

Title	廃棄物循環の線形経済モデル
Sub Title	A linear economic model of waste cycles
Author	中村, 慎一郎
Publisher	慶應義塾経済学会
Publication year	1999
Jtitle	三田学会雑誌 (Keio journal of economics). Vol.92, No.2 (1999. 7) ,p.326(86)- 347(107)
JaLC DOI	10.14991/001.19990701-0086
Abstract	
Notes	小特集：低環境負荷型社会の構築に向けて
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-19990701-0086

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

廃棄物循環の線形経済モデル

中 村 慎一郎*

1. 序

鉱物性資源枯渇よりも火急な持続可能性に対する制約条件として、人間活動による過大な環境負荷を原因とする再生可能資源の希少化が指摘されている [14]。環境負荷の最たる原因は、産業及び消費活動に伴う環境への過度の廃棄物放出である。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 [19] が指摘した如く、⁽¹⁾ 廃棄物の完全な再資源化は“實際上”不可能である。すなわち、リサイクルは廃棄物を消滅させる玉手箱ではないし、廃棄物処理過程とはあくまでも廃棄物の形状変換過程である。

開墾・都市化を始め、あらゆる土木工事は表土の除去・移動を伴うので、多少の差こそ有れその部分に存在する生態系を直接破壊することになる。開発行為に伴う表土の除去・移動等をも含む総物質必要量（Total Material Requirement 略して TMR [13]）も廃棄物の範疇に含めるならば、経済活動により生じる全ての環境負荷を廃棄物発生に帰す事が出来よう。

転じて、経済学において廃棄物はどのように扱われているのだろうか。現代の主流的新古典派経済学は専ら生産と消費に関連する財の流れをその分析対象とし、それに付随して必然的に発生する廃棄物の流れを考慮して来なかったし、未だに重視していない様に見受けられる [17]。重要な例

* 本稿は [7] と [22] を元に加筆修正した物である。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、F市を御紹介いただいた寄本勝美氏（早稲田大学）、有益な示唆を頂いた大平純彦氏（静岡県立大学）、鷺田豊明氏（神戸大学）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。

(1) あえて“實際上”としたのは「エネルギー制約が存在する現実において」、という意味である。少なくとも現在において、人類がエネルギー問題を“最終的に解決した”極限状態について議論することは意味のあることとは思えない。

外として [15] [19] [10] 等があるが、それらは何れも“主流的”とは言い難い。従来の主流的経済学は物質の流れのうち専ら財に関わる前半（いわゆる動脈）部分のみを分析対象とし、財の生産に伴い発生する廃棄物や時間を通じる財の廃棄物化に関わる後半（いわゆる静脈）部分を見逃し又は軽視して来た。物質循環の記述としては不完全であったと言わざるを得ない。

本稿は、生産・消費活動に伴う廃棄物の発生、再利用、処理・処分から構成される“静脈部門”と財生産を司る“動脈部門”との間の量的相互連関関係を把握し、経済学における物質循環を閉じた体系とするための一つの試みである。産業連関表・産業連関モデルは生産・消費活動に伴う財の循環を記述するための優れた分析装置である。しかし、生産・消費活動に伴って不可避免的に発生する廃棄物の流れを包括していないので物質循環の記述としては不完全である。

産業連関表への廃棄物の取り込みは Leontief [20] によって先鞭を付けられ、Faye Duchin [18]、中村 [21] 等により拡張と一般化がなされてきた。[21] 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・処理を考慮した勘定体系と線形モデルを示した。本稿は更に廃棄物発生を考慮してこれを一般化する。産業連関表の概念を拡張した廃棄物循環勘定（以下、「リサイクル産業連関表」と呼ぶ）を提唱し、これ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。リサイクル産業連関表及びモデルについての経験的知見を得るために、自治体データを用いた実証分析を行う。

本稿の内容は以下の通りである。まず 2 節で、再資源化過程を含む線形モデルの基本的性質を、特に資源散逸条件についての鷺田豊明の先駆的研究との関連を中心に、単純な 4 部門モデルを用いて検討する。これを踏まえて、3 節では実証分析に耐えうる一般的な多部門モデルを展開する。特に、2 節の如き単純なモデル設定の場合と違って、一般には廃棄物と廃棄物処理が一对一对応していない点が指摘され、モデルを解く上でこれに対する対応策が示される。以上で展開されたモデルを自治体データに応用したのが 4 節である。応用対象として、一般廃棄物再資源化への先駆的取り組みで知られる北海道の F 市を選んだ。F 市についてリサイクル産業連関表を推定し、同市の廃棄物処理事業の有効性を埋立処分量とエネルギー需要の面から分析評価した。5 節は今後の研究方向を示して結語とする。

