

# 摂取率と3Rの変化を考慮した資源循環の分析モデル

鄭 年 皓

## 1. はじめに

近年の資源枯渇や自然環境の劣化をマクロ的に捉えるべく、筆者ら（山下と鄭）は資源循環の概念モデル [1] に基づき、「資源循環における領域推移の分析モデル」[2]、「資源循環の領域推移モデルによる同期化生産と非同期化生産の比較」[3] といった一連の研究を展開している。しかしながら、こうした一連のモデルは、領域推移確率の時間的な一様性を前提に資源循環の領域推移をモデル化しており、開発途上国の経済発展による摂取率の増大や、3R (Reduce、Reuse、Recycle) 活動による摂取率の減少を考慮していない。そこで、鄭らは、摂取率の変化を考慮した領域推移行列を新たに導入し、資源循環のマクロ的な推移を捉えるべく、「摂取率を考慮した資源循環の領域推移確率モデル」[4] の構築を試みている。

本研究では、主として資源循環のマクロ的な振る舞いに関する鄭らの一連の研究 [2]-[4] を整理し総合的に報告する。また、本研究のまとめとして先行研究 [2]-[4] の限界から今後の「資源循環」研究がアプローチすべき3つの課題を指摘する。これらの課題とは、(1) 摂取率や3R活動のみならず、販売率と排出率の時間的な一様性を前提としないモデルの構築、(2) 技術革新が環境問題に及ぼす効果に関するモデルの構築、(3) 国際的な取り組み（例えば、京都議定書）が資源循環に及ぼす影響に関するモデルの構築である。こうした本研究の議論により、「資源循環」の本質に関する基本的な研究視座 [2]-[4] を紹介するとともに、今後の「資源循環」研究がめざすべき方向性を示唆していくことにする。

## 2. 資源循環の概念モデル

ここでは、本研究の基礎となる「資源循環の概念モデル」を概説しておくことにしよう。これまで、社会においてあまり目を向けられてこなかった「環境の内部化」[5] の視点（第3節を参照）を、企業評価の問題に導入すべく、大野ら [1] は図1のような「資源循環の概念モデル」を提案している。このモデルは、地球が「自然空間」と「社会空間」によって構成されていることを仮定し、自然空間を「それ自体では目的律を持たない物質によって構成される空間」として、また社会空間を「それ自体の目的律に基づいた行動をとる人間および組織によって構成される空間」として位置づけている。

図1において、社会空間ではその構成要素（生産者と消費者）の目的に合致した価値を創造

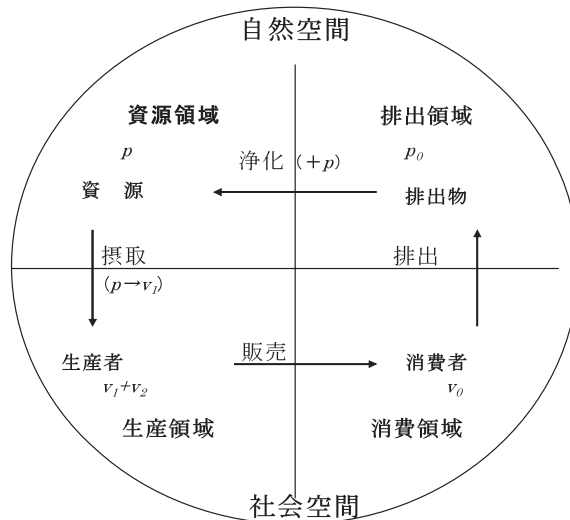


図1. 資源循環の概念モデル [1]

するために、自然空間から資源を摂取する。また、逆に社会空間で不要になった（価値を消費した）ものを自然空間に排出する。すなわち、社会空間には「価値の創造」と「価値の消費」の側面があり、それぞれ自然空間に対して摂取と排出といった働きかけを行っているのである。このような考え方に基づけば、社会空間を、そこでの目的に合致した価値を創造する「生産領域」と、価値を消費する「消費領域」とに分割することができ、これら2つの領域における行動の主体がそれぞれ生産者と消費者なのである [1]。

さらに大野ら [1] は、自然空間を、社会空間からの摂取を受ける「資源領域」と排出を受ける「排出物領域」に分割している。前者の構成要素が「資源」であり、後者の構成要素が「排出物」である。こうして概念的に分割された4つの領域において、資源は自然空間と社会空間の中で、資源領域→生産領域→消費領域→排出物領域→資源領域といった循環システムを構成している。今日の環境問題の多くはこの排出物領域の肥大化にある。すなわち、自然空間はそれ自体の「浄化」により資源領域と排出物領域のバランスを保ってきたのであるが、このバランスが崩れつつあるところに今日の環境問題の本質がある [1]。

