日本経済政策学会西日本部会
OnLine ワーキングペーパーシリーズ No.10
Japan Economic Policy Association Nishi-Nippon Branch
OnLine Working Paper Series

環境技術供与と国際協調のスーパーゲーム

Super-game with Environmental Technology Grant
and International Cooperation

林　祖宝（久留米大学大学院比較文化研究科後期博士課程）
Zubao LIN
Graduate School of Comparative Studies of International Cultures and Societies,
Kurume University

2021 年 4 月 22 日

日本経済政策学会西日本部会
Japan Economic Policy Association
Nishi-Nippon Branch

環境技術供与と国際協調のスーパーゲーム

Super-game with Environmental Technology Grant and International Cooperation

林 祖宝（久留米大学大学院比較文化研究科後期博士課程）

Zubao LIN, Graduate School of Comparative Studies of International Cultures and Societies, Kurume University

要約

本稿は、環境汚染物質削減の技術革新に注目し、先進国から発展途上国への環境技術供与について分析する。その際、問題となるのは、技術革新は技術の進化的・動的変化をもたらすという点である。すなわち、新技術の開発は更なる新技術を誘発する。このとき、モデルは動学的文脈で構成されなくてはならない。そこで、本稿では、ゲームの進行とともに利得が変化するスーパーゲームを採用し、これに、環境保持の新技術および生産性向上の新技術の継続的登場という状況を組み込んでモデルを構成する。そして、このような状況の中で、環境汚染防止のために継続的国際協調が発生する条件を考察する。得られる結論は、国際協調を維持するためには、環境技術の供与に加え、生産性向上のための継続的技術供与が必要であるという点である。

Abstract

This paper studies international cooperation regarding environmental technology grant. New environmental technologies are caused by innovations. However, the process of innovation is described by dynamical and evolutional ones. Therefore, the model should be constructed by dynamical and evolutional one. We construct our model by super-game and demonstrate that continuous technology grants not only of environmental one but also of industrial one which raises productivity are necessary for international cooperation to be supported.

キーワード：　環境技術供与、国際協調、スーパーゲーム、囚人のジレンマ

Keywords： Environmental technology grant, International cooperation, Super-game, Prisoner's Dilemma

JEL 区分： C72 , F63, F64, O10, Q55 , Q58

１．はじめに

本稿は、環境汚染物質削減の技術革新に注目し、先進国から発展途上国への環境技術供与について分析する。その際、問題となるのは、技術革新は技術の恒常的動的変化をもたらすという点である。すなわち、新技術の開発は更なる新技術を誘発する。このとき、モデルは動学的文脈で構成されなくてはならない。そこで、本稿では、スーパーゲームを採用し、新技術の継続的登場を想定して、環境技術供与と国際協調の可能性を分析する。

越境汚染に関する環境問題では、中国からの PM2.5 飛来の問題に象徴されるように、隣国の経済発展による環境汚染が注目されている。しかし、近年の環境汚染問題の深刻化は、隣国からの環境汚染物質の飛来に留まらず、地球温暖化効果ガスの排出に象徴されるような地球規模の環境破壊を引き起こしている。そして、このような状況を地球規模で観察するならば、先進国（以下、N 国とよぶ）および発展途上国（以下、S 国とよぶ）のバランスのとれた持続可能な経済発展の構造を構築することが不可避であることは明白である。もちろん、ここで議論される持続可能な経済発展とは、N 国と S 国のバランスのとれた環境保全を前提とするが、このバランスを構築するためには、環境技術開発能力を持つ N 国とこれを持たない S 国の国際的協調が必要となることも明白である。この国際協調が本稿の主題であるが、現実的には、この環境技術供与の形態は多様である。たとえば、生産ラインにおける CO_2 削減の技術の供与がその象徴として取り上げられるが、その一方で、中国における自動車産業の合弁事業の拡大、それにともなう電気自動車などの環境技術の移転など、技術供与の形態は多種・多様である。すなわち、技術革新は多様かつ複雑であり、その分析は動学的枠組みの中で分析されなくてはならない。

そこで、このような視座を持ちつつ、理論的にこの環境協調問題が経済システムの中で如何に分析されてきたのかを見てみよう。この分野での業績はもちろん多数存在するが、その多くは、視点を地球規模に置き、モデルをいわゆる 2 国モデル（すなわち南北問題の枠組み）を用いて分析がなされてきた。この多数ある先行論文の中で、排出量と経済成長の問題を取り扱った基本的モデルとしてわれわれは Stokey [1998]に注目する。このモデルは、閉鎖経済において、汚染物質の排出（負効用）をともなう経済において、個人の効用関数を最大化するという基本的モデルである。この分析の中では、一人当たりの資本ストック量と排出に関する考察が行われ、環境クズネッツ曲線の導出などが行われている。ただし、このモデルは静学モデルであり、その後、伊ヶ崎 [2004]によって最適制御の文脈でモデルが再構築され、動学モデルとして分析の新たな道が開かれた。しかしながら、前述のように、問題は所謂南北問題の視野で分析されなくてはならない。この分野の研究では、グローバルな視点より越境汚染や温室効果ガスの問題が取り上げられてきた。具体的には、たとえば、Hagem [1996]、藤田康範 [1997]、Wirl et al. [1998]などをあげることができるが、これらのモデルでは、先進国に対し、一定の排出物削減が義務付けられ、その中で分析が行われている。ただし、ここでは、環境技術に対する技術革新の視野が導入されていないという欠点が指摘される。

このような中で、Stokey [1998]を用いて、これを南北問題モデルに拡張しようとした試みもなされている（伊ヶ崎 [2004]）。伊ヶ崎 [2004]は、N 国と S 国を設定し、S 国の環境汚染物質排出の規制に対し、N 国が、この排出規制で失われた生産額を補填するという設定で、国際協調のゲームモデルを構成している。このモデルは静学ゲームの枠組みで構成されているが、その中で、囚人のジレンマが発生することが証明されている。そして、その上で、伊ヶ崎 [2004]は最適制御理論を用いてこれを動学化し、国際協調が可能となる諸条件を分析している。

このような状況の中で、近年の環境保全と国際協調の業績を概観しよう。まず、環境汚染と国際協調を、動学的モデルを用いて考察した業績として藤田敏之 [1997]などが挙げられる。ここでは、削減率に応じた削減コスト（すなわち、削減技術に関する投資）の軽減という形で越境汚染物質削減技術を導入し、動的計画すなわちベルマン方程式を用いてモデル解析を行っている。この業績では、モデルのシミュレーションも実施され、ゲーム分析による国際的な援助

