

リサイクリング・システムの外部性

On the Externality of Recycling Systems

キーワード: リサイクリング、マーシャルの外部効果、効率性、物質循環

西村一彦

ある財を使用した後の廃棄物を利用したリサイクリングにより、その財自体の素材の一部を代替することが可能な場合を考える。本稿では、このようなリサイクリングを有する経済システムが、分権的であり且つ各々の産業が完全競争的である場合でも、価格による主体の近視眼的(myopic)最適化行動が、必ずしも社会的に効率的な均衡を達成しないことを示す。これは、2次素材を生産する主体の戦略環境が、1次素材を生産する産業の生産量に依存するために、マーシャルの外部効果が発生することに起因する。この現象を簡単なモデルを用いて示し、さらに均衡解の安定性についても考察する。

1. はじめに
2. モデル
3. 近視眼的行動と巨視的行動
4. マーシャルの外部効果
5. 均衡の安定性
6. おわりに

1. はじめに

これまでの経済学におけるリサイクリングに関する研究^[1]は、それが資源配分の非効率性にどのような貢献をするかという視点からのものが多い。これらは大きく分けて二つの方向性を持っている。一つは Alcoa 社の研究^[2]に端を発する、独占ないしは寡占産業の競合相手としてのリサイクリングのポテンシャルを評価する方向である。もう一つは、廃棄物の存在により発生する外部効果の内部化策としてリサイクリングを評価する^{[1], [3]}方向である。従っていずれの場合も、リサイクリングが社会に内在する非効率性(独占や外部性など)を是正する可能性をもつことを示唆しようとするものである^[4]。その他の方向性としては資源の採掘・供給とリサイクリングの関係を動学的最適化のフレームワークで検討したもの^{[3], [4]}などが挙げられる。

しかし、リサイクリングを、再資源化産業とそれを利用する資源消費産業との間の相互依存性に着目した「リサイクリング・システム」として考察した例は筆者の知る限りでは存在していない。然るに本

稿では、リサイクリングの規範的優位性を主張する^{[10], [11]}のではなく、それが経済システムの一部として自律的に、しかも社会全体の効率性と整合的に機能しうるかを分析する。

産業間の相互依存性が強く、大きな規模の経済性を持つ寡占産業で、連関効果が大きい場合には、セットアップコストが現れ、価格に必要十分な情報が盛り込まれない場合がある。これが一般的に「マーシャルの外部効果」と呼ばれている現象である^[2]。リサイクリングを含む経済システムに関しても、再資源化産業の戦略環境が資源消費産業の生産状態に依存することから、価格に必要十分な情報が盛り込まれず、マーシャルの外部効果と同様の現象により、システム全体の効率性を損なう可能性がある。

本稿の目的は、リサイクリングを含む経済システムが、分権的で且つ各産業が完全競争的であっても、社会的に効率的な運営がなされないという性質を潜在的に持つことを示すことである。本稿で扱うモデルは2章に詳述し、3章では部分均衡分析により、資源消費産業と再資源化産業が分権

的に存在する状態と、合併した場合の比較を行う。4章では、二財生産システムを導入し、生産可能性フロンティア及び価格情報の歪みを導出し、5章で均衡点の安定性を吟味する。さらに、物質循環に焦点を当てた数値モデルを用いて廃棄物のダイナミクスを分析した例を付録に加えた。

2. モデル

本稿では、資源消費産業 A と再資源化産業 B を含む図1のような経済システムを考える。無用な複雑化を避けるため、本稿で扱うモデルでは、産業 A において一次素材と、再資源化された二次素材を利用する二つのプロセスが併存し、それらの相対費用に従い採用プロセスの比率が連続的に変化するような仮定を導入する。

ある財 A は完全競争産業 A において、労働および労働を用いて内部生産されるある素材を加工して生産される。財 A を構成する素材の量は一定とし、このうちのある割合以上は、内部生産される素材(一次素材)に代替性のある二次素材 B を用いてもかまわないこととする。二次素材 B は、産業 B において労働を用いて生産される。産業 B の代表企業は、消費され廃棄された財 A の屑を労働を用いて回収・加工し、素材 B を生産する。

