

環境規制の実効性に関するゲーム論的研究

福山 敬

社会開発システム工学科

(1995年8月29日受理)

Effective Enforcement Policies of Environmental Regulations :
A Lesson from Repeated Games

by

Kei FUKUYAMA

Department of Social Systems Engineering

(Received August 29, 1995)

More efficient and effective enforcement of environmental regulations would enhance environmental conditions around the globe by improving compliance to existing regulations and by allowing regulatory agencies to broaden their scope without increasing their resources. This research analyzes comply-evade decisions by regulated firms in the context of their relationships with environmental agencies, and clarifies how enforcement policies effectively encourage voluntary compliance. More specifically, the environmental enforcement conflict is modeled as a 2×2 non-cooperative game and the dilemmatic situation where the environmental agency and the regulated firm lock themselves into less efficient situation is clarified. The game is then extended to the repeated game. The repeated game strategy called Review Strategy is then introduced as an effective enforcement policy to overcome the dilemma of the environmental regulation. The theoretical results show that under the proposed review strategies the agency can induce the operator's maximum effort to comply with the required environmental standards.

Key words : Enforcement, Environmental regulations, Inducing compliance, Non-cooperative game theory, Repeated games

1. はじめに

企業に対する環境汚染規制は、企業の環境への影響を社会的に許容できるレベルに抑制するための重要な手段である。一般に、環境汚染規制に関する意志決定は規制ルール自体の選択(どの法的ルールを選択すべきか)とその執行(その法が実効性を持つためにどのように執行されるべきか)の2つの問題から成っていると考えられる。環境規制ルールの選択問題に関しては古くから多くの研究蓄積があり、税・補助金システム、市場システム、行政的介入等、より有効な規制システムの構築をめざした研究がなされている。また、このような長年にわたる理論的精緻化を背景に、一昨年(2007)のアメリカにおけるCO₂の排出権の市場売買の開始に代表されるように、実際の規制システムとして様々な環境規制システムが実施され始めている。一方、筆者が知る限り、環境規制に関わる第2の問題である規制の執行問題をあつかった研究は少ない。いかに社会的により望ましい環境規制制度が選択されたとしても、それが効果的に執行され、被規制主体に遵守されなければ、規制自身の持つメリットは半減してしまう。施行された環境規制の実効性を保証する有効な執行システムの構築が不可欠となろう。本研究は、企業に対する環境汚染規制ルールの効率的執行システムの構築についてゲーム論的立場から考察する。

2. 本研究の基本的考え方

近年、Avenhaus¹⁾やRussell²⁾は伝統的抑止論に基づき環境規制の最適執行問題を解析している。Becker³⁾に始まる規制問題への伝統的抑止論的アプローチにおいては、被規制主体(企業)の規制遵守努力に関する意志決定は、遵守努力のための費用や違反に対する罰金を考慮した利潤最大化(あるいは費用最小化)問題の解として求められる。従って、規制主体(政府)の最適執行レベルは、規制執行のための社会的限界費用がそれにより達成される社会的限界便益と等しくなるように決まる。

Scholz⁴⁾⁵⁾⁶⁾は、このような抑止論的規制政策へのアプローチに対し、より効率的な規制執行方策として繰返しゲーム論に立脚するアプローチを提案している。Scholzは、環境規制に関する規制主体と非規制主体との関係は、囚人のジレンマ的状况にあると考た。そして、この前提の下では伝統的抑止論に基づく規制執行システムは、社会的にパレートの意味で非効率な結果をもたらすことを指摘した。さらに、繰返しゲーム論におけるしっぺ返し戦略(Tit-for-Tat Strategy)に立脚した規制執行システムを用いること

により、このジレンマ的状况から脱却でき、協力(規制主体による最小限の規制執行の下での被規制主体による最大限の自主的規制遵守努力)という社会的に効率的な規制執行が達成できることを示した。

しかしながら、ある期の規制主体の戦略が被規制主体の前期の行動に依存するというScholzのモデルは、規制主体である政府と被規制主体である企業がともに規制執行に関する完全情報を持つことが前提となっている。一般に、環境規制において規制主体は被規制主体の規制遵守努力に関する意志決定や行動を正確に把握できないと考えるのが妥当であろう。この場合、規制主体は被規制主体の規制遵守行動を常に正確に監視する必要がある。しかしながら、規制主体による被規制主体の規制遵守に関する行動の完全な把握は難しい。一般に、規制主体は被規制主体の規制遵守に関する努力をその結果として起こる環境の質というノイズを含んだシグナルにて間接的にモニタリングする事になる。この様な不完全情報の下では、Scholzの提案した規制執行政策を実行することは困難となる。

本研究では、以上のような考え方にに基づき、被規制主体に関する不完全な情報しか得られない場合、規制遵守努力を効率的に誘引する規制執行システムの理論的構築を試みる。具体的には、まず、規制主体(政府)と被規制主体(企業)との環境規制執行に関する相互関係を非協力ゲームとしてモデル化し、環境規制執行ジレンマとも呼ぶべき環境規制の効率的執行を妨げる本質的コンフリクトを解明する。さらに、環境規制執行ジレンマを不完全情報下の繰返しゲームに拡張する。そのとき、規制主体である政府は企業の規制遵守努力に関する行動を直接的には観測できないと考える。そして、政府は統計的手法と繰返しゲーム論的戦略を組み合わせることにより不確実性下においても企業の規制遵守努力を誘導でき、社会的に効率的な規制執行状況を誘導することができることを示す。

3. 環境規制執行ジレンマゲーム

3-1 モデルの構築

まず、環境規制の執行・強制に関する規制主体(政府)と被規制主体(企業)の関係を非協力ゲームとしてモデル化する。ここでは、生産活動の副産物として生じた(潜在的)環境汚染物質を自己処理し、直接環境に排出している企業の規制を考える。規制主体である政府はこのような企業による環境への汚染物の排出を環境基準値以内に規制するものとする。本節で提案されるゲームモデルは、Scholz⁴⁾に示されたモデ

ルの拡張であり、Fukuyama *et al.*⁷⁾により詳細な解説が与えられている。

いま、環境規制主体の規制執行に関する意志決定が、規制をどの程度強制するかという規制執行努力のレベルで表されるとする。つまり、政府は、最小の費用で最小の干渉しか行わない緩やかな規制執行レベルか、規制の詳細部分まで細やかに強制するという厳しい規制執行レベルかを戦略とする。まず、政府が緩やかな規制執行を選択すると仮定しよう。そのとき、緩やかな規制の執行の下では、規制を違反している企業の規制遵守努力の明確な把握は難しく、よって、そのとき企業は規制遵守の努力水準を下げる誘因を持つ。この企業の努力低下のインセンティブを考慮すれば、政府は厳しい規制執行を行うかもしれない。しかしながら、企業がすでに規制遵守に最大限の努力を行ってれば、この厳しい規制執行によって規制遵守努力のインセンティブが失われてしまうかもしれない。結果として、政府、企業とも緩やかな環境規制執行の下での自主的規制遵守努力という協力的な状態を達成できなくなる。

このような環境規制執行政策に関する戦略的なコンフリクトの主要な構造は、図1に示す‘環境規制執行ジレンマ’という2×2非協力ゲームとしてモデル化される。本ゲームには、環境規制を行う公共主体(政府)と被規制主体である民間事業主(企業)の2人のプレイヤーが仮定される。政府の役割は、環境の質に関する義務を企業に効率的かつ効果的に履行させることにより、社会的厚生を高めることである。一方、規制された企業は規制の下でその利潤を最大にすることを目的とすると考える。

