国際寡占競争下における環境 R&D の微分ゲーム分析[†]

前 鶴 政 和*

A Differential Game of Environmental R&D under International Oligopolistic Competition

Masakazu MAEZURU*

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the dynamic properties of environmental R&D and environmental policies by analyzing the infinite horizon differential game between two governments. In this paper, we formulate the differential games that need to be solved by the two governments and derive and characterize the unique open-loop and Markov-perfect Nash equilibrium solutions. By comparing the two equilibrium solutions, we explore the free-riding behavior of governments with regard to pollution control. We derive and compare the steady-state levels of emission tax, pollution stock and social welfare. In addition, we derive the convergence speed of pollution control under the respective equilibrium solutions. In conclusion, compared to the Markov-perfect Nash equilibrium solution, we obtain a higher emission tax, a lower pollution stock, a higher social welfare and a slower pace of pollution control under the open-loop Nash equilibrium solution.

JEL classification: F18, L13, Q58

Keywords: Differential Game, Environmental R&D, Third Market Model, Emission Tax

1. は じ め に

近年、環境汚染が深刻となっており、1 国内の環境汚染だけではなく、地球温暖化や酸性雨のような、世界規模での環境汚染が問題となっている。これらの世界規模での環境汚染は、先進国が中心となって発生させてきたものであり、特に、先進国における寡占産業の生産活動が、その大きな要因となっていると考えられる。また、国際化の進展に伴い、先進国の寡占産業にとっては、国際市場への輸出が大きな意味を持つようになっている。そこで、現実の世界規模での環境汚染問題を考察し、各国政府が課す環境政策について検討するためには、国際寡占競争下の企業に課される環境政策を分析しなければならない。さらに、汚染物質は長期にわたって蓄積されていくものであるということに注意すべきである。したがって、世界規模での環境汚染問題を考える際には、長期的視点で考察する必要があるため、静学分析の枠組みではなく、動学分析の枠組みで分析しなければならない。

[†] 本稿は、日本地域学会第 42 回年次大会 (2005 年 10 月 9 日, 鳥取大学) において発表した論文を加筆・修正したものです。討論者の松本昭夫教授 (中央大学), 吉岡忠昭准教授 (神奈川大学), 座長の關哲雄教授 (立正大学), 河野正道教授 (関西学院大学), 本巻編集委員長の多和田眞教授 (名古屋大学) ならびに 2 名のレフェリーの諸氏より、大変有益なコメントを頂きました。ここに記して感謝の意を表します。ただし、本稿における誤謬のすべては、筆者の責任に帰するものです。なお、本稿は大阪経済法科大学研究補助金の成果の一部です。感謝申し上げます。

* 大阪経済法科大学経済学部

2006 年 2 月 28 日受付 2006 年 12 月 17 日受理

© 日本地域学会 (JSRSAI) 2007

以上のような問題意識にしたがって、本稿では、2 国の企業が第 3 国の市場に財を供給し、各国企業が汚染物質を排出するような財の生産を行っているが、同時に排出量を削減するような技術に投資（環境関連投資と呼ぶ）を行うような状況を想定する。

その際、各国政府は環境政策として、各国企業の排出量に排出税を課すものとする。そのような状況において、各国企業は汚染物質の排出量を削減するような技術に投資するものとする。また、汚染物質は、通時的に蓄積するものであり、ある国で発生すると国境を越えて世界全体に広がるものとし、世界全体の汚染物質の総量が自国、外国および第 3 国に同様に環境損失を与えるものとする。

本稿のモデルは、3 段階のゲームから構成されるものとする。まず、第 1 段階において、各国政府が排出税率を決定する。次に、第 2 段階において、第 1 段階において決定された排出税率に基づき、各国企業は環境関連投資の成果としての排出削減水準を決定する。最後に、第 3 段階においては、第 1 段階で決定された排出税率及び第 2 段階で決定された排出削減水準に基づき、各国企業が生産量を決定するものとする。

本稿の目的は、以上のような想定の下で、2 国政府間の無限期間の微分ゲームを考えることによって、環境対策の動学的な性質を考察することである。特に、初期時点で決定された環境対策計画を変更できない open-loop ナッシュ均衡解、およびいかなる時点でもそれを自由に変更できる Markov 完全ナッシュ均衡解を比較検討することによって、環境対策における各国政府のただ乗り行動がもたらす様々な理論的帰結を明らかにする。

本稿の分析は、以下に挙げるような先行研究に依存する。まず、環境関連投資と環境政策に関しては、以下のような研究が挙げられる。Katsoulacos & Xepapadeas [6] (1996) は、排出税及び環境関連投資補助金が課されている状況で、同一国内でクールノー競争を行う 2 企業が環境関連投資を行う際の、最適な排出税率及び環境関連投資補助金率を導出している。しかし、本稿と異なり、彼らの研究は同一国内の 2 企業を対象としたものであり、さらに、動学的な分析は行われていない。