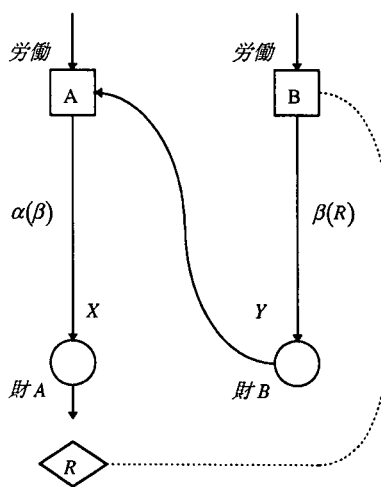


図1 リサイクリング・システム

仮に財 A がカップ・アンド・ソーサーだとしよう。産業 A の代表企業では、自社内の土地から採掘

される土砂(一次素材)を用いた粘土からカップとソーサーの生産が可能である。またこの企業は、産業 B から得られる粉末茶碗屑(二次素材)を用いた粘土と一次素材を用いた粘土を、どのような割合で混合してもソーサーの部分を生産することが可能であるが、カップの部分は品質上一次素材を用いた粘土でなければならない。さらに、カップやソーサーの形成工程は、使用する粘土には依存しないが、粘土の製造には、使用するものが

二次素材に依存して異なる加工プロセスを用いる必要がある。加えて、粘土は形成工程の直前に製造する必要があり、独立した粘土産業は成立しないものとする。このカップ・アンド・ソーサーは消費された後、広大な土地に一緒に茶碗屑として廃棄される。茶碗屑は使用素材の如何に関わらず同一物であるとする。産業 B の代表企業は労働を用いて茶碗屑を回収し、粉末加工を行い、粉末茶碗屑は産業 A だけに卸される。

このような産業 A における最適化行動を考察しよう。(粘土製造に)一次素材を用いるプロセス(P1)、二次素材を用いるプロセス(P2)ともに費用曲線が U 字型をしているとする。図2は、これら二つのプロセスによる生産量と、その平均費用の対応を表したものである。例えば、P1 のみによって生産される場合、平均費用曲線はオーソドックスな U 字型を示すが、少しずつ P2 が導入されるに従い、P1 少量生産時の高コストが緩和されて行く様子がわかる。

使用素材の制約が無い場合、両プロセスにおける限界費用=平均費用となる損益分岐価格を比較して、一次素材を用いるほうが安価な場合は、一次プロセスに特化され、その逆も然りである。図2の場合、P2 特化状態(点 S)の方が P1 特化状態よりも安価である。しかし、上記の(財のある部分には一次素材を使用する必要があるという)制約があるため、点 S は選ばれず、二つのプロセスを組み合わせた点 K で生産される時に平均費用が最小となる。従って、二つのプロセスが共存することになる。

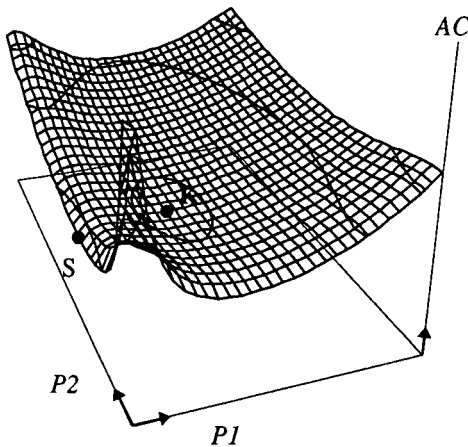


図2 プロセスの組み合わせ

このことから、費用関数 c は、生産量 x 、プロセスの組み合わせ比 θ 、財 B の価格 β を変数とする関数となることがわかる。産業 A の代表企業では、任意の β に対して最適生産量及びプロセス比を決定し^{注1}、産業 A の完全競争性により、財 A の供給曲線は損益分岐価格 α で水平となる。即ち、次式が成立する。

$$\alpha(\beta) = \frac{c(x^*, \theta^*; \beta)}{x^*}, \quad \partial \alpha / \partial \beta > 0 \quad (1)$$