本モデルにおいて、政府は2つの極端な戦略を有すると考える。1つは、規制を最大限に強いる‘厳しい執行’戦略であり、もう1つは、最小限に執行する‘緩やかな執行’戦略である。ここで、厳しい執行とは、広範的な検査や、告知なしの立入検査、ルールの厳しい解釈、即時の起訴やその他様々な法的・行政的手段を含む。このような厳しい規制執行戦略を実行するためには、政府は企業をくまなくその監視下におき、すべての可能な違反を調査し、法の一語一句を詳細に実行する必要がある。一方、緩やかな執行戦略は、全く正反対の規制執行スタイルを表している。ここでは、企業は政府による最小限の検査・モニタリングの下である程度の自由裁量を与えられている。この政府による緩やかな執行戦略の下では、高コストな検査・監査はほとんど行われず、規制違反はもし平凡あるいはささいなものであれば許容される。

一方、環境規制執行ジレンマにおける企業の行動

		政府	
		緩やかな執行 (1-c)	厳しい執行 c
企業	遵守 (c)	協力 (0,0)	抑止 (-c _F , -c _A)
	違反 (1-c)	搾取 (b _F , -d)	対立 (b _F - c _F - p, b _A - c _A - d)

b_F : 違反による利潤
 $-c_F$: 厳しい規制によって生じる企業の費用
 $-p$: 違反に対する懲罰
 b_A : 違反を取り締まることによる利得
 $-c_A$: 厳しい取り締まりに要する費用
 $-d$: 規制違反による社会的ダメージ

図1: 環境規制執行ジレンマ

は、規制を遵守する努力のレベルで表されるとする。本2×2ゲームにおいてはこの努力レベルは2つの両極的な戦略で表される。1つは規制で求められた基準を遵守するため最大限の努力を行うという戦略(‘遵守’戦略)であり、もう1つは、規制遵守の努力を最小限にとどめるという戦略(‘違反’戦略)である。遵守戦略を用いる企業は汚濁排出物処理施設の頻繁な自己検査や新処理技術の開発への投資など、要求された規制値を遵守するための最大限の努力を行う。一方、違反戦略を選択する企業は、上述のような汚濁処理施設への支出や規制遵守のための社員教育等の努力を最小限にとどめる。従って、規制基準を破る可能性も高くなることになる。

図1に与えられたように、この2×2環境規制執行ジレンマゲームには、‘協力’、‘搾取’、‘抑止’、‘対立’の4つの結果がある。図1において4つの結果それぞれにそのときのプレイヤーの利得が付されており、カッコ内の第1項目が企業の利得であり、第2項目が政府の利得である。‘協力’が利得(0,0)を持つと考え、他の結果の利得を相対的に与えた。

図1には、また、結果の費用・便益を表す各パラメータが与えられている。ここで、すべての費用及び便益のパラメータは正であると仮定する。プレイヤーの4つの結果に関する選好関係のいくつかは費用及び便益のパラメータが正という条件によって決定される。たとえば、 $-c_F \leq 0$ 及び $-c_A \leq 0$ より、企業、政府とも、‘抑止’より‘協力’を 선호することになる。さらに、企業及び政府は‘対立’より‘協力’を選好すると仮定する。つまり、次の不等式を仮定する。

$$b_F - c_F - p < 0 \quad \text{かつ} \quad b_A - c_A - d < 0 \quad (1)$$

言い換えれば、政府は対立より最小限の規制執行の下での自主的な規制遵守を望み、また、企業は政府による厳しい規制執行下で最小限の規制遵守努力を行うより緩やかな規制執行の下で自主的に遵守努力を

行方を選択する。この2つの仮定は多くの場面で妥当であると考えられる。

環境規制執行ジレンマゲームにおいて、企業及び政府の戦略的行動は、それぞれ意志決定変数 c 及び e で表される。 c は企業が遵守を選択する確率 (よって $(1-c)$ は違反を選ぶ確率) であり、一方 e は、政府が厳しい執行を選ぶ確率 (よって $(1-e)$ は緩やかな執行を選ぶ確率) である。

よって、企業及び政府それぞれの期待効用 $U_F(c; e)$ 及び $U_A(e; c)$ は以下のように計算される。

$$U_F(c; e) = (b_F - p \cdot e)(1 - c) - c_F \cdot e \quad (2)$$

$$U_A(e; c) = \{b_A(1 - c) - c_A\}e - d(1 - c) \quad (3)$$

企業及び政府による合理的行動はそれぞれ式 (2) 及び式 (3) で与えられる期待効用の最大化として規定される。

3-2 均衡解

環境規制執行ジレンマゲームの均衡解を求める。ナッシュ均衡 (c^*, e^*) とは、1) 企業の期待効用 $U_F(c; e^*)$ を最大にする戦略 $c^* = c$ 及び 2) 政府の期待効用 $U_F(e; c^*)$ を最大にする戦略 $e^* = e$ の組である。明らかに、環境規制執行ジレンマは、囚人のジレンマや弱虫ゲームといった対称ゲームと違い、プレイヤーの嗜好は非対称的である。囚人のジレンマにおいては、プレイヤーの個人合理性に基づく行動は、そこに互いが協力的であるというより望ましい結果が存在するにも関わらず、ナッシュ均衡解はパレートの意味で不効率的結果になるというジレンマ的状态をもたらすことが知られている。ここで示すように、同様のジレンマが環境規制執行にかかわるゲームにも発生することが示される。

Fukuyama *et al.*⁸⁾ は、本ゲームが以下の3通りの均衡解を持つことを示した。

1. $\frac{b_A}{c_A} < 1$; $(c^*, e^*) = (0, 0)$; $(U_F^*, U_A^*) = (b_F, -d)$
2. $\frac{b_A}{c_A} > 1$ かつ $\frac{b_F}{p} > 1$; $(c^*, e^*) = (0, 1)$;
 $(U_F^*, U_A^*) = (b_F - c_F - p, b_A - c_A - d)$
3. $\frac{b_A}{c_A} > 1$ かつ $\frac{b_F}{p} < 1$; $(c^*, e^*) = (1 - \frac{c_A}{b_A}, \frac{b_F}{p})$;
 $(U_F^*, U_A^*) = (-\frac{c_F b_F}{p}, -\frac{d c_A}{b_A})$

ここでアスタリスクはナッシュ均衡戦略を示している。各ケースの境界上を除き、本ゲームは唯一の均衡解を持つ。はじめの2つのケースは純粋戦略を均衡解として持ち、最後のケース3の均衡解は混合戦略

となっている。それぞれの均衡解は以下のように解釈することができる。

1. 政府の環境規制の厳しい執行のための費用が規制違反を取り締まることによる社会的便益を上回っている。政府は常に緩やかな規制執行を行い (支配戦略)、企業は常に最小の規制遵守努力をおこなう。
2. 規制違反を取り締まることの社会的便益がそのための厳しい規制執行に要する費用を上回っている。また、企業の規制遵守努力を最小にとどめることによる利益が、違反が取り締まれたときの費用 (ペナルティー) を上回っている。企業は常に最小の規制遵守努力しか行わず (支配戦略)、政府は常に厳しい規制執行戦略をとる。
3. 違反を取り締まることの社会的便益が厳しい規制執行の費用を上回っている。また、企業が直面する規制違反が発見されることによるペナルティーが、規制遵守努力を行わないことによって生ずる利益を上回っている。政府はときに規制を厳しく執行し、ときに緩やかに執行する。一方、企業はときに最大の規制遵守努力を行い、ときに最小の努力しか行わない。