次に、微分ゲームに関しては、以下のような研究が挙げられる。Kort[7] (1996)、Stimming[10] (1999) は、同一国内にある 2 企業が、排出税や排出規制の下での企業の最適な投資戦略に関して微分ゲームの枠組みで分析している。しかし、本稿と異なり、彼らの研究は同一国内の 2 企業を対象としたものであり、さらに、政府の最適な戦略は考察されていない。

また、Reynolds[8] (1987) は、同一国内の 2 企業が生産設備に投資する状況を考察し、open-loop ナッシュ均衡解と Markov 完全ナッシュ均衡解を比較している。しかし、本稿と異なり、彼らの研究は、同一国内の 2 企業を対象としており、さらに環境問題に関する分析は行われていない。

以上のような先行研究との相違を認識しつつ、本稿では微分ゲームの枠組みを用いて国際複占競争下における環境関連投資と環境政策について分析し、open-loop ナッシュ均衡解と Markov 完全ナッシュ均衡解を比較検討し、どちらが望ましいか、そしてそのことがどのような経済学的な意味を持つかを明らかにする。

本稿の構成は以下の通りである。2 節で基本モデルを提示する。3 節で各国政府の動学的最大化問題を定式化し、微分ゲームの枠組みを用いて各国政府間の排出税ゲームの open-loop ナッシュ均衡解を求める。4 節で Markov 完全ナッシュ均衡解を求める。5 節で定常状態における open-loop ナッシュ均衡と Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率及び汚染ストックを比較する。6 節で結論と今後の課題を述べる。

2. モ デ ル

本節では、基本モデルを提示する。自国および外国の 2 国に、汚染物質を排出するような同質財を生

産する企業が 1 社ずつ存在し、第 3 国市場においてクールノー競争を行うモデルを考える。各国企業は、自国及び外国の市場には供給しないものとする¹。

まず、第 3 国市場の逆需要関数は次式で与えられるものとする。

$$p=p(Q)=a-Q \quad (1)$$

ただし、 p は価格、 $Q=q_1+q_2$ 、 q_i は企業 i の生産量である。

ここで、環境関連投資が行われなければ、各国企業の生産活動は生産物と同量の汚染物質を排出するものとする。排出された汚染物質は、国境を越え、通時的に蓄積されていくものとする。具体的には、当該産業が鉄鋼産業であり、生産する際に石炭を使用するため、二酸化炭素が排出され、その蓄積により地球温暖化を引き起こしているものとする。各国企業は、汚染物質の排出量を減少させるための技術に投資（環境関連投資）を行うものとする。環境関連投資が行われると、生産過程において汚染物質を減らすような技術が採用され、排出量が減少する。

環境関連投資が行われた後の、企業 i の排出量は、次のように表される。

$$E_i=q_i-x_i \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

ここで、 x_i は、環境関連投資の成果としての排出削減水準を表す。 x_i だけ排出量を減少させるための環境関連投資費用関数は、以下の式で表される。

$$g(x_i)=\gamma(x_i)^2/2 \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

ここで、各国政府は、環境対策として、各国企業の排出量に 1 単位あたり τ_i だけの排出税を課すものとする。

上記の仮定を所与として、企業 i の利潤 π_i は次のように表される。

$$\pi_i=p(Q)q_i-\tau_iE_i-g(x_i) \quad (i=1, 2) \quad (4)$$

ただし、生産費用は 0 と仮定する。

このゲームは、3 段階ゲームで構成される。まず、第 1 段階において、各国政府が排出税率を決定する。次に、第 2 段階において、各国企業は排出削減水準を選択し、第 3 段階において各国企業は生産量を選択する。

このゲームを後ろ向きに解いていく。まず、各国企業は第 3 段階において、排出税率及び排出削減水準を所与として、各国企業の利潤を最大化するように生産量を選択する。このとき、生産量に関する利潤最大化の 1 階の条件は次式で与えられる。

$$a-2q_i-q_j-\tau_i=0 \quad (i, j=1, 2; i \neq j) \quad (5)$$

(5) 式より、サブゲーム均衡における各国企業の生産量は次式で与えられる。

$$q_i(\tau_i, \tau_j)=(a-2\tau_i+\tau_j)/3 \quad (i, j=1, 2; i \neq j) \quad (6)$$

第 2 段階において、各国企業は排出税率を所与として、(6) 式より、以下のような利潤を最大化するように排出削減水準を決定する。

$$\pi_i=\{q_i(\tau_i, \tau_j)\}^2+\tau_ix_i-\gamma(x_i)^2/2 \quad (i, j=1, 2; i \neq j) \quad (7)$$

