

ISSN 1881-6436

DISCUSSION PAPER SERIES

No. 07-01

不確実性下における代替的な環境政策の選択

後藤允・高嶋隆太・辻村元男

2007年2月

612-8577 京都市伏見区深草塚本町 67
龍谷大学経済学部

TEL: 075-642-1111 (代表)

FAX: 075-643-8510 (研究部)

不確実性下における代替的な環境政策の選択

後藤允¹・高嶋隆太²・辻村元男^{3*}

¹ 早稲田大学理工学術院

² 東京大学大学院工学系研究科

³ 龍谷大学経済学部

概要

本研究は、不確実性下における環境政策についての考察を行なう。経済主体は、経済活動によって便益を得ているが、同時に汚染物質を排出しているため、損害も被っている。そのため、政策実施費用は低い、排出削減量も小さい政策（環境政策1）と、政策実施費用は高い、排出削減量も大きい政策（環境政策2）の2種類の環境政策の実施を検討している。ただし、両方の政策を実施することは出来ない。したがって、経済主体は、汚染物質から被る損害を抑制するために、どちらの政策をいつ実施するかという問題に直面している。本研究では、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る。分析の結果、汚染物質から受ける損害に関する不確実性が大きくなるに従い、環境政策1の実施が抑制され、環境政策2が選択されることが示された。また、不確実性の大きさがある水準以上となると、環境政策1が実施されなくなり、代替的な環境政策において、主体の問題は、環境政策2のみを政策の選択肢として保有する単一の環境政策の問題に変化することが示された。

重要語: 環境政策, 最適停止, リアルオプション

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、Arrow and Fisher (1974), Henry (1974) は、環境政策の実施については、異時点間にわたる主体の意思決定であることと、政策の実施に関する不可逆性に注目した分析を行なった。その後、Dixit and Pindyck (1994) Chapter 12, Conrad (1997), Pindyck (2000, 2002), Wirl (2006a, 2006b), Lin, Ko and Yeh (2007) など、不確実性下にお

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

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研究がなされている。本研究も、これらの研究と同様に、リアルオプション・アプローチを応用し、不確実性下における環境政策について考察を行なう。

経済主体は、経済活動に伴って汚染物質を排出しているとする。そのため、経済主体は、汚染物質から損害を被っており、汚染物質の排出の削減を検討しているとする。例えば、電力・ガスといったエネルギーや工業製品などの財を生産するために、石炭や石油などの化石燃料を燃焼させることで、二酸化炭素などの温室効果ガスや硫酸化物や窒素酸化物が排出されると、その結果、引き起こされる温暖化や酸性雨による損害が発生し、損害を抑制するために、これらの物質の排出を削減することを検討しているとする。本研究では、同じ水準の経済活動から排出される汚染物質を減少させる設備などを、導入する政策について考察する。

経済主体が環境政策を検討する際に、重要なことは、複数の政策の候補の中から最適な政策を選択することである。環境省政策評価基本計画¹の6. 事前評価の実施に関する事項においても、複数の政策代替案の中からの適切な政策の選択について述べられている。また、実際の環境・エネルギー政策においても、代替政策への移行や代替シナリオの保有が考えられている。例えば、石油価格の高騰、化石燃料の枯渇、そして二酸化炭素排出の問題から、将来、原子力エネルギーや新エネルギーの供給量を増加させるエネルギー政策が考えられており²、現在の政策から社会的費用が小さい政策へ移行する意思決定ともみることが出来る。また、原子力エネルギー分野における核燃料サイクル政策においては、(i) 全量再処理、(ii) 部分再処理、(iii) 全量直接処分、(iv) 当面貯蔵といった4つの政策シナリオが考えられており、それぞれのシナリオにおいて社会的・経済的費用の評価が行なわれ、将来の状況に最適なシナリオが選択される。これは、代替政策のオプションであり、将来の不確実性と伴に、このオプション自体には経済的な価値があり、それぞれの政策の意思決定が先送りされているものと考えられる³。

したがって、本研究の目的は、不確実性下において、代替的な環境政策から、主体はどの政策を選択すればよいかを明らかにすることである。この目的のため、本研究では、環境政策が2種類存在する場合に、経済主体がどちらを選択することが最適であるかについて考察を行なう。具体的には、次のような2種類の環境政策1, 2を考える。環境政策1は、政策実施に要する費用は低いが、汚染物質の排出削減量も小さい政策である。一方、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。2種類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の内いずれか一方しか主体が実施でき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。本研究は、同様の考察を行なった先行研究 Dixit and Pindyck (1994) Chapter 12, Pindyck (2000, 2002) に従い、経済主体の問題の定式化をおこなう。経済主体は、将来にわたって、経済活動から便益を得ているが、損害も

¹環境省政策評価基本計画については、次のウェブページを参照のこと。

<http://www.env.go.jp/guide/seisaku/h18/kihon.html>

²経済産業省・資源エネルギー庁 (2006) を参照のこと。

³現在では、「エネルギーセキュリティ」、「将来の不確実性への対応能力」に優れた (i) の再処理シナリオが採用されている。

被っている。そのため、損害が大きくなれば、便益と損害の差である正味の便益が小さくなる。したがって、環境政策を実施し損害を小さくする。ただし、このときに政策実施費用がかかる。以上より、主体は、将来にわたる正味の便益、つまり、便益の期待割引現在価値と、環境政策を実施する際に要する費用の割引現在価値をあわせた、期待総割引便益を最大とするように、環境政策を実施する時刻を検討している。したがって、主体の問題を最適制止問題として定式化し、分析を行なう。次に、この分析を拡張し、経済主体は、環境政策1と2のいずれも実施可能であり、2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。単一の環境政策の場合と同様に、主体の問題を最適停止問題として定式化し分析を行なう。次に、最適な政策実施時刻を定める閾値を数値的に求める。さらに、主体の問題の定式化において、外生的に与えられたパラメータに関する比較静学を行ない、主体の環境政策の選択について考察を行なう。

分析の結果、次のようないくつかの重要な結果を得た。汚染物質から受ける損害に関する不確実性が大きくなるに従い、環境政策の実施が抑制される。代替的な環境政策においては、不確実性が大きくなるに従い、環境政策1の実施が抑制され、環境政策2が選択されるようになる。また、不確実性の大きさがある水準以上となると、環境政策1が実施されなくなり、代替的な環境政策において、主体の問題は、環境政策2のみを政策の選択肢として保有する単一の環境政策の問題に変化する。次に、現在の排出量が多くなるに従い、単一の環境政策の場合であっても、代替的な環境政策であっても、環境政策の実施が促進されることが明らかとなった。また、現在の排出量が少なくなるにしたがい、代替的な環境政策において、環境政策1が実施されなくなる。次に、政策の実施によって排出削減量が増えると、環境政策の実施が促される。代替的な環境政策の場合は、どちらか一方の削減量が増える場合を考察し、その削減量が増えるにしたがい、当該政策の実施が促進される。一方、削減量が少なくなるに従い、もう一方の政策実施が促進される。また、環境政策1の削減量が、ある量まで減少したとすると、環境政策1は実施されなくなり、代替的な環境政策において、主体の問題は、環境政策2のみを政策の選択肢として保有する単一の環境政策の問題に変化する。同様に、もし、環境政策2の削減量が、ある量まで増加すると、環境政策1は実施されなくなる。次に、ある政策の政策実施費用が大きくなると、当該政策の実施が抑制される。代替的な環境政策の場合は、当該政策の実施が抑制され、他方の政策実施が促進される。環境政策1の実施費用がある水準以降となると環境政策1は実施されなくなる。したがって、代替的な環境政策において、主体の問題は、環境政策2のみを政策の選択肢として保有する単一の環境政策の問題に変化する。環境政策2の実施費用がある水準以下となる場合も同様である。

