

廃棄物循環再利用の経済環境効果の産業連関分析：
古紙再利用の数値例

中村慎一郎

No. 9703

正誤表: WP9703

1. P.1, 脚注 12行目。
significantly を 池田 に訂正。
2. P.6, テキスト5行目。
 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=2}^n X^{(n)}$ を $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=2}^n X^{(i)}$ に訂正。

廃棄物循環再利用の経済・環境効果の産業連関分析： 古紙再利用の数値例*

中村慎一郎

〒169-50 早稲田大学政治経済学部

nakashin@mn.waseda.ac.jp

1997年4月18日

1 序

廃棄物には、財/サービスの生産/消費活動に伴って(現行の技術のもとでは)経済的価値を持たない副産物として発生するものと、本来は経済的価値を有していた(それゆえに生産された)が、時間の経過の中でその価値を失ったために廃棄物に転化したものがある。前者の例として、 CO_2 等の排気ガス、排水、汚泥、後者の例として、古紙、建築廃材、廃自動車、等が挙げられる。廃棄物はストックの性質を持ち、自然環境で分解/浄化される部分を除いて生産/消費活動が行われた分だけ蓄積していく。この蓄積を放置すれば、これが我々の生存環境に甚大なる影響を持つまでに増加する事は明白である。実際、これは埋め立て処分場の絶対的不足、オゾン層の破壊、温暖化、と言った形で既に顕在化している。

本稿の目的は、産業連関分析の方法を用いて廃棄物循環再利用の経済/環境への効果を数量的に分析する方法を提示し、合わせてその数値例を示す事にある。廃棄物をはじめとする環境問題は、温暖化が正にそうであるように体系(システム)全体に関わる部分が多いので、部分的な定性的議論に加えて、体系全体の相互依存関係を考慮した定量的分析が重要である。廃棄物再利用に関しても、再利用のもたらす廃棄物削減効果と、廃棄物回収のための輸送活動により生じる排気ガスの効果との定量的比較が問題になる。

産業連関分析の廃棄物問題への応用は Wassily Leontief(1970) が産業部門における大気汚染物質の発生と除去を考慮したことに始まり、Faye Duchin (1990) 等により拡張が行われている。冒頭に挙げた廃棄物の2種類のうち、これらの研究が対象としているのは主に前者であり、廃棄物の回収/再利用/最終処理過程は明示的な形で考慮されていない。これに対して、中村(1996)は後者の種類の廃棄物(時間の経過により財が転化した廃棄物)を分析対象とするべく、回収/再利用/最終処理過程を明示的に考慮した拡張産業連関モデルを作成した。¹

中村(1996)は、数量モデルとその双対としての価格モデルの両方を考察した。本稿では廃棄物循環再利用がもたらす経済/環境効果を数量的に分析する観点から、数量モデルに焦点を与える。現行の産業連関表は、このモデルを実証化するために必要な拡張データを提供しないので、実証モデルを即座に作る事は出来ない。そこで、理論モデルの実証的挙動を分析するための試行として、数値的ひな型を作成する。ひな型とは言っても、何がしかの実証的裏付けを持つ物でなければ、結果は経済学的な意味を持たない。

*オランダNAMEAデータを提供いただいた Steven Keuning 氏(オランダ中央統計局長)、及び、有益なコメントを頂いた池田 明由氏に深く感謝する。

¹鷲田(1991a)は、廃棄物再利用にかかる経済学上の基礎的問題を、多部門線形モデルの枠組みで理論的に分析した重要な研究である。更に、鷲田(1991b)は廃プラスチック油化についての実証応用例を与える。significantly他(1996)は、廃棄物に加えて生産の過程で発生する副産物の再利用をも考慮した詳細な産業連関モデルを作成した。しかし、回収/再利用の過程が隠密的に扱われておらず、又、廃棄物減量効果も考慮していない。

オランダ統計局作成の NAMEA (National Accounting Matrix including Environmental Accounts) 1992 年データと日本についての廃棄物回収及び古紙再利用データを基に、古紙再利用についての数値的ひな型を作成した。オランダのデータを用いたのは、産業連関表に付帯する形で詳細な環境負荷因子排出情報が計上されているからである。古紙を選んだのは、紙廃棄物発生量の増大が一般廃棄物処理システムを圧迫しつつある事、及び、古紙循環再利用が森林資源の保全を通じて生態系の保全に少なからず貢献する、と考えられるからである²。

作成したひな型について、廃棄物循環再利用についてのいくつかのシナリオを想定し、その経済/環境効果(2酸化炭素排出量)を計算する³。数値例についての試算結果は、モデルの応用可能範囲とその限界を示すためにも有効であると思われる。

以下、2節で理論モデルを展開し、3節は数値ひな型の作成といくつかのシナリオのもとでの計算結果を示す。結語と今後の展開方向を与えるのが最後の4節である。

2 理論モデル

2.1 基本的設定

産業部門で生産された全ての財は、時間と共にその有用性を消失することにより、廃棄物に転化する可能性を持つ⁴。以下では、特に断らない限り、廃棄物とはこの転化により生じたものを指す。

よく定義された産業部門の数を $n > 1$ とすると、廃棄物の数は高々これからサービス部門の数を引いた $k < n$ である。完全な分別回収を想定して、再生財生産のための廃棄物回収と再生財生産部門の部門数は等しいとし、これを m と置く。 $m \leq k$ である。 k 種類の廃棄物に対応して k 個の最終処理部門(焼却/埋め立て等)があるとする。

2.1.1 産業生産物勘定

産業部門を添え字 '0'、回収部門を添え字 'z'、再生財生産部門を添え字 'r'、廃棄物処理部門を添え字 'w'、最終需要部門を添え字 'f'、でそれぞれ表す。以下、用語の混乱を避けるために、このように定義された $0, z, r, w, f$ で表される物を "ブロック" と呼び、各ブロックの構成要素を部門又は活動と呼ぶ事にする。