財 A はその価格 α に基づき市場で X だけ需要され消費されたのち廃棄される。このとき、素材を含む廃棄物は、ある一定の面積 S に一様に分布し、一定時間の後には回収不能となることとする。単位面積当たりの廃棄素材量を二次素材濃度と呼び、 R で表すことにする。本章では簡単のため次のように表せるものとする。

$$R(X), \quad \partial R / \partial X > 0 \quad (2)$$

これは、上記の例を用いて次のように解釈できる。カップ・アンド・ソーサーは、ある期間(例えばひと月)の間に X の量が生産され消費され、茶碗屑となり、当該期間後には土に返り、回収不能となる。また、当該期間中に産業 B がいくら回収しても、茶

碗屑は広大な土地に一様に分布しているため、産業 B の代表企業の直面する単位面積当たりの茶碗屑の量は回収量に依存しない。

産業 B では、労働を用いてこの廃棄素材を回収し、産業 A の代替原料である財 B (二次素材) を生産する。産業 B の代表企業は U 字型の費用曲線に基づき最適回収規模を決定する。ただし、費用曲線は二次資源濃度 R に依存する(図3参照)。即ち、廃棄素材が多く、二次資源濃度が高いほど回収がしやすく、同じ労働投入で多くの二次素材を生産することができる。

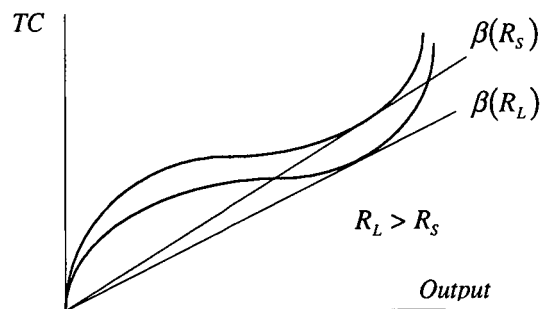


図3 二次資源濃度に対する費用曲線の変化

この代表企業は最適回収規模に基づく回収面積から廃棄素材を回収する。また、財 B は最終消費されず、すべて産業 A で消費され、この需要量 Y に応じて産業 B の企業数が決定し、回収が行われる総面積(総回収面積)が決定する。ただし、財 B の需要量が多い場合でも総回収面積が S を超えず、常に産業 B における完全競争が実現されることとする。以上より、財 B の損益分岐価格 β は次のように書ける^{注2}。

$$\beta(R), \quad \partial \beta / \partial R < 0 \quad (3)$$

また、供給曲線は産業 B の完全競争性ゆえに β の水準で一定となる。

注1 θ は内生化するが、ここでは敢えて明示した。また、図2より、 x^* 、 θ^* は内点解となる。これを考慮し α は β で微分可能とした。

注2 ただし、どの企業もあらゆる土地に負担なしにアクセスできることを仮定している。

3. 近視眼的行動と巨視的行動

産業Aの各企業が、近視眼的に財Bの価格を受容して生産量を最適化する場合(ケース1)と、各企業が自分の生産量を増やした場合にそれが産業Bの環境を変化させ、ひいては自身の費用を低減させる効果を考慮する巨視的最適化を行う場合(ケース2、資源消費産業と再資源化産業が合弁した場合に相当)の状態を比較する。本節では簡単化のために、産業Aの代表企業の費用関数 $c(x, \theta; \beta)$ におけるプロセス比 θ を内生化して、 $c(x; \beta)$ と書くことにする。

