

三つの選択肢からなる環境政策の評価について

早稲田大学・創造理工学部 後藤 允 (Makoto Goto)
School of Creative Science and Engineering,
Waseda University

東京大学・大学院工学系研究科 高嶋 隆太 (Ryuta Takashima)
Graduate School of Engineering,
The University of Tokyo

龍谷大学・経済学部 辻村 元男 (Motoh Tsujimura)*
Faculty of Economics,
Ryukoku University

1 はじめに

地球温暖化、酸性雨、砂漠化など様々な環境問題に我々は直面しており、これらの問題を解決するために、世界各国で取り組みが行なわれている。環境問題を議論する際の重要な要素の一つとして、不確実性が挙げられる。例えば、地球温暖化を考えた場合、大気に関わるシステムが非常に複雑なため、将来の温暖化の程度は、確実にはわからない。また、大気中の温暖化ガスの濃度が同じであったとしても、温暖化によって被る損害は、人口の変化や天候などそれ以外の不確実な要素によっても每期異なると考えられる。このような不確実性下における環境政策に関して、Pindyck (2000, 2002) などは、不確実性下において、設備投資など不可逆なプロジェクトへの投資を分析するリアルオプション・アプローチを環境問題の分析に応用した。

本研究は、これらの研究を基礎とし、政策実施主体が政策選択肢として三つの環境政策 1, 2, 3 を所有している場合に、どの政策をいつ実施すればよいかを明らかにする。環境政策 1 は、政策実施に要する費用は低い、汚染物質の排出削減量も小さい政策である。環境政策 2 は、政策実施に要する費用は、政策 1 よりも高いが、汚染物質の排出削減量は、政策 1 よりも大きい政策である。環境政策 3 は、汚染物質の削減量と費用が、政策 1, 2 のそれぞれ間の大きさとなっているとする。このような 3 つの代替的な環境政策の分析をするために、本研究では、先ず、環境政策 1, 2, 3 の内いずれか一つしか政策選択しが存在しない場合を考察する。つまり、不確実性下において単一の環境政策に関する考察である。次に、この分析を拡張し、経済主体は、環境政策 1, 2, 3 のいずれも実施可能であり、3 種類の代替的な環境政策のどちらか一方を実施する場合を考察する。考察に際しては、2 種類の代替的なプロジェクトへの投資を分析した Dixit (1993) を拡張した Décamps, Mariotti and Villeneuve (2006) に従う。このように、政策主体が 2 つの政策選択肢を所有する場合の環境政策については、後藤・高嶋・辻村 (2007, 2008) が考察している。本研究は、これらの先行研究を政策主体が所有する政策選択肢を 3 つに拡張した。

2 単一環境政策

経済主体は、経済活動をすることで便益を得ているが、経済活動に伴って汚染物質を排出しているとする。汚染物質の排出によって損害を被っているとす。したがって、汚染物質の排出を

*612-8577 京都市伏見区深草塚本町 67 E-mail: tsujimura@econ.ryukoku.ac.jp

削減する環境政策の実施を検討しているとする。検討する環境政策は、同じ水準の経済活動から排出される汚染物質が少なくなるような設備を導入する政策である。本節では、三つの環境政策のうち一つしか政策選択肢が存在しない単一環境政策の場合を考察する。

経済主体は、時刻 $t \geq 0$ において、経済活動の水準 Q_t から便益 pQ_t を得ているとする。 $p > 0$ は経済活動の水準を金額に変換する定数パラメータ。 Q_t が財の生産量だとすると p は財の価格に対応する。経済活動の水準 Q_t の過程は、微分方程式

$$dQ_t = \alpha Q_t dt, \quad Q_0 = q \quad (2.1)$$

に従っているとする。ただし、 $\alpha > 0$ とする。経済活動に伴って排出される汚染物質のフローは、経済活動のある一定割合で汚染物質が排出され、 γQ_t^2 と与えられるとする。排出された汚染物質が蓄積されたストックを Y_t とし、 Y_t の過程は、微分方程式

$$dY_t^i = (\gamma^i Q_t - \delta Y_t^i) dt, \quad Y_0^i = y \quad (2.2)$$

に従っているとする。ただし、 $\delta \in (0, 1)$ は、汚染物質の自然浄化率を表わす。主体は汚染物質から損害を被っているため、汚染物質の排出フローを削減する環境政策を検討しているとする。環境政策を実施していないときの汚染物質の排出フローを、 $\gamma^0 Q_t$ とする。したがって、 $i = 0$ は環境政策が実施されていない状態を表わす。環境政策 i ($i = 1, 2, 3$) によって汚染物質の排出フローは、 $\gamma^i Q_t$ に削減される。ただし、環境政策の削減量の仮定から、 $\gamma^0 > \gamma^1 > \gamma^2 > \gamma^3$ という関係が成り立つ。

