

## セルオートマトン・モデルによる技術進化プロセス

その他のタイトル	Patterns of Technological Evolution in a Model Based on Cellular Automata
著者	荒木 孝治
雑誌名	関西大学商學論集
巻	41
号	3-4
ページ	177-186
発行年	1996-10-25
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10112/00019262">http://hdl.handle.net/10112/00019262</a>

# セルオートマトン・モデルによる 技術進化プロセス<sup>1)</sup>

荒木孝治

## 1. はじめに

二つ以上の技術が市場に存在するとき、それらは生存をかけて他の技術と競争することになる。同種の製品を生産するための異なった技術が同一の市場を開拓するとき、あるいは、ある既存の市場に新しい技術が参入するとき、その競争状況が発生する。この競争のプロセスでは新しい技術が既存の技術にとってかわる、または複数の技術が自らに適した環境(ニッチ)を見いだして共存状態に収束する、といったさまざまなパターンのダイナミクスが生み出される。現在、このプロセスを進化という視点から分析する数理的な理論枠が社会科学のなかで生まれつつある。その分析アプローチには、大きく分けて、微分方程式モデルによるものと、セルオートマトン・モデルによるものが存在する。

技術間競争のプロセスにおいて、ある技術が需要をよりよく満足しうるならばその技術は他の技術を完全に代替することになるだろう。市場において異なったニッチを形成することにより各技術が共存する状況が生じることもある。一つの技術が市場を独占する例、たとえばキーボードのキー

---

1) 本稿は、1994年度関西大学在外研究による成果の一部です。在外研究の機会を与えていただいた関西大学とトロント大学に深く感謝いたします。

配置ではいわゆる QWERTY 方式が市場を完全に独占している。ビデオテープレコーダー (VTR) の世界では VHS 規格がベータ規格を駆逐した。しかし、一つの技術や製品が完全に市場を独占する状況はそう多くない。多くの発展途上国ではカラーテレビと白黒テレビが市場に異なったニッチを形成して互いに共存している。パーソナルコンピュータの基本ソフトウェアであるオペレーティングシステム (OS) においても、現在、ウィンドウズ系・Unix 系・Mac 系が共存している状態である。こういったニッチ形成は経済的な理由やその他の理由による (Arthur (1989))。

このニッチ形成のプロセスを数理生態学的な競争の文脈で説明しようという試みがある。そこでは生物学でいう“種 (species)”として技術をとらえ、二つ以上の競争種が生存をかけて共通の資源を争うというアナロジーを行う。共通の資源を争う状況では生物種のいくつかが消滅する結果になる可能性が高い。資源をよりよく利用できるものは優位となり、他のものを駆逐する。もし必要とする資源がそれほど重なっていたならば両者は共存できる。

これらのプロセスを時間の流れの中で記述するツールとしてロトカ・ボルテラ (Lotka-Volterra) 競争システムがよく用いられる。それは次の微分方程式系で記述できる (巖佐 (1990), Dolan et al. (1986) 参照)。

$$dx/dt = r_1 x (1 - (x + ay)/K_1)$$

$$dy/dt = r_2 y (1 - (bx + y)/K_2)$$

$x$  と  $y$  は二つの種の集団の大きさであり、 $a$  と  $b$  は各“種”が他の種に対して与える影響の強さの尺度、 $K_i$  ( $i = 1, 2$ ) は環境収容力 (相互作用がないときに種が成長できる最大レベル)、 $r_i$  は内的自然増加率である。微分方程式モデルを離散時間として表現するものが差分方程式系である。

微分方程式モデルでは技術を受容する個体 (潜在的受容者) の市場における空間的な配置を分析視点としてとりいれることができない。これを可能にするものがセルオートマトンによるモデル化である。Bhargava and Mukherjee (1994) は、市場において個体が技術や製品を採用するプロセ

