

# 越境汚染問題と国際協力に関するゲーム理論的考察\*

藤田敏之

## 1. はじめに

近年、特定の汚染物質による越境汚染問題が大きな注目を集めており、そのいくつかは地球規模のものとなっている。越境汚染(transboundary pollution)とは、個々の国の排出した汚染物質により複数の国が損害をこうむるような汚染を指し、地球温暖化、酸性雨、オゾン層の破壊、国際河川の汚染などがその例としてあげられる。日本においても今後、中国からの越境汚染物質の増加による被害の深刻化が懸念されている。

汚染問題への対策を経済学的に分析する研究では、一般に汚染物質排出または削減に関する費用便益分析が行われている。汚染物質を削減するためには、生産水準を下げたり、代替物質に依存したりしなければならないので、ある程度のコストがかかるが、削減をしないと長期的には汚染物質の蓄積によってさまざまなダメージをこうむることになってしまう。したがって費用と便益のバランスを考慮したときの最適な排出量(または粗排出量からの削減量)が理論的に求められる。Nordhaus(1991)は、温室効果の定常状態を扱った研究において最適なCO<sub>2</sub>の削減率を求めており、現在は気候変動とマクロ経済モデルを組合せたDICEモデル(Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy)を用いて動的分析を行い、最適経済成長経路を求めるという研究に着手している(Nordhaus, 1994)。

また地球温暖化については、大規模な計量経済予測モデルがいくつか開発されている。これらのモデルでは、温暖化によるダメージという現時点では推定が困難な指標を用いる代りに、

ある水準にCO<sub>2</sub>排出量を安定化させるのに必要な炭素税率(シャドープライス)が、エネルギー需給に関するいろいろな仮定のもとで計算されている(たとえばEdmonds and Reilly(1983), Manne and Richels(1991)など)。

越境汚染問題を分析するとき、意思決定を行う主体が複数となるので、ゲーム理論を適用して各主体の意思決定の戦略的要素やその相互的な外部性を考慮することができる。たとえば各プレイヤーを国として、その戦略を各期の汚染物質の排出量とする。そして各プレイヤーは自分の利得を最大化、またはコストを最小化するような行動をとることを仮定するといったアプローチが考えられる。ゲーム理論的枠組で問題を扱った例として、ヨーロッパ地域での酸性雨問題を扱ったMäler(1989)、それを応用してフィンランド、旧ソ連間の酸性雨に関する協力ゲームを分析したKaitala *et al.*(1992)や、静的均衡モデルを用いて、各国が汚染物質をどれだけ削減すべきかという基準を提案したWelsch(1993)などがあるが、これらは比較静学的枠組で問題を分析しており、問題の動的な性質を捉えていない。Martin *et al.*(1993)は、動的ゲームの均衡を計算して課税政策の効果を考察している。しかし汚染物質排出に対する課税政策は、経済の停滞をもたらすというネガティブな響きがあるためか、日本においても根強い反対にあっている。発展途上国でも経済成長を優先しているので、すすんで税を徴収することは期待できない。また税収を政府がどのように管理し、再分配すべきかについての合意がなされていない。したがって課税政策が全世界的に実現可能であるかについては、疑問が残る。

そこで本稿では、越境汚染問題を解析するた

めの動的ゲームモデルをつくり、その均衡解が汚染物質削減に関する技術援助、経済援助といった国際協力によってどのように変わるかということを検証する。またそれぞれの場合の協力解もあわせて計算する。この場合、各国における経済成長率は外生的に与えられているものとし、汚染対策によって経済成長の規模は変化しないことを仮定する。汚染問題を国際問題としてみると、先進国と途上国の考え方の相違が南北問題に発展しており、汚染物質削減に関する世界的な合意が得られていない。それにはさまざまな原因が考えられるが、最大の原因は途上国の汚染物質削減に対するインセンティブの低さではないかと思われる。すなわち途上国では、将来の潜在的な経済成長率が高く、削減技術の水準も低いことから、相対的な削減コストが高く、地球環境保全のためにそれらの国が積極的に削減を行うとは考えにくい。そこで重要なのは、先進国が援助を行い、途上国の発展過程を省エネルギー的なものにするために貢献することである。環境への対策は、共有財産問題(Hardin, 1968)などを中心に「囚人のジレンマ」に類似した状況にあり、単独で対策を行う国が損害をこうむることになるので、結局どの国もすすんで対策を実行しようとしなないということがしばしば指摘されている。そこで国際協力によって、汚染物質削減についてのインセンティブを各国に与え、必要に応じて別払い(side payment)の譲渡を行い、協力が無い場合に比べてPareto 優越的な状態をつくることが望まれる。本研究は、このような考えのもとで展開されている。

