

【研究ノート】

簡単な動学モデルによる 地域環境問題と越境汚染問題についての一考察

藤 垣 芳 文

第1節 はじめに

本研究ノートは、経済主体間の相互作用の研究をテーマに私が数年来続けてきた動学的モデル分析で得た結果を、一応の論考形式として紙面上に纏めることを目的に書き始めたものである。先に私は「ロトカ=ヴォルテラの微分方程式」を用いた経済主体間の相互作用に関する研究を行ったが、テーマと手法の両面においてこの研究ノートはそれを引き継ぐものである。これまでに得た成果とこれから得る成果を統合し、いずれかは経済動学に関する一研究成書として纏め上げたいと考えている。

今回の論考がカバーするのは、ひとつの独立した地域内で行われる経済活動と、それが引き起こす環境問題を、簡単な動学モデルとして定式化し分析すること、そして、このモデルを2つの異なった地域経済を含むように拡張し越境汚染問題の分析用具として整理することである。後者に関しては、何か具体的な問題解決策を提示できたわけではない。よくいわれる「不都合な問題」を再確認するだけにとどまっている。

今後の研究の中では、本研究ノートで提示した「ひな型モデル」を地域間交易を扱えるように拡張し、その拡張した動学的地域間交易モデルを用いて、あらためて越境汚染問題や、この問題に対処するための環境政策が地域間の交易パターンに与える影響を検討する予定である。

本研究ノートはいろいろな意味でコンピュータに依存している。本研究ノートにはコンピュータを利用しなければ得られなかった内容が少なからず含まれている。好都合なことに、経済学には数理モデルになじむ基本的な分析概念が数多く蓄積されている。したがって、コンピュータ操作にある程度の技能さえ持つことができれば、幅広い経済問題に関して、比較的簡単に、コンピュータ上のモデル構築ができるようになる。率直に述べるなら、ここで私が行おうとしていることは、たかだかそのような試みのひとつにすぎないのかもしれない。

ただし、いったんモデルのひな型が構成できたら、それを用いて無数の試行錯誤を繰り返すことができる。そうした繰返しの中かで、ひな型モデルを論理的かつ自然な形へと、より精密なモデルにブラッシュアップし、考察中の問題の本質的な特徴を絞り込むことができる

ようになる。そうした試行錯誤のプロセスの中で、問題の新たな側面や考察する主体側でもつべき新たな視点が次々と現れてくることも、しばしば経験することである。そのような事柄を本論考およびそのシリーズのなかに書き記すことで、同様の関心を持つ誰かの、何らかの役に立つことがあるかもしれない。

本研究ノートの第2節以降の構成は次の通りである。第2節では、独立した単一地域内の経済活動をあつかう動学モデルを提示し、その特徴を見る。その内容は、完全競争市場を想定した、最も簡単な形式の動学的一般均衡分析である。第3節では、第2節で提示したモデルに外部性問題を加え、環境コスト管理のための環境税政策の役割を検討する。第4節では、この動学モデルを2つの異なった地域経済に適用することを試みる。越境汚染問題を取り上げ、その本質的困難性を再確認する。

本研究ノートの各節で導入されるすべての動学モデルは、ウルフラムリサーチ社の *Mathematica* (version 10) を用いてプログラムを作り、コンピュータ上で数値計算を実行した。その結果のいくつかは本文中で紹介したが、紙面の都合上、すべてを本文中に掲載することはできなかった。本研究ノートに掲載しなかった部分は、成蹊大学の私のホームページ (<http://sun.econ.seikei.ac.jp/~fujigaki/>) 上に掲げておくので、必要に応じてアクセスされたい。

第2節 基本モデル1 孤立したひとつの地域・外部性なし

2.1 効用関数と生産関数

その地域に存在する2種類の資源(生産要素) L, K を投入して、2種類の生産物 X, Y を生産し、消費している地域経済を考える。この地域には多数の生産者と消費者が存在するものと想定するが、分析の簡単化のために、それぞれは同質的と仮定する。

消費者は2種類の生産物 X, Y に関してコブ=ダグラス型の効用関数

$$U(x, y, m) = \alpha x^\beta y^\gamma + m, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0, \quad \gamma > 0 \quad (2.1)$$

を有するものとする。消費者の効用は、彼が保有する貨幣の量 m にも依存するとし、本研究ノートでは、分析の簡単化のために、効用は m に関して線形と仮定する。さらに、この地域に存在する資源 $L = L_0, K = K_0$ は、消費者が一体として所有すると仮定する。

生産物 X, Y の生産者を、それぞれ、生産者 X 、生産者 Y とよぶ。これらの生産者は1次同次のコブ=ダグラス型生産関数

$$\begin{aligned} x &= a_x L^{b_x} K^{1-b_x}, \quad a_x > 0, \quad 0 < b_x < 1 \\ y &= a_y L^{b_y} K^{1-b_y}, \quad a_y > 0, \quad 0 < b_y < 1 \end{aligned} \quad (2.2)$$

を有しているものと仮定する。

2.2 生産物の市場価格

消費者は予算制約下に効用最大化を行う。すなわち、

$$\text{Max}U = \alpha x^\beta y^\gamma + m \quad \text{s. t.} \quad P_x X + P_y Y + m \leq M = wL_0 + rK_0 \quad (2.3)$$

ここに、 M は消費者の所得であり、 w, r は資源 L, K の市場価格、 L_0, K_0 はこれらの資源の初期賦存量である。

この制約付き最大化問題のラグランジュ関数を

$$V(x, y, m, \lambda) = U(x, y, m) + \lambda \{M - (P_x x + P_y y + m)\}$$

とすると、最適化の1階条件式として

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \alpha \beta x^{\beta-1} y^\gamma - \lambda P_x = 0,$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \alpha \gamma x^\beta y^{\gamma-1} - \lambda P_y = 0,$$

$$\frac{\partial V}{\partial m} = 1 - \lambda = 0,$$

$$\frac{\partial V}{\partial \lambda} = M - (P_x x + P_y y + m) = 0,$$

を得る。これらを整理して、生産物 X, Y の市場価格（正確には「需要価格式」というべきだが）

$$P_x = \alpha \beta x^{\beta-1} y^\gamma, \quad P_y = \alpha \gamma x^\beta y^{\gamma-1} \quad (2.4)$$

を得る。

2.3 生産者の生産調整様式

一方、生産者は、生産要素市場で資源を調達し、それを生産プロセスに投入し、それで産出した生産物を生産物市場で販売する。すべての市場は完全競争市場とする。

以下では、企業は一挙に大幅（大域的）な生産調整を行うことはできないと仮定する。そうではなく、各企業は、各時点において、市場で成立している市場価格をシグナルとして、追加的生产物が利益をもたらすときは「増産」し、損失をもたらすときは「減産」という形で、小幅（局所的）な生産調整を繰返すものとする。生産者によるこの利潤追求的な調整行動は、

$$\frac{d}{dt}x(t) = [P_x - MC_x]x(t), \quad \frac{d}{dt}y(t) = [P_y - MC_y]y(t) \quad (2.5)$$