図1の資源循環モデルにおいて、自然空間から社会空間への資源の摂取は「資源の内部化」を、また社会空間から自然空間への排出は「環境の外部化」[5]を意味する。ここで問題となるのは、「環境の外部化」である。それは、社会空間がこれまで価値を消費した排出物を自然空間に移動させること（環境の外部化）により、自らの生産活動および消費活動を最小のコストで行ってきたからである。そして、自然空間内での自然浄化により、資源領域と排出物領域のバランスが保たれてきたと同時に、社会空間の構成員が摂取すべき資源を確保してきたのである [6]。

しかしながら、自然浄化が摂取・排出の速度に追いつかなくなっていることは明らかであり、急速に排出物領域が肥大化しつつある。したがって、排出物→資源の変換（ポテンシャルの付

加)の際に自然浄化のみでは不十分な分の浄化を人為的に行うこと（人為浄化）が必要である。ここで、「人為的」とあるということは、自然空間でなく社会空間での行為を意味する。価値を消費した排出物をそのまま自然空間に排出するのではなく、排出物の浄化という機能の一部を社会空間に取り込むことが求められる。言い換えれば、人為浄化によってポテンシャルを付加すること、またはそのためのコストを負担することが生産者と消費者の責務となるのである。

また、少しでも排出物領域の肥大化を抑制するために、3R（リデュース、リユース、リサイクル）を徹底することも重要である。ここで、リユースは自然空間の排出物領域から社会空間の消費領域への排出物の取り込み、リサイクルは社会空間の生産領域への取り込みを、それぞれ意味する。社会空間における「価値」の判断は主観的であり、ある人にとっては価値が無くても他の人にとっては十分に価値があるかもしれない。価値が無いと判断したことによって生じる排出物を、価値があると思う他の消費者（リユース）や生産者（リサイクル）が再利用するのである。

これまで、環境は自然空間（社会空間の外部）に位置づけられ、社会空間とは切り離して考えられてきた。しかし、社会空間への環境の取り込み（これは、次節の「環境の内部化」[5]に相当する）を行わない限り、急速に深刻化している環境問題を解決することはできないとの認識を、社会空間のすべての構成員（生産者と消費者）が持つべき時期に来ているのである[1]。

### 3. 環境の内部化と外部化

ここまでの議論から、現在の深刻化する地球環境問題の本質が、自然空間における資源領域と排出物領域のバランスが崩れようとしているところにあることがわかる。自然空間が、それ自体の浄化（自然浄化）のみでは、社会空間からの摂取と排出に追いつかないのである。こうした地球環境問題に対して、鷺田 [5] は「環境の内部化」と「環境の外部化」の概念からのアプローチを試みている。これによれば、社会経済システムがこれまでその重要性を適切に認識してこなかった環境の利用をめぐる現在の環境問題が発生しているということになる。そこで、社会経済システムの外部に置かれている（環境の外部化）ために現在はその対象とはされていない環境の経済的機能や文化的機能を、その内部に取り込むこと（環境の内部化）が求められるのである。

このような内部化と外部化に関して、山下 [6] は前者を「資源の内部化」、後者を「環境の外部化」として位置づけている。前者の内部化は前述の「資源循環の概念モデル」[1]における自然空間→社会空間の「資源の摂取」に、また後者の外部化は社会空間→自然空間の「排出物の排出」に相当する。したがって、環境の内部化の必要性は主として「排出物の内部化」の必要性を意味する。これは、排出物を社会空間の内部で処理する、すなわち排出物を社会空間内で自然空間のバランスを崩さないような状態に変換（これは「資源循環の概念モデル」における「人為浄化」に相当する）してから自然空間に排出する、あるいは再利用することが必要であるという考え方である。社会における人為浄化やリサイクル活動・リユース活動が、これ

らに相当する。また、リデュースにより排出物自体を抑制することも必要である。このような人為浄化と3R（リデュース、リユース、リサイクル）により、排出物領域の肥大化にブレーキをかけ、自然空間における資源領域と排出物領域のバランスを維持していくのである。

