

動学的参入阻止価格モデルにおける環境課税の 経済効果について

佐藤 佑一
浅田 統一郎

In this paper, we study the economic effects of ambient charges by using Gaskins' model of dynamic limit pricing. In the first model, it is assumed that the amount of environment pollution per output is the same for all firms and the government knows this amount, which is called the case of 'Point Source Pollution'. In the second model, we introduce the 'Non-Point Source Pollution', which means that the amount of environment pollution of the dominant firm and that of the fringe firms are different, and the government does not grasp the amount of environment pollution by particular firm, but it knows only the total amount of environment pollution.

1. はじめに

近年環境経済学で注目されている環境問題において、汚染源が特定できる点源汚染 (Point Source Pollution) と、汚染源が特定できない面源汚染 (Non-Point Source Pollution) がある。これらの汚染は、主に窒素やリンなどであるが、両方の汚染とも、最終的に湖沼や海に流れ込むことによって、富栄養化を招き、生態系を壊す可能性があり、重大な環境問題である。とりわけ、面源汚染の場合は、①汚濁排出の実態がよくわかっていない、②汚濁水の処理や制御が困難であるなど (竹田 (2010) 147頁)、汚染源の特定ができないことが、汚染規制をより困難なものにしている。

本稿では、汚染が存在する市場における企業を、価格設定の先導者として行動する主導的企業と (先導的企業が設定した価格を所与として参入・退出を行う) 周辺企業の2種類に分ける。この2種類の企業が存在する市場において、各企業が排出する汚染量を政府が完全に把握しているために、汚染額に比例した環境税を掛けることができる点源汚染に関しての環境税と、政府は汚染物質の総排出量を把握しているが、個別の内訳に関して特定ができない面源汚染に対する環境税の効果について、本稿では検証する。また、点源汚染についてはそ

の社会厚生についても検証する。そのための分析的枠組みとして、Gaskins (1971) によって定式化された動学的参入阻止価格モデル (dynamic limit pricing model) を利用する。

第2章では Gaskins (1971) の動学的参入阻止価格モデルに点源汚染と環境税を導入して、主導的企業と (参入・退出を繰り返す) 周辺企業の行動を、主導的企業が直面する動学的最適化問題から導出される連立微分方程式システムによって定式化する。続く第3章では、第2章で導出された連立微分方程式システムにおける諸変数の均衡値に関して、環境税の経済効果の比較静学分析を行う。さらに、社会的総余剰の均衡値の最大化を達成させる環境税の値について検討する。第4章では、総排出量を特定しているが、個別の内訳を特定できない面源汚染について、第2章と同様に主導的企業の動学的最適化問題を解くことによって、主導的企業と周辺企業の行動を連立微分方程式システムで表し、環境税の効果について検証する。第5章で結論とする。

2. 基本モデル——「点源汚染」の場合

本章では、Gaskins (1971) の動学的参入阻止価格モデルに最も単純な形で点源汚染と環境税を導入した基本モデルを定式化し、そのパフォーマンスを数学的に分析する。オリジナルなモデルでは無視されている環境税が存在するという意味では、このモデルは Gaskins (1971) のモデルの一般化になっているが、市場需要関数の線形性が仮定されているという意味では、このモデルは、Gaskins (1971) のモデルの単純化になっている。市場需要関数の線形性を仮定することにより、モデルの本質に影響を及ぼすことなく、数学的分析を単純化することができる¹⁾。

Gaskins (1971) に従って、先導者として価格を設定する1社の主導的企業 (dominant firm) およびプライス・テイカーとして市場への参入と撤退を繰り返す多数の周辺企業 (fringe firms) が存在する部分均衡動学モデルを考えよう。まず、 x = 市場全体の需要量、 x_1 = 主導的企業の生産量、 x_2 = 周辺企業が生産量の合計とすれば、時点 t において、常に

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (1)$$

という等式が成り立っていることが仮定されている。ここで、 t は、時点 (time period) を表す記号である。また、 p = 財の単位価格としたとき、時点 t における需要関数は、以下のように右下がりの線形関数になり、需要関数は、時間を通じてシフトしないことが仮定されている²⁾。

1) Gaskins (1971) の動学的参入阻止価格モデルは、本稿のように環境税を導入する以外にも、様々な方向に拡張されている。たとえば、Judd and Petersen (1986) や Asada and Semmler (2004) は、このモデルに、企業の投資による資本蓄積を導入している。

$$x(t) = f(p(t)) = a - bp(t); a > 0, b > 0 \quad (2)$$

各企業はいずれも生産1単位あたり ε だけの金額表示の汚染物質を排出すると仮定すれば、時点 t におけるこの市場の汚染物質の排出総額 $Z(t)$ は、以下のように表すことができる³⁾。

$$Z(t) = \varepsilon x(t) = \varepsilon \{x_1(t) + x_2(t)\} = \varepsilon \{a - bp(t)\}; \varepsilon > 0 \quad (3)$$

政府(規制当局)はこの事実を把握しており、排出額1単位あたり m だけ排出企業に課税するならば、時点 t における環境税総額 $T(t)$ は、

$$T(t) = mZ(t) = m\varepsilon x(t) = m\varepsilon \{x_1(t) + x_2(t)\} = m\varepsilon \{a - bp(t)\}; m > 0 \quad (4)$$

となる。このとき、すべての企業に適用される生産量1単位あたりの税率 $\tau(t)$ は

$$\tau(t) = \frac{T(t)}{x(t)} = \frac{T(t)}{x_1(t) + x_2(t)} = \frac{T(t)}{a - bp(t)} = m\varepsilon > 0 \quad (5)$$

となり、 $\tau(t)$ は、時間を通じて一定になる。この場合には、政府は各企業が排出する汚染額を完全に把握しており、汚染排出額に比例した環境税を各企業に課すことができる。このようなケースは、「点源汚染」(Point Source Pollution)と呼ばれている(中山(2021), 佐藤(2022)参照)。

このとき、主導的企業の税引き後利潤の割引現在価値 W を以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{\infty} \{p(t) - \tau(t) - c\} x_1(t) e^{-rt} dt \\ &= \int_0^{\infty} \{p(t) - m\varepsilon - c\} \{a - bp(t) - x_2(t)\} e^{-rt} dt; c > 0, r > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

2) Gaskins (1971) は必ずしも市場需要関数の線形性を仮定してはならず、単に $f'(p(t)) < 0$ という符号条件のみを仮定している。

3) (3)式は、時点 t における汚染物質の排出総額 $Z(t)$ が時点 t におけるこの市場の総生産量=総需要量 $x(t)$ に比例することを意味しているが、このことは、汚染物質が蓄積しないで即座に消散してしまう「フロー変数」(flow variable)であることを意味する。他方、 $Z(t)$ が即座には消散しないで蓄積する「ストック変数」(stock variable)であれば、 $Z(t)$ の値は時点 t においては所与になり、一例を挙げるならば、 $Z(t)$ は、 $\dot{Z}(t) = \varepsilon x(t) - \delta Z(t)$; $\varepsilon > 0, 0 < \delta < 1$ というような動学方程式に基づいて変動することになる。この説明からもわかるように、 $Z(t)$ をストック変数として取り扱おうと、1本の微分方程式が新たにシステムに追加されることになり、モデルの数学的解析が著しく複雑になる(この点についての詳細は、Forster (1980), Chiang (1992) Chapters 7 and 8を参照されたい)。本稿では、このような複雑化を避けるために、Forster (1980)における1番目のモデルと同様に、 $Z(t)$ をフロー変数と仮定している。