以下、2節では動的ゲームとその均衡の概念を紹介し、3節において越境汚染問題のモデルと技術援助、経済援助の定式化、さらにモデルの解の求め方についての説明を行い、4節で地球温暖化問題をケーススタディとしてとりあげたシミュレーション結果を示す。そして5節に結論となる事項をまとめる。

## 2. 動的ゲーム

ここでは一般的な動的ゲーム(dynamic

game)の定式化について、Başar and Olsder (1982), Kamien and Schwartz(1991)をもとに述べる。ゲームにおいては複数の主体があるルールにしたがって意思決定を行い、それに応じた利得やコストを受ける。それぞれの主体はゲームのプレイヤーと呼ばれ、その行動は戦略と呼ばれる。

以下考えるのは、非対称な  $n$  人のプレイヤーによって行われる非零和、非協力ゲームである。時間  $t$  を離散的にとる。プレイヤー  $i$  ( $i=1, \dots, n$ ) はそれぞれ各期の戦略として制御変数  $u_i(t)$  を決定して、次の目的コスト関数を最小化する。

$$J^i(\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t f^i(t, x(t), u_1(t), \dots, u_n(t)). \quad (1)$$

ここで  $\mathbf{u}_i$  はプレイヤー  $i$  の各期の戦略をならべたベクトル、 $T$  はゲームの終端となる時刻、 $\rho$  は割引を表すパラメーターである。目的関数は、各期のコストの現在価値の総和である。すべての許容可能な  $\mathbf{u}_i$  の集合を  $U_i$  と表すことにする。また  $x$  はゲームの「状態」を表す変数であり、状態方程式

$$\begin{aligned} x(t+1) &= g(t, x(t), u_1(t), \dots, u_n(t)), \\ x(0) &= x_0 \end{aligned} \quad (2)$$

にしたがって推移する。つまりあるプレイヤーの戦略は、自分のコストだけでなく、他のプレイヤーのコスト、さらにゲームの状態にも影響を与える。なお関数  $f^i, g$  は連続であり、各成分に関して微分可能であることを仮定する。

いま戦略の組  $(\mathbf{u}_1^*, \dots, \mathbf{u}_n^*)$  が、

$$J^i(\mathbf{u}_1^*, \dots, \mathbf{u}_n^*) \leq J^i(\mathbf{u}_1^*, \dots, \mathbf{u}_{i-1}^*, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_{i+1}^*, \dots, \mathbf{u}_n^*) \quad \forall \mathbf{u}_i \in U_i \quad (3)$$

をすべての  $i$  についてみたすとき、各プレイヤーは自分の戦略を変えるインセンティブをもたない。このような状況を Nash 均衡、または単に均衡(equilibrium)と呼び、(3)をみたすような戦略を均衡戦略と呼ぶ。以下、各時刻  $t$  でのプレイヤー  $i$  の均衡戦略を  $u_i^*(t)$  と表す。

動的ゲームの均衡はゲームの情報構造によっていろいろと分類されるが、以下ではフィードバック均衡について考える。フィードバック均衡(feedback equilibrium)とは、プレイヤーが

時刻  $t$  においてその期の状態変数の値を観測し、それだけをもとに時刻  $t$  での戦略を決定する、すなわち  $u_i(t) = u_i(t, x(t))$  であるときの均衡である<sup>1)</sup>。

いまフィードバック均衡戦略を求めるために、動的計画法(西村, 1990)を用いる<sup>2)</sup>。時刻  $t (= 0, \dots, T)$  において状態変数の値が  $x$  であるとす。ここで  $x$  が、固定された値であることに注意する。このとき戦略の組  $(u_1^*, \dots, u_n^*)$  は、以下の再帰関係式をみたす関数  $V^i (i=1, \dots, n)$  が存在する場合、そしてその場合に限りフィードバック均衡戦略となる。

$$\begin{aligned} V^i(t, x) &= \min_{u_i(t)} \{ \rho^t f^i(t, x, u_1^*(t), \dots, u_{i-1}^*(t), \\ &\quad u_i(t), u_{i+1}^*(t), \dots, u_n^*(t)) \\ &\quad + V^i(t+1, x(t+1)) \} \\ &= \rho^t f^i(t, x, u_1^*(t), \dots, u_i^*(t), \dots, \\ &\quad u_n^*(t)) + V^i(t+1, g(t, x, u_1^*(t), \\ &\quad \dots, u_i^*(t), \dots, u_n^*(t))) \\ &\quad \forall i (t = 0, \dots, T-1), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V^i(T, x) &= \min_{u_i(T)} \rho^T f^i(T, x, u_1^*(T), \dots, \\ &\quad u_{i-1}^*(T), u_i(T), u_{i+1}^*(T), \dots, u_n^*(T)) \\ &= \rho^T f^i(T, x, u_1^*(T), \dots, u_i^*(T), \\ &\quad \dots, u_n^*(T)) \forall i. \end{aligned} \quad (5)$$