ス、特にそれらのニッチ形成の進化の分析をセルオートマトン・モデルに基づいたシミュレーションによって行った。本稿ではそのモデルを一部拡張することを考える。

## 2. 技術間競争セルオートマトン・モデル

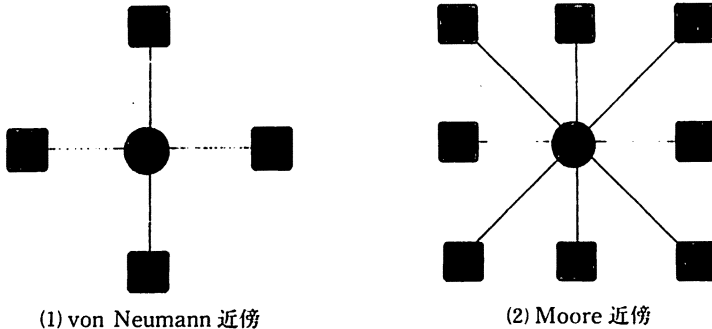
### 2.1 セルオートマトン

セルオートマトン (Cellular Automata ; CA) は離散的な空間・時間・状態によって特徴づけられる数学的なシステムであり、さまざまな物理現象や生物現象のモデル化に用いられてきた (たとえば Gaylord and Welin (1995) 参照)。Conway によって創造されたライフゲームを研究対象として含む人工生命はその最も代表的なものである (Langton (1994) 参照)。最近では社会科学における集合現象の分析にも用いられるようになってきた。例えば、セルオートマトンと囚人のジレンマ・ゲームを組み合わせて協調と裏切りの進化プロセスを研究する分野がある (たとえば Nowak and May (1992) 参照)。

セルオートマトンでは有限次元の格子で区切られたセルの行列から構成される進化の場を考える。任意の時刻において各セルはある有限集合から構成される状態空間の値をとる。ある時刻におけるセルの状態は、一つ前の時刻 (離散時間を考えているので一定の時間ステップ前) におけるそのセルの状態と近傍のセルの状態に対して、遷移ルールとよばれる規則を適用することにより決定される。遷移ルールは決定論的であっても確率論的であってもよい。そして通常、全てのセルは同時に次の状態へと移行する。近傍の考え方にはいろいろあるが、代表的なものは図 1 に示す von Neumann 近傍および Moore 近傍である。

### 2.2 Bhargava and Mukherjee モデル

ある市場をセルの行列であらわす。そしてその市場に二つの技術 (A お



(1) von Neumann 近傍

(2) Moore 近傍

図 1. 近傍の例 (セル●に対してセル■が近傍)

よびB)が存在するとする。一つのセルが二つの技術の(潜在的)採用者にあたると考える。セルの状態が-1のとき技術Aの採用を,+1のとき技術Bの採用を,空のセル(0とする)は潜在的な採用者を示すとしてしよう。セルの行には添え字*i*を,列には添え字*j*を与え,市場における位置をあらわす。時刻*t*における第(*i*,*j*)セルの状態を $n(i, j, t)$ と記す。

Bhargava and Mukherjee (1994)は,市場において個体が製品や技術を採用する際,その個体が相互作用する近傍のセルの状態に影響を受けるとした。具体的には,次の時刻におけるセルの状態はその近傍のセルの状態およびそれらの数に依存するとする。その影響の受け方には,①二つの技術を採用している近傍のセルの数,および②相互作用を通じて近傍のセルが影響を与える強さ,の二つを考える。彼らは近傍を,直近の近傍(いわゆる Moore 近傍部分)とそれよりも遠い2次的な近傍(Moore 近傍の外側の16個のセルから構成される部分)の2層に分け(図2参照。以下この近傍をBM近傍と呼ぶ),直近の近傍の方が注目するセルに対して与える影響が強いと考える。

具体的には次のようにする。時刻*t*において技術Aを採用している第(*i*,*j*)セルの近傍のセルの数 $v_-(i, j, t)$ ,および技術Bを採用している近傍のセルの数 $v_+(i, j, t)$ (以下,これらをまとめて $v_{\pm}(i, j, t)$ とあらわす)を考える。このとき相互作用の効果を確率的に取り扱う。具体的には,0と1の間の値を取る確率変数 $\eta$ を考え,この値があるパラメータ $\chi$ の値

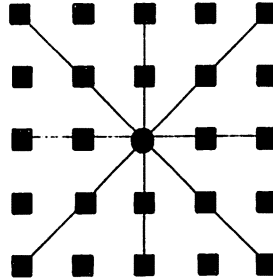


図 2. Bhargava and Mukherjee の近傍 (BM 近傍)

