の定理を援用することができない。技術や制度の変更によって、ある処理部門の活動をゼロにする（例えば、海洋投棄が禁止される）ことは可能であろうが、完全な再資源化が不可能である限り、廃棄物純発生量は必ず正値をとるであろう。この場合、資源散逸条件は、非負の最終需要ベクトルに対して  $K \times 1$  ベクトル  $X_o$  のうち少なくとも一つの要素が正値をとる、と言う緩い条件に置き換えられる。

前節で考察した単純なモデルと更に異なるのが、環境負荷因子の存在である。環境負荷因子を考慮するならば、資源散逸条件は “ $W_o$  の要素のうち正値を持つものが少なくとも一つある” と言う条件にまで緩めることができあって、この場合に  $W_o$  の要素は全てゼロであっても構わない。これは、例えば全ての廃棄物が何ら処理されることなく環境に放出される場合に該当する。

上の勘定体型を現実のデータを用いて実証化していく場合に、資源散逸条件は如何なる意味を持つのであろうか？この条件は、物質について閉じた体型から導かれている。従って、考察対象が国を含む特定の地域に限定され、他地域との間で財や廃棄物の移出入がある場合には、その地域について資源散逸条件は必ずしも成立するとは限らないのである。

## 4 自治体データを用いた数値例

### 4.1 F 市の廃棄物処理事業

我が国では、一般廃棄物は自区内処理を原則として市町村がその自区内の廃棄物を責任を持って処理/処分することに廃棄物処理法で規定されている。従って、一般廃棄物処理に関する収集方法や再資源化の仔細が、隣接する自治体の間で大きく異なる事も珍しくない。この事情から、一般廃棄物についての数値例の作製においても、その対象として全国ではなくて個別自治体を考慮するのが望ましいと思われる。

本稿では、北海道の F 市を対象として選択した。F 市は、農業とサービス業（観光）を主たる産業とする人口約 3 万人の小都市であるが、自治体収集一般廃棄物の実に 5 割強を再資源化している点で全国でも屈指の先進的自治体である（1995 年の全国平均は 8 パーセント）。F 市の廃棄物フローに関するデータを用いて、3.1 で展開した数量表における廃棄物の計上方法を具体的に示す。要点は、自治体が公表しているデータを用いて、表 1 の形式の勘定体型を実際に作成可能なことを示す点にある。

F 市の廃棄物再資源化政策の際だった特徴として、廃プラスチック（農廃ビニールを除く）や紙を“固体燃料ごみ”として生ごみと分別して収集し、前者からは固体燃料（RDF）、後者からは有機肥料を生産している（RDF については、例えば、永田・嬉野（1996）、鍋島（1996）を見よ）。再資源化製品の需要先確保における困難は、よく指摘される点である。同市の場合には、RDF は市内の

学校その他の公共施設で燃料として使用され、有機肥料も農協などを通じて地域の農地に還元されるているので、この種の問題は目下存在していない。

#### 4.2 F 市の拡張産業連関表

		産業	廃棄物処理部門	再資源化部門	最終需要	行和
			焼却 埋立	有機肥料 RDF	家計	
産業 再生資源	有機肥料 RDF	2176 989				2176 989
付加価値						
生産額						
廃棄物	生ごみ 農廃フィルム 固体燃料ごみ 可燃ごみ 医療系廃棄物 焼却残滓	1148 757 272 592 39 457		-3269 -1490 461 167	2121 1218 1888 3108 39 457	0 757 0 3108 39 457
列和 t		2808	457	0	-2808 -1323	5227 4361

表 4: 拡張産業連関表形式による F 市廃棄物循環 (t)

表 4 は、排出者として産業部門と家計部門の 2 部門を考慮して、F 市の廃棄物フローを表 1 の形で表現した物である(廃棄物連関以外のマスは空白表示)。自治体収集分に限られることから、民間業者による(主に建築系廃棄物から成る)産業廃棄物処理は含まれていない。F 市では、粗大ごみ、金属、ガラス、乾電池を加えた 9 種類の廃棄物が分別回収され、焼却/埋立に委託処理を加えた 3 種類の廃棄物処理/処分が行われている。しかし、金属/ガラス類の再資源化および粗大ごみの大半と乾電池の委託処理は市外の業者によって行われているので、以下の分析ではこれらを除いて焼却灰を加えた 6 種類の廃棄物と焼却/埋立から成る 2 種類の廃棄物処理/処分方法に限定する。

有機肥料/RDF を生産する再資源化部門においても、生産の過程で廃棄物が発生する。これは、再資源化の対象とならない収集用ビニール袋等の不純物である。表 4 では、この不純物の内、可燃性の物のみを計上してある。廃棄物についての最終需要列の右側の"行和"は、発生量から再資源化量を引いた純発生量を表している。

1990 年地域産業連関表(北海道 46 部門表)、F 市統計表、就業者統計調査等を元に、F 市の産業連関表を試算推定した(推定の詳細は付録に収録した)。既存の 46 内生部門に 2 つの再資源化部門(堆肥と RDF 生産部門) および 2 つの廃棄物処理部門(焼却と埋立)を加えて 50 内生部門とした。RDF は公共部門で消費されているので、公務を RDF 消費部門とした。

