

## 寡占競争下の環境 R&D と 環境政策の動学分析\*

前 鶴 政 和

### 1. はじめに

本稿は、2 企業が財を供給し、各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、同時に排出削減技術の研究開発投資を行うような状況を、動学モデルを用いて分析する。

本稿では、汚染物質を排出するような、同質財を生産する企業が2社存在し、財市場においてクールノー競争を行うモデルを考える。その際、政府は環境政策として、汚染物質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、各企業は汚染物質の排出量を削減するような研究開発（環境 R&D と呼ぶ）に投資するものとする。ただし、環境 R&D 投資によって生み出される排出削減技術の知識、すなわち環境 R&D 資本は時間を通じて蓄積し、蓄積された環境 R&D 資本の量に応じて排出量が削減されるものとする。また、環境 R&D 資本の一部は他企業へスピルオーバーするものと仮定する。

本稿のモデルは、2 段階のゲームから構成されるものとする。まず、第 1

---

\* 本稿は、2005年度日本経済学会春季大会で報告した論文を加筆・修正したものです。座長の大沼あゆみ教授（慶應義塾大学）、討論者の石井安憲教授（早稲田大学）より、非常に有益なコメントを賜りました。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。

段階において、各企業は環境 R&D 投資水準を決定する。その際、2 企業が非協調的に決定する場合と、協調的に決定する場合とを考察する。次に、第2段階においては、第1 段階で決定された環境 R&D 投資水準に基づき、各企業がクールノー競争を行なうものとする。

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 R&D と環境政策に関しては、以下のような研究が挙げられる。Poyago-Theotoky & Teerasuwannajak (2002) は、1 国内で 2 企業が汚染物質を排出する差別化された財を生産するような状況で、政府が排出税を決定した後で企業が環境 R&D 及び生産量の決定を行うゲームと、企業が環境 R&D を決定した後で政府が排出税を決定し、企業が生産量を決定するというゲームとで経済厚生を比較している。Tanguay (2001) は、相互ダンピングモデルにおいて、2 国の企業が自国のみならず外国にも環境汚染をもたらす（越境汚染が生じる）状況を想定し、排出税と関税の影響について考察している。また、Waltz & Wellisch (1997) は、第 3 国市場モデルにおいて、自国と外国の企業が環境 R&D を実施している状況で、排出税と輸出補助金について考察している。

次に、動学モデルに関しては、以下のような研究が挙げられる。Kort (1996)、Stimming (1999) は、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。Cheng (1987) は、両企業間で研究開発競争及び輸出競争を行っている状況で、最適な輸出政策及び R&D 政策を明らかにしている。Reynolds (1987) は、同一国内の二企業が生産設備に投資する状況を考察し、生産設備への投資が参入を抑制するための「カラ脅し」として用いられうるということを示している。Petit & Tolwinski (1999) は、同一国内の二企業で研究開発投資競争が行われる状況を考察し、スピルオーバーの程度にしたがって、様々な形態の共同研究開発が行われるということを示している。Figuieres et al. (1999) は生産設備に投資するモデルを考え、設備投資費用が異なる際に、open-loop ナッシュ均衡における定常状態の生産設備の水準への収束がどのように異なるかを分析している。

以上のような先行研究に基づき、本稿では動学モデルを用いて排出税の下での複占市場における環境 R&D 投資競争について分析する。

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 節で各企業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環境 R&D 投資競争の open-loop ナッシュ均衡及び協調均衡を求める。4 節で open-loop ナッシュ均衡と協調均衡を比較する。5 節で結論を述べる。

## 2. 基本モデル

本節では、環境 R&D 投資競争に関して分析を行う前に、生産量1単位当たりの排出量（排出係数と呼ぶ）を所与とした場合の2企業間のクールノー競争について示すことにする。

同質的な財を生産する企業が2社存在し、それらを企業1、企業2と呼ぶことにする。任意の時点  $t$  で、企業  $i$  ( $i=1,2$ ) の排出係数は  $h_i(t) > 0$  によって表される。各企業  $i$  が環境 R&D 投資を行うと、 $h_i(t)$  は通時的に減少する。