本研究は、Dixit and Pindyck (1994) Chapter 12 や Pindyck (2000, 2002) を、Décamps, Mariotti and Villeneuve (2006) を参考に、代替的な環境政策の最適な選択問題に拡張を行なった。先に挙げた先行研究以外にも、関連研究として、単一の環境政策の実施について、主体が複数の場合について考察を行なった研究として、Barrieu and Chesney (2001), Ohyama and Tsujimura (2006a, 2006b) が挙げられる。また、本研究が考慮していない環境の激変の

影響を考慮した研究として、Baranzini, Chesney and Morisset (2003) が挙げられる。

本研究の構成は次である。次節において、環境政策として、環境政策 1, 2 の内いずれか一方しか、経済主体は実施できない場合を考察する。次に、第 3 節において、経済主体は、環境政策 1 と 2 のいずれも実施可能であり、二つの環境政策のどちらか一方を実施する場合を考察する。第 4 節において、環境政策の実施に関わる閾値を数値で示し、比較静学を行なう。最後に、第 5 節にて、本研究をまとめる。

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る。したがって、汚染物質の排出を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。ただし、環境政策としては 2 種類の政策を考察する。環境政策 1 は、政策実施に要する費用は低いが汚染物質の排出削減量も小さい政策である。一方、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大きい政策である。主体は、これら二つの政策のうちどちらを実施するのが最適なのかについて検討している。主体の問題を考察するために、本節では、環境政策として、環境政策 1, 2 の内いずれか一方しか主体が実施できない場合を考察する。同様の考察として、Dixit and Pindyck (1994) Chapter 12 や Pindyck (2000, 2002) が先行研究としてあげられる。本節はこれら先行研究に従い、問題の定式化を行なう。

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 $P_t Q_t$ を得ているとする。 P_t は経済活動の水準を金額に変換するパラメータ。 Q_t が財の生産量だとすると P_t は財の価格に対応する。経済活動の水準 Q_t の過程 $Q = \{Q_t\}_{t \geq 0}$ は、次の微分方程式に従っているとする。

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

ただし、 $\alpha > 0$ とする。また、 P_t は簡単化のため一定とする。 $p \equiv P_t$ 。経済活動に伴って排出される汚染物質のフローを E_t とし、経済活動のある一定割合で汚染物質が排出されるとする。 $E_t = \gamma Q_t^4$ 。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 $Y = \{Y_t\}_{t \geq 0}$ は、次の微分方程式に従っているとする。

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

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

⁴ 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。

が実施されていない状態を表わす。環境政策 i ($i = 1, 2$) 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 1 より 2 の方が削減量が大きいため、 $\gamma^0 > \gamma^1 > \gamma^2$ という関係が成り立つ。環境政策の実施を考慮した汚染物質のストック過程 Y の振る舞いは、次となる。

$$dY_t = \begin{cases} dY_t^0 = (\gamma^0 Q_t - \delta Y_t^0) dt, & t < \tau_S^1 \text{ or } \tau_S^2, \\ dY_t^1 = (\gamma^1 Q_t - \delta Y_t^1) dt, & t \geq \tau_S^1, \\ dY_t^2 = (\gamma^2 Q_t - \delta Y_t^2) dt, & t \geq \tau_S^2. \end{cases} \quad (2.3)$$

ただし、 $\tau_S^i \in \mathcal{T}$ ($i = 1, 2$) 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。時刻 t において、汚染物質のストックから被る損害を、 $X_t Y_t$ 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パラメータであり、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 $X = \{X_t\}_{t \geq 0}$ は、次の確率微分方程式に従っているとする。

$$dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t dW_t, \quad X_0 = x. \quad (2.4)$$

ただし、 $\mu > 0$, $\sigma > 0$ は定数とし、 W_t は通常条件⁵を満たすフィルター付き確率空間 $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P}, \{\mathcal{F}_t\}_{t \geq 0})$ 上に定義される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、次で与えられる便益関数 $B(Q_t, X_t, Y_t)$ によって表わされる。

$$B(Q_t, X_t, Y_t) = pQ_t - X_t Y_t. \quad (2.5)$$

(2.5) は、環境政策の実施状態 i によって汚染物質の排出量が増えることを考慮すると、次のようになる。

$$B(Q_t, X_t, Y_t) = \begin{cases} B^0(Q_t, X_t, Y_t^1) = pQ_t - X_t Y_t^0, & t < \tau_S^1 \text{ or } \tau_S^2, \\ B^1(Q_t, X_t, Y_t^1) = pQ_t - X_t Y_t^1, & t \geq \tau_S^1, \\ B^2(Q_t, X_t, Y_t^1) = pQ_t - X_t Y_t^2, & t \geq \tau_S^2. \end{cases} \quad (2.6)$$

環境政策 i を実施するために必要な費用を、 K^i とする。環境政策 1 の方が、環境政策 2 よりも費用が低く、 $K^1 < K^2$ 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、次で与えられる。

$$J^i(q, x, y; \tau_S^i) = \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-rt} B(Q_t, X_t, Y_t) dt - e^{-r\tau_S^i} K^i \right]. \quad (2.7)$$

ただし、 $r > 0$ は割引率を表わす。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。

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

⁵例えば、Karatzas and Shreve (1991) を参照されたい。

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。

$$V^i(q, x, y) = \sup_{\tau^i \in \mathcal{T}} J^i(q, x, y; \tau^i) = J^i(q, x, y; \tau_S^{i*}). \quad (2.8)$$

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

主体の問題 (2.8) は、最適停止問題として定式化されており、以下、主体の問題を最適停止問題として考察する。

まず、(2.7) を次のように書き直す。

$$\begin{aligned} J^i(q, x, y; \tau_S^i) &= \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-rt} B(Q_t, X_t, Y_t) dt - e^{-r\tau_S^i} K^i \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\int_0^{\tau_S^i} e^{-rt} B^0(Q_t, X_t, Y_t^0) dt \right. \\ &\quad \left. + e^{-r\tau_S^i} \left(\int_{\tau_S^i}^\infty e^{-r(t-\tau_S^i)} B^i(Q_t, X_t, Y_t^i) dt - K^i \right) \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\int_0^{\tau_S^i} e^{-rt} B^0(Q_t, X_t, Y_t^0) dt + e^{-r\tau_S^i} G^i(Q_{\tau_S^i}, X_{\tau_S^i}, Y_{\tau_S^i}^i) \right]. \end{aligned} \quad (2.9)$$

ただし、

$$G^i(Q_t, X_t, Y_t^i) = \int_t^\infty e^{-r(s-t)} B^i(Q_s, X_s, Y_s^i) ds - K^i. \quad (2.10)$$

主体は環境政策 i の実施について、経済活動から被る損害を抑制すべくシフトパラメータを観察している。したがって、主体が環境政策 i を実施しない領域（続行領域） H_S^i は、

$$H_S^i = \{x > 0; V^i(q, x, y) > G^i(q, x, y)\} \quad (2.11)$$

となり、環境政策 i の実施時刻 τ_S^i は、次のように与えられる。

$$\tau_S^i = \inf\{t > 0; x \notin H_S^i\}. \quad (2.12)$$

最適停止問題は、変分不等式を用いて解くことができる。例えば、Hu and Øksendal (1998), Dupuis and Wang (2002), Øksendal (2003)などを参照のこと。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。

$$\mathcal{L}V^i(q, x, y) + B^0(q, x, y) \leq 0, \quad (2.13)$$

$$V^i(q, x, y) \geq G^i(q, x, y), \quad (2.14)$$

$$[\mathcal{L}V^i(q, x, y) + B^0(q, x, y)][V^i(q, x, y) - G^i(q, x, y)] = 0. \quad (2.15)$$