¹ このような第 3 国市場モデルについては、Barrett [1] (1994)、Brander & Spencer [2] (1985)などを参照。

排出削減水準に関する利潤最大化の1階の条件は、次式で与えられる。

$$\tau_i - \gamma x_i = 0 \quad (i=1, 2) \quad (8)$$

したがって、サブゲーム均衡における排出削減水準は、次式で与えられる。

$$x_i = \tau_i / \gamma \quad (i=1, 2) \quad (9)$$

3. open-loop ナッシュ均衡

本節では、各国政府間の排出税ゲームに関する open-loop ナッシュ均衡²を導出する。2国の企業によって排出される汚染物質は、国境を越え、一部は自然浄化されるが、浄化されない部分は通時的に蓄積する。すなわち、 $S(t)$ を t 時点での地球規模での汚染ストックとすれば、 $S(t)$ は以下の動学方程式に従って蓄積されていく。

$$\dot{S}(t) = E_1(t) + E_2(t) - \delta S(t) \quad (10)$$

ただし、 δ は自然浄化率を表す。

自国および外国には財は供給されないと想定しているため、自国および外国には消費者余剰は存在せず、各国政府の社会厚生関数は、以下のように表される。

$$W_i = \pi_i + \tau_i E_i - D(S) \quad (11)$$

ただし、 $D(S) = dS^2/2$ は汚染物質によって引き起こされる環境損失を表す。

(3), (11) 式のように、 x_i, S_i に関する2次の項によって環境関連投資費用関数や環境損失関数が表されているのは、限界投資費用逓増および限界環境損失逓増を表しているだけでなく、急激な x_i, S_i の増加を望んでいないという各国企業および各国政府の選好も表している。したがって、瞬時に環境対策を行うことは各国企業および各国政府にとって大きな費用を伴うことになるので、環境対策は必然的に異時点間にわたるものとなる。

各国政府は、その社会厚生関数の割引現在価値を最大化するように、その排出税率を選択するものとする。したがって、各国政府の動学的最大化問題は、次式で表される³。

$$\begin{aligned} \max_{\tau_i} \quad & \int_0^{\infty} e^{-\rho t} W_i dt \\ \text{subject to} \quad & \dot{S} = E_1 + E_2 - \delta S \\ & S(0) = S_0 \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 ρ は割引率を表す。

ここで、両国政府は排出税率の経路に事前にコミットできると仮定する。すなわち、両国政府は open-loop 戦略を採用すると仮定する。

(12) 式より、現在価値ハミルトニアンは、以下のように定義される。

$$H_i = W_i + \lambda_i (E_1 + E_2 - \delta S) \quad (13)$$

ただし、 λ_i は共役変数を表す。

² 微分ゲームの open-loop ナッシュ均衡については、Dockner et al. [4] (2000)などを参照。

³ 動学的最適化については、Kamien & Schwartz [5] (1991), Seierstad & Sydsaeter [9] (1987)などを参照。

(13) 式から、次のような 1 階の条件が得られる。

$$\gamma a + (4\gamma + 9)\tau_i + \gamma\tau_j + 3\lambda_i(3 + \gamma) = 0 \quad (14)$$

$$\dot{\lambda}_i(t) = (\rho + \delta)\lambda_i + dS \quad (15)$$

さらに、横断性条件は $\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_i(t)S(t)e^{-\rho t} = 0$ で与えられる。

(10), (14), (15) 式から得られる連立微分方程式体系のヤコビ行列の特性方程式は、次のようになる。

$$P(\omega) = \omega^2 - \rho\omega - \delta(\rho + \delta) - 2(\gamma + 3)^2 d / \gamma(5\gamma + 9) = 0 \quad (16)$$

ただし、 ω は固有根を表す。

(16) 式から、次のような固有根が求められる。

$$\omega_{1,2} = \frac{\rho \pm \sqrt{\rho^2 + 4[\delta(\rho + \delta) + 2(\gamma + 3)^2 d / \gamma(5\gamma + 9)]}}{2} \quad (17)$$

ただし、 $\omega_1 < 0$, $\omega_2 > 0$ で、正と負の固有根が 1 つずつ存在するので、定常均衡値は鞍点安定である⁴。

ここで、定常均衡値を求める。定常均衡値は、(10), (14), (15) 式において、 $\dot{\lambda}_1 = \dot{\lambda}_2 = \dot{S} = 0$ とおくことで求められる。したがって、定常状態における open-loop ナッシュ均衡の排出税率は次のように求められる。

$$\bar{\tau}^N = \frac{\gamma[12(\gamma + 2)(\gamma + 3)d - \Gamma^N]}{(5\gamma + 9)\Gamma^N} a \quad (18)$$