2. 線形生産モデルと資源散逸条件

廃棄物循環を考える場合に無視出来ない条件が、Georgescu-Roegen [19] 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、“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から、資源散逸条件を物理法則と見なすことは出来ない [16]。しかし、この事は現実にはきわめて多くの資源が散逸している事実の重要性をいささかも減じるものでは

ない。

鷲田豊明 [12] 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、単純な4部門モデルを用いて鷲田の資源散逸条件が持つ含意を検討する。以下の本節では、鷲田の設定を単純化して消費財と工業財部門を区別しない事にする。

2.1 廃棄物発生

産業 (o)、天然資源採取 (N)、再資源化 (r)、及び廃棄処理 (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)処理・処分される。

あくまでも相互排他的な分類ではないと断った上で、廃棄物発生因として次の3要素が挙げられよう：

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

所与の生産技術や消費財組成の下では、1を起源とする廃棄物発生量は生産・消費活動に比例すると考えられる。石炭火力発電における燃えがら、製鉄における鉱滓、食料消費と尿尿などが典型的な例である。2を起源とする廃棄物についても、所与の生産技術や消費形態の下では、当該非耐久財の投入水準が生産・消費活動に比例する限りにおいて、その発生量はやはり生産・消費水準に比例すると考えられよう。熱間圧延における廃酸、家計からの容器包装廃棄物が具体例である。1と2は共に経常的にフローとして発生する。

これに対して、3を起源とする廃棄物の発生量はストックとフローの両方に依存しており、その決定機構は複雑である。特に、「新しい製品設計パラダイム」として近年注目されている逆工場 (Inverse Manufacturing : IM) の進展は、この発生機構を大きく変えていく可能性を持っている [1]。しかし、少なくとも定常的な状態においては、耐久財の減耗を耐久財存在量の一定割合とみなす事が出来よう。この場合、耐久財起源の廃棄物はストックである耐久財存在量に依存して発生する。以下では、家計を含む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事にする。

いま x_o 、 x_r を産業部門と再資源化部門の生産量、 f を産業部門の生産物に対する最終需要、 a_{wr} を1単位の再資源化財生産に必要な廃棄物投入量とする (a_{wr} は r における廃棄物発生原単位を差し引いた純投入係数である)。 j 部門の活動水準を x_j 、耐久財存在量を K_j とすると廃棄物発生量

w_j は

$$w_j = g_j^* x_j + g_j^{**} K_j, \quad (1)$$

ここで g^* , g^{**} は、それぞれ活動水準 1 単位、耐久財存在量 1 単位当たりが発生する廃棄物の量を表すパラメーターである。 K_j については、各部門の活動量がこの水準に比例すると仮定し、更に比例係数が 1 に等しくなるように計測の単位を決めることにする。以上の設定の下で、全部門の廃棄物発生量から再資源化される分を引いて求められる廃棄物処理量 x_w は、次のように与えられる。

$$x_w = \sum_j w_j - a_{wr} x_r = g_o x_o + g_f f - a_{wr} x_r. \quad (2)$$

ここで $g_o := g_o^* + g_o^{**}$, $g_f := g_f^* + g_f^{**}$ である。

2.2 鷺田モデル

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重要な役割を演じる。鷺田は、仮に両者が完全に代替的であったとしても、生産・消費過程で資源散逸が生じるために、定常経済の維持においてできさ天然資源の投入が不断に必要となる条件を導いた。ちなみに、この(唯一の)天然資源が枯渇的である場合には、「定常経済すら持続可能でない」とする Georgescu-Roegen の命題が導かれるのである。

鷺田に倣って、この節では先ず廃棄物から得られる再生資源 (x_r) と処女天然資源 (x_N) 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見るならば、それから得られる再生資源で廃棄物の量を計測するのが適当であろう。実際、これが鷺田の用いた方法である。これに対して、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廃棄物を計測する方が適切かもしれない。以下では、先ず鷺田の方法を踏襲してモデルを展開し、その後で総量で計測した場合を考察する。

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。不等式の右辺が需要を、左辺が供給を表す。

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

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

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

ここで a_{oo} , a_{or} , a_{wr} , a_{ro} , g_o , g_f は正のパラメーターで、 a_{or} は再資源化財 1 単位生産に必要な産業財の量を、 a_{ro} は産業財 1 単位生産に必要な再資源化財の量を、それぞれ表している。

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と

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

この条件は、[12] 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と

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

この条件は [12] 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)と(7)を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と