#### 4. 領域推移確率行列と固有ベクトル

本節では、次節以降の分析モデルが解を有する際の条件を明らかにするため、鄭 [7] の先行研究に基づき、「状態ベクトル」と「領域推移確率行列」（第5節を参照）が与えられたとき、マルコフ連鎖（Markov Chain）の枠組みにより、この推移確率行列が時刻  $t$  に対して一定とした場合の定常状態ベクトル（ $t \rightarrow \infty$  の状態ベクトル）が、領域推移確率行列の最大固有値（ $\lambda_{\max}=1$ ）に対する固有ベクトルとして与えられることを示すことにする。ここで、領域推移確率行列は鄭 [7] の先行研究における通信路行列（channel matrix）に、また定常状態ベクトル（normal state vector）は定常分布ベクトル（normal distribution vector）に相当する。

時刻  $t$  の各要素  $i$  によって構成される状態ベクトル  $\mathbf{s}(t)$  に対して、領域推移確率行列  $\mathbf{P}=(p_{ij})$  と初期状態ベクトル  $\mathbf{a}=(a_i)$  が与えられているものとし、その極限の状態  $\mathbf{s}(\infty)$  を  $\mathbf{s}^*$  で表すと (1) 式のようなになる [8]。

$$\mathbf{s}^* = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{a} \cdot \mathbf{P}^t \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \mathbf{s}^* = (s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n)$$

$$\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$$

一方、上記の定常状態ベクトル  $\mathbf{s}^*$  はマルコフ連鎖の状態の分類より、周期的状態と非周期的状態に分けられる。まず、周期的状態の場合、定常状態ベクトルは収束しないため、状態ベクトル  $\mathbf{s}(t)$  の各要素  $s_i(t)$  の平均をとることにより、各状態量を捉えることが可能になる [8]。

$$s_{i*} = \sum_{t=1}^c s_i(t)/c \quad (2)$$

ただし、 $s_i(t)$  : 状態ベクトル  $\mathbf{s}(t)$  の各要素

$c$  : 周期

これに対して、非周期的状態の場合、定常状態ベクトルは収束し (3) 式を満足する。

$$\mathbf{s}^* \cdot \mathbf{P} = \mathbf{s}^* \quad (3)$$

上式は、ある状態が安定的に保持されるマルコフ均衡（Markov Equilibrium）を意味し、(3) 式を満足する場合が一般的である [8]。そこで、(3) 式に零ベクトルでない  $\mathbf{s}^*$  の解が存在するとき、それが固有値  $\lambda=1$  に対する固有ベクトルになることを、以下で示していくことにしよう。

まず、(3) 式の右辺の  $\mathbf{s}^*$  を左辺に移項することにより、(4) 式が得られる。

$$\mathbf{s}^* \cdot \mathbf{P} - \mathbf{s}^* = \mathbf{0} \text{ (零ベクトル)} \quad (4)$$

次に、左辺第2項の  $\mathbf{s}^*$  に単位行列  $\mathbf{E}$  をかければ、(5) 式となる。

$$\mathbf{s}^* \cdot \mathbf{P} - \mathbf{s}^* \cdot \mathbf{E} = \mathbf{s}^* \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{E}) = \mathbf{0} \quad (5)$$

ここで、 $\lambda$  を 1 とおくと、(6) 式となる。

$$\mathbf{s}^* \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{E}) = \mathbf{s}^* \cdot (\mathbf{P} - \lambda \mathbf{E}) = \mathbf{0} \quad (6)$$

したがって、(6) 式を満足する零ベクトルでない  $\mathbf{s}^*$  の解は、固有方程式  $|\mathbf{P}' - \lambda \mathbf{E}| = 0$  の固有値  $\lambda$  を 1 としたときの固有ベクトルとなる。しかしながら、(6) 式のみでは、 $\lambda = 1$  の解の保証とその主要解 (最大値) としての位置付けが不明確である。

そこで、領域推移確率行列  $\mathbf{P}$  が  $n$  次正方行列であり、かつ  $\mathbf{E}$  が  $n \times n$  の単位行列であることをふまえて、 $|\mathbf{P}' - \lambda \mathbf{E}| = 0$  を、(7) 式のように書き直すことにしよう。

$$|\mathbf{P}' - \lambda \mathbf{E}| = \begin{vmatrix} p_{11} - \lambda & p_{21} & p_{31} & \cdots & p_{n1} \\ p_{12} & p_{22} - \lambda & p_{32} & \cdots & p_{n2} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} - \lambda & \cdots & p_{n3} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{1n} & p_{2n} & p_{3n} & \cdots & p_{nn} \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

さらに、(7) 式の行列式の各行を全て第 1 行に加え、 $\sum p_{ij} = 1$  の性質を利用すれば、(8) 式が得られる。

$$|\mathbf{P}' - \lambda \mathbf{E}| = \begin{vmatrix} 1 - \lambda & 1 - \lambda & 1 - \lambda & \cdots & 1 - \lambda \\ p_{12} & p_{22} - \lambda & p_{32} & \cdots & p_{n2} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} - \lambda & \cdots & p_{n3} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{1n} & p_{2n} & p_{3n} & \cdots & p_{nn} \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