ただし、 $\Gamma^N = (\rho + \delta)\delta\gamma(5\gamma + 9) + 2(\gamma + 3)^2 d$, $\bar{\tau}^N = \bar{\tau}_1^N = \bar{\tau}_2^N$ であり、 $\hat{\cdot}$ は定常均衡値を、上付の N は open-loop ナッシュ均衡を表す。

また、定常状態における open-loop ナッシュ均衡の汚染ストックは、次式で与えられる。

$$\bar{S}^N = \frac{4(\rho + \delta)\gamma(\gamma + 2)a}{\Gamma^N} \quad (19)$$

ここで、定常状態における open-loop ナッシュ均衡の排出税率及び汚染ストックが、種々のパラメータの変化によってどのように影響を受けるかということを検討する。

(18), (19) 式から、次のような命題が得られる。

命題 1

定常状態における open-loop ナッシュ均衡の排出税率 $\bar{\tau}^N$ 及び汚染ストック $\bar{S}^N$ は、パラメータの変化によって、以下のような影響を受ける。

- (i) 環境関連投資費用に関して、 $\partial \bar{\tau}^N / \partial \gamma > 0$, $\partial \bar{S}^N / \partial \gamma > 0$ が成立する。
- (ii) 割引率に関して、 $\partial \bar{\tau}^N / \partial \rho < 0$, $\partial \bar{S}^N / \partial \rho > 0$ が成立する。
- (iii) 環境損失に関して、 $\partial \bar{\tau}^N / \partial d > 0$, $\partial \bar{S}^N / \partial d < 0$ が成立する。

これらの結果から、環境関連投資費用パラメータの上昇、割引率の下落、環境損失パラメータの上昇によって定常状態における open-loop ナッシュ均衡の排出税率は上昇し、環境関連投資費用パラメータの上昇、割引率の上昇、環境損失パラメータの下落によって定常状態における open-loop ナッシュ均衡の汚染ストックは増加する、ということが分かった。

⁴ 定常均衡値の安定性については、Dockner & Feichtinger [3] (1996)などを参照。

また、状態変数である汚染ストックの安定経路は、次の式で与えられる。

$$S^N(t) = \hat{S}^N + (S_0 - \hat{S}^N)e^{\omega_1 t} \quad (20)$$

(17) 式より、 $\omega_1 < 0$ であり、この経路は定常均衡値に収束する。

さらに、定常状態における open-loop ナッシュ均衡の生産量、排出削減水準、利潤、排出量及び社会厚生は、次のように表される。

$$\bar{q}^N = (a - \bar{\tau}^N)/3 \quad (21)$$

$$\bar{x}^N = \bar{\tau}^N/\gamma \quad (22)$$

$$\bar{\pi}^N = (\bar{q}^N)^2 + \bar{\tau}^N \bar{x}^N - \gamma(\bar{x}^N)^2/2 \quad (23)$$

$$\bar{E}^N = \bar{q}^N - \bar{x}^N \quad (24)$$

$$\bar{W}^N = \bar{\pi}^N + \bar{\tau}^N \bar{E}^N - D(\bar{S}^N) \quad (25)$$

ただし、 $\bar{q}^N = \bar{q}_1^N = \bar{q}_2^N$, $\bar{x}^N = \bar{x}_1^N = \bar{x}_2^N$, $\bar{\pi}^N = \bar{\pi}_1^N = \bar{\pi}_2^N$, $\bar{E}^N = \bar{E}_1^N = \bar{E}_2^N$, $\bar{W}^N = \bar{W}_1^N = \bar{W}_2^N$ である。

ここで、定常状態における open-loop ナッシュ均衡の第3国の社会厚生について考える。まず、定常状態における open-loop ナッシュ均衡の第3国の消費者余剰は、次のように表される。

$$\bar{Q}^N = (\bar{Q}^N)^2/2 = 2(a - \bar{\tau}^N)^2/9 \quad (26)$$

第3国には生産者は存在せず、消費者しか存在しないと想定しているため、第3国の社会厚生は消費者余剰と環境損失のみから構成される。したがって、定常状態における open-loop ナッシュ均衡の第3国の社会厚生は以下のように表される。

$$\bar{W}_3^N = \bar{Q}^N - D(\bar{S}^N) \quad (27)$$

ただし、下付の3は第3国を表すものとする。

4. Markov 完全ナッシュ均衡

本節では、各国政府の排出税ゲームに関する Markov 完全ナッシュ均衡⁵を導出する。両国政府は、各時点において状態変数である汚染ストックに依存して排出税率を決定する、Markov 戦略を採用するものと仮定する。