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

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

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

(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、[12] 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ぬ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」([12] p. 13)⁽²⁾。廃棄物を再資源化して得られる資源量が生産量維持のための必要資源量より少ないから、天然資源の投入が不可欠となるのである。

(12)の下では、再資源化を徹底する事で (再資源化可能な) 廃棄物の量をゼロにする事が出来る。ちなみに、 $x_N \rightarrow \min$ の場合について(9)と(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

(2) 鷺田論文では「大きく」が誤って「小さく」となっているが、鷺田氏に確認の上、訂正した表現を引用文とした。

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 [14] 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いう形を取るにせよ）廃棄処理されるから、資源散逸とは廃棄処理される廃棄物量が正值をとる事と同義でもある。

2.3 鷲田モデルと廃棄物処理

上の議論においては、廃棄物量をそれが含むところの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、その資源含有量よりは排出総量である事の方が多いと思われる。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て総量で計測する事にする。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 θ 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表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。

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

前節と同様に解を求めると ($f=1$ 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と $x_N \rightarrow \min$ の場合にもこれは正值をとる。

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

再資源化率の技術的上限を表すパラメーター θ 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物処理量も正值をとる事(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。

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

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

$$x_N = a_{No}x_o, \quad (23)$$

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

このモデルは x_N に関わる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、正直条件(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

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

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

(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節において得た正直条件(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。2.2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。

この類似点に対して(27)と(8)の相違点は $a_{ow}a_{wr}a_{ro}$ の項にあり、これは前者の設定における廃棄物処理部門の存在による。この項は、廃棄物を処理する代わりに再資源化することによって、廃棄物処理部門において節約される産業生産物の投入量を表している。

モデルの設定から $x_o > 0 \Rightarrow x_N > 0$ なので、 x_N についての資源散逸条件の検討は意味がない。検討すべき資源散逸条件は $x_w > 0$ に関わる物である。この条件について(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()内の項は正值をとる。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、1単位の工業製品の生産によって生み出される廃棄物量よりも小さくしなければならない事を表す。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。

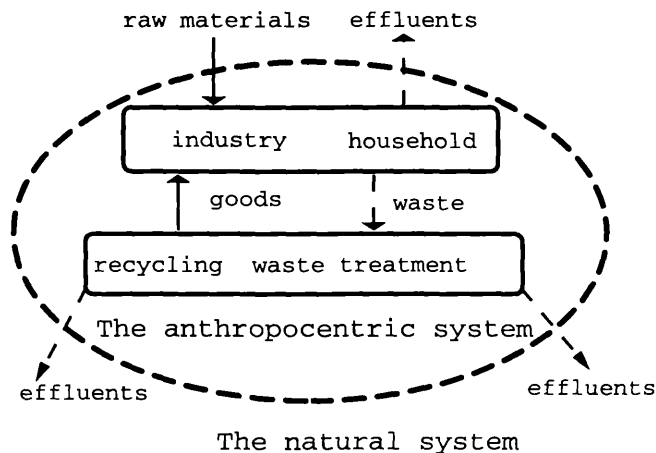
3. 多部門モデルへの拡張

3.1 設定

天然資源採掘・採取を含む $N > 1$ 種類の財・サービス生産部門から成る産業部門 (o)、 $L > 1$ 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 $K > 1$ 種類の廃棄物処理部門 (z) と最終需要 (家計) 部門 (f) から成る経済を考える。 o, r, z, f の活動により $M > 1$ 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。

図1は以上の設定を図式化した物である。図中、破線で囲まれた部分が経済活動 (anthropocentric system) を表し、その外部が自然環境 (natural system) である。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・環境負荷因子の量を発生量で計測する。

図1：財・廃棄物・環境負荷因子の流れ



3.2 リサイクル産業連関表

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て得た財・サービス、廃棄物と環境負荷因子の連関表（リサイクル産業連関表）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 廃棄物の量を表す（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表すものである。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、焼却したり、また再利用のために解体・破砕・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（経済活動）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（廃棄物処理の方法は [3] に詳しい）。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」処分施設で埋め立て処分（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 (CO_2)、メタン (CH_4)、亜酸化窒素 (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、埋め立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産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、リサイクル産業連関表は廃棄物・環境負荷因子を物量表示している点で NAMEA (National Account Matrix including Environmental Accounts) [25] の一種として位置づけることが出来る。この点の詳細については付録Aを参照されたい。

表1は廃棄物処理の行を持たないから行部門と列部門が非対称であり、このままでは廃棄物発生と処理を内生化したモデルとして解くことが出来ない。廃棄物を関連する廃棄物処理に対応させて、行要素を廃棄物から廃棄物処理に変換する必要がある。そこで、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。ある廃棄物について再資源化が行われないうちに、

