農経論叢 第51集，1995，Mar.

大気汚染問題と国際協力の必要性

―ダイナミックゲーム理論によるアプローチ―

修 震 杰・出 村 克 彦

Global Environmental Problems and Necessity of International Cooperation

XIU Zhenjie · Katsuhiko DEMURA

Summary

International pollution control involving two countries is modeled as a simple two-player dynamic game. We characterize nonocooperative pollution control strategies of the governments of two countries that maximize the discounted stream of net benefits of their country. Any strategy involving punishment based on the observed deviation of other players is likely not to maintain renegotiation-proofness. For this reason, we restrict our attention to Markov-perfect strategies. It is well-known result (Folk theorem of repeated games) that Pareto efficiency can be supported as a subgame-perfectequilibrium in an infinite horizon dynamic game. However Pareto optimum is impossible in our game. This intertemporal dimension could not attenuate the free-rider. International agreement and commitment are necessary for environmental problems.

最近，大気の温暖化とオゾン層の破壊という地球規模の環境問題は，ますます深刻になってきた。社会科学からみると，地球環境問題は，決して一国の環境問題と完全に一致するわけではない。一国では法的な手段に通じて，税金・規制等によって自国の汚染物の放出量をコントロールできる。実際は，情報の不完全性によって，一国では自国の放出を完全にコントロールできるわけではない。自国の汚染物の放出量を完全にコントロールできても，地球環境問題は決して簡単にコントロールできない。超国家的な政府はこの世界に存在していないのである。本論文はこの世界には超国家的な政府はなく，たくさんの主権国家が存在するという実態を認識しながら，国際汚染物の放出に関するモデルを研究する。

環境財の外部性はよく知られている。つまり，競争によって環境破壊が起こり，外部に負の利益を与え，結果的に最適状態から乖離する［2］［5］。もしも超国家的政府が存在するならば，Pigouvian Tax 理論によって，税金を課して，最適状態に戻すことができる［12］［13］。しかし，国際環境問題の中ではこの税率をどう決めるか，ある国はこの税制度に従わないとき，強制的手段がない，だから，この制度は成立しえない。

静学的なモデルに関するさまざまな文献がある［4］［9］［11］［13］。すべての論文は環境問題には囚人のジレンマによってパレート非効率性を生ずると指摘している。囚人ゲームが繰り返しプレーされるとき，パレート非効率性の問題は解消できる［8］。だから，最近，一部の研究ではダイナミックゲームで環境問題を論じ，環境問題が動的モデルの中で解消できると述べている［6］。更に，パレート効率の結果が Markov-perfect（注1）戦略［1］［8］により支持されるならば，国際環境問題が制裁，条約によらなくて，対話のみによって解決できるとしている。非協力ゲーム

の均衡は各プレーヤー(各国の政府と考えて良い)の自主的な行動により達成される。この均衡において各プレーヤーが違反するインセンティブがないから，約束（条約）がなくても，この均衡が保証される。

本論文ではパレート効率は決して Markov-perfect 戦略結果ではなく，かつ，Markov-perfect 均衡は非効率であることについて論ずる。パレート効率は非協力ゲームの均衡から得られず，このパレート効率の結果を維持するため，国際条約が不可欠である。対話のみによって，国際環境問題が解決できないことを論証する。

本論文は四つの章によって構成される。第一章は本論文の分析モデルを提出する。本論文で二カ国のダイナミックゲームに抽象化して，Markov-perfect 均衡は再交渉立証（Renegotiation-Proofness）（注２）と一致しているから，もし，ある特定の戦略ペアは，二カ国のゲームの中で，パーフェクト均衡でなければ，この特定の戦略によって構成された結果は，多国のモデルの中で，明らかに再交渉立証を満たさない。第二章は協力戦略（注３）と非協力線形戦略と比較して，協力戦略の結果はあくまでも合意（条約）が必要であることについて論ずる。合意がなければ，協力戦略が実行できない。ここでは比較の基準（パレート効率）として協力戦略の結果を持ち込む。第三章は非線形戦略について分析する。現実の問題の中で，いろいろな制約がある。これらの制約を満たす戦略の中で，パレート効率になれる戦略ペアはパーフェクト均衡ではないことを証明する。第四章は本論文の政策的の含味及び残された問題について再検討する。

１．モデルに関する

本論文は主に二酸化炭素など「完全な」(pure) 望ましくない公共財（public bads）のような汚染物質をイメージとして扱っている。「完全」というのは，完全拡散性，完全に排他性がないという意味である。完全拡散性という意味は上空の二酸化炭素濃度は各国にとって同じである。完全に排他性がないという意味は，一国が二酸化炭素の上昇により被害を被ることによって他国の被害を緩和しないという意味である。この仮定によって，各国は同様な環境質で生活している。ここでは環境質は大気中の二酸化炭素の量とか，濃度とかを指している。

産業革命以前，地球上の二酸化炭素の放出量と二酸化炭素の吸収量とはほぼ均衡していたが，産業革命以降の大規模な化石燃料の消費によって大きく崩れることとなった。もし，産業革命以前の二酸化炭素濃度（あるいは量）を基準値とした時，現在はどうしても，この基準値以下を達成できないであろう。産業革命以前の二酸化炭素の放出量を比較の基準値とした時（つまり，産業革命以前の放出量はゼロ値として設定する)，現在どんな技術でも，ゼロ以下の放出は出来ないであろう。

人類が経済活動をする以上，エネルギーが不可欠である。エネルギーといえば，化石燃料，太陽エネルギー，水力発電，原子発力などさまざまなエネルギーがある。長期的に，これらのエネルギーは代替可能であるが，調整コストが不可欠である。短期的（年間単位）には，大きな転換は不可能である。二酸化炭素の放出を減少するため，化石燃料の使用を減少させると同じと考えられ，短期的に重大なエネルギーの転換が不可能な時に限り，化石燃料の使用の急減は生産を激減させ，現実には，不可能なことである。各国の放出は時間に関する連続関数である。本論文は以上の事実に基づいて展開する。

われわれは二つの国を仮設する。この二つの国は自給自足で単一の財を生産する（注４)。この財を生産するとともに，汚染物を放出して，それは環境汚染源になる。汚染の蓄積は生活の質に影響を与える。