によって削減される範囲での最適な CO_2 の均衡削減率を推定している[1]。この業績も、動学モデルによる国際協調を解析しているという点で高く評価されているが、多様に進化する技術革新および S 国自体の生産技術の改善という視点は取り入れられていない。以上、国際環境協調の業績を概観してきたが、さらに、近年の技術革新、技術供与および国際協調に関する近年の重要な研究として Barrett [2006]、Buchner et al. [2005]および Golombek ,R and M.Hoel [2004]などが取り上げられる。これらの業績はいずれも、技術革新および技術供与を視野に入れた環境保持を分析しているが、目まぐるしく多様に進化する技術革新という現実をモデルの中に食い込むことはできていない。したがって、本稿は、これらの点を取り込んで、国際協調の可能性を分析することを目的とする。

このような問題意識に立ち、改めて伊ヶ崎 [2004]を応用したモデルの開発に取り組む。本稿でわれわれが問題としたのは、上述の 1 期ゲームにおける囚人のジレンマの発生である。すなわち、N 国と S 国のゲームにおいて、環境汚染物質抑制に関する協調戦略が高い効用をもたらすのにもかかわらず、両国は非協力のナッシュ均衡点をプレイするという状況である。これに関しては、われわれはいくつかの問題点に突き当たった。

まず、第 1 点は、囚人のジレンマの解消についてである。通常単純な繰り返しゲームを考えると、ナッシュ均衡点を罰則経路として、協調戦略を完全均衡経路として支えることができる。しかし、いまわれわれは持続可能な経済発展を問題としているのであるから、経済成長を視野に入れてモデルを構成しなくてはならない。すなわち、単純な繰り返しゲームは考察の対象外である。このとき、たとえば、第 2 節で分析するように、一人あたりの資本蓄積が増加する中で、協調戦略が返って排出量を増やしてしまう可能性があることが指摘される。このとき、囚人のジレンマゲーム自体が構成されなくなる。このような事態がなぜ発生するのかは第 2 節の分析に譲るが、その根本的原因は、技術革新の欠如にあることはこの時点で指摘しなくてはならない。すなわち、環境汚染物質制御技術に関わる技術革新が皆無で、保障移転のみで国際協調を持続することは不可のであるという結論に至る。

われわれが直面した第 2 の点は、たとえ囚人のジレンマが単純に繰り返される状況が発生したと仮定しても、囚人のジレンマが解消されるためには、それは無限の繰り返しゲームでなくてはならないという点である。すなわち、プレイされる期間に終期があるとき、非協力ナッシュ均衡点の経路がプレイされることとなる。

このような問題意識に基づくと、国際協調を引き出すためには、環境保持の新技術および生産性向上の新技術の継続的登場が不可欠となることが推測されるが、このような状況でモデルを構成すると、従来型の最適制御理論ではこれをモデル化することは不可であることが分かる。そこで、本稿では、ゲームの進行とともに利得が変化するスーパーゲームを採用し、これに、環境保持の新技術および生産性向上の新技術の継続的登場という状況を組み込んでモデルを構成する。そして、このような状況の中で、環境汚染防止のために継続的国際協調が発生する条件を考察する。

２．ゲームの構成

2.1　ゲームの設定[2]

＜期間設定＞

期間分析により動学ゲームを構成する。期間を $t(=1,2,3........)$ で表す。したがって、パラメーター（定数）以外のすべての変数は期間 t の関数である。

＜プレイヤーの設定＞

まず、先進国と発展途上国を想定し、前者を N 国、後者を S 国とよぶ（以下、$i=$N、S などと書く）。そして各国の生産関数を次のように規定することにしよう。

[1] 藤田敏之［1997, p. 250]

[2] 2.1 節と 2.2 節は伊ヶ崎 [2004, pp. 170-172]による。ただし、本稿に含まれる誤謬はすべて筆者に帰す。

$$Y_i(t)=p_i AK_i(t)z_i(t) \qquad (1)$$

ただし、$Y_i(t)$、$K_i(t)$はt期におけるi国の総産出量、資本ストック量を表し、p_iは両国における技術の違いを表すパラメータで、$p_N > p_S(\geq 1)$とする。Aは生産性のパラメータを表す。また、ここで、$z_i(t)(\in[0,1])$はt期におけるi国の汚染に対する規制水準である。以上の準備の下で、一人あたりの産出量は次のようになる。

$$y_i(t)=p_i Ak_i(t)z_i(t) \qquad (2)$$

ただし、$y_i(t)$、$k_i(t)$はそれぞれt期におけるi国の一人あたりの産出量、資本ストックである。すなわち、t期におけるi国の総人口を$L_i(t)$とすると、$y_i(t)\equiv\frac{Y_i(t)}{L_i(t)}$、$k_i(t)\equiv\frac{K_i(t)}{L_i(t)}$となる。

つぎに、生産過程のみが汚染を発生させるものとし、汚染の排出量を表す関数$D_i(t)$を次のように規定する。

$$D_i(t)=AK_i(t)z_i(t)^{\beta} \qquad (3)$$

ただし、$D_i(t)$はt期におけるi国の総排出量である。$\beta(>1)$はパラメータである。ここで、z_iをD_iについて解き、これを生産関数(1)に代入すると、

$$Y_i(t)=p_i A^{\frac{\beta-1}{\beta}} K_i(t)^{\frac{\beta-1}{\beta}} D_i(t)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$D_i(t)=AK_i(t)z_i(t)^{\beta} \qquad (4)$$

を得る。(4)は、自国の資本ストックと自国からの排出物が生産要素として作用していると解釈される。

＜各国の消費者の消費関数＞

次に、消費者の効用$U_i(t)$を定義しよう。t期におけるi国の代表的消費者の効用関数を

$$U_i(t)=\frac{c_i(t)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-(B_1D_i(t)+B_2D_j(t)) \qquad (5)$$

で定義する。ただし、$c_i(t)$はt期におけるi国の消費量である。また、B_iはi国の国民の自国の環境汚染に対する負の効用係数を、$B_j\ (j\neq i)$はi国の国民の他国（j国）の越境環境汚染に対する負の効用係数をあらわす。$\sigma(>0)$は定数である。

2.2　国際協調が存在しないときの最適排出量

ある 1 つの期を固定しよう。いま、k_iの水準は所与であるので、社会的計画者は効用関数(5)を最大化する排出量z_iを選択する。一階の条件は、

$$\frac{dU_i}{dz_i}=(p_iAk_iz_i)^{-\sigma}p_iAk_i-\beta B_1Ak_iL_iz_i^{\beta-1}\geq 0 \qquad (6)$$

である。ただし、$z_i\in$[0、1]である。したがって、国際的な協調が存在しないときのi国の最適排出量z_i^*は、

$$z_i^*=\begin{cases}1, & (k_i\leq k_{i\sigma})\\ (\beta B_1L_i)^{-h}(Ak_i)^{-\sigma h}p_i^{(1-\sigma)h}, & (k_i>k_{i\sigma})\end{cases} \qquad (7)$$