政府 i の価値関数、すなわち社会厚生 of 割引現在価値の最大値を $V_i(S, t)$ とする。政府 i の Hamilton-Jacobi-Bellman 方程式は、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \rho V_i(S, t) \\ &= \max_{\tau_i} \left\{ \frac{(a - 2\tau_i + \tau_j)^2}{9} + \frac{\tau_i^2}{2\gamma} + \frac{\tau_i \{ \gamma a - (2\gamma + 3)\tau_i + \gamma\tau_j \}}{3\gamma} - \frac{dS^2}{2} + V_i'(S, t) \left\{ \frac{2\gamma a - (3 + \gamma)(\tau_i + \tau_j)}{3\gamma} - \delta S \right\} \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

さらに、横断性条件は $\lim_{t \rightarrow \infty} V_i(S, t)e^{-\rho t} = 0$ で与えられる。

このゲームの linear-quadratic の構造から、価値関数は以下のような S に関する2次関数であると考えられる。

$$V_i(S, t) = (1/2)\beta S^2 + \phi S + \sigma \quad (29)$$

(29) 式より、次の式が得られる。

⁵ Markov 完全ナッシュ均衡については、Dockner et al. [4] (2000)などを参照。

$$V_i(S, t) = \beta S + \phi \quad (30)$$

(28) 式の右辺の最大化から、排出税率に関して以下の式を得る。

$$\tau = -\frac{\gamma a - 3(\gamma + 3)(\beta S + \phi)}{5\gamma + 9} \quad (31)$$

ただし、 $\tau = \tau_1 = \tau_2$ である。

(28) 式に (29) 式の価値関数、(30) 式と (31) 式の最大化の条件を代入して係数比較を行うと、(29) 式の価値関数のパラメータに関して、以下の式を得る。

$$\beta = \frac{(\rho + 2\delta)\gamma(5\gamma + 9)^2 - \sqrt{(\rho + 2\delta)^2\gamma^2(5\gamma + 9)^4 + 4d\gamma(\gamma + 3)^2(5\gamma + 9)^2(16\gamma + 27)}}{2(\gamma + 3)^2(16\gamma + 27)} \quad (32)$$

$$\phi = \frac{\gamma\{2(5\gamma + 9)^2 + \gamma(\gamma + 3)\}\beta}{3\{(\rho + \delta)\gamma(5\gamma + 9)^2 - (\gamma + 3)^2(16\gamma + 27)\beta\}} a \quad (33)$$

$$\sigma = \frac{9(\gamma + 3)^2(16\gamma + 27)\phi^2 + 6\gamma a\{2(5\gamma + 9)^2 + \gamma(\gamma + 3)\}\phi + \gamma a^2\{2(5\gamma + 9)^2 - \gamma(14\gamma + 27)\}}{18\rho\gamma(5\gamma + 9)^2} \quad (34)$$

なお、 β に関しては正の共役解も存在するが、経路の安定条件のために、 β は負でなければならないということを後述する。

ここで、定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の汚染ストックは、以下のように求められる。

$$\hat{S}^M = \frac{4\gamma(\gamma + 2)a + 2(\gamma + 3)^2\phi}{\delta\gamma(5\gamma + 9) - 2(\gamma + 3)^2\beta} \quad (35)$$

ただし、上付の M は Markov 完全ナッシュ均衡を表す。

(35) 式を (31) 式に代入すると、定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率は以下のように求められる。

$$\hat{\tau}^M = -\frac{\gamma a + 3(\gamma + 3)(\phi + \beta\hat{S}^M)}{5\gamma + 9} \quad (36)$$

ここで、定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率及び汚染ストックが、種々のパラメータの変化によってどのように影響を受けるかということを検討する。

(35)、(36) 式から、次のような命題が得られる。

命題 2

定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率 $\hat{\tau}^M$ 及び汚染ストック $\hat{S}^M$ は、パラメータの変化によって、以下のような影響を受ける。

- (i) 環境関連投資費用に関して、 $\partial \hat{\tau}^M / \partial \gamma > 0$, $\partial \hat{S}^M / \partial \gamma > 0$ が成立する。
- (ii) 割引率に関して、 $\partial \hat{\tau}^M / \partial \rho < 0$, $\partial \hat{S}^M / \partial \rho > 0$ が成立する。
- (iii) 環境損失に関して、 $\partial \hat{\tau}^M / \partial d > 0$, $\partial \hat{S}^M / \partial d < 0$ が成立する。

これらの結果から、環境関連投資費用パラメータの上昇、割引率の下落、環境損失パラメータの上昇によって定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率は上昇し、環境関連投資費用パラメータの上昇、割引率の上昇、環境損失パラメータの下落によって定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の汚染ストックは増加する、ということが分かった。

