

〈共同研究〉

「非線形力学系の新しい成果を応用した複雑な経済変動の解明と将来予測」

循環経済モデルと持続可能な経済成長

西垣泰幸*、新井 潤**、伊藤敏和***

1. イントロダクション

経済活動に伴う環境破壊や地球温暖化の進展により、環境保全やそれに資する CO₂ 排出量の削減、資源の循環的再利用などの研究の必要性が高まっている。ここでは、環境経済学の分野において、理論的、実証的研究の蓄積が比較的進んでいないと思われる、自然資源の循環的再利用に焦点を当て、これらの問題に環境経済学の観点から接近する。

自然資源の循環的再利用は、新資源の採掘量を削減し、環境や生態系に与えるダメージを低減させるとともに、廃棄物の排出量を削減し、環境汚染を低減させる効果を持つ。このような観点からの研究は、循環経済モデルと呼ばれる、資源の循環的再利用のプロセスをマクロ経済モデルに取り入れた研究により展開されてきた。このような問題意識は、Boulding (1968) の指摘により、有限な自然資源の長期継続的利用のための研究として始まった。Anderson (2007) は、Pearce and Turner (1990) に基づいて、循環経済のモデルを定式化し、資源の循環的再利用の進展のため、廃棄物やそれがもたらす外部性のコストを明確化することの重要性を指摘した。また、Block and Taylor (2010) は、汚染除去の技術進歩を明示的に取り扱い、循環経済モデルにおいて経済成長と汚染水準との間によく知られた逆 U 字パターンが存在することを示した。

近年、Bongers and Cases (2022) は、資源の中間投入を伴う経済成長モデルにリサイクル活動を導入し、リサイクルと経済成長の関係を検討した。その結果、リサイクル率と経済成長率の間には S 型の関係があり、リサイクル率の上昇が経済厚生を高めることが示された。また、数値計算により、汚染水準と経済成長との間に逆 U 字の関係があること、また、リサイクル技術の向上が経済成長につながり、資源価格の上昇が経済成長を抑制することが示された。

Kasioumi and Stengos (2023) は、リサイクル可能な汚染物質を含む経済成長モデルを用いて、汚染ストックと経済成長との間の環境クズネッツ曲線の関係を検討した。その結果、汚染水準と経済開発の間の逆 U 字関係を見出すとともに、リサイクル活動が経済成長率を高めることを発見した。

これらのモデルは、循環経済におけるリサイクル活動と経済成長の関係性をとらえた興味深い関係性を明らかにしている。ところが、モデルの単純な構造との関係により、リサイクル活動に伴う費用の表現が十分ではなく、ともにリサイクル費用なしに廃棄物あるいは汚染物質の一定割合がリサイクルされ

* 龍谷大学経済学部 教授

** 龍谷大学経済学部 准教授

*** 龍谷大学 名誉教授

ると仮定している。したがって、多くの資源リサイクルに必要な高額のリサイクル費用がモデルに取り込まれていないので、リサイクルに伴う経済成長効果が過度に高く評価されている可能性がある。

また、これらのモデルはじめ既存のモデルの多くが汚染物質や汚染水準と経済開発との関係性を問題としており、環境クズネツツカーブの関係性の存在が研究の中心となっている。環境クズネツツカーブからは、資源のリサイクル活動と経済の持続可能性の関係性について、ある程度の情報が得られる。しかしながら、Johansson (1993)、Markandya, Pearce and Barbier (1990) などの研究により蓄積された持続可能な経済発展の研究成果をモデルに導入するならば、リサイクル活動と持続可能な経済成長に関するさらに興味深い研究成果が得られることが期待される。

以上のような観点から、この研究においては、リサイクル活動のために労働や資源の投入を考慮するリサイクル生産関数を明示的に取り扱い、資源リサイクルのコストを明示的に取り扱った上で、最適なりサイクル率やリサイクル率と経済成長率との関係を検討する。また、環境資本ストックを導入することにより、経済の持続可能性を表す指標を用いて、リサイクル活動や経済の汚染水準と持続可能性の関係性を明らかにするとともに、持続可能性の観点から見た最適なりサイクル活動を検討する。

2. 基本モデル

前提

生産活動：Bongers and Cases (2022) と同様に、生産関数に中間財を導入する。生産活動は、資本ストック、中間財と労働力を用いて、複合財の生産を行う。また、環境資本ストックは生産水準に対して正の外部性を与え、汚染水準は負の外部性をもたらすと仮定する。さらに、生産活動に伴い汚染物質が排出されると仮定する。これは、汚染除去活動により減少させることができる。