となる。ただし、$h=\dfrac{1}{\beta-1+\sigma}(>0)$、$k_{i\delta}=p_i^{\frac{1-\sigma}{\sigma}}A^{-1}(\beta B_1 L_i)^{-\frac{1}{\sigma}}$である。(7)より、$z_i^*<1$ すなわち$k_i>k_{i\sigma}$の範囲では、$\partial^2 z_i^*/\partial k_i^2>0$である。

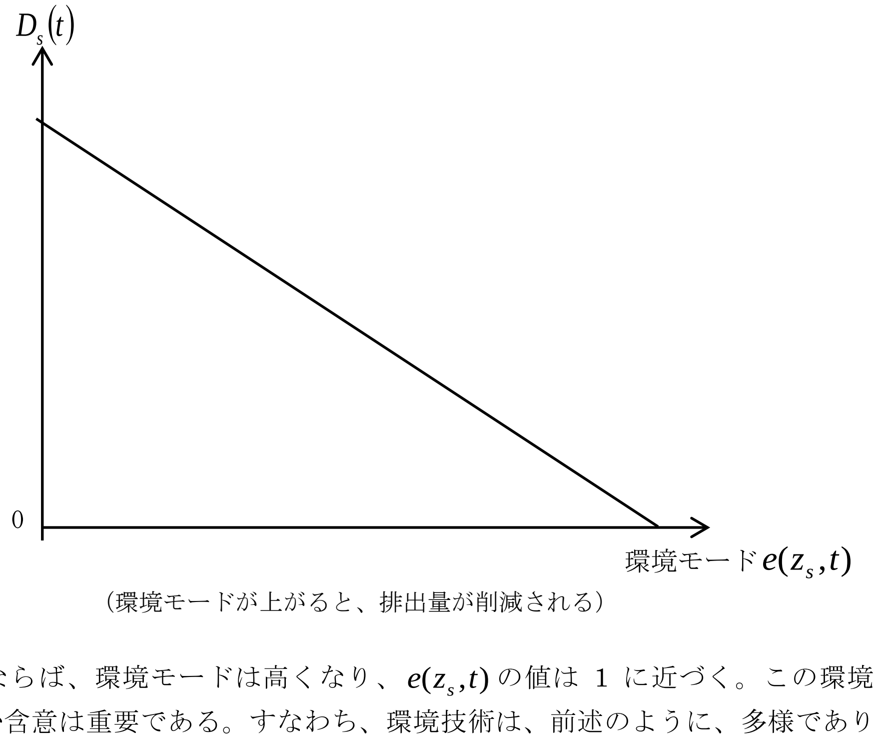
2.3 環境汚染防止技術供与と汚染物質の排出

N 国は常に環境汚染防止技術に関する技術革新を起こしており、これらの新技術を毎期 S 国に提供することができるものとする。そして、N 国が S 国にt期において環境汚染防止技術を供与する事象を$e_0(t)=1$、技術供与をしない事象$e_0(t)=0$で表す。そして、 S 国においてt期に実現する環境維持水準（環境モード）$e(z_s,t)$を、

$$e(z_s,t)=1-\lambda(t)z_S(t) \qquad \text{（ただし、}\lambda(t)=\frac{1}{\left\{1+\sum_{m=1}^{t}e_0(m)\right\}^{\varepsilon}}\text{）} \tag{8}$$

で定義する。ただし、$\varepsilon(\in(0,1))$は十分小さい定数とする。(8)は、S 国の生産水準が$z_S(t)$であるとき、汚染物質除去技術の供与$\sum_{m=1}^{t}e_0(m)$により、これを実質的に削減し、環境水準を維持する 1 つの指標を示したものである。たとえば、技術供与ゼロ（すなわち$\sum_{m=1}^{t}e_0(m)=0$）で、$z_S(t)=1$（すなわち、フル生産）ならば、環境モードは$e(z_s,t)=0$である。一方、$\sum_{m=1}^{t}e_0(m)=t$

図 2.1 環境モードと排出量



（環境モードが上がると、排出量が削減される）

で、$z_S(t)<1$ならば、環境モードは高くなり、$e(z_s,t)$の値は 1 に近づく。この環境モード$e(z_s,t)$が含む含意は重要である。すなわち、環境技術は、前述のように、多様であり多岐にわたる。そして、われわれはこの状況を、単なる有限個の環境技術の供与ではなく、マクロ経済的視点でとらえなくてはならない。さまざまな分野の新技術が、たとえば、第 1 期から第t

期まで、さまざまな生産過程に投入されたとすると、汚染物質除去技術供与を$\sum_{m=1}^{t} e_0(m)$でこの新技術投入を表現し、これを用いてマクロ経済学的視座で S 国の環境モードを定義している。すなわち、多様多岐に渡る環境状態を環境モードとして定義する。そして、t 期における S 国の環境モードが$e(z_s, t)$であるとき、S 国の排出量$D_s(t)$は、

$$D_s(t) = d_0 - d_1 e_0(z_S, t) \quad (9)$$

で表されるものとする。(10)のグラフを図 2.1 に示す。また、d_0, d_1は正の定数である。(8)および(9)より、

$$D_s(t) = d_0 - d_1(1 - \lambda(t) z_S(t)) \quad (10)$$

となる。

2.4 環境技術供与と特許の放棄（ゲームのルール）

N 国における技術革新には多大な研究開発費がかかっており、新技術の移転には特許の要求がともなう。そこで、われわれは、N 国は毎期、環境術供与（$e_0(t) = 1$）を採用し、その見返りとして、特許料を要求する権利を得るものとする。そして、第t期における特許請求額を$P(t)$で表す。すなわち、N 国の戦略は、技術供与は毎期行った上で、「特許料の請求を行う」あるいは「これを放棄する」と表されるものとする。

＜協定 1＞　t 期において、N 国が特許料$P(t)$を放棄した場合、S 国は以下の(11)にしたがって汚染に対する規制数準$z_S^{**}(t)$を決定するものとする。

$$p_s A k_S(t) = p_S A k_S(t) z_S^{**}(t) + \frac{L_N}{L_S} P(t) \quad (11)$$

(11)の協定が結ばれると、S 国の協調戦略は、

$$Z_s^{**}(t) = 1 - \frac{L_N}{p_S A k_S L_S} P(t) \quad (12)$$

となる。

2.5 各国のt期における効用

以上の準備のもとで、各国の効用関数を計算しよう。$U_i^t(\cdot\, s_N^t, s_S^t)$は$t$期における$i$国の効用関数を表すものとする。ただし、$s_i^t$は$t$期における$i$国の戦略を示す。

まず、協定 1 が遵守されているときの N 国の効用関数$U_N^t(1, z_s^{**})$は、(5)および(10)より、

$$U_N^t(1, z_s^{**}) = \frac{(p_N A k_N z_N^*)^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \left[B_1 p_N A K_N z_N^{*\beta} + B_2 \left\{d_0 - d_1\left(1 - \lambda(t) z_S^{**}(t)\right)\right\}\right] \quad (13)$$

