[北海道農業経済研究　第4巻第2号　1995.5]

［論　文］

環境政策の制定と実施のタイミング問題

− 政府・企業の交渉におけるゲーム理論分析 −

修　震　杰*・出　村　克　彦**

Ⅰ．はじめに

1．1　問題意識

今日環境問題がますます深刻化している。環境問題は経済学的にも注目されてきた。Pigouvian taxとLindahl均衡は環境問題等の外部性の課税と補償の根拠を提供した。しかし、多くの経済学者が指摘しているように、経済活動の利益と環境破壊による経済的損失の評価額を集計的に推定することは困難である。この最適税率（あるいは補償率）が存在しても、この値を推定することは困難である。新厚生経済学の原理に従えば、個人間の効用比較の不可能性を前提にすれば、Pigouvian taxの存在性さえも疑問視される。

Baumol, Oates (1988) はPigouvian taxを批判しながらも、環境目標を一旦設定して（この目標が最適か否かは問わず)、規制と税金を通じてこの環境目標が達成できることを証明した［1］［9］。しかし、これは政府に絶対的な権限があれば、あるいは、この規制政策が実行できれば、目標が達成できるという論理の循環である。この環境政策が実行できる否かは、またどの主体によって政策が決定されるかはまだ未解明である。

環境規制政策を現実に実施する場合、多くの困難性があるが、これには二つのケースに分類される。

1）環境基準があるのにも関わらず、長期的には基準を達成できないケース。達成できないのに関わらず、有効な制裁手段を使わないために、基準は有名無実になっている。

2）実施の有効手段が判っているにも関わらず、政治的に立法化・制度化できないケース。

例えば、大気汚染に係る環境基準において、人の健康を守るために望ましい環境基準は現在、二酸化窒素、二酸化硫黄などの汚染物質について設定されている。二酸化窒素の環境基準は日平均値で定められており、その上限値は約0.03ppmである。この基準を越えている局（測定機関）はおよそ半分ある［12]。この状況が昭和45年から現在まで続いている。大気の汚染はさまざまな病気をひき起こす原因となっている。環境庁は昭和61年から平成2年までの5年間に、約5,000人の児童の健康状況を追跡調査した結果、二酸化窒素の年平均濃度が0.03ppmを越える地域において、それ以下の地域に比べて、喘息症状の新規発生率が高くなる傾向があり、3倍以上の発生率となっている。大気汚染が人体へ悪影響を与えることは知られているが、強力な規制手段を発動できない理由は「基準の達成に時間が係る」という意見がある

＊北海道大学大学院、＊＊北海道大学農学部

ためである。

課税を通して環境基準を達成できるという認識は経済学者の共通認識である。平成4年上半期環境税を含む環境基本法の成立の機運が高まった。本来は平成4年上半期に国会に提出するということであったが、平成4年4月、官房長官は記者会見で、この法案を見送り、8月地球サミット後にするとした。さらに8月首相が発言して、環境税の導入を示唆した。しかし、9月に、首相の発言により、秋の国会では環境基本法見送くられ、経団連など経済界は環境税あくまで反対であることが公表された。ついに政府は環境法の提出を断念し、環境団体から批判が出た。環境規制には有効的手段があるが、その手段が実施できるかどうかは別問題である一例である。

法案成立と基準達成は複雑な問題であり、一括して究明、解決するのは不可能である。しかし、本論では、「調整は時間がかかる、待て」という意見に対して反論のメスを入れたい。この問題が実行の可能性とタイミングの問題である。

1.2　目的と研究方法

環境規制の手段は多くある。例えば、汚染を発生させているところから租税を徴収し、不経済を被るところに移転する、環境の所有権を明確にして交渉する、放出権の取引市場をつくる、直接規制するなどである。どの方法でも、設定された環境基準あるいは効率が達成できる。しかし、基準達成を努力する以前に、この基準値が設定できるか、また、規制の方法が実行に移せるかどうかがまず問題になる。また、実行できるとしても、いつのタイミングで実行するのが良いかという問題がある。本論は、これらの問題の解明に新しい分析を試みた。分析目的の根拠は以下の四つである。

1）環境優劣の指数が連続変化しても、この環境の悪化によりもたらされる結果は連続だと考えられない。例えば、汚染がある閾値を越えれば、人の健康は危険にさらされる。
2）個人により環境に対する態度や評価が違い、貨幣評価に基づく基数的効用関数の成立は不可能である。
3）立場が違う人々の間で、利益が一致しないとき、利益の集計は意味がない。
4）ゲーム理論が分析パラダイムとして、政策プロセスを理論分析できる。

もちろん、他の理由はあるが、以上の四つ理由がメインである。

本論は理論的な分析であり、モデルは抽象化されている。例えば、政府の独占企業に対する環境規制のモデルは抽象モデルである。日本など先進国は、通常独占禁止法を整備している。独占企業に対する環境規制モデルは明らかに現実と合わない。しかし、ここでの企業は現実の企業ではなく、経済界の団体と考えてよい。例えば、去年環境法をめぐる議論はほとんど環境庁（あるいは政府）と経団連の間での折衝である。農産物について農薬基準をめぐっては、ほとんどが政府と農家との折衝ではなく、政府と農業団体の折衝である。この角度からみると、独占企業に対する環境規制モデルは現実の意味を持っている。

本論のモデルは環境以外の分野でも応用可能だが、しかし、かなり限定されるべきであろう。一つの理由は一対一のゲームは現実にそれほど多くない。例えば、農協と組合員の関係は一対多数である。もう一つ環境問題に限定されるべき理由は、他の政策問題の中では、金銭で評価できることが考えられるためである。そのとき人々の効用は「譲渡」できる（transferable）ことになる。一旦、効用が譲渡できれば、問題の複雑性は減少され、集計が可能となり、Kaldor-Hicks補償原理が適用できる。もちろんゲーム理論はこの場合でも応用可能である。しかし、環境問題には譲渡可能性を含めることは問題がある。これが本論のタイトルに環境の用語をつける理由である。