(8) 式において、ある行や列の全ての要素が 0 であれば、行列式も明らかに 0 になる。したがって、 $\lambda = 1$  の場合、固有方程式  $|\mathbf{P}' - \lambda \mathbf{E}| = 0$  を満足する。これより、 $\lambda = 1$  は固有値の一つとなっていることがわかる。

一方、固有値の定義により、領域推移確率行列  $\mathbf{P}$  において、その全ての固有値は零ベクトルでないベクトル  $\mathbf{x}$  に対して (9) 式を満足する。

$$\mathbf{P}\mathbf{x} = \lambda \mathbf{x} \quad (9)$$

(9) 式を要素ごとに書き直すと (10) 式となる。

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} x_j = \lambda x_i \quad (10)$$

ここで、 $M = \max x_j$  とおけば、Frobenius の固有値定理と Kolmogorov 不等式 [9], [10] により、(11) 式が成立する。

$$\lambda M \leq M \sum_{j=1}^n p_{ij} = M \quad (11)$$

したがって、(11) 式により、 $\lambda \leq 1$  となり、1 は明らかに最大固有値である。一方、他の固有値は、全て 1 未満の値をとる。これにより、領域推移確率行列  $\mathbf{P}$  が既知で一定である場合、非周期的な定常状態ベクトルは、領域推移確率行列  $\mathbf{P}$  の最大固有値 ( $\lambda_{\max} = 1$ ) に対する固有ベクトルとして与えられることがわかる [7]。

## 5. 資源循環における領域推移の分析モデルと3R行列

本節では、第2節の「資源循環の概念モデル」[1]を基礎にして、図1の4つの領域（資源領域、生産領域、消費領域、排出物領域）に存在する、それぞれ資源量・在庫量・活用量・排出物量の間の推移を捉えるべく、下記のような分析モデル[2],[3]を紹介していくことにする。

まず、上記の4つの量(状態量)を要素とするベクトル  $\mathbf{s}=(a, b, c, d)$  を、状態ベクトル(State vector)と呼ぶことにしよう。これらの各要素は、領域推移確率行列  $\mathbf{P}=(p_{ij})$  に従って、図1のように領域  $i$  から領域  $j$  へと推移するものとする [2]。

$$\mathbf{P}=\begin{pmatrix} 1-\alpha & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 1-\beta & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1-\gamma & \gamma \\ \delta & 0 & 0 & 1-\delta \end{pmatrix} \quad (12)$$

ただし、 $\alpha$ : 摂取率  $\beta$ : 販売率  $\gamma$ : 排出率  $\delta$ : 自然浄化率

このとき、時刻  $t$  での状態ベクトルを  $\mathbf{s}(t)$  とし、領域推移確率行列  $\mathbf{P}$  が時刻  $t$  に対して一定であると仮定すれば、状態ベクトル  $\mathbf{s}(t)$  は次のように表される。

$$\mathbf{s}(1)=\mathbf{s}(0)\cdot\mathbf{P} \quad (13)$$

$$\mathbf{s}(t)=\mathbf{s}(t-1)\cdot\mathbf{P} \quad (14)$$

次に、こうした領域間推移を無限に繰り返したとき ( $t\rightarrow\infty$ ) の状態ベクトル  $\mathbf{s}(\infty)$  について考えてみよう。この場合の  $\mathbf{s}(\infty)$  を、ここでは  $\mathbf{s}^*$  で表すことにし、これを「定常状態ベクトル」と呼ぶことにする。

$$\mathbf{s}^*=\lim_{t\rightarrow\infty}\mathbf{s}(0)\cdot\mathbf{P}^t \quad (15)$$

もし、状態ベクトル  $\mathbf{s}(t)$  が周期性を持たずに収束するとすれば（前述のように、このような場合が一般的である）、定常状態ベクトル  $\mathbf{s}^*$  は下式を満足するため、第4節における「推移確率行列（通信路行列）と固有ベクトル」[7]と全く同様の議論を展開することができる。

$$\mathbf{s}^*=\mathbf{s}^*\cdot\mathbf{P} \quad (16)$$

したがって、上記のモデルの解（定常状態ベクトル  $\mathbf{s}^*$ ）は固有値問題に帰着し、(16)式を満たす定常状態ベクトル  $\mathbf{s}^*$  は、領域推移確率行列  $\mathbf{P}$  の最大固有値 ( $\lambda_{\max}=1$ ) に対する固有ベクトルとして与えられる。