ここで、 c と r はそれぞれ、主導的企業の平均費用および割引率（いずれも定数と仮定する）であり、 e は自然対数の底である。

また、この産業への参入と退出を繰り返す周辺企業の行動は、以下のような動学方程式によって表されるものと仮定されている。

$$\dot{x}_2(t) = k\{p(t) - \tau(t) - \bar{p}\} = k\{p(t) - m\varepsilon - \bar{p}\}; k > 0, \bar{p} > c \quad (7)$$

ここで、 \bar{p} は参入阻止価格 (limit price) であり、 k は、周辺企業の参入・退出の動学過程の調整速度である (\bar{p} と k は、いずれも定数と仮定されている)。記号の上のドット ($\dot{\cdot}$) は、時間に関する微分を表す。(7)式は、以下のことを意味している。税引き後価格 $p(t) - \tau(t)$ が参入阻止価格 \bar{p} を上回るか下回るかに応じて周辺企業はこの産業に新規参入するかまたはこの産業から撤退し、 $p(t) - \tau(t) = \bar{p}$ の場合には周辺企業の税引き後利潤がゼロになり、新規参入も撤退も生じなくなるのである。 $\bar{p} > c$ が仮定されているから、 $p(t) - \tau(t) = \bar{p}$ のときは、 $p(t) - \tau(t) - c > 0$ となり、生産量 1 単位あたりの主導的企業の利潤は正になる。

主導的企業が直面する動学的最適化問題は、(7)式の制約のもとで(6)式における W を最大にする価格 $p(t)$ の時間経路を求めることである。すなわち、主導的企業が解くべき動学的最適化問題は、以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \text{Max}_{p(t)} &= \int_0^{\infty} \{p(t) - m\varepsilon - c\} \{a - bp(t) - x_2(t)\} e^{-rt} dt; c > 0, r > 0 \\ \text{subject to } \dot{x}_2(t) &= k\{p(t) - m\varepsilon - \bar{p}\}; k > 0, \bar{p} > c \end{aligned} \quad (P_1)$$

ここで、 $p(t)$ は制御変数 (control variable)、 $x_2(t)$ は状態変数 (state variable) であり、状態変数の初期値 $x_2(0)$ は所与と仮定されているが、制御変数は、その初期値 $p(0)$ を含めて自由に選ぶことができる。この問題は、以下のようにして、ポントリャーギンの最大値原理 (Pontryagin's maximum principle) を用いて解くことができる⁴⁾。

まず、時点 t の経常値ハミルトン関数 (current value Hamiltonian) $H(t)$ を以下のように定義しよう。

$$H(t) = \{p(t) - m\varepsilon - c\} \{a - bp(t) - x_2(t)\} + \mu(t)k\{p(t) - m\varepsilon - \bar{p}\} \quad (8)$$

ここで、 $\mu(t)$ は、時点 t における補助変数 (costate variable) である。このとき、動学的最適化のための必要条件は、以下の(9)～(12)で表される⁵⁾。

4) ポントリャーギンの最大値原理については、Chiang (1992) Part IIIを参照されたい。

5) (12)式は、横断性条件 (transversality condition) と呼ばれる。

$$\text{Max}_{p(t)} H(t) \quad \text{for all } t \geq 0 \quad (9)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\partial H(t)}{\partial \mu(t)} = k\{p(t) - m\varepsilon - \bar{p}\} \quad (10)$$

$$\dot{\mu}(t) = -\frac{\partial H(t)}{\partial x_2(t)} + r\mu(t) = p(t) - m\varepsilon - c + r\mu(t) \quad (11)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t)e^{-rt} = 0 \quad (12)$$

(9)式の1階の条件は、以下のようになる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(t)}{\partial \mu(t)} &= \{a - bp(t) - x_2(t)\} - b\{p(t) - m\varepsilon - c\} + k\mu(t) \\ &= -2bp(t) - x_2(t) + \{a + b(m\varepsilon + c)\} + k\mu(t) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式を $\mu(t)$ について解けば、

$$\mu(t) = (1/k)[2bp(t) + x_2(t) - \{a + b(m\varepsilon + c)\}] \equiv \mu(x_2(t), p(t)) \quad (14)$$

となる。(14)式の両辺を時間で微分して(10)式を代入すれば、以下のようになる。

$$\dot{\mu}(t) = (1/k)[2b\dot{p}(t) + \dot{x}_2(t)] = (2b/k)\dot{p}(t) + \{p(t) - m\varepsilon - \bar{p}\} \quad (15)$$

(11)式と(15)式より、

$$(2b/k)\dot{p}(t) = (\bar{p} - c) + r\mu(t) \quad (16)$$

という式を得る。(16)式に(14)式を代入して $\dot{p}(t)$ について解けば、

$$\dot{p}(t) = (r/2b)x_2(t) + rp(t) + (k/2b)(\bar{p} - c) - (r/2b)\{a + b(m\varepsilon + c)\} \quad (17)$$

となる。

結局、このモデルの基本動学方程式は、(10)、(12)、(17)の各式から構成される、横断性条件付の2変数の線形微分方程式システム、すなわち、以下のシステム(18a)~(18c)によって表すことができる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) &= k\{p(t) - m\varepsilon - \bar{p}\} \equiv F_1(p(t)) \quad (18a) \\ \dot{p}(t) &= (r/2b)x_2(t) + rp(t) + (k/2b)(\bar{p} - c) - (r/2b)\{a + b(m\varepsilon + c)\} \end{aligned}$$

6) $\frac{\partial^2 H(t)}{\partial p(t)^2} = -2b < 0$ であるから、2階の条件は満たされている。

$$\equiv F_2(x_2(t), p(t)) \quad (18b)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(x_2(t), p(t))e^{-rt} = 0 \quad (18c)$$

ただし、 $\mu(x_2(t), p(t))$ は、(14)式によって定義されている。

以下では、この基本動学方程式の解の性質を数学的に分析することにしよう。まず、

$$\dot{x}_2(t) = \dot{p}(t) = 0 \quad (19)$$

を満たす(18a)～(18b)の均衡解 x_2^* 、 p^* が以下のように一意的に決まることを、容易に確かめることができる。

$$x_2^* = a - b(m\varepsilon + \bar{p}) - (b + \frac{k}{r})(\bar{p} - c) \quad (20)$$

$$p^* = m\varepsilon + \bar{p} > 0 \quad (21)$$

この均衡解が経済的に有意義であるためには、 $x_2^* > 0$ でなければならないが、そのための必要十分条件は、市場における需要の規模を表すパラメーター a が十分に大きいこと、具体的には、

$$a > b(m\varepsilon + \bar{p}) + (b + \frac{k}{r})(\bar{p} - c) \quad (22)$$

という不等式が満たされることである。このとき、均衡における主導的企業の生産量 x_1^* と市場全体の生産量 x^* はそれぞれ、以下ようになる。

$$x_1^* = (b + \frac{k}{r})(\bar{p} - c) > 0 \quad (23)$$

$$x^* = x_1^* + x_2^* = a - bp^* = a - b(m\varepsilon + \bar{p}) > 0 \quad (24)$$