Ⅱ. 有限ゲーム

まず、以下のストーリィーをイメージする。政府〔あるいは環境エイジェント（agent）〕は、ある産業で、ある環境規制政策を実行したいと考えている。この政策を実施する理由は、例えば国民からの要求、あるいは国際環境保護団体からの圧力などによる。この産業は独占体であり、一つの規制対象である。政府は直接規制政策を実行するか、あるいは事前に企業側に通達して調整時間を与え、企業の調整を待って実行するかするであろう。政府は後者の戦略を取るであろう。なぜなら企業が調整するという結果は、政府が即座に規制政策を実行するという結果をパレート支配することである。ここで生じる問題は、約束という戦略を取った後の結果である。政府の本来の目的は企業に調整時間を提供し、企業が新しい技術（あるいは設備）を導入し、一定の環境基準を達成させることである。しかし、企業がもし政府との約束を無視し、調整しないために、政府が再通達した場合、政府はどう対処するであろうか。

議論はまず単純な二人プレーヤー（政府と一つ企業）の有限ゲームから始める。政府の行動空間は一期の行動が二つしかない行動空間により構成される。つまり、各期に規制を実行する(R)と規制を実行しない(NR)の二つの作用である。企業も各期に二つの作用をとる。つまり、環境改善をする(I)、改善をしない(NI)である。

もし政府が先に規制政策を取れば、企業は直ちに改善作用(I)という戦略を取るしかない（これは支配戦略である）。そのとき、事実上ゲームは終了し、そこから得る各期の利得は$B=(B_1, B_2)$である。もし企業が先に改善策を取れば、政府は次期に規制政策を取る。そこからの各期の利得は$A=(A_1, A_2)$であり、ゲームは事実上終了する。ゲームが終了しないのは、それまでに政府はNR作用を、企業はNI作用を取り続けたときである。そこまでの各期利得は$C=(C_1, C_2)$で、割引率は$d=(d_1, d_2)$である。各期は2ステージにより構成され、政府がまず行動し、あとに企業が行動する。

仮定1：$A_1>B_1$, $A_2>B_2$.

この仮定の意味は企業が先に改善策を取ることは政府がいきなり規制政策を取ることよりも、両者にとって望ましいことを意味している。

仮定2：$C_2>A_2$.

この意味はもし政府が全く規制政策を取るつもりがないならば、企業にとって改善しない戦略が選好される。

仮定3：$A_1>C_1$.

この式は$A_1>B_1$と共に、企業が先に改善策をとることは、政府にとって望ましいことである。

仮定4：$B_1>C_1$.

これは、もし企業に改善策をとる見通しがないとき、政府は強行策をとる戦略を選好する。

議論は、まず一期のゲームから始める（2ステージ）。

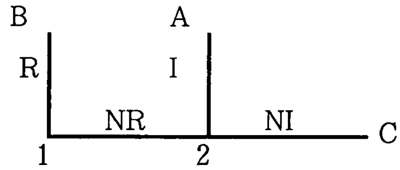

図 1

このゲームの唯一のNash均衡は(R, NI)である。かつ、サブゲーム・パーフェクション（subgame perfection）である［10］[1)][2)]。

二期のゲーム（4ステージ）は、

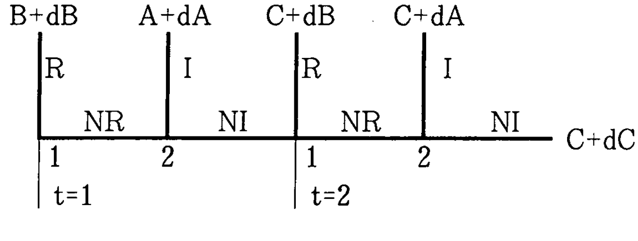

図 2

分析を進める前に、まず戦略の記号について説明する。マルテイ・ステージゲームの中での一つの戦略は、すべてのステージのすべてのコンテイ ンジェントの歴史によって作用を特定化されなければならないが、ここでは、もしあるステージに到着すれば、そのステージまでの歴史が唯一であるから、歴史を考えなくても作用を特定できる。本論では一つの戦略はすべての時期の作用を特定する。例として$s_1=\{R(t)\}$, $s_2=\{I(t)\}$, $s_1 \in S_1$, $s_2 \in S_2$をあげよう。なお、ここでは、IかRかを取れば、ゲームは終了になるから、t期では、tの歴史を明記しなければ、その歴史はtの前にNR, NIを取っていたことを示す。tの後の作用を特定しなければ、tの後の作用は任意である。厳密にいえば、tの後の各時の作用が任意作用であるから、{R(t)}, {I(t)}は戦略集合であり、戦略記号 si で現す。作用の時期 t を省略すれば、すべての時期でその作用を取ることを意味する。

$A_2+d_2A_2 \geqq C_2+d_2B_2$の場合、t=2とき、プレヤー 2 は必ずNIを取る。だから、t=2ときプレヤー1は必ずRを取る。したがって、プレヤー 2はt=1ときIをとる。このゲームはNash均衡が$(s_1, s_2)=(\{R(2)\}, \{I(1), NI(2)\})$で、かつサブゲームパーフェクションである。このゲームはもう一つのNash均衡集合({R(1)}, {NI})がある。しかし、これはサブゲームパーフェクションではない。({R(1)}, {NI})がなぜNash均衡であり、サブゲームパーフェクションではないか。

もしプレヤー2がNIを取るなら、明らかにR(1)は最適関数(best respondence)である。もしプレーヤー1がR(1)を取るなら、プレーヤー2の行動が利得と無関係であり、したがって、({R(1)}, {NI})はNash均衡である。

({R(1)}, {NI})はサブゲームパーフェクションではない。ここでt=1のプレヤー2のインフオーメイションセット(information set)からのサブゲームを見てみよう。

戦略{R(1)}の意味は政府がt=2の時、任意の作用を取るので、{R(1)}={R(1), NR(1)}、あるいは、={R(1), R(2)}となることである。もしNR(2)を取るなら、NR(2)はNIに対するベストコレスポンデンスではない。もしR(2)を取るなら、NIはサブゲームの中のベストレスポンデンスではない。いずれも、このサブゲームの中には({R(1)}, {NI})による誘導された戦略結合はNash均衡ではない。R(2)を取るならば、NIは信用できない「脅し」となる。NR(2)も信用できない「慈悲」である。({R(1)}, {NI})はサブゲームパーフェクションではない。