さらに、筆者らはこうした「資源循環における領域推移の分析モデル」[2]に対して、下記のような3R（リデュース、リユース、リサイクル）の影響を表す「3R行列」 $\mathbf{R}$ を導入したモデルを提案している[3]。これにより、3R活動を展開したときの領域間の状態推移確率は、領域推移確率行列  $\mathbf{P}$  と3R行列  $\mathbf{R}$  の和となり、 $\mathbf{P}$  と  $\mathbf{R}$  が時刻  $t$  に対して一定であると仮定すれば、定常状態ベクトル  $\mathbf{s}^*$  は、3R行列  $\mathbf{R}$  を用いて(19)式のように表される。このときの  $\mathbf{s}^*$  の解は、上で述べた(16)式の解と同様に、行列  $(\mathbf{P}+\mathbf{R})$  の最大固有値 ( $\lambda_{\max}=1$ ) に対する固有ベクトルとして与えられる[3]。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} u & -u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w & v & -v-w \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

ただし、 $u$  : リデュースによる摂取率の減少分

$v$  : リユースによる排出率の減少分

$w$  : リサイクルによる排出率の減少分

$$\mathbf{P} + \mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1-\alpha+u & \alpha-u & 0 & 0 \\ 0 & 1-\beta & \beta & 0 \\ 0 & w & 1-\gamma+v & \gamma-v-w \\ \delta & 0 & 0 & 1-\delta \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{s}^* = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{s}(0) \cdot (\mathbf{P} + \mathbf{R})^t = \mathbf{s}^* \cdot (\mathbf{P} + \mathbf{R}) \quad (19)$$

## 6. 摂取率の変化を考慮した領域推移の分析モデル

前節までの先行研究のモデルでは、基本的に領域推移確率の時間的な一様性を前提に領域推移を分析しており、開発途上国の経済発展による摂取率の増大や、3R 活動または資源節約型技術開発による摂取率の減少を考慮していない。そこで、本節では、摂取率の変化に注目した(時間的な一様性を満たさない)領域推移確率行列  $\mathbf{Q}(t)$  を(20)式のように新たに導入し、資源循環のマクロ的な推移を分析している鄭ら [4] のモデルを概観していくことにしよう。

$$\mathbf{Q}(t) = \begin{pmatrix} 1-\alpha(t) & \alpha(t) & 0 & 0 \\ 0 & 1-\beta & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1-\gamma & \gamma \\ \delta & 0 & 0 & 1-\delta \end{pmatrix} \quad (20)$$

$t+1$  時点の状態ベクトル  $\mathbf{S}(t+1)$  は(21)式のように表される。

$$\mathbf{s}(t+1) = \mathbf{s}(t) \cdot \mathbf{Q}(t) \quad (21)$$

ここで、摂取率  $\alpha(t)$  の時間的发展について考えると、まずそれが増加する場合は、下記の(22)式のような関係式で表すことができる。

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = k \cdot \alpha(t) \quad (22)$$

ただし、 $\alpha(t)$  : 時刻  $t$  における摂取率  $k$  : 比例定数

比例定数  $k$  は、摂取率の増加に伴って減少することが自然であり、摂取率が最大摂取率に近づけば、 $k$  も 0 となる。したがって、こうした考え方に基づくと、(22)式は(23)式のようになる。

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = k_0 \left[ 1 - \frac{\alpha(t)}{\alpha_{\max}} \right] \alpha(t) \quad (23)$$

ただし、 $\alpha_{\max}$  : 最大可能摂取率

(23) 式を簡素化するため、 $\alpha(t)/\alpha_{\max}=n(t)$  に置換し、同式を整理していけば、

$$\frac{dn(t)}{dt} = k_0[1-n(t)]n(t) \quad (24)$$

$$\int \left\{ \frac{1}{1-n(t)} \right\} \frac{1}{n(t)} dn(t) = k_0 \int dt \quad (25)$$

$$\log n(t) - \log[1-n(t)] = k_0 \cdot t + c \quad (26)$$

$$n(t) = \frac{1}{\{1 + \exp[-(k_0 \cdot t + c)]\}} \quad (27)$$

となる。 $n(t) = \alpha(t)/\alpha_{\max}$  であることをふまえると、摂取率  $\alpha(t)$  は (28) 式のように求められる。

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_{\max}}{\{1 + \exp[-(k_0 \cdot t + c)]\}} \quad (28)$$