産業ブロック第 i 部門の生産量を $x_{0:i}$ とすると、これは自己部門を含む産業ブロック、回収ブロック、再生財生産ブロック、廃棄物処理ブロックで中間投入として用いられたり、最終財として最終需要ブロックに投入される。この第 i 部門の生産物のうち、産業ブロック第 j 部門に投入されたものを $x_{00:ij}$ 、回収ブロック第 h 部門に投入されたものを $x_{0z:ih}$ 、再生財生産ブロック第 u 部門に投入されたものを $x_{0r:iu}$ 、廃棄物処理ブロック第 v 部門に投入されたものを $x_{0w:iv}$ 、最終需要ブロックに投入されるたものを $f_{0:i}$ で表す。すると、以下の数量恒等式が成立立つ。

$$\sum_{j=1}^n x_{00:ij} + \sum_{h=1}^m x_{0z:ih} + \sum_{u=1}^m x_{0r:iu} + \sum_{v=1}^k x_{0w:iv} + f_{0:i} = x_{0:i}, i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

2.1.2 廃棄物勘定

$z_{t,j}$ を t 期期初の第 $j, j = 1, \dots, k$ 廃棄物ストックの量とする。この水準は t 期以前における財生産量/財耐久性/消費者の選好等に依存しているが、本稿ではこれを所与とし、その決定因には触れない。 $z_{j,t}$ の

²生態系の保全と生物物理学的に持続可能な経済活動との関連については Smith (1996) を見よ。

³池田他 (1996, 第7章) は、独自に推定したデータを用いて、古紙循環再利用の CO_2 発生量への効果を、副産物である黒液の自家発電への投入等も考慮して分析した。しかし、脚注 1 で触れたように、最終廃棄処理削減の効果を考慮していない。

⁴この節で展開される内容は中村 (1996) による所が多いが、修正/拡張を加えている。

うち, t 期中に回収されて再利用される部分を $x_{z:j}$ で表す⁵. 残りの $x_{w:j}$ は廃棄物として埋め立て/焼却その他の方法で最終廃棄処理される. すなわち, 廃棄物について以下の恒等式が成り立つ

$$\text{廃棄物ストック} = \text{再利用のための回収} + \text{最終廃棄処理}, \text{ 又は}$$

$$z_j = x_{z:j} + x_{w:j}. \quad (2)$$

最終廃棄処理のためにも当然回収は必要であり, 上記 "最終廃棄処理" はこれを含む. あえて "再利用のための回収" としたのは, 再利用における分別回収の重要性を強調するためである. z_j が所与であることから, $x_{z:j}$ が決まると $x_{w:j}$ は(2)から残差として決まる.

2.1.3 回収廃棄物勘定

回収された廃棄物 $x_{z:j}$ は, 再生財生産ブロックで原材料として用いられる ($x_{zr:ju}, u = 1, \dots, m$) が, 在庫/輸出の形で最終需要ブロックで需要される部分 ($f_{z:j}$) も存在するだろう. すなわち

$$\sum_{u=1}^n x_{zr:ju} + f_{z:j} = x_{z:j} \quad (3)$$

再生財生産ブロックを経由すること無く, 廃棄物が直接産業ブロックに中間財として投入されることはないとする(仮に産業ブロックが再生財生産事業を行っているとしても, これを別の生産活動とみなす). この仮定を置かないと, Duchin がしたように, 再生財生産を産業ブロックにおける副産物, すなわち負値を持つ投入として処理することになる. 負の投入を排除する事は, 産業連関モデルに経済学的に意味のある解を持たせるために重要である.

回収ブロックは産業ブロックの生産する中間財 X_{0z} (主に, 補助材料/エネルギー/物流サービス) と労働(回収作業者/車両運転者など)/資本用役(車両他) を投入する.

ここで, 記号について整理しておく. 以下では, 大文字を用いて行列又はベクトルを表し, 小文字によりその個別要素を表す. 例えば, $x_{0w:ij}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$ から構成される $n \times m$ 行列を X_{0w} と書く.

2.1.4 再生財勘定

再生財生産ブロックは, 産業ブロックの生産する中間財 X_{0r} と労働/資本用役を用いて, X_z の廃棄物から再生財を X_r 生産する. 第 i 再生財 $x_{ri:i}$ は産業ブロックで中間財として投入されたり ($x_{r0:ij}, j = 1, \dots, n$), 最終財として使用される ($f_{r0:i}$). 再生財について以下の恒等式が成り立つ

$$\sum_{j=1}^n x_{r0:ij} + f_{r0:i} = X_{r0:i} \quad (4)$$

$f_{r0:i}$ も, $f_{z:j}$ と同様に在庫変動を含むものとする.

2.1.5 最終廃棄物処理量と環境負荷因子

再生財の生産量が決まると, (2) から最終廃棄物処理量も決まる. 廃棄物処理ブロックでは, 産業ブロックの生産する中間財 X_{0w} と労働/資本用役をもちいて処理を行う.

産業/回収/再生財生産/廃棄物処理の何れのブロックでも, その活動によって 2酸化炭素その他の環境負荷因子が環境に放出される(家計部門の自家輸送による 2酸化炭素その他の環境負荷因子放出は大きな割合を占めるが, 本稿では最終需要を所与としているので分析の対象としない). q 種類の環境負荷因子が識別されているものとし, これを添え字 e であらわす. 又, 各ブロックでの $q \times 1$ 排出量ベクトルを $X_{e0}, X_{ez}, X_{er}, X_{ew}$ とする.

⁵以下, 特に誤解を生むと考えられる場合を除いて, 時間添え字 t を省略する.