Q_i は i 国の財である。Ei は汚染放出である。

$Q_i = T_i(E_i)$,

Ti は i 国の技術を表す。

国 i の効用 $U_i(Q_i, p)$ は Q_i，p について分離性を満たすと仮定すると

$$U_i(Q_i, p) = V_i(Q_i) - C_i(p)。 \qquad (1)$$

p は各国にとって共通である。

$V_i(Q_i)$，$C_i(p)$ は次の式に特定化する。

$$V_i(Q_i) = V_i(T_i(E_i)) = A'_i E_i - \frac{B'_i}{2} E_i^2。 \qquad (1\,A)$$

大きい E は多い財を生産する意味である。もち

ろん多い財が大きい効用をもたらすが，財を生産するため，時間とか，精力とかを使うため，この意味で，ある水準以上の財がその国にとって，むしろ限界効用を負にする。

$$C_i(p)=\frac{1}{2}s'_i p^2。 \quad (1\,B)$$

汚染問題は限界コスト（負効用）が逓増である。これは現実に基づいた仮説である。

$$U(Q,\ p)=A'_i E_i-\frac{B'_i}{2}E_i^2-\frac{1}{2}s'_i p^2。$$

静学的モデル $p=E_1+E_2$ つまり，

$$U_i=AE_i-\frac{1}{2}E_i^2-\frac{1}{2}s(E_1+E_2)^2$$

$$i=1,\ 2。 \quad (2)$$

この式は，国iにとっては，自国のみの放出だけではなく，他国の汚染放出も自国の環境にも完全に悪影響を与えることを意味する。これは完全な「公共財」(あるいは“Public bads”）の質，つまり，国際環境問題の典型である。

独自の最大化によって

$$\frac{\partial U_i}{\partial E_i}=A-E_i-s(E_1+E_2)=0$$

$$i=1,\ 2$$

$$E_1=E_2=\frac{A}{1+2s}=E^{**},\quad p^{**}=\frac{2A}{1+2s} \quad (3)$$

$$U_i^{**}=A\frac{A}{1+2s}-\frac{1}{2}\left(\frac{A}{1+2s}\right)^2-\frac{1}{2}s\left(\frac{2A}{1+2s}\right)^2=\frac{A^2}{2(1+4s+4s^2)} \quad (3')$$

両国は協力によって，両国の総効用が最大化であるとき，両国の効用はパレート効率であるが，このときの戦略は拘束がない限り，実行できない。この戦略は協力戦略と呼ばれる。

協力戦略によって，

$$E=E=\frac{A}{1+4s}=E^{00},\quad p^{00}=\frac{2A}{1+4s}。 \quad (4)$$

それぞれの利得は

$$U_i^{00}=A\frac{A}{1+4s}-\frac{1}{2}\left(\frac{A}{1+4s}\right)^2-\frac{1}{2}s\left(\frac{2A}{1+4s}\right)^2=\frac{A^2}{2(1+4s)}。 \quad (4')$$

明らかに，$U_i^{00}>U_i^{**}$ $(i=1,\ 2)$，p^{**} の状態はパレート非効率の状態である。

もし，プレーヤー2は自主的に協力戦略を取り，プレーや1は事個利得最大化の行動を取るならば，

$$\frac{\partial U_1}{\partial E_1}=A-E_1-s\left(E_1+\frac{A}{1+4s}\right)=0$$

$$E_1^{*0}=\frac{A(1+3s)}{(1+4s)(1+s)}>\frac{A}{1+2s}=E_1^*$$

$$U_1^{*0}=\frac{A^2}{2(1+4s)^2(1+s)^2}[(1+4s)(1+s)^2+4s^2+4s^3]>U_1^{00}$$

そのとき，プレーヤー2の利得は

$$U_2^{0*}=\frac{A}{1+4s}-\frac{1}{2}\left(\frac{A}{1+4s}\right)^2-\frac{s}{2}\left[\frac{A}{1+4s}+\frac{A(1+3s)}{(1+4s)(1+s)}\right]^2$$

$$\therefore U_2^*-U_2^{0*}=\frac{2sA^2(s+5s^2+11s^3+8s^4)}{(1+2s)^2(1+4s)^2(1+s)^2}>0$$

$$\therefore U_2^*>U_2^{0*}$$

両国が協力E0戦略を取るならば，両国にとって最大の利得を得られる。しかし，国1は国2が協力戦略を取っているというこの前提において，自国（国1）が違反戦略によって（E_1^{*0} を取る)，更に高い利得が得られる。更に，国2はこの恐れを知っているから，事前に予備措置を取らなければならない。つまり，すべての国にとっては自国の利益のみの最大化という戦略が支配戦略であるから，協力戦略は強力な約束がない限り実行できないのである。ここでは，典型的な一種の環境問題が生じる。次のゲームでイメージを示す。

	E_2^0	E_2^*
E_1^0	5、5	−2、8
E_1^*	8、−2	0、0

図1

周知の通り，囚人ゲームが繰り返しプレーされるとき，違反者は他のプレーヤーの報復を恐れているから，協力戦略は維持される。この協力結果がパーフェクト均衡であることはすでに証明されている［7］。ここでの問題は，この報復（制裁）を実施するとき，もちろん違反者に打撃を与え，間違いなく制裁を実施する国にとっては損害をもたらし，再交渉によって，制裁はしばしば実行できないということである。だから，この繰り返しゲームのパレート効率の結果が再交渉の標準で成り立つかどうかは重要な問題である。つまり，自主的な戦略によってパレート効率が維持できるかどうかである。文献［6］は長期的な（環境）ゲームの中で，このような均衡があると述べている。本論文で，このような均衡がない，つまり，環境問題が自主的，あるいは対話のみによって解決できず，国際条約が不可欠であることを主張したい。

動学的なモデルの中で，環境汚染は瞬間的な汚染放出によって決められるわけではなく，連続の期間の放出と関係している。もう一方で，自然界は自らの浄化能力を持っているから，環境汚染のストックは放出と関係は以下の式であられされる（注5）。

$$\frac{dp}{dt}E_1(t)+E_2(t)-kp(t)$$

$$p(t_0)=p_0$$

ここでは，kは自然の汚染に対するクリー率である。二つの国の汚染放出はともに環境汚染に寄与する。p_0はある考慮期間の初期状態で，既存する状態である。

同時に，国の目標は瞬間の効用最大化ではなく，長期な効用を最大化する（注6）。

$$\max_{E_i(t)} =\int_0^\infty B_i'\left[A_iE_i-\frac{1}{2}E_i^2-\frac{1}{2}s_ip^2\right]e^{-rt}dt,$$

$$s\cdot t\cdot\quad \frac{dp}{dt}=E_1(t)+E_2(t)-kp(t),$$

$E(t)\in[0,\infty)$　　Lipschitz 連続。

ここでは，rは割引率である。

B_i'が定数であるから，目標は次の目標と一致している。

$$\max_{E_i(t)} J^i(E_i,\ E_{-i},\ p_0),$$

$$s\cdot t\ \frac{dp}{dt}=E_1(t)+E_2(t)-kp(t),$$

$$p(t_0)=p_0,$$

初期条件$t_0=0$，$p\mid_{t=0}=p_0$。　　(5)

ここでは

$$J=\int_0^\infty\left[A_iE_i-\frac{1}{2}E_i^2-\frac{1}{2}s_ip^2\right]e^{-rt}dt。$$

以下，われわれはこの式に基づいて，議論を展開する。

2．協力戦略と非協力線形戦略

環境汚染Pは“Public bads”であり，外部性の性質を持っている。両国が両国の効用を加重して合計した効用を最大化すれば，パレート効率が成立できるということは自明である。

