

地球環境問題における国際協力の効果の検証

02501750 東京大学 * 藤田敏之 FUJITA Toshiyuki

01501020 東京大学 伏見正則 FUSHIMI Masanori

1 はじめに

地球環境問題の解決のためには国際協力が不可欠であるが、現在多くの問題について汚染物質削減のための協力態勢は整っておらず、むしろ国家間の対立が表面化している。先進国は途上国が今後経済成長を遂げることによって地球規模の環境が悪化することを恐れているが、そのために先進国が途上国に対して成長を抑制すべきだという態度で交渉するのは不合理であるし、そういう態度に基づく国際協定が合意に達するのは困難であろう。重要なのは、先進国が汚染物質削減に関する援助を行い、途上国の発展過程を環境保全的なものにするることである。

これまで環境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とその削減の費用便益分析がなされ、汚染物質の最適管理方法が理論的に求められてきた。しかし地球環境問題を扱う場合、意思決定をする主体が複数となるので、ゲーム理論を適用して各主体の決定の戦略的要素やその相互の外部性を考慮することが必要となる。環境への対策は、「囚人のジレンマ」に類似した状況にあり、どの国も単独で対策をとろうとしない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この状況を打破することが望まれる。

本研究では、地球環境問題についての動的ゲームモデルをつくり、その非協力均衡解が技術援助、経済援助といった国際協力によっていかに変化するかを検証する。このゲームのプレイヤーは国、戦略は各期の汚染物質の削減率であり、そしてプレイヤーは戦略に応じたコストを受けることを仮定する。またこのゲームを協力ゲームとしたときのパレート効率的な解を求め、非協力の場合の均衡解と比較する。

2 地球環境モデル

以下考えるのは、非対称な n 人のプレイヤーによる非零和、非協力ゲームである。時間 t を離散的に

とる。ゲームのプレイヤーは各国または地域である。第 i 国の時刻 t における汚染物質の粗排出量を $E_i(t)$ とおき、削減率を $a_i(t)$ ($0 \leq a_i(t) \leq 1$) とする。ここでは毎期の削減率をプレイヤーの戦略とする。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。次に状態変数として汚染物質の大気中蓄積量を取り、 $M(t)$ とおく。 $M(t)$ が

$$M(t+1) = (1-\delta)M(t) + \mu \sum_{i=1}^n (1-a_i(t))E_i(t) \quad (1)$$

という式をみたすことを仮定する。ここで δ は大気中の汚染物質が吸収される割合、 μ は排出された汚染物質の中で大気中に入る割合である。汚染による第 i 国へのダメージは、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。ここで関数 $C_i(\cdot)$, $D_i(\cdot)$ はともに連続、単調増加で厳密に凸関数であるとする。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 $Y_i(t)$ との比率によって表されているものとする。

以上により、最小化すべき第 i 国の目的関数は

$$J^i(a_1, \dots, a_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t Y_i(t) \{C_i(a_i(t)) + D_i(M(t))\} \quad (2)$$

となる。ここで a_i は第 i 国の各期の削減率をならべたベクトル、 T はゲームの終端となる時刻、 ρ は割引を表すパラメーターである。

動的ゲームの Nash 均衡解はゲームの情報構造によって分類されるが、以下ではプレイヤーが各時点において状態変数(汚染物質蓄積量)の値 $M(t)$ を観測し、それをもとに戦略を決定するときの均衡であるフィードバック均衡 [1] を求め、それを基準ケースでの解と呼ぶ。

次に国際協力を行う場合を考える。ここではある国が技術を提供して他の国の削減の一部を負担する

技術援助ケース、および他の国の削減コストの一部を支払う経済援助ケースを取り扱う。このとき第 i 国の目的関数は、技術援助ケースでは

$$J^i(a_1, \dots, a_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t Y_i(t) \{ C_i(\sum_{j=1}^n h_{ij} a_j(t)) + D_i(M(t)) \}, \quad (3)$$

経済援助ケースでは

$$J^i(a_1, \dots, a_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t \{ \sum_{j=1}^n h_{ij} Y_j(t) C_j(a_j(t)) + Y_i(t) D_i(M(t)) \} \quad (4)$$