ケース1における産業Aの代表企業の費用関数 c_1 は次のように書ける。

$$c_1(x) := c(x; \beta) \quad (4)$$

一方、ケース2では、財Bの価格 β を自分の生産量を調節することによりコントロールしようとする。したがって、(1)~(4)より次のような費用関数 c_2 を持つ^{注3}。

$$c_2(x) := c(x, \beta(R(x))) \quad (5)$$

いま、ケース1の均衡解を x_1^* とすると、

$$c_1(x_1^*) = c_2(x_1^*) \quad (6)$$

である。また、 x_1^* における財Bの価格 β を

$$\beta^* = \beta(R(x_1^*)) \quad (7)$$

と書くことにする。

次に、両ケースについて x_1^* における限界費用関数を導出する。

$$mc_1(x_1^*) = \left. \frac{\partial c(x; \beta^*)}{\partial x} \right|_{x=x_1^*} \quad (8)$$

$$mc_2(x_1^*) = \left. \frac{\partial c(x, \beta^*)}{\partial x} \right|_{x=x_1^*} + \left. \frac{\partial c}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x} \right|_{x=x_1^*} \quad (9)$$

従って、 $\partial c / \partial \beta > 0$ 、 $\partial \beta / \partial R < 0$ 、 $\partial R / \partial x > 0$ より、次式を得る。

$$mc_1(x_1^*) > mc_2(x_1^*) \quad (10)$$

^{注3} 代表企業の生産量 x に対する R の反応は、産業の生産量 X に対するそれと同様である。

一方、(6)より、

$$\frac{c_1(x_1^*)}{x_1^*} = \frac{c_2(x_1^*)}{x_1^*} \quad (11)$$

即ち、それぞれのケースにおける平均費用関数 ac_1 、 ac_2 を用いれば、

$$ac_1(x_1^*) = ac_2(x_1^*) \quad (12)$$

と書ける。したがって、 $mc_1(x_1^*) = ac_1(x_1^*)$ および式(10)を用いて

$$mc_2(x_1^*) < ac_2(x_1^*) \quad (13)$$

を得る。

ここで、 $ac_2(x)$ の x_1^* における傾きをしらべよう。

$$\left. \frac{dac_2(x)}{dx} \right|_{x=x_1^*} = \frac{mc_2(x) - ac_2(x)}{x} \quad (14)$$

当然 $x_1^* > 0$ であり、式(13)、(14)より、

$$\left. \frac{dac_2(x)}{dx} \right|_{x=x_1^*} < 0 \quad (15)$$

となり、負の傾きを持つことになる。

したがって、 $ac_2(x)$ も U 字型をしていると仮定すれば、式(12)、(15)から、図のようになり、ある $x_2^* > x_1^*$ において、

$$ac_1(x_1^*) > ac_2(x_2^*) \quad (16)$$

$$ac_1(x_1^*) = mc_1(x_1^*) \quad (17)$$

となる。

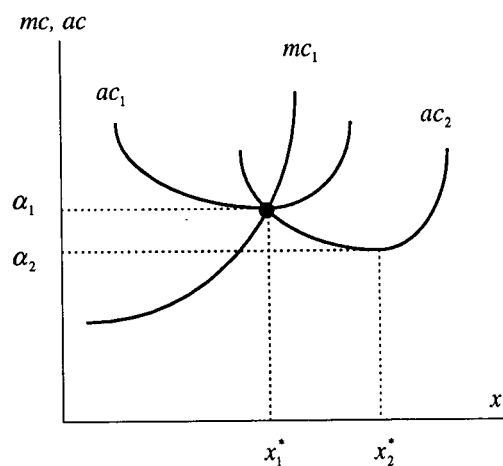


図4 平均費用曲線の位置

即ち、ケース2の場合に、各代表的企業が x_2^* のレベルの生産を行うほうが、ケース1の場合に各代表的企業が x_1^* のレベルの生産を行うよりも、供給

曲線の水準 α が低くなり、余剰を拡大させることができる。(図 5 参照)