第1番目のケースは実際の規制執行問題においてほとんど発生しないと考えられる。政府はそれ自身が規制を執行する誘因を持たず、従って、ゲームはいかなるジレンマも持たず、政府の規制の無執行の下、企業の最小限の規制遵守努力という状態となる。ケース2及び3は実際の環境規制問題において発生すると考えられる。この2つのケースにおける違いは、企業の‘規制違反のインセンティブ’を表す項 b_F/p で表される。つまり、もしペナルティー p が相対的に小さければこの規制違反のインセンティブは高く、従って企業は政府の厳しい規制執行に関わらず最小の遵守努力を選び、ゲームは‘対決’となる。もし罰が相対的に大きく厳しい場合、この企業の規制違反のインセンティブは低くなり、政府のいくらかの規制執行努力 ($0 < e^* < 1$) に対しいくらかの規制遵守努力 ($0 < c^* < 1$) を行う。言い換えれば、 $b_F/p < 1$ という、ペナルティーと企業利潤の関係を実現することによって政府は政府の (最大ではないが) 規制遵守努力を導出することができる。

しかしながら、いかなる均衡解も企業が最大限の規制遵守努力を行い ($c^* = 1$)、政府が緩やかな規制の執行を行う ($e^* = 0$) という結果を持たない。つまり、利得 $(0, 0)$ を持った‘協力’という結果がゲームに

含まれているにも関わらず、ゲームの均衡解は常に両方のプレイヤーに負の利得しかもたらさない。言い換えれば、本ゲームにおけるナッシュ均衡解は「協力」という結果に対し常にパレートの意味で劣っている。

次節では、環境規制執行ジレンマを無限繰り返しゲームに拡張する。これにより、より効率的な規制方策・検査施策を見いだそうとするものである。一般的に、環境規制主体は企業の汚濁排出を継続的に規制するのが普通であろう。つまり、環境規制主体と被規制企業の関係は長期的なものと考えられる。ゲーム論的にいえば、政府と企業の間での規制ゲームは繰り返されるといえよう。そのような拡張された相互作用の中で両主体は未来に相手を選ぶだろう戦略や期待される結果などを考慮しながら戦略を選ぶことになる。

4. 繰り返しゲームへの拡張

4-1 繰り返しゲームモデル

長期的に継続する相互関係においては意志決定主体は短期的利益のみならず長期的な(未来の)見込みも考慮すると考えられる。従って、繰り返しゲームにおける非近視眼的プレイヤーは自分の現在の戦略に対する相手の将来の反応やそれによって決まる将来の結果を予期しながら戦略を選ぶこととなる。従って、ゲームのプレイヤーは抑止力を持った協定や契約を結ぶことなく協力的に行動するという暗黙の結託(implicit collusion)に賛同するインセンティブを持ち得る。

いま Γ を前節にて与えられた1期だけプレイされる環境規制執行ジレンマゲームとしよう。このゲームが非協力の枠組みで行われるとき、前節で与えられた1期ゲームのいずれかのナッシュ均衡解 (c^*, e^*) が実現する。このとき環境規制ジレンマゲームが無限に繰り返されるというゲームは $\Gamma^\infty = (\Gamma_0, \Gamma_1, \dots)$ と記述できる。ここで、 $\Gamma_t = \Gamma$ は t 期に行われるゲームである。

いま、ゲーム Γ がすでに T 回行われたと仮定し、そのときの各々のゲーム Γ_t ($t = 0, 1, \dots, T-1$) の結果を $o_t = (c_t, e_t)$ と表す。本繰り返しゲームの T 期間におけるこれまでのゲームの結果の集合 $h^T = (o_0, o_1, \dots, o_{T-1})$ を T 期におけるゲームの履歴(history)と呼ぼう。繰り返しゲームにおけるプレイヤーはこのゲームの履歴について完全あるいは不完全な情報を持ちうる。 T 期におけるプレイヤーの持つ情報をそのプレイヤーの情報の履歴(information history)と呼び、企業及び政府に対しそれぞれ h_F^T 及び h_A^T と記そう。このとき、繰り返しゲーム中で企

業及び政府は Γ_T において各々の情報の履歴 h_F^T あるいは h_A^T に基づき戦略を選ぶこととなる。従って、繰り返しゲームにおける企業及び政府の戦略、それぞれ σ_F 及び σ_A とは、繰り返しゲームの各サブゲーム $\Gamma_T^\infty = (\Gamma_T, \Gamma_{T+1}, \dots)$, $T = 1, \dots$ における、持ちうる情報の履歴 h_F^T 及び h_A^T から実際の戦略行動 c_T 及び e_T への写像であるといえる。

もしゲームが完全情報ゲームであれば、企業及び政府はゲーム Γ_T において全く同じ情報の履歴 $h_F^T = h_A^T = h^T$ に基づいてその戦略を選ぶこととなる。完全情報下では、ゲームのプレイヤーは相手のプレイヤーの協調的行動からの乖離を直ちに知ることができる。有名な囚人のジレンマにおいてはトリガー戦略やしっぺ返し戦略(Tit-for-Tat Strategy)と呼ばれるような戦略によって相互的な協力に関する暗黙の結託が達成可能であることがわかっている。このとき、双方にとって望ましい「協力」という結果が繰り返しゲームの(ナッシュ)均衡解となる(たとえば、Friedman⁹⁾、Axerlod¹⁰⁾を参照)。

環境規制において、規制主体である政府の戦略は被規制主体である企業への規制執行の厳しさであるのに対し、企業の戦略は(政府にではなく)環境に対するアクションである。したがって、被規制主体である企業が規制主体である政府の選択した戦略をほとんど無償に入手できるのに対し、政府は企業の戦略に関する情報をほとんど持ち得ないと考えられる。このような非対称情報構造の下では、企業の規制違反を抑止するため、モニタリングや検査等の情報収集活動をおこななければならない。多くの場合、環境規制における被規制主体の行動に関するモニタリングは規制主体にとって高費用であり、その他の実行上の困難性をともなう。環境規制主体は、限られた資源しか持ち得ず、そのうえ、入手可能なデータはしばしば検査の不確実性や環境自身の持つ変動により影響を受けていると考えられる。このように、政府が不完全な情報しか持ち得ない場合、繰り返しゲームに立脚した規制執行戦略により被規制主体である企業との間に協力という暗黙の結託(implicit collusion)を構築することが困難となる。

いま、企業の戦略を直接的に観測できない政府は、時点 t において企業の戦略行動に(部分的に)依存している環境の質に関する計量値 q_t を観測するとしよう。この観測により検出される環境の質は、また、検査時のエラーや環境自身の確率的変動等の外生的要因によっても影響されているとする。この環境の質の

観測値を以下の式で表現できるとしよう。

$$q_t = q(c_t, \beta_t) \quad (4)$$

ここで c_t は t 期の企業の規制遵守の努力レベル ($c_t = 0$ は違反; $c_t = 1$ は遵守) であり β_t は外生的リスク要因を表すランダム変数である。また、 $Eq(c_t, \beta_t) = c_t$ であると仮定しよう。

このような環境規制主体による不完全な検査のもとでは、時点 T におけるゲームの履歴はこの検査結果を含むこととなる。つまり、 $h^T = (C_T, E_T, Q_T)$ であり、ここで $C_T = (c_0, c_1, \dots, c_{T-1})$ 、 $E_T = (e_0, e_1, \dots, e_{T-1})$ 、 $Q_T = (q_0, q_1, \dots, q_{T-1})$ である。ゲームに関するすべての情報を持つと考えられる企業は、時点 T において完全な履歴 $h_F^T = h^T$ を知っている。一方、政府は自身の過去にとつた戦略及び一連の過去の環境検査値しか知り得ず、よって時点 T において履歴 $h_A^T = (E_T, Q_T)$ を持つこととなる。規制主体はこの不完全な情報の履歴 h_A^T に基づいて戦略を選ぶこととなる。