表1：財・サービスと廃棄物の産業連関

	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

当該廃棄物は如何に処理されるか、その配分を考えるわけである。ここで s_{ij} は、廃棄物の再資源化が行われないうちに、 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、そのかなりの部分は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。

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。

表2：財・サービスと廃棄物の産業連関：廃棄物発生と処理

	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

3.3 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 を多部門の場合に一般化したものであり、 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

表 3 : 廃棄物発生と処理を含んだ投入係数表

	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_{wo}^*	$S(G_{wr}^* - A_{wr}^*)$	SG_{wz}^*
環境負荷因子 (e)	G_{eo}	G_{er}	G_{ez}

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、 $X_{rf} = HX_{of}$ とする。すると、表 2 が表す恒等条件を次のように表す事が出来る。

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

これを解いて

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X_o \\ X_r \\ X_z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} I - A_{oo} & -A_{or} & -A_{oz} \\ -A_{ro} & I - A_{rr} & -A_{rz} \\ -G_o & -(G_r - A_{wr}) & I - G_{wz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_{of} \\ HX_{of} \\ G_f X_{of} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} B_{oo} & B_{or} & B_{oz} \\ B_{ro} & B_{rr} & B_{rz} \\ B_{zo} & B_{zr} & B_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{of} \\ HX_{of} \\ G_f X_{of} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (32)$$

B_{zz} のある要素 $b_{zz:ij}$ 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_{of} 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。

通常の産業連関モデルに倣って、我々は上で用いた投入・排出係数を観察点の近傍での投入・排出関係の一次近似と見なすことにする。その結果、我々は(32)を単なる恒等関係としてではなく、最終需要と廃棄物処理・再資源化を含む生産活動との間の関数関係として捉える事が出来るのである。

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副包の定理 [8] を援用することが出来ない。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こと（例えば海洋投棄の禁止）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_z のうち少なくとも一つの要素が正值をとる、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_e の要素のうち正值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可能であって、この場合に W_w 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。

リサイクル産業連関表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. 自治体への応用

前節までの理論的展開を踏まえて、その経験的知見を得るために実証分析を行う。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リサイクル産業連関表の作製においても、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パーセントであった）。

4.1 F市のリサイクル産業連関表

F市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）や紙くずを“固形燃料ごみ”として生ごみと分別して収集し、前者からは固形燃料（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[6]を見よ）点が挙げられる。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。しかし、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ているので、この種の問題は少なくとも1997-98年の調査時点では存在していなかった。

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（廃棄物関連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

表4：リサイクル産業連関表形式によるF市廃棄物循環（数値はトン）

		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	2176						2176
	RDF	989						989
付加価値								
生産額								
廃棄物	生ごみ	1148			-3269		2121	0
	農廃フィルム	757						757
	固形燃料ごみ	272				-1490	1218	0
	可燃ごみ	592			461	167	1888	3108
	医療系廃棄物	39						39
	焼却残滓			457				457
列和		2808	457	0	-2808	-1323	5227	4361

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。焼却は、発電機能を持たない固定バッチ式炉による単純焼却である。

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市のリサイクル産業連関表を試算推定した。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。推定の詳細や部門分類については付録Bを参照されたい。

4.2 再資源化事業のシナリオ分析

推定されたりサイクル産業連関モデルを用いてF市廃棄物処理事業の“有効性”を複数の角度から評価する。全国にも例を見ない同市の廃棄物処理事業の発端は、埋立処分場の立地難から埋立処分量の最小化を目指したことにある（[11] p. 2）。有機肥料は農地に還元されるから、生ごみから

の有機肥料生産がこの目的のために有効であることは明白である。

しかし、燃料としての消費を目的に生産される RDF の場合、消費に伴って発生する焼却灰は結局埋め立てられるので、その生産は（燃焼効率の向上による残渣発生率減少効果を除いて）埋立量を削減しない。RDF は石炭の代替物として石炭ボイラで使用される。F 市型 RDF の低位発熱量は 4900kcal/kg であるから（[2] 表 5）、石炭の低位発熱量を 6200kcal/kg として、RDF 1 t で石炭 $4900/6200=0.79$ t を代替出来ることになる。一方、RDF 生産には破袋機・分別装置・コンベヤ・破碎機・成型機・ボイラなどが使われ、その運転には電力や灯油などのエネルギー投入が必要である。従って RDF の有効性は、製品としての RDF が持つエネルギーがその生産に要したエネルギーを上回るか、すなわちエネルギー的に有効であるか否かに掛かっている⁽³⁾。