となる。上式の h_{ij} は、第 j 国の汚染物質削減の中で第 i 国が負担する割合である。ここで $\sum_{i=1}^n h_{ij} = 1$ という条件をおく。これらのケースでの解を、非協力ゲームのフィードバック均衡として計算する。

最後に、すべての国が協力して削減を行う場合のバレート効率的な解は

$$(\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n) = \arg \min \{ \sum_{i=1}^n \alpha_i J^i(a_1, \dots, a_n) \} \quad (5)$$

をみたく $(\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n)$ として求められる。この解を各ケースでの協力学と呼ぶことにする。ここで α_i は重みパラメーターであり、 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ をみたく。各ケースの均衡における各国の目的関数の値が、この協力学での値にどれだけ近づくかに注目する。

3 地球温暖化問題への適用

以上紹介したモデルをもとに実際の問題についてシミュレーションを行う。ここでは地球温暖化問題をとりあげる。つまり汚染物質は温室効果ガスであり、ダメージは平均気温の上昇にともなう気候変動によるものである。地域数は簡単のため 2 とし、地域 1 を先進国地域、地域 2 を途上国地域とする。時間 t は 1 年刻みで、1990 年を基準年とする。さらに温室効果ガスの削減コスト、温暖化によるダメージは、以下の関係式で表されることを仮定する [2][3]。

$$C_i(a_i) = c_i a_i^3, \quad (6)$$

$$D_i(M) = d_i \{ M - M(0) \}^2. \quad (7)$$

各パラメーターの値も [2][3] にならって $\delta = 0.004$, $\mu = 0.64$, $\rho = 0.96$, $c_1 = 0.06$, $c_2 = 0.16$, $d_1 =$

$6.53 \times 10^{-26} [t^{-2}]$, $d_2 = 1.09 \times 10^{-25} [t^{-2}]$ とおく。 $Y_i(t)$, $E_i(t)$ は外生的に与え、その成長率は徐々に低下するものとする。援助ケースにおいては、 $h_{11} = 1$, $h_{21} = 0$ とし、 h_{12} にさまざまな値をとらせた。

以上の前提をもとに、 $T = 60$ [年] とした長期的なシミュレーションによって均衡解、協力学における目的関数の値を求めた結果を表 1 に示す。ここで 2 つの援助ケースの均衡解では、 $J^1 + J^2$ が最小値をとるときの結果、そして協力学では $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ とおいたときの結果を示す。

表 1: 各ケースでの目的関数の値 [単位 兆ドル]

ケース	J^1	J^2	計
基準ケース (均衡)	4.08	2.47	6.55
(協力)	3.71	2.56	6.27
技術援助ケース (均衡)	3.42	1.94	5.36
(協力)	3.34	1.96	5.29
経済援助ケース (均衡)	3.96	2.38	6.34
(協力)	3.99	2.28	6.27
削減なし	5.44	3.98	9.42

表 1 より、先進国から途上国への適切な技術援助によって世界全体の長期的な損失 ($J^1 + J^2$) が基準ケースに比べて 2 割ほど低減し、協力学での値にも十分近づいていることがわかる。この協力学での平均削減率は先進国地域で 18%、途上国地域で 31% であり、国際会議で提唱されているような大きな削減率は必要とされない。一方経済援助の効果は小さく、経済的な援助だけでは途上国の削減の自発的な増加は望めないことが示された。また基準ケース、技術援助ケースの協力学では途上国の損失が均衡解よりも増加しているため、先進国からの別払いの譲渡が必要である。経済援助ケースの協力学では、逆に途上国からの別払いが必要である。

今後は資本の蓄積といった要素を取り入れ、モデルをさらに現実的なものにしていく予定である。

参考文献

- [1] Başar, T., G.J. Olsder(1982), *Dynamic Non-cooperative Game Theory*, Academic Press.
- [2] Burniaux, J. et al. (1992), "The Cost of Reducing CO₂ Emissions: Evidence from GREEN," Working Paper No.115, OECD.
- [3] Nordhaus, W.D.(1994), *Managing the Global Commons*, MIT Press.