ただし、 \mathcal{L} は次で与えられる偏微分作用素である。

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\sigma^2 x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \mu x \frac{\partial}{\partial x} + (\gamma^i q - \delta y) \frac{\partial}{\partial y} + \alpha q \frac{\partial}{\partial q} - r. \quad (2.16)$$

(2.13)–(2.15) は、次と書き直せる。

$$\max[\mathcal{L}V^i(q, x, y) + B^0(q, x, y), G^i(q, x, y) - V^i(q, x, y)] = 0. \quad (2.17)$$

価値関数 $V^i(q, x, y)$ の候補関数を $\phi^i(q, x, y)$ とする。 $\phi^i(q, x, y)$ が (2.13)–(2.15) の変分不等式の解であるとする、Verification Theorem⁶ より、候補関数が価値関数と一致し、最適な停止時刻 τ^{i*} が求まる。興味のある読者は、Hu and Øksendal (1998), Dupuis and Wang (2002), Øksendal (2003)などを参照のこと。

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、シフトパラメータの水準が x_S^i 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 の定義 (2.12) は、次となる。

$$\tau_S^i = \inf\{t > 0; x \geq x_S^i\}. \quad (2.18)$$

変分不等式より、 $x < x_S^i$ においては、次が成り立つ。

$$\mathcal{L}\phi^i(q, x, y) + B^0(q, x, y) = 0 \quad (2.19)$$

(2.19) 式の解は、次のように求まる。

$$\phi^i(q, x, y) = C_{S1}^i x^{\beta_1} + C_{S2}^i x^{\beta_2} + \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^0 q}{\rho_1 \rho_2}. \quad (2.20)$$

ただし、 C_{S1}^i, C_{S2}^i は未知定数。 β_1, β_2 は、特性方程式

$$\frac{1}{2}\sigma^2 \beta(\beta - 1) + \mu\beta - r = 0 \quad (2.21)$$

の解で、それぞれ次と求まる。

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} > 1, \\ \beta_2 &= \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} < 0. \end{aligned} \quad (2.22)$$

(2.20) の右辺第 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る。

$$\begin{aligned} & \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-rt} (pQ_t - X_t Y_t^i) dt \right] \\ &= \int_0^\infty e^{-rt} p q e^{\alpha t} dt - \int_0^\infty e^{-rt} x e^{\mu t} \left(e^{-\delta t} \left(y - \frac{\gamma^i q}{\alpha + \delta} \right) + e^{\alpha t} \frac{\gamma^i q}{\alpha + \delta} \right) dt \\ &= \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{r - \mu + \delta} - \frac{x\gamma^i q}{(r - \mu + \delta)(r - \mu - \alpha)} \\ &= \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^i q}{\rho_1 \rho_2} \end{aligned} \quad (2.23)$$

⁶Verification Theorem の詳細については、例えば、Øksendal (2003) Theorem 10.4.1 を参照のこと。

ただし, $\rho_1 = r - \mu + \delta$, $\rho_2 = r - \mu - \alpha$ である. また, シフトパラメータ X_t の値がゼロの時, 汚染物質から被る損害もゼロとなるため, 主体の問題の境界条件として, 次を得る.

$$\phi^i(q, 0, y) = \frac{pq}{r - \alpha} \quad (2.24)$$

(2.20) が発散しないために, $C_{S2}^i = 0$ とおく. したがって, (2.20) は次となる.

$$\phi^i(q, x, y) = C_{S1}^i x^{\beta_1} + \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^0 q}{\rho_1 \rho_2}. \quad (2.25)$$

(2.25) 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. この価値をいわゆるリアルオプション価値と呼ぶ. 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 と x_S^i である. これらは, value-matching 条件と smooth-pasting 条件として知られている次の条件⁷によって求まる.

$$\phi^i(q, x_S^i, y) = G^i(q, x_S^i, y), \quad (2.26)$$

$$\phi_x^i(q, x_S^i, y) = G_x^i(q, x_S^i, y). \quad (2.27)$$

ただし, (2.10), (2.23) より, $G^i(q, x, y)$ は次となる.

$$G^i(q, x, y) = \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^i q}{\rho_1 \rho_2} - K^i. \quad (2.28)$$

(2.25)-(2.28) より, 環境政策 i に対する閾値 x_S^i と未知定数 C_{S1}^i は, 次と求まる.

$$x_S^i = \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{(\gamma^0 - \gamma^i)q} \right) \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \right) K^i, \quad (2.29)$$

$$C_{S1}^i = \left(\frac{(\gamma^0 - \gamma^i)q}{\rho_1 \rho_2 \beta_1} \right)^{\beta_1} \left(\frac{K^i}{\beta_1 - 1} \right)^{1-\beta_1}. \quad (2.30)$$

(2.29) と求まった x_S^i を用い, (2.18) で定義される政策実施時刻 τ_S^i が, 最適な政策実施時刻 τ_S^{i*} であることを示すためには, 候補関数 ϕ^i が, 変分不等式 (2.13)-(2.15) を, 満たすことを確かめなければならない. このことについては, Hu and Øksendal (1998), Dupuis and Wang (2002) Proposition 1 を参照のこと.

3 代替環境政策

本節では, 経済主体は, 環境政策 1 と 2 のいずれも実施可能であり, 二つの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, 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.

⁷これらの条件の詳細については, 例えば, Dixit and Pindyck (1994) を参照されたい.

二つの環境政策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_A は、次のように与えられる。

$$\tau_A = \min [\tau_A^1, \tau_A^2]. \quad (3.1)$$

ただし、 τ_A^i ($i = 1, 2$) は、2つの環境政策が与えられているときに、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) から次のように与えられる。

$$\begin{aligned} J(q, x, y; \tau_A) &= \mathbb{E} \left[\int_0^{\tau_A^1 \wedge \tau_A^2} e^{-rt} B^0(Q_t, X_t, Y_t^0) dt \right. \\ &\quad + \mathbf{1}_{\{\tau_A^1 \leq \tau_A^2\}} e^{-r\tau_A^1} \left(\int_{\tau_A^1}^{\infty} e^{-r(t-\tau_A^1)} B^1(Q_t, X_t, Y_t^1) dt - K^1 \right) \\ &\quad + \mathbf{1}_{\{\tau_A^1 > \tau_A^2\}} e^{-r\tau_A^2} \left(\int_{\tau_A^2}^{\infty} e^{-r(t-\tau_A^2)} B^2(Q_t, X_t, Y_t^2) dt - K^2 \right) \\ &= \mathbb{E} \left[\int_0^{\tau_A^1 \wedge \tau_A^2} e^{-rt} B^0(Q_t, X_t, Y_t^0) dt \right. \\ &\quad \left. + \mathbf{1}_{\{\tau_A^1 \leq \tau_A^2\}} e^{-r\tau_A^1} G^1(Q_{\tau_A^1}, X_{\tau_A^1}, Y_{\tau_A^1}^1) + \mathbf{1}_{\{\tau_A^1 > \tau_A^2\}} e^{-r\tau_A^2} G^2(Q_{\tau_A^2}, X_{\tau_A^2}, Y_{\tau_A^2}^2) \right]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

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、二つの環境政策のうち一方の環境政策を実施する時刻 τ_A を選択する問題となる。

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

主体が環境政策を実施しない続行領域 H_A は、(2.11) より、次となる。

$$H_A = \{x > 0; V(q, x, y) > \max[G^1(q, x, y), G^2(q, x, y)]\}. \quad (3.4)$$

したがって、政策実施時刻 τ_A は、次のように与えられる。

$$\tau_A = \inf\{t > 0; x \notin H_A\}. \quad (3.5)$$

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。

$$\mathcal{L}V(q, x, y) + B^0(q, x, y) \leq 0, \quad (3.6)$$

$$V(q, x, y) \geq \max[G^1(q, x, y), G^2(q, x, y)], \quad (3.7)$$

$$[\mathcal{L}V(q, x, y) + B^0(q, x, y)] [V(q, x, y) - \max[G^1(q, x, y), G^2(q, x, y)]] = 0. \quad (3.8)$$