さらに、均衡におけるこの市場の汚染物質の排出総額 Z^* および環境税総額 T^* は、以下のようになる。

$$Z^* = \varepsilon x^* = \varepsilon \{a - b(m\varepsilon + \bar{p})\} > 0 \quad (25)$$

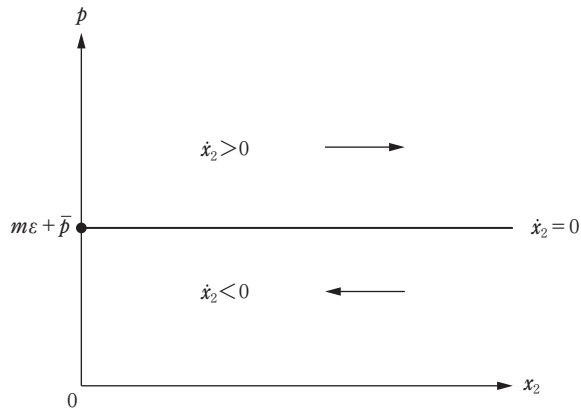
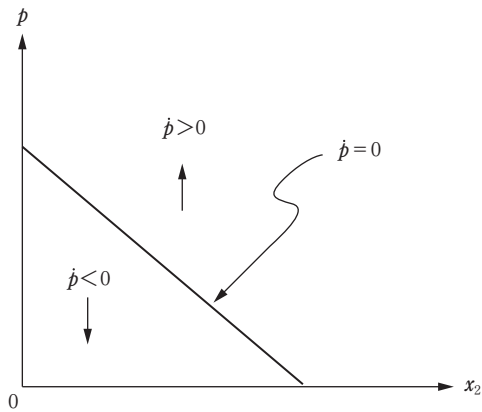
$$T^* = mZ^* = m\varepsilon \{a - b(m\varepsilon + \bar{p})\} > 0 \quad (26)$$

次に、動学システム(18)の位相図を作成することにより、均衡点以外での挙動を調べることにしよう。

(18)式における $\dot{x}_2 = 0$ をもたらす x_2 と p の組合せの軌跡は

$$p = m\varepsilon + \bar{p} \quad (27)$$

と表され、さらに、 $\partial x_2 / \partial p = k > 0$ である。このことから、図1が得られる。

図1 \dot{x}_2 の分類図2 \dot{p} の分類

(18)式における $\dot{p}=0$ をもたらす x_2 と p の軌跡は

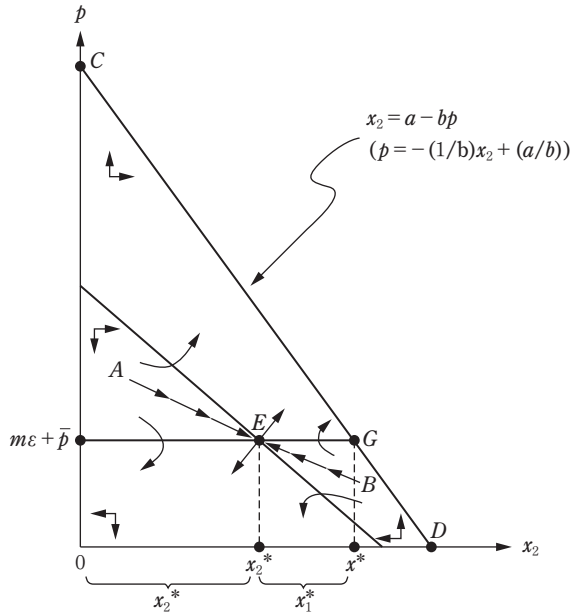
$$p = -(1/2b)x_2 + (1/2b)\{a + b(m\varepsilon + c) - (k/r)(\bar{p} - c)\} \quad (28)$$

と表され、さらに、 $\partial \dot{p} / \partial p = r > 0$ である。このことから、図2が得られる。

図1と図2を組み合わせることにより、このシステムの位相図が図3のようになることがわかる。ただし、この図は、均衡において $x_2^* > 0$ 、 $x_1^* = x^* - x_2^* > 0$ の場合を示している。この図において、直線 CD は $x_2 = a - bp$ (すなわち、 $p = -(1/b)x_2 + (a/b)$) を満たす x_2 と p の軌跡であり、直線 CD 上では、 $x_1 = x - x_2 = 0$ になる。図3において、 $x_1 \geq 0$ と $x_2 \geq 0$ の両方を満たす経済学的に意味のある領域は、三角形 $0CD$ の内部(境界線上を含む)になる。

図3は、このシステムの均衡点 E がサドル・ポイントになることを示している。すなわ

図3 動学システム(18)の位相図



ち、均衡点に収束する2本の経路AEとBEが存在し、それらの経路上では、横断性条件(18c)が満たされ、主導的企業にとって、動学的に最適になる。それ以外の経路は均衡点に収束せず、途中で経済学的に無意味な領域に入り込んでしまうので、最適ではない⁷⁾。図3の均衡点Eがサドル・ポイントになることは、以下のように、このシステムのヤコビ行列の固有値を計算することによっても、確かめることができる。線形微分方程式システム(18a)～(18b)のヤコビ行列Jは、

$$J = \begin{bmatrix} 0 & k \\ r/2b & r \end{bmatrix} \tag{29}$$

となる。このシステムの固有方程式は、

$$\Delta(\lambda) \equiv |\lambda I - J| = \begin{vmatrix} \lambda & -k \\ -(r/2b) & \lambda - r \end{vmatrix} = \lambda^2 - r\lambda - (rk/2b) = 0 \tag{30}$$

となるから、このシステムの2個の固有値 λ_1 、 λ_2 はそれぞれ、以下のようになる。

$$\lambda_1 = \frac{r - \sqrt{r^2 + (2rk/b)}}{2} < 0, \quad \lambda_2 = \frac{r + \sqrt{r^2 + (2rk/b)}}{2} > 0 \tag{31}$$

すなわち、このシステムの特微方程式(30)は1個の負実根(λ_1)と1個の正実根(λ_2)を持

7) 環境税が存在しない Gaskins (1971) のオリジナルなモデルも、同様の性質を持っている。

つ。このことは、このシステムの均衡点 E がサドル・ポイントになることを意味している⁸⁾。

このモデルでは、周辺企業の生産量（状態変数）の初期値 $x_2(0)$ は所与と仮定されているが、主導的企業のコントロール変数である価格の初期値 $p(0)$ は所与ではなく、主導的企業が選択することができることが想定されている。したがって、主導的企業は、所与の $x_2(0)$ に対応して、図3における均衡点に収束する経路 AE または BE 上の p の初期値 $p(0)$ を選ぶことにより、動学的な最適性を確保することができる⁹⁾。すなわち、 $x_2(0)$ が比較的小さい場合には、主導的企業は $p(0)$ を高めに設定し、その後、 $p(t)$ を徐々に引き下げていく。その結果、 $x_2(t)$ は徐々に増加していく。逆に $x_2(0)$ が比較的大きい場合には、主導的企業は $p(0)$ を低めに設定し、その後 $p(t)$ を徐々に引き上げていく。その結果、 $x_2(t)$ は徐々に減少していく。

3. 基本モデルにおける環境税の経済効果の比較静学

以上の分析により、このモデルにおける価格と各企業の生産量は、横断性条件付の線形連立微分方程式(18)の均衡点に収束することがわかった。本章では、環境税の強度を表すパラメーター m の変化が各変数の均衡値にどのような影響を及ぼすかを、比較静学の方法を用いて分析しよう。