また、状態変数である汚染ストックの安定経路は、次の式で与えられる。

$$S^M(t) = \bar{S}^M + (S_0 - \bar{S}^M)e^{\eta t} \quad (37)$$

ただし、 $\eta = \frac{2(\gamma+3)^2\beta - \delta\gamma(5\gamma+9)}{\gamma(5\gamma+9)}$ である。この経路が安定条件を満たすためには、 $\eta < 0$ 、すなわち $\beta < \delta\gamma(5\gamma+9)/2(\gamma+3)^2$ でなければならないので、上述したように、 β は負の共役解でなければならない。(32) 式のように β が負の共役解であれば、この経路は定常均衡値に収束する。

さらに、定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の生産量、排出削減水準、利潤、排出量及び社会厚生は、次のように表される。

$$\hat{q}^M = (a - \hat{\tau}^M)/3 \quad (38)$$

$$\hat{x}^M = \hat{\tau}^M/\gamma \quad (39)$$

$$\hat{\pi}^M = (\hat{q}^M)^2 + \hat{\tau}^M \hat{x}^M - \gamma(\hat{x}^M)^2/2 \quad (40)$$

$$\hat{E}^M = \hat{q}^M - \hat{x}^M \quad (41)$$

$$\hat{W}^M = \hat{\pi}^M + \hat{\tau}^M \hat{E}^M - D(\bar{S}^M) \quad (42)$$

ただし、 $\hat{q}^M = \hat{q}_1^M = \hat{q}_2^M$ 、 $\hat{x}^M = \hat{x}_1^M = \hat{x}_2^M$ 、 $\hat{\pi}^M = \hat{\pi}_1^M = \hat{\pi}_2^M$ 、 $\hat{E}^M = \hat{E}_1^M = \hat{E}_2^M$ 、 $\hat{W}^M = \hat{W}_1^M = \hat{W}_2^M$ である。

ここで、定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の第3国の社会厚生について考える。まず、定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の第3国の消費者余剰は、次のように表される。

$$\hat{\Omega}^M = (\hat{Q}^M)^2/2 = 2(a - \hat{\tau}^M)^2/9 \quad (43)$$

このとき、定常状態における Markov 完全ナッシュ均衡の第3国の社会厚生は以下のように消費者余剰と環境損失のみによって表される。

$$\hat{W}_3^M = \hat{\Omega}^M - D(\bar{S}^M) \quad (44)$$

5. open-loop ナッシュ均衡と Markov 完全ナッシュ均衡の比較

本節では、定常状態における open-loop ナッシュ均衡と Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率及び汚染ストックを比較する。

(18), (19), (35), (36) 式から、定常状態において、open-loop ナッシュ均衡と Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率を比較すると、次のような命題が得られる。

命題 3

- (i) $\hat{\tau}^M < \hat{\tau}^N$
- (ii) $\hat{S}^N < \hat{S}^M$

命題 3 の (i) は、定常状態において、open-loop ナッシュ均衡の排出税率の方が、Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率より高いことを示している。また、命題 3 の (ii) は、定常状態において、Markov 完全ナッシュ均衡の汚染ストックが open-loop ナッシュ均衡の汚染ストックよりも高いことを示している。

次に、定常状態において、open-loop ナッシュ均衡と Markov 完全ナッシュ均衡の社会厚生を比較する。

(25), (42) 式から、次のような命題が得られる。

命題 4

$$\bar{W}^N > \bar{W}^M$$

したがって、定常状態において、open-loop ナッシュ均衡の社会厚生の方が、Markov 完全ナッシュ均衡の社会厚生よりも大きいということが分った。

次に、定常状態において、open-loop ナッシュ均衡と Markov 完全ナッシュ均衡の第 3 国の社会厚生を比較する。

(27), (44) 式から、次のような命題が得られる。

命題 5

$$\bar{W}_3^N > \bar{W}_3^M$$

したがって、定常状態において、open-loop ナッシュ均衡の第 3 国の社会厚生の方が、Markov 完全ナッシュ均衡の第 3 国の社会厚生よりも大きいということが分った。

次に、open-loop ナッシュ均衡と Markov 完全ナッシュ均衡における安定経路の収束速度について比較する。open-loop ナッシュ均衡の安定経路における収束速度は $|\omega_1|$, Markov 完全ナッシュ均衡における安定経路の収束速度は $|\eta|$ で表されるため、両者を比較すると、次の命題が得られる。

命題 6

$$|\eta| > |\omega_1|$$

したがって、Markov 完全ナッシュ均衡の安定経路における収束速度の方が、open-loop ナッシュ均衡における安定経路の収束速度より速いということが分った。