消費者：個人は労働供給と資本投資により得た所得を用いて、消費活動を行う。効用関数は財の消費と労働供給、環境資本ストックと汚染水準に依存すると仮定する。財の消費は消費者に正の効用をもたらす、労働供給は負の効用をもたらす。また、環境資本ストックは正の、また、汚染水準は負の外部性をもたらすと仮定する。さらに、財の消費に伴って一定の廃棄物が排出されると仮定する。これは、リサイクル活動により中間財へと転換することができる。

環境資本ストック：Johansson (1993)、Markandya, Pearce and Barbier (1990) などと同様に、環境資本ストックは、環境の保全状況を示す状態変数として導入する。これは、廃棄物の排出や汚染水準により低下するとともに、中間財としての新資源の採掘により低下する。逆に汚染除去活動やリサイクル活動による再生産資源の増加により上昇するとともに、一定の自然の復元力を持つと仮定する。

リサイクル活動：リサイクル関数は、生産要素としての労働と財の投入により廃棄物を再資源化する活動である。消費に伴い発生する廃棄物をリサイクルすることにより、生産プロセスに投入可能な中間財に再生され、新規資源の投入量を減らすことができるとともに廃棄物の排出が削減されることにより、汚染を低く保つことができる。また、この関数は、廃棄物の量が高くなればよりコストが高くなる。

汚染除去活動（環境保護活動）：生産活動に伴い汚染物質が排出されるが、それは中間財投入の増加とともに増加すると仮定する。また、消費活動に伴う廃棄物のうちリサイクル処理されない部分は、経済の汚染水準を高めると仮定する。汚染除去活動は、労働力と生産された財の要素投入により汚染水準を低下させる活動であり、汚染水準を低下させることにより消費者や生産活動への外部不経済効果を低下させるとともに、環境資本ストックの再生産効果を高め、持続可能性を高めると考える。

モデル

効用関数：消費者は無限期間に渡り生存すると仮定する。簡単のため消費者の数は、一定にとどまると

仮定する。したがって、消費者の無限期間にわたる効用は、次のように示される。

$$\int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(C, L, R, z) dt \quad (1)$$

ここで、 C は財の消費量、 L は労働供給量、 R は環境資本ストック、 z は汚染水準を示している。

生産関数：生産活動は、資本ストックと労働、中間財を投入して複合財を生産する過程である。生産活動には、汚染水準が負の外部効果を及ぼすと仮定する。

$$x = F(K, M, L^x, z) \quad (2)$$

ここで、 x は複合財の産出量、 K は資本ストック、 M は中間財、 L^x は生産過程に投入される労働量を示している。また、中間財の投入量に応じて汚染物質が排出されると仮定する。

リサイクル活動：リサイクルは、生産された財と労働を投入して、消費により発生した廃棄物を再利用可能な中間財とする活動である。リサイクル関数は、次のように示される。

$$v = v(x^v, L^v) \quad (3)$$

ここで、 v はリサイクルされた再生資源、 x^v はリサイクル活動のための財の投入量、 L^v は労働投入量を示す。

中間財の投入量：中間財の投入量は、新たに採掘された新資源とリサイクル活動により生み出された再生産資源とからなる。ここで、中間財投入量のうち再生産資源を超える部分が新資源によりまかなわれると仮定する。

$$M = h + v(x^v, L^v) \quad (4)$$

ここで、 h は新資源の量を示す。

環境ストックの動態：環境資本ストックは、Johansson (1993)、Markandya, Pearce and Barbier (1990) などと同様に、一定の再生産機能を持つと仮定する。環境資本ストックの値が大きければ、再生産機能は高まり、逆に、経済の汚染水準が高くなればこの機能が損なわれると仮定する。また、新資源の採掘は、環境資本ストックを低減させ、持続可能性を損なうと考える。

$$\dot{R} = g(R, z) - h \quad (5)$$

ここで、 g は資源の再生産関数であり、上の仮定により $\partial g / \partial R > 0$, $\partial g / \partial z < 0$ とする。

資本ストックの蓄積過程：

$$\dot{K} = I - \delta K \quad (6)$$

ここで、 I は投資、 δ は資本減耗率である。

汚染水準の決定式：

$$z = \varepsilon M + \gamma[\mu C - v(\mu C, x^v, L^v)] - z^p(x^p, L^p) \quad (7)$$

ここで、 ε は生産に伴う汚染の発生率、 γ は廃棄物に伴う汚染の発生率、 μ は消費量に対する廃棄物の排出係数、 μC は廃棄物、 z^p は汚染除去関数、 x^p は汚染除去に投入される複合財、 L^p は労働投入とする。