このゲームは唯一のサブゲームパーフェクションしかない。この場合、政府はt=1の時、直ちには規制政策を実行できないので、一期の間、企業の行動を待つ。

しかし、$A_2+d_2A_2<C_2+d_2B_2$の場合、({R(2)}, {I(1)})はもはやNash均衡ではなくなる。このゲームの唯一のNash均衡は({R}, {NI})である。このとき、企業は当期の利得が十分に大きく、後の罰は無視できるほど小さいと思っている。

T期ゲームは

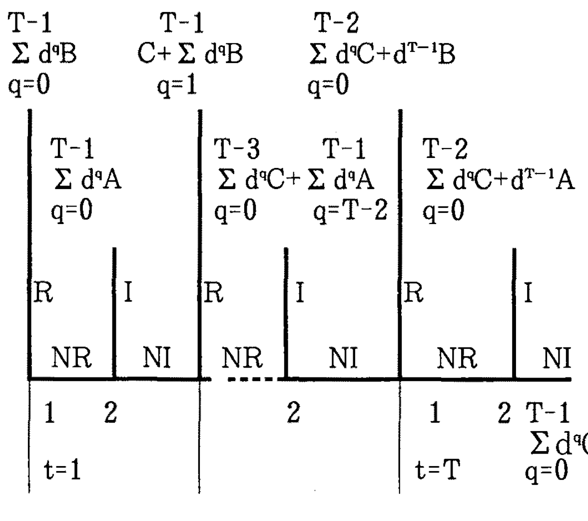

図 4

これは長いマルテイステージゲームである。このゲームはどちらが先にIか、Rかの作用を取れ

ば、ゲームは事実上終了になる。

もし、政府が先にRを取ると、利得は、

$$U^R(t)=\sum_{q=0}^{t-2} d^qC+\sum_{q=t-1}^{T-1} d^qB,\ t>1\text{の時}.\ (1.1)$$

$$U^R(t)=\sum_{q=0}^{T-1} d^qB,\ t=1\text{の時}.\ (1.1')$$

もし、企業が先にIを取ると、利得は、

$$U^I(t)=\sum_{q=0}^{t-2} d^qC+\sum_{q=t-1}^{T-1} d^qA,\ t>1\text{の時}.\ (1.2)$$

$$U^I(t)=\sum_{q=0}^{T-1} d^qA,\ t=1\text{の時}.\ (1.2')$$

どちらもR、Iをとらないでいると、利得は、

$$U^N=U^N(T)=\sum_{q=.0}^{T-1} d^qC.\ (1.3)$$

Tとd_2が十分に多ければ、あるtまでに、プレヤー1の戦略R(t+1)に対して、プレヤー2はI(t)をNI(t)よりも選好する。つまり、$U^I{}_2(t)>U^R{}_2(t+1)$を満足するtが存在する。

I(t)ならば、t期プレヤー2のインフォーメイションセットに到着することを前提として、

$$U^I{}_2(t)=\sum_{q=0}^{t-2} d_2{}^qC_2+\sum_{q=t-1}^{T-1} d_2{}^qA_2,$$

$t>0$の時.

$$U^I{}_2(t=1)=\sum_{q=0}^{T-1} d^q{}_2A_2$$

NI(t)ならば、

$$U^R{}_2(t+1)=\sum_{q=0}^{t-1} d_2{}^qC_2+\sum_{q=t}^{T-1} d_2{}^qB_2$$

$U^I{}_2(t)>U^R{}_2(t+1)$なら

$$\frac{d_2(1-d_2T-t+1)}{1-d_2}>\frac{C_2-A_2}{A_2-B_2}\ (1.4)$$

$T\to\infty, d_2\to1$とき、

$d_2(1-d_2{}^{T-t+1})\ /\ (1-d_2)\to\infty$

仮定5’: $U^I{}_2(1)>U^R{}_2(2)$

この仮説は実際にはd_2, Tに課する条件である。

明らかにtに対して、

$U^I{}_1(t+t^*(t)-1)\geqq U^R(t)>U^I{}_1(t+t^*)$, (1.5)を満足する唯一の$t^*$が存在する。$t^*$は割引率と残りの時間の長さに依存する。$t^*=t^*(t, d_1)$、$t^*$はtの単調減少関数である。仮定1 $A_1>B_1$によって、$t^*=1$であるから、T期のゲームは必ずt^*が存在する。

t^*は政府にとっては最大の待ち時間である。つまり、時刻tの時、政府はもし企業が確実にt^*時期以内(例えば、$t+t^*-1$)でI作用を取るならば、政府はさらに実行を延ばし、企業の改善直後($t+t^*$で)に規制する。もし、企業がt^*期以内に改善しなければ、政府は直ちに規制する。

仮定5’によって$U^I{}_2(t)>U^R{}_2(t+1)$を満足するtが存在する。

$r(t)=U^I{}_2(t)-U^R{}_2(t+1)$は、($t+1\leqq T$) tについて単調減少関数である。もしS(t)は任意のtについて正数であれば(このとき、図2のゲームの中の$A_2+d_2A_2>C_2+d_2B_2$を満足する)、$t=T-1$からスタートのサブゲームの中では(R(T), I(T−1))はNash均衡である。もしr(t)があるtについて負数であれば、r(t)が正数である最大のt($t\leqq T-1$)では$t=T-t_0$が存在する。$t_0=1$ならば、r(t)はT以外の任意のtについて正数である。つまり、

$t\leqq T-t_0$ならば、$U^I{}_2(t)>U^R{}_2(t+1)$. (1.6)

$t>T-t_0$ ならば、$U^I{}_2(t)<U^R{}_2(t+1)$. (1.7)