われわれは基準として，協力結果を使って，非協力結果（注7）と比較する。協力すれば，

$$\max_{E_1E_2}\int_0^\infty\sum_{1,2}a_i\left[A_iE_i-\frac{1}{2}E_i^2-\frac{1}{2}s_ip^2\right]e^{-rt}dt,$$

$$a_1+a_2=1,$$

$$s\cdot t\cdot\frac{dp}{dt}=E_1+E_2-kp$$

初期条件　$P_{(t=0)}=P_0$

この問題は最適制御の問題である。

静止状態はわれわれにとって最も関心がある。

二つ同格な国にとっては

$a_1=a_2=a$，$A_1=A_2=A$，$s_1=s_2=s$，

そのとき，

$$p_C=\frac{2A(k+r)}{k(k+r)+4s}\quad,\qquad (6\,A)$$

$$E_1=E_2=\frac{kp^*}{2}=\frac{2A(k+r)k}{k(k+r)+4s}\qquad (6\,B)$$

この結果はパレート効率を満たす結果である。つまり，環境と経済の調和の結果である。しかし，この結果は国際条約に依存しなければならない。なぜならば，この結果はNash均衡ではないからである。任意の一国にとってはこの協力戦略を違反するインセンチブがある。

非協力ゲームはどうするか。ここではMarkovゲームを考える。Markovゲームでは，任意のプレーヤーは自分の行動を採用するとき，他国の行動を考慮しない，単なる状態を考慮する。プレーヤーは他のプレーヤーの行動を考慮しないから，このようなパターンのパーフェクト均衡は再交渉の条件に満たすのは明かである。制裁に依存している均衡（この均衡が再交渉に満たさない）がパレート効率に一致するという結論はすでに理論経済学で解決されている。ここでの問題は再交渉を満たす均衡について分析するから，Markovゲームは妥当と考える。

非協力戦略は各国が自国の利得を最大化するという行動である。

$$\frac{\partial H^i}{\partial E_i} \leqq 0 \quad (=0\ if E_i > 0) \quad i=1,\ 2,$$

$$\frac{d\lambda_i}{dt} = -\frac{\partial H^{i0}}{\partial p} - \frac{\partial H^{i0}}{\partial E_j}\frac{\partial E_j}{\partial p} + r\lambda_i \ (i,\ j=1,\ 2 \quad i \neq j),$$

$$\frac{dp}{dt} = E_1 + E_2 - kp\ 。$$

ここでは

$$H^i = \left(AE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}sp^i\right) + \lambda_i(E_1 + E_2 - kp) \quad (i=1,\ 2)。$$

汚染放出は非負であるから，

最大化条件によって

$E_1 = max\{A_i + \lambda_i,\ 0\}$,

$$\frac{dE_i}{dt} = s_i p + (k+r)(E_i - A_i) - (E_i - A_i)\frac{\partial E_j}{\partial p},$$

$\frac{dE_i}{dt} = \frac{\partial E_i}{\partial t} + \frac{\partial E_i}{\partial p}\frac{dp}{dt}$，だから，更に，われわれは安定な状態を考察する。従って，

$$s_i p + (k+r)(E_i - A_i) - (E_i - A_i)\frac{dE_j}{dp} - \frac{dE_i}{dp}\frac{dp}{dt} = 0, \tag{7}$$

このゲームの線形戦略はNash均衡として存在し，この均衡はかつパーフエクションである，という結論はよく知られている。

ここでは$E_i = c_i + b_i p$と設定して，

同格の二つの国にとっては簡単に計算できる。

$s_1 = s_2 = s$，$A_1 = A_2 = A$，

$c_1 = c_2 = c$，$b_1 = b_2 = b$，

$$b_{1,2} = \frac{1}{3}\left\{k + \frac{r}{2} \mp \sqrt{\left(k + \frac{1}{2}r\right)^2 + 3s}\right\}, \tag{8}$$

$$c_{1,2} = \frac{2Ab_{1,2}}{k + r - 3b_{1,2}} + A = \frac{\frac{2A}{3}\left[k + \frac{r}{2} \mp \sqrt{\left(k + \frac{r}{2}\right)^2 + 3s}\right]}{\frac{r}{2} \pm \sqrt{\left(k + \frac{r}{2}\right)^2 + 3s}} + A \tag{9}$$

静止な汚染ストックは

$2c + 2bp^* - kp^* = 0$，

$$p_{nl}^* = \frac{2A\left(2k + \frac{5}{2}r\sqrt{\left(k + \frac{r}{2}\right)^2 + 3s}\right)}{\left(\frac{r}{2} + \sqrt{\left(k + \frac{r}{2}\right)^2 + 3s}\right)\left(k - r + 2\sqrt{\left(k + \frac{r}{2}\right)^2 + 3s}\right)} \tag{10}$$

放出Eiに対して制約がなければ，$E_i = A_i + \lambda_i$である。しかし，任意の国家にとっては，放出が非負であると言う事実から，この微分方程式は$E_i \geqq 0$でのみ成立するから，$p > p^u$にとって，まだ定義していない。すべてのpにとってE(p)が定義されるから，E(p)は戦略と言える，$p > p^u$ときE(p)=0と拡張できる。つまり，図のような戦略である。この戦略ペアはパーフェクト均衡であるということは次の章で説明する。

$$E(p) = \begin{cases} c + bp & p \leqq p^u = -\frac{c}{b} \\ 0 & p > p^u \end{cases} \tag{11}$$

命題　この非協力線形戦略の均衡により成り立つ汚染ストックp_{nl}^*は協力戦略により成り立つ汚染ストックp_cより大きい。

証明：参考［6］

この線形戦略の均衡は国際環境問題が生じることは簡単に説明できる。もし，この均衡がこのゲー

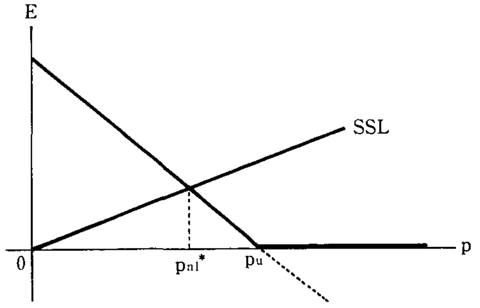

図2　$E(p)\geqq 0$ という制約がなければ、均衡戦略は曲線であるが、この制約があれば、均衡戦略は折線である。

ムの唯一のパーフェクト均衡であれば，パレート効率状態（国際環境問題の解消）になるためには協力しなければならない。あるいは制裁しなければならない。協力は国際法に依存している。制裁はしばしば実行できない。実行できないから，信頼できるのは国際法しかない。勿論国際法の締結は容易なことではない。だから，このゲームの中で，パレート効率の結果にパーフェクションがあるかどうかは我々にとって関心のことである。