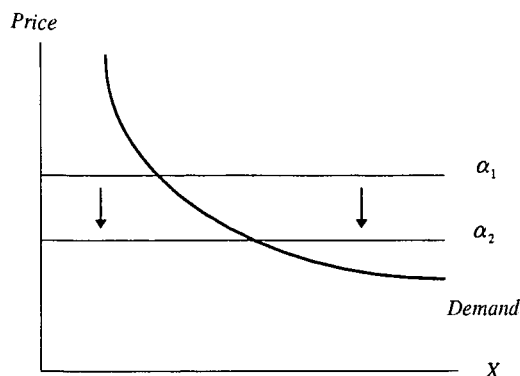


図5 供給曲線の変化

4. マーシャルの外部効果

本章では、リサイクリングが存在する経済システムの生産可能性フロンティア (PPF) を導出し、マーシャルの外部効果により価格が歪められることを示す。いま図 6 のようにシステムにもう一つ別の財 C を生産する完全競争産業 C があるとしよう。また、この産業 C の代表的企業は労働だけを生産要素とし、財 C 単位あたり γ だけの労働投入を必要とするものとする。労働価格を 1 に基準化すれば、産業 C の供給曲線は γ で水平となる。

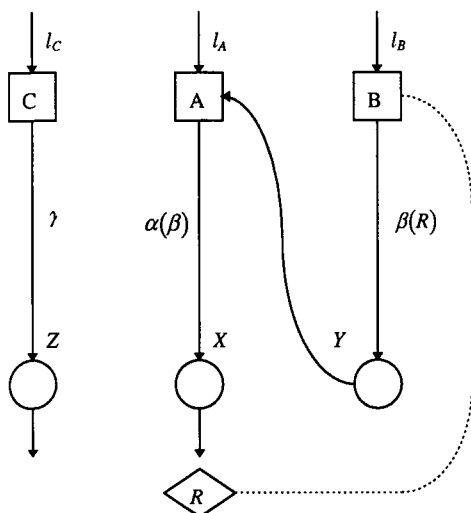


図6 リサイクリングを含む2財システム

ここで、財 A、C を消費する(但し、生産量はそれぞれ X 、 Z)この経済システムの PPF を導出し

よう。このシステムに存在する総労働量を $L = l_A + l_B + l_C$ とすれば、PPF は

$$\alpha X + \gamma Z = L \quad (18)$$

を満たす (X, Z) の軌跡である。これより社会的限界変形率は、(18)を全微分することにより求められる。

$$0 = \gamma dZ + \left[\frac{\partial \alpha}{\partial X} \cdot \frac{X}{\alpha} + 1 \right] \alpha dX \quad (19)$$

ただし、(1)~(3)より、

$$\frac{\partial \alpha}{\partial X} = \frac{\partial \alpha(\beta(R(X)))}{\partial X} = \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial R} \cdot \frac{\partial R}{\partial X} < 0 \quad (20)$$

である。そこで、分析を一層単純化するため、産業 A の損益分岐価格 α の生産量 X に対する弾力性 η が生産量には依存しない定数であり、 $-1 < \eta < 0$ を満たしていると仮定しよう。即ち、次式が成立することとする。

$$0 < \frac{\partial \alpha}{\partial X} \cdot \frac{X}{\alpha} + 1 = \eta + 1 < 1 \quad (21)$$

これと、(19)を用いて事項を得る。

$$\frac{\partial Z}{\partial X} = -\frac{\eta + 1}{\gamma} \alpha < 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial X^2} = -\frac{\eta + 1}{\gamma} \frac{\partial \alpha}{\partial X} > 0 \quad (23)$$

したがって、この場合 PPF は図 7 のような凹型をしたものになる。

つぎに、このシステムの社会的限界変形率と私的限界変形率のずれを考察しよう。いま生産財の家計への配分時に価格比が p であったとしよう。この経済システムの生産と配分が効率的であるためには、価格比が社会的限界変形率 $\partial Z / \partial X$ と等しくなる点で生産が行われなくてはならない。

一方、近視眼的主体は私的限界変形率 α / γ に従って生産を行うため、社会的に好ましい状態をもたらすためには、これが社会的限界変形率と等しいことが必要である。ところが、(22)より明らかに、