財市場の需要は次のような（逆）需要関数によって表される。

$$p = p(Q), \quad p' < 0 \quad (1)$$

ただし、 $Q = q_1 + q_2$ 、 $q_i$  は企業  $i$  の生産量、 $p$  は価格を表す。

次に任意の時点  $t$  での企業の生産量の決定を示す。企業  $i$  の利潤は次式によって与えられる。

$$\pi_i = p(Q)q_i - \tau E_i - g(I_i) \quad (i=1,2) \quad (2)$$

ただし、 $\tau (> 0)$  は政府の課す排出税率（一定）を、 $E_i = h_i q_i$  は企業  $i$  の排出量を、 $g(I_i)$  は環境 R&D 投資費用を表す。また、単純化のために、生産費用はゼロと仮定する。

ここで、本稿の問題に対して明快な結果を得るために、（逆）需要関数を次のような線形の関数で特定化する。

$$p = a - Q = a - q_1 - q_2 \quad (1')$$

ただし、パラメータ  $a$  は正で通時的に一定であり、両企業が存続するのに十分大きいものとする。

ここで、財市場に関して両企業間でクールノー競争が行われると仮定する。

このとき、企業  $i$  にとっての利潤最大化の一階の条件は次式で表される。

$$a - 2q_i - q_j - \tau h_i = 0 \quad (i, j = 1, 2, i \neq j) \quad (3)$$

各企業にとっての条件(3)は、他企業の生産量に対する最適反応関数を表す。(3)式の企業の最適反応関数を解くと、サブゲーム・ナッシュ均衡における各企業の生産量が次のように決定される。

$$q_i = (a - 2\tau h_i + \tau h_j) / 3 \quad (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (4)$$

### 3. 動学的環境 R&D 投資競争モデル

#### 3. 1 各企業の問題

本節では、動学的環境 R&D 投資競争モデルを提示する。まず、各企業の排出係数がどのようにして通時的に削減されるかを示す。各企業の排出係数は、環境 R&D 資本が蓄積されていくにつれて減少する。これは、環境 R&D 資本が蓄積されていくのに伴い、排出係数が達成可能な最小の排出係数に近づくとすることを意味する。

企業  $i$  によって時点  $t$  までに生み出された排出削減技術の知識、すなわち時点 0 から時点  $t$  にかけて企業  $i$  によって蓄積された環境 R&D 資本を  $K_i(t) \geq 0$  で表す。企業  $i$  の各時点での環境 R&D 投資は  $I_i(t)$  によって表される。各企業の状態変数は  $K_i(t)$ 、制御変数は  $I_i(t)$  である。また、状態変数  $K_i(t)$  は次のような状態方程式を通じて制御変数  $I_i(t)$  と関連を持つ。

$$\dot{K}_i = I_i - \delta K_i \quad (5)$$

ただし、 $\dot{K}_i$  は  $K_i(t)$  の時間に関する微分、 $\delta$  は環境 R&D 資本の減耗率を表す。

また、企業間でスピルオーバーが生じる可能性も考慮に入れるので、スピルオーバー・パラメータ  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) を導入する。これは各時点  $t$  での企業  $i$  の環境 R&D 資本の水準が、 $t$  時点までそれ自身が蓄積した環境 R&D 資本と他企業によって蓄積された環境 R&D 資本の  $\beta$  倍との和、すなわち  $K_i(t) + \beta K_j(t)$  ( $i, j = 1, 2; i \neq j$ ) で表されるということを意味する。

環境 R&D 資本の水準( $K_i, K_j$ )に対応する各時点での企業  $i$  の排出係数を、 $h_i(K_i, K_j)$  で表すものとする。上述のように、企業の排出係数はその環境 R&D 資本の水準が増加するにつれて減少すると仮定する。ここで、任意の時点  $t$  における企業  $i$  の排出係数は次のような式によって与えられると想定する。

$$h_i(K_i, K_j) = \bar{h} - K_i - \beta K_j \quad (6)$$

(6)式は、企業  $i$  の排出係数が環境 R&D 資本蓄積とともに減少するということを表している。このようなモデルで、蓄積された環境 R&D 資本  $K_i$  は、長期的に、定常状態の水準  $\hat{K}_i$  に近づく。ただし、 $\bar{h}$  は定常状態を表す。これは企業が環境 R&D 投資を行うことによって達成することのできる最小排出係数が  $\bar{h} - \hat{K}_i - \beta \hat{K}_j$  に等しいということを示す。