第3章　非線形戦略と均衡

①. 無制約の非線形解

線形戦略は求められたにも関わらず，微分方程式では非線形解が存在している。この非線形解に対応しているのは非線形戦略である。

$$s_1 p + (k+r)(E_i - A_i) - (E_i - A_i)\frac{dE_j}{dp} - \frac{dE_i}{dp}\frac{dp}{dt} = 0 \qquad (12)$$

$$\frac{dp^*(t)}{dt} = E_1 + E_2 - kp^*(t).$$

この連立微分方程式の一般解を求めるのは難しい。同格の二つの国にとって，対称な戦略は有り得る。

$$sp + (k+r)(E-A) - (E-A)\frac{dE}{dp} - \frac{dE}{dp}(2E - kp) = 0. \qquad (13)$$

つまり，

$$\frac{dE}{dp} = \frac{sp + (k+r)(E-A)}{3E - kp - A},$$

$$\phi = E + a - A,\quad q = p + b \qquad (14)$$

を設定する。

$\dfrac{dE}{dp} = \dfrac{d\phi}{dq}$ になる。

$$\frac{d\phi}{dq} = \frac{-\dfrac{sb + (k+r)a}{q} + s + (k+r)\dfrac{\phi}{q}}{\dfrac{2A + kb - 3a}{q} - k + 3\dfrac{\phi}{q}},$$

$sb + (k+r)a = 0$
$2A + kb - 3a = 0$　　を設定すると

$$\frac{d\phi}{dq} = \frac{s + (k+r)\dfrac{\phi}{q}}{-k + 3\dfrac{\phi}{q}} = G\left(\frac{\phi}{q}\right),$$

ここでは

$$a = \frac{2As}{3s + k(k+r)},\quad b = -\frac{2A(k+r)}{3s + k(k+r)}, \qquad (15)$$

$\phi = \pi q$ を設定すると

$$q\frac{d\pi}{dq} = G(\pi) - \pi = \frac{\pi^2 - \dfrac{2k+r}{3}\pi - \dfrac{s}{3}}{\dfrac{k}{3} - \pi}$$

$$Cq = (\pi - z_a)^{m1}(\pi - z_b)^{m2}。 \qquad (16)$$

ここでは，z_a，z_b は次の方程式の解である。

$$z^2 - \frac{2k+r}{3}z - \frac{s}{3} = 0,\quad z_b \neq z_a$$

ここでは

$$m_1 = \frac{z_a - \dfrac{k}{3}}{z_b - z_a},\quad m_2 = \frac{\dfrac{k}{3} - z_b}{z_b - z_a},$$

$$m_1 + m_2 = -1$$

(16) 式に $\pi = \phi / q$ を入れて

$$C = (\phi - qz_a)^{m1}(\phi - qz_b)^{m2}$$

さらに，変換式 (14) を上の式にいれて，次の式になる。

$$C = \{E + a - A - Z_a(p+b)\}^{m1}\{E + a - A - Z_b(p+b)\}^{m2} \qquad (17)$$

この方程式により表す曲線は図3のように，a，bの二つの直線

$E + a - A = z_a(p + b)$，$E + a - A = z_b(p + b)$ は二つの前述べた非協力線形戦略と対応している。すべての曲線はこの二つに関する漸近線であり，互いに交差しない。

SSL 線は $E1 + E2 - kp = 0$ を表す。つまり，

$SSL = kp / 2$ (18)

われわれが求めたいことは，安定なパレート効率の状態になれる Markov-perfect 均衡である。O 点はP点の上，かつ SSL の勾配が b 線より小さいから，Ⅱ区のすべての戦略は SSL 線と交差しない。だからⅡ区内の戦略によって静止的な戦略を求めるのは不可能である。従ってⅡ区を考えない。Ⅲ区の戦略は SSL と交差しない，あるいは，安定な状態になれない。いずれも，Ⅲ区の戦略を考慮しなくても良いⅠ区の戦略によって得た安定な汚染状態はP点の汚染状態より大きく，かつ利益も小さい。線形戦略がパーフェクト均衡になる上でⅠ区の戦略を考えなくても良い。

曲線の横軸交差している左点と右点は別々 p_d，p_u と書く。p_d，p_u の間で $\hat{E_i} = A + \lambda_i \geqq 0$

これから，われわれはⅣ区で分析する。

ここでは図3の縦軸は $\hat{E}$ である。$\hat{E} \geqq 0$ のみ E と等しい。前述べたように $\hat{E} < 0$ 時，$\hat{E}$ は戦略を合わせない。もう一方，戦略と言えば，状態空間のすべての状態を用意しなければならない。

$p \in (p^d, p^u]$ のとき $\hat{E}(p) = E(p)$

$p \notin (p, p)$ のとき $E(p) \geqq 0$

連続性によって

$\lim_{p \to pd} E(p) = \hat{E}(p^d)$，$\lim_{p \to pu} E(p) = \hat{E}(p^u)$

すべての $p \in P$ の p にとって E(p) の定義があるこそ E(p) は戦略と呼ばれる。

SSL 線と a 直線の交差点は線形戦略により得た安定的な汚染ストック p_{nl}^* である。この汚染ストックは常に協力戦略から得た汚染ストックより大きいから，パレート非効率性の問題が生じる。しかし，方程式が表す非線形戦略の数は無限であるから，これらの非線形戦略により得た安定的な汚染ストックは協力戦略に得た汚染ストックに近付けるであろうか。非協力ゲームの非線形戦略によりそのパレート非効率性の問題を解消できるだろうか。これは我々にとって最も関心ある問題である。

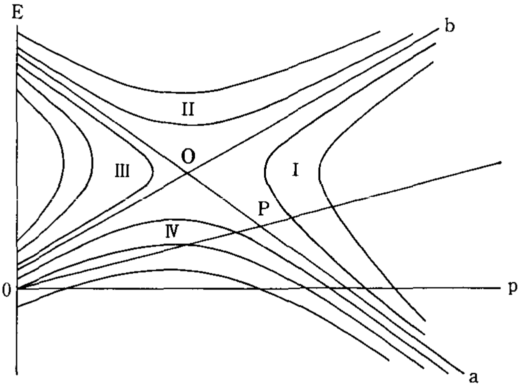

図3　制約がないとき、方程式の解の曲線

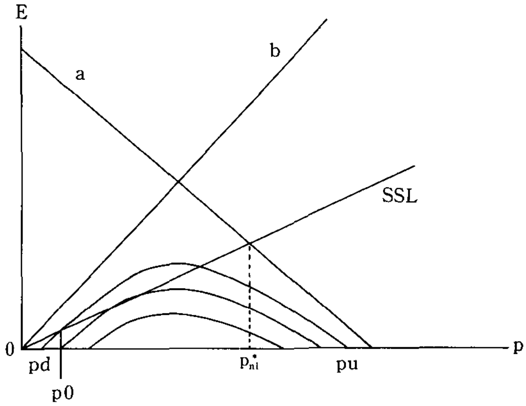

図4

両国の戦略 $E = A + \lambda$ はこの曲線に定着できる安定的な汚染ストックは次のように求められる。

$$\frac{dp^*(t)}{dt} = E_1^* + E_2^* - kp^*(t)$$

をある安定な p^* のところで線形化して，

$$\frac{dp}{dt} = \left[2\frac{dE}{dp}\bigg|_{p*} - k \right](p - p^*)$$

安定性条件は $2\frac{dE_i}{dt}\bigg|_{p*} - k < 0$，である。

(19)