いま、プレイヤーの目的を正規化された期待効用の最大化と規定しよう。ここで、正規化された期待効用とはプレイヤーの各期の利得の現在価値の総和から成っており、企業及び政府に対しそれぞれ r_F 及び r_A の割引率で割り引かれたものとする。割引ファクター $\delta = 1/(1+r_F)$ 及び $\gamma = 1/(1+r_A)$ を用いれば企業 $U_F(\delta)$ および政府の効用 $U_A(\gamma)$ は以下のように表される。

$$U_F(\delta) = (1-\delta) \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t EU_{Ft} \quad (5)$$

$$U_A(\gamma) = (1-\gamma) \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t EU_{At} \quad (6)$$

ここで U_{Ft} 及び U_{At} はそれぞれ t 期における企業と政府の利得である。割引ファクター δ 及び γ は $0 \leq \delta, \gamma \leq 1$ の実数で、 δ が 1 に近ければ割引率 r_F は小さく、企業は将来の利得を現在のそれと同等に評価することを表す。一方、もし δ がゼロに近ければ、割引率 r_F は大きく、企業はその将来の利得を現在のそれに比べて重要でないとする。政府の立場から割引ファクター γ に対し同様の議論が成り立つ。

正規化ファクター $(1-\delta)$ 及び $(1-\gamma)$ は割引期待効用に δ 及び γ について一様に上界を与えるもので、これにより以下の収束特性を得る。

$$\lim_{\delta \rightarrow 1^-} U_F(\delta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T EU_{Ft} \quad (7)$$

つまり、 δ が下方から 1 に近づくとき、企業の効用は無限繰り返しゲーム全期を通しての平均利得に近づ

く。ここで、ゲームのすべての実現可能な効用の集合が境界値を含むようにするため、割引ファクター δ が 1 である場合の無限繰り返しゲームにおける利得を定義する必要がある。企業のこの $\delta = 1$ のときの期待効用を以下のように定義する。

$$U_F(1) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \inf \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} EU_{Ft} \quad (8)$$

これは、すべての有界な数列 (U_{Ft}) に対して定義できかつ有限である。政府に対する $\gamma = 1$ のときの限界利得も同様に定義できる。

無限繰り返しゲームの一般的な均衡解は通常使われるゲームの均衡解と同様に定義される。つまり、無限繰り返しゲームの均衡解は、ゲームに参加しているいかなるプレイヤーも一方的にその戦略を変更することによってゲームによる利得を改善することができないような戦略の組み合わせである。無限に繰り返される環境規制執行ジレンマゲームの 1 つの可能な均衡解は 1 回限りの環境規制執行ジレンマゲームのナッシュ均衡戦略 (c^*, e^*) の無限繰り返しである。そこでは、企業、政府とも負の利得しか得られない。

4.2 レビュー戦略

本節では、以上に定式化された繰り返しゲーム上に定義される有効な環境規制執行戦略として‘レビュー戦略’を導入する。Radner¹¹⁾は、プリンシパル-エージェント関係にある 2 つの経済主体間において、パレート効率的契約履行状態をもたらす金銭支払い戦略としてレビュー戦略を提言している。本節では、このレビュー戦略を環境規制執行問題に適用し、規制主体による検査が不完全なとき規制主体と被規制主体間の相互協調を誘導する効率的な規制執行方策として設計する。

ここで、繰り返し環境規制執行ジレンマゲームは、完備情報の下でプレイされると考える。また、企業は、政府が以下に説明するレビュー戦略を用いることを知っているとする。まず、レビュー戦略を用いる政府は、企業の行動をある一定期間検査し、その検査データの集計値によって厳しいかあるいは緩やかな規制執行戦略をとるかを決定する。検査を行う期間をレビュー期間と呼び、これは連続した R 期から成っている。レビュー戦略を構成するもう 1 つの期間を懲罰期間と呼び、連続した M 期から成るとする。政府はレビュー期間においては必ず緩やかな規制の戦略をとり、また懲罰期間では 1 期ゲームにおけるナッシュ均衡戦略を選ぶ。

図 2 は、政府のレビュー戦略を表している。ここで、横軸は時間である。この時間軸の左端をスタート

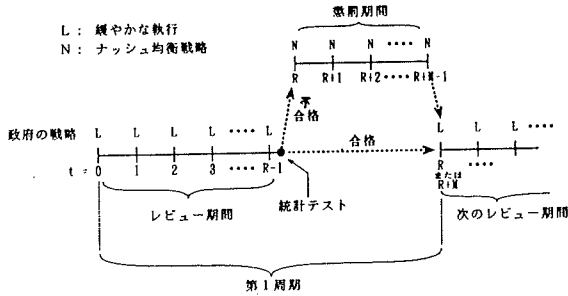


図-2: 政府のレビュー戦略

に、環境規制執行ジレンマゲームが繰り返される。レビュー戦略を用いる政府は、まず環境の質を R 期間測ることにより企業の行動を検査する(レビュー期間)。このレビュー期間中、政府は各期の検査結果に関わらず常に緩やかな規制執行戦略をとる。レビュー期間の終了期に、政府は企業がそのレビュー期間に規制を遵守したか否かを判定する。この判定は当レビュー期間中に集められた検査データに対する統計テストに基づく。もし、政府が企業が少なくとも1度でも規制違反を選択したと判断すると(つまり企業がテストに不合格になると)、政府は続く M 期間、前章にて導入した1期の環境規制執行ジレンマゲームにおけるナッシュ均衡戦略を選択する(懲罰期間)。この1つのレビュー期間と1つの懲罰期間からなる期間をレビュー戦略の1周期と呼ぶ。(ただし、企業が試験に合格した場合、その周期は懲罰期間を含まず、1つのレビュー期間のみから成ることになる)。 M 期連続のナッシュ均衡戦略から成る懲罰期間の後、政府は再び無条件に緩やかな規制執行戦略を R 期間選択する。これが第2番目のレビュー期間となる。

一方、もし政府が企業はレビュー期間中規制を遵守し続けたと判断すると(つまり、企業がテストに合格すると)、政府は懲罰期間には入らず、第1回目レビュー期間の後、直接、第2番目のレビュー期間に入る。この場合、政府は環境の質を検査し続け、かつ緩やかな規制執行戦略を使い続けることになる。

このレビュー期間と懲罰期間の繰り返しが際限なく続く。政府のレビュー戦略は、レビュー期間長 R 及び懲罰期間長 M という2つのパラメータを持つことになる。

一方、企業の戦略 σ_F は、以上に記した政府のレビュー戦略に対する最適反応として規定される。先述し

たように、レビュー戦略を用いる政府は企業の戦略のいかんに関わらず懲罰期間においてはすべての期で1期規制執行ジレンマゲームのナッシュ均衡戦略 (e_t^*) を選択する。ゆえに、このような政府の無条件のナッシュ戦略に対し、企業もまた1期規制執行ジレンマゲームのナッシュ均衡戦略 (c_t^*) を最適反応として選択することになる。結局、懲罰期間においては、每期、1期規制執行ジレンマゲームにおけるナッシュ均衡 (c^*, e^*) が実現することになる。