まず、(20)～(25)の各式をパラメーター m で微分することにより、以下の結果が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{dp^*}{dm} = \varepsilon > 0, \quad \frac{dx_1^*}{dm} = 0, \quad \frac{dx_2^*}{dm} = -b\varepsilon < 0, \\ \frac{dx^*}{dm} = \frac{dp(x_1^* + x_2^*)}{dm} = -b\varepsilon < 0, \quad \frac{dZ^*}{dm} = -b\varepsilon^2 < 0 \end{aligned} \quad (32)$$

以上の分析結果は、以下の命題として要約することができる。

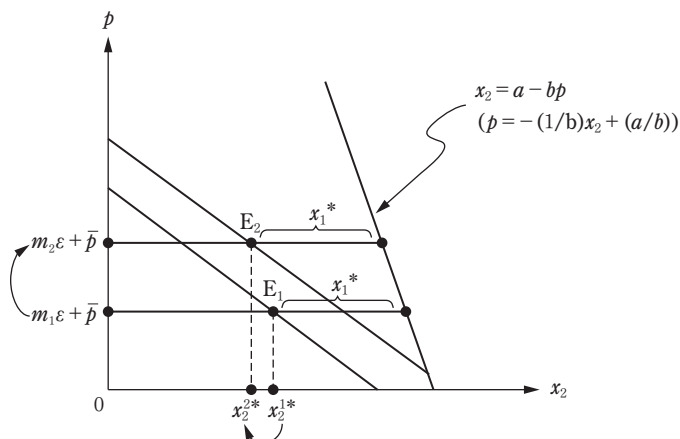
[命題1]

- (1) p^* は、 m の増加関数である。
- (2) x_2^* および $x^* = x_1^* + x_2^*$ は、 m の減少関数である。
- (3) x_1^* の値は、 m とは独立に決まる。
- (4) Z^* は、 m の減少関数である。

8) 三土(1996)第16章を参照されたい。

9) このシステムは線形の微分方程式システムなので、均衡点に収束する経路上の初期値 $p(0)$ を正確に計算することができる。その計算方法については、補論を参照されたい。

図4 m の増加が x_2^* に及ぼす影響
($0 < m_1 < m_2$)



この命題は、以下のことを意味している。環境課税が強化される (m が増加する) と、均衡価格の上昇を通じて産業全体の均衡需要量＝均衡生産量の低下が誘発され、均衡における環境汚染量は低下する。ただし、このとき、主導的企業の均衡生産量は環境課税の強化の影響を受けず、産業全体の均衡生産量の低下は、もっぱら周辺企業の生産量の低下によってもたらされる。 m の増加が x_2^* に及ぼす影響は、図4のように表すことができる。

ところで、政府は単に環境汚染を減らすことのみを目標にすべきではなく、「社会厚生」(social welfare)の最大化を目指すべきである、という有力な見解が存在する。そこで、以下では、部分均衡分析で通常採用される「社会的総余剰」(social surplus)を用いて「社会厚生」を表し、 m の変化がそれに及ぼす影響を分析することにしよう。

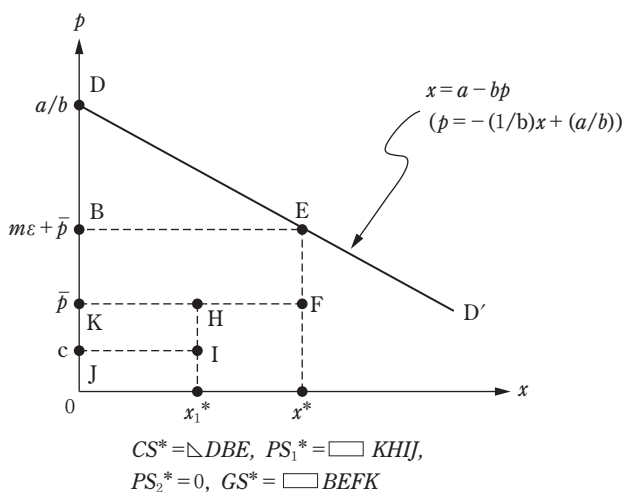
均衡における社会的総余剰の構成項目は、図5を用いて、以下のように表される¹⁰⁾。

$$\begin{aligned}
 \text{消費者余剰 (Consumers' Surplus, } CS^*) &= \text{三角形 } DBE \text{ の面積} \\
 &= (1/2)\{(a/b) - (m\varepsilon + \bar{p})\}\{a - b(m\varepsilon + \bar{p})\} \\
 &= (1/2)\{-b\varepsilon^2 m^2 - 2\varepsilon(a + \bar{p})m + (a^2/b) - (2a + b\bar{p})\bar{p}\} > 0 \\
 ; \frac{d(CS^*)}{dm} &= -\varepsilon(b\varepsilon m + a + \bar{p}) < 0
 \end{aligned} \tag{33}$$

$$\begin{aligned}
 \text{主導的企業の税引き後生産者余剰 (Producer's Surplus 1, } PS_1^*) \\
 = \text{長方形 } KHIJ \text{ の面積} &= (b + \frac{k}{r})(\bar{p} - c)^2 > 0
 \end{aligned} \tag{34}$$

10) これらの概念の説明と計算方法については、たとえば、浅田 (2017) を参照されたい。

図5 消費者余剰, 生産者余剰, 政府余剰



$$\text{周辺企業の税引き後生産者余剰 (Producers' Surplus 2, } PS_2^*) = 0 \quad (35)$$

政府余剰 (Government Surplus, CS^*) = 長方形 $BEFK$ の面積

$$\begin{aligned}
 &= T^* = mZ^* = m\epsilon\{a - b(m\epsilon + \bar{p})\} \\
 &= -b\epsilon^2 m^2 + \epsilon(a - b\bar{p})m > 0; \quad \frac{d(GS^*)}{dm} = \epsilon\{-2b\epsilon m + (a - b\bar{p})\} \quad (36)
 \end{aligned}$$

均衡における社会的総余剰 (Social Surplus, SS^*) は, $CS^* + PS_1^* + PS_2^* + GS^*$ から (25) 式で表される汚染物質の排出総額 Z^* を差し引いた値として, 以下のように計算される。

$$SS^* = CS^* + PS_1^* + PS_2^* + GS^* - Z^* = Am^2 + Bm + C \quad (37)$$

ここで, A, B, C は, m から独立に決まる定数であり, 特に, A と B は, それぞれ以下のように定義されている¹¹⁾。

$$A = -(3/2)b\epsilon^2 < 0 \quad (38)$$

$$B = \epsilon\{\epsilon b - (1 + b)\bar{p}\} \quad (39)$$

ところで,

$$\frac{d(SS^*)}{dm} = 2Am + B, \quad \frac{d^2(SS^*)}{dm^2} = 2A < 0 \quad (40)$$

11) C の具体的な表現は, 本稿の目的にとって必要ではないので, 省略されている。

であるから、 SS^* 最大化の1階の条件 $\frac{d(SS^*)}{dm} = 0$ をもたらす m の値を m^* とすれば、

$$m^* = -B/2A = \{\varepsilon b - (1+b)\bar{p}\}/3b\varepsilon \quad (41)$$

となる。すなわち、 $m = m^*$ のとき、 $-\infty < m < \infty$ の範囲内で SS^* が最大になる¹²⁾。しかし、経済学的に意味がある m の範囲は、

$$0 \leq m \leq \bar{m} \quad (42)$$

という領域に制約される。ここで、 \bar{m} は、(20)式において $x_2^* = 0$ をもたらす m の値であり、

$$\bar{m} = \{(a - b\bar{p}) + (b + \frac{k}{r})(\bar{p} - c)\}/b\varepsilon > 0 \quad (43)$$