(3.6)-(3.8) は、次のように書き直せる。

$$\max[\mathcal{L}V(q, x, y) + B^0(q, x, y), G^1(q, x, y) - V(q, x, y), G^2(q, x, y) - V(q, x, y)] = 0 \quad (3.9)$$

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、シフトパラメータの水準が x_S^i 以上になれば、主体は環境政策 i を実施した。その結果、(2.29) より、環境政策 1 の実施を定めるシフトパラメータの閾値 x_S^1 の値は、環境政策 2 のシフトパラメータの閾値 x_S^2 の値より小さいことがわかった: $x_S^1 < x_S^2$ 。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、シフトパラメータの値が x_S^1 より大きい時: $x > x_S^1$ でも、環境政策 1 と 2 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_A^1, x_A^2) とする。つまり、主体は、 $x < x_S^1$ においては、環境政策を実施していない。 $x_S^1 \leq x \leq x_A^1$ においては、環境政策 1 を実施している。 $x_A^1 < x < x_A^2$ においては、環境政策を実施していない。 $x \geq x_A^2$ においては、環境政策 2 を実施している。シフトパラメータ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_A^1 は、次で与えられる。

$$\tau_A^1 = \inf\{t > 0; x_S^1 \leq x \leq x_A^1\}. \quad (3.10)$$

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_A^2 は、次で与えられる。

$$\tau_A^2 = \inf\{t > 0; x \geq x_A^2\}. \quad (3.11)$$

(3.4) で、与えられる環境政策が実施されない領域 H_A は、次となる。

$$H_A = \{x; x < x_S^1, x_A^1 < x < x_A^2\}. \quad (3.12)$$

変分不等式より、環境政策が実施されない領域 H_A においては、次が成り立つ。

$$\frac{1}{2}\sigma^2 x^2 \phi_{xx} + \mu x \phi_x + (\gamma^0 q - \delta y) \phi_y + \alpha q \phi_q - r \phi + B^0 = 0 \quad (3.13)$$

$x < x_S^1$ における解は、 x が x_S^1 に到達すれば、環境政策 1 を実施することから、(2.25) となる。一方、 $x_A^1 < x < x_A^2$ における解は、 x が x_A^1 に到達すれば、環境政策 1 を実施し、 x_A^2 に到達すれば環境政策 2 を実施することから、

$$\phi(q, x, y) = C_{A1} x^{\beta_1} + C_{A2} x^{\beta_2} + \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^0 q}{\rho_1 \rho_2} \quad (3.14)$$

となる。したがって、候補関数 ϕ は x の水準によって、次のように場合分けされる。

$$\phi(q, x, y) = \begin{cases} C_{S1}^1 x^{\beta_1} + \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^0 q}{\rho_1 \rho_2}, & x < x_S^1, \\ \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^1 q}{\rho_1 \rho_2} - K^1, & x_S^1 \leq x \leq x_A^1, \\ C_{A1} x^{\beta_1} + C_{A2} x^{\beta_2} + \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^0 q}{\rho_1 \rho_2}, & x_A^1 < x < x_A^2, \\ \frac{pq}{r - \alpha} - \frac{xy}{\rho_1} - \frac{x\gamma^2 q}{\rho_1 \rho_2} - K^2, & x \geq x_A^2. \end{cases} \quad (3.15)$$

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_{A1} , C_{A2} , x_A^1 , x_A^2 である。これらは次の条件をもちいることで求まる。

$$\phi(q, x_A^1, y) = G^1(q, x_A^1, y). \quad (3.16)$$

$$\phi(q, x_A^2, y) = G^2(q, x_A^2, y). \quad (3.17)$$

$$\phi_x(q, x_A^1, y) = G_x^1(q, x_A^1, y). \quad (3.18)$$

$$\phi_x(q, x_A^2, y) = G_x^2(q, x_A^2, y). \quad (3.19)$$

ただし、本節の問題については、解析的な解を求めることは出来ないので、次節にて数値的にこれらの値を求める。

4 数値計算と比較静学

本節では、代替的な環境政策の実施に関わる閾値 x_A^1, x_A^2 を求める (3.16)-(3.19) を数値的に解き、閾値を求める。数値計算においては、Press et al. (1992) Chapter 9 を参考に、非線形連立方程式の数値解法である Newton-Raphson 法を拡張したアルゴリズムにより、四つの非線型連立方程式を解く。また、代替的な環境政策の特徴を明らかとするために、単一な環境政策の実施に関わる閾値 x_S^1, x_S^2 についても、値を求める。さらに、モデルに与えられた外生的なパラメータを変化させることで比較静学を実施し、経済学的な含意を明らかにする。比較静学に際しては、パラメータを次の4種類に分類する。経済環境パラメータ: r, α, q, δ 。シフト変数パラメータ: μ, σ 。排出フローパラメータ: γ^i ($i = 0, 1, 2$)。環境政策実施費用パラメータ: K^i ($i = 1, 2$)。

数値計算に使用する基準となるパラメータ値は次である: $r = 0.05, \alpha = 0.01, q = 5, p = 10, \mu = 0.01, \sigma = 0.2, y = 0.1, \delta = 0.01, \gamma^0 = 0.05, \gamma^1 = 0.03, \gamma^2 = 0.02, K^1 = 100, K^2 = 300$ 。これらの基準パラメータ値を使い、各政策の価値関数を図1に示した。また、基準パラメータ値を用いた時の閾値の値は、それぞれ、 $x_S^1 = 3.263, x_S^2 = 6.526, x_A^1 = 4.906, x_A^2 = 7.181$ となる。以下、閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と、各パラメータとの関係について考察する。

4.1 経済環境パラメータ

割引率 r との関係を示した。図2に示した。 r が大きいということは、汚染物質から被る損害の現在価値が小さくなる。したがって、単一環境政策の場合の閾値 x_S^1, x_S^2 は、大きくなり、環境政策の実施が抑制される。一方、代替的な環境政策においても、閾値 x_A^1, x_A^2 は大きくなっている。(3.12) より、代替的な環境政策において、環境政策が実施されない領域 H_A が、大きくなっており、両環境政策の実施が抑制される。ここで、(3.10) より、代替的な環境政策において、環境政策1が実施されるシフトパラメータの領域 $[x_S^1, x_A^1]$ は、 r が大きくなるに従い、大きくなっている。したがって、 r が大きくなるに従い、環境政策2と比べ環境政策1の実施機会が増えている。一方、 r を小さくし、 $r = 0.0344$ となったとき、 $x_A^1 = x_S^1, x_A^2 = x_S^2$ となる。 $r \leq 0.0344$ において、(3.10) より、環境政策1が実施されることは無くな

る。また、環境政策2の実施については、このとき、代替的な環境政策の問題から、単一な環境政策の問題に、主体の問題が変化している。

経済活動水準の期待成長率 α との関係を示した。図3に示した。 α が大きいということは、汚染物質から被る損害の現在価値が大きくなる。したがって、単一環境政策の場合の閾値 x_S^1, x_S^2 は、小さくなり、環境政策の実施が促進される。一方、代替的な環境政策においても、閾値 x_A^1, x_A^2 は小さくなっている。(3.10)より、代替的な環境政策において、環境政策1が実施されるシフトパラメータの領域 $[x_S^1, x_A^1]$ は、 α が大きくなるに従い、小さくなり、環境政策1の実施が抑制される。また、代替的な環境政策において、環境政策が実施されない領域 H_A も小さくなっている。したがって、環境政策2の実施が促進される。更に α を大きくすると $\alpha = 0.04$ で、仮定 (AS.1) を満たさなくなる。