ここで、環境 R&D 投資費用は次のような式で表されるものとする。

$$g(I_i) = \gamma(I_i)^2/2 \quad (7)$$

すなわち、環境 R&D 投資の限界費用は  $I_i(t)$  に関して逓増的である。

ここで、(4)式に(6)式を代入すると、サブゲーム・ナッシュ均衡における各企業の生産量は次のように表される。

$$q_i(K_i, K_j) = \{A + \tau(2 - \beta)K_i + \tau(2\beta - 1)K_j\}/3, i, j = 1, 2; i \neq j \quad (4')$$

ただし、 $A = a - \tau\bar{h}$  である。

(2)、(3)、(4')式を用いると、環境 R&D 資本の水準で表した企業の利潤  $\pi_i$  は次のような式で表される。

$$\pi_i(K_i, K_j, I_i) = q_i(K_i, K_j)^2 - g(I_i) \quad (8)$$

ここで、各時点で次のような2段階のゲームが行われると考える。第1段階において、各企業はライバルの環境 R&D 投資水準を所与として、自らの環境 R&D 投資水準を選択し、環境 R&D 投資競争を行う。第2段階において、第1段階で決定した環境 R&D 投資の結果として生じる排出係数を所与として、両企業がクールノー競争を行う。

各企業の問題は、各企業の環境 R&D 投資の水準が選択されると、各企業は生産量に関して競争するということを知った上で、その環境 R&D 投資の水準を選択することである。各企業は環境 R&D 資本の変化がその生産量及び利潤に及ぼす効果を完全に知っていると仮定するので、以下の分析では第1段階に

焦点を当てる。

### 3. 2 open-loop ナッシュ均衡

本節では、open-loop ナッシュ均衡、すなわち、各企業が open-loop 戦略を採用し、個別の利潤を最大化するように環境 R&D 資本及び環境 R&D 投資水準を決定する際の均衡解を求める。

まず、第1段階において、各企業は以下のような動学的最大化問題に直面する<sup>1</sup>。

$$\max \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \pi_i(K_i, K_j, I_i) dt \quad (9)$$

subject to

$$\dot{K}_i = I_i - \delta K_i$$

$$K_i(0) = K_i^0$$

ただし、 $\rho$  は割引率を表す。すなわち、各企業は環境 R&D 資本水準に関する状態方程式の制約の下で、その利潤の割引現在価値を最大化する。

本稿で考察する均衡戦略は open-loop 戦略である。open-loop 戦略を採用する企業は、各時点における環境 R&D 投資水準に事前にコミットする。

以下で、この微分ゲームの open-loop ナッシュ均衡を求める<sup>2</sup>。本来、各企業は有限期間の投資計画を立てるものと考えられるが、分析の便宜上、本稿では Reynolds (1987) に従い、各企業が無限期間の投資計画に直面しているものと想定する。このような open-loop ナッシュ均衡において、各企業の戦略はそのライバル企業によって選択される戦略への最適反応戦略である。open-loop ナッシュ均衡を考えることから、各企業はゲームの開始時点でゲームの全期間にわたる環境 R&D 投資水準にコミットする。

ここで、企業  $i$  は、ライバル企業の環境 R&D 投資  $I_j(t)$  を所与として、(9) 式のように、環境 R&D 投資  $I_i(t)$  を選択する。

1 動学的最適化については、Kamien & Schwartz (1991)、Seierstad & Sydsaeter (1987) などを参照。

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

(9)式より、企業の現在価値ハミルトニアンは次のように表される。

$$H_i = \pi_i(K_i, K_j, I_i) + \lambda_i (I_i - \delta K_i) \quad (10)$$

ただし、 $\lambda_i$  は共役変数を表す。

最大値原理から、次のような最大化のための必要条件が得られる。

$$\dot{K}_i(t) = \lambda_i(t)/\gamma - \delta K_i(t) \quad (11)$$

$$\dot{\lambda}_i(t) = (\rho + \delta)\lambda_i(t) - 2(2 - \beta)\tau[A + \tau(2 - \beta)K_i + \tau(2\beta - 1)K_j]/9 \quad (12)$$