と表すことができる。ここに、 $dx(t)/dt, dy(t)/dt$ は、時点 t における財 X, Y の生産調整速度、 P_x, P_y は時点 t での生産物 X, Y の市場価格、 MC_x, MC_y は生産物 X, Y の限界費用である。

2.4 費用関数、限界費用関数、および資源の派生需要関数

生産物 X の生産者は、産出目標値 X を実現するのに最小の費用を目指す。すなわち、

$$\text{Min } wL + rK \quad \text{s. t.} \quad x = a_x L^{b_x} K^{1-b_x}. \quad (2.6)$$

この制約付き最小化問題の1階条件式を求めると、 μ をラグランジュ乗数として、

$$\begin{aligned} w - \mu ab(L/K)^{b-1} &= 0, \\ r - \mu a(1-b)(L/K)^b &= 0, \\ x - a L^b K^{1-b} &= 0 \end{aligned}$$

である。上の第1式と第2式から μ を消去し、第3式と連立させて L, K について解くと、各資源の派生需要関数が

$$L(x) = \frac{1}{a} \left(\frac{1-b}{b} \right)^{b-1} \left(\frac{w}{r} \right)^{b-1} x, \quad K(x) = \frac{1}{a} \left(\frac{1-b}{b} \right)^b \left(\frac{w}{r} \right)^b x \quad (2.7)$$

と求められる。なお、記号表記が煩雑になることを避けるために、(2.7)では、パラメータ a_x, b_x の添字 x は省略した。(2.7)から、生産物 X を x 単位生産するときの最小費用が

$$C(x) = \text{Min}\{wL + rK\} = wL(x) + rK(x) = \frac{1}{a} b^{-b} (1-b)^{-(1-b)} w^b r^{1-b} x \quad (2.8)$$

と定められる。(2.8)から明らかなように、生産関数のパラメータ a がパラメータ b と

$$a \equiv b^{-b} (1-b)^{-(1-b)} \quad (2.9)$$

なる関係を充たすように生産物 X の計量単位を選べば、(2.8)の費用関数は単純化され、

$$C(x) = w^b r^{1-b} x \quad (2.10)$$

と書くことができる。以下では単位の縮尺(2.9)を一貫して仮定する。

(2.10)から生産物 X の限界費用は

$$MC(x) = w^b r^{1-b} \quad (2.11)$$

となる。同様の計算によって、生産物 Y の派生需要関数と、費用関数、限界費用関数

$$L(y) = b \left(\frac{w}{r} \right)^{b-1} y, \quad K(y) = (1-b) \left(\frac{w}{r} \right)^b y \quad (2.12)$$

$$C(y) = w^b r^{1-b} y, \quad MC(y) = w^b r^{1-b} \quad (2.13)$$

を得る(ここでも、パラメータの添字は省略した)。

2.5 生産者による生産調整式(まとめ)

生産物の調整式は(2.5)のように仮定したが、消費者の効用最大化行動から導かれる市場価格(2.4)、および生産者の費用最小化行動から導かれる限界費用(2.11)、(2.13)を代入して、次のように書き改めることができる。

$$\frac{d}{dt} x(t) = [\alpha \beta x^{\beta-1} y^\gamma - w^{b_x} r^{1-b_x}] x(t) \quad (2.14)$$

$$\frac{d}{dt} y(t) = [\alpha \gamma x^\beta y^{\gamma-1} - w^{b_y} r^{1-b_y}] y(t) \quad (2.15)$$

2.6 生産要素市場における価格調整

生産要素市場では、派生需要 (2.7) と (2.12) の総量と総供給量 (初期賦存量) とがバランスするように、各生産要素の市場価格が定まると仮定する。超過需要が存在するときには市場価格は上昇し、超過供給が存在するときには下落する。こうして、生産要素 L, K の価格調整式は

$$\frac{d}{dt}w(t) = \lambda_w \left[b_x \left(\frac{w}{r} \right)^{b_x-1} x + b_y \left(\frac{w}{r} \right)^{b_y-1} y - L_0 \right] (w - w_0) \quad (2.16)$$

$$\frac{d}{dt}r(t) = \lambda_r \left[(b_x - 1) \left(\frac{w}{r} \right)^{b_x} x + (b_y - 1) \left(\frac{w}{r} \right)^{b_y} y - K_0 \right] (r - r_0) \quad (2.17)$$

と書くことができる。(2.16), (2.17) の右辺に含まれる変数 $\lambda_w > 0, \lambda_r > 0$ は、要素価格の調整パラメータである。

なお、後段に示すように、環境税が課される場合には、生産物の生産レベルが抑制されて、すべての、ないし一部の資源に、超過供給が発生することがある。そうした場合、当該の資源価格はゼロにまで落込んでしまうが、そのときには、本研究ノートで提示する動学モデルは、動作速度が極端に遅くなって、機能しなくなってしまう。これを避けるには、すべての資源に非ゼロの最低価格が存在することが必要である。(2.16), (2.17) の右辺最後の項に含まれる $w_0 > 0, r_0 > 0$ は資源 L, K のそうした最低価格を表している。かりに市場において、資源の超過供給が解消されなくても、その市場価格はこの最低水準を超えてさらに下落することはないと仮定する。

さらにもう一点、瑣末ではあるが注意しておくべきことがある。(2.16), (2.17) の調整式を含む動学プロセスでは、調整経路上の終点を除く任意の点で、任意の財の超過需要が発生し得る。これは、調整途中の状態変数が生産可能性フロンティアの外側にはみ出すことがあること、すなわち、経路上の取引は、必ずしも実現可能ではないことを意味する。こうした意味で、本研究ノートで取り上げる動学モデルは、厳密には (実現する取引の時系列モデルではなく) ある種の模索過程モデルと考えるなければならない。

2.7 動学モデルの定常点としての競争均衡, およびその安定性

以上で、2つの生産物の生産量 (消費量) x, y , および、2つの生産要素の価格 w, r に関する動学的調整モデルが示されたことになる。4本の調整式 (2.14), (2.15), (2.16), (2.17) で構成されるモデルがそれである。

この動学モデルに含まれるパラメータの数値を適当に設定し、コンピュータ上で数値計算プログラムによって作動させてみる。それから得られる結果のひとつを以下に示す。

[図2-1] は、モデルのパラメータを

$$\{b_x=0.7, b_y=0.4, \alpha=2, \beta=0.4, \gamma=0.4\}$$

とおき、初期値を

$$\{x_0=0.1, y_0=1, w_0=0.5, r_0=1\}$$

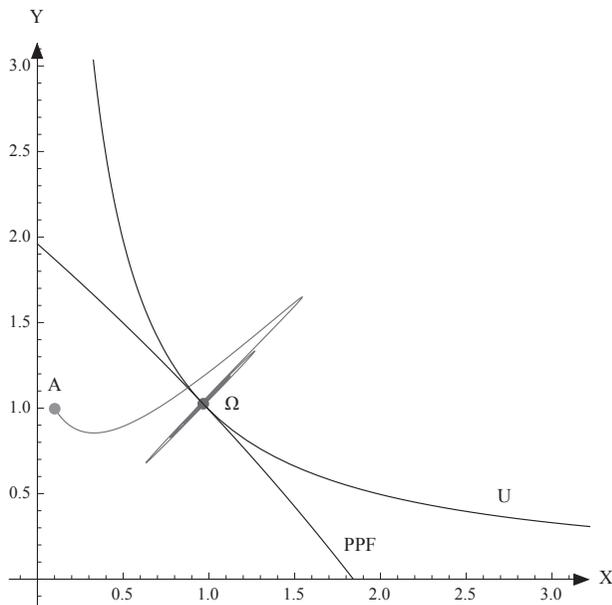
としたときの生産物 $\{x(t), y(t)\}$ の調整経路を表すものである。資源の初期賦存量は、