静止条件によって，$2E - kp^* = 0$ つまり，

$$E = \frac{kp^*}{2}$$

この式を安定性条件に代入して，

$$\frac{dE}{dp}\bigg|_{p^*}=\frac{2sp^*+k(k+r)p^*-2A(k+r)}{kp^*-2A}<\frac{k}{2},$$

$$p^*>P_m^*=\frac{2A(k+2r)}{k^2+2kr+4s}.$$

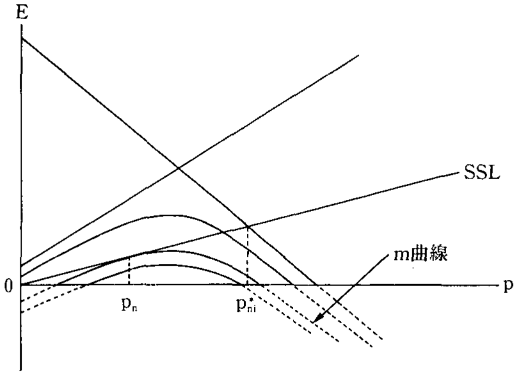

図5　制約があるから、横軸以下は意味がない。

この式により，線形戦略から得た汚染ストック p_{nl}^* と p_c の間のすべての安定な状態 p^* はこれらの非線形戦略により支持される。割引率が小さいとき（普通は割引率が小さい）p_m^* は協力戦略にから得た汚染ストック p_c と同じである。この結果は多数の人々の関心を呼び起こした。もしも，この p_m^* を支持する戦略ペアが Nash 均衡であれば，さらに，パーフェクションであれば，パレート非効率性の問題を解消できる。文献［5］はこの p_l と p_c の間のすべての p^* を支持する戦略ペアはパーフェクションであると結論をつけた。これは重大な問題である。特に，p_m^* を支持する戦略は Nash 均衡である，あるいはパーフェクションであるならば，パレート非効率性の問題を解消するために，単なる国家間の対話を通じて，この非効率の問題を解決できる。つまり，国家間の対話によって非線形戦略を設けて，決着することができる。均衡であるから，片方の国にとっては，違反のインセンティブがないから，この効率の結果を守れる。もしも，この P_m^* を支持する戦略ペアは Nash 均衡さえでなければ，この効率の結果を守るために，協力戦略を維持するための条約を必要とするか，あるいは，制裁などの手段を使わなければならない。つまり，単なる対話を通じて，環境問題を解決するには全く不十分である。

②．戦略の制約

二つ国にとってどのような戦略を選択しても，放出の行動は負値にならない。この現実を我々は無視できない。ここではこの制約は重要な役を演じている。すべての戦略は E ＞ 0 以上の半平面で有意である。線形戦略を含めて，すべての戦略はこの問題に抱えている。微分方程式の解は単なる p^d，p^u の間の区間の必要条件を定めた。この区間以外でどのように行動するか，一つの非線形戦略の構築は簡単であるが，この拡張された戦略は均衡になれるかどうか，続けて検討する必要がある。

これらの戦略ペアはパーフェクションであるかどうか，これに答えるために，次の分析をおこなう。

定義　ゲームの Markov パーフェクションはすべてのプレヤー（国）の戦略が Markov 戦略を採用したパーフェクト均衡である。つまり，任意の p（p ∈ P）で，すべてのペア（E_1，E_2）∈ $S_1\times S_2$ にとっては

$$J^1(E_1^*,\ E_2^*,\ p)\geqq J^1(E_1,\ E_2^*,\ p),$$

$$J^2(E_1^*,\ E_2^*,\ p)\geqq J^2(E_1^*,\ E_2,\ p),$$

が成り立つならば，ペア（E_1^*，E_2^*）は Markov パーフェクションである。

文献［1］［11］により，（E_1^*，E_2^*）パーフェクションであれば，値関数(value function) Vi は Bellman-Hamilton 方程式に満たす。

$$\frac{\partial}{\partial t}V^i(E_i^*,\ E_{-i}^*,)=$$

$$maxH^i(E_i,\ E_{-i}^*,\ p;dV^i/dp),$$

$$for\ all\ p\in P \tag{20}$$

一般的にこの偏微分方程式から値関数を求めるのは難しい。或いは値関数存在しない。ここでは前の分析を利用して分析する。

ここではまず W (p)関数を定義する。

$$V^i(p_0)=\int_0^\infty\left[A_iE_i^*-\frac{1}{2}E_i^{*2}\frac{1}{2}s_ip^{*2}\right]e^{-rt}dt, \tag{21}$$

$$\frac{dp^*(t)}{dt}=E_1^*(t)+E_2^*(t)-kp^*(t),$$

$$p_0=p_{(t=0)}$$

本論文の場合は

$$rV^i = \max_{E_i} \mathscr{H}^i \left(E_i,\ E^*_{-i},\ p;\ \frac{dV^i}{dp} \right)$$

$$= \mathscr{H}^i \left(E^*_i,\ E^*_{-i},\ p;\ \frac{dV^i}{dp} \right)$$

ここでは,

$$\mathscr{H}^i (E_i,\ E_{-i},\ p;\ \lambda_i)$$
$$= AE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}sp^2 + \lambda_i (E_1 + E_2 - kp),$$

$$E^*_i = \operatorname{argmax}_{E_i} \mathscr{H}^i (\mathrm{E_i},\ E^*_{-i},\ p;\ dV^i / dp)$$

$$= A + \frac{dV^i}{dp},$$

制約 $A + \dfrac{dV}{dp} \geqq 0$。

パーフェクションの必要条件はまず，Nash 均衡である。最大化原理は Nash 均衡の必要条件を提供していた。それにより，

$p \in (p^d,\ p^u)$で微分方程式の解である。つまり，

$$\lambda = \frac{dV^i}{dp}$$

ここでは，$\lambda > -\mathrm{A}$とき，λは微分方程式 (13) 式の解である。つまり，もし，W (p)は値関数であれば (注 8),

我々は

$$W^i (p) = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{2} (A^2 - sp^2) + (2A - kp) \lambda + \frac{3}{2} \lambda^2 \right], \qquad (22)$$

が値関数と推測する。$[p^d,\ p^u]$で，Ei が Ui の内点をとっているから，この区間でψは唯一解である。だから，値関数存在すれば，$[p^d,\ p^u]$区間で, (22) 式を満たさなければならない。しかし，$[p^d,\ p^u]$区間で, (22) 式は値関数になれるかどうかは調べる必要がある。この区間で,

$$E^*_i = \arg\max H^i \left(E_i,\ E^*_{-i},\ \frac{dW^i}{dp} \right) = A + \frac{dw}{dp},$$