時刻 t において、汚染物質のストックの 2 乗に比例して損害を被ると仮定し³、 $X_t Y_t^2$ と表わす。 X_t は汚染物質のストックから受ける損害を表わすシフト変数であり、汚染物質の単位から損害額への変換もなされている。同じ汚染物質のストック量によっても、被る損害は、人口の変化や天候などそれ以外の不確実な要素によっても毎時異なると考えられる。したがって、損害が時間の経過を通じて変化することを表わすために、 X_t の過程は、確率微分方程式

$$dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t dW_t, \quad X_0 = x \quad (2.3)$$

に従っているとする。ただし、 $\mu > 0$ 、 $\sigma > 0$ は定数とし、 W_t は標準ブラウン運動である。経済主体が経済活動から得られる正味の便益は、便益関数 $B(Q_t, X_t, Y_t^i)$

$$B^i(Q_t, X_t, Y_t^i) = pQ_t - X_t (Y_t^i)^2 \quad (2.4)$$

によって表わされる。環境政策 i を実施するために必要な費用は、汚染物質の削減量に比例した費用と、それとは独立にかかる固定費用、さらに調整費用を考慮し、

$$K^i(Q_t) = k_0 + k_1(\gamma^0 - \gamma^i)Q_t + k_2(\gamma^0 - \gamma^i)^2 Q_t^2 \quad (2.5)$$

と与えられるとする。ただし、 $k_0 > 0$ は固定費用を、 $k_1 > 0$ 比例費用パラメータを、 $k_2 > 0$ は調整費用パラメータを表わす。 $\gamma^0 > \gamma^1 > \gamma^2 > \gamma^3$ より、環境政策の実施費用は、 $K^1 < K^2 < K^3$ となっている。環境政策 i に関する主体の期待総割引便益 J^i は、

$$J^i(q, x, y; \tau_S^i) = \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-rt} B^i(Q_t, X_t, Y_t^i) dt - e^{-r\tau_S^i} K^i(Q_t) \right] \quad (2.6)$$

² Q を使用電力量、あるいは発電量とし、汚染物質として二酸化炭素を考えると、 γ は、二酸化炭素排出原単位に相当する。

³ 何乗になるかは、汚染物質を特定化しなければならない。本研究では、取り扱いの簡単さから 2 乗と仮定した。

と与えられる。ただし、 $r > 0$ は割引率を表わす。 $\tau_S^i \in \mathcal{T}$ ($i = 1, 2, 3$)は、環境政策*i*が実施される時刻を表わし、 \mathcal{T} は、許容な政策実施時刻の全体を表わす。ここで、意味のある問題を考察するために、次の条件を仮定する。

$$\mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-rt} |B^i(Q_t, X_t, Y_t)| dt \right] < \infty. \quad (\text{AS.1})$$

以上より、主体の問題は、環境政策*i*に関する主体の期待総割引便益 J^i を最大とするように、環境政策*i*を実施する時刻 τ^i を選ぶ問題となる。

$$V^i(q, x, y) = \sup_{\tau^i \in \mathcal{T}} J^i(q, x, y; \tau_S^i) = J^i(q, x, y; \tau_S^{i*}). \quad (2.7)$$

ただし、 V^i は価値関数を、 τ_S^{i*} は最適な政策実施時刻を表わす。

最適環境政策

最適停止問題として定式化された主体の問題は、変分不等式を用いて解くことが出来る。本節の主体の問題に対応する変分不等式は、次のように与えられる。

$$\mathcal{L}V^i(q, x, y) + B^0(q, x, y) \leq 0, \quad (2.8)$$

$$V^i(q, x, y) \geq G^i(q, x, y), \quad (2.9)$$

$$[\mathcal{L}V^i(q, x, y) + B^0(q, x, y)][V^i(q, x, y) - G^i(q, x, y)] = 0. \quad (2.10)$$

ただし、 \mathcal{L} は

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\sigma^2 x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \mu x \frac{\partial}{\partial x} + (\gamma^i q - \delta y) \frac{\partial}{\partial y} + \alpha q \frac{\partial}{\partial q} - r \quad (2.11)$$