を超えるとき、すなわち  $\eta > \chi$  のとき Moore 近傍における各 8 つのセルの影響を考慮し、そうでないときは無視する。さらに、16個のセルからなる 2 次の近傍の各セルの影響を、 $\eta > \sqrt{\chi}$  のときのみ考慮する。これらを式で表現すると、

$$v_{\pm}(i, j, t) = \sum_{\substack{|i'-i|=1, |j'-j| \leq 1 \\ \text{or } |i'-i| < 1, |j'-j| = 1}} \theta(\pm n(i', j', t)) + \sum_{\substack{|i'-i|=2, |j'-j| \leq 2 \\ \text{or } |i'-i| < 2, |j'-j| = 2}} \theta(\pm n(i', j', t))$$

ただし、

$$\theta(x) = 1, x > 0, = 0, x \leq 0$$

となる。 $v_{\pm}(i, j, t)$  の最初の項は 1 次の近傍における注目するセルに影響を与えている二つの技術の各採用者数をあらわし、2 番目の項は 2 次の近傍のセルにおけるその数をあらわしている。各セル  $(i', j')$  に対して  $\eta$  を発生させて  $v_{\pm}$  を求めていることに注意。

時刻  $t$  における近傍のセルの状態が決定されたとき、時刻  $t+1$  における全てのセルの状態は次に示す遷移ルールから同時に決定される。

### Bhargava and Mukherjee の遷移ルール

1. 慣習ルール：もしセルが、二つのタイプの近傍のセルを高々 1 つしか持たないとき、その状態は次の時点でも変化しない。つまり、孤立した潜在的採用者は新しい技術を採用しないとするわけである。
2. 順応ルール：二つのタイプの異なった数の近傍のセルを持つセルは多数の採用者を持つ技術を採用する(または他の技術に乗り換える)。ただし、1 対 0 の場合は慣習ルールを優先的に適用する。

3. 競争優位ルール：ルール 1 および 2 が適用できないとき、すなわち、二つのタイプの採用者が同数 ( $\geq 2$ ) いる場合に適用する。あるパラメータ  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ ) を導入し、これが二つの技術間の競争優位性を決定するようにする。新しい確率変数  $\eta' \in [0, 1]$  を発生させ、それと  $\rho$  とを比較する。 $\eta' > \rho$  のとき次の時刻におけるセルの状態を +1 とし、 $\eta' \leq \rho$  のとき -1 とする。よって  $\rho = 0.5$  のとき二つの技術は対等となる。 $\rho$  の値を 0.5 からずらすことにより片方の技術に優位性を与え、その成長を偏らせることができる。

このルールを数式で表現すると次のようになる。セル  $(i, j)$  の時刻  $t+1$  における状態  $n(i, j, t+1)$  は

$$n(i, j, t+1) = \begin{cases} n(i, j, t) & \text{if } v_{\pm}(i, j, t) \leq 1, v_{-}(i, j, t) \leq 1 \\ \pm 1 & \text{if } v_{\pm}(i, j, t) > v_{\pm}(i, j, t) \\ 2\theta(\eta' - \rho) - 1 & \text{if } v_{+}(i, j, t) = v_{-}(i, j, t) > 1 \end{cases}$$

と決定される。

### 2.3 修正モデル

Bhargava and Mukherjee (1994) は、100行100列の計10000個のセルの集まりで市場を表現し、初期配置として同数の技術A採用者と技術B採用者をランダムに配置した12×12のセルの集まりをその市場の中心に設定した(12×12以外の残りのセルはすべて未採用者)。本稿ではシミュレーションの時間を節約するためにセルの数を縮小し、60×60の市場に対して12×12の初期配置を中央に考える。Bhargava and Mukherjee (1994) は市場の周辺部までにニッチが成長するシミュレーションを行っていない(または報告していない)ので市場全体のセルのサイズの縮小は本質的ではない。また彼らは、 $\chi$  には二つの値(0.82, 0.92)を、 $\rho$  には3つの値( $\chi = 0.82$ に対して0.2, 0.5, 0.8;  $\chi = 0.92$ に対して0.0, 0.5, 1.0)を与え、それらパラメータ値の組合せに対してコンピュータシミュレーションを行っ

だが、 $\chi$  の値の効果に関しては彼らの結果より明白なので、ここでは  $\chi = 0.82$  に固定する。近傍には Moore 近傍を採用する。