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial X} \right| < \left| \frac{\alpha}{\gamma} \right| \quad (24)$$

であり、価格情報に歪みが生じていることになる。このように、リサイクリングが存在する場合、主体の

近視眼的最適化行動がシステム全体の効率化をもたらさないのは、大きな規模の経済性を持つ寡占産業を含む経済システムなどにおいて見られる現象と同様の、マーシャルの外部効果によるものであると捉えることができる。

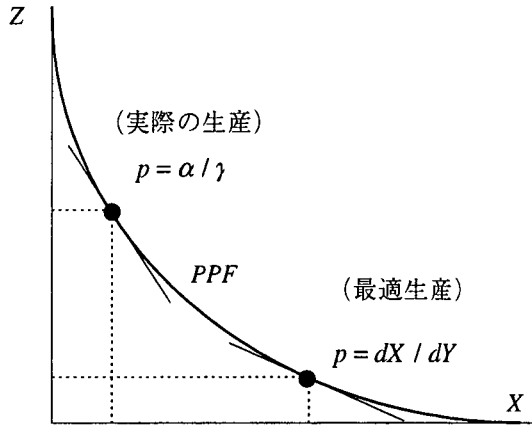


図7 生産可能性フロンティア

5. 均衡の安定性

以上の議論は均衡状態における静学的分析であるが、本節では経済均衡の安定性を分析する。ここでは、2章で定式化したモデルを用いて、産業Aの生産量Xのダイナミクスに注目して安定性を考察しよう。財Aに関する需要関数を

$$D(\alpha), \partial D / \partial \alpha < 0, \partial^2 D / \partial \alpha^2 > 0 \quad (25)$$

とする。これを用いて、Xの動的システムを次のように記述できる。

$$X_{t+1} = D(\alpha(X_t)) \quad (26)$$

ただし、 X_t をt期の生産量とする。このシステムの安定性は、

$$\frac{\partial X_{t+1}}{\partial X_t} = \frac{\partial D}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial X_t} \quad (27)$$

の値に依存する。前章の弾力性に関する仮定を用い、さらに価格の需要量に対する弾力性を λ とすれば、均衡条件 $D = X_t$ より、

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{t+1}}{\partial X_t} &= \frac{\partial D}{\partial \alpha} \cdot \frac{\alpha}{X_t} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial X_t} \cdot \frac{X_t}{\alpha} \Bigg|_{Eq.} \\ &= \frac{\partial \alpha}{\partial X_t} \cdot \frac{X_t}{\alpha} \cdot \frac{\partial D}{\partial \alpha} \cdot \frac{\alpha}{D} \Bigg|_{Eq.} = \eta / \lambda > 0 \end{aligned} \quad (28)$$

を得る。したがって、このシステムが安定であるためには(28)式の値が均衡点において1以下であることが必要である。即ち、

$$0 < \eta / \lambda < 1 \quad (29)$$

従って、前章同様 $-1 < \eta < 0$ を満たす場合、 $\lambda < \eta < 0$ が安定の条件となる。これより、均衡の安定性は、生産・回収技術(η)と消費行動(λ)の兼ね合いに依存することがわかる。この結果を踏まえたうえで、物質循環に焦点を当てたモデルのシミュレーションの結果を付録に示す。

6. 終わりに

図7より明らかなように、主体が近視眼的行動をとる場合、リサイクル可能財Aの価格が高く設定され、しかもその財の生産が過少となる。一方、主体が完全情報により巨視的行動をとることができる場合、あるいは両産業A、Bが合併している場合にはリサイクル可能財の価格が低く、生産量も大きな状態が実現される。

本稿で得た結果は次のような事項を示唆している。1)リサイクル財の市場がある場合に、リサイクリング産業の運営を市場の原理に任せることが必ずしも社会の効率性に整合的でない。2)リサイクリングが、一次生産者によって行われる場合には、社会の効率性が維持される。3)従って本論の範囲(経済的インセンティブがリサイクリングに存在する場合)では、生産者が消費者により排出されるリサイクル可能な廃棄物の責任を負う制度は、倫理観とは無関係に支持される。さらに、4)一般的な仮定の上では均衡の安定性が保証されないため、リサイクリング・システムを何らかの技術政策の管理下におくことも有効であると考えられる。