したがって、(20) 式の  $Q(t)$  を  $\alpha(t)$  に対して書き直せば、(29) 式となる。

$$Q(t) = \begin{pmatrix} 1 - \alpha_{\max}/\{1 + \exp[-(k_0 \cdot t + c)]\} & \alpha_{\max}/\{1 + \exp[-(k_0 \cdot t + c)]\} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \beta & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \gamma & \gamma \\ \delta & 0 & 0 & 1 - \delta \end{pmatrix} \quad (29)$$

一方で、摂取率  $\alpha(t)$  が減少していく場合は、上記の (22) 式の符号を逆にし、(30) 式のように表すことができる。

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = -k \cdot \alpha(t) \quad (30)$$

上記のロジックと同じく、比例定数  $k$  は、摂取率の減少に伴って増大することが自然であり、摂取率が最小摂取率に近づけば、 $k$  も 0 となる。したがって、こうした考え方に基づく、(30) 式は (31) 式ようになる。

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = -k_0 \left[ 1 - \frac{\alpha_{\min}}{\alpha(t)} \right] \alpha(t) \quad (31)$$

ただし、 $\alpha_{\min}$  : 最小摂取率

$\alpha_{\min}/\alpha(t) = n(t)$  に置換し、(31) 式を整理していけば、

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{n(t)} \right] = -k_0 \left\{ \frac{1}{n(t)} - 1 \right\} \quad (32)$$

となり、さらに  $1/n(t) = n'(t)$  に書き換えることにより、(32) 式を整理していけば、

$$\int \left\{ \frac{1}{n'(t)-1} \right\} dn'(t) = -k_0 \int dt \quad (33)$$

$$\log[n'(t)-1] = -k_0 \cdot t + c \quad (34)$$

$$n'(t) = 1 + \exp[-(k_0 \cdot t - c)] \quad (35)$$

となる。ここで、 $n'(t) = \alpha(t)/\alpha_{\min}$  であることをふまえると、摂取率  $\alpha(t)$  は (36) 式のように求められる。

$$\alpha(t) = \alpha_{\min} \{1 + \exp[-(k_0 \cdot t - c)]\} \quad (36)$$



したがって、(20) 式の  $Q(t)$  を同様に  $\alpha(t)$  に対して書き直せば、(37) 式となる。こうした領域推移確率行列  $Q(t)$  と (21) 式により、 $t+1$  時点の状態ベクトル  $S(t+1)$  を求めることができる [4]。

$$Q(t) = \begin{pmatrix} 1 - \alpha_{\min}\{1 + \exp[-(k_0 \cdot t - c)]\} & \alpha_{\min}\{1 + \exp[-(k_0 \cdot t - c)]\} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \beta & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \gamma & \gamma \\ \delta & 0 & 0 & 1 - \delta \end{pmatrix} \quad (37)$$

## 7. 数値例による分析

本節では、鄭らの一連のモデル [2]-[4]、とりわけ「摂取率の変化を考慮した領域推移の分析モデル」[4] に対して、摂取率が①増加する場合と②減少する場合の領域推移をとらえるための定量的分析の結果を紹介していくことにしよう。

まず、基本例として初期摂取率  $\alpha(0) = 1/100$ 、最大摂取率  $\alpha_{\max} = 1$ 、比例定数  $k_0 = 1$  の初期値を与えれば、前節の (28) 式により  $\alpha(t) = 1/(1 + \exp[4.5951 - t])$  として摂取率の増加関数が求められた。次に、初期状態ベクトルを  $S(0) = (0.8, 0, 0.1, 0.1)$ 、販売率  $\beta = 1$  (同期化生産)、排出率  $\gamma = 1/10$ 、自然浄化率  $\delta = 1/100000$  とし、3R 活動が行われない場合の分析を (21) 式を用いて行った。その結果、図 2 の摂取率の増加に伴い、資源量は単調減少する一方で、在庫量と活用量は一定の時刻までは増加しその後は減少することが図 3 からわかる。また、排出物量は単調増加するという現実に即した分析結果を得た [4]。

一方、摂取率が減少する場合の分析を行うため、初期摂取率  $\alpha(0) = 0.6$ 、最小摂取率  $\alpha_{\min} = 0.01$ 、比例定数  $k_0 = 0.1$  といった初期値を与えれば、前節の (36) 式により  $\alpha(t) = 0.01\{1 + \exp[4.078 - 0.1t]\}$  として摂取率の減少関数が導かれた。同様に、初期状態ベクトルを  $S(0) = (0.8, 0, 0.1, 0.1)$ 、販売率  $\beta = 1$  (同期化生産)、排出率  $\gamma = 1/10$ 、自然浄化率  $\delta = 1/100000$  とし、3R 活動が行われない場合の分析を (21) 式を用いて行った。その結果、図 4 のように、摂取率の減少に伴い、資源量は単調減少から (非常にゆっくりではするが) 単調増加に変化する一方で、在庫量は単調減少し、活用量は一定の時刻までは単調増加でその後は単調減少する。また、排出量は単調増加から (非常にゆっくりではするが) 単調減少に変わるとい