モデルの修正としては以下を考える。慣習ルールに関して、すでにある技術を採用している者が異なった技術に乗り換えることは、技術の未採用者が新しく技術を採用することよりも困難であると考えの方がモデルとしては現実的であろう。しかし Bhargava and Mukherjee (1994) では近傍からの影響  $v_{\pm}(i, j, t)$  を計算する際、自己の状態をカウントしないためこの効果を考慮しない。そこで  $v_{\pm}(i, j, t)$  の定義を次のように変更する。

$$v_{\pm}(i, j, t) = \theta(\pm n(i, j, t)) + \sum_{\substack{|i'-i|=1, |j'-j| \leq 1 \\ \text{or} \\ |i'-i| \leq 1, |j'-j|=1}} \theta(\eta - \chi) \theta(\pm n(i', j', t))$$

ここで、Moore 近傍を採用していること、自己の状態が +1 または -1 ならば必ず 1 としてカウントされること、また、技術の未採用者についてはそのセルの状態はカウントされないことに注意。

次に、彼らのシミュレーションにおいて技術間の競争優位性を決定するパラメータである  $\rho$  の値は時間  $t$  に依存しない形で固定されている。競争優位ルールにおいてパラメータ  $\rho$  の値を近傍の状況に応じて、時間に依存した形で定めてみたい。そのために Moore 近傍のさらに一つ外側のセルを考え、その領域における技術 A の採用者数  $n_-$  と技術 B の採用者数  $n_+$  を求め、 $\rho' = n_- / (n_- + n_+)$  (ただし、 $n_- + n_+ = 0$  のときは、 $\rho' = 0.5$ ) とする。これは技術の採用を考える場合、両技術の影響が等しいときは直接インタラクトする近傍よりもうすこし大きな地域情報といった事柄が技術の採用に影響を与えることをシミュレーションに取り入れることを目的とする。市場全体での  $n_-$  および  $n_+$  を考えることもできるが、ここではローカルな状況で決定されるパラメータを考えたい。また、近傍の取り方がニッチ形成のスピードに与える影響を調べるために BM 近傍に対して小さな近傍 (Moore 近傍) を考えてみる。