経済活動水準の初期値 q との関係を示した。図4に示した。 q が大きいということは、汚染物質から被る損害も大きいことを意味する。したがって、 q が大きくなるに従い、単一環境政策の場合の閾値 x_S^1, x_S^2 は、ともに小さくなり、環境政策の実施が促進される。一方、代替的な環境政策においても、閾値 x_A^1, x_A^2 は小さくなっている。代替的な環境政策において、環境政策1が実施されるシフトパラメータの領域 $[x_S^1, x_A^1]$ と、環境政策が実施されない領域 H_A は、 α と同様に q が大きくなるに従い、小さくなっている。したがって、環境政策1の実施が抑制され、環境政策2の実施が促進される。

汚染物質の自然浄化率 δ との関係を示した。図5に示した。 δ が大きいということは、汚染物質から被る損害の現在価値が小さいことを意味する。したがって、 δ が大きくなるに従い、単一環境政策の場合の閾値 x_S^1, x_S^2 は、ともに大きくなり、環境政策の実施が抑制される。一方、代替的な環境政策においても、閾値 x_A^1, x_A^2 は大きくなっている。代替的な環境政策において、環境政策が実施されない領域 H_A は、 δ が大きくなるに従い、大きくなっており、環境政策の実施が抑制される。ここで、 δ が大きくなるに従い、環境政策1が実施されるシフトパラメータの領域 $[x_S^1, x_A^1]$ が、大きくなっていることから、環境政策2と比べ環境政策1の実施機会が増している。

4.2 シフト変数パラメータ

シフトパラメータの期待成長率 μ との関係を示した。図6に示した。 μ が大きいということは、汚染物質から被る損害の現在価値が大きいかを意味する。したがって、 μ が大きくなるに従い、単一環境政策の場合の閾値 x_S^1, x_S^2 は、ともに小さくなり、環境政策の実施が促進される。一方、代替的な環境政策においても、閾値 x_A^1, x_A^2 は小さくなっている。代替的な環境政策において、環境政策1が実施されるシフトパラメータの領域 $[x_S^1, x_A^1]$ は、 μ が大きくなるに従い、小さくなっている。環境政策が実施されない領域 H_A において、領域 $(0, x_S^1)$ は、 μ が大きくなるに従い、小さくなっている。一方、領域 (x_A^1, x_A^2) は、図7にあるように、 μ が、 μ が大きくなるに従い、ほぼ小さくなっているが、 μ が 0.02 に近いところでは、逆に大きくなっている。したがって、 μ の H_A に対する影響については定かではない。しかし、全体としては、環境政策1の実施が抑制され、環境政策2の実施が促進される、という相対関

係が読み取られる。 μ を大きくし、 $\mu = 0.0198$ となったとき、 $x_A^1 = x_S^1$ 、 $x_A^2 = x_S^2$ となる。 $\mu \geq 0.0198$ において、 環境政策 1 が実施されることは無くなる。 また、 環境政策 2 の実施については、 このとき、 代替的な環境政策の問題から、 単一な環境政策の問題に、 主体の問題が変化している。

シフトパラメータのボラティリティ σ との関係を、 図 8 に示した。 σ が大きいということは、 汚染物質から被る損害に関する不確実性が大きいことを意味する。 したがって、 σ が大きくなるに従い、 政策実施を待ち損害に関する情報を得ようとする誘因が強まる。 したがって、 単一環境政策の場合の閾値 x_S^1 、 x_S^2 は、 大きくなり、 環境政策の実施が抑制される。 一方、 代替的な環境政策においては、 閾値 x_A^1 は小さくなり、 x_A^2 は大きくなっている。 代替的な環境政策において、 環境政策 1 が実施されるシフトパラメータの領域 $[x_S^1, x_A^1]$ は、 σ が大きくなるに従い、 小さくなっている。 環境政策が実施されない領域 H_A は、 σ が大きくなるに従い、 大きくなっている。 したがって、 環境政策の実施が抑制される。 σ を大きくし、 $\sigma = 0.271$ となったとき、 $x_A^1 = x_S^1$ 、 $x_A^2 = x_S^2$ となる。 $\sigma \geq 0.271$ において、 環境政策 1 が実施されることは無くなる。 また、 環境政策 2 の実施については、 このとき、 代替的な環境政策の問題から、 単一な環境政策の問題に、 主体の問題が変化している。

4.3 排出フローパラメータ

排出フローパラメータ γ^0 との関係を、 図 9 に示した。 γ^0 は、 環境政策が実施されていないときの排出フローパラメータである。 γ^0 が大きいということは、 汚染物質の排出フローが大きく、 汚染物質から被る損害も大きいことを意味する。 したがって、 単一環境政策の場合の閾値 x_S^1 、 x_S^2 はともに小さくなり、 環境政策の実施が促進される。 一方、 代替的な環境政策においては、 x_A^2 は小さくなっているが、 x_A^1 は大きくなっている。 代替的な環境政策において、 γ^0 が大きくなるに従い、 環境政策 1 が実施されるシフトパラメータの領域 $[x_S^1, x_A^1]$ は、 大きくなっていることや、 環境政策が実施されない領域 H_A が、 小さくなっていることにより、 環境政策の実施が促進される。 γ^0 を大きくしていくと、 やがて x_A^1 と x_A^2 が一致し: $\lim_{\gamma^0 \rightarrow \infty} (x_A^2 - x_A^1) = 0$ 、 図 1 より、 閾値は、 $\tilde{x} = x_A^1 = x_A^2$ となる。 ただし、 \tilde{x} は、 $G^1(q, x, y) = G^2(q, x, y)$ となる x の値である。 基準パラメータを使うと、 $\tilde{x} = 6$ となる。 逆に、 γ^0 の小さい範囲について考察する。 $\gamma^0 = 0.0452$ において、 $x_A^1 = x_S^1$ 、 $x_A^2 = x_S^2$ となる。 したがって、 $\gamma^0 \leq 0.0452$ において、 環境政策 1 が実施されることは無くなる。 また、 環境政策 2 の実施については、 代替的な環境政策の問題から、 単一な環境政策 2 の問題に、 主体の問題が変化している。

次に、 排出フローパラメータ γ^1 との関係を考察する。 この関係を、 図 10 に示した。 γ^1 は、 環境政策 1 が実施された後の排出フローパラメータである。 γ^1 が大きいということは、 環境政策 1 を実施したとしても、 排出フロー削減量が小さいことを意味する。 したがって、 単一環境政策の場合の閾値 x_S^1 は大きくなり、 環境政策 1 の実施が抑制される。 一方、 代替的な環境政策の場合、 γ^1 が大きくなるに従い、 領域 $[x_S^1, x_A^1]$ の大きさが小さくなっている。 したがって、 環境政策 1 の実施が抑制される。 また、 環境政策 1 の実施が抑制されることに

より、環境政策が実施されない領域 H_A が大きくなっている。ただし、 γ^1 が大きくなるに従い、 x_A^2 は小さくなっていることから、環境政策 2 の実施は促進される。 γ^1 を大きくしていき、 $\gamma^1 = 0.0319$ となったとき、 $x_A^1 = x_S^1$ 、 $x_A^2 = x_S^2$ となる。 $\gamma^1 \geq 0.0319$ において、環境政策 1 が実施されることは無くなる。また、環境政策 2 の実施については、このとき、代替的な環境政策の問題から、単一な環境政策の問題に、主体の問題が変化している。