もし、$t=T-t_0+1$のプレヤー1のインフォーメイションに到着すれば、(1.7)式によって必ず$R(T-t_0+1)$、したがって$t=T-t_0$からの任意のサブゲームの中では$(\{R\mid t\geqq T-t_0+1\}, \{I(T-t_0)、NI\mid t\geqq T-t_0+1\})$はNash均衡であり、かつ唯一である。

$t=T-t_0$をスタートさせた時、サブゲームとしてのゲームの中では、バックワード(backward)

により得た唯一なNash均衡は$(\{R \mid t \geqq (T-t_0+1)\}, \{I(T-t_0)$、$NI \mid t \geqq T-t_0+1\})$である。Nash均衡の定義によるもう一つNash均衡$(R(T-t_0), NI)$がある。しかし、それはバックワードにより排除される。

$t_1{}^*$は次の意味がある。時期tの時、政府は企業が$t^*(t)-1$期の後に改善策をとって、t^*の後に規制する$t+t^*(t)=T-t_0-1$が満たされるtの時の待ち時間である。

$t_1{}^*=t^*(t) \mid t=T-t_0-(t^*{}_{(1)}+1)$。だから

$t_m{}^*$は次のように定義される。

$$
\begin{aligned}
t^*{}_m &= t^*(t) \mid t \\
&= T-t_0-(t_1{}^*+1)+(t_2{}^*+1) \\
&\quad - \ldots -(t^*{}_m-1+1)-(t^*{}_m+1).
\end{aligned}
$$

$t=T-t_0+1-(t_1{}^*+1)$スタート時のサブゲームの中ではバックワードにより得た唯一の均衡は$(R(T-t_0+1), I(T-t_0))$である。

$$
T-t_0-(t_1{}^*+1) \geqq t > T-t_0-(t_1{}^*+1)-(t_2{}^*+1)
$$

スタート時のサブゲームの中では均衡は$(R(T-t_0-(t^*+1), IN(T-t_0-(t_1{}^*+1)-1))$である。

以下の結論が導かれる。もし

$$
T-t_0=(t_1{}^*+1)+(t_2{}^*+1)+\ldots +(t_n{}^*+1)+1
$$

であれば、バックワードにより唯一の均衡は(S_1, S_2)である。

$S_1=\{R(1), R(t_n{}^*+1+1), \ldots, R(t_1{}^*+1+t_2{}^*+1+\ldots+t_n{}^*+1+1), R \mid t>t\text{-}t_0, NR \mid \text{otherwise}\}$,

$S_2=\{I(t^*{}_n), \ldots, I(t_1{}^*+1+t_2{}^*+1+\ldots+t_n{}^*+1), NI \mid \text{otherwise}\}$。

これは唯一のサブゲームパーフェクションである。ここには多くのNash均衡があるが、サブゲームパーフェクションではない。たとえば$(R(2), I(1))$はNash均衡であるが、$t^* \geqq 1$とき、$R(2)$は信用できる「脅し」ではない。もし、

$T-t_0 \neq (t_1{}^*+1)+(t_2{}^*+1)+\ldots+(t_n{}^*+1)$であれば、政府は最初のtを待つ。tは次の式で定義される。

$$
T-t_0+1-t = t_1{}^*+1+t_2{}^*+1+\ldots t_n{}^*+1。
$$

政府が待ち時間を持つかどうかは、

$T-t_0=t_1{}^*+1+\ldots+t_n{}^*+1$であるかどうかに依存する。これはフェイス（phase）と呼ばれる。

サブゲームパーフェクション$(R(t'+1), I(t'))$は$t(t'' \geqq t > t)$からスタートのサブゲームの中のパーフェクションにより保証される。t'とtは次のように定義される。

$$
\begin{aligned}
t' &= (T-t_0)-(t_1{}^*+1)-(t_2{}^*+1) - \ldots -(t_n{}^*+1)、\\
t'' &= (T-t_0)-(t_1{}^*+1)-\ldots-(t_{n-1}{}^*+1)、\\
t' &< t \leqq t''
\end{aligned}
$$

繰り返しにより、最後は$(R(T-t_0+1), I(T-t_0))$により保証される。これは後は無限ゲームを分析するときの要点である。

T期ゲームの中では、一般的にサブゲームパーフェクションは唯一であるが、Nash均衡は唯一ではない。プロファイル$(\{R(1)\}, \{NI(t_{(1)}{}^*)\})$及び$(\{R(t+1)\}, \{I(t)\})$ $(t \leqq t_{(1)}{}^*)$はすべてNash均衡である。

注1）サブゲームの意味は任意のノード(node)からスタートしたとき、そのノードから後の部分である。

注2）戦略プロファイルがサブゲームパーフェクト均衡であるのは、それが全体ゲームに対するNash均衡であり、また、すべてのサブゲームに対して、元の戦略プロファイルによって得た部分戦略のプロファイルがNash均衡であり、かつそのときである。

Ⅲ. 独占に対する規制の無限ゲーム

T期ゲームを見ると、無限ゲームの結論が現れている。無限ゲームは何時のｔからスタートしても、そのときから見る後のゲームはいつも同じである。まず第１には仮定５'によって、$U^{I}{}_{2}(t)>U^{R}{}_{2}(t+1)$が成立する。第２には$t^{*}(t)$が定数になる。

しかし、問題の核心は、T→∞時の有限ゲームの均衡集合の極限が、この有限ゲームの極限のゲーム（無限ゲーム）の均衡集合であるかどうかである。我々の答は否である。D.Fudenberg and D. Levine（1983）の定理［５］によると、T→∞とき、有限ゲームの$\varepsilon\to0$のε－Nash均衡（及びサブゲームパーフェクション）[3)]の極限は有限ゲームの極限（無限ゲーム）の均衡（及びサブゲームパーフェクション）である。この定理によって有限ゲームのε－Nash均衡の集合を通じて無限ゲームの均衡を求める方法が考えられる。