#### 4.3 モデル分析

拡張産業連関表を用いた分析の一例として、(32) から焼却処理と埋立処分に対する部門別誘発量を求めた。表 5 は、主な誘発部門についての結果を、総誘発量に対する比率で示したものである。表の左半分は直接誘発量を、右半分はこれに間接効果を加えた総誘発量を(32) で求めたものを示す。排出部門としての焼却は、最終需要からの排出を指している。焼却に占める最終需要の割合が最も高く 1 を越えているのは、一般廃棄物における家計の排出割合が最も高い事、及び再資源化が行われている事による。対個人サービスの比率が比較的高いのは、これが農業と並んで基幹産

直接		直接+間接	
焼却	埋立	焼却	埋立
部門	焼却	埋立	埋立
焼却 (家計)	1.661	農業	0.621
対個人サービス	0.273	焼却 (家計)	0.375
商業	0.114		
農業	0.103		
食料品・たばこ	0.056		
医療・保険	0.030		
教育・研究	0.021		
建築・補修	0.013		
金融・保険	0.007		
公務	0.007		
印刷・出版	0.007		
対事業所サービス	0.005		
運輸	0.004		
その他の製造業	0.004		
RDF	-0.420		
有機肥料	-0.892		
焼却	1.382	焼却 (家計)	0.579
対個人サービス	0.228	農業	0.344
商業	0.094	対個人サービス	0.126
医療・保険	0.026	商業	0.040
教育・研究	0.018	食料品・たばこ	0.019
建築・補修	0.013	医療・保険	0.013
食料品・たばこ	0.008	教育・研究	0.008
農業・土石製品	0.002	建築・補修	0.005
運輸	0.002	埋立 (家計)	0.004
金融・保険	0.002	その他の製造業	0.001
木材・木製品	0.001	農業・土石製品	0.001
印刷・出版	0.001	運輸	0.001
鉱業	0.001	金融・保険	0.001
公務	-0.343	木材・木製品	0.001
農業	-0.437	鉱業	0.000
		公務	-0.143

表 5: 主な廃棄物処理誘発部門 (比率)

業であるところの観光 (特に宿泊/飲食) を含むからである。再資源化部門は焼却処理を直接減少させる。有機肥料生産による減少割合が高いのは、対象となる廃棄物の排出量が RDF のそれより大きいのと製品歩留まりが高いからである (表 4 を参照せよ)。

総誘発効果に転じる。直接効果では焼却処理の主要な需要部門であった農業は、総効果で見ると最大の焼却処理削減部門である。これは、農業部門が投入する堆肥の原料として可燃ごみ (生ごみ) が需要されるからである。焼却の減少は、焼却灰の発生を通じて埋立処分需要も減少する。直接排出量で見ると農業部門は最大の埋立処分需用者であり、その量は焼却部門の約 1.7 倍である。しかし、再資源化を通じる間接効果も考慮すると、農業部門の埋立需要量は焼却部門の約半分になる。埋立以外の農廃ビニールの適正処理が進めば、農業部門は純で埋立需要量を減少することも可能になるであろう。公務が総効果で焼却と埋立を減少させるのは、この部門が RDF の需用者である一方、廃棄物をさして排出しないためである。もっとも、この計算は RDF 消費に伴って発生する焼却灰の埋立を考慮していない。しかし、これを考慮しても公務の埋立誘発は -0.09 と負値になるから、RDF 化は純で埋立需要を減少させるのである。

## 5 結語

廃棄物発生、再資源化、処理を考慮した実証的な多部門モデルを作製するための理論的基礎として、単純な 4 部門の場合についての線形モデルを考察し、それを拡張する形で多部門モデルの場合の勘定体系を展開した。後者を実証的に裏付けるために、F 市のデータを用いた数値例を示した。同様の方法により、廃棄物再資源化事業の直接間接二酸化炭素排出量の推定も容易に行うことが出来よう (近藤/森口 (1997) は我が国基本産業連関表に対応した二酸化炭素排出原単位を公表している)。

本稿では、専ら数量モデル/数量勘定が扱われた。数量勘定に対応した名目表を作成するために、特に次の二つの点を考慮しなくてはならない。第一は、廃棄物処理の単価から廃棄物処理費用を求めることである。これは基本的には、本源的投入の単位価格が与えられれば、線形モデルを解

くことによって求められると考えられよう。しかし、数量表はあくまでも量的な相互依存関係を表しているのであって、処分費用の負担といった制度的な問題までをその範疇に含むものではない。(32)における逆行列係数  $B_2$  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、処理費用の負担を表すものではない。これが処理費用の負担に対応するのは、処理費用の負担について制度的に完全な意味での排出者責任が問われる場合である。

しかし、これは制度に関わることで、数量表が記述する技術的関係とは別個の問題である。これが、名目表における第 2 の問題点であるところの「容器包装法」や「家電循環再利用法」等に代表される処理費用負担制度である。処理費用負担制度とは  $X_2$  に必要な費用を、各部門間で如何に配分するかに関わるものである。処理費用を求めるためには処分単価  $p_2$  を求めなくてはならないが、実はこれも厳密には処理費用負担制度が確定していないと決めることが出来ない。すなわち、処理費用負担制度を勘定体型に反映することが、名目表の作製に必須なのである。