政府がレビュー期間の任意の時点で緩やかな規制執行戦略 ($e = 0$) を用いなかった場合の企業の反応戦略を特定する必要がある。政府がレビュー期間において緩やかな規制執行戦略をとらなかった場合、企業は当該レビュー期間の残留期及びその後の追加的 M' 期間にわたって、1期ゲームのナッシュ均衡戦略をとると規定する。したがって、 M' が企業の戦略 σ_A のパラメータとなる。

政府のレビュー戦略 σ_F を定式化する。レビュー期間において、政府は企業の行動をその結果として起こる環境の質 q_t を検査する。レビュー期間の期末 R において、政府は自身の戦略行動 E_R 及びレビュー期間中の検査データ $Q_R = \{q_0, q_1, \dots, q_{R-1}\}$ からなる情報の履歴 h_A^R を持つ。政府はこの環境の質のデータ Q_R が企業による規制違反によるものか否かを判断する。

いま ϕ をレビュー期間後に企業がテストに不合格となる確率とする。明らかに、 ϕ はレビュー期間における企業の規制遵守努力 (c_0, \dots, c_{R-1}) の関数である。懲罰期間のそれぞれの期においては、1期ゲームのナッシュ均衡 (c^*, e^*) が成立し、懲罰期間における各期の企業及び政府の期待効用はそれぞれ $U_F^* < 0$ 及び $U_A^* < 0$ となる。

第1周期目でのすべての過程を所与としたときの第2周期以降の企業の割引期待効用は $U_F(\delta)$ となる。従って、企業の期待効用 $U_F(\delta)$ は次の等式で表わされる。

$$U_F(\delta) = (1 - \delta) \sum_{t=0}^{R-1} \delta^t EU_{Ft} + \phi \left\{ (1 - \delta) \sum_{t=R}^{M+R-1} \delta^t U_F^* + \delta^{R+M} U_F(\delta) \right\} + (1 - \phi) \delta^R U_F(\delta). \quad (9)$$

式(9)を $U_F(\delta)$ について解くことにより以下を得る。

$$U_F(\delta) = \frac{(1 - \delta) \sum_{t=0}^{R-1} \delta^t EU_{Ft} + \phi \delta^{R-1} (1 - \delta^M) U_F^*}{1 - \phi \delta^{R+M} - (1 - \phi) \delta^R}. \quad (10)$$

同様に、政府の割引期待効用 $U_A(\gamma)$ は次の等式を満足する。

$$U_A(\gamma) = (1-\gamma) \sum_{t=0}^{R-1} \gamma^t EU_{At} + \phi \left\{ (1-\gamma) \sum_{t=R}^{M+R-1} \gamma^t U_A^* + \gamma^{R+M} U_A(\gamma) \right\} + (1-\phi) \gamma^R U_A(\gamma), \quad (11)$$

よって同様に政府の効用関数として次式を得る。

$$U_A(\gamma) = \frac{(1-\gamma) \sum_{t=0}^{R-1} \gamma^t EU_{At} + \phi \delta^{R-1} (1-\delta^M) U_A^*}{1 - \phi \gamma^{R+M} - (1-\phi) \gamma^R} \quad (12)$$

ϕ は政府が企業に対しレビュー期間中に規制違反があったと判断する確率である。このレビュー期間後に執行される統計テストを以下のように定義する。

$$\begin{cases} \text{合格} & \sum_{t=0}^{R-1} q(c_t, \beta_t) > \sum_{t=0}^{R-1} q_t^* - B \text{ のとき} \\ \text{不合格} & \sum_{t=0}^{R-1} q(c_t, \beta_t) \leq \sum_{t=0}^{R-1} q_t^* - B \text{ のとき} \end{cases}$$

ここで、 $q_t^* \equiv E[q(1, \beta_t)] = 1$ は企業が t 期において規制遵守を選択したとき ($c_t = 1$)、その期の環境の質に関する検査データの期待値である。また、 B は統計テストにおける測定誤差許容項である。以上のように特定化された統計テストは次のように解釈できる。もしあるレビュー期間における環境の質に関するデータの集計値 (単純和) が (測定誤差許容項 B を含む) 求められた環境水準より良いとき、企業はテストに合格し、そうでなければ不合格となる。

以上の統計テストの定義より、 ϕ は以下のように与えられる。

$$\phi = \text{Prob} \left\{ \sum_{t=0}^{R-1} q(c_t, \beta_t) \leq \sum_{t=0}^{R-1} q_t^* - B \right\} \quad (13)$$

$c_t = 1$ を式 (13) に代入することにより、レビュー期間中常に規制遵守の戦略を選択した企業のテストに不合格となる確率 ϕ^C は以下のように与えられる。

$$\phi^C = \text{Prob} \left\{ \sum_{t=0}^{R-1} q(1, \beta_t) \leq \sum_{t=0}^{R-1} q_t^* - B \right\} \quad (14)$$

以上、環境規制執行ジレンマの無限繰り返しゲームにおけるレビュー戦略 (σ_F, σ_A) に関する定義が終了した。続く節ではレビュー戦略の特性とその有効性を詳細に検討し、また、効率的均衡解の存在を示す。

4-3 均衡分析

本節では、レビュー戦略の特性とレビュー戦略下での均衡の存在を導く。政府のレビュー戦略に対面する企業は、式 (10) にて与えられる効用を最大にするように戦略を選ぶ。ここで、企業はレビュー期間での戦略のみを決定すればよい。

企業の選択可能な戦略の 1 つは、レビュー期間において協調戦略、つまり最大の規制遵守努力戦略をとり続けることであろう。もし企業が遵守 $c_t = 1$ を常に選択するならば、企業の効用 $U_F^C(\delta)$ は以下のように与えられる。

$$U_F^C(\delta) = \frac{(1-\delta^R) \hat{U}_F + \phi^C \delta^{R-1} (1-\delta^M) U_F^*}{1 - \phi^C \delta^{R+M} - (1-\phi^C) \delta^R} \quad (15)$$

ここに、 ϕ^C : 式 (14) に与えられたように企業が遵守のみを選択したときにテストで不合格となる確率、 \hat{U}_F : 政府、企業両プレイヤーともに協力的 (パレート優位な) 戦略を取ったときの企業の利得である。このような常に協力的な戦略をとる企業の効用は以下の性質を持つことが示せる

性質 1

$$\lim_{\delta \rightarrow 1^-} U_F^C(\delta) = \frac{R \hat{U}_F + \phi^C M U_F^*}{R + \phi^C M} \quad (16)$$

割引ファクター δ が 1 に近づくとき、協力的企業の効用は割引なしの期平均利得に収束する。このとき、1 周期の期待期間長は $(R + \phi^C M)$ となる。従って、式 (16) の右辺は \hat{U}_F (レビュー期間に獲得する利得) と U_F^* (懲罰期間に獲得する利得) の、それぞれ対応する各期間の期待長による重みづけ平均で与えられる。

ここで、環境規制のジレンマにおけるパレート効率的結果は協力 (0,0) である。協力においては企業及び政府の取る戦略はそれぞれ遵守 ($c = 1$) 及び緩やかな規制執行 ($e = 0$) である。よって $\hat{U}_A = \hat{U}_F = 0$ である。

レビュー期間の期間長 R を、ペナルティー期間及び統計テストの誤差容認項を相対的に測るための単位とし、以下のように定義する。

$$M = aR, \quad a > 0, \quad (17)$$

$$B = bR^p, \quad b > 0, \quad \frac{1}{2} < p < 1. \quad (18)$$

ここで、環境の不確実性を表すランダム変数 β_t ($t = 1, \dots, \infty$) は独立かつ同一の分布を持つと仮定しよう。企業が遵守を選択したときの環境のランダム変数の分散を以下のように定義する。

$$k^C \equiv \text{Var}(q(1, \beta_t)) \text{ for } t = 0, \dots, \infty \quad (19)$$