上式は Hamilton-Jacobi-Bellman 方程式と呼ばれる。関数  $V^i(t, x)$  は、他のプレイヤーの将来の戦略が均衡戦略であるとき、時刻  $t$  以降、プレイヤー  $i$  が受ける総コストの最小値を意味する。つまり、

$$\begin{aligned} V^i(t, x) &= \min_{u_i(t), \dots, u_i(T)} \sum_{\tau=t}^T \rho^\tau f^i(\tau, x(\tau), \\ &\quad u_1^*(\tau), \dots, u_{i-1}^*(\tau), u_i(\tau), \\ &\quad u_{i+1}^*(\tau), \dots, u_n^*(\tau)). \end{aligned} \quad (6)$$

以下  $V^i(t, x)$  をプレイヤー  $i$  の状態評価関数 (state evaluation function) と呼ぶことにする。

フィードバック均衡戦略  $(u_1^*, \dots, u_n^*)$  は、(4)、(5) で表される計  $n(T+1)$  本の式をみたさなければならない。それらを求めるためには、(5) を境界条件として、まずすべての状態  $x$  について各  $i$  の終末期における均衡戦略  $u_i^*(T, x)$ 、状態評価関数  $V^i(T, x)$  を求め、(4) を用いて時間的に後向きに逐次解いていく。すべての時刻  $t$ 、状態  $x$  について  $u_i^*$ 、 $V^i$  が求められ

れば、今度は  $x$  の初期値をもとに時間的に前向きに均衡戦略、均衡解における状態変数の経路を求めていけばよい。

なお各時刻での均衡戦略がどのように求められるかについて補足をしておくと、まずある時刻において他のプレイヤーの戦略が与えられたときに、各プレイヤーがどの戦略をとればコストを最小化できるかを計算しておく。この戦略を「最適反応戦略」(optimal response strategy) と呼ぶ。そしてある  $(u_1^*(t), \dots, u_n^*(t))$  という戦略の組合せについて、各々の  $u_i^*(t)$  が他のプレイヤーの戦略に対する最適反応戦略になっているとき、これらは時刻  $t$  における均衡戦略となる。このような静的な小問題を次々と解いていくことによって全期間、全状態に関する均衡戦略を求めることができる。

### 3. 越境汚染モデル

2 節で紹介した動的ゲームを用いて、越境汚染問題を分析することを試みる。ゲームのプレイヤーは各国または各地域である。第  $i$  国の粗排出量を  $E_i(t)$  とおき、削減率を  $a_i(t) (0 \leq a_i(t) \leq 1)$  とする。したがって第  $i$  国の純排出量は  $(1 - a_i(t))E_i(t)$  ということになる。毎期の削減率をプレイヤーの戦略と解釈する。このとき第  $i$  国には削減率に応じたコスト  $C_i(a_i(t))$  がかかる。ここでいう削減コストとは、さまざまな形での削減技術に関する投資を指す。 $C_i(\cdot)$  は連続で単調増加、厳密に凸関数であり、 $C_i(0) = 0$  をみたすことを仮定する。

また汚染物質の大気中蓄積量(濃度)<sup>3)</sup> を  $M(t)$  とおき、 $M(t)$  が

$$\begin{aligned} M(t+1) &= (1 - \delta)M(t) + \mu \sum_{i=1}^n (1 - a_i(t)) \\ &\quad E_i(t), M(0) = M_0 \end{aligned} \quad (7)$$

という状態方程式をみたすことを仮定する。以下この  $M(t)$  を状態変数とみなす。ここで  $\delta$  は大気中に蓄積している汚染物質が海洋などに吸収される割合、 $\mu$  は排出された汚染物質の中で大気中に入る割合である ( $0 \leq \delta \leq 1, 0 \leq \mu \leq 1$ )。 (7) はこのような場合にしばしば使われている単純化された関係式である。そして汚染による第  $i$  国へのダメージは、汚染物質の蓄積量  $M$

( $t$ ) だけに依存していることを仮定し、それを  $D_i(M(t))$  と表す。  $D_i(\cdot)$  も  $C_i(\cdot)$  と同じく、連続、単調増加で厳密に凸であることを仮定する。削減コストとダメージは貨幣価値で算定され、各国の生産量  $Y_i(t)$  の割合としての値をとる。

以上により最小化すべき第  $i$  国の目的関数は、

$$J^i(\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t Y_i(t) \{C_i(a_i(t)) + D_i(M(t))\} \quad (8)$$