本稿ではヴァージン、リサイクル両方のプロセスが併存するようなモデルを設定したが、今後は両方互いに完全代替する場合を考察する必要がある。ただしこの場合には、両プロセスが併存せず、離散的な扱いを必要とするだろう。また、現実政策への応用には、廃棄資源をカスケード利用する場

合を考慮する必要がある。さらに、産業 B が有限なサイクル資源を利用し、大きな規模効果がある場合には寡占産業となるため、問題が複雑化する可能性がある。これらの諸問題を今後の課題とする。

謝辞

本稿は、電力中央研究所大河原透氏による多くの貴重な助言に依拠している。また、匿名の査読者からも有益なコメントを頂いた。ここに深く御礼を申し上げたい。

【参考文献】

- [1] Anderson, R.C. and R. D. Spiegelman (1977) "Tax Policy and Secondary Material Use," *Journal of Environmental Economics and Management* 4, pp. 68-82.
- [2] Fullerton, T.D. and T.C. Kinnaman (1995) "Garbage, Recycling and Illicit Burning or Dumping," *Journal of Environmental Economics and Management* 29, pp. 78-91.
- [3] Lusk, R. (1975) "Optimal Taxation Policies for Conservation and Recycling," *Journal of Economic Theory* 11, pp. 315-328.
- [4] Smith, V.L. (1977) "Control Theory Applied to Natural and Environmental Resources: An Exposition," *Journal of Environmental Economics and Management* 4, pp. 1-24.
- [5] Suslow, V.Y. (1986) "Estimating Monopoly Behavior with Competitive Recycling: An Application to Alcoa," *Rand Journal of Economics* 17, pp. 389-403.
- [6] Weinstein M.C. and R.J. Zeckhauser (1974) "The Optimal Consumption of Depletable Natural Resources," *Quarterly Journal of Economics* 89, pp. 371-392.
- [7] 伊藤元重、清野一治、奥野正寛、鈴木興太郎 (1988), 『産業政策の経済分析』、東京大学出版会
- [8] 奥野正寛、鈴木興太郎 (1988), 『ミクロ経済学I・II』、岩波書店
- [9] 小出秀雄 (1996), 『リサイクルの経済分析』、一橋大学経済学研究科修士論文
- [10] 植田和弘 (1992), 『廃棄物とリサイクルの経済学』有斐閣
- [11] 鷺田豊明 (1995), 「市場経済と資源リサイクル」室田武他編『循環の経済学、持続可能な社会の条件』学陽書房

(にしむら かずひこ
電力中央研究所 経済社会研究所)

付録 物質循環のダイナミクス

5章では、一般的な経済学的仮定のもとでは均衡の安定性がパラメータ依存することが示されたが、果たして物質循環のフレームでも同様の結果が得られるのであろうか。そこで、一次プロセス特化の初期状態から、廃棄物が増え、財 B の価格が下がり、産業 A におけるリサイクル財の使用が増え、そのために財 A の価格も下がり、消費が増えて廃棄物が更に増えるという繰り返しにより、システム全体で物理的にどのような現象が起きているかを分析しよう。

本付録では素材の循環や廃棄素材の時間的な変化を分析するための簡単なモデルを新たに導入し、数値実験することにする。図 8 は、このモデルにおける素材の流れを図示したものである。