廃棄物政策の有効性を評価するために、同政策についての複数のシナリオの下で(32)から求めた解を比較した。F 市廃棄物政策の際だった特徴は可燃ごみの再資源化にあるので、分析対象を可燃ごみに限定した。表 5 は F 市における可燃性一般廃棄物の 3 分別での排出割合を表す。前出の如く、「生ごみ」と「RDF ごみ」として排出されたものは再資源化の対象となる。

表 5 : F 市収集可燃ごみの排出割合

年度	生ごみ	RDF ごみ	焼却ごみ
1991	0.538	0.156	0.304
1992	0.450	0.173	0.376
1993	0.471	0.193	0.335
1994	0.463	0.200	0.335
1995	0.451	0.205	0.342
1996	0.451	0.201	0.346

1996年の排出割合をコントロールとし、排出割合について以下の三シナリオを想定した：

シナリオ 1 :再資源化無し 全ての可燃ごみは焼却される

シナリオ 2 :RDF のみ RDF の割合はコントロールと同じだが、それ以外は全て焼却される

シナリオ 3 :有機肥料のみ 有機肥料の割合はコントロールと同じだが、それ以外は全て焼却される

RDF と有機肥料は、公務部門（庁舎・市立学校・市営保養所）と農業部門でそれぞれ全量消費される。従って、公務部門の RDF 投入係数と農業部門の有機肥料投入係数を変更することで各シナリオをモデルに反映した。例えば、両方の投入係数の値をゼロとおいて [シナリオ 1] を得るのである。RDF と石炭の代替を考慮するために石炭代替量を熱量換算して求め、その価額で鉱業部門か

(3) 有機肥料が化成肥料の一部を代替するならば、後者の生産に必要なエネルギー投入を減らすことになる。この代替の程度が不明であったので、本稿ではこの効果は考慮していない。

らの投入係数を調整した。簡単化のために、考察する3種類の可燃ごみ（RDFごみ、生ごみ、その他可燃ごみ）の灰分や低位発熱量は全て等しいと仮定した。

これはかなり強い仮定である。現実には排出割合の大幅な変更は、焼却・埋立施設の操業に影響を及ぼして、その投入係数を変化させる可能性がある。例えば、自治体の中には廃プラスチックを焼却する代わりに埋め立てている所があるが、これを発電設備つき焼却工場⁽⁴⁾で処理すれば、ごみの低位発熱量が上昇して蒸気発生量が増え電気エネルギーをより多く得ることが出来る。一方、埋立処分場においては投入されるプラスチックが減少してかさ密度（t/m³）が上昇し、埋立容積が減少して、覆土量をはじめエネルギーや薬品使用量等が減少するのである。

これは、実は固定係数モデルの仮定に抵触することなのであるが、“観察値の近傍”から大きく逸脱した場合を想定しているので当然のことではある。しかしながら、廃棄物処理部門が「雑多な起源を持つ多様な廃棄物を受け容れて、これが決められた規制値を満たす様に変換する」と言う、通常⁽⁴⁾の財生産部門には見られない“受動的”な特徴を持つことも確かである。この意味で、特に廃棄物処理部門に関しては、固定係数の仮定は慎重に用いられるべきであろう。F市の焼却施設・埋立処分場について、処理廃棄物組成が大きく変化した場合に生じる投入係数の変化の程度は不明であったので、本稿の分析ではこの点は考慮しなかった。

シナリオ分析におけるエネルギー関連部門（鉱業、石油・石炭製品、電力）の取り扱いを説明しておく。F市は石炭、石油・石炭製品及び電力を全て域外から調達しているので、エネルギー需要が変化しても同市への直接的な波及効果は生じない。従って、厳密な意味で分析対象を市内の活動に限ってしまうと、エネルギーに関わるシナリオ分析は意味を持たなくなってしまう。そこで以下の分析では、あたかもこれらのエネルギー関連部門がF市内で操業しているとみなし、その市内自給率を100%とした。一方、エネルギー関連部門は本来F市で操業していないから、その操業に付随して発生するであろう産業廃棄物も存在せず、当然の事ながら関連処理事業も存在しない。そこで以下では、エネルギー関連部門からの廃棄物発生は考慮しない事にした。

表6は以上の設定の下で得られたシナリオ分析の結果を表す。数値はコントロールに対する変化率である。再資源化を全く行わず〔シナリオ1〕“全量単純焼却→焼却灰埋立”⁽⁵⁾とすると、単純焼却量は132%増加し埋立処分量も26%増加する。生ゴミを単純焼却しRDFのみ生産する〔シナリオ2〕場合、単純焼却量は89%増加し埋立は28%増加する。これに対してRDFごみを単純焼却し有機肥料のみ生産する〔シナリオ3〕場合には、焼却量が43%増加するのに対して、埋立量は微減する。すなわち、再資源化を一切行わないと焼却量は約2.3倍に増えるが、その約7割は生ごみの再

