環境汚染軽減技術の導入タイミングに関する意思決定問題

玉置　哲也[1]

[1]正会員 香川大学准教授 創造工学部 創造工学科（〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20）
E-mail: tamaki.tetsuya@kagawa-u.ac.jp

地球温暖化をはじめとする環境問題は，しばしば企業の生産能力に悪影響をもたらす．外部環境自体の改善を行うことが企業にとって利潤となる場合，その企業は環境汚染を改善する技術への投資インセンティブが高まると考えられる．これまで企業の利潤最大化に向けた革新技術の導入タイミングについては研究が行われてきたものの，多くの場合が生産技術にかかわるものであり，環境負荷軽減による間接的な生産性向上に対する投資については分析されていない．そこで本研究は，現行技術では環境汚染が進行しうる状況下において，どのようなタイミングで環境汚染軽減新技術を導入すべきか数理モデルを構築し分析を行う．

Key Words: *technological change, environment pollution, adoption timing, uncertainty*

1. はじめに

地球温暖化をはじめとした多くの環境問題が喫急の課題として挙げられる．近年においても環境への負荷を全く生じない技術はまれであり，生産や使用によって二酸化炭素など自然環境に悪影響をもたらす廃棄物の流出が懸念されている．こうした廃棄物による自然環境の悪化はしばしば人々の生活にリスクをもたらす．一方で，企業の社会的責任（CSR : Corporate Social Responsibility）や ESG 投資といった考え方が国際的に認知されている現在，企業にとっても自然環境や次世代への配慮を念頭においた生産活動をするインセンティブが高まっている．環境にやさしい技術の導入はこうした CSR や ESG への対応としてだけではなく，自然環境の悪化を防ぐまたは軽減することで生産効率の悪化を防ぐ効果も期待できるであろう．例えば，二酸化炭素の排出によって地球温暖化が加速することで，企業は様々なリスクに備える必要が生じる．もし，二酸化炭素の排出を抑える技術を導入できれば，わずかかもしれないが温暖化の加速を軽減出来るであろう．ただし，こうした新技術は日進月歩であり，どのタイミングで新技術を導入するかは企業にとって重要な意思決定となろう．

新技術の導入を数理モデルとして表現した研究として Farzin et al.[1] がある．この研究では，技術革新の生じるタイミングおよび技術革新の程度が不確実である場合，どのタイミングで新技術に更新を行うべきか分析するモデルを動的計画法の枠組みで構築している．Doraszelski[2] は Farzin et al.[1] をもとに，技術更新を革新的なものと修繕や改善による軽微なものに区別した分析モデルを提案している．しかし，これらの研究において技術は生産力の向上に直接作用するものであり，環境汚染を軽減させるような技術とは一線を期すものである．環境汚染を軽減する技術の場合，直接的な生産力の向上よりも，環境改善（もしくは維持）によってもたらされる間接的な影響が企業の収益に反映されるであろう．技術への投資に関する研究の中でも Kort et al.[3] は環境リスクによる不確実な被害を防ぐための投資に関する意思決定問題として，リアルオプションアプローチを試みている．

本研究では環境汚染が生産に影響をもたらす状況下において，環境汚染技術の導入タイミングに焦点を当てる．生産規模が縮小する中で投資か撤退を分析するモデルはあるものの[4]，生産規模の縮小に起因する環境の改善に着目している研究はほとんどない．このような環境改善への投資に対して，動的計画法を用いた意思決定モデルを提案する．

2. モデル

本モデルでは環境汚染改善技術の導入タイミングに着目し，有限離散期間モデルとする．ここで想定する企業は同質財を生産する完全競争企業とする．n 期（$n = 0, 1, 2, \cdots, N$）における生産関数として以下を想定する．

$$h(v_n, E_n) = E_n v_n^a \tag{1}$$

n 期におけるインプットを v_n，環境レベルを E_n とする．a は投入に対する生産を決定するパラメータであ

る．n 期において採用している環境汚染軽減技術水準を θ_0 とし，新しい技術への更新を試みる．この技術は生産活動に伴う環境汚染の程度を示すものであり，環境レベル E_n は水準の低い技術を用いて生産を行うことで徐々に悪化（E_n が減少）するが，水準の高い技術に変更することで，環境レベルの悪化速度を抑える（または止める）ことができる状況を想定する．つまり，0 期における環境レベルを E_0 としたとき，技術 θ に対する環境負荷を $\delta(\theta)$ とすると，

$$E_{n+1} - E_n = -\delta(\theta)E_n \tag{2}$$

と表される．ここで $\delta(\theta) \geq 0$, $\frac{\partial \delta}{\partial \theta} \leq 0$ とする．新技術に更新する際には投資コストとして I が生じる．本モデルでは技術水準や時期によらず投資コストは一定であると仮定する．