と与えられる作用素であり、 G^i は、政策*i*の実施費用と政策が実施された後の主体の期待総割引便益であり、

$$G^i(Q_t, X_t, Y_t^i) = \mathbb{E} \left[\int_t^\infty e^{-r(s-t)} B^i(Q_s, X_s, Y_s^i) ds - K^i(Q_t) \right] \quad (2.12)$$

と与えられる。価値関数 $V^i(q, x, y)$ の候補関数を $\phi^i(q, x, y)$ とする⁴。

次に、候補関数 ϕ^i の解析解を求める。今、主体の最適な環境政策として、シフト変数の水準が $x_S^i(y)$ 以上になれば、主体は環境政策*i*を実施する、という環境政策を考える。政策実施時刻 τ_S^i は、

$$\tau_S^i = \inf\{t > 0; X_t \geq x_S^i(y)\} \quad (2.13)$$

となる。変分不等式より、 $x < x_S^i(y)$ においては、

$$\mathcal{L}\phi^i(q, x, y) + B^0(q, x, y) = 0 \quad (2.14)$$

⁴候補関数 ϕ^i が(2.8)-(2.10)の変分不等式の解であるとする、Verification Theoremより、候補関数が価値関数と一致することが示される。

が成り立つ。(2.14)式の解は、境界条件:

$$\phi^i(q, 0, y) = \frac{pq}{r - \alpha} \quad (2.15)$$

を考慮すると

$$\phi^i(q, x, y) = C_{S1}^i(y)x^{\beta_1} + \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy^2}{\rho_1} - \frac{2xy\gamma^0 q}{\rho_1\rho_2} - \frac{2x(\gamma^0 q)^2}{\rho_1\rho_2\rho_3} \quad (2.16)$$

となる。ただし、 $C_{S1}^i(y)$ は未知定数であり、 $\beta_1 > 1$ は特性方程式 $1/2\sigma^2\beta(\beta - 1) + \mu\beta - r = 0$ の解

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} > 1, \quad \beta_2 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} < 0 \quad (2.17)$$

である。なお、境界条件により本節では必要とならないが、次節では必要となるので特性方程式の負の解 $\beta_2 < 0$ も示した。(2.16)の右辺第1項は、主体が環境政策 i の実施時刻を柔軟に選択できることから生じる価値である。右辺第3-5項は、環境政策が将来にわたって実施されない場合の便益関数 B^i の期待割引現在価値であり、 $\rho_1 = r - \mu + 2\delta > 0$ 、 $\rho_2 = r - \mu + \delta - \alpha > 0$ 、 $\rho_3 = r - \mu - 2\alpha > 0$ である。主体の問題を解くために、求めなければならない未知パラメータは、 $C_{S1}^i(y)$ と $x_S^i(y)$ である ($i = 1, 2, 3$)。これらは、value-matching条件と smooth-pasting条件:

$$\phi^i(q, x_S^i(y), y) = G^i(q, x_S^i(y), y), \quad (2.18)$$

$$\phi_x^i(q, x_S^i(y), y) = G_x^i(q, x_S^i(y), y) \quad (2.19)$$

によって求まる。ただし、 $G^i(q, x, y)$ は、

$$G^i(q, x, y) = PV^i(q, x, y) - K^i(q) \quad (2.20)$$

と求まる。ただし、 $i = 0, 1, 2, 3$ に対して、

$$PV^i(q, x, y) = \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy^2}{\rho_1} - \frac{2xy\gamma^i q}{\rho_1\rho_2} - \frac{2x(\gamma^i q)^2}{\rho_1\rho_2\rho_3} \quad (2.21)$$

である。(2.16)-(2.21)より、環境政策 i に対する閾値 $x_S^i(y)$ と未知定数 $C_{S1}^i(y)$ は、次と求まる。

$$x_S^i(y) = \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - 1}\right) \left(\frac{\rho_1\rho_2\rho_3}{2(\rho_3 y \Gamma^i + \Upsilon^i)}\right) K^i(q), \quad (2.22)$$

$$C_{S1}^i(y) = \left(\frac{2(\rho_3 y \Gamma^i + \Upsilon^i)}{\beta_1 \rho_1 \rho_2 \rho_3}\right)^{\beta_1} \left(\frac{\beta_1 - 1}{K^i(q)}\right)^{\beta_1 - 1} \quad (2.23)$$

ただし、 $\Gamma^i = (\gamma^0 - \gamma^i)q$ 、 $\Upsilon^i = ((\gamma^0)^2 - (\gamma^i)^2)q^2$ とおく。