次に、排出フローパラメータ γ^2 との関係を検討する。この関係を、図 11 に示した。 γ^2 は、環境政策 2 が実施された後の排出フローパラメータである。 γ^1 と同様に、 γ^2 が大きいということは、環境政策 2 を実施したとしても、排出フロー削減量が小さいことを意味する。したがって、単一環境政策の場合の閾値 x_S^2 は大きくなり、環境政策 2 の実施が抑制される。一方、代替的な環境政策の場合、 γ^2 が大きくなるに従い、領域 $[x_S^1, x_A^1]$ が大きくなっている。したがって、環境政策 1 の実施が促進される。また、環境政策 2 の実施の抑制と比べ、環境政策 1 の実施の促進の影響が相対的に大きいことから、 γ^2 が大きくなるに従い、環境政策が実施されない領域 H_A の (x_A^1, x_A^2) が小さくなっている。一方、 γ^2 を小さくしていくと、 $\gamma^2 = 0.0169$ となったとき、 $x_A^1 = x_S^1$ 、 $x_A^2 = x_S^2$ となる。 $\gamma^2 \leq 0.0169$ において、環境政策 1 が実施されることは無くなる。また、環境政策 2 の実施については、このとき、代替的な環境政策の問題から、単一な環境政策の問題に、主体の問題が変化している。

4.4 環境政策実施費用パラメータ

環境政策 1 の実施費用 K^1 との関係を検討する。この関係を、図 12 に示した。環境政策 1 の実施費用 K^1 が大きくなるに従い、単一環境政策の場合の閾値 x_S^1 は大きくなり、環境政策 1 の実施が抑制される。一方、代替的な環境政策の場合、 K^1 が大きくなるに従い、領域 $[x_S^1, x_A^1]$ が小さくなる。したがって、環境政策 1 の実施が抑制される。環境政策が実施されない領域 H_A の (x_A^1, x_A^2) について、図 13 に示したように、 K^1 との関係が一定ではない。 K^1 の小さい領域では、環境政策 1 の実施が促進され、相対的に、環境政策 2 の実施が抑制される。このとき、環境政策 2 に関する影響の方が大きく (x_A^1, x_A^2) が大きくなる。一方、 K^1 の大きい領域では、環境政策 1 の実施が抑制され、相対的に、環境政策 2 の実施が促進される。このとき、環境政策 1 に関する影響の方が大きく、 (x_A^1, x_A^2) が大きくなる。 K^1 を大きくしていき、 $K^1 = 124$ となったとき、 $x_A^1 = x_S^1$ 、 $x_A^2 = x_S^2$ となる。このとき、代替的な環境政策の問題から、単一な環境政策の問題に、主体の問題が変化している。

次に、環境政策 2 の実施費用 K^2 との関係を検討する。この関係を、図 14 に示した。環境政策 2 の実施費用 K^2 が大きくなるに従い、単一環境政策の場合の閾値 x_S^2 は大きくなり、環境政策 2 の実施が抑制される。一方、代替的な環境政策の場合、 K^2 が大きくなるに従い、領域 $[x_S^1, x_A^1]$ が大きくなる。したがって、環境政策 1 の実施が促進される。また、環境政策 2 の実施の抑制の影響の方が、環境政策 1 の実施の促進の影響よりも相対的に強いことから、 K^2 が大きくなるに従い、環境政策が実施されない領域 H_A の (x_A^1, x_A^2) が大きくなっている。 K^2 を小さくしていき、 $K^2 = 242$ となったとき、 $x_A^1 = x_S^1$ 、 $x_A^2 = x_S^2$ となる。 $K^2 \leq 242$ において、環境政策 1 が実施されることは無くなる。また、環境政策 2 の実施については、このと

き、代替的な環境政策の問題から、単一な環境政策の問題に、主体の問題が変化している。

5 まとめ

本研究は、不確実性下において、経済主体は2種類の環境政策を実施することが可能であり、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。2種類の環境政策は、政策実施費用は低いが、排出削減量も小さい環境政策1と、政策実施費用は高いが、排出削減量も大きい環境政策2である。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、第2節において、単一の環境政策についての分析を行なった。次に、第3節において、代替的な環境政策について分析を行なった。次いで、第4節において、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を実施し、経済学的な含意を明らかとした。

本研究の興味ある拡張として、以下の研究が挙げられる。Dixit and Pindyck (1994) Chapter 12 や Pindyck (2000, 2002) を、経済主体が2主体存在し、各主体が同じ単一の環境政策の実施を検討している場合を考察した研究として、Barrieu and Chesney (2001), Ohyama and Tsujimura (2006a, 2006b) が挙げられる。これらの研究を参考とした、2主体がそれぞれ2つの政策選択肢を持つ場合の研究。Baranzini, Chesney and Morisset (2003) を参考とした、環境の激変に影響を考慮した研究。また、エネルギー政策においても、代替政策への移行や代替シナリオの保有が考えられており、Gollier et al. (2005) を参考とした、エネルギー政策に関する研究。これらの研究を、将来の研究課題として残す。