6. 結論と今後の課題

本稿は、2 国の企業が第 3 国の市場に財を供給し、各国企業が汚染物質を排出するような財の生産を行っているが、同時に排出量を削減するような技術に投資を行うような状況を想定した。そのような状況で、各国政府間で行われる排出税ゲームを微分ゲームの枠組みで分析し、open-loop ナッシュ均衡と Markov 完全ナッシュ均衡を導出し、定常状態における均衡値の比較を行った。

本稿の分析によって、以下のような結果が得られた。

(1) 定常状態において、open-loop ナッシュ均衡及び Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率は、環境関連投資費用パラメータの上昇、割引率の下落、環境損失パラメータの上昇によって、上昇する。

(2) 定常状態において、open-loop ナッシュ均衡及び Markov 完全ナッシュ均衡の汚染ストックは、環境関連投資費用パラメータの上昇、割引率の上昇、環境損失パラメータの下落によって、増加する。

(3) 定常状態において、open-loop ナッシュ均衡の排出税率は Markov 完全ナッシュ均衡の排出税率より高い。

(4) 定常状態において、Markov 完全ナッシュ均衡の汚染ストックの方が、open-loop ナッシュ均衡の汚染ストックより大きい。

(5) 定常状態において、open-loop ナッシュ均衡の社会厚生の方が、Markov 完全ナッシュ均衡の社会厚生より大きい。

(6) 定常状態において、open-loop ナッシュ均衡の第 3 国の社会厚生の方が、Markov 完全ナッシュ均衡の第 3 国の社会厚生よりも大きい。

(7) Markov 完全ナッシュ均衡の安定経路における収束速度の方が、open-loop ナッシュ均衡における安定経路の収束速度より速い。

このように、国際寡占競争下におかれている企業が、汚染物質が通時的に蓄積されていくという想定の下で、汚染物質を削減するような環境関連投資競争を行っていく中で、open-loop ナッシュ均衡の方が、Markov 完全ナッシュ均衡よりも社会厚生上は望ましいということが確認された。このことの経済学的含意は次のように考えられる。

まず、open-loop 戦略と Markov 戦略の違いとして、ある時点で選ばれた戦略に対してコミットメント(拘束性)があるかどうかという点が挙げられる。つまり、open-loop 戦略の場合、計画の初期時点で決められた最適戦略が、その後状況の変化があっても、あるいはどのような新しい情報が得られても、何らかの理由のために計画期間全体にわたって変更ができないケースであると考えられる。一方、Markov 戦略は、各時点での状態に関する新しい情報を入手しながら、最適戦略をより適切なものに更新することができるので、このような拘束性はない。いずれにしても、Markov 戦略は、過去の時点での決定に関する情報は open-loop 戦略と同様に利用できないが、現時点での状態についての情報を利用できるという点で、open-loop 戦略よりも現実的な戦略であると考えられる。

各国政府がどのような戦略を採用するかに応じて、2つの異なるナッシュ均衡が得られる。open-loop 戦略の下でのナッシュ均衡が open-loop ナッシュ均衡であり、各国政府が選択する排出税率に関する最適戦略は、汚染ストックの初期値および時間にのみ依存する。他方、各国政府が Markov 戦略を採用する場合、任意の時点から始まるすべての部分ゲームにおいてナッシュ均衡であるような均衡解が選ばれる。これが Markov 完全ナッシュ均衡であり、均衡戦略は各時点で実現する汚染ストックの水準に依存することになる。このことは、初期時点で各国政府が決定した内容が、その後のいかなる時点でも変更できない場合(open-loop ナッシュ均衡)と、いかなる時点においても状況の変化に応じて、各国政府にとって最も望ましいものに変更することができる場合(Markov 完全ナッシュ均衡)の2つのケースとして考えられる。

open-loop ナッシュ均衡の下では、各国政府が排出税率を決定するとき、自らの社会厚生のみを最大化する結果、汚染ストックの増加がもたらす他国政府に対する負の外部性が無視されるので、汚染ストックの増加がもたらす自国および外国の社会厚生との和の減少が過小に評価される。Markov 戦略が利用可能な時、各時点で各国政府は利用可能となる新しい情報をもとに最適戦略を変えていく。各国政府が Markov 戦略を採用しているとき定常状態における排出税率は open-loop 戦略のそれより小さくなる。Markov 戦略が使われる場合、自らは排出税率を低くして他国に「ただ乗り」しようとする誘因が各国政府に働くが、これは、各国政府が環境汚染の外部性を無視していることに加えて、戦略的外部性が存在していることによる。