このとき、レビュー期間における環境の質データの和の分散は次のようになる。

$$\text{Var} \left(\sum_{i=0}^{R-1} q(1, \beta_i) \right) = Rk^C \quad (20)$$

よって、チェビシエフの不等式より、以下の不等式を得る。

$$\text{Prob} \left\{ \left| \sum_{i=0}^{R-1} q(1, \beta_i) - \sum_{i=0}^{R-1} q^s \right| \geq B \right\} \leq \frac{Rk^C}{B^2} = \frac{k^C}{b^2 R} \quad (21)$$

ここで、 ϕ^C は式(14)において以下のように定義された。

$$\phi^C = \text{Prob} \left(\sum_{i=0}^{R-1} q(1, \beta_i) \leq \sum_{i=0}^{R-1} q^s - B \right) \quad (14)$$

従って、 ϕ^C について以下の第2の性質が得られる。

性質 2

$$\phi^C \leq \frac{k^C}{b^2 R^{2\rho-1}} \quad (22)$$

つまり、 R が際限なく増加するとき、 ϕ^C がゼロに収束する。言い換えれば、(誤差容認項一定の下で) レビュー期間長を増加させることにより政府は規制遵守している企業を規制違反者と判断する可能性を際限なく減少させることができる。よって、式(15)及び性質2より、(固定された a 及び b の下で) δ が1に漸近するとき、 $U_F^C(\delta)$ は R に関して一様に $U_F^C(1)$ に収束することがわかる。

$$U_F^C(1) = \frac{\phi^C a U_F^*}{1 + \phi^C a} \quad (23)$$

特に、任意の $\varepsilon > 0$ に対し、

$$R \geq R_\varepsilon \text{ かつ } \delta \geq \delta_\varepsilon \text{ のとき } U_F^C(\delta) > -\varepsilon \quad (24)$$

を満たす R_ε 及び δ_ε が存在する。表記方法を変え、 $U_F(\delta, R)$ を企業の最大割引期待効用とし、 $\phi(\delta, R)$ をそのときの企業のテストに不合格となる確率とする。そのとき、以下の第1の補題を得る。

補題 1 すべての正の実数 $\varepsilon < -2U_F^*$ に対し、 $\delta \geq \delta_\varepsilon$ が以下を満足するような閾値 R_ε 及び $\delta_\varepsilon < 1$ が存在する。

$$U_F(\delta, R_\varepsilon) > -\frac{\varepsilon}{4} \quad (25)$$

$$\phi(\delta, R_\varepsilon) < \varepsilon \quad (26)$$

証明は付録に示す。もし、レビュー期間が十分長く、また、企業の割引ファクターが十分大きければ、企業の効用は効率的レベル $0 (= \hat{U}_F)$ に近似することを表している。一方、政府に関して以下の補題を導出できる。

補題 2 政府及び企業の割引ファクターがそれぞれ γ 及び δ のとき、期間長 R のレビュー期間の下での政府の期待効用を $U_A(\gamma, \delta, R)$ で表す。そのとき、すべての $\varepsilon > 0$ に対し以下を満たす $\gamma'_\varepsilon < 1$ が存在する。つまり、もし、 $R = R_\varepsilon$ であり(命題1で与えられたように) $\delta \geq \delta_\varepsilon$ かつ、 $\gamma \geq \gamma'_\varepsilon$ ならば、次式が成立する。

$$U_A(\gamma, \delta, R_\varepsilon) \geq \frac{\varepsilon a U_A^* - \varepsilon d(1 - bR_\varepsilon^{\rho-1}) - dbR_\varepsilon^{\rho-1} - \varepsilon}{1 + \varepsilon a} - \varepsilon \quad (27)$$

この補題により、レビュー期間が十分長くかつ政府及び企業の割引ファクターが十分大きいとき、政府の割引期待効用は効率的レベル $\hat{U}_A = 0$ に漸近することがわかる。

レビュー戦略下における政府及び企業の戦略の組 (σ_F, σ_A) はパラメータ R, B, M 、及び M' にて特定化される。はじめの3つのパラメータの関係は式(17)及び式(18)に特定化される。ここで、 a, b 、および ρ は付録における式(38)と式(39)を満たす固定パラメータである。従って、企業のレビュー戦略はこの政府の戦略に対して最適戦略となるように決まる。政府と企業のレビュー戦略をそれぞれ $\sigma_A(R, M')$ 及び $\sigma_F(\delta, R, M')$ で表そう。そのとき、以下の定理を得る。

定理 1 もし δ と R が式(58)を満たし、 $\gamma > \gamma(\delta, R)$ かつ $M' > M'(\delta, \gamma, R)$ のとき、レビュー戦略 $\sigma_A(R, M')$ 及び $\sigma_F(\delta, R, M')$ は繰り返し環境規制執行ジレンマゲームの ε -均衡となる。

また、補題1、補題2及び定理1より次の第2の定理を得る。

定理 2 すべての正である $\varepsilon < -2U_F^*$ に対し、以下を満たす $R_\varepsilon, \delta_\varepsilon$ 、及び γ_ε が存在する。つまり、すべての $\delta > \delta_\varepsilon, \gamma > \gamma_\varepsilon$ 及び $M' > M'(\delta, \gamma, R_\varepsilon)$ に対し、レビュー戦略 $\sigma_A(R_\varepsilon, M')$ 及び $\sigma_F(\delta, R_\varepsilon, M')$ は繰り返し環境規制執行ジレンマゲームの ε -均衡をなし、以下の割引期待効用を持つ。

$$U_A(\gamma, \delta, R_\varepsilon) \geq -\varepsilon,$$

$$U_F(\delta, R_\varepsilon) \geq -\varepsilon.$$

さらに、企業がテストに不合格となる確率 $\phi(\delta, R_e)$ は ϵ を超えない。

この定理は、将来割引ファクターが 1 に近い場合、レビュー戦略はほぼ効率的であるというレビュー戦略の ϵ -均衡の存在を示している。以上、レビュー戦略が繰り返し環境規制執行ゲームにおいて、効率的均衡解を持ち得ることが示された。

5. おわりに

環境規制は被規制主体に遵守されてはじめて環境汚染を抑制する社会的手だてとなりうる。本研究では、環境規制の実効性の問題に焦点を置き、環境へ直接的に汚濁物質を排出している企業の規制問題を対象に、環境規制の効率的な執行政策を非協力ゲーム論的立場から考察した。

本研究の環境規制執行政策に関する提案は次の質問にて要約される。それは、完全な排出検査が不可能あるいは禁止的に高費用な場合、繰り返しゲーム論的アプローチが効率的環境規制執行の戦略を提供しうるか、ということである。2章において導入された環境規制執行のジレンマは、前節において非対称情報下の繰り返しゲームへと拡張された。そこでは、規制主体である政府は、(間接的)検査によって被規制主体である企業の行動に関する情報を集めなければならない。提案されたレビュー戦略と呼ばれる繰り返しゲーム戦略の下では、規制主体は検査データを集計的に扱うことで、限られた資源の下で企業の規制遵守のインセンティブを誘導しうるということが理論的に示された。少なくとも、レビュー戦略は規制主体の潜在的に検査コストを減少させ規制執行及び抑止のための資源を効率的に利用することを可能とする。以上、本研究は効率的規制執行方策のための 1 つの有望な方向性を示し得たと考える。