財市場均衡式：生産された複合財は、個人の消費、資本ストックへの投資に加えて、環境保全投入、リサイクル投入として利用される。

$$x = C + x^p + x^v + I \quad (8)$$

労働市場の均衡式：労働は、複合財の生産過程、環境保全活動およびリサイクル活動に雇用される。

$$L = L^x + L^v + L^p \quad (9)$$

3. 社会的に最適ナリサイクル活動、環境保全活動とその必要条件

この節では、上記の基本モデルについて動的な最適化を行い、社会的に最適な生産、消費、投資、リサイクル活動、環境保全活動を求め、最適な状態における資本ストックの蓄積経路、環境資本ストックの動態を検討する。

動的な最適化問題は、次のように定式化される。

$$\begin{aligned} H = & U(C, L, R, z) + P_x[F(K, M, L^x, z) - C - x^p - x^v - I] \\ & + w(L - L^x - L^v - L^p) \\ & + P_m[h + v(x^v, L^v) - m] \\ & + \beta\{z - \varepsilon M - \gamma[\mu C - v(x^v, L^v)] + z^p(x^p, L^p)\} \\ & + \lambda_1(I - \delta K) \\ & + \lambda_2[g(R, z) - h] \end{aligned} \quad (10)$$

この最適化問題は、最適制御の手法を用いて解くことができる。内点解の存在を仮定した上で最適化のための1階の条件を求めると次のように示される。

$$\partial H / \partial C = U_c - P_x - \beta\gamma\mu = 0 \quad (11)$$

$$\partial H / \partial L = U_L + w = 0 \quad (12)$$

$$\partial H / \partial L^x = F_L - w = 0 \quad (13)$$

$$\partial H / \partial L^p = \beta z_L^p - w = 0 \quad (14)$$

$$\partial H / \partial L^v = P_m v_L + \beta\gamma v_L - w = 0 \quad (15)$$

$$\partial H / \partial x^p = -P_x + \beta z_x^p = 0 \quad (16)$$

$$\partial H / \partial x^v = -P_x + P_m v_x + \beta\gamma v_x = 0 \quad (17)$$

$$\partial H / \partial M = P_x F_M - P_m - \beta\varepsilon = 0 \quad (18)$$

$$\partial H / \partial I = \lambda_1 - P_x = 0 \quad (19)$$

$$\partial H / \partial h = P_m - \lambda_2 = 0 \quad (20)$$

$$\partial H / \partial z = U_z + P_x F_z + \beta + \lambda_2 g_z = 0 \quad (21)$$

$$\dot{\lambda}_1 = \rho\lambda_1 - \partial H / \partial K = \rho\lambda_1 - P_x F_K - \lambda_1\delta \quad (22)$$

$$\dot{\lambda}_2 = \rho\lambda_2 - \partial H / \partial R = \rho\lambda_2 - U_R - \lambda_2 g_R \quad (23)$$

最適性条件**最適消費、外部効果、および最適リサイクル条件**

(11) 式は、個人の消費に関する最適条件を示している。

$$U_c = P_x + \beta\gamma\mu \quad (24)$$

ここでは、消費に伴って一定割合（ μ ）の廃棄物が排出され、それに係数 γ をかけたものが汚染として排出されると仮定しているので、その条件は限界効用と財の価格が一致するという通常のものではない。(24) 式の右辺第2項の β は、(20) 式より得られる $\lambda_2 = P_m$ を用いて(21) 式より次の様に示すことができる。

$$\beta = -U_z - P_x F_z - P_m g_z \quad (25)$$

ここで、 U_z は、汚染水準の限界不効用であり、 $P_x F_z$ は汚染が生産活動に及ぼす影響（限界費用）、 $P_m g_z$ は環境資源の再生産に及ぼす汚染の影響（限界費用）を示している。従って、 β は廃棄物がもたらす社会的限界費用を示すことがわかる。このような想定の下では、消費はこの社会的限界費用の分だけ、通常の最適点より低くとどめることが最適であることを示している。

しかしながら、この社会的限界費用は技術的外部費用であり、個人に直接認識されるものではない。したがって、現実の市場経済の下では、廃棄物がもたらすこのような外部効果は、個人には認識されることなく、消費が(24) 式が示す最適点を超えて過剰に行われる。最適な消費のためには、何らかの政策的手段により、個人にこの社会的外部負経済効果を認識させることが必要となる。