$$\{L_0=1, K_0=1\}$$

と仮定している。以下のすべての数値計算において、資源の初期賦存量に関するこの数値設定は維持される。

縦軸に近い点 A が初期点で、そこから開始された調整プロセスは、図の中央の点 Ω に収束していく。この図において、右下がりのほぼ直線に見える曲線 PPF は、この地域経済の生産可能性フロンティアである。また、右下がりの曲線 U は、この地域の代表的消費者の無差別曲線である。調整経路の終点 Ω で、両者は接し合っている。点 Ω において限界代替率と限界変形率は均等化し、両者は生産物の価格比率に一致している。すなわち、動学モデルの終点 Ω は、パレート効率的な競争均衡であることがわかる。

点 Ω が、われわれの動学モデルにおける（局所的に）安定な定常点であることは、この点でわれわれの動学モデルを線形化し、そうして得られる線形化行列の固有値を計算し、それらの実部がすべてマイナスであることを確認すればよい。この数値計算結果を本研究ノートに掲載することは省略するが、点 Ω において確かにそれが成り立つことを確認できる。



[図2-1]

第3節 基本モデル2 孤立したひとつの地域・外部性あり

3.1 環境コスト

本節では、前節のモデルに外部性を追加する。すなわち、生産物 X, Y の生産に付随して廃棄物が環境中に排出され、それが累積して、この地域の住人（消費者）に悪影響を及ぼすとする。この影響を「環境コスト」と呼ぶ。

以下では、この環境コストは消費者の効用に直接被害を与えるが、生産活動には何ら影響を与えないと仮定する。いうまでもなく、これも分析の単純化のための仮定で、より一般的には、環境コストが資源や生産設備の質を劣化させ、それによって生産者の生産性が低下するようなケースを考えることにも大きな意味がある。本研究ノートでは、そこに立ち入ることは避けるが、いずれかは、こうしたケースを取り上げることも予定したい。

さて、以下では、生産物 X, Y の生産にともなう廃棄物の発生、および環境への廃棄物の累積による環境コストの発生について、次のようなメカニズムを想定する。廃棄物は生産に比例的に発生する。そのうちの一部は、自然環境が備える浄化能力によって分解されるが、残余部分は環境中に蓄積される。時点 t における生産活動によって環境中に放出される廃棄物は

$$g(t) = \mu_x x(t) + \mu_y y(t) - \theta, \quad \mu_x, \mu_y, \theta > 0 \quad (3.1)$$

であり、こうした繰返しにより時点 t までに環境中に累積した廃棄物ストックは

$$G(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau + G_0 \quad (3.2)$$

である。各時点における累積廃棄物量を初期時点との相対量で考えることとして、以下では $G_0 = 0$ と基準化する。

環境中に累積した廃棄物は、自然破壊、景観破壊、地球温暖化などを引き起こして、人々の健康等に被害をもたらすであろう。本研究ノートでは、その被害の大きさは、廃棄物量の増加により、マルサスの成長で拡大していくと仮定する。すなわち、

$$c(t) = \varphi e^{\delta G(t)}, \quad \varphi, \delta > 0 \quad (3.3)$$

である。この環境コストの時間変化率は

$$\frac{d}{dt} c(t) = \delta \frac{dG(t)}{dt} \varphi e^{\delta G(t)} = \delta \{ \mu_x x(t) + \mu_y y(t) - \theta \} c(t) \quad (3.4)$$

と計算できる。

3.2 環境税

生産活動にともなう廃棄物の排出が放置されるケースにおいては、自然の浄化力が十分に高いか、あるいは、生産活動のある領域において、廃棄物を積極的に減らすような活動が実

施される場合を除いて、地域経済はいずれかは破綻に直面する。それを避けるために、政府には、生産者に排出を抑制させるような、環境政策の実施が求められることになる。

生産物 X の生産者への課税について考えてみよう。生産物 X の追加的1単位が排出する廃棄物の量は μ_x である。また、廃棄物の追加的1単位が生み出す環境コストは δc である。したがって、時点 t における生産物 X の $x(t)$ 単位の生産が原因となって発生する環境コストの増加分は

$$T_x(t) = \delta \mu_x c(t) x(t) \quad (3.5)$$

である。「汚染者負担の原則」を前提とすれば、各時点 t において、この額の環境税が、生産者 X に対して、課されるのでなければならない。

同様の環境税が、生産物 Y の生産者に対しても課されるものとする。

$$T_y(t) = \delta \mu_y c(t) y(t) \quad (3.6)$$

環境税がこのように課されると、生産者の(税込みの)限界費用は $\delta \mu c$ だけ増加して利益を圧迫する。前節で提示した生産者の生産調整式 (2.14), (2.15) は、

$$\frac{d}{dt} x(t) = [\alpha \beta x(t)^{\beta-1} y(t)^\gamma - w(t)^{b_x} r(t)^{1-b_x} - \delta \mu_x c(t)] x(t) \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} y(t) = [\alpha \gamma x(t)^\beta y(t)^{\gamma-1} - w(t)^{b_y} r(t)^{1-b_y} - \delta \mu_y c(t)] y(t) \quad (3.8)$$

のように修正される。

環境コストが導入され、その時間変化が (3.4) で規定される。さらに生産者には環境税が課されて、生産調整が (3.7), (3.8) のように進められる。動学モデルがこのように修正されるとき、調整経路の終点ではどのような状態がもたらされるか。以下に検討してみよう。

3.3 動学モデルの定常点の性質 (環境税政策が実施されないとき)

生産にともなう廃棄物の排出は自然の浄化力を超えており、放置すれば環境コストが加速度的に高まっていくことを仮定する。そうした想定のもとに、まずはじめに、環境税政策が実施されないときの帰結をみてみよう。

[図3-1-1] は、モデルのパラメータを

$$\{ b_x = 0.7, b_y = 0.4, \alpha = 2, \beta = 0.4, \gamma = 0.4, \\ \mu_x = 0.1, \mu_y = 0.4, \theta = 0.3, \varphi = 1, \delta = 1 \}$$

とおき、初期値を

$$\{ x_0 = 0.1, y_0 = 1, w_0 = 0.5, r_0 = 0.5, c_0 = 1 \}$$

としたときの生産物 $\{x(t), y(t)\}$ の数量調整経路を表すものである。ただし、環境税は課されないので、生産調整式 (3.7), (3.8) の右辺 $\{ \}$ 内の第3項は 0 である。数値計算のプロセスの紹介は省略するが、点 A が初期点で、そこから開始された調整プロセスは点 Ω に収束して

