

## 経済成長の進化モデル\*

経営学輪講 Nelson and Winter (1982), Chapters 8, 9

Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). Neoclassical growth theory: A critique (chap. 8, pp. 195–205). An evolutionary model of economic growth (chap. 9, pp. 206–233). In R. Nelson & S. G. Winter, *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press.

若林 隆久<sup>†</sup>・岡本 伊織<sup>‡</sup>・氷熊 大輝<sup>§</sup>

要約：新古典派成長理論は経済成長の重要な要因である技術変化をうまく取り扱えていないことを指摘し、進化的アプローチに基づいたシミュレーション・モデルを構築する。各企業が生産コスト低減のためのイノベーションを行うモデルは Solow (1957) が利用した米国のマクロデータによく似た時系列データを生成する。経済成長の進化モデルは、(A) 企業の意思決定についての実証研究と整合的であり、(B) 技術変化についてのミクロレベルの知見に整合的であると同時に、(C) マクロレベルの経済全体の振る舞いを説明できるという点で新古典派のモデルよりも優れている。

本稿では、Richard R. Nelson と Sidney G. Winter による An Evolutionary Theory of

\* この経営学輪講は Nelson and Winter (1982) の解説と評論を若林・岡本・氷熊が行ったものです。当該論文の忠実な要約ではありませんのでご注意ください。図表も若林・岡本・氷熊が解説のために Nelson and Winter (1982) を元に整理し直したものです。したがって、本稿を引用される場合には、「若林・岡本・氷熊(2010)によれば、Nelson and Winter (1982) は…」あるいは「Nelson and Winter (1982) は (若林, 岡本, 氷熊, 2010)」のように明記されることを推奨いたします。

<sup>†</sup> 東京大学大学院経済学研究科・日本学術振興会特別研究員 DC taka17@deluxe.ocn.ne.jp

<sup>‡</sup> 東京大学経済学部 iori.okmt@gmail.com

<sup>§</sup> 東京大学経済学部 daiki.higuma@gmail.com

Economic Change (邦題：『経済変動の進化理論』)<sup>1</sup> の第 IV 部 “Growth theory” (成長理論) を構成する四章のうち二つの章、第 8 章 “Neoclassical growth theory: A critique” (新古典派成長理論：批判的検討) と第 9 章 “An evolutionary model of economic growth” (経済成長の進化モデル) を取り扱う。第 8 章は Nelson (1973) と Nelson and Winter (1973) を、第 9 章は Nelson and Winter (1974) と Nelson, Winter, and Schuette (1976) をもとにして書かれた章である。

Nelson と Winter は、第 8 章と第 9 章において、経済成長をもたらすひとつの重要な要因である技術変化に焦点をあて、ミクロレベルの企業行動からマクロレベルの経済全体の集計量までを統合的に説明する進化的アプローチに基づいたシミュレーション・モデルを提示する。

まず、第 8 章では経済成長をもたらす重要な要因である技術変化を取り上げ、進化的アプローチに基づいて技術変化を取り扱う必要性を説く。もちろん、Solow (1957) が残差として技術変化を捉えて以来、成長理論の主流をなす新古典派成長理論においても技術変化の重要性は認められてきた。しかし、新古典派成長理論は、(1)イノベーションにともなう不確実性、(2)イノベーションで得た知識の公共的側面、(3)企業の行動や運のばらつき、といった技術変化についてのミクロレベルの知見を説明できていない点で技術変化をうまく取り扱えていない。そこで、進化的アプローチに基づいたモデルの構築が必要となると Nelson と Winter は主張する。

第 9 章では、第 8 章の議論を受けて、ミクロレベルの企業行動からマクロレベルの経済全体の集計量までを統合的に説明する進化的アプローチに基づいたシミュレーション・モデルを構築する。このモデルでは、各企業が生産コスト低減のためのイノベーションを行い、(1)イノベーションにともなう不確実性、(2)イノベーションで得た知識の公共的側面、(3)企業の行動や運のばらつきを含むモデルとなっている。モデルは Solow (1957) が利用した 1909 年から 1949 年にかけての米国のマクロデータによく似た時系列データを生成する。すなわち、経済成長の進化モデルは、(A)企業の意思決定についての実証研究と整合的であり、(B)技術変化についてのミクロレベルの知見に整合的であると同時に、(C)マクロレベルの経済全体の振る舞いを説明できるという点で新古典派のモデルよりも