となる。ここで  $\mathbf{a}_i$  は第  $i$  国の削減率をならべたベクトルである。この場合フィードバック均衡  $(\mathbf{a}_1^*, \dots, \mathbf{a}_n^*)$  は、(4), (5)に相当する

$$\begin{aligned} V^i(t, M) &= \min_{a_i(t)} [\rho^t Y_i(t) \{C_i(a_i(t)) + D_i(M)\} \\ &\quad + V^i(t+1, M(t+1))] \\ &= \rho^t Y_i(t) \{C_i(a_i^*(t)) + D_i(M)\} \\ &\quad + V^i(t+1, (1-\delta)M) \\ &\quad + \mu \sum_{i=1}^n (1-a_i^*(t)) E_i(t) \\ \forall i(t=0, \dots, T-1), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V^i(T, M) &= \min_{a_i(T)} \rho^T Y_i(T) \{C_i(a_i(T)) \\ &\quad + D_i(M)\} \\ &= \rho^T Y_i(T) \{C_i(a_i^*(T)) \\ &\quad + D_i(M)\} \forall i \end{aligned} \quad (10)$$

という式をみます。状態評価関数  $V^i(t, M)$  は

$$V^i(t, M) = \min_{a_i(t), \dots, a_i(T)} \sum_{\tau=t}^T \rho^\tau Y_i(\tau) \{C_i(a_i(\tau)) + D_i(M(\tau))\} \quad (11)$$

と表される。まず(9), (10)をもとに均衡戦略を計算して、基準ケースでの結果を得る。このとき2節と同様、(10)をもとに時刻  $T$ , 状態  $M$  における均衡削減率  $a_i^*(T, M)$ , 状態評価関数  $V^i(T, M)$  を求め、(9)を用いて時間的に後向きに逐次解いていく。各時刻での均衡削減率は、すべての国の削減率が他の国の削減率の最適反応戦略になっている状況を探すことにより求められる。

次に国際協力を行う場合を考える。ここでは技術援助ケース、経済援助ケースという2つの援助形式を考える。技術援助とは、援助国が被援助国に技術を提供する、具体的には汚染物質削減やエネルギー効率改善のための設備を無償で設置し、その運営コストも負担することを指す。経済援助とは、援助国が被援助国の削減コ

ストの一部を資金援助の形で支払い、被援助国が自国の技術で削減を行うことを指す。そして第  $j$  国の汚染物質削減の中で第  $i$  国が負担する割合を技術援助係数と呼び、 $h_{ij}$  と表す。経済援助ケースにおいて、第  $j$  国のコストの中で第  $i$  国が負担する割合を経済援助係数と呼び、 $h'_{ij}$  と表す。ここで  $0 \leq h_{ij} \leq 1, 0 \leq h'_{ij} \leq 1 \forall i, j, \sum_{i=1}^n h_{ij} = \sum_{i=1}^n h'_{ij} = 1 \forall j$  という条件をおく。

第  $i$  国が自国の排出量の  $a_i$  の割合にあたる分を削減しようという場合には、 $C_i(a_i) Y_i$  の投資が必要である。第  $i$  国が第  $j$  国に技術援助を行うとき、協定により第  $j$  国の削減量の  $h_{ij}$  にあたる部分を担当することになるので、第  $j$  国が決定する削減率  $a_j$  に応じて  $Y_j h_{ij} C_j(a_j)$  の投資を行う。これは第  $i$  国が、第  $j$  国の工場などの一部に、削減率  $a_j$  を実現するための削減設備を設置すると考えればよい。結果的にこれは第  $j$  国の削減量1単位あたりのコストを下げるのに寄与する。この場合技術はフローとして考えられ、ストックの蓄積による効果はないものとする。また一般に外国への投資は、施設、インフラストラクチャーの不備や輸送費、人件費などを考慮すると、国内での投資よりも効率が悪くなると考えられるが、ここではその非効率性は無視する。

経済援助ケースにおいては、第  $i$  国の負担する第  $j$  国の削減コストは  $h'_{ij} Y_j C_j(a_j)$  となる。これは第  $j$  国の削減コストが  $Y_j C_j(a_j)$  であることから明らかである。

以上により第  $i$  国の目的関数は、技術援助ケースでは

$$J^i(\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t \left\{ \sum_{j=1}^n h_{ij} Y_j(t) C_j(a_j(t)) + Y_i(t) D_i(M(t)) \right\}, \quad (12)$$

経済援助ケースでは

$$J^i(\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t \left\{ \sum_{j=1}^n h'_{ij} Y_j(t) C_j(a_j(t)) + Y_i(t) D_i(M(t)) \right\} \quad (13)$$