2.2 拡張された産業連関表

以上の設定の下で、産業部門(0), 回収部門(z), 再生財生産部門(r), 廃棄物処理部門(w)と最終需要(f)からなる5ブロックの間での財/サービスと廃棄物/環境負荷因子の投入と产出の循環は、拡張された産業連関表としてTable1の様に表せよう。ここで、 X_{r0} は $x_{r0:ij}$ を*i*行*j*列要素とする*m*×*n*行列で、その

	産業	再生財生産	回収(物量)	廃棄物処理(物量)	最終需要	产出/合計
産業	X_{00}	X_{0r}	X_{0z}	X_{0w}	F_0	X_0
再生財生産	X_{r0}	0	0	0	F_r	X_r
回収(物量)	0	X_{rz}	0	0	F_z	X_z
資本用役	K_0	K_r	K_z	K_w		
労働用役	L_0	L_r	L_z	L_w		
環境負荷因子(物量)	X_{e0}	X_{er}	X_{ez}	X_{ew}		

Table 1: 財・サービス・廃棄物の産業連関

他の行列も同様に定義されている。

廃棄物の量をストックとして外生的に扱っているので、Leontief/Duchin のモデルと異なり、廃棄物処理ブロックから他のブロックへの投入はない。廃棄物は全て回収後に再利用されるから、Duchin モデルにおけるような負値投入も無く、各変量は全て非負である。勿論、フローとしての廃棄物を加えることも可能である。その場合には、その処理部門の列と発生行を新たに加えれば良い。

2.2.1 価値表示と物量表示

理論的な議論においては、*n*に非常に大きな値を与えることで、物量単位のみを用いた産業連関表を想定することが出来る。しかし、実証的な観点からは、すべての投入产出を物量単位で表示できるほどに*n*を大きくすることは非現実的である。従って、異なる財/サービスの集計を可能にするために、少なくとも部分的に価格表示を用いざるを得ない。これに対して、廃棄物は多くの場合に市場価値を持たないから、必然的に物量表示が用いられる。すなわち、拡張された産業連関表では価値表示と物量表示が混在する。

拡張産業連関表は、市場価値を持たない廃棄物のある部分が、回収され、価値を持つ再生財として産業ブロックで再利用され、残りの部分が廃棄処理される過程を記述するものである。拡張産業連関表に特徴的なのが、物量表示の行/列と価値表示の列/行の交点にある X_{rz} , X_{oz} 及び X_{ow} である。 X_{rz} は1貨幣単位の再生財生産に直接必要な廃棄物の物量(例えばトン表示)を、 X_{oz} は1物量単位の廃棄物を回収するために必要な産業ブロックからの投入額を、 X_{ow} は1物量単位の廃棄物を廃棄処理するのに必要な産業ブロックからの投入額を、それぞれ表している。これらの諸量は通常の産業連関表では計上されないので、実証分析においてはその推定が重要な課題となる。

2.3 線形数量モデルとその解

今、 $a_{kl:ij} \equiv x_{kl:ij}/x_{l:ij}$, $k \in (0, r, z, K, L, e)$, $l \in (0, r, z, w)$ とすると、これは*l*ブロックの*j*部門の生産/活動を1単位行うのに直接必要な*k*ブロック*i*部門からの投入を表す。ただし、 $a_{el:ij}$ は*l*ブロック*j*部門の生産/活動を1単位行う事により排出される第*i*環境負荷因子の量を表す。こうして定義した投入係数を用いて、Table1からTable 2の投入係数行列を得る。ここで、 A_{r0} は $a_{r0:ij}$ を*i*行*j*列要素とする*m*×*n*行列で、他の行列も同様に定義されている。

投入/産出	産業	再生財生産	回収	廃棄物処理
産業	A_{00}	A_{0r}	A_{0z}	A_{0w}
再生財生産	A_{r0}	0	0	0
回収	0	A_{rz}	0	0
資本用役	A_{K0}	A_{Kr}	A_{Kz}	A_{Kw}
労働用役	A_{L0}	A_{Lr}	A_{Lz}	A_{Lw}
環境負荷因子	A_{e0}	A_{er}	A_{ez}	A_{ew}

Table 2: 財・サービス・廃棄物の投入係数行列

以下では Leontief 固定投入係数を仮定し、投入係数行列は投入産出の技術的関係について当該期間内において有効な1次近似を与えるとする。すなわち、投入係数行列は単に勘定体系から恒等的に得たものではなく、技術パラメータであるとする。

環境負荷因子の排出量と経済活動水準の間に線形性を仮定する際には、注意が必要である。例えば CO_2 の場合には、これが燃料消費に比例する事から、燃料消費が経済活動水準に比例的な限りにおいて、線形性の仮定は妥当だと考えられる。しかし、 NO_x について同様の仮定を置くのは適当でない。以下の議論では、環境負荷因子としてもっぱら CO_2 を考慮する。⁶

仮定により投入係数は全て非負であるから、非負行列についての Hawkins-Simon 条件(二階堂 1960, pp. 12-13)が満たされているならば、所与の最終需要を満たすために必要な産業/回収/再生財生産ブロックの産出額/活動量は、廃棄物処理ブロックをひとまず無視する事にして、以下のように求められる(添え字 "⁽¹⁾" は廃棄物処理ブロックを無視している事を表す)。

$$\begin{aligned} X^{(1)} &= \begin{pmatrix} X_0^{(1)} \\ X_r^{(1)} \\ X_z^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (I_n - A_{00}) & -A_{0r} & -A_{0z} \\ -A_{r0} & I_m & 0 \\ 0 & -A_{rz} & I_m \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} F_0 \\ F_r \\ F_z \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} B_{00} & B_{0r} & B_{0z} \\ B_{r0} & B_{rr} & B_{rz} \\ B_{z0} & B_{rz} & B_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_0 \\ F_r \\ F_z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 I_n は n 次の単位行列、 B_{ij} は分割逆行列の各構成要素を表す。こうして $X_z^{(1)}$ が決まると、(2) から処理されなくてはならない廃棄物の量 $X_w^{(1)}$ が決まる:

$$X_w^{(1)} = Z - X_z^{(1)} = Z - (B_{z0}F_0 + B_{rz}F_r + B_{zz}F_z) \quad (6)$$