である。 $m \in [0, \bar{m}]$ という制約のもとで SS^* を最大化する社会的に最適な m の値に関して、以下の命題が成立する。

[命題2]

- (1) 以下の不等式が成立しているものとする。

$$\varepsilon \leq (1 + \frac{1}{b})\bar{p} \quad (44)$$

このとき、 $m^* \leq 0$ となり、 $m = 0$ の場合に $m \in [0, \bar{m}]$ という制約のもとで SS^* が最大になる (コーナー解)。

- (2) 以下の2つの不等式が成立しているものとする。

$$\varepsilon > (1 + \frac{1}{b})\bar{p} \quad (45)$$

$$(3/b)\{(a - b\bar{p}) + (b + \frac{k}{r})(\bar{p} - c)\} > \varepsilon - (1 + \frac{1}{b})\bar{p} \quad (46)$$

このとき、 $0 < m^* < \bar{m}$ となり、 $m = m^*$ の場合に $m \in [0, \bar{m}]$ という制約のもとで SS^* が最大になる (内点解)。

- (3) 不等式

$$(3/b)\{(a - b\bar{p}) + (b + \frac{k}{r})(\bar{p} - c)\} \leq \varepsilon - (1 + \frac{1}{b})\bar{p} \quad (47)$$

が成立しているものとする。このとき、 $m^* \geq \bar{m}$ となり、 $m = \bar{m}$ の場合に $m \in [0, \bar{m}]$ という制約のもとで SS^* が最大になる (コーナー解)。

12) (40)式より、最大化の2階の条件は満たされている。

[証明]

- (1) 不等式(44)が満たされる場合には、(41)式より、 $m^* \leq 0$ となるので、 $m \in (0, \bar{m})$ の範囲で SS^* は m の減少関数になる。したがって、命題2(1)が成立する。
- (2) 不等式(45)が満たされる場合には、(41)式により、 $m^* > 0$ となる。また、(41)式と(43)式より、

$$\bar{m} - m^* = \frac{3\{(a - b\bar{p}) + (b + \frac{k}{r})(\bar{p} - c)\} + (1 + b)\bar{p} - \varepsilon b}{3b\varepsilon} \quad (48)$$

となるので、不等式(46)が満たされる場合には $\bar{m} - m^* > 0$ となる。この場合には $0 < m^* < \bar{m}$ という不等式が成立するので、命題2(2)が成立する。

- (3) (48)式により、不等式(47)が満たされる場合には $m^* \geq \bar{m}$ となるので、 $m \in [0, \bar{m})$ の範囲で SS^* は m の増加関数になる。したがって、命題2(3)が成立する。□

命題2は、以下のことを意味している。

[命題2から導かれる定性的結論]

- (1) 汚染物質を排出する強度を反映するパラメーター ε が比較的小さい場合は、社会的総余剰を最大化する環境税率はゼロになる。
- (2) パラメーター ε が中間的な値であれば、社会的総余剰を最大化する環境税率は正になるが、その税率は、均衡において周辺企業を産業から完全に駆逐してしまう税率より低い。
- (3) パラメーター ε が極端に大きい場合には、社会的総余剰を最大化する環境税率は、単に正になるだけでなく、その税率は、均衡において周辺企業を産業から完全に駆逐してしまうほど高くなる。

これらの結論は、経済学的な直観と整合的であるが、この「最適環境税率」を政府(規制当局)が正確に計算できるほどの情報を保有しているとは限らない。したがって、この「最適環境税率」を実際に実現することは、必ずしも容易なことではないであろう。

4. モデルの拡張——「面源汚染」の場合

前章までは、汚染源とその汚染物質の排出量を政府(規制当局)が正確に把握できる「点源汚染」(Point Source Pollution)を前提にして、環境税の効果を分析した。本章では、規制当局は汚染物質の総排出量は把握しているが、その個別の内訳を特定できない「面源汚

染」(Non-Point Source Pollution, 非点源汚染とも訳される) の場合にモデルを拡張する¹³⁾。

本章では、時点 t におけるこの市場の汚染物質の排出総額 $Z(t)$ が、第 2 章の (3) 式ではなく、以下のように表されるものとする。

$$\begin{aligned} Z(t) &= \varepsilon_1 x_1(t) + \varepsilon_2 x_2(t) = \varepsilon_1 \{x(t) - x_2(t)\} + \varepsilon_2 x_2(t) = \varepsilon_1 x(t) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x_2(t); \\ \varepsilon_1 &> 0, \varepsilon_2 > 0, \varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (49)$$

ここで、規制当局は、総生産量 $x(t)$ および排出総額 $Z(t)$ は把握しているが、 ε_1 と ε_2 の正確な値を把握していないと仮定しよう。規制当局が $Z(t)$ に比例した環境税総額を企業全体から徴収するものとすれば、時点 t における環境税総額 $T(t)$ は、以下ようになる。

$$T(t) = mZ(t) = m\{\varepsilon_1 x(t) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x_2(t)\}; \quad m > 0 \quad (50)$$

規制当局は、排出総額 $Z(t)$ は把握しているが、企業のタイプごとの汚染物質の排出額を特定化できないので、財の生産量 1 単位あたりの環境税率 $\tau(t)$ をすべての企業に一律に課すものとすれば、

$$\tau(t) = \frac{T(t)}{x(t)} = m\varepsilon_1 + \frac{m(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x_2(t)}{x(t)} = m\varepsilon_1 + \frac{m(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x_2(t)}{a - bp(t)} = \tau(x_2(t), p(t)) \quad (51)$$

となる。ここで、以下の結果が成立する¹⁴⁾。

$$\begin{aligned} \tau_{x_2} &\equiv \frac{\partial \tau(t)}{\partial x_2(t)} = \frac{m(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{a - bp(t)}, \quad \tau_p \equiv \frac{\partial \tau(t)}{\partial p(t)} = -\frac{bm(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x_2(t)}{\{a - bp(t)\}^2}, \\ \tau_{x_2 x_2} &\equiv \frac{\partial^2 \tau(t)}{\partial x_2(t)^2} = 0, \quad \tau_{pp} \equiv \frac{\partial^2 \tau(t)}{\partial p(t)^2} = \frac{2b^2 m(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x_2(t)}{\{a - bp(t)\}^3}, \\ \tau_{x_2 p} &\equiv \frac{\partial^2 \tau(t)}{\partial p(t) \partial x_2(t)} = \tau_{p x_2} \equiv \frac{\partial^2 \tau(t)}{\partial x_2(t) \partial p(t)} = -\frac{bm(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\{a - bp(t)\}^2}, \\ \tau_{pp x_2} &\equiv \frac{\partial \tau_{pp}}{\partial x_2(t)} = \frac{2b^2 m(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\{a - bp(t)\}^3}, \quad \tau_{ppp} \equiv \frac{\partial \tau_{pp}}{\partial p(t)} = \frac{6b^3 m(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x_2(t)}{\{a - bp(t)\}^4} \end{aligned} \quad (52)$$