いく。

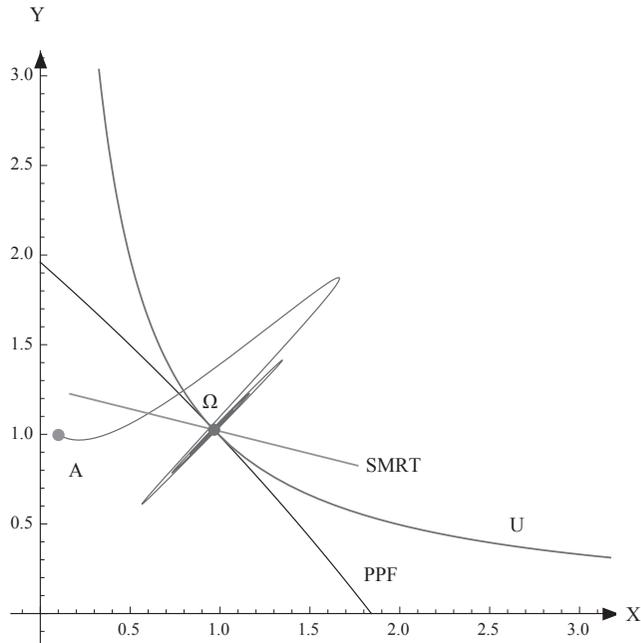
終点 Ω において、この地域の生産可能性フロンティアと無差別曲線は接し合っている。ではあるが、環境コストが存在するから、この状態はパレート効率的ではない。実際、生産可能性フロンティアの点 Ω における接線の傾きは、環境コストを考慮しない「私的限界変形率」を表しているにすぎない。

終点 Ω において、生産物 X を1単位減らすと、それによって、限界費用 MC_x と限界的な環境コスト $\delta\mu_x c$ の合計額が、 X の生産から開放され、 Y の生産に振り向けられる。1単位の Y の生産には、限界費用 MC_y と限界的な環境コスト $\delta\mu_y c$ の投入が必要であるから、したがって Ω における「社会的限界変形率」は、

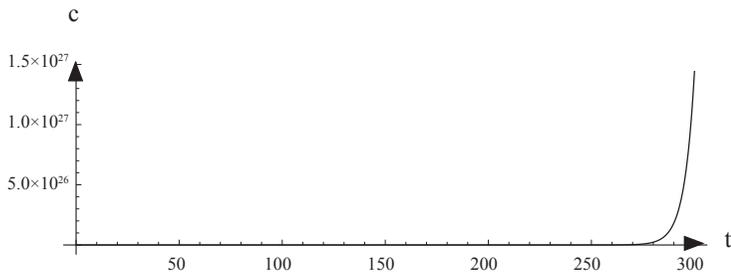
$$SMRT = \frac{MC_x + \delta\mu_x c}{MC_y + \delta\mu_y c} \quad (3.9)$$

である。[図3-1-1]において明らかな通り、この社会的限界変形率(SMRT)は点 Ω で無差別曲線と接するのではなく、交差している。

累積廃棄物による環境コストは[図3-1-1]には表現されていない。環境コストの変化の様子は[図3-1-2]で確認できる。環境コストは、消費者の効用を、その貨幣表示額だけ減少させる。パラメータ δ が微小な場合には、環境コストの成長は初め穏やかに進むので、環境税の負担の方が、環境コストに較べて、相対的に重く感じられる。しかし、いずれかは確実に環境コストは発散する。そのとき地域経済は破綻するであろう。



[図3-1-1]

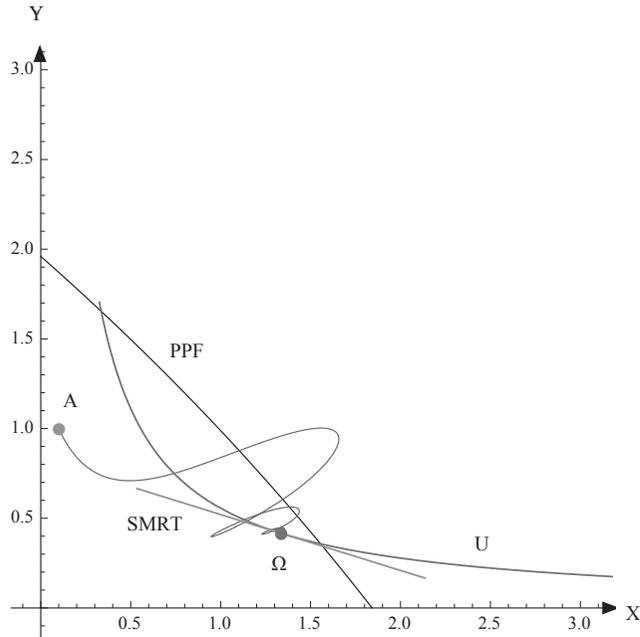


[図3-1-2]

3.4 環境税政策が実施されるとききの動学モデルの定常点の性質

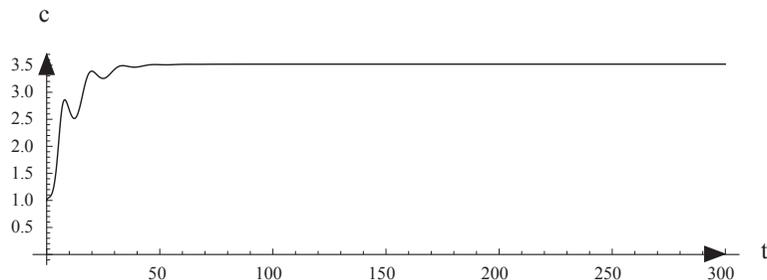
[図3-2-1] は、同じパラメータ値と初期条件の下、環境税が生産者 X, Y に課される場合の調整過程を表している。点 A が初期状態、点 Ω が終点である。

環境税政策が実施されるとききの終点 Ω の特徴は、それが生産可能性フロンティア上ではなく、フロンティアの内側に位置することである。環境税によって、相対的に廃棄物排出率の高い生産物 Y の生産が抑制され、 Y の生産に集約的に投入される生産要素 K に超過供給が発生する。結果として、要素 K の市場価格は最低レベル ($r = 0.1$) にまで落込み、この地域経済は環境税起因のデフレーションに陥る。



[図3-2-1]

ただし [図3-2-1] の終点 Ω を見て明らかなように、この場合には、生産サイドの環境税込みの限界変形率（すなわち社会的限界変形率 SMRT）と、消費サイドの限界代替率とは均等化する。すなわち、環境税政策によって、生産物 X, Y の生産と消費に関して、パレート効率が達成されている。[図3-2-2] に示したように、環境税により、環境コストは $c = 3.52$ 程度の水準に安定的に抑え込むことができている。



[図3-2-2]

自然の浄化力を超えるような環境汚染に関しては、それを放置するよりも、環境税政策により適正水準に抑制する方が、長い目でみて確実に消費者の厚生を高める結果につながる。