ここで、定常状態における環境 R&D 資本及び環境 R&D 投資水準を求める。まず、環境 R&D 資本の定常値は (11)、(12) 式から次のように求められる。

$$\hat{K}^N = \frac{2(2 - \beta)\tau A}{9(\rho + \delta)\delta\gamma - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\tau^2} \quad (13)$$

ただし、 $\hat{K}^N = \hat{K}_1^N = \hat{K}_2^N$  に注意する。

また、環境 R&D 投資の定常値は (5)、(13) 式から次のように求められる。

$$\hat{I}^N = \frac{2(2 - \beta)\delta\tau A}{9(\rho + \delta)\delta\gamma - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\tau^2} \quad (14)$$

ただし、 $\hat{I}^N = \hat{I}_1^N = \hat{I}_2^N$  に注意する。

次に、open-loop ナッシュ均衡における定常状態の環境 R&D 資本の水準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。

(13)式から、次のような命題が得られる。

#### 命題 1

各企業の open-loop ナッシュ均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準  $\hat{K}^N$  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) 排出税率に関して、 $\partial \hat{K}^N / \partial \tau > 0$  が成立する。
- (ii) スピルオーバーの程度に関して、 $\partial \hat{K}^N / \partial \beta < 0$  が成立する。
- (iii) 割引率に関して、 $\partial \hat{K}^N / \partial \rho < 0$  が成立する。
- (iv) 環境 R&D 投資費用に関して、 $\partial \hat{K}^N / \partial \gamma < 0$  が成立する。

これらの結果から、(1) 排出税率の上昇、(2) スピルオーバーの程度の下落、(3) 割引率の下落、(4) 環境 R&D 投資費用の下落によって、

open-loop ナッシュ均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準は増加するということが分かった。

また、(6)式より、open-loop ナッシュ均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準が増加すれば、定常状態の排出係数が減少するということが分かる。

### 3. 3 協調均衡

本節では、協調均衡、すなわち、各企業が共同利潤を最大化するように環境 R&D 資本及び環境 R&D 投資水準を決定する際の均衡解を求める。

まず、第1段階において、各企業は以下のような動的的最大化問題に直面する。

$$\max \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \{ \pi_i(K_i, K_j, I_i) + \pi_j(K_i, K_j, I_j) \} dt \quad (15)$$

subject to

$$\dot{K}_i = I_i - \delta K_i$$

$$K_i(0) = K_i^0$$

ここで、企業  $i$  は(15)式のように、環境 R&D 資本水準に関する状態方程式の制約の下で、共同利潤の割引現在価値を最大化するような環境 R&D 投資水準  $I_i(t)$  を選択する。

(15)式より、企業  $i$  の現在価値ハミルトニアンは次のように表される。

$$H_i = \pi_i(K_i, K_j, I_i) + \pi_j(K_i, K_j, I_j) + \mu_i(I_i - \delta K_i) \quad (16)$$

ただし、 $\mu_i$  は共役変数を表す。

ここで、両企業が対称的であることから、協調均衡において  $K = K_1 = K_2$ 、 $I = I_1 = I_2$ 、 $\mu = \mu_1 = \mu_2$  が成立することに注意すれば、最大値原理から、次のような最大化のための必要条件が得られる。

$$\dot{K}(t) = \mu(t)/\gamma - \delta K(t) \quad (17)$$

$$\dot{\mu}(t) = (\rho + \delta)\mu(t) - [2(1 + \beta)\tau A + 2(1 + \beta)^2 \tau^2 K] / \theta \quad (18)$$

ここで、協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準を求める。

環境 R&D 資本の定常値は、(17)、(18)式から次のように計算される。



$$\hat{K}^c = \frac{2(1+\beta)\tau A}{9(\rho+\delta)\delta\gamma - 2(1+\beta)^2\tau^2} \quad (19)$$