となる。これらのケースでの解を、非協力ゲームの均衡として計算する。削減コストが相対的に高い国では、通常汚染物質を削減する誘因が働かないと考えられる。そこで他の国が援助することによって汚染物質の排出を抑え、地域全

体の目的関数の総和を基準ケースよりも低下させることができるかどうかを確かめる。この援助は、経済援助ケースにおいては協力ゲームでの別払いに相当すると考えられる。(12), (13)を比較すると技術援助が経済援助よりも大きな効果をあげることが予想される。なぜなら技術援助を通じて、コスト係数の高い国における削減をコスト係数の低い国が代りに受けもって行うことによって、地域全体の目的関数を低下させることができるからである。したがって本稿では、技術援助の効果を検証するとともに、技術援助ケースと経済援助ケースの均衡解の差異がどの程度あるかということも分析の対象とする。

以上是非協力ゲームの均衡であったが、このゲームが協力ゲームであるとするとき、どのような解が得られるのかを参考のために求める。すべての国が協力して削減を行う場合の Pareto 最適解は

$$(\bar{a}_1, \dots, \bar{a}_n) = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i J^i(\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n) \right\} \quad (14)$$

をみたく  $(\bar{a}_1, \dots, \bar{a}_n)$  として求められる。この解を各ケースでの協力解と呼ぶことにする。ここで  $\alpha_i (\geq 0)$  は重みパラメーターであり、 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$  をみたく。この解は Nash 均衡という概念とは異質のものであり、1人ゲームの最適解ということになっている。協力解は、国際会議などで削減率に関する協定を結ぶときの結果に相当する。それに対し、非協力ゲームの均衡解は、削減率についての強制的な取り決めが存在しない代りに、技術的、経済的な援助をするという枠組を作り、その仮定のもとで援助国、被援助国が自主的な決定を行うときの結果である。本稿では基本的に非協力ゲームの均衡として解を求めるが、それは強制的な協定よりも、全地域が自発的な決定をするという協定の方が受け入れられやすいと判断したからである。各ケースの均衡における各地域の目的関数の値が、この協力解での値にどれだけ近づくかに注目する。

#### 4. 地球温暖化問題への適用

前節で記述されたモデルをもとに実際の汚染問題について計算機実験(シミュレーション)を行う。越境汚染問題にもさまざまなものがあるが、以下では地球温暖化問題を取りあげる。つまり汚染物質は、化石燃料消費、森林伐採などによって排出される CO<sub>2</sub> をはじめとする温室効果ガスであり、ダメージは気温上昇や、それによってもなると予測される気候変動、海面上昇などによる被害である<sup>4)</sup>。また地域数  $n$  は簡単のため 2 とおき、第 1 地域を先進国地域、第 2 地域を途上国地域とする<sup>5)</sup>。時間  $t$  は 1 年刻みで 1990 年を基準年とする。

温室効果ガス(以下代表して CO<sub>2</sub> と表記)の削減コスト、温暖化によるダメージは、

$$C_i(a_i) = c_i a_i^3, \quad (15)$$

$$D_i(M) = d_i(M - M_0)^2 \quad (16)$$

と表されることを仮定する。ここで  $M_0$  は 1990 年における CO<sub>2</sub> 濃度(350 ppm)である。(15) に関しては Nordhaus(1994)、(16) に関しては Falk and Mendelsohn(1993)を参考にした。係数は地域によって異なるが、コスト、ダメージ係数ともに途上国地域の方が大きいと推定される。そして粗排出量  $E_i(t)$ 、総生産  $Y_i(t)$  の増加率を外生的に与える。粗排出量は先進国地域、途上国地域でそれぞれ平均で年率 1.0%、2.5%、総生産はそれぞれ 1.9%、2.8% で増加させることにする。各パラメーターの値を表 1 に記す。コスト係数は Burniaux *et al.*(1992)での計算結果と式(15)により、ダメージ係数は Nordhaus(1994)と式(16)により推定した。

以上の準備のもとで、長期的なシミュレーションによって、2060 年までの状態評価関数、均衡削減率、CO<sub>2</sub> 濃度の経時変化を求めた結果を表 2、表 3、表 4 に示す。表 2 中の「コスト」、「ダメージ」は、それぞれ CO<sub>2</sub> 削減コスト、温暖化によるダメージの現在価値の総和を表しており、それらの和が  $J^1, J^2$ (両地域での目的関数の値)となっている。シミュレーションは削減なしケース、基準ケース、技術援助ケース、経済援助ケースの 4 通りについて行われて