となり、同じく、協定 1 が遵守されている場合の S 国の効用関数$U_S^t(1, z_s^{**})$は、

$$U_S^t(1, z_s^{**}) = \frac{(p_S A k_S z_s^{**}(t))^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \left[B_2 p_S A K_N z_N^{*\beta} + B_1 \left\{d_0 - d_1\left(1 - \lambda(t) z_S^{**}(t)\right)\right\}\right] \quad (14)$$

となる。ただし、$s_N^t = 1$は N 国の特許放棄戦略を示す。一方、S 国がt期に協定 1 から逸脱した場合の N 国の効用関数$U_N^t(1, z_s^*)$は、

$$U_N^t\left(1,z_s^*\right)=\frac{(p_N Ak_N z_N^*)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-\left[B_1 p_N AK_N z_N^{*\beta}+B_2\left\{d_0-d_1\left(1-\lambda(t)z_S^*(t)\right)\right\}\right] \quad (15)$$

となる。同じく、このときのS国の効用関数$U_N^t\left(1,z_s^*\right)$は、

$$U_S^t\left(1,z_s^*\right)=\frac{(Ak_S z_s^*)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-\left[B_2 AK_N z_N^{*\beta}+B_1\left\{d_0-d_1\left(1-\lambda(t)z_S^*(t)\right)\right\}\right] \quad (16)$$

となる。次に、S国が協定1を遵守した状況で、t期にN国がこの協定から逸脱し、新技術供与に対する特許料を要求した場合、 N国の効用関数$U_N^t\left(0,z_s^{**}\right)$は、

$$U_N^t\left(0,z_s^{**}\right)=\frac{(p_N Ak_N z_N{}^* +(\sum_{m=0}^{t-1}P(t)/L_N)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-\left[B_1 p_N AK_N z_N^{*\beta}+B_2\left\{d_0-d_1\left(1-\lambda(t)z_S^{**}(t)\right)\right\}\right]$$

(17)

であり、このときのS国の効用関数$U_S^t\left(0,z_s^{**}\right)$は、

$$U_S^t\left(0,z_s^{**}\right)=\frac{(p_S Ak_S z_S{}^{**}(t)-(\sum_{m=0}^{t-1}P(t)/L_N)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-\left[B_2 p_S AK_N z_N^{*\beta}+B_1\left\{d_0-d_1\left(1-\lambda(t)z_S^{**}(t)\right)\right\}\right]$$

(18)

となる。ただし、$s_N^t=0$はN国の特許料要求戦略を示す。最後に、N国およびS国がともにt期に協定1を離脱した場合、N国およびS国の効用関数は、それぞれ、

$$U_N^t\left(0,z_s^*\right)=\frac{(p_n Ak_N z_n^* +(\sum_{m=0}^{t-1}P(t)/L_N)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-\left[B_1 p_N AK_N z_N^{*\beta}+B_2\left\{d_0-d_1\left(1-\lambda(t)z_S^*(t)\right)\right\}\right]$$

(19)

$$U_S^t\left(0,z_s^*\right)=\frac{(p_S Ak_N z_S^* -\sum_{m=0}^{t-1}P(t)/L_n)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-\left[B_2 p_S AK_N z_N^{*\beta}+B_1\left\{d_0-d_1\left(1-\lambda(t)z_S^*(t)\right)\right\}\right]$$

(20)

となる。

３．分析

3.1　戦略の分析； 協調ゲームが維持されるための環境分析

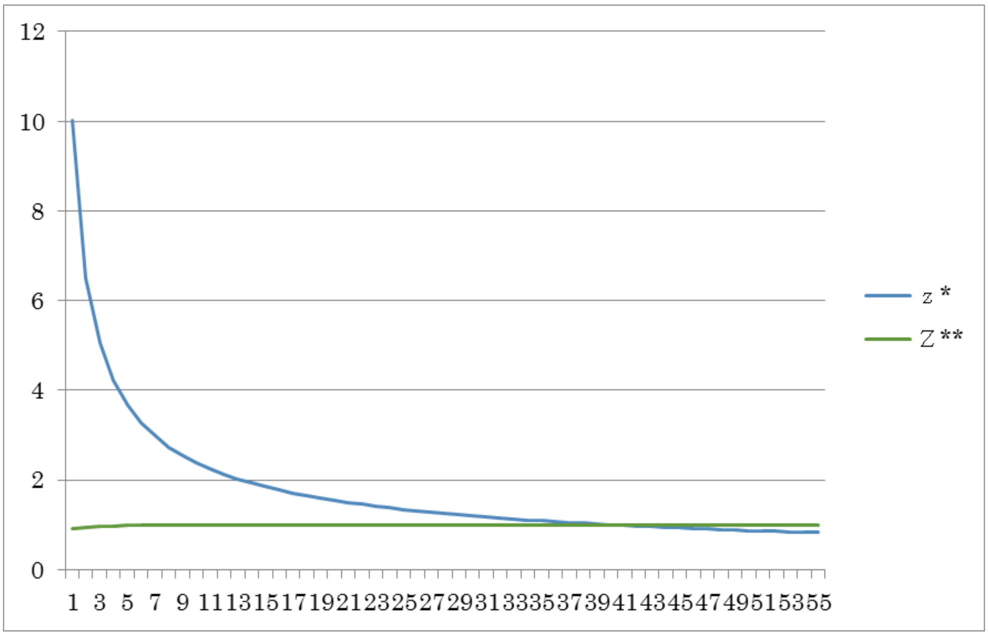
ゲームの分析に入る前に、各国の戦略分析をしよう。なぜなら、(7)および(12)における戦略は、一人当たり資本量k_tの関数であるからである。すなわち、z_S^{**}およびz_S^*は資本蓄積の増加とともに変化する。そして、これらの戦略に対し、経済学的に意味のある戦略として要求される条件は、$z_S^{**}<z_S^*$である。すなわち、$z_S^{**}\geq z_S^*$であるならば、排出は協定によってかえって増加する。以下、この条件について考察しよう。

まず、(7)および(12)より、

$$\frac{\partial z_t^*}{\partial k_t}<0、\frac{\partial z_t^{**}}{\partial k_t}>0、\lim_{k_t\to 0} z_i^*=+\infty、\lim_{k_t\to 0} z_i^{**}=-\infty、\lim_{k_t\to\infty} z_i^*=0、\lim_{k_t\to\infty} z_i^{**}=1$$

であるので、図 3.1 に示すように、資本蓄積が進んで一人当たり資本量k_tが大きくなると、いずれ$z_S^* < z_S^{**}$となる。すなわち、資本蓄積が進むと、協調戦略z_s^{**}の意味が無くなり、ゲームを構成すること自体が無意味となる。このような事態が発生することを防ぐためには、z_i^*およびz_s^{**}に含まれるパラメータが変化する以外に方法はない。これに関しては次の命題を得る。