戦略的外部性とは、次のようなものである。ある時点で、一方の国の政府が突然、排出税率を上昇させたとする。その結果、実現される汚染ストックの水準は、他国政府が事前に予想したよりも低い水準になる。Markov 戦略のもとでは、他国政府は観察された汚染ストックの水準を新たな初期値として、最適化問題を解き直して、新しい最適戦略を選択する。この結果、減少した汚染ストックを観察した各国政府は、現時点での排出税率を下落させようとする誘因が働く。このような関係は、戦略的代替関係と呼ばれる。このような戦略的代替関係が存在するため、Markov 完全ナッシュ均衡で実現する定常状態の汚染ストックは、open-loop ナッシュ均衡で実現するより大きくなる。したがって、各国政府が Markov 戦略を採用するとき、open-loop ナッシュ均衡解に比べて、各国政府が「ただ乗り」する傾向はより大きくなり、環境問題の解決はより困難なものとなる。

したがって、そのような事態を避けるためには、各国政府の戦略集合を open-loop 戦略集合に限定する政策が考えられる。そうすれば、各国政府に対して、環境問題への対策が始まる初期時点で決定された環境対策計画は、環境対策の途中において計画の変更を認めないようなコミットメントが課されることになる。そのようなコミットメントがあれば、ある程度の環境対策を確実に達成できる。そのようなコミットメントを実効的なものとするためには、将来時点での環境対策計画の変更を一切認めないか、あるいは変更する際には非常に厳しい条件を付けるような法律や数値目標の設定などが有力な政策手段であると考えられる。例えば、京都議定書がそのような役割を果たすものとして考えられる。

なお、本稿には、次のような課題がある。まず、本稿は環境関連投資に伴うスピルオーバーを考慮に入れていない。また、差別化財に関するベルトラン競争も考慮に入れていない。これらの点で本稿の分析を拡張することが、今後の課題である。

参 考 文 献

- [1] Barrett, S., "Strategic Environmental Policy and International Trade," *Journal of Public Economics*, vol. 54, 1994, pp. 325-338.
- [2] Brander, J.A. and Spencer, B.J., "Export Subsidies and International Market Share Rivalry," *Journal of International Economics*, vol. 18, 1985, pp. 83-100.
- [3] Dockner, J. and Feichtinger, G., "On the Optimality of Limit Cycles in Dynamic Economic Systems," *Journal of Economics*, vol. 53, No. 1, 1996, pp. 31-50.
- [4] Dockner, E., Jorgensen, J., Long, N.V. and Sorger, G., *Differential Games in Economics and Management Science*, Cambridge University Press, 2000.
- [5] Kamien, M.I. and Schwartz, N.L., *Dynamic Optimization: The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management (2nd Edition)*, North-Holland, 1991.
- [6] Katsoulacos, Y. and Xepapadeas, A., "Environmental Innovation, Spillovers and Optimal Policy Rules," in C. Carraro, Y. Katsoulacos and A. Xepapadeas (ed.), *Environmental Policy and Market Structure*, pp. 143-150, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [7] Kort, P.M., "Pollution Control and the Dynamics of the Firm: The Effects of Market-Based Instruments on Optimal Firm Investments," *Optimal Control Applications & Methods*, vol. 17, 1996, pp. 267-279.
- [8] Reynolds, S.B., "Capacity Investment, Preemption and Commitment in an Infinite Horizon Model," *International Economic Review*, vol. 28, no. 1, 1987, pp. 69-88.
- [9] Seierstad, A. and Sydsaeter, K., *Optimal Control Theory with Economic Applications*, North-Holland, 1987.
- [10] Stimming, M., "Capital Accumulation subject to Pollution Control: Open-loop versus Feedback Investment Strategies," *Annals of Operations Research*, vol. 88, 1999, pp. 309-336.

A Differential Game of Environmental R&D under International Oligopolistic Competition

Masakazu MAEZURU*

The purpose of this paper is to investigate the dynamic properties of environmental R&D and environmental policies by analyzing the infinite horizon differential game between two governments. In this paper, we formulate the differential games that need to be solved by the two governments and derive and characterize the unique open-loop and Markov-perfect Nash equilibrium solutions. By comparing the two equilibrium solutions, we explore the free-riding behavior of governments with regard to pollution control. We derive and compare the steady-state levels of emission tax, pollution stock and social welfare. In addition, we derive the convergence speed of pollution control under the respective equilibrium solutions. In conclusion, compared to the Markov-perfect Nash equilibrium solution, we obtain a higher emission tax, a lower pollution stock, a higher social welfare and a slower pace of pollution control under the open-loop Nash equilibrium solution.

JEL classification : F18, L13, Q58

Keywords : Differential Game, Environmental R&D, Third Market Model, Emission Tax

* Department of Economics, Osaka University of Economics and Law, 6-10 Gakuonji Yao, Osaka, Japan