表1. 各パラメーターの値

パラメーター	記号	値
CO <sub>2</sub> 吸収率	$\delta$	0.004
CO <sub>2</sub> 残存率	$\mu$	0.64
割引パラメーター	$\rho$	0.96
コスト係数(第1地域)	$c_1$	0.06
(第2地域)	$c_2$	0.16
ダメージ係数(第1地域)	$d_1$	$3.0 \times 10^{-7}$
(第2地域)	$d_2$	$5.0 \times 10^{-7}$

いる。削減なしケースは比較の対象として計算され、削減率  $a_i(t)$  がつねに0であることを仮定している。基準ケースは式(9)、(10)によって求められる均衡である。また技術援助ケース、経済援助ケースでは、先進国地域が途上国地域の削減に対し、技術的、経済的な援助をしてコストを負担している。この時の援助係数は  $h_{11} = h'_{11} = 1$ ,  $h_{21} = h'_{21} = 0$  とし、 $h_{12}$ ,  $h'_{12}$  を変化させる。つまり第1地域から第2地域への援助のみを考慮する。なお計算にあたっては、削減率は0.01刻み、CO<sub>2</sub>濃度は上限、下限をもうけ1ppm刻みに離散化した。

表2に示される2つの援助ケースの均衡解は目的関数の総和( $J^1 + J^2$ )が最小値をとるときの結果、そして協力解は、重みパラメーターを  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$  とおいて同じく目的関数の総和を最小化するときの結果である。技術援助ケース、経済援助ケースでの均衡解では、最適な援助係数はそれぞれ  $h_{12} = 0.75$ ,  $h'_{12} = 0.5$  となった。また協力解では、それらは  $h_{12} = 1$ ,  $h'_{12} = 0.5$  となった。基準ケースと経済援助ケースの協力解では目的関数が同一となるので、削減率は同じであり、両地域のコスト負担だけが異なっている。表3は各ケースにおける両地域の平均削減率を示す。第1地域の削減率はほぼ同じ値をとって

表3. 平均削減率 [%]

	第1地域		第2地域	
	-2020	-2060	-2020	-2060
削減なしケース	0	0	0	0
基準ケース(均衡解)	16	25	7	19
(協力解)	21	16	14	14
技術援助ケース(均衡解)	20	23	20	31
(協力解)	20	16	24	23
経済援助ケース(均衡解)	19	14	13	13
(協力解)	21	16	14	14

表4. CO<sub>2</sub>濃度 [単位 ppm]

年	1990	2000	2020	2040	2060
削減なしケース	350	368	427	519	640
基準ケース(均衡解)	350	364	412	475	560
(協力解)	350	362	402	464	545
技術援助ケース(均衡解)	350	362	402	461	540
(協力解)	350	361	399	453	528
経済援助ケース(均衡解)	350	362	404	467	553
(協力解)	350	362	402	464	545

いるが、第2地域の削減率は広範囲にわたっている。第2地域の今後の削減、特に2020年までの時期の削減が重要になることが示される。表4はCO<sub>2</sub>濃度の経時変化を記したものであるが、2020年までの値は削減なしケースを除くとほとんど差がみられず、それ以降差が拡大している。このことから地球温暖化問題が超長期的問題であることがわかる。

これらの結果により、かなり大規模な技術援助が行われるのが望ましいことが示される。つまり第1地域の技術的優位性があるので、第2地域への技術援助により均衡削減率の上昇とCO<sub>2</sub>濃度の低下、それによるダメージの低下を促し、世界的に基準ケースよりもPareto優越的な状況を作り出すことができる。目的関数の値は最大で13%低下する。協力解では、第2

表2. 目的関数の値 [単位 1990年兆ドル]

	第1地域			第2地域			$J^1 + J^2$
	コスト	ダメージ	$J^1$	コスト	ダメージ	$J^2$	
削減なしケース	0	3.86	3.86	0	3.52	3.52	7.38
基準ケース(均衡解)	0.51	2.28	2.79	0.27	2.10	2.37	5.16
(協力解)	0.67	1.89	2.56	0.38	1.76	2.14	4.70
技術援助ケース(均衡解)	0.73	1.82	2.55	0.24	1.69	1.93	4.48
(協力解)	1.19	1.59	2.78	0	1.47	1.47	4.25
経済援助ケース(均衡解)	0.87	2.03	2.90	0.19	1.89	2.08	4.98
(協力解)	0.86	1.89	2.75	0.19	1.76	1.95	4.70

地域の削減コストをすべて第1地域が負担することになるが、それでも第2地域だけでなく第1地域においても基準ケースの均衡より目的関数の値が減少している。一方経済援助ケースでは大きな効果はみられず、均衡解では目的関数の値を3.6%低下させるのにとどまっている。これは経済的な援助だけでは、第2地域の汚染物質削減の自発的増加が望めないことを示している。