以下では、規制当局と周辺企業は時点 t において $\tau(t)$ は把握しているが ε_1 と ε_2 の正確な値を知らないので、(51) 式の関数形を把握していないが、他方、主導的企業は、 ε_1 と ε_2 を

13) 最近、「面源汚染」の規制に関する様々な理論的研究が蓄積されている。たとえば、Segerson (1988), Suter, Volssler, Poe and Segerson (2008), Raju and Ganguli (2013), H. Sato (2017), Y. Sato (2021), 中山 (2021), 佐藤 (2022) を参照されたい。

14) ただし、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ の場合には、 $\tau(t) = m\varepsilon > 0$ となり、このモデルは、第 2 章で定式化した「点源汚染」のモデルと一致してしまう。したがって、「面源汚染」のモデルでは、 $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$ と仮定しなければならない。

含む(51)式の関数形を正確に把握しており、主導的企業はこの情報を用いて動学的な最適化を実行できることを仮定する。すなわち、主導的企業と規制当局を含むその他の経済主体の間に情報の非対称性があることを仮定するのである。

周辺企業の参入・退出の動学過程は、第2章の(7)式と同様に、

$$\dot{x}_2(t) = k\{p(t) - \tau(t) - \bar{p}\} = k\{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - \bar{p}\}; k > 0, \bar{p} > 0 \quad (53)$$

で表されるが、この行動は、(51)式の関数形を把握していなくても、時点 t において $p(t)$ と $\tau(t)$ の値を観察できれば、可能である。他方、主導的企業の税引き後利潤の割引現在価値 W は、第1章の(6)式と同様に、以下ようになる。

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{\infty} \{p(t) - \tau(t) - c\} x_1(t) e^{-rt} dt \\ &= \int_0^{\infty} \{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - c\} \{a - bp(t) - x_2(t)\} e^{-rt} dt; \bar{p} > c > 0, r > 0 \end{aligned} \quad (54)$$

主導的企業は、 $\tau(x_2(t), p(t))$ を含めて(53)式と(54)式の関数形をすべて正確に把握しており、以下の動学的最適化問題を解くことができることが想定されている。

$$\begin{aligned} \text{Max}_{p(t)} \int_0^{\infty} \{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - c\} \{a - bp(t) - x_2(t)\} e^{-rt} dt; c > 0, r > 0 \\ \text{subject to } \dot{x}_2(t) &= k\{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - \bar{p}\}; k > 0, \bar{p} > c \end{aligned} \quad (P_2)$$

ここで、 $p(t)$ は制御変数、 $x_2(t)$ は状態変数であり、状態変数の初期値 $x_2(0)$ は所与であるが、制御変数の初期値 $p(0)$ は主導的企業が自由に選ぶことができる。

この問題も、第2章の問題(P_1)と同様に、以下のようにして、ポントリャーギンの最大値原理を用いて解くことができる。

時点 t の経常値ハミルトン関数 $H(t)$ は、以下ようになる。

$$H(t) = \{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - c\} \{a - bp(t) - x_2(t)\} + \mu(t) k \{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - \bar{p}\} \quad (55)$$

ここで、 $\mu(t)$ は、時点 t における補助変数である¹⁵⁾。このとき、動学的最適化のための必要条件は、以下ようになる。

$$\text{Max}_{p(t)} H(t) \quad \text{for all } t \geq 0 \quad (56)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\partial H(t)}{\partial \mu(t)} = k\{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - \bar{p}\} \quad (57)$$

15) (55)式における $H(t)$ と $\mu(t)$ の値は、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ でない限り、第2章の(8)式におけるそれらの値とは異なるが、便宜上、同じ記号を用いている。

$$\begin{aligned}\dot{\mu}(t) &= -\frac{\partial H(t)}{\partial x_2(t)} + r\mu(t) \\ &= \{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - c\} + \tau_{x_2}(p(t))\{a - bp(t) - x_2(t)\} + r\mu(t)\end{aligned}\quad (58)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t)e^{-rt} = 0 \quad (59)$$

ところで、以下の関係が成立することが容易にわかる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial H(t)}{\partial p(t)} &= \{1 - \tau_p(x_2(t), p(t))\}\{a - bp(t) - x_2(t)\} - b\{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - c\} \\ &\quad + k\{1 - \tau_p(x_2(t), p(t))\}\mu(t) \\ &= \{1 - \tau_p(x_2(t), p(t))\}\{a - bp(t) - x_2(t) - k\mu(t)\} \\ &\quad - b\{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - c\}\end{aligned}\quad (60)$$

$$\frac{\partial^2 H(t)}{\partial p(t)^2} = -2b\{1 - \tau_p(x_2(t), p(t))\} - \tau_{pp}(x_2(t), p(t))\{a - bp(t) - x_2(t) + k\mu(t)\} \quad (61)$$

(52)式から、 $|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|$ が十分に小さければ、 $|\tau_p|$ と $|\tau_{pp}|$ が十分に小さくなるので、

$$1 - \tau_p(x_2(t), p(t)) > 0, \quad \frac{\partial^2 H(t)}{\partial p(t)^2} < 0 \quad (62)$$

となる。この場合には、(56)式の1階の条件

$$\frac{\partial H(t)}{\partial p(t)} = 0 \quad (63)$$

を満たす $p(t)$ を選択すれば、(56)式の条件が満たされる。(63)式を $\mu(t)$ について解けば、以下の式を得る¹⁶⁾。

$$\begin{aligned}\mu(t) &= (1/k) \left[\frac{b\{p(t) - \tau(x_2, p(t)) - c\}}{1 - \tau_{pp}(x_2(t), p(t))} - a + bp(t) + x_2(t) \right] \\ &= \mu(x_2(t), p(t))\end{aligned}\quad (64)$$

ここで、以下の仮定を置くことにしよう。

[仮定1]

$\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$ であるが、 $|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|$ が十分に小さいので、(62)式が成立する。

このとき、(57)、(58)、(59)、(64)から成るシステムは、以下のような横断性条件付きの

16) もし $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ であれば、(64)式は、第2章の(14)式と正確に一致する。

2変数の非線形微分方程式に還元されることを示すことができる¹⁷⁾。

$$\dot{x}_2(t) = k\{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - c\} \equiv G_1(x_2(t), p(t)) \quad (65a)$$

$$\dot{p}(t) = G_2(x_2(t), p(t)) \quad (65b)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(x_2(t), p(t))e^{-rt} = 0 \quad (65c)$$

以下では、このシステムの位相図を検討しよう。まず、(65a)式において $\dot{x}_2=0$ をもたらす x_2 と p の軌跡は、

$$p - \tau(x_2, p) - \bar{p} = 0 \quad (66)$$

という式によって与えられる。(66)式を x_2 と p について全微分すれば、

$$-\tau_{x_2} dx_2 + (1 - \tau_p) dp = 0 \quad (67)$$

となる。したがって、仮定1のもとでは、以下の関係が得られる。

$$\left. \frac{dp}{dx_2} \right|_{\dot{x}_2=0} = \frac{\tau_{x_2}}{1 - \tau_p} \quad (68)$$

また、(65a)式と仮定1により、

$$\frac{\partial \dot{x}_2}{\partial p} = 1 - \tau_p > 0 \quad (69)$$

となる。したがって、(52)式と仮定1により、以下の命題が成立する。

[命題3]