この様にして求められた 4 ブロックの生産量 $X^{(1)\top} = (X_0^{(1)\top}, X_r^{(1)\top}, X_z^{(1)\top}, X_w^{(1)\top})$ は、しかし未だ最終的な水準では無い(^T は行列の転置を表す)。それは、 $X_w^{(1)}$ が未処理のまま残されているからである。 $X_w^{(1)}$ を処理するために追加的に必要な最初の 3 ブロックの生産額/活動量は、これを $X^{(2)}$ で表す:

$$X^{(2)} = \begin{pmatrix} X_0^{(2)} \\ X_r^{(2)} \\ X_z^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{00} \\ B_{r0} \\ B_{z0} \end{pmatrix} A_{0w} X_w^{(1)}.$$

しかし、波及効果の伝播はこれで終了するのではない。なぜなら、追加的な廃棄物再利用 $X_z^{(2)} > 0$ の結果、廃棄物処理量がその分減少し(廃棄物は所与のストック量である事を想起せよ)、廃棄物処理ブロック

⁶この点は池田明由氏の指摘による。固定排出係数を用いた2酸化炭素排出量に関する最近の実証研究として、Proops, Faber and Wagenaars (1993), 池田他 (1996) がある。

に由来する他ブロックへの派生需要が減少するからである。この減少した派生需要 $X^{(3)}$ は、以下で与えられる。

$$X^{(3)} = - \begin{pmatrix} B_{00} \\ B_{r0} \\ B_{z0} \end{pmatrix} A_{0w} X_w^{(2)} = - \begin{pmatrix} B_{00} \\ B_{r0} \\ B_{z0} \end{pmatrix} A_{0w} B_{zo} A_{0w} X_w^{(1)}$$

従って、一般に $n > 2$ について $X^{(n)}$ は以下で与えられる

$$X^{(n)} = (-1)^{n-2} \begin{pmatrix} B_{00} \\ B_{r0} \\ B_{z0} \end{pmatrix} A_{0w} (B_{zo} A_{0w})^{n-2} X_w^{(1)}.$$

今、 $D \equiv B_{zo} A_{0w}$ として、 D の固有値がすべて絶対値で 1 未満ならば、次式が成立する、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n (-D)^i = (I + D)^{-1}.$$

ゆえに、全ての効果を加えた最終的な産出量 X は、1次効果 $X^{(1)}$ に $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=2}^n X^{(n)}$ から成る派生需要の和(2次効果)を加えたものに等しい:

$$\begin{aligned} X &= \begin{pmatrix} X_0 \\ X_r \\ X_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{00} & B_{0r} & B_{0z} \\ B_{r0} & B_{rr} & B_{rz} \\ B_{z0} & B_{rz} & B_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_0 \\ F_r \\ F_z \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} B_{00} \\ B_{r0} \\ B_{z0} \end{pmatrix} A_{0w} (I + D)^{-1} \left\{ Z - (B_{z0} B_{rz} B_{zz}) \begin{pmatrix} F_0 \\ F_r \\ F_z \end{pmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

埋め立て/焼却/海洋投棄といった廃棄物処理への依存を減じる方策として、廃棄物再利用が重視されてきている事の一つの大きな要因は、前者が環境に対して負の影響を持つと考えられる因子を高い割合で発生させるからである(McClain 1995)。ここに2次効果を分析する事の重要性がある。2次効果の項は、本来、最終廃棄物処理の波及効果を表すものであるが、特定の再利用計画による廃棄物減少の効果を分析するために用いる事も出来る。実際、次節における数値例が対象とするのは、この限定的な意味での2次効果である。

環境負荷因子放出量を計測するために利用できるのが、Table 2 における環境負荷因子発生係数行列 $A_e = (A_{eo}, A_{er}, A_{ez}, A_{ew})$ である。ある最終需要/技術/廃棄物ストックの下での産出量ベクトルを X^0 とすると、この生産活動に伴う環境負荷因子、例えば CO_2 、放出量ベクトル X_e^0 は $A_e X^0$ で与えられる。この測度を用いて、様々な最終需要、技術、廃棄物ストックの組み合わせが持つ経済/環境効果を、数量的に比較する事が出来よう。 X_e^0 は $q \times 1$ ベクトルであるが、各構成要素についての相対的評価基準が有るならば(例えば2酸化炭素排出量換算を用いる)、それを反映した集計量を用いて、複数の選択可能な最終需要/技術が環境に対して持つ効果を1元的に比較する事が出来るであろう。

3 数値例:古紙再利用

この節では、前節で展開された理論モデルの実証的挙動を分析するための試行として、古紙循環再利用についての数値的ひな型を作成する。基礎的な産業連関データとして、オランダ統計局作成の NAMEA データを用いる。

3.1 オランダ統計局 NAMEA データ

オランダ統計局 NAMEA データは、SNA (国民経済計算体系)に詳細な環境情報を付加して拡張した勘定体系である(詳細については Haan and Keuning 1996, Central Bureau voor de Statistiek 1996 を参照の事)。ひな型の骨格となる産業連関表に関する部分は、37行20列の商品×産業行列(いわゆる U 表)と20行37列の産業×商品行列(いわゆる V 表)から構成されている。環境負荷因子排出量は、排出産業部門ごとに11の因子について、11行20列の行列形式で表されている(元データでは、これに原油と天然ガスが加わるが、本稿では除外した)。環境負荷因子排出量データは、産業ごとにのみ計上されているので、 U , V 表を変換して、産業×産業の中間投入行列を持つ通常の形式の産業連関表を得た(変換の詳細は付録 A を見よ)。