本稿ではこれらの修正モデルのもとで技術進化のプロセスにおいてどう



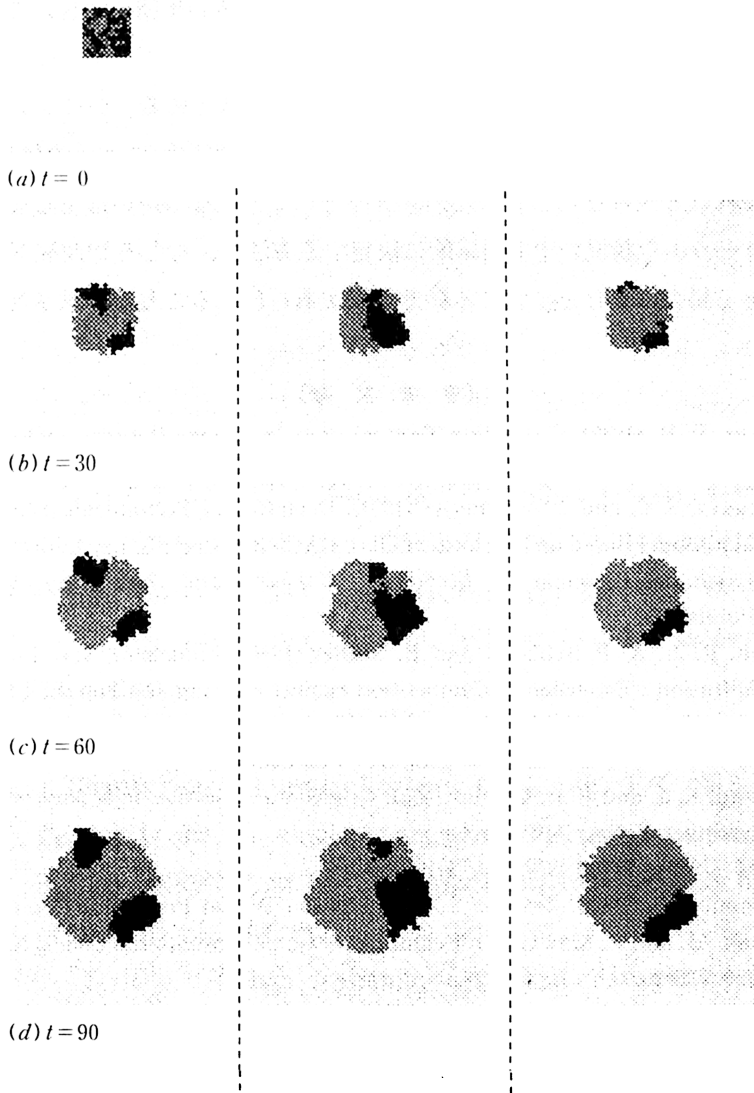
いった空間的なダイナミクスが生じるかを調べてみる。

### 3. 結 果

Bhargava and Mukherjee (1994) は次の三つの主要なシミュレーション結果を報告した。第一に、 $\chi$  と  $\rho$  のすべての値と市場の大きさに対して市場が分化する現象を観察できる。12×12のセルのどんな初期配置に対しても二つの技術の既受容者はある期間の後、独自の領域を空間的に開拓するわけである。第二に、ニッチの成長と形成は相互作用の影響度を決定するパラメータ  $\chi$  に依存する。 $\chi$  の値が大きいときニッチの形成は遅くなる。それは、近傍のセルとの相互作用の効果がカウントされにくくなるために潜在的受容者の採択の確率が低くなるからである。これは競争が激しく、技術が互いに牽制しあう状況に対応する。第三に、 $\rho$  の導入により二つの技術の成長にはバイアスが生じる。このことは、うまくマーケットを開発した技術は他のものより大きくニッチを成長させるということを示している。

これらに対して、我々のシミュレーションでは次のようなことがわかった(一例を図3に示す)。いくつかの初期配置に対してもやはり市場分化の現象が生じた。また、BM近傍と Moore 近傍の結果の比較から、セルがインタラクトする領域の大小により、各技術の市場開拓のスピードが異なることがわかる。インタラクトする領域が大きければ大きいほどそのスピードは早くなる。これは、領域の効果は確率的にあらわれるが、その考える領域が大きいほどその地域で採用されている技術の数の違いを平均的に明確に把握することができるためであると考えられる。

図3の I と II の比較により、技術の既受容者か未受容者かという自己の状態の違いがダイナミクスに与える影響を見ることができる。余り明確ではないが、自己の状態を考慮する慣習ルールを技術の既受容者に対して強めることにより、既受容者のコロニー内でのニッチ形成のスピードが遅く



I :  $\rho'$  と  $v'_\pm(i, j, t)$  モデル    II :  $\rho$  と  $v'_\pm(i, j, t)$  モデル    III :  $\rho$  と  $v_2(i, j, t)$  モデル

図 3. 12×12のランダムな初期配置((a)  $t = 0$  は各モデル共通)からの進化プロセス例 (Moore 近傍;  $\chi = 0.82$ ).

なることがわかる。これは、一度、一つの技術を受容するとその技術に慣性が発生し、他の技術に乗り換えることが困難になるためであると考えられる。当然のことながら、市場開発全体（既受容者の集団の成長）のスピード自体に変化はない。

$\rho$  の決定の仕方の効果は I と III の比較により可能である。シミュレーションでは基本的に  $\rho=0.5$  から出発しているため、平均的には  $\rho$  の値は 0.5 からそれほどずれない。そのため、全体として大きなちがいは生じない。 $\rho$  をローカルな状況の中で適応的に決定する方法は、むしろ初期配置に偏りがある場合にそれを拡大する形で効果があらわれることが予想される。

#### 【参 考 文 献】

- Arthur, W.B. (1989). Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by Historical Events. *The Economic Journal*, 99, 116-131.
- Bhargava, S. C. and A. Mukherjee (1994). Evolution of Technological Growth in a Model Based on Stochastic Cellular Automata. in : L. Leydesdorff and P. van den Besselaar eds. *Evolutionary Economics and Chaos Theory*. Pinter Publishers.
- Dolan, R. J., A. P. Jeuland, and E. Muller (1986). Models of New Product Diffusion : Extension to Competition against Existing and Potential Firms over Time. in : V. Mahajan and Y. Wind eds. *Innovation Diffusion Models of New Product Acceptance*. Ballinger Publishing Company.
- Gaylord, R. J. and P. R. Wellin (1995). *Computer Simulations with Mathematica*. Springer-Verlag Publishers.
- 巖佐庸 (1990). 数理生物学入門. HBJ 出版局.
- Langton, C. G. (1994). *Artificial Life III*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Nowak, M. and R. May (1992). Evolutionary Games and Spatial Chaos. *Nature* 359, 826-29.