図 3.1　z_i^*とz_s^{**}のグラフ



$\beta = 0.9$　$B_1=0.01$　$B_2=0.01$　$L_S=100$　h=1.25　A=1　$\alpha = 0.9$　$\sigma = 0.5$
P=1　Ln=10　$d_0=1$　$d_1=100$　Σe=2

命題 3.1　資本蓄積が進んでk_Sの値が増加するとき、戦略に関し$z_S^* > z_s^{**}$を維持するためには、パラメータに関し次の 3 つの条件が要求される。

(i) 環境技術が N 国において継続的に開発され、環境技術に対する特許料$P(t)$の増加率が資本量k_Sの増加率より大きくなる。

(ii) 生産技術に関する技術革新が継続的に発生して、新生産技術が S 国に供与され、S 国の生産性を示すパラメータ p_Sの減少率が資本量k_Sの増加率より大きくなる。

(iii) N 国と S 国の人口比率L_N / L_Sが大きくなる。

（証明）(12)式より明らか。　（証了）

この命題における(i)および(ii)は継続的な技術革新とその S 国への供与を要求している。すなわち、生産技術および環境技術の継続的開発がなければ、環境保持のための協調自体を維持することができなくなり、ゲームが成立しなくなる。

3.2　スーパーゲームの分析

スーパーゲームを構成する各期の 1 期ゲームの利得表を解析しよう。第t期の各国の利得表は(13)-(20)で定義している。これを表にしたのが、表 3.1 である。前述のように、スーパーゲームにおいて協調戦略が完全均衡経路であるためには、次の条件が成立していなければならない。

(I)　すべての$t(\geq 1)$に対して、非協力戦略がナッシュ均衡点を形成していること。

(II) すべての$t(\geq 1)$に対して、囚人のジレンマが発生していること。

この２つの条件を探査することが目的である。

表 3.1　第t期における１期ゲーム

S 国 ＼ N 国	$s_S = z_S^{**}$	$s_s = z_S^*$
特許放棄 $s_N = 1$	$U_N^t(1, z_S^{**})$　$U_S^t(1, z_S^{**})$	$U_N^t(1, z_S^{*})$　$U_S^t(1, z_S^{*})$
特許要求 $s_N = 0$	$U_N^t(0, z_S^{**})$　$U_S^t(0, z_S^{**})$	$U_N^t(0, z_S^{*})$　$U_S^t(0, z_S^{*})$

s_Nおよびs_sはそれぞれＮ国およびＳ国の戦略を表す

3.2.1　ナッシュ均衡点の存在について

まず、(I)に関しては次の命題を得る。

命題 3.2　表 3.1 において定義される１期ゲームにおいて、

$$\left(s_N^t,\ s_S^t\right) = \left(0, z_s^*\right)$$

がナッシュ均衡戦略であるためには、

$$\frac{(p_S A k_S z_S^*(t) - P(t)/L_S)^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \lambda(t) B_1 d_1 z_s^*(t) >$$

$$\frac{(p_S A k_S z_S^{**}(t) - P(t)/L_S)^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \lambda(t) B_1 d_1 z_s^{**}(t) \qquad (21)$$

が成立しなくてはならない。

（証明） $U_N^t(1, z_S^*) < U_N^t(0, z_S^*)$ は明らか。また、(21)が成立していると、$U_S^t(0, z_S^{**}) <$ $U_S^t(0, z_S^*)$ となる。　（証了）

したがって、条件(I)が成立するためには、t 期において(21)を満足するＮ国の特許料$P(t)$が存在するか否かが問題となるが、この点に関して分析しよう。(21)は、

$$\frac{(p_S A k_S z_S^*(t) - P(t)/L_S)^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \frac{(p_S A k_S z_S^{**}(t) - P(t)/L_S)^{1-\sigma}}{1-\sigma}$$

$$> \lambda(t) B_1 d_1 \left(z_S^*(t) - z_S^{**}(t)\right) \qquad (21)'$$

と整理できるが、ここで、関数$f(z)$を

$$f(z_S) = \frac{\left(p_S A k_S z_S - P(t)/L_S\right)^{1-\sigma}}{B_1 d_1 (1-\sigma) \lambda(t)}$$

と定義すると、(21)'は、

$$\frac{f\left(z_S^*(t)\right)-f\left(z_S^{**}(t)\right)}{z_S^*(t)-z_S^{**}(t)}>1 \tag{22}$$

となる。ここで、$z_S^*(t)$は(7)で決定されているので、$z_S^*(t)>z_S^{**}(t)$であることに注意しつつ$z_S^{**}(t)\uparrow z_S^*(t)$とすると（すなわち、$z_S^*(t)>z_S^{**}(t)$を保ちつつ、$z_S^{**}(t)$を$z_S^*(t)$に収束させると）[3]、(22)より、

$$\lim_{z_S^{**}\uparrow z_S^*}\frac{f\left(z_S^*(t)\right)-f\left(z_S^{**}(t)\right)}{z_S^*(t)-z_S^{**}(t)}>1 \tag{23}$$

を得る。すなわち、$z_S^*(t)$の近傍において(23)が成立していれば、(21)'が成立し、したがって(21)も成立する。そこで、(23)を解析すると、

$$P(t)>\frac{L_S}{L_N+1}\left[p_S A k_S-\frac{\left(p_S A k_S\right)^{\frac{1}{\sigma}}}{\lambda(t)B_1 d_1}\right] \tag{24}$$

を得る。ただし、(24)において$P(t)>0$でなくてはならないので、

$$\lambda(t)B_1 d_1 p_S A k_S>\left(p_S A k_S\right)^{\frac{1}{\sigma}} \tag{25}$$

が成立しなくてはならない。(25)の左辺は効用関数における環境技術供与を加味した上での排出に関する負効用を表わす。(25)は、これが S 国の生産フル稼働下（$z_S^t=1$）での生産額の$1/\sigma$乗より大きいことを要求している。そして、(24)は、(25)の左辺と右辺の差に各国の人口比を掛けたものより大きい特許額が必要であることを示している。なお、(25)はさらに、

$$\lambda(t)B_1 d_1>\left(p_S A k_S\right)^{\frac{1}{\sigma}-1} \tag{26}$$

と整理される。以上の分析を以下の命題に収める[4]。

命題 3.3　t期の 1 期ゲームにおいてナッシュ均衡点が存在するためには、(24)を満足する特許料$P(t)$が設定されなくてはならない。

条件(24)に関する条件に関しては、この条件が(23)の分析仮定における$z_S^{**}(t)\uparrow z_S^*(t)$のプロセスと両立できるか否かの問題が残る。この両立が成り立たないときは、ナッシュ均衡点は存在しない。以下では、時間を通して両者のプロセスが両立していることを前提として論を進める。