ただし、 $\hat{K}^c = \hat{K}_1^c = \hat{K}_2^c$  に注意する。

また、環境 R&D 投資の定常値は (5)、(19) 式から次のように計算される。

$$\hat{I}^c = \frac{2(1+\beta)\delta\tau A}{9(\rho+\delta)\delta\gamma - 2(1+\beta)^2\tau^2} \quad (20)$$

ただし、 $\hat{I}^c = \hat{I}_1^c = \hat{I}_2^c$  に注意する。

次に、協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本の水準が種々のパラメータ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。

(19)式から、次のような命題が得られる。

## 命題 2

各企業の協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準  $\hat{K}^c$  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) 排出税率に関して、 $\partial\hat{K}^c/\partial\tau > 0$  が成立する。
- (ii) スピルオーバーの程度に関して、 $\partial\hat{K}^c/\partial\beta > 0$  が成立する。
- (iii) 割引率に関して、 $\partial\hat{K}^c/\partial\rho < 0$  が成立する。
- (iv) 環境 R&D 投資費用に関して、 $\partial\hat{K}^c/\partial\gamma < 0$  が成立する。

これらの結果から、(1) 排出税率の上昇、(2) スピルオーバーの程度の上昇、(3) 割引率の下落、(4) 環境 R&D 投資費用の下落によって、協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準は増加するということが分かった。

また、(6)式より、協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準が増加すれば、定常状態の排出係数が減少するということが分かる。

#### 4. open-loop ナッシュ均衡と協調均衡の比較

本節では、open-loop ナッシュ均衡と協調均衡の比較を行う。まず、(13)、(19)式から、open-loop ナッシュ均衡と協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準について、次の命題が得られる。

命題 3

$$\hat{K}^C \geq \hat{K}^N \Leftrightarrow \beta \geq 1/2$$

したがって、スピルオーバーの程度が1/2より大きければ、協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準の方が大きくなり、スピルオーバーの程度が1/2より小さければ、open-loop ナッシュ均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準の方が大きくなるということが分かった。

次に、定常状態における open-loop ナッシュ均衡と協調均衡の社会厚生を比較する。

まず、open-loop ナッシュ均衡における社会厚生は、次のように表される。

$$\hat{W}^N = \hat{\Omega}^N + 2\hat{\pi}^N + 2\tau\hat{E}^N - D(2\hat{E}^N) \quad (21)$$

ただし、 $\Omega = Q^2/2$  は消費者余剰、 $D(2E) = \frac{d}{2} \cdot 2E = d \cdot E$  は環境損失を表す。また、 $\hat{\pi}^N = \hat{\pi}_1^N = \hat{\pi}_2^N$ 、 $\hat{E}^N = \hat{E}_1^N = \hat{E}_2^N$  に注意する。

協調均衡における社会厚生は、次のように表される。

$$\hat{W}^C = \hat{\Omega}^C + 2\hat{\pi}^C + 2\tau\hat{E}^C - D(2\hat{E}^C) \quad (22)$$

ただし、 $\hat{\pi}^C = \hat{\pi}_1^C = \hat{\pi}_2^C$ 、 $\hat{E}^C = \hat{E}_1^C = \hat{E}_2^C$  に注意する。

ここで、パラメータに具体的な数値を与えて、シミュレーション分析を行う。パラメータに関して、 $a=10, \gamma=5, \bar{h}=8, \rho=0.5, \delta=0.1, \tau=0.1$ を仮定し、 $\beta \in [0, 1]$  に関してそれぞれ open-loop ナッシュ均衡の場合、協調均衡の場合について、社会厚生を表すと、図1のようになる。