次に、消費に伴う廃棄物をリサイクルする活動の最適性に目を移すと、リサイクル活動に関する(15) 式と(17) 式より、次のような最適条件を得る。

$$MR = (P_m + \beta\gamma) \left(v_x \frac{dx^v}{dv} + v_L \frac{dL^v}{dv} \right) = P_x \frac{dx^v}{dv} + w \frac{dL^v}{dv} = MC \quad (26)$$

(26) 式の最右辺および右辺は、リサイクル活動に伴い発生する費用を示している。他方、最左辺および左辺は、リサイクル活動から得られる限界収入を示しているが、それはリサイクルから得られる再生资源1単位の価格に加えて、廃棄物が低下することに伴い節約できる限界社会的外部費用の合計であることを示している。ところが、市場経済の下でリサイクル活動が運営される場合には、私的なリサイクル運営主体が認識するのは、再生産資源の価格のみであり、この社会的外部費用の節約部分を正しく認識することができない。したがって、リサイクル活動は社会的に最適な場合と比較して過少な水準にとどまることがわかる。

このように、リサイクル活動に伴う外部効果が存在する場合には、市場経済において社会的最適を達成する場合には、補助金等何らかの政策手段が必要となることがわかる。リサイクル活動は、生産に投入される自然資源の採掘を減じて、環境資本ストックの持続可能性を高めるので、最適なりサイクル活動を促進することは特に重要である。また、この社会的な外部経済効果に関する(25) 式を見ると、これには環境資本ストックの再生産に関わる阻害効果を含むことがわかる(25 式右辺第3項)。したがって、リサイクル活動が廃棄物の処理を通じて汚染の除去につながるばかりではなく、環境資本の保全にも一定の促進効果を持つことからこのような活動の重要性を認識しなければならない。

最適な環境政策

汚染水準 (z) を低減させる環境政策の効果については、上述のように、(21) 式に基づいて (25) 式の様を示すことができる。他方、環境政策のコストに関しては、(14) 式と (16) 式から次のように示すことができる。

$$\frac{dC_p}{dz} = P_x \frac{dx^p}{dz} + w \frac{dL^p}{dz} = \beta \left(z_x^p \frac{dx^p}{dz} + z_L^p \frac{dL^p}{dz} \right) = \beta \quad (27)$$

ここで、(27) 式右辺より際右辺の関係は、環境政策の費用関数あるいは、汚染除去の最適問題（費用最小化）に関する制約条件式の全微分により示される。

このように、 β は、環境汚染の社会的シャドウプライスであると同時に、最適な環境政策の下では、そのコストと一致することがわかる。

経済成長率と汚染水準

次に、経済成長率に関して議論を進める。通常の経済成長モデルにおいては、経済成長率は資本ストックの成長率として与えられる。それは、このモデルにおいては、(19) 式と (21) 式より次のように示される。

$$-\frac{\dot{\lambda}_1}{\lambda_1} = F_k - (\rho + \delta) \quad (28)$$

他方、消費の成長率については、(11) 式と (19) 式から、次のように示すことができる。

$$\frac{\dot{c}}{c} = -\frac{1}{\sigma} \left[\epsilon \frac{\dot{\lambda}_1}{\lambda_1} + (1 - \epsilon) \frac{\dot{\beta}}{\beta} \right] \quad (29)$$

ここで、 $\sigma (= -U_{cc}c/U_c > 0)$ は消費の異時点間弾力性であり、 $\epsilon (\equiv \lambda_1/(\lambda_1 + \beta\gamma\mu))$ は相対的シェアーとされている。

(29) 式は、消費の成長率が資本の成長率 ($-\dot{\lambda}_1/\lambda_1$) と外部効果の低下率 ($-\dot{\beta}/\beta$) に依存して決まることを意味している。したがって、消費の成長率が資本ストックなど経済の基本的な成長率と一致するためには、(25) 式により示される財の消費がもたらす外部性が同じ率で低下しなければならない。逆に、環境の外部効果をともなう市場経済においては、このような消費がもたらす外部効果が個人に正しく認識されないため、(29) 式カギ括弧内は (25) 式右辺と一致し、消費はその外部性にかかわらず、経済の基本的成長率と同じ率で増加してゆくことがわかる。

次に、環境資本ストックの動態について検討しよう。(22) 式と (20) 式を用いて整理することにより、次のような関係が得られる。

$$-\frac{\dot{\lambda}_2}{\lambda_2} = \frac{U_R}{P_m} + g_R - \rho \quad (30)$$

(30) 式は、環境資本ストックの成長率が、個人の限界効用を自然資源価格で評価した値とその限界再生力から割引率を引いた値に依存することを示している。

4. 循環経済と経済厚生

環境変数を考慮した経済の厚生水準に関しては、Hartwick (1973) や Johansson (1993) などに従っ

て、瞬時的効用関数の一次近似を行い、ハミルトニアン、状態変数に関する微分方程式、市場均衡条件を用いることにより次のような表現を得る。

$$H(\cdot) \approx U_c c + U_L L + U_R R + U_Z z + \lambda_1 \dot{K} + \lambda_2 \dot{R} \quad (31)$$