だから,

$$rW^i = H^i \left(\mathrm{E}^*_i,\ E^*_{-i},\ \frac{dW^i}{dp} \right) = AE^*_{i(t)} - \frac{1}{2}E^{*2}_{i(t)} - \frac{1}{2}sp^{*2}_{(t)} + \frac{dW^i}{dp} [E^*_{1(t)} + E^*_{(t)} - kp^*_{(t)}]$$

もしも，時間 T 以内で状態 p は$[p^d,\ p^u]$区間にあれば，

$$\int_0^T \left[AE^*_{(t)} - \frac{1}{2}E^{*2}_{(t)} - \frac{1}{2}sp^{*2}_{(t)} \right] e^{-rt} dt$$
$$= W^i (p_0) - W^i (p_T) e^{-rT}$$

になる。もしも，個の区間に集束すれば，

$$\lim_{T \to \infty} \int_0^T \left[AE^*_{(t)} - \frac{1}{2}E^{*2}_{(t)} - \frac{1}{2}sp^{*2}_{(t)} \right] e^{-rt} dt$$
$$= W^i (p_0)$$

明らかに，区間$[p^d,\ p^u]$の中のすべての初期状態が個の区間で集束するわけではない。$p_0 \in [p^0,\ p^u]$中の初期状態はその中で集束する。$p_0 \in [p^d,\ p^0]$の初期状態は$[p^d,\ p^u]$の中で集束するのは保証できない。だから，(22) 式で表す関数は値関数になれるのは$[p^0,\ p^u]$区間だけで保証される。

状態空間$P = [0,\ \infty)$の場合は，初期状態は二つの区間おいて，値関数になれるか否かは明らかになっていない。つまり，$[0,\ p^0)$と$[p,\ \infty)$である。右の区間にとって，Haniltonian 方程式を満たす値関数を探すのは簡単なことである (注 9)。

$$W^E (p) = \begin{cases} V^E (p) & p \in [p^u_q,\ \infty) \\ W (p) & p \in [p^0_q,\ p^u_q] \end{cases} \qquad (23)$$

$$E^E (p) = \begin{cases} 0 & p \in [p^u_q,\ \infty) \\ \hat{E} (p) & p \in [p^0_q,\ p^u_q] \end{cases}$$

ここでは

$$W^i (p) = W (p^u) e^{-r\tau(p)} - \frac{s}{2(r + 2k)} [p^2 - p^{u2} e^{-r\tau(p)}] \qquad (23\mathrm{A})$$

$\tau(p)$ は $p(p>p^u)$ から p^u までの時間である。ここでは

$$\tau(p)=\frac{1}{k}ln\left(\frac{p}{p^u}\right) \tag{24}$$

$p>p^u$ とき，$E(p)=0$ から，状態は確実に p から pu へ変化し，pu になると，非線形部分に入る。

以上の拡張により，値関数は（p_q^0，∞）で定義あり，かつ状態方程式により p_q^* へ集束する。

この拡張の意味は q 曲線はパーフェクションであるかどうかは（p_q^0，∞）でチェックしなくても良い。もし，状態空間 $P\subseteq(P_q^0, \infty)$ ならば，q 曲線による戦略ペアはパーフェクションである。P＝［0，∞）の状態空間にとっては，q 曲線はパーフェクションであるかどうかは［0，p_q^0 ）区間により決められる。（p_q^d，p_q^0 ）区間の曲線はこの解により定められたからである。線形戦略にとっては $p_d=-\infty$ である。ここでは前章で線形戦略ペアがパーフェクト均衡であると説明しなっかたことを証明した。しかし，非線形戦略にとっては $p_d>0$ から，任意の初期状態 $p_0>0$ にとって，（0，∞）の中のすべての状態 p が到着できるのは有り得ることである。だから，状態空間は（0，∞）$\subseteq P$ である。だから，パーフェクションが保証されない。ここまで，パーフェクションが保証され無いけれども，パーフェクションではないということはまだ証明されない。これは次の仕事である。

③．非線形戦略ペアはパーフェクションではない

命題　初期状態 $p_0\in[p_m^d, p_m^*)$ のゲーム $G(p_0)$ において p_m^* を支持する戦略ペアは Nash 均衡にならない。

証明：

m 曲線に置いては $p_0\in[p_m^d, p_m^*)$ の任意の p_0 が初期状態として，プレヤー（国）が 0 曲線の戦略を実行すれば，point（P_m^d，0）に到着できるのは事実である。E＞＝0 の制約があるから，微分方程式による定めた区間（p_m^d，p_m^u）だけである。p_m^d 状態に到着した後，任意の作用（単値条件と連続性）を取っても安定状態 p_s は必ず $p_s\in[0, p_m^d)$ が満たす。そうすれば，プレーヤー i の利得は

$$V^i(p_0)=\int_0^{Td}\left[A_iE_i-\frac{1}{2}E_i^2-\frac{1}{2}s_ip^2\right]e^{-rt}dt+\int_{Td}^{Ts}\left[A_iE_i-\frac{1}{2}E_i^2-\frac{1}{2}s_ip^2\right]e^{-rt}dt+\int_{Ts}^{\infty}\left[A_iE_i-\frac{1}{2}E_i^2-\frac{1}{2}s_ip^2\right]e^{-rt}dt \tag{26}$$

ここでは，

$$\frac{dp(t)}{dt}=E_1(t)+E_2(t)-kp(t)$$

$p_{(t=0)}=p_0$，　$p_0\in[p_m^d, p_m^*)$

ここでは，Td が p_0^d 状態に到達の最初時間で，Ts が安定状態 ps に到達の時間である。Td は有限であるのは明確であるが，Ts が有限であるかどうかは $E_{(p)}$，$p\in[0, p_m^d)$ に依存している。

もし，プレヤー i は勝手に戦略を違反して，初期状態 p_0 から p_m^d を定着すれば，どうするか。プレヤー j はこの時，予定戦略を実行しているから，プレヤー i は違反戦略 $E'(p)$ で安定な $p_m^d(<p_0)$ で維持できる。安定状態を維持できるということを証明するために，まず，この戦略を構造しなければならない。

$$\frac{dp}{dt}=E_{h(p)}+E^*_{(p)}-kp$$

安定状態は

$NSSL(p)=kp-E^*(p)$

プレーヤー j が $E(p)$ を実行する（違反しない）限り，プレーヤー i（違反者）はこの曲線の上方で放出すれば，汚染状態は増加する。逆に，汚染状態は減少する。この曲線上で放出すれば，静止状態になる。安定な p_m^d になれる違反戦略は

$$E'(p)=\begin{cases}>NSSL & p<p_0\\ =NSSL & p=p_0\\ <NSSL & p>p_0\end{cases} \tag{27}$$