3 二つの政策選択肢

本節では、経済主体が、環境政策の選択肢を二つ所有する時に、どちらか一方を実施する場合を考察する。政策選択肢の組み合わせとしては、政策 i, j ($i, j = 1, 2, 3, i < j$) の3種類ある。考察に際しては、二つの代替的なプロジェクトへの投資を分析した Décamps, Mariotti and Villeneuve (2006) に従う。

環境政策 i, j のどちらか一方が実施されるため、環境政策の実施時刻 τ_{ij} は、

$$\tau_{ij} = \min [\tau_{ij}^i, \tau_{ij}^j] \quad (3.1)$$

と与えられる。ただし、 τ_{ij}^l ($l = i, j$) は、環境政策 i, j が実施可能な時に、環境政策 l が実施される時刻を表わす。主体の期待総割引便益 J^{ij} は、(2.7) から

$$J^{ij}(q, x, y; \tau_{ij}) = \mathbb{E} \left[\int_0^{\tau_{ij}^i \wedge \tau_{ij}^j} e^{-rt} B^0(Q_t, X_t, Y_t^0) dt + \mathbf{1}_{\{\tau_{ij}^i \leq \tau_{ij}^j\}} e^{-r\tau_{ij}^i} G^i(Q_{\tau_{ij}^i}, X_{\tau_{ij}^i}, Y_{\tau_{ij}^i}^i) + \mathbf{1}_{\{\tau_{ij}^j > \tau_{ij}^i\}} e^{-r\tau_{ij}^j} G^j(Q_{\tau_{ij}^j}, X_{\tau_{ij}^j}, Y_{\tau_{ij}^j}^j) \right] \quad (3.2)$$

と与えられる。したがって、主体の問題は、主体の期待総割引便益 J^{ij} を最大とするように、環境政策 i, j のどちらかを実施する時刻 τ_{ij} を選択する問題

$$V^{ij}(q, x, y) = \sup_{\tau_{ij} \in T} J^{ij}(q, x, y; \tau_{ij}) = J^{ij}(q, x, y; \tau_{ij}^*). \quad (3.3)$$

となる。

第2節と同様に、最適停止問題として定式化された主体の問題を解く。本節の、主体の問題に対する変分不等式は次のようになる。

$$\mathcal{L}V^{ij}(q, x, y) + B^0(q, x, y) \leq 0, \quad (3.4)$$

$$V^{ij}(q, x, y) \geq \max[G^i(q, x, y), G^j(q, x, y)], \quad (3.5)$$

$$[\mathcal{L}V^{ij}(q, x, y) + B^0(q, x, y)] [V^{ij}(q, x, y) - \max[G^i(q, x, y), G^j(q, x, y)]] = 0. \quad (3.6)$$

\tilde{x}_{12} を $G^i(q, x, y) = G^j(q, x, y)$ となるシフト変数の値とする。 \tilde{x}_{13} , \tilde{x}_{23} についても同様に与えられる。したがって、 \tilde{x}_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, i < j$) は、

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\rho_1 \rho_2 \rho_3 (K^2(q) - K^1(q))}{2[\rho_3 y (\gamma^1 - \gamma^2) q + ((\gamma^1)^2 - (\gamma^2)^2) q^2]} \quad (3.7)$$

と求まる。ただし、 $\tilde{\Gamma}^{ij} = (\gamma^i - \gamma^j)q$, $\tilde{\Upsilon}^{ij} = (\gamma^i)^2 - (\gamma^j)^2 q^2$ である。Décamps, Mariotti and Villeneuve (2006) Proposition 2.2. より、 $x = \tilde{x}_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3, i < j$) においては、環境政策 i が実施されないことが示される。

次に、価値関数の候補関数 ϕ を求める。2節で環境政策を個別に考察をしていた場合は、シフト変数の水準が $x_S^i(y)$ 以上になれば、主体は環境政策 i を実施した。その結果、(2.22) より、環境政策 i の実施を定めるシフト変数の閾値 $x_S^i(y)$ の値は、環境政策 j のシフト変数の閾値 $x_S^j(y)$ の値より小さいことがわかった: $x_S^i < x_S^j$ 。一方、本節では、2つの環境政策が与えられており、そのいずれか一方を実施する主体の問題を考察している。このため、シフト変数の値が x_S^i より大き

い時: $x > x_S^i(y)$ でも, 環境政策 i と j を比較してどちらを実施すべきかの意思決定を遅らせている領域が存在する. このような領域を $(x_{ij}^i(y), x_{ij}^j(y))$ とする. つまり, 主体は, $x < x_S^i(y)$ においては, 環境政策を実施していない. $x_S^i(y) \leq x \leq x_{ij}^i(y)$ においては, 環境政策 i を実施している. $x_{ij}^i(y) < x < x_{ij}^j(y)$ においては, 環境政策を実施していない. $x \geq x_{ij}^j(y)$ においては, 環境政策 j を実施している. シフト変数の領域の分割に関しては, Décamps, Mariotti and Villeneuve (2006) Theorem 2.1 を参照のこと.