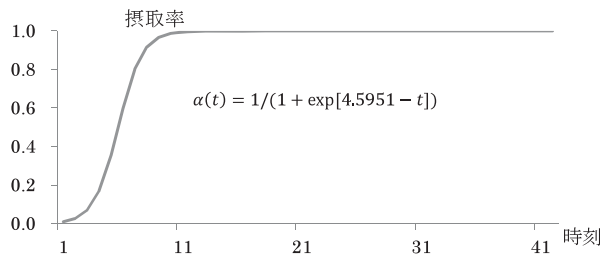


図 2. 摂取率の増加 [4]

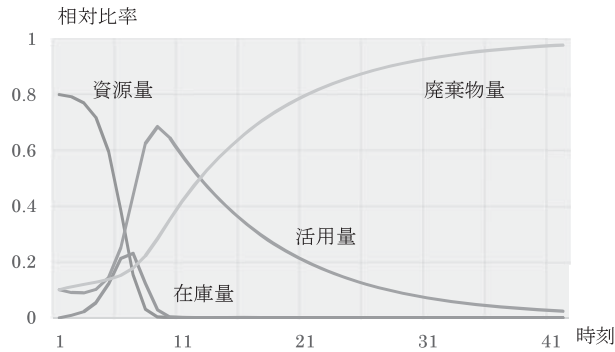


図3. 状態量の変化1 [4]

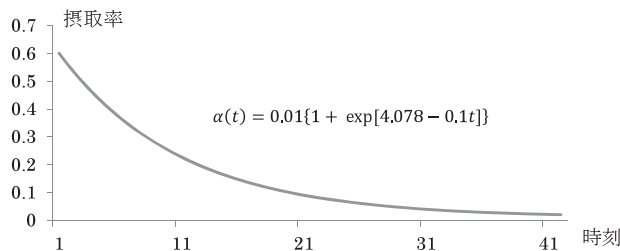


図4. 摂取率の減少 [4]

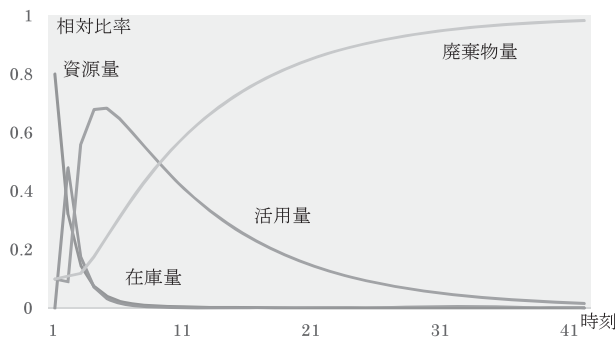


図5. 状態量の変化2 [出所：筆者作成]

う現実に即した分析結果を得た [4]。

図3と図5の結果は、摂取率が増加する場合でも、逆に減少する場合でも、人類に破滅的な結果が待っていることを示している。摂取率と廃棄物量を減少させる3R活動も一時的な効果のみを期待することができ、長期的には社会経済システムの崩壊を防ぐことはできない。また、表1と表2は、現在のような生産活動と消費活動の破滅が近づいていることを示している。

こうした分析結果から、少なくとも現在の生産水準や生活水準を維持するためには、既存の資源やエネルギーの生産効率と活用効率を高めると同時に、代替資源や代替エネルギーの開発が至急の課題であることがわかる。3R活動を展開しても廃棄物量の肥大化を止めさせること

表 1. 主要鉱物資源の可採年数 [11]

元素名	可採年数	元素名	可採年数	元素名	可採年数
アルミニウム	156年	鉄	117年	セレン	58年
アンチモン	13年	鉛	24年	銀	14年
クロム	123年	水銀	86年	スズ	26年
コバルト	182年	モリブデン	67年	チタン	96年
銅	36年	ニッケル	46年	タングステン	62年
金	17年	白金族	415年	バナジウム	194年
インジウム	8年	希土類	1029年	亜鉛	23年

表 2. 採掘可能な主要エネルギー資源の現状 [11]