謝辞

本研究は、筆者のウォータールー大学での Ph.D. 論文研究の 1 部を拡張したものであり、ここに、ウォータールー大学博士課程在学中、熱心にご指導いただいたウォータールー大学工学部システムデザイン工学科長 キース・W・ハイベル教授ならびにウィルフリッドローリエ大学数学科教授 D・マーク・キルガー教授に感謝の意を表します。また、本論文を完成するにあたって鳥取大学工学部 小林潔司教授、多々納裕一助教授から貴重なご意見をいただいた。ここに感謝の意を表します。

付録

補題 1 の証明

まず、企業の期待効用の上限を導入する。企業の選好順序より、レビュー期間における任意の時点 t における任意の戦略に対し以下の不等式を満たす正の実数 K が存在する。

$$(EU_{Ft} - \hat{U}_F) + K(c_t - 1) \leq 0 \quad (28)$$

ここで、 $\hat{U}_F = 0$ より、以下を得る。

$$EU_{Ft} \leq K(1 - c_t) \quad (29)$$

ただし、 $c_t = Eq_t$ である。不等式 (29) と (10) より、次式を得る。

$$U_F(\delta) \leq \frac{(1 - \delta)K \sum_{t=0}^{R-1} \delta^t (1 - Eq_t) + \phi \delta^R (1 - \delta^M) U^*}{1 - \phi \delta^{R+M} - (1 - \phi) \delta^R} \quad (30)$$

ここで、次のように与えられる関数 $f(\delta, R)$ を定義しよう。

$$f(\delta, R) \equiv \sum_{t=0}^{R-1} (1 - \delta^t) = R - \frac{1 - \delta^R}{1 - \delta}, \quad 0 \leq \delta < 1 \quad (31)$$

$|1 - Eq_t| \leq 1$ より、

$$\left| \sum_{t=0}^{R-1} \delta^{t-1} (1 - Eq_t) - \sum_{t=0}^{R-1} (1 - Eq_t) \right| \leq f(\delta, R) \quad (32)$$

であり、よって次式を得る。

$$\sum_{t=0}^{R-1} \delta^t (1 - Eq_t) \leq 1 - ES_R + f(\delta, R) \quad (33)$$

ここで、 $ES_R \equiv \sum_{t=0}^R q_t$ である。また、

$$\begin{aligned} \phi &= \text{Prob}(S_R < REq(1, \beta_t) - B) \\ &= \text{Prob}(S_R < R - B) \end{aligned}$$

$$S_R \geq 0$$

より、以下を得る。

$$R\hat{c} - ES_R \leq \phi R + (1 - \phi)B. \quad (34)$$

従って、式 (30) - (34) から次式を得る。

$$U_F(\delta) \leq U_F^0(\delta) \quad (35)$$

ただし、

$$\begin{aligned} U_F^0(\delta) &\equiv \frac{(1 - \delta^R) + \phi \delta^R (1 - \delta^M) U^*}{(1 - \delta^R) + \phi \delta^R (1 - \delta^M)} \\ &\quad + \frac{(1 - \delta)K[\phi R + (1 - \phi)B + f(\delta, R)]}{(1 - \delta^R) + \phi \delta^R (1 - \delta^M)} \quad (36) \end{aligned}$$

である。

よって、もし、(36)において、レビュー期間長 R 一定のもとで δ が 1 に漸近するとき、次式を得る。

$$U_F^0(1) = \frac{\phi a U_F^* + K[\phi + (1-\phi)bR^{\rho-1}]}{1 + \phi a} \quad (37)$$

ここで、 η を以下の不等式を満たす値としよう。

$$0 < \eta < -U_F^* \quad (38)$$

また、 a を次の様に特定化しよう。

$$a > \frac{K}{-U_F^* - \eta} \quad (39)$$

これより、 $\varepsilon' < \eta$ を満たす正の実数 ε' に対し

$$\phi \geq \frac{KbR^{\rho-1} + \varepsilon'}{a(-U_F^* - \varepsilon') - K + KbR^{\rho-1}} \quad (40)$$

となり、これは次式のように書き換えられる。

$$U_F^0(1) \leq -\varepsilon' \quad (41)$$

R_ε を (24) において $R_\varepsilon \geq R_{\varepsilon/4}$ を満たし、かつ $\varepsilon' = \varepsilon/2$ のとき式 (40) の右辺が ε を越えないような R の値とする。また、 δ_ε を式 (24) において $\delta_\varepsilon \geq \delta_{\varepsilon/4}$ を満たし、かつ $R = R_\varepsilon$ 及び $\delta \geq \delta_\varepsilon$ に対して以下を満たす δ の値とする。

$$|U_F^0(\delta) - U_F^0(1)| \leq \frac{\varepsilon}{4} \quad (42)$$

式 (24) より、補題 1 における不等式 (25) は直ちに得られる。一方、もし $\delta > \delta_\varepsilon$ かつ $\phi(\delta, R_\varepsilon) \geq \varepsilon$ であるとすると、(40) 及び (41) より、

$$U_F^0(1) \leq -\frac{\varepsilon}{2} \quad (43)$$

を得る。これは、(42) より以下を意味する。

$$U_F^0(\delta) < -\frac{\varepsilon}{4} \quad (44)$$

ところが、 $U_F(\delta, R_\varepsilon) \leq U_F^0(\delta)$ であり、(44) は (25) に矛盾する。よって、式 (26) を得る。

補題 2 の証明

まず、緩やかな規制を行う政府の t 期における期待利得は以下で表される。

$$EU_{A_t|c_t=0} = -d(1 - c_t) = -d(1 - E q_t) \quad (45)$$

従って、記号を簡易化し、 $U_A(\gamma, \delta, R)$ を $U_A(\gamma)$ 、また、 $\phi(\gamma, R)$ を ϕ と表すことにすると、(12) より以下を得る。

$$U_A(\gamma) = \frac{(1-\gamma)(-d) \sum_{t=0}^{R-1} \gamma^t (1 - E q_t) + \phi \gamma^R (1 - \gamma^M) U_A^*}{(1-\gamma^R) + \phi \gamma^R (1 - \gamma^M)} \quad (46)$$

式 (30) から式 (36) ままで同様の議論により以下の不等式を得る。

$$U_A(\gamma) \geq U_A^0(\gamma) \quad (47)$$

ここで、

$$U_A^0(\gamma) \equiv \frac{\phi \gamma^R (1 - \gamma^M) U_A^*}{(1 - \gamma^R) + \phi \gamma^R (1 - \gamma^M)} - \frac{d(1 - \gamma)[\phi R + (1 - \phi)B + f(\gamma, R)]}{(1 - \gamma^R) + \phi \gamma^R (1 - \gamma^M)} \quad (48)$$

であり、一定の R 及び ϕ に対し

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow 1^-} U_A^0(\gamma) &= U_A^0(1) \\ &= \frac{a\phi U_A^* - d\phi - (1 - \phi)bR^{\rho-1}}{1 + \phi a} \quad (49) \end{aligned}$$

である。結局、(49) 及び補題 1 より補題 2 が得られる。

定理 1 の証明

企業の戦略 $\sigma_F(\delta, R, M')$ が、政府のレビュー戦略 $\sigma_A(R, M)$ に対し最適であることは、 $\sigma_F(\delta, R, M')$ の定義から明らかである。したがって、 $\sigma_A(R, M)$ が $\sigma_F(\delta, R, M')$ に対して最適戦略であることを示せば、戦略のペアがゲームの均衡解であることが示せる。先述したように、もし政府がレビュー期間中に効率的な戦略 $e_t = 0$ から逸脱したとき、企業はそのレビュー期間中及びその後の M' 期間短期的戦略（つまり 1 回ゲームにおけるナッシュ均衡戦略）を選ぶ。よって、そのとき、1 回ゲームにおけるナッシュ均衡 (c^*, e^*) が結果として起こることになる。したがって、政府がレビュー期間中に戦略を変えないことを示せばよい。