その他表には示していないが、どちらの援助に関しても援助係数が0.1程度の小さな値をとるときには援助の効果は顕著ではない。そしてそれが1に近い値のときは(均衡解では)第1地域の削減コストが過大になり、基準ケースよりも目的関数の値が大きくなるという事態が生じる。

以上はパラメーターが標準的な値をとるときの結果であったが、パラメーターの値の変化により計算結果が大幅に変動するという可能性も否定できない。そこで実験計画法を用いてモデルの感度分析を行った。以下ではその概要を定性的に示すことにする。

表1に示されている7つのパラメーターを因子とし、これらを2水準に変化させる。水準のとり方は、標準値の2割増、2割減というようにする。観測する計算結果としては、基準ケースの均衡解での世界全体の目的関数の値(結果1)と、技術援助による目的関数値の減少率(結果2)をとる。直交表を用いて16回のシミュレーションによる要因実験の一部実施を行い次のような知見を得た。2つの結果のいずれにおいても割引パラメーター、CO<sub>2</sub>残存率の影響が大きい。また結果1はシミュレーションに応じて幅広く変化する(最大値は最小値の約12倍)が、結果2の方はほぼ同じ値をとっている。したがってパラメーターの値を少し変動させても技術援助の効果が大きく変動することはないということがわかった。

## 5. 結論

前節でのシミュレーションによって得られる結論は以下のようにまとめられる。

地球温暖化問題のゲーム理論的分析によると、国際的な援助によって達成される範囲での最適なCO<sub>2</sub>の均衡削減率は20-30%ほどである。これは国際条約などで提唱されている目標より、はるかに低い値である。たとえば本稿でのモデルの前提に立つと、1988年のトロント会議での提案を実現するためには、2060年の時点で先進国では約70%、途上国では約85%の粗排出量からの削減が必要となる<sup>6)</sup>。一般に国際会議での提案は、温暖化によるダメージを高く見積もった場合に正当化されると考えられるが、現在のトレンドの延長として将来を分析する場合には、それほど大きな削減を強制することは合理的でないということがシミュレーションによって示された。

次にCO<sub>2</sub>削減に関する先進国から途上国への技術援助は、かなり大規模に行われる必要があることがわかった。技術援助によって、途上国ばかりでなく、援助を行う先進国も利得を受け、世界全体のコストを低減させることができる。いくつかの因子を選んで感度分析を行ったところ、計算結果に大きな影響を与えるのは割引パラメーター、CO<sub>2</sub>残存率であること、いずれのシミュレーションにおいても技術援助の効果は同様であることが示された。これは逆にいえば、パラメーターの値などについての正確な情報が与えられれば、各地域が最適に近い行動を、均衡として自発的にとる可能性が高いということを示しているとも考えられる。現時点では汚染物質の削減について実現不可能に近い目標を立てるよりも、技術援助などが円滑に行われるためのシステムづくりの方が重要であろう。

また本研究の問題点については次のことがいえる。

経済成長率、CO<sub>2</sub>粗排出量増加率が外生変数になっていること、地域分割が粗いことなどにより、計算結果が信頼できるとは断言できない。しかし現在のところ、計算にかかる時間を考慮すると、生産資本、汚染物質削減資本といった新しい状態変数の導入や、地域分割の精密化は難しい状況である。ただし戦略の数(本稿のモデルでは101)を減少させ計算量を少なくすれ

ば、さらに現実に近いモデルを構築する余地は  
あるので、今後それらについて検討する予定で  
ある。

その他の課題としては、越境汚染に関する協  
力ゲームの中での提携形成や、それに付随する  
ただ乗り (free-riding) 問題の分析、それから不  
確実性に対応するための確率モデルの構築など  
があげられる。

(論文受付日 1995年6月5日・採用決定日  
1996年6月12日、東京理科大学理工学部)

## 注

\* 本稿を作成するにあたって重要な御忠告を下さ  
った東京大学工学部の伏見政則教授、教養学部の廣松  
毅教授、明治学院大学国際学部竹内啓教授に謝意を  
表したい。また本稿の改訂にあたっては、『経済研究』  
編集部およびレフェリーの方々に懇切丁寧な御教示を  
いただいた。ここに記し、厚く御礼を申し上げる。も  
ちろん、本稿におけるあり得べき誤りはすべて筆者の  
責任に帰する。

1) フィードバック均衡は、文献によってはマルコ  
フ完全均衡 (Markov perfect equilibrium) と呼ばれ  
ており、また部分ゲーム完全 (subgame perfect) と  
いう重要な性質もっている。部分ゲーム完全性や、そ  
の他ゲーム理論の一般的事項については鈴木(1994)を  
参照。