かつ，$E^*(p_0)=E'(p_0)$

違反戦略により利得は

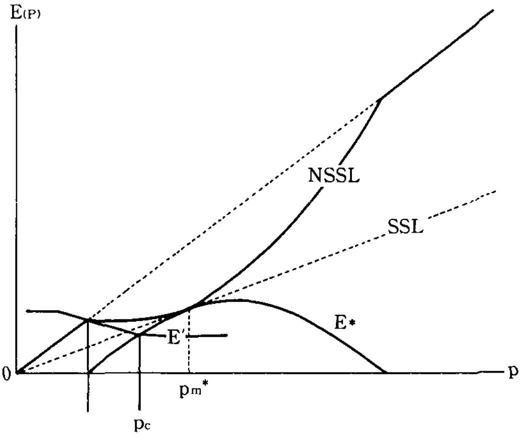

図 6　制約条件を満たす違反戦略はもっと高い利得を得られる。

$$J^i(E',\ E^*,\ p_0) = \int_0^T \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt + \int_T^\infty \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt \quad (28)$$

違反しない戦略の利得 V (p_0)より大きいとすれば，予定戦略（違反しない戦略）は Nash 均衡ではない。ここでは T' は違反戦略で状態 p_d に到着にかかる時間である。

以下のケースに分ける。ケースⅠはT'，Ts ともに無限である。ケースⅡはT' 有限で，Ts 無限である。ケースⅢはTs 有限で，T' 無限である。ケースⅣはT'，Ts ともに有限である。ここでは，T'，Td 無限であるケースⅠを証明する。他のケースはこのケースⅠの特例と考えられる。

予定戦略で，状態は p_s へ集束するから，有限な時間内 T_s^δで

$|p_{(t)} - p_s| < \delta_s \qquad \delta_s > 0 \quad for \quad t1T_s^\delta$

違反戦略を採用すれば，状態は p_m^d へ集束するから，有限な時間内で

$|p_{(t)} - p_m^d| < \delta_d \qquad \delta > 0 \quad for \quad t1T'_\delta$

$T = max\,[T_s^\delta,\ T'_\delta]$ と設定して

$$V^i(p_0) = \int_0^{Td} \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt + \int_{Td}^{T_s^\delta} \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt + \int_{T_{\delta s}}^{T} \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt + \int_T^\infty \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt$$

$$J^i(p_0) = \int_0^{T\delta} \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt + \int_{T\delta}^{T} \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt + \int_T^\infty \left[A_iE_i - \frac{1}{2}E_i^2 - \frac{1}{2}s_ip^2\right] e^{-rt}dt$$

違反しない戦略で安定状態と放出は SSL に置いているから，

$$E^*(p_s) = \frac{k}{2}p_s$$

$U(p) = \frac{kA}{2}p - \frac{1}{2}\left(\frac{kp}{2}\right)^2 - \frac{s}{2}p^2$ と設定する。

$p^m = \frac{2\,kA}{k^2 + 4\,s}$ で U が最大値となる。

$p_s < p_d < p^m$ かつ U (p)は p について concave であるから，

$$U(p_s) < U(p_d)\ U(p_s) = \frac{kA}{2}p_s - \frac{1}{2}\left(\frac{kp_s}{2}\right)^2 - \frac{s}{2}p_s^2 \quad (29)$$

U (ps)の値は違反しない戦略が安定状態 p_s でのカレント瞬間利得である。

$t \geqq T$ 時，違反しない戦略によって，

$|p_{(t)} - p_s| < \delta,\ |E_{(p)} - E_{(ps)}| < M\,|p_{(t)} - p_s|$

t 時刻のカレント利得は $U^*(t) = AE^*_{(t)} - \frac{1}{2}E^{*2}_{(t)}\ \frac{1}{2}sp^{*2}_{(t)} = U(p_s) + \triangle$

ここでは，$\triangle = AM\,\delta - E(p_\delta)_i M\,\delta - \frac{1}{2}M^2\,\delta^2 + sP_\delta\,\delta - \frac{1}{2}s\,\delta^2$

もし$\triangle < \varepsilon$，つまり，

$AM\,\delta - E(p_s)_i M\,\delta + sp_s\,\delta < \varepsilon$

$$\delta < \frac{\varepsilon}{M(A - E(p_s)_i) + sp_s}$$

$E(p_s) < A$，$p_s > 0$，$s > 0$
だから，任意の $\epsilon > 0$ にとっては δ 存在する。
国 i は違反戦略を選ぶならば，安定状態と放出は NSSL に置いているから，安定状態 pd でのカレント瞬間利得は

$$U'(p) = AE'_{(pd)} - \frac{1}{2}E'^2_{(pd)} - \frac{1}{2}sp_d^2$$

$$= kAp_d - \frac{1}{2}(kp_d)^2 - \frac{1}{2}sp_d^2 > U(p_d) \tag{30}$$

$t \geqq T$ 時，違反戦略によって，

$|p'_{(t)} - P_s| < \delta$，$|E'_{(t)} - E'_{(pd)}|$
$< M\,|p'_{(t)} - p_d|$

$$U'(t) = \mathrm{AE}'_{(t)} - \frac{1}{2}E'^2_{(t)}\frac{1}{2}sp'^2_{(t)}$$

$$\geqq A(E'(p_d) - M\delta) - \frac{1}{2}(E'(p_d) - M\delta)^2$$

$$-\frac{1}{2}s(p_d + \delta)^2 = U'(p_d) - \triangle$$

ここでは，$\triangle = AM\delta - E(\mathrm{p_d})M\delta$
$+\frac{1}{2}M^2\delta^2 + sP_d\delta + \frac{1}{2}s\delta^2$

$\triangle' < \epsilon'$ にとって，このような δ がいつも存在している。
$U(p_s) < U(p_d) < U'(p_d)$ によって
$U(p_s) + \epsilon < U(p_s)$，$U(p_d) + \epsilon' < U'(p_d)$
を成立させる ϵ，ϵ' が存在する。だから，$t \geqq T$ とき
$U'(p'_{(t)}) > U(p_{(t)})$　　$U'(p'_{(t)}) - U(p_{(t)}) > \epsilon$
$J^i(E'_i,\ p_0) - V^i(p_0) = F' - F + \int_T^\infty [U'(p'_{(t)}) - U(p_{(t)})]e^{-rt}dt >$
$F' - F + \frac{1}{r}\epsilon_0 e^{-rT}$

十分に小さい r にとって，$J^i(E'_i,\ E_i^*,\ p_0) > V^i(E_i^*,\ E_j^*,\ p_0)$
証明終了。

命題　任意の初期条件 P'_0 にとっては P_m^* を支持する戦略ペアはパーフェクションにならない。

証明：任意の p'_0 にとっては，状態 $p_0 \in (p_m^d, p_m^*)$ になれる。つまり，G $(\mathrm{p_0})$ は G $(\mathrm{p_0^1})$ のサブゲームである。証明終了。

4．結　　論

われわれのモデルのなかで，パレート非効率の問題は自主的な行動によってはどうしても解消できない。国家間の対話のみによっても国際環境問題を解決できない。国際法は国際環境問題の解決にとっては不可欠なものである。もちろん，本論文は国家間の対話の役割に対して否定的な立場ではない。国家間の対話は国家間の信頼を増やし，これに基づいて国際の協定の締結に対する役割がある。しかし，協定につながらない対話はあくまでも国際環境問題を解決できない。