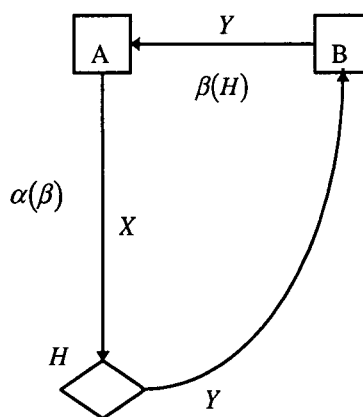


図8 物質循環モデル

各期の廃棄素材 H は、各期の発生量とリサイクル量より決定 ($H_{t+1} = X_t - Y_t$) する。物質保存則により、各期の一次素材産出量が、当該期の財 A の生産量 X_t とその前の期の財 B の生産量 Y_{t-1} の差に等しいことになる。さらに、簡単化のために、 H だけが財 B の価格 β に影響を及ぼすこととする。即ち、

$$\beta(H), \partial \beta / \partial H < 0 \quad (29)$$

とかける。産業 A は(完全競争ゆえに)収穫一定の生産関数を持ち、シェファードの補題より、

$$\frac{Y}{X} = \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} \quad (30)$$

なる技術が採用される。財 A は価格 $\alpha(\beta)$ に依存して需要関数 $D(\alpha)$ に基づき生産される。

$$X = D(\alpha) \quad (31)$$

以上より、ある廃棄素材 H_t に対し、次の期の廃棄素材 H_{t+1} は次のように決定される。

$$H_{t+1} = D(\alpha(\beta(H_t))) \left[1 - \frac{\partial \alpha(\beta(H_t))}{\partial \beta} \right] \quad (32)$$

$$:= F(H_t)$$

この関数の均衡解における安定性を調べよう。いま仮に、生産技術: $\alpha(\beta) = \ln \beta$ 、回収技術: $\beta(H) = \pi H^{-\sigma}$ 、需要関数: $D(\alpha) = \alpha^{-\mu}$ とし、パラメータを変化させた(表 1 参照)ときの、安定性を図 9 ~ 12 に示す。

表 1 数値実験のパラメータ

パラメータ	π	$-\sigma$	$-\mu$
ケース 1	4	-1.5	-1
ケース 2	0.7	-1.4	-0.2
ケース 3	1.05	-3	-0.2
ケース 4	4	-1.5	-2

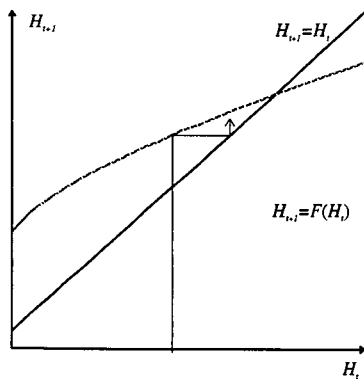


図 9 ケース 1 (安定)

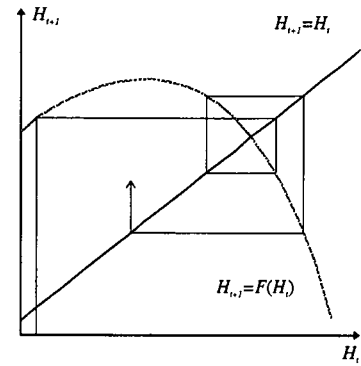


図 10 ケース 2 (振動)

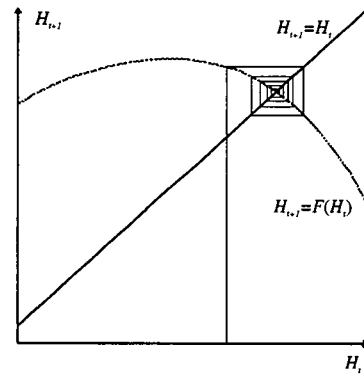


図 11 ケース 3 (安定)

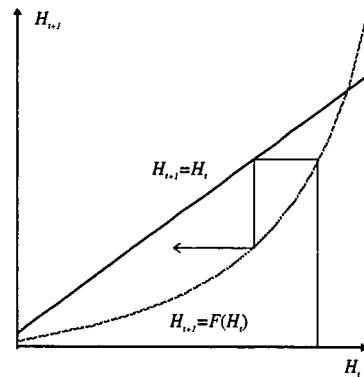


図 12 ケース 4 (不安定)