エネルギー資源	石油	天然ガス	石炭	ウラン
確認埋蔵量	1兆460億バレル	150兆m <sup>3</sup>	9.842億トン	395万トン
可採年数	40年	61年	227年	64年

はできないが、持続可能な社会のためには、環境の内部化 [5] をめざす 3R 活動が代替資源や代替エネルギーの開発という長期目標よりは現実的である。

しかしながら、現在のような社会経済システムにおいては、破滅的な結果が避けられなく、社会経済システムの崩壊は単なる時間的な問題に過ぎなくなってしまう。したがって、環境問題を根本的に解決し、持続可能な開発と社会を維持するためには、社会経済システムと生活モードの根本的な変革が求められるのである。

## 8. おわりに

本研究では、資源循環の概念モデル [1] における 4 つの領域（資源領域・生産領域・消費領域・排出物領域）の間の領域推移を定量的に捉えるための一連の分析モデル [2]-[4] を紹介した。そこで、4 つの領域を構成する資源量・在庫量・活用量・排出物量を要素とする「状態ベクトル」と「領域推移確率行列」との関係性をマルコフ連鎖の枠組みに従って定式化した分析モデル [2]-[4] に基づき、簡単な数値例による提案モデルの実証分析を試み、大量摂取・大量排出に特徴づけられる現在の環境問題が自然空間と社会空間のバランスを崩壊させていく推移（プロセス）と、その究極（極限）の状態を示唆した。これにより、急激に劣化していく環境問題の本質を理解していく際の分析モデルの妥当性を確認することができ、資源循環の長期的推移および資源領域と排出物領域のバランスに対する分析アプローチの方向性を示唆した。

しかしながら、筆者らの先行研究 [2]-[4] が資源循環の長期的推移に関する本質を捉える際の基本的な研究視座を与えるにもかかわらず、(1) 販売率と排出率の時間的な一様性を前提とした分析モデルを構築している点、(2) 新素材や新エネルギー開発のような技術革新の効果を

導入していない点、(3) 環境問題に対する国際的な取り組みと連携を考慮していない点で、先行研究 [2]-[4] の限界がある。したがって、資源循環や環境問題のマクロ的な振る舞いを捉えようとする際、こうした3つの新たな研究視座を反映した分析モデルの構築が求められ、方法論としてもマルコフ連鎖や微分方程式を包括した確率微分方程式が考えられよう。今後は、こうした問題意識に基づく新たな「資源循環」の研究を展開したい。

#### 参考文献

- [1] 大野高裕, 葛山康典, 山下洋史 (1992): “コスト尺度に基づく新たな企業評価の視点”, 日本経営工学会春季大会予稿集, pp. 49-52
- [2] 山下洋史, 鄭年皓 (2010): “資源循環における領域推移の分析モデル”, 明大商学論叢, Vol. 92, No. 4, pp. 25-39
- [3] 山下洋史, 坂井俊祐, 臧巍, 村山賢哉, 鄭年皓 (2010): “資源循環の領域推移モデルによる同期化生産と非同期化生産の比較”, 日本経営システム学会第44回全国研究発表大会講演論文集, pp. 92-95
- [4] 鄭年皓, 山下洋史, 金子勝一, 松丸正延 (2012): “摂取率を考慮した資源循環の領域推移確率モデル”, 日本経営システム学会第49回全国研究発表大会講演論文集, pp. 106-109
- [5] 鷺田豊昭 (1999): 環境問題と環境評価, 築地書館, pp. 2-24
- [6] 山下洋史 (2003): “「循環型 SCM」と新世紀の経営倫理”, 第2回「経営倫理」懸賞論文優秀論文集, pp. 5-17
- [7] 鄭年皓 (2009): “情報共有・知識共有に基づく新製品開発組織に関する工業経営的研究”, 明治大学博士(商学)学位論文, pp. 43-47
- [8] 山下洋史 (1999): 情報管理と経営工学, 経林書房, pp. 142-154
- [9] 森村英典, 高橋幸雄 (1979): マルコフ解析, 日科技連, pp. 277-278
- [10] Papoulis, A. and S. U. Pillai (2002): *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill, pp. 695-711
- [11] 東千秋, 飯田汎, 雀部博之 (2008): 技術革新を支える物質の科学, 日本放送出版協会, pp. 128-147
- [12] 飯島伸子 (1996): 環境社会学, 有斐閣, pp. 45-52
- [13] Porter, R. C. (2002): *The Economics of Waste*, Resources for the Future, pp. 33-47
- [14] 岡田啓, 塩見英治 (2003): “リバース・ロジスティクスの概念の変遷と再検討”, 日本物流学会誌, No. 11, pp. 49-56