われわれのモデルの中で，モデルの抽象化によって国際貿易が省略されている。制裁手段として貿易を使わない限り，貿易が環境政策に対する影響は負的である。例えば，国が自国の財の国際の競争力を考慮するとき，自国の環境基準がきびしければ厳しいほど，自国の財の競争力も失ってしまう。本論文は長期的な戦略でもフリーライドのような行動が避けられないと論じて，貿易など国際取引の省略は本論文の本質を失っていない。

本論文は国の放出行動は時間に関する連続であり，下限はゼロであるとしている。もし，非連続な行動が国の選択肢になれば，パレート非効率の問題が解消できる。あるいは一国の放出が負値(産業革命以前のような原始的な経済活動）になるのが可能であれば，パレート非効率の問題が解消できる。しかし，いずれの前提も非現実である。極短な時間内で，突然エネルギーの転換，化石燃料の削減はある企業にとって可能かもしれないが，一国にとって決して可能ではない。産業革命以前のような状態に戻るのはもっと可能性がない。

本論文は自主規制（フリーライドの解消）の可能性に関する研究で，国際環境問題を解消するため，国際条約の不可欠に関する研究である。国際条約はどうやて締結するか，本論文のテーマではないが，国際環境問題の解決に向かって国際条約の締結はそれほど簡単ではない問題である。世界の中で，国の事情はさまざまである。経済の格差，生活のスタイル，文化の差など諸要因がある。環

境質を一つの財として，高級財の質を現せる。この特徴によって，先進国が発展途上国より国際環境の改善を望んでいる。その意味は国際環境改善によって，先進国の一人あたりの利益（補償変分）は途上国より大きいことを表している。逆に，二酸化炭素の削減によって，途上国の犠牲は先進国より大きい。利益移転がない国際環境改善計画はまず合意不可能であろう。幸い，このような研究は進んでいる。例えば，文献［16］［18］など。

(註)

（註１）長期的なゲーム中で，過去の決定は現在あるいは将来の意思決定に影響を与えると考えられる。もし，過去の決定は現在あるいは将来の決定に直接ではなく，ある状態に通じて影響を与えるならば，このようなゲームは Markov ゲームと呼ぶ。Markov ゲームにおけるパーフェクト均衡は Markov - perfect 均衡と呼ぶ。文献［１］,［８］を参考のこと。

（註２）再交渉立証（ Renegotiation-Proofness ）は均衡 Refinement の基準として Bernheim, Peleg と Whinston たちによってはじめて提出された。この基準は Coalition の概念に基づいて定義され， Coalition-Proofequilibrim とも呼ばれる。多数のプレーヤーのゲームの中の均衡は Coalition-proof 均衡に満たすならば，この均衡はすべての Coalit-ion によって構成されたゲームの中で均衡とも言える。文献［３］,［８］を参考。

（註３）本論文では，すべて他のプレーヤーの戦略が一定するとき，自分が利用できる情報に基づき，自分にとって最も大きい利得を得られる戦略は，非協力戦略と呼ぶ。自分の利得の目的ではなく， Coali-tion の利得の最大化の目的としての戦略は協力戦略と呼ぶ。これは公式的な定義ではない.

（註４）この単一財は複数の集計と考えられる。複数財について選好は支出関数により表す。ここでは価格は定数と設定する。

（註５）自然浄化能力は海や森林などが二酸化炭素に対する吸収能力の和である。文献［16］は詳しい説明に参考して下さい。なお，本論文は森林を伐採するによって自然が二酸化炭素の浄化律の変化について考慮していない。

（註６）このようなゲームは微分ゲームである。最初の研究は文献［13］環境問題に関する研究は文献［９］［10］など。

（註７）協力結果はすべてのプレーヤーが協力戦略をプレーするによって得られた結果であり，各プレーヤーの戦略及び利得である。非協力結果は非協力戦略に対応している各プレーヤーの戦略及び利得である。

（註８）(22) 式の基本的な考えは文献［15］と同じだが，目標関数の違いによって具体的な式は［14］と多少違う。

（註９）基本的な考えは［６］と同じが，具体的に多少違う。

参考文献

［１］ Basar, T and Olsder G. J, Dynamic Noncooperative Game Theory, Academic press, 1982.

［２］ Baumol, William J. and Wallance E. Oates, The Theory of Environmental Policy (Second Edition), Cambridge University Press (1988).

［３］ Bernhein, B. D., B. Peleg, and M. Whinston. Coalition-proof Nash equilibria. I : Concepts. Journal of Economic Theory 12 : 1–12 1987

［４］ Braden, J. B and Daniel W. Bromley, The Economics of Cooperation Over Collective Bads, Journal of Environmental Economics and Management 8, 134–150 (1981).

［５］ Cornes, Richard and Told Sandler, the Theory of Externalities, Public Goods, and Club Goods. Cambridge University Press (1986).

［６］ Dockner, Engelbert J and Ngo Van long, International Pollution Control : Cooperative Versus Noncooperative Strategies. Journal of Environmental Economics and Management 24 (1993) 13–29.

［７］ Fershtman, chaim and Morton I. Kamien, Dynamic Duopolistic Competition with Sticky Prices. Econometrica, Vol. 55, No.5 (1987) 1151–1164.

［８］ Fudenberg, Drew and J. Tirole, Game Theory. MIT Press (1991).

［９］ *Hoel, Michael, Global Environmental Problems :* The Effects of Unilateral Actions Taken by One Country. Journal of Environmental Economics and Management 20, (1991)55–70.

[10] Long, N. V, Pollution Control : A Differential Game Approach. Annals of Operation Research, 27 (1992) 283–296.

[11] Mehlman, Alexander, Applied Differential Games. Plenum Press 1988.

[12] Pearce, David W. and R. Kerry Turner, Economics of Natural Resources and The Environment. Harvester Wheatsheaf (1990).

[13] Randall, Alan, RESOURCE ECONOMICS : An Economic Approach to Natural Resource and Environmental Policy (Second Edition). John Wiley & Son (1987).

[14] Starr, A. W and Y. C. Ho, Nonzero-Sum Differential Game Journal of Optimization Theory and Applica-

tion, Vol. 3, No. 3 (1969) 184–206
[15] Tsutsui, Shunichi and Kazuo Mino, Nonlinear Strategies in Dynamic Duopolistic Competition with Sticky Prices. Journal of Economic Theory 52, (1990) 136–161.
[16] Uzawa, Hirofumi, "Global Warming Initiative : The Pacific Rim" in R. Dornbush and J. M. Poterba eds., Global Warming : Economic Policy Responses, MIT Press(1991) 275–324
[17] Varian, H, Microeconomic Analysis, 3d ed. NORTON(1992).
[18] Whalley, J. and R. Wigle "The International Incidence of Carbon Taxes" in R. Dornbush and J. M. Poterba eds., Global Warming : Economic Policy Responses, MIT Press (1991) 275–324