次に n 期における収益について考える．0 期において技術水準が θ_0，環境レベルが E_0 であり，その技術を使い続けたときの n 期における収益を $f_n(E_0, \theta_0)$ とする．インプットの単位価格を w，生産物の単位価格を p とし，企業は毎期利潤最大化するための行動をとるとすると，

$$f_n(E_0, \theta_0) = \max_{v_n} \left(pE_n v_n^a - wv_n\right) \tag{3}$$

より，

$$v_n = \left(\frac{apE_n}{w}\right)^{\frac{1}{1-a}} \tag{4}$$

となる．したがって，

$$\begin{aligned} f_n(E_0, \theta_0) &= pE_n \left(\frac{apE_n}{w}\right)^{\frac{a}{1-a}} - w\left(\frac{apE_n}{w}\right)^{\frac{1}{1-a}} \\ &= (1-a)\left(\frac{a}{w}\right)^{\frac{a}{1-a}} p^{\frac{1}{1-a}} (E_n)^{\frac{1}{1-a}} \\ &= \varphi(E_n)^b \end{aligned} \tag{5}$$

となり，$\varphi = (1-a)\left(\frac{a}{w}\right)^{\frac{a}{1-a}} p^{\frac{1}{1-a}}$，$b = \frac{1}{1-a}$ である．したがって，k 期において技術新技術 θ_1 に更新した場合，n 期における profit は $f_n(E_k, \theta_1)$ と表すことができ，つまり，

$$\begin{aligned} f_n(E_k, \theta_1) &= \varphi {E_k}^b [(1-\delta(\theta_1))]^{b(n-k)} \\ &= [(1-\delta(\theta_1))]^{b(n-k)} f_k(E_0, \theta_0) \end{aligned} \tag{6}$$

となる．

次に技術革新について考えよう．技術革新は各期のはじめに確率 q で前の期までの最新技術よりも u 大きい技術が開発されるが，$1-q$ の確率で技術革新は起こらないものとする．また，u は一様分布 $U(0, \bar{u})$ に従うものとする．n 期において採用可能な環境技術を $\theta(n)$ とし，1 期間での変化量を $d\theta(n)$ で表わすとすると，

$$d\theta(n) = \begin{cases} u & \text{with probability} \lambda \\ 0 & \text{with probability} 1-\lambda \end{cases} \tag{7}$$

$$\theta(0) = \theta_0 \tag{8}$$

であり，つまり，n 期までに生じた技術革新の回数を確率変数 $I(n)$ と表わすとき，n 期における採用可能な環境技術 $\theta(n)$ は，

$$\theta(n) = \theta_0 + \sum_{j=0}^{I(n)} u_j \tag{9}$$

とかける．

技術更新が一度きりのモデルにおいては，企業は毎期，採用できる最新技術の水準を確認したうえで，その環境技術への投資を見送りもっと高い水準に達するまで現状の技術水準のまま待つか，投資をすることで最新の技術に更新して，それ以降その技術水準で最後まで生産を行うか決定する．つまり，一度きりの技術更新の場合，技術更新後に得られる利得は確定的となる．したがって，k 期に環境レベルが E_k であったときに技術水準 θ_1 の技術を採用したときの n（$\geq k$）期時点における企業の価値 $V(n, \theta_1 | k, E_k)$ は，時間選好割引率 r を用いて，

$$\begin{aligned} V(n, \theta_1 | k, E_k) &= \sum_{i=0}^{\infty} f_{n+i}(E_k, \theta_1)(1-r)^i \\ &= \frac{f_k(E_0, \theta_0)[(1-\delta(\theta_1))]^{b(n-k)}}{1-(1-\delta(\theta_1))(1-r)} \end{aligned} \tag{10}$$

と表される．

以上より，k 期の開始時において，採用している技術が θ_0 であり，採用可能な技術が $\theta(k) = \theta$ が達しているときに得られる最大利得を $F_k(\theta|\theta_0)$ とすると，次の再帰方程式が得られる．

$$\begin{aligned} F_k(\theta|\theta_0) = \lambda \int_0^{\bar{u}} \Big(&\max\big[V(0, \theta+u|k, E_k) - I, \\ &f_k(E_0, \theta_0) + rF_{k+1}(\theta+u|\theta_0)\big]\Big)\frac{du}{\bar{u}} \\ &+(1-\lambda)\Big(f_k(E_0, \theta_0) + rF_{k+1}(\theta|\theta_0)\Big) \\ &(1 \leq k < N) \end{aligned} \tag{11}$$

境界条件は $F_{N+1}(\theta|\theta_0) = 0$ とすればよいので，

$$\begin{aligned} F_N(\theta|\theta_0) = \lambda \int_0^{\bar{u}} \Big(&\max\big[V(0, \theta+u|N, E_N) - I, \\ &f_N(E_0, \theta_0)\big]\Big)\frac{du}{\bar{u}} + (1-\lambda) f_N(E_0, \theta_0) \end{aligned} \tag{12}$$

となる．数値計算例は発表時に示す．

謝辞: 本研究は JSPS 科研費（23K04077）の助成を受けたものです．

参考文献

1) Farzin, Y. H., Huisman, K. J., and Kort, P. M.: Optimal timing of technology adoption, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.22, No.5, pp.779–799, 1998.
2) Doraszelski, U.: Innovations, improvements, and the optimal adoption of new technologies, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.28, No.7, pp.1461–1480, 2004.
3) Kort, P., Lavrutich, M., Nunes, C., and Oliveira, C.: Preventing environmental disasters in investment under uncertainty, *Environmental and Resource Economics*, pp. 1–22, 2021.
4) Kwon, H. D.: Invest or exit? optimal decisions in the face of a declining profit stream, *Operations Research*, Vol.58, No.3, pp.638–649, 2010.