「長い目でみて」というのは、環境コストの顕在化には時間がかかることがあるからである。その場合、消費者は束の間の豊かさによって将来を見誤る危険がある。「確実に」というのは、汚染抑制的な新しい技術の登場などに期待するのと較べて、得られる結果（すなわち環境コストの安定的抑制）が確実であるからである。

3.5 静脈産業の意義——環境税デフレーションの回避策 (1)

環境税による生産抑制は生産要素の超過供給を生み、それが当該生産要素の最低価格への落込みを招く。こうした環境税起因のデフレ発生を防止するには、余った資源を有効に活用するような新たなアクティビティの存在が必要である。そのアクティビティは、環境に関しては、少なくとも中立的でなければならない。できることならば、汚染物質を削減して、環境を改善するものであることが望ましい。

そうしたアクティビティとして、以下に、ふたつの可能性を提示しておこう。ひとつは「静脈産業」の存在、もうひとつは環境税の節約を動機とした、生産者自身による「排出削減」の活動である。

バージン資源を用いて生産物を製造する産業を「動脈産業」と呼ぶ。また、廃棄された使用済み製品のリサイクルや再資源化によって、既存の生産物に新たな付加価値を付加したり、動脈産業から排出される廃棄物を投入して、経済的価値を有する新製品を製造したりする産業を「静脈産業」と呼ぶ。

本節で提示した動学モデルを用いて、環境税を起因とするデフレーションは、そうした静脈産業が地域経済のなかで一定規模以上の活動をするときには、発生を抑止できることを示そう。生産者 X が静脈産業の担い手であるとし、この生産者の排出パラメータ μ_x がマイナスの値をもつと仮定する（本研究ノートにおいて採用する「静脈産業」の特徴付けは、このことのみである）。

[図3-3] は、モデルのパラメータを

$$\{b_x = 0.7, b_y = 0.4, \alpha = 2, \beta = 0.4, \gamma = 0.4, \\ \mu_x = -0.1, \mu_y = 0.4, \theta = 0.3, \varphi = 1, \delta = 1\}$$

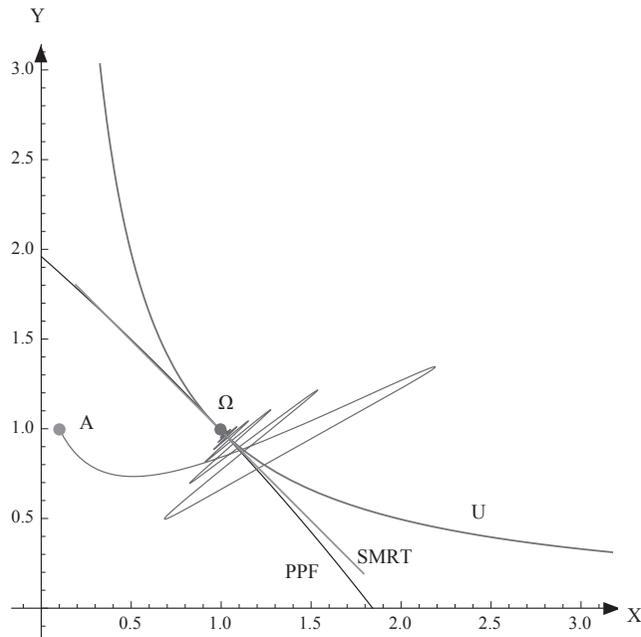
とおき、初期値を

$$\{x_0 = 0.1, y_0 = 1, w_0 = 0.5, r_0 = 0.5, c_0 = 1\}$$

としたときの生産物 $\{x(t), y(t)\}$ の数量調整経路を表すものである。いうまでもなく、生産物 Y の生産者は、ここにおいても、動脈産業の従事者として廃棄物の排出を続けている。

排出パラメータがマイナスの生産者 X には、マイナスの環境税、すなわち補助金が支給される。それが刺激となって、生産物 X の生産拡大が起こり、環境税で生産を抑制される生産者 Y からの生産要素の放出を吸収する。こうして、調整過程の終点 Ω は、生産可能性フロン

ティアの境界線上に引き戻される。点 Ω において、無差別曲線は、生産可能性フロンティアと（わずかに）交差するが、その傾きは社会的限界変形率と一致する。こうして、[図3-3]からは、動学モデルの終点 Ω において、生産物 X, Y のパレート効率的な生産・消費が実現されていることとともに、資源の完全利用が実現されていることがわかる。



[図3-3]

3.6 排出抑制活動——環境税デフレーションの回避策 (2)

もうひとつのデフレ抑止の方策は、環境税を課される生産者自身による「排出削減」の活動である。廃棄物排出率を低下させるには、生産プロセスにおけるより細やかな作業の実行など、追加的資源投入が必要である。その一方で、排出削減が進めば、環境コストが縮小し、環境税の負担は軽減される。生産者は、これらのバランスを考慮しながら、適切な水準の排出削減活動を実行するであろう。

以下では、国際貿易論でよく用いられる輸送コストの「氷塊型モデル」の考え方を参考に、生産者の排出削減費用を定式化する。排出削減活動は排出パラメータの削減率を用いてそのレベルを計測することとし、排出削減活動のレベルが σ のとき、排出パラメータは μ から μ/σ に削減されるとする。一方で、生産者の排出削減活動は、レベル σ の排出削減に対して、生産物1単位分の追加的生産費を σ^k 倍にすると仮定する。ただし、 $\sigma \geq 1, k \geq 1$ とする。

こうして、排出削減活動 σ を実施する場合、生産者は環境税率（生産物1単位あたり税額）

を

$$\Delta_T = \delta \mu c - \delta (\mu / \sigma) c = \delta \mu c (1 - 1/\sigma) \quad (3.10)$$

だけ節約できるのに対して、生産物1単位あたりの生産費用は

$$\Delta_C = \sigma^k MC - MC = (\sigma^k - 1) MC \quad (3.11)$$

だけ増加することになる。生産者は、環境税が課されるときには、税負担を節約するために、(3.10) と (3.11) の差額 $\Delta_T - \Delta_C$ をより大きくする方向に、すなわち

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \sigma_i(t) &= \frac{\partial}{\partial \sigma_i} (\Delta_T - \Delta_C) (\sigma_i - 1) \\ &= (\delta \mu_i c \sigma_i^{-2} - k \sigma_i^{k-1} MC_i) (\sigma_i - 1), \quad i = X, Y \end{aligned} \quad (3.12)$$

により、排出削減レベル σ を調整する。

排出削減活動 σ が実行されるとき、排出パラメータは

$$\mu \rightarrow \frac{\mu}{\sigma} \quad (3.13)$$

と修正され、これに連動して動学モデルの関連する変数（たとえば環境税率等）が改訂される。同時に、生産物の限界費用は、排出削減活動 σ の実行によって

$$MC \rightarrow \sigma^k MC \quad (3.14)$$

と変化し、これに連動して動学モデルの関連する変数が改訂される。

以上の修正の影響は生産要素市場にも及ぶことに注意する必要がある。排出削減活動のために生産物の限界費用が一定倍率で増加すれば、1次同次の生産関数の下では、単位あたり生産に必要な各資源の投入量も同じ倍率で増加し、その結果として、各資源の派生需要量も同じ倍率で増加する。われわれの動学モデルにはそれを反映した改訂を加える必要がある。なお、その表記は煩雑だけなので、ここでは省略する（第4節において、異なる2地域に適用するための拡張モデルを提示する。そこではモデルを構成するすべての数式を明示する）。