3.2.2　囚人のジレンマについて

命題 3.2 より、1 期ゲームに N 国および S 国ともに協定を破棄する戦略がナッシュ均衡点となる。すなわち、1 期ゲームでは協調戦略は選択されない。ただし、いま、われわれはスーパーゲームを構成しているので、環境汚染防止の協調戦略$\left(1, z_s^{**}\right)$が問題となるのは、このゲームにおいて囚人のジレンマが発生しているかどうかである。なぜならば、後でも分析するように、各期のゲームにおいて囚人のジレンマが発生していなければ、スーパーゲームにおいて、ナッシュ均衡が選択される戦略の経路が完全均衡経路となり、国際協調はすべての期において実現しない。すなわち、各期のゲームにおいて囚人のジレンマが発生していると、各期のゲー

---

[3] $z_s^{**}(t)\uparrow z_s^*(t)$は単に数学的解析のための記述であり、モデルが表す経済において、$z_S^{**}(t)$ が$z_S^*(t)$に収束することはない。

[4] ナッシュ均衡が存在するためには、p_sは(26)を満足する水準でなくてはならない。

ムにおけるナッシュ均衡を協調戦略からの逸脱に対する罰則として利用でき、いわゆる、おどし戦略(Theat Strategy)により、各期の協調戦略から構成される経路が完全均衡経路として成立するからである。この囚人のジレンマが発生する条件については以下の命題を得る。

命題 3.4 表 3.1 で定義される 1 期ゲームにおいてにおいて囚人のジレンマが発生するためには、N 国の特許料$P(t)$に関し、次の条件が成立していればよい[5]。

$$\frac{P(t)}{L_N} < \left[\lambda(t)B_2 d_1(1-\sigma)\left(z_s^*(t)-z_s^{**}(t)\right)+\left(p_N Ak_N z_N^*(t)\right)^{1-\sigma}\right]^{\frac{1}{1-\sigma}} - \left(p_N Ak_N z_N^*(t)\right) \quad (27)$$

$$\frac{P(t)}{L_S} > \left(p_S Ak_S z_S^*(t)\right) - \left[\lambda(t)B_1 d_1(1-\sigma)\left(z_s^*(t)-z_S^{**}(t)\right)+\left(p_S Ak_S z_S^{**}(t)\right)^{1-\sigma}\right]^{\frac{1}{1-\sigma}} \quad (28)$$

（証明）囚人のジレンマが発生するためには、N 国に関し、$U_N^t\left(1, z_s^{**}\right) > U_N^t\left(0, z_s^*\right)$でなければならない。すなわち、

$$\frac{(p_N Ak_N z_N^*)^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \lambda(t)B_2 d_1 z_s^{**}(t) > \frac{(p_N Ak_N z_N^* + P(t)/L_N)^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \lambda(t)B_2 d_1 z_s^*(t)$$

である。これを整理すると、(27)を得る。一方、S 国に関しては、囚人のジレンマが発生するためには、$U_S^t\left(1, z_s^{**}\right) > U_S^t\left(0, z_s^*\right)$を必要とする。すなわち、

$$\frac{(p_S Ak_S z_S^{**})^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \lambda(t)B_1 d_1 z_S^{**}(t) > \frac{(p_S Ak_S z_S^* - P(t)/L_S)^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \lambda(t)B_1 d_1 z_s^*(t)$$

である。これを整理すると、(28)となる。（証了）

このように、囚人のジレンマが発生するためには(27)および(28)が成立していなくてはならない。これらの条件は、それぞれ、N 国および S 国における一人当たり特許料に関する条件である。これらに合わせて、ナッシュ均衡点が存在するために条件(26)が成立していなければならない。ただし、ここで、(26)および(28)おいて、一人当たり資本量がk_Sであるのに対し、(27)においては、それがk_Nであることに注意しよう。すなわち、各国の資本蓄積スピードは相違しており、一般的には、$k_N > k_S$である。

次節において国際協調が整理するためには、(26)、(27)および(28)が各期において成立していなければならないことを証明するが、われわれはこの 3 つの条件が各期において成立していることを前提として国際協調の可能性を分析する。

3.2.3 スーパーゲームにおける完全均衡経路とトリガー戦略

第t期の利得表が表 3.1 で定義されるスーパーゲームを考えよう。まず、スーパーゲームを正確に定義しよう[6]。

t期においてプレイされるゲーム$\Gamma_t = \left(N^t, S^t, U^t\right)$を考える。ここで、$N^t$は$t$期におけるプレイヤー集合で、すべての$t$において$N^t$ =（N 国、S 国）である。$S^t\left(=\left(S_N^t, S_S^t\right)\right)$はプレイヤーの戦略空間である。$S_N^t$および$S_S^t$はそれぞれ$t$期における N 国および S 国の戦略空間で、すべてのtにおいて、

S_N^t =｛特許料$P(t)$を放棄、特許料$P(t)$を要求｝（$= \left\{AP^t, RP^t\right\}$）

[5] (27)および(28)を満たすL_NおよびL_Sが問題となる。すなわち、(27)および(28)は、L_NおよびL_S が満たさなければならない条件を規定する。

[6] スーパーゲームの定義については、細江守紀編 [1989]第 6 章を参照せよ。

$$S_S^t = \left\{ z_S^{**}(t) \, , \, z_S^{*}(t) \right\}$$

と定義する。また、t 期における利得関数U^tは、$U^t = \left(U_N^t, U_S^t \right)$で定義される。

つぎに、$\Gamma_t = \left(N^t, S^t, U^t \right)$を用いてスーパーゲームを構成しよう。まず、戦略はクローズド・ロープ戦略を用いる。すなわち、t 期の戦略は$t-1$期以前の各プレイヤーの（すなわち過去の）戦略の関数として定義する。また、このスーパーゲームでは各期に N 国からの環境技術供与があることを前提とする（すなわち、技術供与は N 国の戦略ではない）。N 国の戦略は各期に特許を放棄するか否かである。各国の戦略が次期の利得表に影響を与えないので、スーパーゲームは時間依存性のないゲームとして定義される。そして、次のような戦略の経路$\left(s_N^{t\,*}, s_S^{t\,*} \right)$（$(t = 1, \ldots\ldots\ldots)$）を考える。

$$s_N^{t\,*} = \begin{cases} AP^t \quad if \;\; h_i = \left(AP^t, z_S^{**}(i) \right), \quad \forall i (= 1, \ldots., t-1) \\ \\ RP^t \quad if \quad h_i = \left(AP^i, z_S^{*}(i) \right), \quad \exists i (= 1 \ldots., t-1)) \end{cases} \tag{29}$$

$$s_S^{t\,*} = \begin{cases} z_S^{**}(t) \quad if \;\; h_i = \left(AP^t, z_S^{**}(i) \right), \quad \forall i (= 1, \ldots., t-1) \\ \\ z_S^{*}(t) \;\; if \quad h_i = \left(RP^i, z_S^{**}(i) \right), \quad \exists i (= 1 \ldots., t-1)) \end{cases} \tag{30}$$