企業の戦略 $\sigma_F(\delta, R, M')$ に直面する政府の最大期待効用を $U_A(\gamma)$ で表そう。もし、政府が緩やかな規制の戦略をはじめのレビュー期間における時期 $t < R$ で放棄し、その後は、最適戦略を選ぶとしよう。そのときの時期 t 後の政府の条件付き期待効用は、以下で与えられる。

$$\begin{aligned} (1-\gamma) \sum_{T=0}^{R-t+M'-1} \gamma^T U_A^* + \gamma^{R-t+M'} U_A(\gamma) \\ = (1-\gamma^{R-t+M'}) U_A^* + \gamma^{R-t+M'} U_A(\gamma) \quad (50) \end{aligned}$$

一方、もし政府が最初のレビュー期間における時期 t において戦略を変えず、緩やかな規制戦略を使い続けその後は最適戦略をとると仮定すると、政府の期待効用は以下のようになる。

$$\begin{aligned} E \left\{ (1-\gamma) \left(\sum_{T=0}^{R-t-1} \gamma^T EU_{A_{T+t}} \right) \right. \\ \left. + \gamma^{R-t} (1 - \gamma^{M(HR)}) U_A^* + \gamma^{R-t+M(HR)} U_A(\gamma) \right\} \quad (51) \end{aligned}$$

ここで、

$$M(H_R) = \begin{cases} 0 & S_R \geq \sum_{t=0}^{R-1} q(1, \beta_t) - B \text{ のとき} \\ M & \text{上記以外のとき} \end{cases}$$

である。ダイナミックプログラミングの最適性の原理により、 $U_A(\gamma)$ は少なくとも (50) と (51) の最大値と同じでなければならない。従って、戦略 $\sigma_A(R, M')$ が最適戦略となるための十分条件は、 $t = 0, \dots, R-1$ に対し、(50) が (51) より小さいことである。

政府の1つの戦略は $e_t = e^*$ をすべての時点 t でとることである。そのとき、

$$U_A(\gamma) \geq U_A^* \quad (52)$$

である。また、(51) において、

$$U_{A^{t+n}} \geq -d, \quad n = 1, \dots, R \quad (53)$$

である。したがって、 $M(H_R)$ を M で置き換えても (51) は増加しない。従って、(51) は少なくとも以下と同等かあるいは大きい。

$$-(1-\gamma^{R-1})d + \gamma^{R-t}(1-\gamma^M)U_A^* + \gamma^{R-t+M}U_A(\gamma) \quad (54)$$

よって、 $\sigma_A(R, M')$ が均衡解であるための十分条件は、(50) が (54) より強く小であることである。つまり、時点 $t = 0, \dots, R-1$ に対して、以下が成り立つことである。

$$\gamma^{R-t}(\gamma^M - \gamma^{M'}) (U_A(\gamma) - U_A^*) > (1-\gamma^{R-t})(d + U_A^*), \quad (55)$$

ここで、 $U_A(\gamma) > U_A^*$ より、上式は次のように書き換えられる。

$$\gamma^R(\gamma^M - \gamma^{M'}) (U_A(\gamma) - U_A^*) > (1-\gamma^R)(d + U_A^*) \quad (56)$$

かつ

$$U_A(\gamma) > U_A^* \quad (57)$$

まず、2つ目の条件である (57) が成立することを示す。そのためには、(48) で定義された $U_A^0(\gamma)$ に対し、 $U_A^0(\gamma) > U_A^*$ であることを示せば十分である。(49) より、所与の δ 及び R に対し、

$$U_A^* < -d\{\phi(\delta, R) + (1-\phi(\delta, R))bR^{p-1}\} \quad (58)$$

であるとき、十分に大きい δ に対し、この不等式が成り立つ。不等式 (58) は、 R を所与としたとき、十分に大きい R 及び十分に1に近い δ に対して成立する。

次に、第1番目の条件式 (56) を考える。不等式 (56) は条件式 (57) が成立するとき以下のように書き換えられる。

$$\gamma^{M'} < \gamma^{aR} - \frac{(1-\gamma^R)g(\gamma)}{\gamma^R} \quad (59)$$

ここで、

$$g(\gamma) \equiv \frac{d + U_A^*}{U_A(\gamma) - U_A^*} \quad (60)$$

である。不等式 (59) は右辺が正であるという条件の下で、十分に大きな M' に対して成立する。式 (59) の右辺が正という条件は次式のように書ける。

$$\frac{\gamma^{(1+a)R}}{1-\gamma^R} > g(\gamma). \quad (61)$$

式 (49) より、 $g(\gamma)$ の上限は存在し、かつ γ が1に漸近するとき、 $g(\gamma)$ の上限が存在しかつ正である。よって、(58) を満たすすべての R 及び δ に対し、本不等式は、1に十分近い γ に対し成立する。

定理1を導出するために、任意の δ 及び R に対し、すべての $\gamma \geq \gamma'$ にとって $U_A^0(\gamma) > U_A^*$ でありかつ不等式 (61) を満足するような、すべての $\gamma' < 1$ の上限を $\gamma(\delta, R)$ としよう。

特に、所与の十分大きな R に対し、 γ が十分1に近いとき、 $\gamma(\delta, R)$ は有限でかつ1より小さい。このとき、もし $\gamma > \gamma(\delta, R)$ ならば、そのとき (59) を満たす値 M' が存在する。そのような値の集合の上限を $M'(\delta, R, M')$ としよう。よって、このとき定理1を得る。

参考文献

- 1) Avenhaus, R.: Monitoring the emission of pollutants by means of the inspector leadership method, *Information and Decision Technologies*, Vol. 16, pp. 229-247, 1990.
- 2) Russell, C. S.: Game models for structuring monitoring and enforcement systems, *Natural Resource Modeling*, Vol. 4, No. 2, pp. 143-173, 1990.
- 3) Becker, G. S.: Crime and punishment: an economic approach, *Journal of Political Economy*, 76, pp. 169-217, 1968.
- 4) Scholz, J. T.: Cooperation, deterrence, and the ecology of regulatory enforcement, *Law and Society Review*, vol. 18, no. 2, pp. 179-224, 1984a.
- 5) Scholz, J. T.: Voluntary compliance and regulatory enforcement, *Law and Policy*, Vol. 6, pp. 385-404, 1984b.
- 6) Scholz, J. T.: Cooperative regulatory enforcement and the politics of administrative effectiveness, *American Political Science Review*, Vol. 85, No. 1, pp. 115-136, 1991.

- 7) Fukuyama, K., Kilgour, D. M., and Hipel, K. W.: Systematic policy development to ensure compliance to environmental regulations, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 24, No. 9, pp. 1289-1305, 1994b.
- 8) Fukuyama, K., Kilgour, D. M. and Hipel, K. W.: A policy for inducing compliance to environmental regulations, in K. W. Hipel and L. Fang (eds.), *Effective Environmental Management for Sustainable Development*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 29-42, 1994a.
- 9) Friedman, J. E.: *Game Theory with Applications to Economics*, New York, Oxford University Press, 1986.
- 10) Axelrod, R.: *The Evolution of Cooperation*, New York, Basic Books, 1984.
- 11) Radner, R.: Repeated principal-agent games with discounting, *Econometrica*, Vol. 53, No. 5, pp. 1173-1199, 1985.