- (1) $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ の場合には $\left. \frac{dp}{dx_2} \right|_{\dot{x}_2=0} > 0$ となり、 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ の場合には $\left. \frac{dp}{dx_2} \right|_{\dot{x}_2=0} < 0$ となる。いずれの場合も、これらの値の絶対値は、比較的ゼロに近い。
- (2) $\frac{\partial \dot{x}_2}{\partial p} > 0$ である。

命題3を図解すれば、図6のようになる。

17) 具体的な関数形 $G_2(x_2(t), p(t))$ の導出については、紙幅の都合により省略するが、その導出過程は、以下のとおりである。(64)式の両辺を時間 t で微分すれば、

$$\begin{aligned} \dot{\mu}(t) = (1/k) & \left[\frac{b\{\dot{p}(t) - \tau_{x_2}(p(t))\dot{x}_2(t) - \tau_p(x_2(t), p(t))\dot{p}(t)\}}{1 - \tau_{pp}(x_2(t), p(t))} \right. \\ & \left. + \frac{b\{p(t) - \tau(x_2(t), p(t)) - c\}\{\tau_{ppx_2}(p(t))\dot{x}_2(t) + \tau_{ppp}(x_2(t), p(t))\dot{p}(t)\}}{\{1 - \tau_{pp}(x_2(t), p(t))\}^2} - b\dot{p}(t) + \dot{x}_2(t) \right] \quad (F1) \end{aligned}$$

となる。「(58)式の右辺=(F1)式の右辺」という等式に(64)式と(65a)式を代入して $\dot{p}(t)$ について解けば、(65b)式が得られる。なお、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ の特殊ケースでは、システム(65a)~(65c)は第1章のシステム(18a)~(18c)に正確に一致することを、示すことができる。

他方、パラメーターの変化に関する関数の連続性を考慮に入れれば、(65b)式において $\dot{p}=0$ をもたらす x_2 と \dot{p} の軌跡と \dot{p} の分類は、 $|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$ が十分に小さければ、定性的には図2と同様になることを示すことができる。

図2と図6を組み合わせることにより、このシステムの位相図が図7のようになることがわかる。図7aの場合にも図7bの場合にも均衡点 E はサドル・ポイントになり、主導的企業は均衡点に収束する動学経路 AE または BE を選択するという意味では、第2章のモデルと同様の結論が得られる。

環境税の強度を表すパラメーター m の変化が均衡点に及ぼす比較静学に関する第3章の命題1(1)~(4)の結論は、 $|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|$ が十分に小さい限り、パラメーターに関する関数の連続性を考慮に入れれば、(3)を除いて成立する。すなわち、本章のモデルではもはや $\frac{dx_1^*}{dm} = 0$ は

図6a \dot{x}_2 の分類 ($\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, $|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|$ 小)

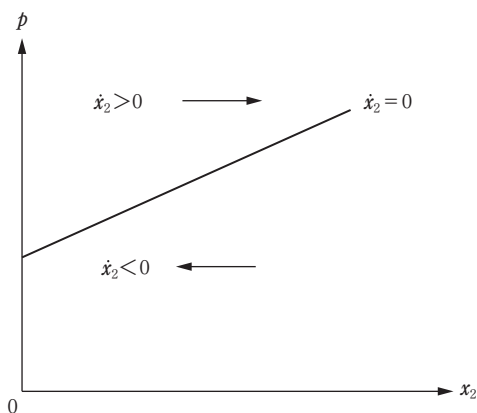


図6b \dot{x}_2 の分類 ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, $|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|$ 小)

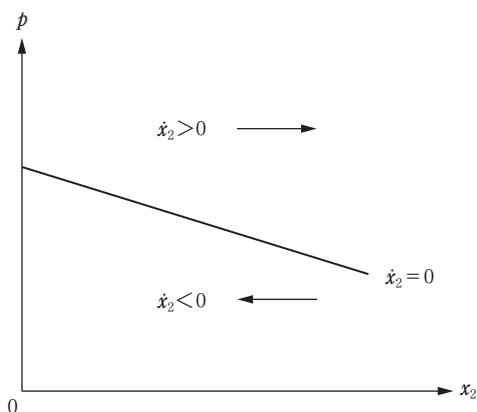


図7a 動学システム(65)の位相図

$$(\varepsilon_1 < \varepsilon_2, |\varepsilon_2 - \varepsilon_1| \text{小})$$

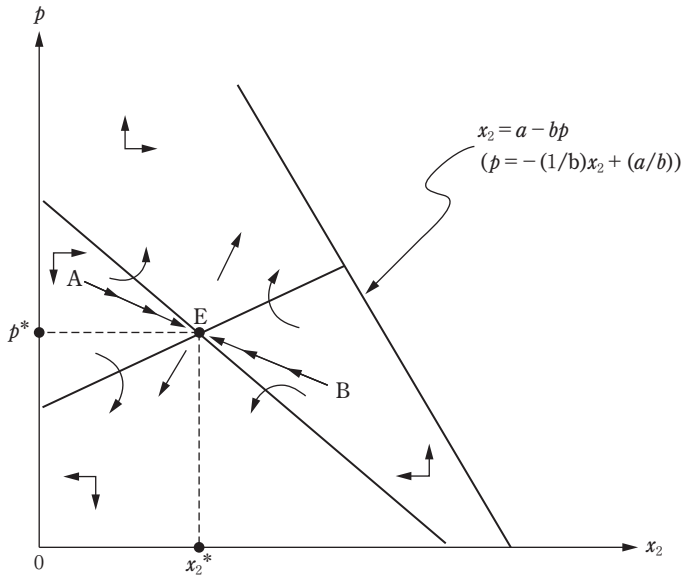
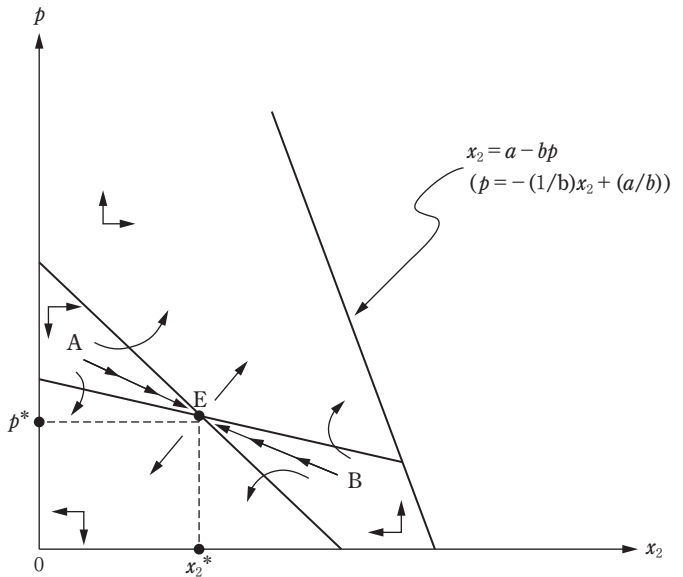


図7b 動学システム(65)の位相図

$$(\varepsilon_1 > \varepsilon_2, |\varepsilon_2 - \varepsilon_1| \text{小})$$



成立しないが、 $\frac{dp^*}{dm} > 0$, $\frac{dx_2^*}{dm} < 0$, $\frac{dx^*}{dm} = \frac{d(x_1^* + x_2^*)}{dm} < 0$, $\frac{dZ^*}{dm} < 0$ は依然として成立する。また、本章のモデルでは、第3章の命題2そのものは定量的には成立しないが、命題2から導かれる定性的結論は、 $|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|$ が十分に小さい限り、依然として成立する。