T期の有限ゲームの中では、εが大きいときε－Nash均衡（及びε－パーフェクション）はNash均衡（パーフェクション）より多い。ε－Nash（ε－パーフェクション）の条件は緩やかあるためである。本論の目的はT期の有限ゲームのε－Nash（およびε－パーフェクト）均衡によって、無限ゲームのNash（パーフェクト）均衡を求めることなので、$\varepsilon_T\to0\,(T\to\infty)$ T期のNash（パーフェクト）均衡の性質を求めなければならない。

まず、T＝∞（無限ゲーム）の時、いくつかの性質が次のようにまとめられる。

仮定５'によって、無限ゲームにおけるd_2は次の式を満たす。

仮定５

$$d_2>\frac{C_2-A_2}{C_2-B_2}.$$

性質１：$U_1{}^{R}(t)$，$U_1{}^{I}(t)$はｔについて単調減少である。

これは仮定３、仮定４による結論である。

性質２：$U_2{}^{R}(t)$，$U_2{}^{I}(t)$はｔについて単調増加である。

これは仮定１、仮定２による結論である。

性質３：$U_2{}^{I}(t)>U_2{}^{R}(t+1)$。

これは仮定５による結論である。

性質４：$U_1{}^{R}(t)<U_1{}^{I}(t)$。

これは仮定１による結論である。

命題１：　政府の最大待ち時間$t^{*}(t)$は有限であり、かつ、定数である。つまり、すべてのｔに対して、

$t^{*}(t)=t^{*}(1)=t^{*}.$

証明：　$t^{*}(t)$の定義により、

$U_1{}^{I}(t+t^{*}(t)-1)\geqq U_1{}^{R}(t)>U_1{}^{I}(t+t^{*}(t)).$

つまり、$t+t^{*}(t)\neq2$とき、

$$\sum_{q=0}^{t+t^{*}(t)-3}d_1{}^{q}C_1+\sum_{t+t^{*}(t)-2}^{\infty}d_1{}^{q}A_1\geqq$$

$$\sum_{q=0}^{t-2}d_1{}^{q}C_1+\sum_{q=t-1}^{\infty}d_1{}^{q}B_1>$$

$$\sum_{q=0}^{t+t^{*}(t)-2}d_1{}^{q}C_1+\sum_{t+t^{*}(t)-1}^{\infty}d_1{}^{q}A_1$$

$$\sum_{q=t-3}^{t+t^{*}(t)-3}d_1{}^{q}C_1+\sum_{t+t^{*}(t)-2}^{\infty}d_1{}^{q}A_1\geqq\sum_{q=t-1}^{\infty}d_1{}^{q}B_1$$

$$>\sum_{q=t-1}^{t+t^{*}(t)-2}d_1{}^{q}C_1+\sum_{t+t^{*}(t)-1}^{\infty}d_1{}^{q}A_1$$

両辺$d_1{}^{t-1}$で割って、

$$\sum_{q=0}^{t^{*}(t)-2}d_1{}^{q}C_1+\sum_{t^{*}(t)-1}^{\infty}d_1{}^{q}A_1\geqq\sum_{q=0}^{\infty}d_1{}^{q}B_1$$

$$>\sum_{q=0}^{t^{*}(t)-1}d_1{}^{q}C_1+\sum_{t^{*}}^{\infty}d_1{}^{q}A_1$$

両辺に$d_1^{t'-1}$を乗じて、(t'>1)

$$\sum_{q=t'-1}^{t'+t^*(t)-3} d_1^q C_1 + \sum_{t'z+t^*(t)-2}^{\infty} d_1^q A_1 \geqq \sum_{q=t'-1}^{\infty} d_1^q B_1$$

$$> \sum_{q=t'-1}^{t'+t^*(t)-2} d_1^q C_1 + \sum_{t'+t^*-1}^{\infty} d_1^q A_1$$

両辺に$\sum_{q=0}^{t'-2} d_1^q C_1$を加えて、

$$\sum_{q=0}^{t'+t^*(t)-3} d_1^q C_1 + \sum_{t'+t^*(t)-2}^{\infty} d_1^q A_1$$

$$\geqq \sum_{q=0}^{t'-2} d_1^q C_1 + \sum_{q=t'-1}^{\infty} d_1^q B_1 >$$

$$\sum_{q=0}^{t'+t^*(t)-2} d_1^q C_1 + \sum_{t'+t^*-1}^{\infty} d_1^q A_1$$

$U_1^I(t'+t^*(t)-1) \geqq U_1^R(t') > U_1^I(t'+t^*(t))$

つまり、$t^*(t)=t^*(t')$

$t^*(1)+t^*(t)=2$とき、

つまり$t=1$, $t^*(t)=1$

$$\sum_{q=0}^{\infty} d_1^q A_1 \geqq \sum_{q=0}^{\infty} d_1^q B_1 > C_1 + \sum_{q=1}^{\infty} d_1^q A_1$$

$$\sum_{q=t'}^{\infty} d_1^q A_1 \geqq \sum_{q=t'}^{\infty} d_1^q B_1$$

$$> d_1 t' \ C_1 + \sum_{q=t'+1}^{\infty} d_1^q A_1$$

両辺に$\sum_{q=0}^{t'-2} d_1^q C_1$を加えて

$$\sum_{q=0}^{t'-2} d_1^q C_1 + \sum_{t'-1}^{\infty} d_1^q A_1$$

$$\geqq \sum_{q=0}^{t'-2} d_1^q C_1 + \sum_{t'-1}^{\infty} d_1^q B_1 >$$

$$\sum_{q=0}^{t'-1} d_1^q C_1 + \sum_{t'}^{\infty} d_1^q A_1$$

$U_1^I(t') \geqq U_1^R(t') > U_1^I(t'+1)$

つまり、$t^*(1)=t^*(t')=1$

従って、すべての$t^*(1)\geqq 0$, $t \geqq 1$に対して、

$t^*(t)=t^*(1)=t^*$

$t^*(t)$は定数であるから、$t^*(1)$は有限であれば、$t^*(t)$は有限である。

$$\sum_{q=0}^{\infty} d_1^q B_1 > \sum_{q=0}^{t^*-2} d_1^q C_1 + \sum_{q=t^*-1}^{\infty} d_1^q A_1$$

$$\frac{B_1}{1-d_1} > \frac{C_1(1-d_1^{t^*-1})}{1-d_1} + \frac{d_1^{t^*-1}A_1}{1-d_1}$$