Table3 は、産業と環境負荷因子の分類を示す。価値表示部分の単位は100万ギルダー(1992年5月の為替レート換算で約7100万円)、環境負荷因子に関しては CFS とハロンが 1000Kg, その他はすべて 1000t 単位である。廃棄物/排水は排出部門ごとの総量であって、組成は計上されていない。先にも述べたように、以下の数値例では、2酸化炭素排出量のみを取り上げ、その他の因子は考慮しない。

	Industry	Emissions
1	Agriculture, hunting, forestry, fishing	CO_2
2	Crude petroleum and natural gas	N_2O
3	Other mining and quarrying	CH_4
4	Food, beverage and tobacco industry	$CFCs$ and halons
5	Textile, wearing apparel and leather industry	NO_x
6	Wood and furniture industry	SO_2
7	Paper, paper products, printing and publishing industry	NH_3
8	Petroleum industry	P
9	Chemical industry	N
10	Rubber and synthetic materials processing industry	Waste
11	Manufacturer of building materials, earthware and glass products	Waste water
12	Manufacturer of basic metals	
13	Manufacturer of metal products and machinery	
14	Industrial manufacturing n.e.c.	
15	Electricity	
16	Other public utilities	
17	Construction	
18	Transport and storage	
19	Environmental cleansing and sanitary services	
20	Other services	

Table 3: Classification of industries and emissions in the Dutch NAMEA

3.2 古紙の循環再利用

紙の原料であるパルプには、木材チップや素材(丸太)を原料に製造されるヴァージンパルプ(化学パルプと機械パルプから成る。以下では、1次パルプと呼ぶ事にする。)と、古紙を原料に製造される古紙パルプ(以下、2次パルプと呼ぶ)がある(森澤他 1993p. 20, 池田他 1996, p. 156)。1次パルプと2次パルプ

は、紙の生産において概ね代替的と考えられるが、その程度は生産される紙の品質や古紙の品質に大きく依存している。

古紙/パルプ/木材チップ/紙についての単純化した投入产出関係を、Table 2 の形で表したのが Table 4 である。

		(1) 紙	(2) 1次パルプ	(r) 2次パルプ
(2)	1次パルプ	a_{21}	0	0
(3)	木材チップ	0	a_{32}	0
(r)	2次パルプ	a_{r1}	0	0
(w)	古紙	0	0	a_{wr}

Table 4: 製紙産業における古紙の循環再利用

次に必要なのは、オランダ産業連関表の枠組みの中に Table 4 を組み込む事である。紙/木材チップ/1次パルプは、何れもオランダ産業連関表では個別産業部門として計上されていない。そこで、紙を第7部門"紙/紙製品/印刷/出版"で、木材チップは"木材/家具"(以下簡略化して、紙部門と呼ぶ)で、1次パルプは"紙/紙製品/印刷/出版"(以下簡略化して、木材部門と呼ぶ)の一部であるとして、それぞれ置き換える。

紙部門は一つなので、最終部門を含む他部門への紙部門からの投入は2次パルプの投入比率に依存しない、すなわち、紙部門の産出物に対する需要は2次パルプの投入比率に関して無差別である、と仮定する⁷。

再生財と1次財の代替/再利用技術/古紙回収/古紙廃棄処理についての情報は、既存の産業連関表では提供されないので、独自の設定/推定が必要である。次にその詳細を述べる。

3.3 数値設定の詳細

3.3.1 2次パルプと1次パルプの代替

2次パルプは紙部門に投入され、紙部門の自己投入と木材製品に対して代替的であるとする。 $\theta \in [0, 1]$ を再生財利用率を表すパラメータとしてして、 $(a_{8,7} + a_{7,7})(1 - \theta)$ を1次パルプ投入、 $a_{7,7}\theta$ を2次パルプ投入、とする。 θ は外生的に与える。

3.3.2 再利用技術

a_{zr} は、1貨幣単位(100万ギルダー)の2次パルプ生産に必要な古紙の量(100t)である。古紙投入量以外の投入に関しては、基本的に価値額表示の紙部門の投入係数を用いるが、天然系部門(1-6部門)からの投入をゼロとし、更にその他の内生部門からの投入に0.5を乗じた。これは、古紙は一度は製品として生産されたものであるから、新たに生産する場合よりも必要投入量が少ない事を意味する。森澤他によれば、1tの2次パルプを生産するために必要な古紙の量は、古紙組成に依存して1.07から1.25tである。そこで、標準的な場合(コントロール)として、1tの2次パルプを生産するために1.2tの古紙が必要であるとする。紙・パルプ統計年報(1992年版, p. 33)によれば、1992年において紙/板紙の1tあたり価格は約10万円である。為替レート(1992年5月平均)換算で、これは1tあたり1400ギルダーに該当する。2次パルプの価格を1tあたり1000ギルダーと仮定し、100万ギルダー(1000t)の2次パルプ生産に必要な古紙投入量は1200tとなる。すなわち、 $a_{zr} = 1.2$ を得る。

⁷現実には、この無差別でない事が廃棄物循環再利用を妨げる一つの要因になっている。

3.3.3 回収

基本的に既存輸送部門の価値額表示投入係数を用いるが、1000tあたり回収に必要な活動であるので、変換が必要である。田中(1996, p.426, Table7)によれば、1000tの廃棄物回収に要する回収費用は、1700万円である。為替レート換算によれば、これは約23万8千ギルダーに該当する。価値額表示投入係数の列和は、100万ギルダーなので、この列の投入係数を全て.238で乗じて、1000t回収に要する価値投入係数ベクトルを得る。