5. 結 論

本稿では、環境汚染を発生させる市場における企業を、価格設定の先導者として行動する主導的企業と（参入・退出を行う）周辺企業の2種類に分けて、環境課税の経済効果の分析を行った。この2種類の企業が存在する市場において、政府は各企業が排出する汚染量を完全に把握しているために汚染額に比例した環境税を掛けることができる「点源汚染」に関しての環境税と、汚染物質の総排出量を把握しているが個別の内訳に関して特定ができない「面源汚染」に対する環境税の効果について検証した。また、点源汚染についてはその社会厚生についても検証した。

検証にあたっては、Gaskins (1971) の動学的参入阻止価格モデルを採用した。結果として、前者の点源汚染の場合は、主導的企業の動学的最適化問題を解くことによって、主導的企業と周辺企業の行動を微分方程式システムを用いて定式化し、環境課税の強化によって、環境汚染量の減少はもっぱら周辺企業の生産量の低下によってもたらされることを示した。同時に均衡における社会厚生において、それを最大化させる最適環境税率の存在についての条件を明示し、必ずしも最適環境税率を達成することが容易であるとは限らないことを指摘した。他方、後者の面源汚染の場合についても、主導的企業の動学的最適化問題を解くことによって、主導的企業と周辺企業の行動を微分方程式システムで定式化し、周辺企業の生産量1単位あたりの汚染排出量と主導的企業の生産量1単位あたりの汚染排出量の差の絶対値が十分小さいならば、環境課税による効果は点源汚染と同様の結論が得られることを示した。

補論：基本モデルの均衡点に収束する経路上の初期値 $p(0)$ の正確な表現について

この補論では、基本モデルの均衡点に収束する経路上の初期値 $p(0)$ の正確な表現を、数学的に求めよう。2変数の線形微分方程式(18a)～(18b)の一般解は、以下ようになる。ただし、以下における e は、「自然対数の底」を表すものとする¹⁸⁾。

18) 線形微分方程式の一般解の計算方法については、たとえば、三土 (1996) 第16章を参照されたい。

$$\begin{bmatrix} x_2(t) \\ p(t) \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^2 \begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} e^{\lambda_j t} + \begin{bmatrix} x_2^* \\ p^* \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

ここで、 $\lambda_1 < 0$ 、 $\lambda_2 > 0$ は(31)式によって与えられ、 x_2^* と p^* はそれぞれ、(20)式と(21)式によって与えられる。また、 A_j と B_j は、以下の関係を満たさなければならない。

$$\begin{bmatrix} \lambda_j & -k \\ -(r/2b) & \lambda_j - r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (j=1, 2) \quad (\text{A2})$$

(A2)式を(A1)式に代入すれば、次式を得る。

$$\begin{bmatrix} x_2(t) \\ p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \lambda_1/k \end{bmatrix} A_1 e^{\lambda_1 t} + \begin{bmatrix} 1 \\ \lambda_2/k \end{bmatrix} A_2 e^{\lambda_2 t} + \begin{bmatrix} x_2^* \\ p^* \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

(A3)式に $t=0$ を代入すれば、以下の関係が成立することがわかる。

$$x_2(0) = A_1 + A_2 + x_2^* \quad (\text{A4a})$$

$$p(0) = (\lambda_1/k)A_1 + (\lambda_2/k)A_2 + p^* \quad (\text{A4b})$$

ここで、状態変数の初期値 $x_2(0)$ は、所与と仮定されている。 $\lambda_1 < 0$ 、 $\lambda_2 > 0$ であるから、 $A_2 = 0$ という条件を満たす初期値の組合せ $(x_2(0), p(0))$ から出発する経路のみが、均衡値の組合せ (x_2^*, p^*) への収束を保証することができる。そこで、(A4)式に $A_2 = 0$ という条件を代入することにより、以下のような、 $p(0)$ と A_1 に関する連立方程式を得る。

$$x_2(0) = A_1 + x_2^* \quad (\text{A5a})$$

$$p(0) = (\lambda_1/k)A_1 + p^* \quad (\text{A5b})$$

(A5a)式を(A5b)式に代入すれば、以下のようになる。

$$p(0) - p^* = (\lambda_1/k)(x_2(0) - x_2^*) \quad (\text{A6})$$

この式こそ、図3における均衡解への収束を保証する経路AEまたはBEに乗った初期値の組合せ $(x_2(0), p(0))$ の正確な表現に他ならない。

謝辞 本研究は、2023年度中央大学基礎研究費より資金援助を受けている。記して感謝する。

参考文献

- 浅田統一郎 (2017) 『ミクロ経済学の基礎 第2版』中央経済社
 佐藤佑一 (2022) 「ベルトラン複占を用いた面源汚染と環境課税に関する研究」『中央大学経済研究所年報』第54号, 255-280頁
 竹田育郎 (2010) 『よくわかる水環境と水質』オーム社
 中山恵子 (2021) 『わが国の森林環境税一恒久的な水源涵養の保全に向けて一』勁草書房
 三土修平 (1996) 『初歩からの経済数学 第2版』日本評論社
 Asada, T. and W. Semmler (2004) "Limit Pricing and Entry Dynamics with Heterogeneous Firms",

- Gallegati, M., A. P. Kirman and M. Marsili (eds.) *The Complex Dynamics of Economic Interaction : Essays in Economics and Econophysics*, Berlin : Springer, pp. 35-48
- Chiang, A.C. (1992) *Elements of Dynamic Optimization*, New York : McGraw-Hill (小田正雄・仙波憲一・高森寛・平澤典男訳『動学的最適化の基礎』シーエーピー出版, 2006年)
- Forster, B.A. (1980) "Optimal Energy Use in a Polluted Environment", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 7, pp. 321-333
- Gaskins, D.W. (1971) "Dynamic Limit Pricing : Optimal Pricing under Threat of Entry", *Journal of Economic Theory*, Vol. 3, pp. 306-322
- Judd, K. and B. Petersen (1986) "Dynamic Limit Pricing and Internal Finance", *Journal of Economic Theory*, Vol. 39, pp. 368-399
- Raju, S. and S. Ganguli (2013) "Strategic Firm Interaction, Returns to Scale, Environmental Regulation and Ambient Charges in a Cournot Duopoly", *Technology and Investment*, Vol. 4, pp. 113-122
- Sato, H. (2017) "Pollution from Cournot Duopoly Industry and the Effect of Ambient Charges", *Journal of Environmental Economics and Policy*, Vol. 6, No. 3, pp. 305-308
- Sato, Y. (2021) "The Effectiveness of Ambient Charges in a Static n-firm Cournot Oligopoly", *The Annual of the Institute of Economic Research Chuo University* (中央大学経済研究所年報), Vol. 53, No. 2, pp. 251-258
- Segerson, K. (1988) "Uncertainty and Incentives for Non-Point Pollution Control", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 15, pp. 87-98
- Suter, J.F., C.A. Vossler, G. L. Poe and K. Segerson (2008) "Experiments on Damage-Based Ambient Taxes for Nonpoint Source Polluters", *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 90, No. 1, pp. 86-102

(非線形経済理論研究会)