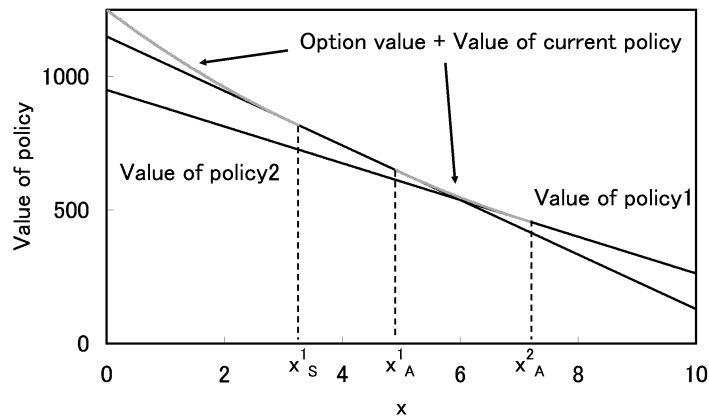


図 1: 各政策における価値関数

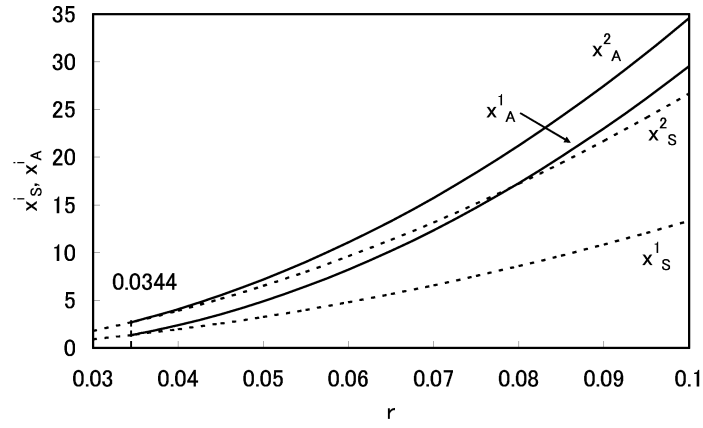


図 2: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と割引率 r の関係

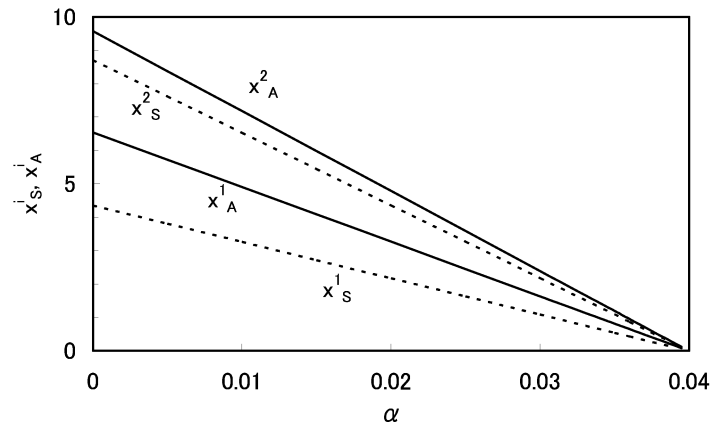


図 3: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と経済活動水準の期待成長率 α の関係

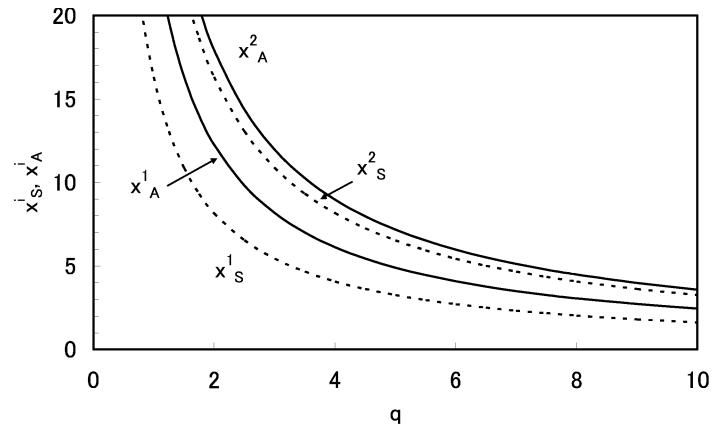


図 4: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と経済活動水準の初期値 q の関係

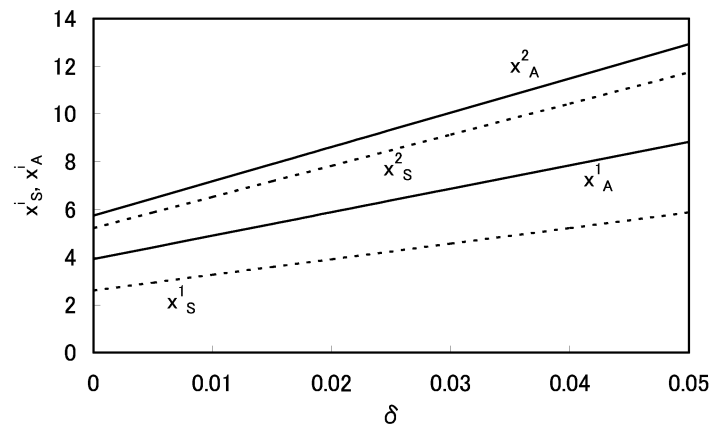


図 5: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と自然浄化率 δ の関係

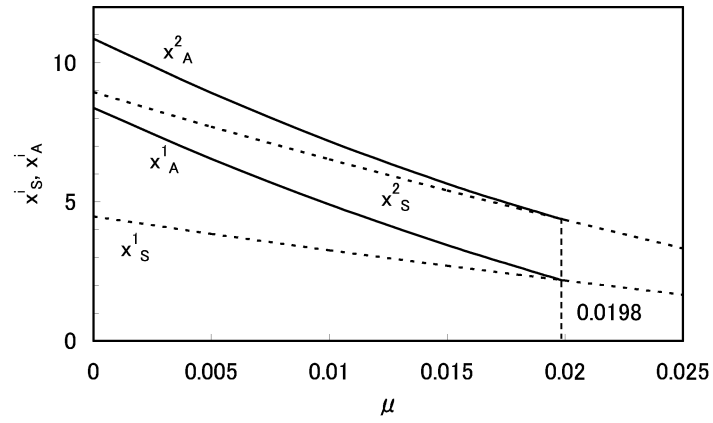


図 6: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ とシフトパラメータの期待成長率 μ の関係

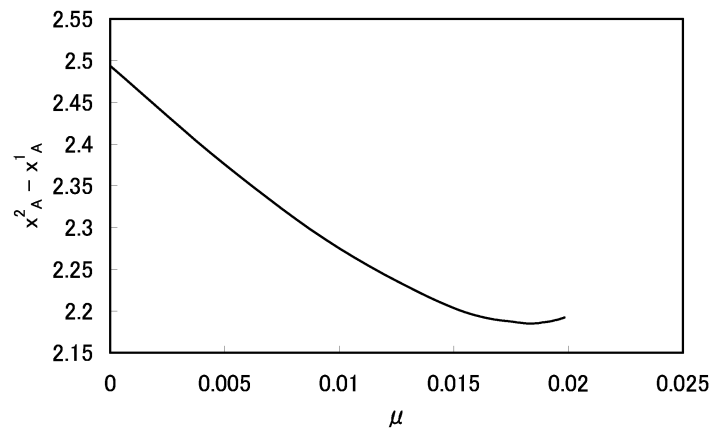


図 7: 閾値の差 $x_A^2 - x_A^1$ とシフトパラメータの期待成長率 μ の関係

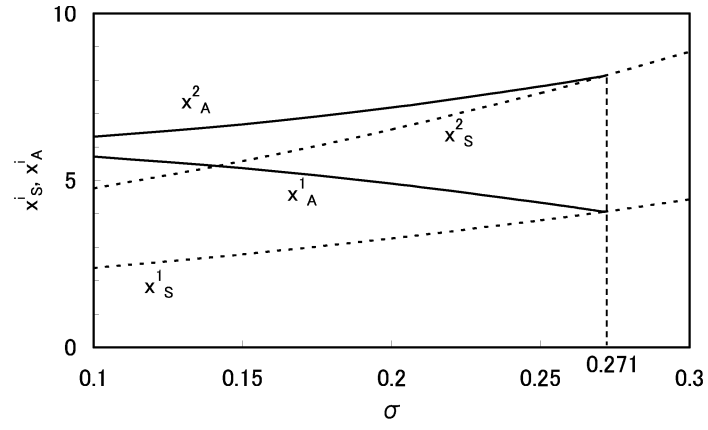


図 8: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ とシフトパラメータのボラティリティ σ の関係