## 参考文献

- F 市 (1997): 資源リサイクルを求めて (F 市 ごみ処理基本計画)、F 市  
久保田 宏、松田 智 (1995): 廃棄物工学、培風館。  
近藤美則、森口裕一 (1997): 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。  
二階堂 副包 (1960): 現代経済学の数学的方法、岩波書店。  
永田 勝也、嬉野 通弥 (1996): 'RDF の有効性に関する検討'、廃棄物学会誌 7-4, 282-293.  
鍋島 淑郎 (1996): 'RDF の技術評価'、廃棄物学会誌 7-4, 294-304.  
槌田 敦 (1998): エコロジー神話の功罪、ほたる出版。  
鷲田 豊明 (1992): 環境とエネルギーの経済分析、白桃書房。  
Adriaanse, A. et al. (1997): Resource Flows: the material basis of industrial economies, World  
Resource Institute, Washington, D.C.  
Ayers, R. (1996): 'Statistical measures of unsustainability', *Ecological Economics* 16, 239-255.  
Cleveland, C. J. and M. Ruth (1997): 'When, where and by how much do biophysical limits  
constrain the economic process? A survey of Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to  
ecological economics', *Ecological Economics* 22, 203-224.  
Georgescu-Roegen, Nicholas (1979): Energy analysis and economic valuation, *Southern Eco-  
nomic Journal* 45, 1023-58.  
Haan, M. and Keuning, S., 1996. Taking the environment into account: the NAMEA ap-  
proach. *Review of Income and Wealth*, 42: 131-148.  
Nakamura, Shinichiro (1998): An inter-industry model for analyzing economic- and environmen-  
tal effects of the recycling of waste, *Ecological Economics* forthcoming.  
Netherlands Central Bureau of Statistics (1993): Environmental Statistics of the Netherlands,  
1993, the Hague, sdu/publishers

## A データ

### A.1 F 市産業連関表の推定

推定の基礎となったのは、1990 年の地域内産業連関表（北海道/46 部門）である。北海道の競争移入型投入係数表をもって、F 市の競争移入型投入係数表  $A$  とした。家計消費と一般政府消費支出および地域内固定資本形成から構成される最終需要を、道に対する F 市の人口比で乗じて F 市最終需要  $F$  とした。F 市部門別生産額  $X$  については、F 市統計表に売り上げ額が公表されている物についてはその値を用いた。それ以外の物については、就業構造基本調査（地域別/産業別）や F 市統計表から得た就業者数を元に、就業者当たり生産性が道と F 市で等しいと仮定して推定した。廃棄物処理部門を別個計上するために、域内産業連関表に元々計上されている水道・廃棄物処理部門については、2 重計算を避けるために廃棄物処理部門の生産額を差し引いた。次に、 $X, F, E$ （移出）、 $M$ （移入）についての以下の恒等式から純移出 ( $E - M$ ) を推定した。

$$(I - A)X = F + (E - M)$$

純移出が正の場合は  $M = 0$ 、負の場合は  $E = 0$  とした。こうして推定した  $M$  を用いて、通常の変換により F 市内投入係数表  $(I - \bar{M})A$  および F 市財/用役に対する最終需要  $(I - \bar{M})F + E$  を求めた。

### A.2 拡張産業連関表

家計からの廃棄物排出を最終需要からの排出とした。事業系一般廃棄物については部門別の排出量が不明なので、部門別の食料品投入シェアで生ごみ排出量を、パルプ/紙/加工品、新聞/印刷、プラスチック製品の投入シェアで RDF ごみと可燃ごみ排出量をそれぞれ推定した。有機肥料、RDF 生産、焼却、埋立各部門の投入係数は、F 市リサイクルセンターにおける聞き取り結果から求めた。表 6 は、部門分類を示す。

1	農業	26	その他の輸送機械
2	林業	27	精密機械
3	漁業	28	その他の製造業
4	鉱業	29	建築・建設補修
5	食料品・たばこ	30	公共事業
6	繊維製品	31	その他の土木建設
7	木材・木製品	32	電力
8	家具・装飾品	33	ガス・熱供給業
9	パルプ・紙・加工品	34	水道
10	新聞・印刷・出版	35	商業
11	化学工業製品	36	金融・保険
12	石油・石炭製品	37	不動産
13	プラスチック製品	38	運輸
14	ゴム製品	39	通信・放送
15	皮革・同製品	40	公務
16	窯業・土石製品	41	教育・研究
17	鉄鋼製品	42	医療・保険・社会保証
18	非鉄金属製品	43	その他の公共サービス
19	金属製品	44	対事業所サービス
20	一般機械	45	対個人サービス
21	事務用・サービス用機械	46	分類不明・その他
22	民生用電気機械	47	有機肥料
23	電子機械	48	RDF
24	その他の電子機械	49	焼却
25	自動車	50	埋立

表 6: 拡張産業連関表部門分類