図 1 から、次のような命題が得られる。

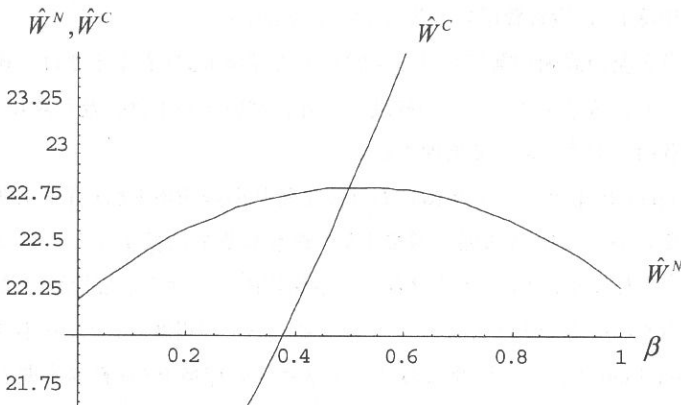
命題 4

$$(i) \quad \frac{\partial \hat{W}^N}{\partial \beta} \begin{matrix} < 0 \\ > 0 \end{matrix} \Leftrightarrow \beta \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \frac{1}{2}$$

$$(ii) \quad \frac{\partial \hat{W}^C}{\partial \beta} > 0$$

$$(iii) \quad \hat{W}^C \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} \hat{W}^N \Leftrightarrow \beta \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} \frac{1}{2}$$

図 1 open-loop ナッシュ均衡と協調均衡における社会厚生の変動



したがって、(1) open-loop ナッシュ均衡において、スピルオーバーの程度が1/2より小さいときにはスピルオーバーの程度の増加とともに社会厚生が増加するが、スピルオーバーの程度が1/2より大きいときにはスピルオーバーの程度の増加とともに社会厚生が減少する、(2) 協調均衡において、スピルオーバーの程度の増加とともに社会厚生が増加する、(3) スピルオーバーの程度が1/2より小さければ open-loop ナッシュ均衡における社会厚生の方が大きい、スピルオーバーの程度が1/2より大きければ協調均衡における社会厚生の方が大きい、ということが分った。

## 5. 結 論

本稿は動学モデルを用いて、2企業が第1段階で環境 R&D 投資水準を選択し、第2段階で生産量を決定する複占競争について分析した。このような状況で、微分ゲームの枠組みを用いて open-loop ナッシュ均衡と協調均衡における環境 R&D 資本水準及び社会厚生を求め、その比較を行った。

本稿の分析によって、次のような結果が得られた。

- (1) 各企業の open-loop ナッシュ均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準は、排出税率の上昇、スピルオーバーの程度の下落、割引率の下落、及び環境 R&D 投資費用の下落によって増加する。
- (2) 各企業の協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準は、排出税率の上昇、スピルオーバーの程度の上昇、割引率の下落、及び環境 R&D 投資費用の下落によって増加する。
- (3) open-loop ナッシュ均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準と協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準を比較すると、スピルオーバーの程度が $1/2$ より大きければ、協調均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準の方が大きくなり、スピルオーバーの程度が $1/2$ より小さければ、open-loop ナッシュ均衡における定常状態の環境 R&D 資本水準の方が大きくなる。
- (4) 定常状態において、open-loop ナッシュ均衡では、スピルオーバーの程度が $1/2$ より小さいときにはスピルオーバーの程度の増加とともに社会厚生が増加するが、スピルオーバーの程度が $1/2$ より大きいときにはスピルオーバーの程度の増加とともに社会厚生が減少する。協調均衡では、スピルオーバーの程度の増加とともに社会厚生が増加する。また、スピルオーバーの程度が $1/2$ より小さければ open-loop ナッシュ均衡における社会厚生の方が大きい、スピルオーバーの程度が $1/2$ より大きければ協調均衡における社会厚生の方が大きくなる。

最後に、本稿のモデルを拡張する方法を示す。まず、本稿で扱ったような open-loop 戦略だけでなく、closed-loop 戦略についても扱う必要がある。また、地球温暖化や酸性雨など、多国間にわたる環境問題を考察するために、国際寡占競争の状況についても扱うべきである。これらの点に関して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