$B_1 > C_1 + (A_1 - C_1)d_1^{t^*-1}$,

$$d_1^{t^*-1} < \frac{B_1-C_1}{A_1-C_1}$$

$$t^* < \frac{\ln\{(B_1-C_1)/(A_1-C_1)\}}{\ln d_1} + 1 > 1$$

$B_1 < A_1$だから、t^*は有限である。

T期ゲームの中では、サブゲームパーフェクションは一般的に唯一である。T→∞なら、この唯一性が守られるだろか。T≠∞時、パーフェクションはフェイスに依存している。しかし、Tが十分大きいとき、最後の行動の違反による損失はε_Tを越えない。かつ$\varepsilon_T \to 0$ (T→∞とき) あるいは、$T-t_0-(t_1^*+1)$ 時にスタートするサブゲームのパーフェクションの利得とは別の結果の利得の差は、εを越えない。そのサブゲームの中では、({$R(T-t_0-t_1^*)$, R | $t \geqq T-t_0+1$, NR | otherwise}, {$I(T-t_0-t^*-1)$, $I(T-t_0)$, NI | otherwise}) はパーフェクションである。

$t' > T-t_0-(t_1^*+1)$ の時、政府が違反すれば、

$$U_1^R(t') = \sum_{q=0}^{t'-2} d_1^q C_1 + \sum_{t'-1}^{T-1} d_1^q B_1$$

違反しなければ、

$$U_1^{I}(T-t_0-t^*) = \sum_{q=0}^{T-t_0-t_1^*-2} d_1{}^q C_1 + \sum_{T-t_0-t_1^*-1}^{T-1} d_1{}^q A_1$$

$$U_1^{I}(T-t_0-t^*)-U_1^{R}(t') = -\sum_{q=T-t_0-t_1^*-1}^{t'-2} d_1{}^q C_1$$

$$-\sum_{t'-1}^{T-1} d_1{}^q B_1 + \sum_{q=T-t_0-t_1^*-1}^{T-1} d_1{}^q A_1$$

$$\leqq \sum_{q=T-t_0-t_1^*-1}^{T-1} d_1{}^q (A_1-C_1)$$

$$= \frac{(A_1-C_1)\, d_1{}^{T-t0-t1^*-1}(1-d_1{}^{t0-t1^*})}{1-d_1}$$

$= \varepsilon_T$, $T\to\infty$とき $\varepsilon_T\to 0$

この意味はεーパーフェクト均衡の概念によって集合($\{R(1)\}$, $\{NI \mid t\leqq t^*(1)\}$)および($\{R(t+1)\}$, $\{I(t)\}$) ($t\leqq t(1)^*$)の中で、あるプロファイルはT期ゲームのεーパーフェクト均衡であると考えられる。だから、無限ゲームのパーフェクト均衡は($\{R(1)\}$, $\{NI \mid t\leqq t^*\}$)の中あるプロファイル及び ($\{R(t+1)\}$, $\{I(t)\}$), ($t\leqq t^*$)の中のあるプロファイルと考えられる。従って、唯一ではない。

以下で、正式に無限ゲームのNash均衡、パーフェクト均衡を特定化する。

命題2：図4のゲームは、$U_1^{I}(t^*)>U_1^{R}(1)$の場合、$T=\infty$（無限ゲームである）の時、Nash均衡の純戦略のプロファイルは以下に特定化される。

($\{R(1)\}$, $\{NI(t) \mid t\leqq t^*\}$)　　(2.1)、

あるいは

($\{R(t+1)\}$, $\{I(t)\}$)　$t\leqq t^*$　　(2.2).

証明：(2.1)式について、

企業の戦略$NI(t'\geqq t^*)$に対して、政府の戦略R($t\leqq t'$)の利得は、

$$U^{R}{}_1(t) = \sum_{q=0}^{t-2} d_1{}^q C_1 + \sum_{q=t-1}^{T-1} d_1{}^q B_1 ,$$

$1\leqq t<t'$.

$U^{R}{}_1(t)$はtについて単調減少であるから、$U^{R}{}_1(1)>U^{R}{}_1(t>1)$が存在する。

t^*の定義により、$U^{R}{}_1(1)>U^{I}{}_1(t>t^*+1)$、また、$U^{I}{}_1(t)$は$t$について単調減少であるから、R(1)は$NI(t'\geqq t^*)$に対する最適反応である。

政府の戦略R(1)に対して、企業の利得が自分の戦略と無関係なので、$NI(t'>t^*)$もR(1)に対するbestである。だから、(2.1)式はNash均衡である。

(2.2)式について、

企業の戦略$\{I(t) \mid t\leqq t^*\}$に対して、戦略$\{R(t+1)\}$は政府にとって最適反応である。なぜなら、し、$t'<t+1$ときR(t')を取るならば、$U_1^{R}(t')$の利得を得る。$U^{R}{}_1(t)$はtに単調減少であるから、$U^{R}{}_1(1)>U^{R}{}_1(t>1)$、かつ、$U^{I}{}_1(t)$は$t$について単調減少であるから、$U^{I}{}_1(t<t^*)>U^{I}{}_1(t^*)$である。$t^*$の定義により$U^{R}{}_1(1)<U^{I}{}_1(t^*)$、従って、$U^{I}{}_1(t+1)>U^{I}{}_1(t+q \mid q>1)$。$t'>t+1$時プレヤー1の利得は自分の行動と無関係である。だから、R(t+1)は$I(t) \mid t\leqq t^*$に対するベストである。同様に、政府の戦略R(t+1)に対して、企業の戦略I(t)は最適である。それは$U^{I}{}_2(t)>U^{R}{}_2(t)$, かつ$U^{I}{}_2(t)$は$t$について単調増加であることによる。なお、$t>t^*+1$以降の行動は利得と無関係である。「証明終了」。