したがって, 二つの環境政策の内, 環境政策 1 が実施される時刻 τ_{ij}^i は,

$$\tau_{ij}^i = \inf\{t > 0; x_S^i(y) \leq X_t \leq x_{ij}^i(y)\} \quad (3.8)$$

と与えられる. 一方, 二つの環境政策の内, 環境政策 2 が実施される時刻 τ_{ij}^j は,

$$\tau_{ij}^j = \inf\{t > 0; X_t \geq x_{ij}^j(y)\} \quad (3.9)$$

と与えられる. したがって, 環境政策が実施されない領域 $H_{ij}(y)$ は,

$$H_{ij} = \{x; x < x_S^i(y), x_{ij}^i(y) < X_t < x_{ij}^j(y)\}. \quad (3.10)$$

となる. 変分不等式より, 環境政策が実施されない領域 H_{ij} においては,

$$\mathcal{L}\phi^{ij}(q, x, y) + B^0(q, x, y) = 0 \quad (3.11)$$

が成り立つ.

$x < x_S^i(y)$ における解は, x が $x_S^i(y)$ に到達すれば, 環境政策 i を実施することから, (2.16) となる. 一方, $x_{ij}^i(y) < x < x_{ij}^j(y)$ における解は, x が $x_{ij}^i(y)$ に到達すれば, 環境政策 i を実施し, $x_{ij}^j(y)$ に到達すれば環境政策 j を実施することから,

$$\phi^{ij}(q, x, y) = C_1^{ij}(y)x^{\beta_1} + C_2^{ij}(y)x^{\beta_2} + PV^0(q, x, y) \quad (3.12)$$

となる. したがって, 候補関数 ϕ^{ij} は x の水準によって, 次のように場合分けされる.

$$\phi^{ij}(q, x, y) = \begin{cases} C_{S1}^i(y)x^{\beta_1} + PV^0(q, x, y), & x < x_S^i(y), \\ G^i(q, x, y), & x_S^i(y) \leq x \leq x_{ij}^i(y), \\ C_1^{ij}(y)x^{\beta_1} + C_2^{ij}(y)x^{\beta_2} + PV^0(q, x, y), & x_{ij}^i(y) < x < x_{ij}^j(y), \\ G^j(q, x, y), & x \geq x_{ij}^j(y). \end{cases} \quad (3.13)$$

主体の問題を解くために, 求めなければならない未知パラメータは, $C_1^{ij}(y)$, $C_2^{ij}(y)$, $x_{ij}^i(y)$, $x_{ij}^j(y)$ である. これらは第 2 節と同様にして, 次の value-matching 条件と smooth-pasting 条件:

$$\phi^{ij}(q, x_{ij}^i(y), y) = G^i(q, x_{ij}^i(y), y), \quad (3.14)$$

$$\phi_x^{ij}(q, x_{ij}^i(y), y) = G_x^i(q, x_{ij}^i(y), y), \quad (3.15)$$

によって求まる ($l = i, j$). ただし, 解析的な解を求めることは出来ないので, 数値的にこれらの値を求める.

4 三つの政策選択肢

本節では、経済主体が、環境政策の選択肢を三つ所有する時に、どの政策をいつ実施するかについて考察する。

環境政策 1, 2, 3 のいずれかが実施されるため、環境政策の実施時刻 τ は、

$$\tau = \min [\tau^1, \tau^2, \tau^3] \quad (4.1)$$

と与えられる。ただし、 τ^i ($i = 1, 2, 3$) は、環境政策の選択肢が三つ存在する時に、環境政策 i が実施される時刻を表わす。主体の期待総割引便益 J は、(2.7) から

$$\begin{aligned} J(q, x, y; \tau) = \mathbb{E} \left[\int_0^\tau e^{-rt} B^0(Q_t, X_t, Y_t^0) dt + \mathbf{1}_{\{\tau^1 \leq \tau^2 \wedge \tau^3\}} e^{-r\tau^1} G^1(Q_{\tau^1}, X_{\tau^1}, Y_{\tau^1}^1) \right. \\ \left. + \mathbf{1}_{\{\tau^2 \leq \tau^1 \wedge \tau^3\}} e^{-r\tau^2} G^2(Q_{\tau^2}, X_{\tau^2}, Y_{\tau^2}^2) \right. \\ \left. + \mathbf{1}_{\{\tau^3 \leq \tau^1 \wedge \tau^2\}} e^{-r\tau^3} G^3(Q_{\tau^3}, X_{\tau^3}, Y_{\tau^3}^3) \right] \end{aligned} \quad (4.2)$$