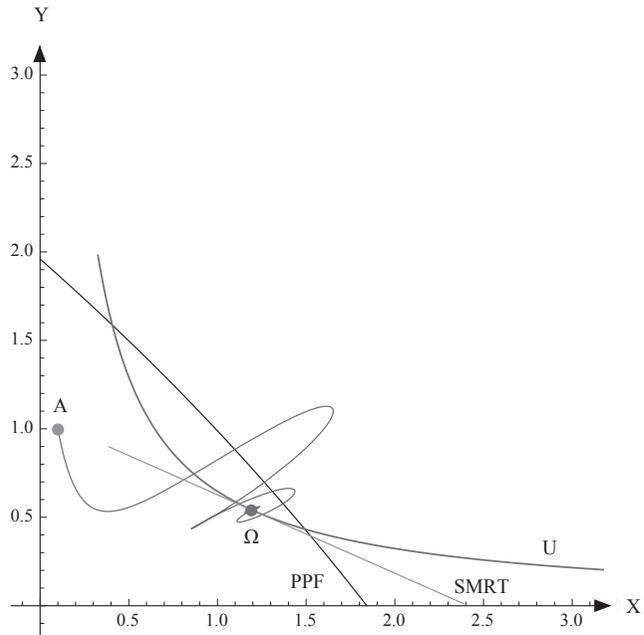
さて、[図3-4-1] は、以上の想定の下に、モデルのパラメータを

$$\begin{aligned} \{ b_x = 0.7, \quad b_y = 0.4, \quad \alpha = 2, \quad \beta = 0.4, \quad \gamma = 0.4, \\ \mu_x = 0.1, \quad \mu_y = 0.4, \quad \theta = 0.3, \quad \delta = 1, \quad k = 2 \} \end{aligned}$$

とおき、各状態の初期値を

$$\{ x_0 = 0.1, \quad y_0 = 1, \quad w_0 = 0.5, \quad r_0 = 0.5, \quad \sigma_x = 1.5, \quad \sigma_y = 1.5, \quad c_0 = 1 \}$$

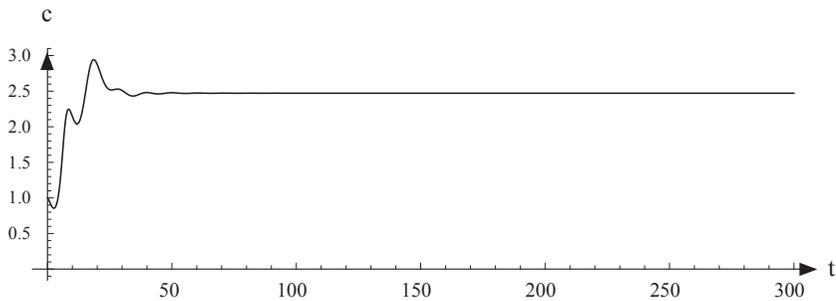
としたときの生産物 $\{x(t), y(t)\}$ の数量調整経路を表すものである。



[図3-4-1]

[図3-4-1] をみると、調整経路の終点 Ω は、相変わらず、生産可能性フロンティアの内部に位置している。ただし、このケースでは、残余の資源は、無駄に放置されるのではなく、排出削減活動のために使用される。ここには詳細は記載しないが、終点 Ω において、資源 L, K が完全利用されること、それゆえ要素価格が最低価格レベルにまで落ち込むようなことにはなっていないことを、数値計算で確認することができる。

また [図3-4-1] から、調整経路の終点 Ω において、生産サイドの社会的限界変形率と消費サイドの限界代替率が、均等化していることも確認できる。このように、静脈産業が役割を果たすときと同様に、生産者が環境税の節税を目的として排出削減活動を実行するときにも、環境税を起因とするデフレーションは回避される。



[図3-4-2]

生産者の排出削減活動は、生産者自身からみれば、「節税」という私的利益追求行為であるにすぎない。しかし、この活動は、地域経済全体に対しても、2重の意味で望ましい効果をもたらす。第1に、それがなければ余剰資源となって無駄に放置されてしまう生産要素を有効に活用することができる。第2に、この行為によって廃棄物の排出量が抑制され、定常状態下に発生する環境コストを、単に環境税政策が実施されるだけのケースに較べて、より低位の水準に抑え込むことができる。結果的に地域社会が負担する環境コストは、より少なくなる。この点は [図3-2-2] の定常状態で $c = 3.52$ であるのに対して、[図3-4-2] の定常状態では $c = 2.47$ であることを見ることで確認できる。

第4節 越境汚染問題

4.1 限定事項 2つの地域間の相互作用について

本研究ノートのここまでの議論においては、ひとつの閉鎖的な地域経済モデルを俎上に上げ、その地域内での生産・消費・環境コストについて考察した。本研究ノートの以下の部分では、2つの異なる地域社会にまたがる生産・消費・環境コストの問題に、議論を拡張する。

生産物や資源の地域間移動も視野に含め、国際経済学の視点から地域間相互作用を考察することは重要である。とりわけ、各地域の環境政策がどのような地域間取引のパターンを生み出すか（あるいは歪めるか）は、きわめて今日的な問題である。しかし、こうした広範な地域間相互作用について検討するためには、筆者にはなお準備が必要である。あらためて分析の機会を待つことにしたい。

以下では、考察の範疇を限定して、対象とする地域を2つとし、もっぱら環境問題を介して生じるこれら2つの地域間の相互作用だけを取り上げることにする。

4.2 越境する廃棄物

地域1および地域2において、それぞれに経済活動が営まれているものとしよう。住民の効用関数、生産物 X, Y の生産者の生産関数は、両方の地域を通して、同一とする。いずれの地域でも、すべての市場は完全競争的であることを仮定する。分析の簡単化のために、資源や生産物の地域間取引は行われないものと仮定する。

各地域の生産活動には廃棄物の排出がともない、それが環境中に累積して環境コストを発生させるとする。さらに、生産にともなう排出物は、発生地域だけにとどまらず、他の地域にも拡散して、全地域の住民にマイナスの影響（環境コスト）を与えると仮定する。

排出物の拡散のしかたは、瞬時に、あるいは緩慢に、など、いろいろな可能性がある。たとえば、(1) 各地域の排出物は全地域に速やかに拡散し、全地域に共通した環境コストを発生させる、あるいは (2) 排出物は緩慢に拡散し、その環境コストは短期的には発生地域にとどまるが、長期的には他地域に流出して、そこでの環境コストを高める、などが考えられる。

(2) のケースについては、廃棄物の拡散係数を最大水準に設定すると (1) と同類のモデルが得られるのに対して、最低レベルで設定すると前節でみた孤立系の地域経済モデルと同類のモデルが得られる。すなわち、(2) のケースの概要は、(1) と前節のモデルの結果から比較的簡単に推測することが可能である。それゆえ本研究ノートでは (1) のケースだけを取り上げることにする。