(4) 天然資源採取部門も類似した特徴を持つと考えられる。

(5) RDFを生産しない方が埋立が微減するのは、RDF生産による他部門への生産誘発を通じる埋立誘発が微減するためと考えられるが、僅かな値なので無視する。

表 6：再資源化シナリオ分析の結果

シナリオ	[1] 再資源化なし	[2] RDFのみ	[3] 堆肥のみ
項目	対コントロール変化率 ^a		
単純焼却	1.32037	0.89426	0.42611
埋立	0.26333	0.27840	-0.01507
石油・石炭製品・電力生産額 ^b	-0.00006	-0.00069	0.00063
二酸化炭素発生 ^{bc}	0.00000	0.00015	-0.00015
全部門生産額計	-0.00002	-0.00004	0.00002

^a 変化率：
$$= \frac{\text{シナリオ値}}{\text{コントロール値}} - 1。$$

^b 焼却に伴う部分を除く。

^c 生産起源の発生のみ、消費起源は含まない。

資源化を行わないために生じる。生ごみからの有機肥料生産は、埋立処分の減量対策として極めて有効に機能しているのである。

次に、RDFについてのエネルギー的な有効性を検討する。エネルギー投入の尺度として、各シナリオの下で誘発される石油・石炭製品と電力の生産額合計を用いた。F市の焼却炉では助燃が行われていないので、投入ベクトルにおけるエネルギー投入が焼却量に比例するとは考えにくい。従って、エネルギー必要量から焼却量の増加に比例する部分を除いた方が適当であると考えられるので、表の数値は焼却に関する部分を除いている。エネルギー投入は再資源化を全く行わない[シナリオ1]と0.006%と僅かではあるが減少する。

しかし、RDFに限定すると[シナリオ2]エネルギー投入は0.07%減少する事から、RDF事業が少なくともエネルギー的に有効であることがわかる。この意味で、F市のRDF化事業は廃棄物処理事業ではなくて生産事業である。この結果は、工学的な見地から廃棄物処理関連部門に限定してRDFのエネルギー分析を行った[9]の結果と整合的である。

5. 結 語

財と廃棄物を巡る物質循環過程を描写する勘定体系(リサイクル産業連関表)とモデルを提示した。F市のデータに対してこれを応用し、同市の廃棄物処理政策の有効性を埋立量とエネルギーの側面から評価し、その有効性を確認した。特に、RDFについてのエネルギー分析において、熱量ベースでの積み上げ計算に基づく研究[9]と整合的な結果を得る事が出来た。

今後の研究方向を示して本稿を結ぶ事にする。本稿のモデルは、時間の概念を含まない静学モデルである。従って、産廃に代表されるような生産に付随して発生する廃棄物の分析については有効

であろうが、廃家電、廃車や建築廃材の如く、数年に及ぶ時間の経過を経て発生する廃棄物を十分に扱うことが出来ない。今後の研究の一つの大きな方向は、モデルに時間要素を導入し、時間を通じた財の廃棄物への変換過程を考慮する事である。

本稿では、専ら数量モデル・数量勘定を扱った。通常の産業連関モデルでは、数量モデルの双対として価格モデルを導き、これを価格分析に用いることが出来る。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ように、こと廃棄物処理費用に関しては、各部門間での費用分担に関わる制度的な側面が重要であり、この点を十分に考慮せずに、形式的に双対モデルを導いたり使用するべきではない。ちなみに、本稿のリサイクル産業連関モデルが表すのは量的な相互依存関係であって、処分費用の配分は考慮していない。(32)における逆行列係数 B_z 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。⁽⁶⁾ すなわち、「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勘定体系に反映して行く事が、価格モデルを作るために必要なのである。

本稿のシナリオ分析では、単純化のために、焼却・埋立部門が受け容れる廃棄物の組成が大きく変化した場合でも、これら部門の投入係数は変化しないと仮定した。これは強い仮定である。実際の所、容器包装リサイクルの進展如何によっては、焼却工場に搬入される廃棄物の低位発熱量が低下し炉の運転効率の妨げとなることが懸念されているのである。こうした事態に対してもモデルが対応出来るように、廃棄物組成が廃棄物処理部門の投入・排出係数に対して持つ効果を考慮して行く必要がある。

(早稲田大学政治経済学部教授)