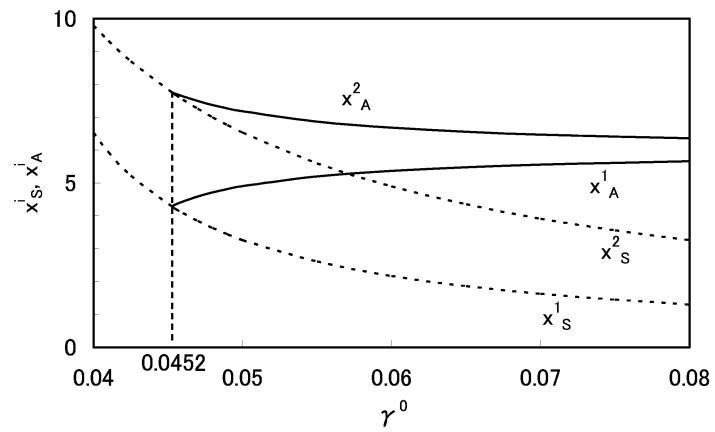


図 9: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と排出フローパラメータ γ^0 の関係

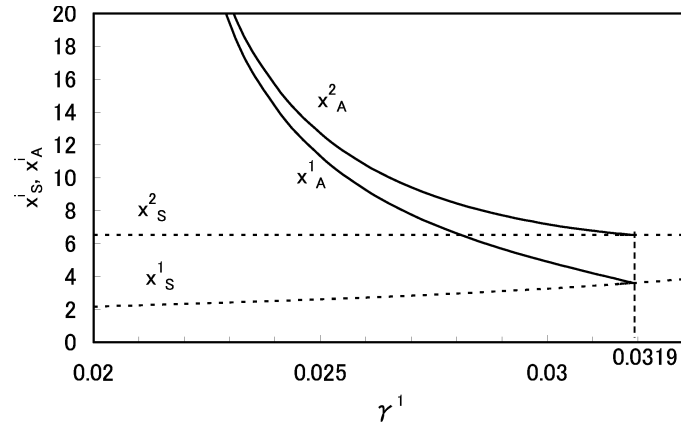


図 10: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と排出フローパラメータ γ^1 の関係

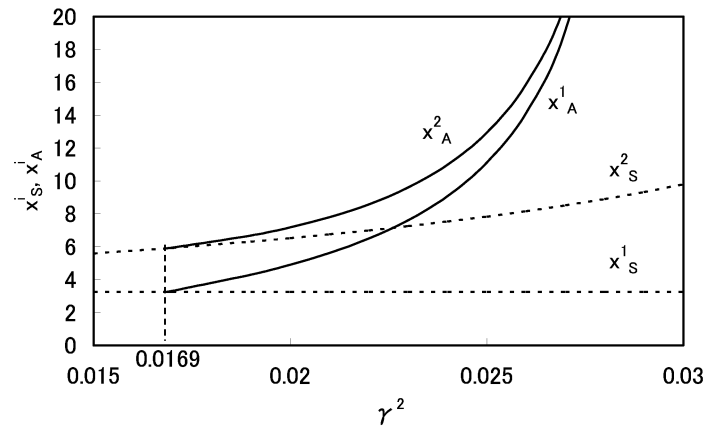


図 11: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と排出フローパラメータ γ^2 の関係

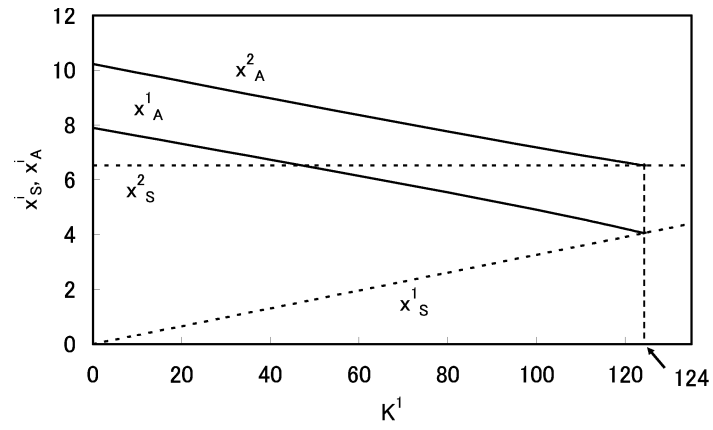


図 12: 閾値 $x_S^1, x_S^2, x_A^1, x_A^2$ と政策実施費用 K^1 の関係

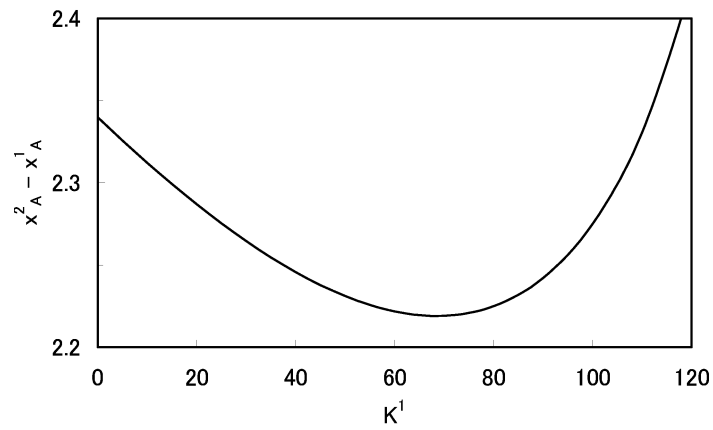


図 13: 閾値の差 $x_A^2 - x_A^1$ と K^1 の関係

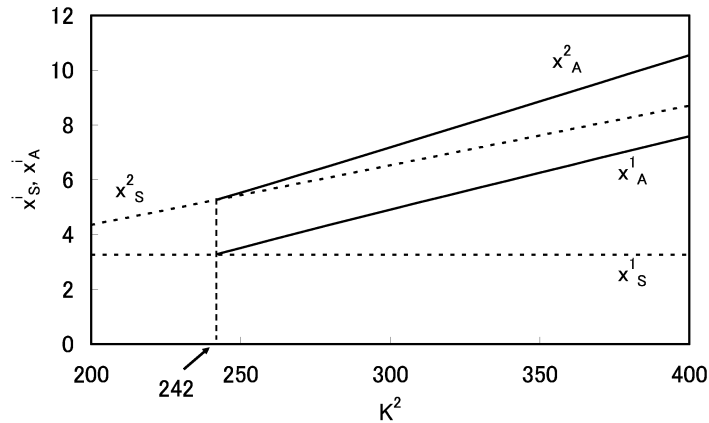


図 14: 閾値 x_S^1 , x_S^2 , x_A^1 , x_A^2 と政策実施費用 K^2 の関係

参考文献

- 経済産業省・資源エネルギー庁 (2006), 「新・国家エネルギー戦略」.
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-strategy/index.htm>
- Arrow, K.J. and A.C. Fisher (1974), “Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility,” *Quarterly Journal of Economics*, **88**, 312–319.
- Baranzini, A., M. Chesney and J. Morisset (2003), “The Impact of Possible Climate Catastrophes on Global Warming Policy,” *Energy Policy*, **31**, 691–701.
- Barrieu, P. and M. Chesney (2003), “Optimal Timing for an Environmental Policy in a Strategic Framework,” *Environmental Modeling and Assessment*, **8**, 149–163.
- Conrad, J.M. (1997), “Global Warming: When to Bite the Bullet,” *Land Economics*, **73**, 164–173.
- 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.
- Dixit, A.K. and R.S. Pindyck (1994), *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, New Jersey.
- Dupuis, P. and H. Wang (2002), “Optimal Stopping with Random Intervention Times,” *Advances in Applied Probability*, **34**, 141–157.

- Gollier, C., D. Proult, F. Thais and G. Walgenwitz (2005), “Choice of Nuclear Power Investments under Price Uncertainty: Valuing Modularity,” *Energy Economics*, **27**, 667–685.
- Henry, C. (1974), “Option Value in the Economics of Irreplaceable Assets,” *Review of Economic Studies*, **41**, 89–104.
- Hu, Y. and B. Øksendal (1998), “The Optimal Time to Invest when the Price Processes are Geometric Brownian Motions,” *Finance and Stochastics*, **2**, 295–310.
- Karatzas, I. and S.E. Shreve (2001), *Brownian Motion and Stochastic Calculus*, 2nd edition, Springer-Verlag, New York.
- Lin, T.T., C.-C. Ko and H.-N. Yeh (2007), “Applying Real Options in Investment Decisions relating to Environmental Pollution,” *Energy Policy*, **35**, 2426–2432.
- Ohyama, A. and M. Tsujimura (2006a), “Political Measures for Strategic Environmental Policy with External Effects,” *Environmental and Resource Economics*, **35**, 109–135.
- Ohyama, A. and M. Tsujimura (2006b), “Induced Effects and Technological Innovation with Strategic Environmental Policy,” Discussion Paper No. 109, *21COE Program Interfaces for Advanced Economic Analysis*, Kyoto University.
- Øksendal, B. (2003), *Stochastic Differential Equations: An Introduction with Applications*, 6th ed., Springer-Verlag, New York.
- 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.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery (1992), *Numerical Recipes in Fortran: The Art of Scientific Computing*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wirl, F. (2006a), “Pollution Thresholds under Uncertainty,” *Environmental and Development Economics*, **11**, 493–506.
- Wirl, F. (2006b), “Consequences of Irreversibilities on Optimal Intertemporal CO₂ Emission Policies under Uncertainty,” *Resource and Energy Economics*, **28**, 105–123.