(31) 式は、この経済の瞬時的厚生水準が各時点での効用水準と資本ストック、環境資本ストックの動態により示されることを意味している。以下では、この式を応用して分析を行う。

経済厚生と国民福祉指標

(31) 式に最適化条件式と市場均衡条件式を適用して整理することにより、環境変数を考慮した経済厚生水準（NMW）は、次のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} NMW = & \\ & P_x c + P_x x^v + P_x x^p + P_x \dot{K} \\ & - P_x x^p + U_z z - w L^p \\ & + U_R R + \lambda_2 \dot{R} - w L \end{aligned} \quad (32)$$

(32) 式右辺第1行は、通常の国民所得概念に対応している。つまり、生産された財により示した個人消費、資源循環への生産物投入、純投資、公共支出（汚染除去投入）からなっている。次の第2行は、環境変数を考慮することに伴う修正を表している。これは、汚染除去に関わる財と労働投入に関する費用と環境汚染に伴う負効用を意味している。まず、汚染除去のための費用は、通常の国民所得概念には含まれるが、厚生指標としての NMW からは除去して考える必要があることを意味している。ただし、汚染除去による環境改善に伴う便益は、汚染に伴う負効用の低下により示されていることに注意が必要である。

他方、(32) 式第3行は、環境ストックの効用評価や余暇の経済評価からなっている。第3行第1項は環境資本ストックの厚生評価を示しており、第3項は余暇時間の評価を労働所得を代理変数として示したものである。他方、第2項は、環境資本ストックの経時的な変化に伴う効用変化を示している。環境資本ストックの効用評価に加えて、この項が含まれる理由は、資源の採掘により増大した生産増に伴う国民所得増の過大評価を修正するためである。逆に、資源のリサイクル活動により新資源の採掘が減少するが、それに伴う環境資本ストックの経時的増加はこの項を通じて厚生評価に反映されることがわかる。

持続可能な経済成長とサステナビリティ

持続可能な経済発展の定義にはいくつかのものが見られるが、比較的良く引用されるものとして Markandya et al. (1990) がある。それは、現時点に達成された所得が、将来消費を低下させないならば、持続可能と考えるものである。この持続可能な所得をさらに検討するために、(10) 式の最適化問題に関するハミルトニアンを時間に関して全微分し、最低条件と市場均衡条件式を代入することにより、次のような表現を得る。

$$\frac{dH}{dt} = \rho[\lambda_1 \dot{K} + \lambda_2 \dot{R}] = \rho[H(\cdot) - U(\cdot)] \quad (33)$$

(33) 式において $dH/dt \geq 0$ ならば持続可能と定義される。しかしながらこの場合、例えば、環境資

本ストックの経時的な減少を資本ストックの増加により補う場合にも持続可能と判断されるため、弱い持続可能性と呼ばれている。さらに、強い持続可能性条件のためには、両ストックともに減少しない、つまり、 $\dot{K}, \dot{R} \geq 0$ が求められる。

このように、この定義によれば、経済成長理論における定常状態均衡 ($\dot{K} = \dot{R} = 0$)、あるいは定常成長均衡 ($\dot{K} = \dot{R} > 0$) は、持続可能な経済成長と呼べることがわかる。

参考文献

- Andersen, M. S. (2007) "An Introductory Note on the Environmental Economics of Circular Economy," *sustainability Science* Vol.2 pp.133-140.
- Bongers, A. and P. Cases (2022) "The Circular Economy and the Optimal Recycling Rate: A macroeconomic approach," *Ecological Economics*, Vol.199, pp.1-12.
- Boulding, K. (1968) *Beyond Economics: Essays on Society, Religion, and Ethics*, University of Michigan Press.
- Johansson, P. O. (1993) *Cost-Benefit Analysis of Environmental Change*, Cambridge University Press.
- Kasioumi, M. and T. Stengos (2023) "A Circular Model of Economic Growth and Waste Recycling," *Circular Economy and Sustainability*, Vol.3, pp.321-346.
- Markandya, A., Pearce, D. W. and E. Barbier (1990) *Sustainable Development, Economics and Environment in the Third World*, Edward Elger.
- Pearce, and Turner (1990) *Economics of natural resources and the environment*. Harvester Wheatsheaf, Londo