参 考 文 献

- [1] 梅田靖：「インバース・マニファクチャリング」, 工業調査会, 1998。
- [2] 金羸載, 松藤敏彦, 田中信寿：“家庭系ごみから生産されたごみ燃料の性状に関する研究”, 廃棄物学会論文誌, 第6巻1号, pp. 7-15, 1995。
- [3] 久保田宏, 松田智：「廃棄物工学」, 培風館, 1995。
- [4] 小島紀徳：「二酸化炭素問題のウソとホント」, アグネス承風社, 東京, 1994。
- [5] 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。
- [6] 永田勝也, 嬉野通弥：“RDFの有効性に関する検討”, 廃棄物学会論文誌, 第7巻4号, pp. 282-293, 1996。
- [7] 中村慎一郎：“廃棄物循環の線形モデル”, 早稲田大学現代政治経済研究所, WP9802, 1998。

(6) 同様の指摘は [25] 所収の Steenge 論文でもなされている。

- [8] 二階堂副包：「現代経済学の数学的方法」，岩波書店，1960。
- [9] 松藤敏彦，田中信寿，金嬴載：“原料ごみ質及びプロセスの異なる RDF 生産施設のエネルギー・コスト・環境影響評価”，*廃棄物学会論文誌*，第 7 卷 2 号，pp. 68-77，1996。
- [10] 室田武，多辺田政弘，槌田敦編著「循環の経済学」，学陽書房，1995。
- [11] 平成 9 年度廃棄物の処理及びリサイクル事業概要，F 市市民部，1997。
- [12] 鷺田豊明：“循環系経済における純生産と資源散逸条件環境”，*経済理論*（和歌山大学経済学会），第 243 号，1991。
- [13] Adriaanse A. et al.: Resource flows: the material basis of industrial economies, World Resource Institute, Washington, D.C. 1997.
- [14] Ayres, Robert: “Statistical measurers of unsustainability”, *Ecological Economics* vol. 16, pp. 239-255, 1996.
- [15] Ayres, Robert and Allen Kneese: “Production, consumption, and externalities”, *American Economic Review* vol. 59, pp. 282-297, 1969.
- [16] Cleveland, C. J. and M. Ruth: “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*, vol. 22, pp. 203-224, 1997.
- [17] Common, Mick: “Is Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz the important point?”, *Ecological Economics*, vol. 22 (3), pp. 277-279, 1997.
- [18] Duchin, Faye: “The conversion of biological materials and waste to useful products”, *Structural Change and Economic Dynamics* vol. 1, pp. 243-62, 1990.
- [19] Georgescu-Roegen, Nicholas: “Energy analysis and economic valuation”, *Southern Economic Journal* 45, pp. 1023-58, 1979.
- [20] Leontief, Wassily: “Environmental repercussions and the economic structure; an input output approach”, *Review of Economics and Statistics*, vol. 52, pp. 262-71, 1970.
- [21] Nakamura, Shinichiro: “An inter-industry model for analyzing economic- and environmental effects of the recycling of waste”, *Ecological Economics* vol. 28 (1), pp. 133-145, 1999.
- [22] 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.
- [23] Proops, John L. and Malte Faber: Reducing CO₂ Emissions, Springer, Berlin, 1993.
- [24] Uno, Kimio and Peter Bartelmus: Environmental Accounting in Theory and Practice, Kluwer, Dordrecht, 1998.
- [25] “Environmental extensions of national accounts: The NAMEA framework”, *Structural Change & Economic Dynamics*, vol. 10 (1), 1999.

A 産業連関表への廃棄物・リサイクルの取り込み

A.1 Leontief

廃棄物問題への産業連関表の応用に先鞭を付けたのは Leontief [20] である。Leontief の関心は、1960年代後半から社会問題化してきた大気汚染の防除への応用にあった。大気汚染を広義の廃棄物の一つと見なせば、Leontief モデルは先駆的な産業連関表への廃棄物の取り込みである。Leontief モデルを表形式で表したのが表 A.1である。

表 7：拡張産業連関表：Leontief

	産業	廃棄物処理	最終需要	生産(処理)量
産業	X_{oo}	X_{oz}	X_{of}	X_o
廃棄物発生	W_{wo}		$-X_{wf}$	X_z
本源的投入	X_{vo}	X_{vz}		X_v

Leontief モデルの特徴は次のようにまとめる事が出来よう。

1. 廃棄物と廃棄物処理が 1 体 1 対応する
2. 廃棄物は処理によって「消失」する：残滓は発生しない
3. 廃棄物再資源化を考慮していない (W_{wo} は非負)
4. 最終需要 (家計) は廃棄物を排出しない： X_{wf} は許容量を表す