3.3.4 最終廃棄処理

基本的に既存の環境浄化部門(第19部門)の価値額表示投入係数を用いるが、1000tあたり最終廃棄に必要な投入水準に変換する必要がある。処理量が既知なので、環境浄化部門の生産額を処理量で除して1000tあたりの最終処理(主に焼却)費用を求め、価値額表示投入係数の列和がこれと等しくなるように投入係数を定数倍した。

3.4 シナリオに基づく計算結果

3.4.1 シナリオの設定

以上の設定のもとで、基本的な3つのパラメータ(再生財使用割合 θ 、再利用技術効率 a_{zr} 、回収効率 β)の組み合わせについて、次の6つのシナリオを想定した。オランダ表では廃棄物循環再利用が別途計上されていないので、仮に古紙の循環再利用が実際行われているとしても、これを識別する事が出来ない。そこで、実現値は古紙の循環再利用が行われていない状態にある、と想定してシナリオを設定した。

標準値:コントロール 再生財使用割合20%, 回収効率1.0, $a_{zr} = 1.2$

A: 再生財使用割合増加 再生財使用割合40%, その他はコントロールと同じ。

B: 回収効率低下 回収効率1.5, その他はコントロールと同じ。

C: 回収効率上昇 回収効率0.5, その他はコントロールと同じ。

D: 再利用効率低下 $a_{zr} = 1.8$, その他はコントロールと同じ。

E: 再生財使用割合増加と回収効率低下 再生財使用割合40%, 回収効率1.5, その他はコントロールと同じ。

再利用技術効率 a_{zr} とは、1tの再生財(2次パルプ)を生産するのに何tの廃棄物(古紙)が必要かに関わる。より少ない(多い)量の廃棄物から1tの再生財が生産できる時に、効率が上昇(低下)したという事にする。回収効率とは、1tの古紙を回収するのに必要な中間財/サービス投入費用に関わるものである。回収効率1.5とは、1tの古紙を回収するのに必要な中間財/サービス投入費用が1.5倍になる事で、効率の悪化を意味する。特に日本の都市部の道路環境のもとでは、廃棄物回収による輸送活動の増加が渋滞を助長し、これが回収効率を下げる可能性が否定できない。

これらのシナリオについて、式(7)を用いて所与の最終需要(1992年実現値)から派生する生産/回収活動/2酸化炭素排出量を計算した。廃棄物の組成についての情報が得られなかつたので、2次効果の計算においては最終廃棄処分総量ではなく、回収による古紙廃棄物の減少効果のみを求めた。具体的には、(7)の最右辺第2項の{ }内を $-X_z$ と置いた。従って、2次効果は必ず生産活動に対して負の効果を持つ。

3.4.2 結果

Table 5 は計算結果を表す。数値は、産業部門の生産量/古紙回収量/ CO_2 排出量の変化率を表している。特に、産業部門の数値は、何れも実現値に対する変化率を表している。これに対して、古紙回収量の数値は、実現値では回収量をゼロとしているので、標準値に対する変化率を表す。 CO_2 に関しては実現排出量が既知なので、実現値に対する変化率と標準値に対する変化率の双方を求めた。シナリオ毎に2列の数値があるが、1列目は1次効果を、2列目は2次効果を加えた総効果を表している。

廃棄物再利用の効果 先ず、標準値を実現値と比較して、廃棄物再利用の効果を見る事が出来る。1次効果に限った場合、回収活動の増加を反映して石油製品と輸送部門の生産が増加するが、その他の部門では全て生産が減少する。結果として、2酸化炭素排出量も減少する。2次効果を含めた場合、石油製品と輸送部門においても生産が減少し、2酸化炭素排出量は更に減少する。再生財使用率が更に上昇すると、回収古紙は標準値との比較で44%増加するが、1次効果に限っても、石油製品/輸送部門の生産増加率及び2酸化炭素排出量は標準値より低くなる。すなわち、廃棄物再利用の進展に伴う回収活動の増加を原因とする2酸化炭素排出量の純増は見られない。

回収効率 回収効率が50%悪化すると、1次効果では石油製品/輸送/建設の生産が増加し、2酸化炭素排出量も実績値より増加する。しかし、2次効果を含む総合効果で見ると、全ての部門で生産が減少し、2酸化炭素排出量は標準値に比べて微増するが実績値より減少する。回収効率が悪化しても、最終廃棄量の減少が全体的な2酸化炭素排出量削減に貢献する。回収効率の悪化と再生品使用率上昇が同時に起きると、1次効果に限定しても2酸化炭素排出量は標準値より減少する。当然の事ながら、回収効率改善は2酸化炭素排出量を標準値より減少させる。

廃棄物再利用効率 廃棄物再利用の効率が低下すると、同じ最終需要を満たすのにより多くの古紙回収が必要になる。このため、1次効果においては石油製品/輸送/建設部門の生産が増加し、2酸化炭素排出量も実績値より増加する。総効果においては、古紙回収の増加による廃棄処理活動の減少により、2酸化炭素排出量は標準値より減少する。これに対して、廃棄物再利用の効率が上昇すると、(最終需要を所与としている当然の結果として)古紙回収量は減少し、2酸化炭素排出量は実績値より減少するが標準値より微増する。

しかし、数値例であると言う限定条件を付けても、この結果をして廃棄物再利用効率を低下すれば2酸化炭素排出量を増やす事無く廃棄物削減が実現できる、とするのは正しくない。それは物質収支の条件から、再利用効率の低下は廃棄物構成要素の中で再利用されない部分が増える事、すなわち再生財生産ブロックにおける廃棄物発生量の増加を意味するからである。本稿のモデルでは、この点は未だ考慮されていない。