命題2’ $U_1^{I}(t^*)=U_1^{R}(1)$の場合、Nash均衡の純戦略のプロファイルは以下に特定化される。

(R(1), NI(t))　　$t>t^*$、あるいは、

(R(t+1), I(t))　$t\leqq t^*$

パーフェクションについて次の命題がある。

命題3：　図4のゲーム、$T=\infty$（無限ゲームである）の時、パーフェクションの純戦略のプロ

ファイルは次に特定化される。

$(s_1{}^n, s_2{}^n)$; $n=0, 1, 2\ldots t^*$.

$$s_1{}^n \in S_1,\ s_2 \in S_2 \qquad (2.3)$$

$s_1{}^n=\{R \mid t=k(t^*+1)+n+1,\ NR \mid \text{otherwise}\}$

$s_2{}^n=\{I \mid t=k(t^*+1)+n,\ NI \mid \text{otherwis}\}$

$k=0$ 及び自然数、$t \geqq 1$。

この命題を証明するために一つの定理を紹介して、この定理を使って我々の命題を証明する。

定理（ワーンステージ違反原理）：

作用が観察でき、かつ無限で連続[4]である無限ゲームの中のパーフェクションの必要および十分条件は、だれもにとって戦略 s_i はワーンステージで違反している。またこのステージの後のステージで完全に戦略 s_i に一致する新しい戦略 $\underline{s_i}$ は、s-i によるそのステージからの誘導される戦略に対抗するために望ましくない。

戦略 s がパーフェクションの戦略であるか否かを調べるには、すべてのサブゲームの戦略 s によって誘導される戦略が、Nash均衡であるという条件をチェックする必要がある。この定理によって、各ステージで各作用を比較すれば、十分条件を満たす。

命題３の証明：

まず、(2.3)式が満たされた (s_1, s_2) は、必ずパーフェクションである（十分条件)。

プレヤー１の戦略 $s_1{}^n$ を見てみよう。

$t=k(t^*+1)+1+n$ の場合、

プレヤー１が任意の t で戦略を違反しなければ、

$U_1{}^R(k(t^*+1)+1+n)$ の利得を得る。

戦略に違反すれば、

$U_1{}^I((k+1)(t^*+1)+n)$ の利得を得る。

命題１により、

$U_1{}^I((k+1)(t^*+1)+n)=U_1{}^I(k(t^*+1)+1+n+1)$

$<U_1{}^R(k(t^*+1)+1+n)$

$t \neq k(t^*+1)+1+n$ の場合、プレヤー１が戦略を違反しなければ、

$U_1{}^I((k+1)(t^*+1)+n)=U_1{}^I(k(t^*+1)+2+n+(t^*-1)$

の利得を得る。違反すれば、

$U_1{}^R(k(t^*+1)+1+n<t<(k+1)(t^*+1)+n)$ を得る。

$U_1{}^R(k(t^*+1)+1+n)<t<(k+1)(t^*+1)+n)$

$\leqq U_1{}^R(k(t^*+1)+2+n)<U_1{}^I(k(t^*+1)+2+n+t^*-1)$

であるから、プレヤー１は任意の t でワーンステージ違反戦略により利得を増加できない。

プレヤー２の戦略 $s_2{}^n$ を見てみよう。

$t=k(t^*+1)+n$ の場合、

プレヤー２は任意の t で戦略を違反しなければ、

$U_2{}^I(k(t^*+1)+n)$ の利得を得る。

違反すれば、$U_2{}^R(k(t^*+1)+1+n)$ の利得を得る。

性質３によって、

$U_2{}^I(k(t^*+1)+n)>U_2{}^R(k(t^*+1)+1+n)$。

$t \neq k(t^*+1)+n$ の場合、

プレヤー２は戦略を違反しなければ、

$U_2{}^I((k+1)(t^*+1)+n)$ を得る。

違反すれば、$U_2{}^I(k(t^*+1)+n<t<(k+1)(t^*+1)+n)$ の利得を得る。

性質２によって、利得が増加できない。従って、(2.3)式が満たされたプロファイルはパーフェクションである。

次はパーフェクションは必ず(2.3)式を満足することを証明する（必要条件)。

性質２により、I(t)を取るなら、必ずR(t+1)がある。性質３により、NI(t)を取るのは、必ずNR(t+1)がある。だから、両プレヤーが同時違反しなければ、必ずパーフェクションとはならない。

両プレヤーにとって、もしパーフェクション (s_1, s_2) が $s_1(t+1)=R$, $s_2(t)=I$ ならば、必ず $s_1(t+1+k(t^*+1)=R$, $s_2(t+k(t^*+1))=I$ であり、かつその時のみ成立する。もし、そうでなければ、必ず最初にこの条件を満たさない t' が存在する。つまり、$s_1(t')=R$, $s_2(t'-1)=I$, $t' \neq t+1+t^*+1$

$t'>1+t^*+1$ならば、
$U_1^I(t')<U_1^I(t+2+t^*)<U_1^R(t+2)$。従って、R(t+2)を取る。
性質3によって、I(t+1)を取る。性質4によって、NR(t+1)を取る。これは$s_1(t+1)=R$と両立しない。
もし、$t'<t+1+t^*+1$ならば、
t+1期プレヤーのインフォーメイションセットに到着すれば、s_1によって、$U_1^R(t+1)$の利得を得る。
違反すれば、$U_1^I(t')$の利得を得る。

$U_1^I(t'<t+1+t^*)=U_1^I(t'\leqq t+t^*)\geqq U_1^I(t+t^*)>U_1^R(t+1)$

従って、$s_1(t+1)=R$という戦略はパーフェクションではない。
従って、パーフェクション戦略は必ずt^*+1周期でR, Iを取る。
なお、命題2により、最初R, Iを取る時期tは必ず1,..., t^*の中の一つである。これらのすべての戦略は(2.3)式により特定できる。
「証明終了」。

$U_1^I(t^*)=U_1^R(1)$の場合と$U_1^I(t^*)>U_1^R(1)$の場合とパーフェクションプロファイルは同じである。

命題3による特定化されたプロファイルの集合は命題2による集合の部分集合である。それにしても、命題3による特定化されたプロファイルの結果は「多すぎ」である。ここではいくつかの性質が明らかになる。