- Barrett, S. (1994), 'Strategic Environmental Policy and International Trade,' *Journal of Public Economics*, vol.54, pp.325-338.
- Brander, J.A. and B.J. Spencer (1985), "Export Subsidies and International Market Share Rivalry," *Journal of International Economics*, vol.18, pp.83-100.
- Cheng, L.K. (1987), "Optimal Trade and Technology Policies: Dynamic Linkages," *International Economic Review*, vol.28, no.3, pp.757-776.
- Chiou, J.R. and J.L., Hu (2001), 'Environmental Research Joint Ventures under Emission Taxes,' *Environmental and Resource Economics*, vol.20, pp.129-146.
- Conrad, K. (1993), 'Taxes and Subsidies for Pollution-Intensive Industries as Trade Policy,' *Journal of Environmental Economics and Management*, vol.25, pp. 121-135.
- Conrad, K. (2001), 'Voluntary Environmental Agreements vs. Emission Taxes in Strategic Trade Models,' *Environmental and Resource Economics*, vol.19, pp.361-381.
- d'Aspremont, C. and A. Jacquemin (1988), "Cooperative and Noncooperative R&D in Duopoly with Spillovers," *American Economic Review*, vol.78, pp.1133-1137.
- Dockner, J. and G. Feichtinger (1996), "On the Optimality of Limit Cycles in Dynamic Economic Systems," *Journal of Economics*, vol.53, No.1, pp.31-50.
- Dockner, E., Jorgensen, J., Long, N.V. and G. Sorger (2000), *Differential Games in Economics and Management Science*, Cambridge University Press.
- Eicher, T.S. and S.J. Turnovsky (1999), "Convergence in a Two-Sector Nonscale Growth Model," *Journal of Economic Growth*, vol.4, pp.413-428.
- Figuières, C., Garderes, P., Michel, P. and F. Rychen (1999), "The Dynamics of the Strategic Capital Accumulation," *Annals of Operations Research*, vol.88, pp. 291-307.
- Kamien, M.I. and N.L. Schwartz (1991), *Dynamic Optimization: The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management (2nd Edition)*, North-Holland.
- Katsoulacos, Y. and A. Xepapadeas (1996), '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.
- Kort, P.M. (1996), "Pollution Control and the Dynamics of the Firm: The Effects of Market-Based Instruments on Optimal Firm Investments," *Optimal Control Applications & Methods*, vol.17, pp.267-279.
- Petit, M.L. and B. Tolwinski (1999), "R&D cooperation or competition?," *European Economic Review*, vol.43, pp.185-208.
- Petrakis, E. and J. Poyago-Theotoky (2002), 'R&D Subsidies versus R&D Cooperation in a Duopoly with Spillovers and Pollution,' *Australian Economic Papers*, vol. 41, issue 1, pp. 37-52.
- Poyago-Theotoky, J. and K. Teerasuwannajak (2002), 'The Timing of Environmental Policy: A Note on the Role of Product Differentiation,' *Journal of Regulatory Economics*, vol. 21, issue 3, pp.305-316.
- Qiu, L.D. and Z.G. Tao (1998), "Policy on International R&D Cooperation : Subsidy or Tax?," *European Economic Review*, vol.42, pp.1727-1750.
- Reynolds, S.B. (1987), "Capacity Investment, Preemption and Commitment in an Infinite Horizon Model," *International Economic Review*, vol.28, no.1, pp.69-88.
- Seierstad, A. and K. Sydsaeter (1987), *Optimal Control Theory with Economic Applications*, North-Holland.
- Spencer, B.J. and J.A. Brander (1983), "International R&D Rivalry and Industrial Strategy," *Review of Economic Studies*, vol.50, pp.707-722.
- Stimming, M. (1999), "Capital Accumulation subject to Pollution Control: Open-loop versus Feedback Investment Strategies," *Annals of Operations Research*, vol. 88, pp.309-336.
- Suzumura, K. (1992), "Cooperative and Noncooperative R&D in an Oligopoly with Spillovers," *American Economic Review*, vol.82, pp.1307-1320.
- Tanguay, G. A. (2001), 'Strategic Environmental Policies under International Duopolistic Competition,' *International Tax and Public Finance*, vol.8, pp. 793-811.
- Ulph, A. (1996), 'Environmental Policy and International Trade When Government and Producers Act Strategically,' *Journal of Environmental Economics and Management*, vol.30, pp.265-281.
- Waltz, U. and D. Wellisch (1997), 'Is free trade in the interest of exporting countries when there is ecological dumping?,' *Journal of Public Economics*, vol.66, pp.275-291.