4.3 地域間で共通する環境コストのケース

地域1および地域2での生産物 X, Y の生産にともなって、廃棄物が排出され、それが瞬時に拡散して、これらの地域に共通した環境中に累積すると想定する。

時点 t での排出物の総計は

$$g(t) = (\eta_{x1} x_1 + \eta_{y1} y_1) + (\eta_{x2} x_2 + \eta_{y2} y_2) - \theta \quad (4.1)$$

であり、それが生み出す環境コスト、および、環境コストの時間変化率は

$$c(t) = \varphi e^{\int_0^t g(\tau) d\tau} \quad (4.2)$$

$$\frac{d}{dt} c(t) = \delta \left[(\eta_{x1} x_1 + \eta_{y1} y_1) + (\eta_{x2} x_2 + \eta_{y2} y_2) - \theta \right] c(t) \quad (4.3)$$

である。これらの式中のパラメータ η_{ij} は、環境税が課されなければ、もともとの排出パラメータ μ_{ij} に等しいが、環境税が課されるときは、排出削減活動 σ_{ij} を反映して、 μ_{ij}/σ_{ij} である。

各地域の住民は、自分が暮らす地域の生産に起因する環境コストだけでなく、他の地域での生産を起因とする環境コストにも、均一に晒されている。本節で検討するのは、そのような状況である。

4.4 2地域動学モデル

地域1と地域2で実施される環境税政策のありかたとしては、環境税政策が

(ケース1) どちらの地域でも実施されない,

(ケース2) 両方の地域で実施される,

(ケース3) 片方の地域だけで実施される,

の3つが考えられるが、ケース1とケース2の帰結は、前節での分析を踏まえれば、ほとんど自明である。2つの地域経済の破綻を避けるためには、ケース1は不適切であり、ケース2は、それが実施できるのであれば、理想的といえる。

検討を要するのはケース3である。環境税政策を実施する地域がひとつでもあれば、その地域内の生産者が実行する排出削減活動と相俟って、全域的な環境コストを適正水準にまで抑制できる可能性がある。問題は、環境コストが抑えられることの便益が、環境税政策を実施しない地域にも及ぶことである。

このケースを、動学モデルを用いて検討してみよう。2地域をまたぐモデルになるので表記は煩雑になるが、モデルの構成式すべてを列記すれば次の通りである。

(地域1 環境税政策が実施される。)

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x_1(t) = \left[\alpha \beta x_1(t)^{\beta-1} y_1(t)^\gamma - \sigma_{x_1}^k w_1(t)^{b_x} r_1(t)^{1-b_x} - \delta (\mu_{x_1}/\sigma_{x_1}) c(t) \right] x_1(t), \\ \frac{d}{dt}y_1(t) = \left[\alpha \gamma x_1(t)^\beta y_1(t)^{\gamma-1} - \sigma_{y_1}^k w_1(t)^{b_y} r_1(t)^{1-b_y} - \delta (\mu_{y_1}/\sigma_{y_1}) c(t) \right] y_1(t), \\ \frac{d}{dt}\sigma_{x_1} = \left[\delta \mu_{x_1} c \sigma_{x_1}^{-2} - k \sigma_{x_1}^{k-1} w_1^{b_x} r_1^{1-b_x} \right] (\sigma_{x_1} - 1), \\ \frac{d}{dt}\sigma_{y_1} = \left[\delta \mu_{y_1} c \sigma_{y_1}^{-2} - k \sigma_{y_1}^{k-1} w_1^{b_y} r_1^{1-b_y} \right] (\sigma_{y_1} - 1), \\ \frac{d}{dt}w_1 = \lambda_{w_1} \left[\sigma_{x_1}^k b_x (w_1/r_1)^{b_x-1} x_1 + \sigma_{y_1}^k b_y (w_1/r_1)^{b_y-1} y_1 - L_{10} \right] (w_1 - w_0), \\ \frac{d}{dt}r_1 = \lambda_{r_1} \left[\sigma_{x_1}^k (b_x - 1) (w_1/r_1)^{b_x-1} x_1 + \sigma_{y_1}^k (b_y - 1) (w_1/r_1)^{b_y-1} y_1 - K_{10} \right] (r_1 - r_0). \end{cases}$$

(地域2 環境税政策は実施されない。)

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x_2(t) = [\alpha\beta x_2(t)^{\beta-1}y_2(t)^\gamma - w_2(t)^{b_x}r_2(t)^{1-b_x}]x_2(t), \\ \frac{d}{dt}y_2(t) = [\alpha\gamma x_2(t)^\beta y_2(t)^{\gamma-1} - w_2(t)^{b_y}r_2(t)^{1-b_y}]y_2(t), \\ \frac{d}{dt}w_2 = \lambda_{w_2} [b_x(w_2/r_2)^{b_x-1}x_1 + b_y(w_2/r_2)^{b_y-1}y_2 - L_{20}] (w_2 - w_0), \\ \frac{d}{dt}r_2 = \lambda_{r_2} [(b_x-1)(w_2/r_2)^{b_x-1}x_1 + (b_y-1)(w_2/r_2)^{b_y-1}y_2 - K_{20}] (r_2 - r_0). \end{cases}$$

(地域間で共通する環境コスト)

$$\frac{d}{dt}c(t) = \delta \left[\{(\mu_{x1}/\sigma_{x1})x_1 + (\mu_{y1}/\sigma_{y1})y_1\} + (\mu_{x2}x_2 + \mu_{y2}y_2) - \theta \right] c(t).$$

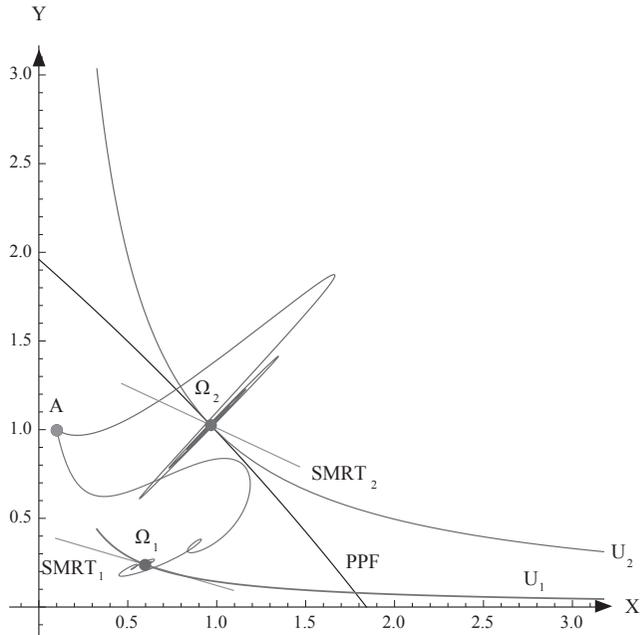
4.5 モデル分析から導かれる結果

さて、地域1での排出削減水準 σ の初期値を除くパラメータ値と初期値は2つの地域で同等として、次のようにこれらの数値を設定しよう。

$$\begin{aligned} \{b_x = 0.7, b_y = 0.4, \alpha = 2, \beta = 0.4, \gamma = 0.4, \\ \mu_x = 0.1, \mu_y = 0.4, \theta = 0.3, \delta = 1, k = 2\} \\ \{x_0 = 0.1, y_0 = 1, w_0 = 0.5, r_0 = 0.5, \sigma_{x10} = 1.5, \sigma_{y10} = 1.5, c_0 = 1\} \end{aligned}$$