要約 以上の試算結果は、次の2点に要約できよう。

1. 廃棄物循環再利用を増加させることで、2酸化炭素排出量は減少する。これは、廃棄物再利用に必要な廃棄物回収のための輸送活動を含めても成り立つ。
2. 2次効果は、特に2酸化炭素排出量を評価する場合に重要である。回収効率が悪化すると、1次効果における2酸化炭素排出量は廃棄物再利用によりむしろ増加するが、2次効果も含めるならば全体として減少する。

数値例の性格から、この結果から現実に対応可能な含意を導く事は危険である。しかし、特に1番目の結果が、膨大なデータを用いて詳細な分析から得た池田他(1996, p.174)の結果と、少なくとも定性的に整合的である事は興味深い。

Scenario	Control		A		B	
Parameters	$\theta: 0.2, \beta: 1, a_{sr}: 1.2$		$\theta: 0.4, \beta: 1 a_{sr}: 1.2$		$\theta: 0.2, \beta: 1.5, a_{sr}: 1.2$	
sector	first effect	total effect	first effect	total effect	first effect	total effect
Agriculture	-0.00008	-0.00024	-0.00020	-0.00043	-0.00004	-0.00020
Crude petroleum	-0.00046	-0.00162	-0.00100	-0.00267	-0.00039	-0.00155
Other mining	-0.00011	-0.00082	-0.00033	-0.00136	-0.00002	-0.00074
Food	-0.00008	-0.00018	-0.00018	-0.00032	-0.00006	-0.00016
Textile & products	-0.00023	-0.00076	-0.00050	-0.00126	-0.00019	-0.00072
Wood & products	-0.00202	-0.00297	-0.00393	-0.00529	-0.00197	-0.00292
Paper & products	-0.04456	-0.04523	-0.08542	-0.08634	-0.04448	-0.04515
Petroleum	0.00024	-0.00159	0.00019	-0.00243	0.00046	-0.00136
Chemical	-0.00045	-0.00145	-0.00101	-0.00244	-0.00041	-0.00141
Rubber	-0.00039	-0.00137	-0.00089	-0.00229	-0.00036	-0.00134
Building materials	-0.00028	-0.00114	-0.00066	-0.00191	-0.00022	-0.00108
Basic metals	-0.00009	-0.00081	-0.00028	-0.00131	-0.00003	-0.00075
Metal products & machinery	-0.00013	-0.00100	-0.00039	-0.00165	-0.00004	-0.00092
Manufacturing n.e.c.	-0.00010	-0.00086	-0.00032	-0.00141	-0.00003	-0.00079
Electricity	-0.00043	-0.00434	-0.00118	-0.00680	-0.00024	-0.00415
Other public utilities	-0.00017	-0.00182	-0.00045	-0.00282	-0.00011	-0.00176
Construction	-0.00002	-0.00088	-0.00014	-0.00138	0.00005	-0.00081
Transport & storage	0.00018	-0.00066	0.00009	-0.00113	0.00040	-0.00045
Environmental cleansing	-0.00051	-0.00409	-0.00127	-0.00641	-0.00037	-0.00396
Other services	-0.00019	-0.00092	-0.00055	-0.00159	-0.00010	-0.00082
old paper: relative to control			0.43585	0.43541	0.00008	0.00008
CO_2 : relative to actual data	-0.00013	-0.00202	-0.00080	-0.00352	0.00024	-0.00165
CO_2 : relative to control			-0.00067	-0.00150	0.00037	0.00037
Scenario	C		D		E: Combination of A and B	
Parameters	$\theta: 0.2, \beta: .5, a_{sr}: 1.2$		$\theta: 0.2, \beta: 1 a_{sr}: 1.8$		$\theta: 0.4, \beta: 1.5, a_{sr}: 1.2$	
sector	first effect	total effect	first effect	total effect	first effect	total effect
Agriculture	-0.00012	-0.00028	-0.00004	-0.00028	-0.00014	-0.00038
Crude petroleum	-0.00053	-0.00170	-0.00039	-0.00213	-0.00089	-0.00257
Other mining	-0.00020	-0.00091	-0.00002	-0.00109	-0.00020	-0.00123
Food	-0.00010	-0.00020	-0.00006	-0.00021	-0.00015	-0.00029
Textile & products	-0.00028	-0.00081	-0.00019	-0.00099	-0.00044	-0.00120
Wood & products	-0.00206	-0.00301	-0.00197	-0.00340	-0.00387	-0.00523
Paper & products	-0.04464	-0.04530	-0.04448	-0.04548	-0.08532	-0.08623
Petroleum	0.00001	-0.00181	0.00046	-0.00227	0.00051	-0.00210
Chemical	-0.00049	-0.00148	-0.00041	-0.00191	-0.00095	-0.00239
Rubber	-0.00043	-0.00140	-0.00036	-0.00182	-0.00084	-0.00224
Building materials	-0.00033	-0.00120	-0.00022	-0.00152	-0.00058	-0.00183
Basic metals	-0.00015	-0.00087	-0.00003	-0.00111	-0.00020	-0.00123
Metal products & machinery	-0.00021	-0.00109	-0.00004	-0.00136	-0.00027	-0.00153
Manufacturing n.e.c.	-0.00018	-0.00094	-0.00003	-0.00117	-0.00021	-0.00131
Electricity	-0.00062	-0.00453	-0.00024	-0.00611	-0.00091	-0.00653
Other public utilities	-0.00023	-0.00188	-0.00011	-0.00259	-0.00036	-0.00273
Construction	-0.00009	-0.00095	0.00005	-0.00125	-0.00004	-0.00128
Transport & storage	-0.00003	-0.00088	0.00040	-0.00087	0.00040	-0.00082
Environmental cleansing	-0.00064	-0.00422	-0.00037	-0.00574	-0.00108	-0.00622
Other services	-0.00029	-0.00102	-0.00010	-0.00119	-0.00041	-0.00145
old paper: relative to control	-0.00008	-0.00008	0.50012	0.49980	0.43601	0.43558
CO_2 : relative to actual data	-0.00050	-0.00239	0.00024	-0.00280	-0.00027	-0.00299
CO_2 : relative to control	-0.00037	-0.00037	0.00037	-0.00058	-0.00014	-0.00096

(Except for when otherwise stated, the figures refer to the rate of change relative to the actual value.