と与えられる。したがって、主体の問題は、主体の期待総割引便益 J を最大とするように、環境政策 1, 2, 3 のいずれかを実施する時刻 τ を選択する問題

$$V(q, x, y) = \sup_{\tau \in T} J(q, x, y; \tau) = J(q, x, y; \tau^*) \quad (4.3)$$

となる。

$G(q, x, y)$ を、

$$G(q, x, y) = \max [G^1(q, x, y), G^2(q, x, y), G^3(q, x, y)] \quad (4.4)$$

とすると、 x の値に応じて、

$$G(q, x, y) = \begin{cases} G^1(q, x, y), & x < \tilde{x}_{12}, \\ G^2(q, x, y), & \tilde{x}_{12} < x < \tilde{x}_{23}, \\ G^3(q, x, y), & x > \tilde{x}_{23} \end{cases} \quad (4.5)$$

となる。この関係を図 1 に示した。図 1 より、政策 1, 3 の組み合わせは、政策 1, 2 と政策 2, 3 の組み合わせより、 G の値が下に位置することから、政策 1, 3 の組み合わせを考える必要はなくなる。

環境政策 1 の政策時刻 τ^1 は、政策 1, 2 の組み合わせにおける環境政策 1 の実施時刻として与えられる。したがって、(3.8) より、

$$\tau^1 = \inf \{ t > 0; x_S^1(y) \leq X_t \leq x_{12}^1(y) \} \quad (4.6)$$

と与えられる。環境政策 2 の政策時刻 τ^2 は、環境政策 1, 2 の組み合わせ時の政策 2 の閾値 $x_{12}^2(y)$ と、環境政策 2, 3 の組み合わせの時の政策 2 の閾値 $x_{23}^2(y)$ によって、

$$\tau^2 = \inf \{ t > 0; x_{12}^2(y) \leq X_t \leq x_{23}^2(y) \} \quad (4.7)$$

と与えられる。環境政策 3 の政策実施時刻 τ^3 は、環境政策 2, 3 の組み合わせ時の政策 3 の閾値 $x_{23}^3(y)$ によって、

$$\tau^3 = \inf \{ t > 0; X_t \geq x_{23}^3(y) \} \quad (4.8)$$

と与えられる。

第3節と同様にして、価値関数の候補関数を ϕ とすると、 ϕ は、 x の水準によって、次のように場合分けされる。

$$\phi(q, x, y) = \begin{cases} C_{S1}^1(y)x^{\beta_1} + PV^0(q, x, y), & x < x_S^1(y), \\ G^1(q, x, y), & x_S^1(y) \leq x \leq x_{12}^1(y), \\ C_1^{12}(y)x^{\beta_1} + C_2^{12}(y)x^{\beta_2} + PV^0(q, x, y), & x_{12}^1(y) < x < x_{12}^2(y), \\ G^2(q, x, y), & x_{12}^2(y) \leq x \leq x_{23}^2(y), \\ C_1^{23}(y)x^{\beta_1} + C_2^{23}(y)x^{\beta_2} + PV^0(q, x, y), & x_{23}^2(y) < x < x_{23}^3(y), \\ G^3(q, x, y), & x \geq x_{23}^3(y). \end{cases} \quad (4.9)$$

主体の問題を解くために、求めなければならない未知パラメータは、 $C_1^{12}(y)$, $C_2^{12}(y)$, $C_1^{23}(y)$, $C_2^{23}(y)$, $x_{12}^1(y)$, $x_{12}^2(y)$, $x_{23}^2(y)$, $x_{23}^3(y)$ である。これらは第3節の主体の問題の各パラメータと同じである。

5 数値例

本節では、環境政策の実施の閾値 x_S^i , x_{ij}^i , x_{ij}^j , $i, j = 1, 2, 3$, $i < j$ を求め、パラメータの値を変化させることで比較静学を行なう。