前段で定式化した動学モデルを、この条件下にコンピュータ上で作動させてみる。得られる結果のいくつかを以下に整理する。

まずはじめに、[図4-1]は、環境税政策が実施される地域1、および環境税政策が実施されない地域2での、生産物 $\{x(t), y(t)\}$ の数量調整経路を、重ねて描いたものである。点Aは共通する初期状態、点 Ω_1 は地域1の調整経路の終点、点 Ω_2 は地域2の調整経路の終点である。

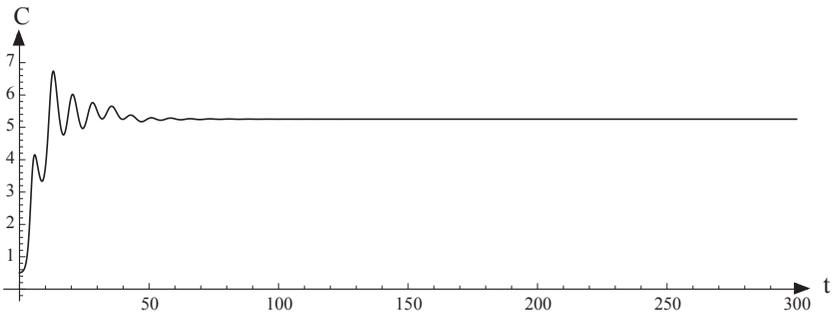


[図4-1]

地域1の終点 Ω_1 は、生産可能性フロンティアの内側に位置している。すべての資源が生産物 X, Y の生産に投入されるわけではなく、一部は排出削減活動のために使用されるからである。前節の [図3-4-1] と較べて Ω_1 が生産可能性フロンティアのさらに内側に位置するようになるのは、第2地域から流入する廃棄物によって環境コストが高められ、それにとまって環境税と排出抑制活動レベルも高められるからである。それに対して、地域2の終点 Ω_2 は、生産可能性フロンティア上に位置する。すなわち、地域2では資源はすべて生産物 X, Y の生産に投入される。地域1での環境対策の恩恵を得て、環境コストの継続的上昇も回避することができている。

仮定により環境コストは地域間で共通である。したがって、終点 Ω_1, Ω_2 を通る無差別曲線の位置関係から、地域1よりも地域2の方が、消費者の効用は高いことがわかる。

[図4-2] は、地域2で環境税政策が実施されないにもかかわらず、地域1における環境税政策と排出削減活動だけで、全地域の環境コストが一定水準以内に抑え込まれる状況を表している。地域2の生産者と消費者は、労せず、環境が保全されることの便益を得ることができる。



[図4-2]

なお、片方の地域で環境税政策が実施されるならば、いつでも全域的な環境コストの抑制ができるというわけではないことを注意しておく。ここで紹介したモデル分析の帰結がそうなっているのは、 μ や θ など、環境関連パラメータ値の設定のしかたに依存するものである。より一般的に起こりそうな状況は、環境対策を実施しない地域から排出される廃棄物が全域的な環境コストを膨張させ、最終的には、環境対策を実施している地域も巻き込んで、全域を破綻に陥らせてしまうような状況である。

4.6 ただ乗り問題

以上から明らかなように、ここでは、いわゆる「ただ乗り」問題が生じている。たんに地域1の環境対策に地域2による「ただ乗り」が生じているだけではない。環境税を課されない地域2の生産者は、排出削減活動を実行する必要がないから、より多くの資源を生産活動に振り向けることができる。こうして、環境税政策を実施しない地域2においては、それを実施する地域1に較べて、より多量の生産物を獲得することができている。

本研究ノートで定式化した動学モデルでは地域間の取引を取り入れていないが、かりに本節の状況で地域間取引が行われるとしたら、地域1にとって、さらに不都合な結果が惹起されると考えられる。すなわち、地域2で安価に生産された生産物が地域1に流入し、地域1の経済は一層の混乱を来すことになると思われる。この点の詳細な検討には、地域間の取引についても同時に取り扱うことのできる拡張モデルの構成が求められる。次の機会での検討に譲りたい。

いうまでもなく、越境汚染問題が存在するときには、すべての地域において、環境税政策を含む環境対策が実施されることが望ましい。しかし、環境政策を強制する超地域的な政治機構が存在するのでないかぎり、それが実現される可能性はきわめて小さいといわざるをえない。どこかで環境対策がとられているならば、他のどの地域も環境対策をとらない方が有

利である。少なくともそうした可能性はゼロではない。そうであれば、結局のところ、どの地域も環境政策を実施しなくなってしまう。これは、まさに「囚人のディレンマ」の状況に他ならない。

(成蹊大学経済学部 教授)

参考文献

- Anderson, D. A., *Environmental Economics and Natural Resource Management*, 3rd Edition, Routledge, 2010
- Baumol, W. J. and W. E. Oates, *The Theory of Environmental Policy*, 2nd Edition, Cambridge University Press, 1988
- DeCanio, S. J., *Economic Models of Climate Change, A Critique*, Palgrave Macmillan, 2003
- Fujita, M., P. Krugman and A. J. Venables, *The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade*, MIT, 1999 (小出博之訳, 『空間経済学 都市・地域・国際貿易の新しい分析』, 東洋経済新報社, 2000)
- Grafton, R. Q., W. Adamowicz, D. Dupont, H. Nelson, R. J. Hill and S. Renzetti, *The Economics of The Environment and Natural Resources*, Blackwell Publishing, 2004
- Krugman, P. R. and M. Obstfeld, *International Economics, Theory & Policy*, 8th Edition, 2009 (山本章子・伊藤博明・伊能早苗・小西紀嗣訳, 『クルーグマンの国際経済学——理論と政策——原著第8版 上巻 貿易編』, 2010)
- Levin, S. A., *Fragile Domain*, Perseus Publishing, 1999 (サイモン・レヴィン著, 重定南奈子・高須夫悟訳, 『持続不可能性 環境保全のための複雑系理論入門』, 文一総合出版, 2003)
- Papandreou, A. A., *Externality and Institutions*, Clarendon Press, 1994
- Tietenberg, T. and L. Lewis, *Environmental & Natural Resource Economics*, 8th Edition, Pearson Addison Wesley, 2009
- 井村秀文, 『中国の環境問題 今なにが起きているのか』, Dojin 選書 012, 化学同人, 2007
- 植田和弘, 『廃棄物とリサイクルの経済学 大量廃棄社会は変えられるか』, 有斐閣, 1996
- 佐藤泰裕・田淵隆俊・山本和博, 『空間経済学』, 有斐閣, 2011
- 中西訓嗣, 『国際経済学 国際貿易編』, ミネルヴァ書房, 2013
- 細田衛士, 『グッズとバズズの経済学 循環型社会の基本原則』, 東洋経済新報社, 1999