1 番目の特徴は、このモデルが大気汚染物質とその除去部門を考慮するために作成された経緯に由来する。2 番目の点は、物質収支の観点からは不満足である。仮に、適正処理を施した排ガスはその限りにおいて「大気汚染物質」では無くなったとしても、除去部門には必ずフィルタに捕獲された煤塵の如き残滓が発生するはずである。第 3 点は、残滓が発生しないから考慮する必要がないわけである。最後の点は、家計が自家輸送を通じて大気汚染に大いに貢献している事実を無視しているごとくとられるかもしれないが、これは家計が自家輸送を購入していると設定すれば解決可能である。

それよりも重要なのが、 X_{wf} は大気汚染許容量を表すと言う点である。この点は、次に紹介する Duchin モデルにも共通するので重要である。表の第 3 行の恒等式は以下のようにになっている。

$$W_{wo} \text{ (廃棄物発生量)} - X_{wf} \text{ (受容廃棄物量)} = X_z \text{ (廃棄物除去量)}$$

A.2 Duchin

表 8 は Faye Duchin [18] による Leontief モデルの拡張を表す。Duchin モデルの特徴は以下の通りである。

1. 廃棄物と廃棄物処理が 1 体 1 対応
2. 廃棄物処理によって残滓が発生
3. 廃棄物再資源化を非明示的に考慮 (W_{wo} は純排出)
4. 最終需要 (家計) は廃棄物を排出しない: X_{wf} は許容量

表 8 : 拡張産業連関表 : Duchin

	産業	廃棄物処理	最終需要	生産(処理)量
産業	X_{oo}	X_{oz}	X_{of}	X_o
廃棄物発生	W_{wo}		$-X_{wf}$	X_z
本源的投入	X_{vo}	X_{vz}		X_v
環境負荷因子	W_{eo}	W_{ez}		W_e

第 1 及び 4 点は Leontief と同一である。しかし、第 2 点及び第 3 点においては、Leontief モデルを拡張している。第 3 点の廃棄物再資源化を明示的に考慮し、更に廃棄物と処理の非対称性と最終需要部門における廃棄物発生をも考慮して、出発点となった Leontief モデルをその制約的な 4 点について全て一般化したのが筆者の提案する「リサイクル産業連関モデル」なのである。

A.3 その他の関連研究

A.3.1 NAMEA

「リサイクル産業連関表」は、いわゆる環境勘定の一つとして見なすことも出来る。環境勘定を巡っては「緑の GDP」から「物質産業連関表」まで、多岐にわたった議論がなされており、その全貌を体系的に捉えるのは必ずしも容易ではない ([24] は環境勘定についての優れた展望である)。特に、環境負荷の金額評価を巡っては大きな基本的困難があるようである。環境勘定としてみたときの「リサイクル産業連関表」の特徴は、廃棄物の量的流れに問題を限定することでこの面倒な金額評価問題を回避していることにある。この意味で、「リサイクル産業連関表」はオランダ統計局の研究グループが提唱している NAMEA [25] の概念に極めて近い。実際、リサイクル産業連関表は NAMEA で再資源化を明示的に表した物であると言うことが出来る。すなわち、環境勘定としては「リサイクル産業連関表」は NAMEA に属するのである (この点をご指摘いただいた有吉範敏氏 (熊本大学) に感謝する)。

A.3.2 二酸化炭素分析

産業連関表を用いた、化石燃料消費を中心とした人為起源の二酸化炭素発生分析に触れておく。二酸化炭素の固定と再資源化については技術的可能性が検討されているが、殆ど実用段階には至っていないようであるし、その是非を巡っても検討の余地が大きいようである [4]。従って、産業連関表を用いた研究はもっぱら二酸化炭素の排出に関わっている。勘定体系としては、リサイクル産業連関表の環境負荷因子として二酸化炭素を計上し、廃棄物発生と廃棄物再資源化をゼロとした物に対応する。海外の例としては、[25] や [23] 等がある。本邦における代表的研究は、森口祐一氏をはじめとする国立環境研究所グループ [5] によるものである。我が国の産業連関表の規模と精度が世界最高水準であることを反映して、国立環境研究所グループの研究は前出の海外研究事例とは桁違いの規模と精度を有している。ちなみに、[23] が47部門表、オランダ、ドイツ、英国などの研究グループ [25] が20数部門表であるのに対して、[5] は407部門表である。

B データ

B.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 $(I-\hat{M})A$ およびF市内で生産された財・用役に対する最終需要 $(I-\hat{M})F + E$ を求めた。

B.2 廃棄物関連データ

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、

表 9 : F市リサイクル産業連関表部門分類

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・装備品	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

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 9 は、部門分類を示す。