政府にとって（R(2), I(1)）の結果が最も望ましく、

$$U^b_1=U^i_1(t=1)=\sum_{q=0}^{\infty} d_1{}^q A_1 = \frac{A_1}{1-d_1}$$

企業にとって、(R(t^*+1), I(t^*)) の結果は最も望ましく、

$$U^b{}_2=U^I{}_2(t=t^*)=\sum_{q=0}^{t^*-2} d_2qC_1+\sum_{q=t^*-1}^{\infty} d_2qA_2$$

双方にとって、最悪の結果はR(1)を取ることである。

$$U^w = \sum_{q=0}^{\infty} d^q B = \frac{B}{1-d}$$

この結果はパーフェクションであるけれども、他のパーフェクション結果によりパレート支配される。この結果は政府が直ちに環境政策を実施する結果である。これは政府が企業と交渉していない結果である。交渉によって別の任意のパーフェクション結果に到着すれば、双方にとって有利になる。(他のパーフェクション結果との間の比較はパレート最適の意味で比較できない)。

企業にとっても、政府にとっても、(R(t+1), I(t)) | $t\leqq t^*$の結果になるインセンテイブがあるので、(R(t'+1), I(t')) | $1\leqq t'\leqq t^*$というt^*+1個の中のある一つの結果を約束する。ここでの問題は、もしt=t'の時、企業がNI(t')を取れば、政府はどうするだろうか。過去のことはすでに過ぎ去り、これからは最適の政策を求めていくことになる。無限ゲームの中では、任意のtで、政府のインフォーメイションセットからスタートするゲームはすべて同じである。ダイナミックプログラミング（dynamic programing）の原理により、全体にとって最適戦略は、この最適戦略により到着したある途中状態からスタートする残りの部分にとっても最適である。この思想が無限ゲームに再交渉立証（Renegotiation-Proofness）の概念である［2］［3］［4］。以下の結論が導かれる。

もし、直ちに実施する戦略が最適でなければ、t=t'+1の時、直ちに実施する戦略R(t'+1)は全体にとって最適ではない。もし、t=1の時、政

府がt'＋1の期間を待つという戦略が最適であれば、t＝t'＋1とき、さらにt'＋1を待つという戦略は最適となる。政府にとって自分のどちらのインフオーメイションセットから残りのゲームを見ても、すべて同一であるためである。

従って、政府にとって環境規制を実施する最適時期は、直ちに実施する時である。「企業の改善の時間を与えるため、少し待つ」という延期理由は成立しない。

注3）もしすべてのプレヤーiのすべての戦略siに対して、式$u_i(s_i^*,\ s_{-i}^*)\ \geqq\ u_i(s_i^*,\ s_{-i}^*)-\varepsilon$が満たされれば、戦略組$s^*$は$\varepsilon$－Nash均衡と呼ばれている。もし、任意のサブゲームの中では、誰が戦略s^*を違反しても、利得がせいぜいεであれば、s^*はε－サブゲームパーフェクト（subgame perfect）均衡と呼ばれている。

注4）ゲームの利得が毎期の利得を割り引いて加えるならば、また毎期の利得が有限であれば、無限で連続という条件はつねに満足される。

Ⅳ．結論

本論では、政府と企業のゲームにより環境政策の実施のタイミングを分析した。政府の利得は政府の「選好」によって定められている。政府の利得は各政治団体、消費者利益などを考慮することによって決められる。明らかに、政府の効用は基数的効用ではない。政府は団体の利益を考慮せずに、純粋に消費者（生活者）の利益を考慮しても、また基数的効用関数が存在しても、このような集計効用は計測できない。環境財が市場財でないため、消費者の選好を顕示するメカニズムは存在していない。従って、ゲーム理論による交渉分析が必要である。

政府が純粋に消費者（生活者）の利益を考慮すれば、本論のゲーム理論で表示された利得関係は明らかに正しい。そうであれば、政府が直ちに環境政策を実施することは望ましい。直ちに実施すべきという結果は、ゲームの中の唯一の再交渉立証を満たす結果である。現実の政策では、環境基準はなかなか達成できない。政府の言い分として「企業に準備時間を与える」ということである。この言い分は経済理論の領域では成立しない。政府は企業の圧力に屈服しているか、他の政治的配慮をしているなど他の理由によるものである。

参考文献

［1］ Baumol, William J., Wallace E.Oates, 1988. The theory of environmental policy (Secondedition). Cambridge University Press.

［2］ Benoit, J.P., Vijay Krishna. 1993. Renegotiationin finitely repeated game. Econometrica 61. 303-323.

［3］ Bernheim, B.D., B.Peleg, and M.Whinston. 1987. Coalition-proof Nash equilibria I : Concepts. Journal of Economic Theory 42 : 1-12

［4］ Farrell, J., E.Maskin, 1989. Renegotiationin repeated game. Games and Economic Behavior 1 : 327-360

［5］ Fudenberg, D., D.Levine. 1983. Subgame-perfect equilibria of finite and infinite horizon game. Journal of Economic Thoery 31 : 227-256.

［6］ Fudenberg, D., J.Tirole. 1991. Game Theory. The MIT Press.

［7］ Fudenberg, D., J.Tirole. 1991. Perfect Bayesian equilibrium. Journal of Economic Theory 53 : 236-2600.

［8］ Matsuyama, K. 1990. The American Economic Review 30 : 480-492 Kreps, D. 1990. A Course in Microeconomic Theory.

Princeton University Press.

[9] Pearce, David W., R.Kerry.Turner, 1990. Economics of Natural Resources and the Environment. Harvester Wheatsheaf.

[10] Selten, R. 1975. Re-examination of the perfectness concept for eqilibrium points in extensive game. International Journal of Game Theory 4 : 25-55.

[11] von Nenmann, J., O.Morgenstern. 1947. Theory of Games and Economic Behavior. PrincetonUniversity Press.

[12] 環境庁『平成3年環境白書』

(平成7年4月21日受理)