2) Pontryaginの最大原理 (Pontryagin *et al.*, 1962)  
を用いることもできる。

3) 汚染物質の蓄積量は、適当な定数で割れば濃度  
となる。

4) 大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は産業革命以前に比べて約  
50% 増加している。そして地球の平均気温は、過去  
100年において 0.3-0.6°C、海面は 10-20 cm 上昇した  
といわれている。また今後このままのペースで CO<sub>2</sub>  
濃度が増加すれば、平均気温は約 0.3°C/10年、海面は  
約 6 cm/10年の上昇を続けるであろうという予測が  
ある。詳しくは霞ヶ関地球温暖化問題研究会(1991)、  
森(1992)などを参照。

5) 先進国地域とは、ヨーロッパ地域、米国、カナ  
ダ、オーストラリア、ニュージーランド、日本のこと  
を指し、残りの地域を途上国とする。

6) この会議では、先進国地域は 1990年レベルよ  
り 20% 排出量を削減、安定化することと、途上国地域  
は 1990年レベルより 50% の排出量の伸びが認められ  
るというスキームが提案されている。

## 参考文献

- [1] Başar, Tamer and Geert J. Olsder(1982)  
*Dynamic Noncooperative Game Theory*, London,  
Academic Press.  
[2] Burniaux, Jean-M., John P. Martin, Giuseppe

Nicoletti and Joaquim O. Martins(1992) *The  
Cost of Reducing CO<sub>2</sub> Emissions: Evidence from  
GREEN*, Economics Department Working  
Papers, No. 115, Paris, OECD.

- [3] Edmonds, Jae A. and John M. Reilly(1983)  
“Global Energy and Carbon to the Year 2050,”  
*The Energy Journal*, Vol. 4, No. 1, pp. 21-47.  
[4] Falk, Ita and Robert Mendelsohn(1993) “The  
Economics of Controlling Stock Pollutants: An  
Efficient Strategy for Greenhouse Gases,” *Journal  
of Environmental Economics and Management*,  
Vol. 25, pp. 76-88.  
[5] Hardin, Garrett(1968) “The Tragedy of Com-  
mons,” *Science*, Vol. 162, pp. 1243-48.  
[6] Kaitala, Veijo, Matti Pohjola and Olli Ta-  
hvonon(1992) “An Economic Analysis of Trans-  
boundary Air Pollution between Finland and  
Former Soviet Union,” *The Scandinavian Journal  
of Economics*, Vol. 94, No. 3, pp. 409-424.  
[7] Kamien, Morton I. and Nancy L. Schwartz  
(1991) *Dynamic Optimization*, 2nd. Ed., Amster-  
dam, North-Holland.  
[8] 霞ヶ関地球温暖化問題研究会(編訳)(1991)  
『IPCC地球温暖化レポート』中央法規。  
[9] Mäler, Karl-G.(1989) *The Acid Rain Game*, in  
H. Folmer and E. van Ierland(eds.), *Valuation  
Methods and Policy Making in Environmental  
Economics*, pp. 231-52, Amsterdam, Elsevier.  
[10] Manne, Alan S. and Richard G. Richels(1991)  
“Global CO<sub>2</sub> Emissions Reductions—the Impacts  
of Rising Energy Costs,” *The Energy Journal*,  
Vol. 12, No. 1, pp. 87-107.  
[11] Martin, Wade E., Robert H. Patrick and Boles-  
law Tolwinski(1993) “A Dynamic Game of a  
Transboundary Pollutant with Asymmetric  
Players,” *Journal of Environmental Economics  
and Management*, Vol. 24, pp. 1-12.  
[12] 森俊介(1992) 『地球環境と資源問題』岩波書店。  
[13] 西村清彦(1990) 『経済学のための最適化理論入  
門』東京大学出版会。  
[14] Nordhaus, William D.(1991) “To Slow or Not  
To Slow: The Economics of the Greenhouse  
Effect,” *The Economic Journal*, Vol. 101, pp. 920-  
39.  
[15] Nordhaus, William D.(1994) *Managing the  
Global Commons—the Economics of Climate  
Change*, Cambridge, MIT Press.  
[16] Pontryagin, L. S., V. G. Boltyanskii, R. V.  
Gamkrelidze and E. F. Mischchenko(1962) *The  
Mathematical Theory of Optimal Processes*, New  
York, Wiley.  
[17] 鈴木光男(1994) 『新ゲーム理論』勁草書房。  
[18] Welsch, Hans(1993) “An Equilibrium Frame-  
work for Global Pollution Problems,” *Journal of  
Environmental Economics and Management*, Vol.  
25, pp. 64-79.