このとき、戦略の経路$\left(s_N^{t\,*}, s_S^{t\,*} \right)$に関し次の命題を得る。

命題 3.5　トリガー戦略と完全均衡経路

すべての期間tにおいて、(26)、(27)および(28)が成立しているとき、戦略の経路$\left(s_N^{t\,*}, s_S^{t\,*} \right)$はスーパーゲームの完全均衡経路となる。

（証明）戦略の経路$\left(s_N^{t\,*}, s_S^{t\,*} \right)$はトリガー戦略である。すなわち、すべての期間$t$において、それまでに選択された過去の戦略が$\left(AP^i, z_S^{**}(i) \right)$（$(i = 1, \ldots., t-1)$）を逸脱しているとき、各プレイヤーは、それ以降、1 期ゲームのナッシュ均衡点を罰則経路として選択する。また、この罰則経路は 1 期ゲームのナッシュ均衡点で構成されているので、この戦略の経路がサブゲームの完全均衡経路を形成する。（証了）

3.2.4　完全均衡経路消滅の可能性とこれを維持する条件

以上、無期間のスーパーゲームについて考察してきたが、命題 3.5 がすべての期間tにおいて、(26)、(27)および(28)を前提としていることを再度確認しよう。この条件はいくるかの重要な要素を含んでいる。以下、この点を考察しよう。

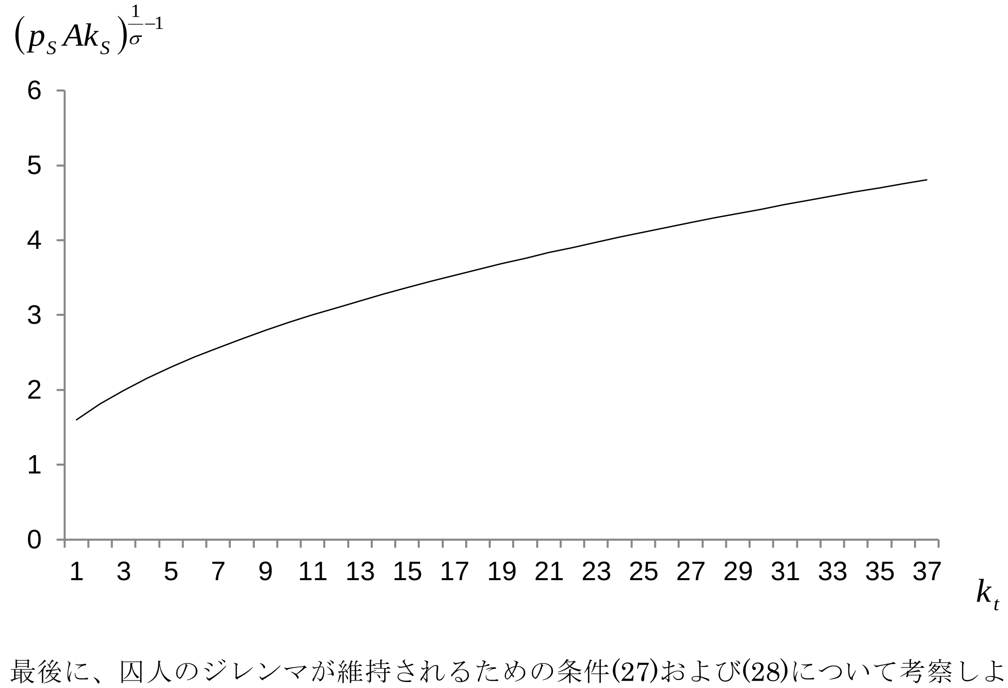
まず、第 1 に問題となるのは「すべての期間tにおいて」という条件である。すなわち、スーパーゲームは無期限のゲームとして成立していなくてはならない。しかし、3.1 節で考察したように、技術革新が存在しない世界では、時間の経過とともに$z_S^{*} < z_S^{**}$となる。もちろん、$z_S^{*} < z_S^{**}$となった時点でスーパーゲームは終了し、ゲームは有限期間のスーパーゲームになる。このとき、単純な囚人のジレンマの繰り返しゲームでも考察されるように、バックワードの解析より、すべての期間においてナッシュ均衡点をプレイする戦略の経路のみが完全均衡経路となる。すなわち、囚人のジレンマは解消されず、環境維持のための協調戦略が選択されることはない。したがって、命題 3.1 でも考察したように環境開発技術および生産性向上の技術に対する技術革新が毎期発生していなくてはならない。そして、(29)および(30)で構成される

完全均衡経路がプレイされるためには、これらの技術革新に関する情報がプレイヤー間の共通の知識(common knowledge)となっていなければならない。換言すれば、技術革新の発生が常態化していることを必要とする。

指摘される第 2 の点は、完全均衡経路が成立するために要求される 3 つの条件である。まず、(24)および(26)はナッシュ均衡点が存在するための条件である。N 国の t 期における特許要求額（あるいは放棄額）$P(t)$ は、(24)の右辺の値を下回ることができない。そして、(24)が経済学的意味を持つためには(26)が成立しなくてはならない。しかし、(26)の右辺は k_s を含む。すなわち、S 国の生産性が一定の場合（すなわち、p_S が一定の場合）資本蓄積とともに(26)の右辺の値は大きくなる（図 3.2）。一方、(26)の左辺は $\lambda(t)$ を含むが、$\lambda(t)$ の値は、環境技術供与の進行とともに減少する（図 3.3）。したがって、資本蓄積が進行すると(26)は成立しなくなる。ナッシュ均衡点を維持するためには、このような事態を回避しなくてはならないが、そのためには、S 国の生産性が資本蓄積とともに上昇すればよい。すなわち、p_S の減少率が一人当たり資本量 k_S の増加率を上回ればよい。そして、このことは、N 国が、環境技術供与に加え、生産性向上の技術を供与しなくてはならないことを意味する。生産性向上技術の供与に関しては命題 2.1 でも触れたが、以下命題としてこの分析結果を提示する。

命題 3.6　ナッシュ均衡点が毎期存在するためには、N 国が S 国に対し、環境技術供与に加え、生産技術を供与し、p_S の減少率が一人当たり資本量 k_S の増加率を上回らなくてはならない。