単一政策の閾値 x_S^i については、(2.22) にパラメータの値を代入するだけである。一方、代替政策の閾値 x_{ij}^i , x_{ij}^j については、解析解は求まらず、(3.11)–(3.12) を Newton 法を用いて数值的に解く。数値計算に使用する基準となるパラメータ値は、以下のように与えられる。 $r = 0.05$, $\alpha = 0.01$, $q = 5$, $p = 10$, $\mu = 0.01$, $\sigma = 0.2$, $y = 0.1$, $\delta = 0.01$, $\gamma^0 = 0.05$, $\gamma^1 = 0.03$, $\gamma^2 = 0.02$, $\gamma^3 = 0.01$, $k_0 = 5$, $k_1 = 100$, $k_2 = 10000$ 。これらの値を使い、代替政策の価値関数を図2に示した。また、この時の未知定数と閾値の値は、それぞれ、以下ようになる。 $C_{S1}^1(y) = 4562.6539$, $C_{S2}^2(y) = 3971.0925$, $C_1^{12} = 3685.6033$, $C_2^{12} = 3.8706$, C_1^{23} , C_2^{23} , $x_S^1(y) = 0.1494$, $x_S^2(y) = 0.2423$, $x_S^3(y) = 0.3674$, $x_{12}^1(y) = 0.2176$, $x_{12}^2(y) = 0.2793$, $x_{23}^2(y) = 0.5412$, $x_{23}^3(y) = 0.5965$ 。

次に、パラメータ値を +20% 変化させたときの閾値の変化を、表 1, 2 に表わした。分析の結果、割引率 r , シフト変数のボラティリティー σ , 自然浄化率 δ , 政策費用パラメータ k_0, k_1, k_2 に関しては、政策1の閾値 x_S^1 と代替的な政策 1, 2, 3 の続行領域 $x_{12}^2(y) - x_{12}^1(y)$, $x_{23}^3(y) - x_{23}^2(y)$ が大きくなっており、政策の実施が遅れる。一方、経済活動の成長率 α , 経済活動の水準 q , シフト変数の期待成長率 μ , 汚染物質のストックの水準 y に関しては、 x_S^1 , $x_{12}^2(y) - x_{12}^1(y)$, $x_{23}^3(y) - x_{23}^2(y)$ が小さくなっており、政策の実施が促進される。また、汚染物質の排出フローを定める γ に関しては、政策が実施されていない場合の γ^0 が大きくなると、 x_S^1 は大きくなり、政策1の実施が遅れるが、 $x_{12}^2(y) - x_{12}^1(y)$, $x_{23}^3(y) - x_{23}^2(y)$ は小さくなり、政策の実施が促進される。政策1実施後の排出フローのパラメータ γ^1 が大きくなると、 x_S^1 は小さくなり、政策1の実施が促進される。一方、 $x_{12}^2(y) - x_{12}^1(y)$ は大きくなり、政策実施が遅れる。 $x_{23}^3(y) - x_{23}^2(y)$ は、 γ^1 とは独立に定まるため、変化はない。政策2実施後の排出フローのパラメータ γ^2 が大きくなると、 $x_{12}^2(y) - x_{12}^1(y)$ は小さくなり、政策の実施が促進される。一方、 $x_{23}^3(y) - x_{23}^2(y)$ は、大きくなり、政策の実施は遅れる。 x_S^2 は、 γ^1 とは独立に定まるため、変化はない。政策3実施後の排出フローのパラメータ γ^3 が大きくなると、 $x_{23}^3(y) - x_{23}^2(y)$ は小さくなり、政策の実施が促進される。 x_S^3 , $x_{12}^2(y) - x_{12}^1(y)$ は、 γ^1 とは独立に定まるため、変化はない。

6 おわりに

本研究は、不確実性下において、経済主体は3種類の環境政策1, 2, 3を実行可能な政策選択肢として所有しており、このような代替的な環境政策の実施について考察を行なった。3種類の環境政策は、政策実施費用と排出削減量の間に関連が成り立っている。分析に際しては、経済主体の問題を最適停止問題と定式化し、主体が環境政策を実施する最適な時刻を求めた。代替的な環境政策について分析をするために、先ず、単一の環境政策についての分析を行い、次に、代替的な二つの環境政策が存在する場合について分析を行なった。これらの分析を基に、実行可能な政策選択肢として代替的な三つの環境政策が存在する場合について分析を行なった。ここでは、政策実施後の主体の期待総割引便益の値の分析を基に、政策選択の組み合わせの一つが消去され、実質的に二つの政策選択肢の組み合わせから分析を行なった。ただし、このことを直感的に示しただけであり、証明することが課題として残されている。また、主体の問題を解いて求めた、政策実施時刻を定める閾値について数値的に比較静学も実施した。