θ : share of 2nd pulp in pulp input, β : efficiency of collection (inverse), a_{sr} : recycling efficiency)

Table 5: Effects of recycling on industrial production and CO_2 emission under several scenarios

4 結論

廃棄物ストックの回収/再利用/最終処理に関する経済/環境効果を、全経済的な相互依存関係を考慮して分析するために、Leontief/Duchin の産業連関モデルを拡張した理論モデルを作成した。モデルの実証的挙動を分析するための試みとして、オランダ統計局作成の NAMEA データと日本の廃棄物回収及び古紙再利用データを基に、古紙再利用についての数値的ひな型を作成した。

ひな型による計算では、古紙再利用は単に廃棄物を減少させるのみでなく、2酸化炭素排出量を減少させる効果もも合わせ持つ。更に回収効率の上昇は、この傾向を強める。廃棄物再利用が廃棄物を減少させる効果を持つ一方で、回収に伴う輸送活動の増加によって、全体的な2酸化炭素排出量が増加するのではないか、という議論がしばしば行われる。本稿で示された方法は、この種の議論に対して有効な量的情報を提供すると考えられる。勿論、本稿で示したモデルは、あくまで数値的ひな型であって実証モデルではない。実証モデルのためには、少なくとも100部門程度の産業部門数と廃棄物の組成/再利用のための回収／再利用技術/1次財との代替関係/最終処理技術/各活動に伴う2酸化炭素等排出量、についての詳細な情報が必要である。

本稿の分析では、再生財使用率は外的に与えられた。しかし、この率は本来、価格/品質を通じる1次財との代替関係で決まるものである。又、回収効率/再生財生産効率は、再生財の価格を大きく左右する要因である。本稿で用いた数量モデルは、再生財使用率を外的に与えて、その結果を評価するためには有効であるが、再生財使用率を内生的に決定するには、価格モデルが必要である。これらは何れも、今後の研究課題である。

References

- [1] 池田明由, 篠崎美貴, 管 幹雄, 早見 均, 藤原浩一, 吉岡完治 (1996):環境分析用産業連関表, 慶応義塾大学産業研究所, KEO モノグラフシリーズ 7.
- [2] 森澤眞輔, 関口隆司, 井上頼輝 (1993): '紙資源の循環再利用と廃棄物処理', 廃棄物学会論文誌 4-1, 19-28.
- [3] 中村慎一郎 (1996): '廃棄物リサイクルの産業連関モデル', 早稲田政治経済学雑誌 328, 303-322.
- [4] 二階堂 副包 (1960): 現代経済学の数学的方法, 岩波書店.
- [5] 田中 勝 (1996): '廃棄物リサイクルと収集運搬システム', 廃棄物学会誌 7-5, 422-433.
- [6] 通商産業省調査統計部編:「紙・パルプ統計年報」, (社)通商統計協会, 1992年版
- [7] 鷲田豊明 (1991a): '循環系経済における純生産と資源散逸の条件', 和歌山大学経済学会 経済理論 243, 1-25.
- [8] 鷲田豊明 (1991b): '廃プラスチック油化技術の原油節約効率', 和歌山大学経済学会 経済理論 244, 17-44.
- [9] Central Bureau voor de Statistiek (1996): *Rekeningen en indicatoren voor economie en milieu NAMEA 1986-1992*, Voorburg/Heerlen.
- [10] Duchin, Faye (1990): 'The conversion of biological materials and wastes to useful products', *Structural Change and Economic Dynamics* 1, 243-62.
- [11] Haan, Mark and Steven Keuning (1996): 'Taking the Environment into Account: the NAMEA Approach', *Review of Income and Wealth Series* 42 Number 2, 131-148.

- [12] McClain, Katherine (1995): 'Recycling Programs', in Daniel W. Bromley ed. *The Handbook of Environmental Economics*, Blackwell, Oxford, 222-39.
- [13] Leontief, Wassily (1970): 'Environmental repercussions and the economic structure; an input output approach', *Review of Economics and Statistics*, 52, 262-71.
- [14] Proops, John, Malte Faber, and Gethard Wagenhals (1993): *Reducing CO₂ emissions*, Springer, Berlin
- [15] Smith, Fraser (1996): 'Biological diversity, ecosystem stability and economic development', *Ecological Economics* 16, 191-203.

A 産業×産業行列への変換

$U = [u_{ij}]$, $V = [v_{kl}]$ をそれぞれ m 産業 × n 財, n 財 × m 産業 の行列とする。 X_{ij} , $i, j = 1, \dots, m$ を i 産業から j 産業への投入とする。今, v_{il} を l 財総供給量のうち i 産業部門で供給された割合とする:

$$q_{il} = V_{il} / \sum_{j=1}^m V_{jl}, \quad i = 1, \dots, m, l = 1, \dots, n.$$

すると

$$X_{ij} = \sum_{l=1}^n q_{il} U_{lj}$$

定義から

$$\sum_i X_{ij} = \sum_i \sum_l q_{il} U_{lj} = \sum_l \frac{\sum_i V_{il}}{\sum_k V_{kl}} U_{lj} = \sum_l U_{lj}$$

すなわち、データの整合性は保存される。