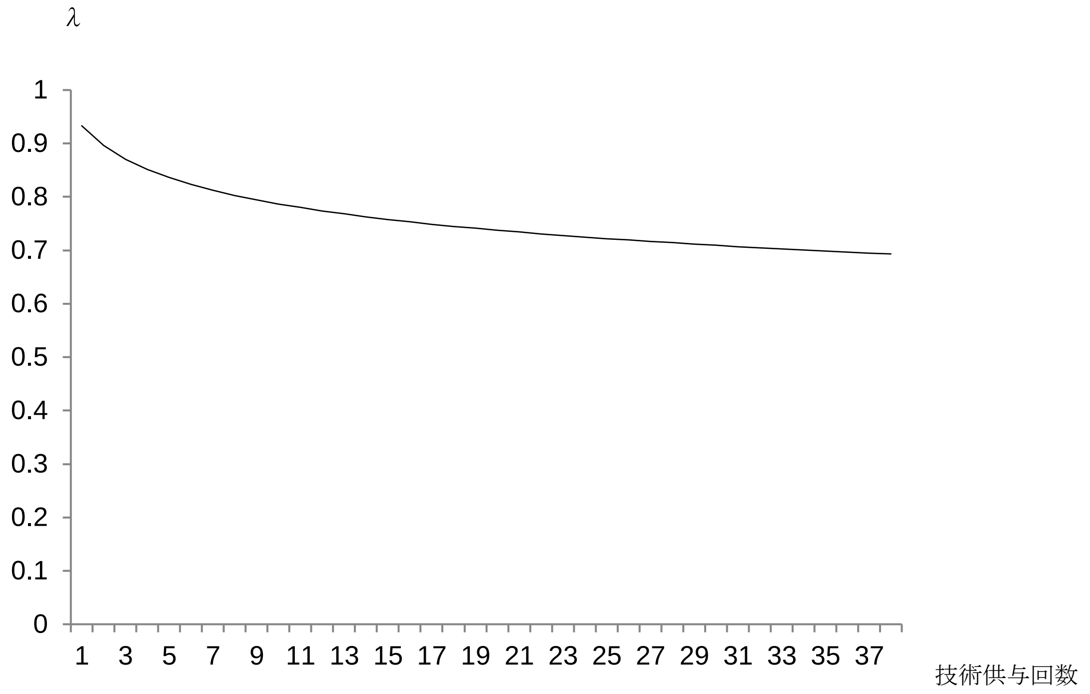
図 3.2　$(p_S Ak_S)^{\frac{1}{\sigma}-1}$ の値（生産性が一定の場合；$p_S = 1, A = 1, \sigma = 0.7$）



最後に、囚人のジレンマが維持されるための条件(27)および(28)について考察しよう。これらの条件で問題となるのは、(27)および(28)の右辺に $\lambda(t)$ が含まれている点である。図 3.3 に示されるように $\lambda(t)$ の値は、環境技術供与の進行とともに減少する。そして、$\lambda(t)$ の値の変化は、(27)および(28)において対称的な影響を及ぼす。すなわち、(27)においては、$\lambda(t)$ の減少は右辺の減少要素として作用し、(28)においては、右辺の増加要素として作用する。もちろん、これらの式の右辺は、各国の資本蓄積の進行状況にも依存するが、無限時間にわたる環境

技術の供与による$\lambda(t)$の減少は、特に(27)において大きな影響を与える。そして、無限期間の視野に立てば、人口の動態を考えなくてはならない。

図 3.3　資本蓄積と λ の値（$\varepsilon = 0.1$）



このとき、(27)が維持されるためには、N 国の人口が増加して　$P(t)/L_N$の値が減少しなくてはならない。すなわち、ゲームの中で、N 国は特許料受け取りの放棄をしなくてはならないが、この特許料放棄戦略にともなう一人当たり負担額が$P(t)/L_N$が、人口L_N　の増加により、軽減されなくてはならない。

４．おわりに

本論文の中では、先進国および発展途上国を想定として議論を進めてきた。そのなかで得られた結論は、環境技術に関する国際協調を実現するためには、いくつかの重要な条件を克服しなくてはならないという点である。具体的には、前節で考察した(26)、(27)および(28)を満たさなくてはならない。これらの条件は、環境技術のみならず生産性向上の技術供与を要求し、さらに、人口の動態にも影響されることが判明した。特に、人口動態は、一人当たりに負担（N 国側）あるいは利益享受（S 国側）の条件として浮上する。すなわち、人口成長に関する条件を要求している。そして、これらの考察は、環境に関わる国際協調を引き出すためは、複眼的視点を維持しなくてはならないことを示唆する。

これらの考察を踏まえ、理論的分析について触れよう。上記の複眼的要素を取り入れて分析しようとする場合、スーパーゲームは、その進化過程の分析において（たとえば、利得表の変化）、強力な分析道具を提供する。これまで、環境技術供与の国際協調は最適制御の枠組みで分析されてきた。それは、この問題が持続的経済発展の枠組みの中で分析されてきたことによる。しかし、持続的経済発展の経路は常に進化的であり、モデルを取り巻く周辺の状況は常に変化し、進化している。その意味において、本稿で考察したスーパーゲームに人口動態などの進化的要素を組みこむことが望まれる。この点における、新たなゲームの開発は今後の課題としたい。

最後に、本稿のスーパーゲームは完全情報および完備情報の枠組みで設定されている点に注意したい。このことは、N 国と S 国の双方が、ゲームの構造を共有の知識とし、かつ技術革新を完全情報のもとで遂行しなくてはならないことを意味する。このような状況を国際協調の場で成立させためには、継続的かつ不断の国際会議が必須となる。歴史的には、京都議定書に始まり、現在のパリ協定に至るまで、多くの国際協調の努力がなされてきたが、本稿のゲームの情報構造は、国際会議の場において環境技術に対する継続的努力と S 国への生産技術の供与も含めて議論されなくてはならないことを示唆する。

参考文献

Barrett,S. [2006], "Climate treaties and breakthrough technologies," *American Economic Review* ,96(2),pp. 22-25.

Buchner,B.and C.Carraro [2005], "Economic and environmental effectiveness of a technology-based climate protocol," *Climate Policy*,4,pp.229-248.

藤田康範［1997],「共同実施成立のための諸条件の検討」，環境経済・政策学会第 2 回報告論文。

藤田敏之［1997],「越境汚染問題と国際協調に関するゲーム理論的考察」，経済研究 vol.48, No.3, pp. 244-251.

Golombek,R. and M,Hoel [2004], "Unilateral Emission Reductions and Cross-Country Technology Spillover," *Advances in Economic Analysis & Policy*, Vol.4, No.2, Article 3.

Hagem [1996], " Joint Implementation under Asymmetric Information and Strategic Behavior,"*Environmental and Resource Economics*, vol.8, pp. 431-447.

細江守紀編［1989],『非協力ゲームの経済分析』，勁草書房。

伊ヶ崎大理［2004],『地球環境と内生的経済成長』，九州大学出版会。

Stokey,N.L.[1998] "Are there limits to growth," *International Economic Review*,vol.39, pp. 1-32.

Wirl,F,C.Huber.and I.O. Walker [1998] , "Joint Implementation: Strategic Reaction and Possible Remedies,"*Environmental and Resource Economics*, vol.12, pp. 203-224.