最後に、政策の組み合わせに関する証明以外で、この研究の残された課題として、汚染物質を特定化し、実際の環境政策についての評価が挙げられる。また、環境政策だけではなく、Décamps, Mariotti and Villeneuve (2006) らが行なったプロジェクトへの投資問題で、三つの代替的なプロジェクトが存在する場合の分析も挙げられる。

参考文献

- 後藤允・高嶋隆太・辻村元男 (2007), 不確実性下における代替的な環境政策の選択『ジャフィージャーナル』近刊。
- 後藤允・高嶋隆太・辻村元男 (2008), 2次形式の調整費用を考慮した代替的な環境政策について『オペレーションズ・リサーチ』近刊。
- Décamps, J.-P., T. Mariotti and S. Villeneuve (2006), "Irreversible Investment in Alternative Projects," *Economic Theory*, **28**, 425-448.
- Dixit, A. (1993), Choosing among Alternative Discrete Investment Projects under Uncertainty, *Economics Letters*, **41**, 265-268.
- Pindyck, R.S. (2000), Irreversibilities and the Timing of Environmental Policy, *Resource and Energy Economics*, **22**, 233-259.
- Pindyck, R.S. (2002), Optimal Timing Problems in Environmental Economics, *Journal of Economic Dynamics and Control*, **26**, 1677-1697.

表 1: 単一環境政策の閾値の比較静学

	$x_S^1(y)$	$x_S^2(y)$	$x_S^3(y)$
基準値	0.1494	0.2423	0.3674
r	+	+	+
α	-	-	-
q	-	-	-
μ	-	-	-
σ	+	+	+
y	-	-	-
δ	+	+	+
γ^0	+	+	+
γ^1	-	uc	uc
γ^2	uc	-	uc
γ^3	uc	uc	-
k_0	+	+	+
k_1	+	+	+
k_2	+	+	+

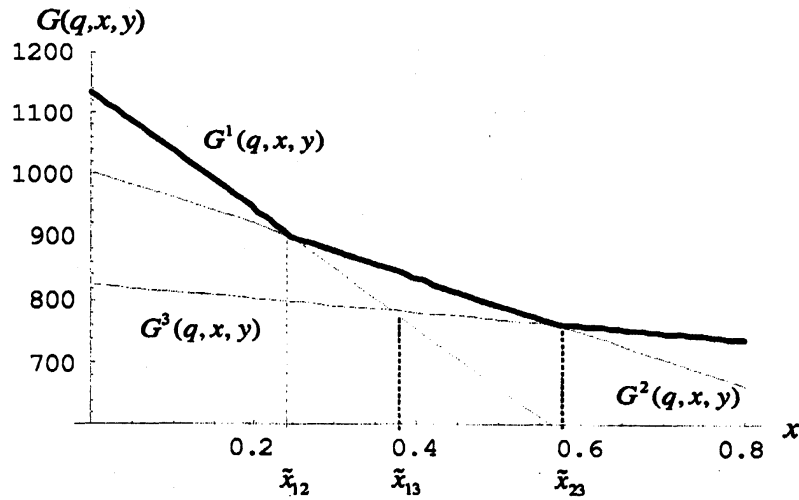
uc : 変化なし

表 2: 代替的な環境政策の閾値の比較静学

	$x_{12}^1(y)$	$x_{12}^2(y)$	$x_{23}^2(y)$	$x_{23}^3(y)$	$x_{12}^2(y) - x_{12}^1(y)$	$x_{23}^3(y) - x_{23}^2(y)$
基準値	0.2176	0.2793	0.5412	0.5965	0.0617	0.0553
r	+	+	+	+	+	+
α	-	-	-	-	-	-
q	-	-	-	-	-	-
μ	-	-	-	-	-	-
σ	-	+	-	+	+	+
y	-	-	-	-	-	-
δ	+	+	+	+	+	+
γ^0	+	+	+	+	-	-
γ^1	-	-	uc	uc	+	uc
γ^2	-	-	-	-	-	+
γ^3	uc	uc	-	-	uc	-
k_0	-	+	-	+	+	+
k_1	+	+	+	+	+	+
k_2	+	+	+	+	+	+

uc : 変化なし

図 1: $G^i(q, x, y)$ の最大値 $G(q, x, y)$



G^i は、政策 i ($i = 1, 2, 3$) の実施費用と政策が実施された後の主体の期待総割引便益の合計.

図 2: 実行可能な政策選択肢が三つ存在する時の価値関数 $V(q, x, y)$