<sup>1</sup> リチャード・R・ネルソン、シドニー・G・ウィンター (2007) 『経済変動の進化理論』後藤晃、角南篤、田中辰雄 訳、慶應義塾大学出版会。本稿は原著を元に書いており、邦訳と訳や解釈が異なる場合にはその旨を明記した。

優れている。

本稿では、第9章のシミュレーション・モデルを中心に、第8章・第9章の内容の解説を行う。あわせて、Solow (1957) および第9章で行われている、マクロデータを用いた技術指数の推計における誤りを付録Aにて指摘する。

## 1. 第8章 「新古典派成長理論 批判的検討」

### 1.1. 新古典派成長理論

経済成長に関する理論においては、ケインズ理論に基づいたハロッド・ドーマー成長モデル (Harrod-Domar growth model) に代わって 1950 年代後半に登場した新古典派成長理論が主流となっている。そのため、新古典派経済学のツールの性質が、成長理論が説明しなければならない現象へのアプローチに深い影響を与えている。<sup>2</sup>

まず、成長理論が説明しなければならない現象は、生産量、投入量、価格の時間経路、国により異なる経済成長率、同じ国でも時間により異なる成長率、資本労働比率、労働者1人当たり生産量の上昇、利子率を上回る実質賃金の上昇、部門により異なる成長率、部門ごとの成長率の異なり方のパターンの時間変化、相対的な生産性上昇率の差と関係する財の相対価格の変化、などである。

そして、新古典派経済学は、投入要素と生産物の組み合わせの選択肢に直面する企業が最大化を行い、経済と産業が均衡<sup>3</sup>にあると仮定している。そのため、経済成長は(A)投入要素の増加と(B)技術変化によって生じる。そして、生産量、投入量、価格の時間経路は、投入要素の需給と技術変化によって動いていく均衡において最大化を行う企業によって生み出される経路と解釈される。

このような特徴を持つ新古典派成長理論の計量経済モデルは、決定係数  $R^2$  が高いという基準で考えれば、(A)投入要素の増加と(B)技術変化によって経済成長をよく説明してきた。新古典派経済学の理論は、長期的な経済成長の背後にある要因をどのようにとらえるかについて基本的な考え方を示し、世界中の研究者による経済成長に関する研究の指針となった。

<sup>2</sup> 成長理論について簡単に概観できる文献として、Jones (1998)、Solow (2000)、Helpman (2004)などを参照のこと。

<sup>3</sup> ここで、均衡は、すべての関連市場において需要と供給が一致し、他の企業の行動を所与とした時にどの企業も自分の状況を改善できないという状態を意味している (p. 196, 邦訳, pp. 242–243)。

## 1.2. 残差としての技術変化

新古典派成長理論の、生産量の増加で表される経済成長を(A)投入要素の増加による部分と(B)技術変化による部分に分割する、という考え方は成長会計 (growth accounting) と呼ばれる。成長会計において、(B)技術変化は(A)投入要素の増加による部分を除いた残差としてとらえられる。<sup>4</sup> 残差として技術変化をとらえるという成長会計の分析手法は、Solow (1957) によって提示された。

残差部分を技術変化として考慮する必要があるのは、投入要素の増加によって新古典派経済学の生産関数に沿って経済が成長すると考えるだけでは現実の経済成長を十分に説明できないからである。生産関数のシフトとして考えられる技術変化が経済成長に寄与する度合いは無視できないほどに大きい。

西欧経済が経験した経済成長は以下のようなものであった。<sup>5</sup> 生産量の増加率は、資本の増加率とほぼ同じ程度であり、労働の増加率よりは大きい。したがって、資本産出比率 ( $K/Q$ ) がほぼ一定である一方、労働者 1 人当たり生産量 ( $Q/L$ ) と資本労働比率 ( $K/L$ ) は、ほぼ同じ率で上昇していく。要素分配率 (資本分配率と労働分配率) はほぼ一定であるため、資本の収益率はほぼ一定である一方で賃金率は上昇していく。

これらの定型化された事実 (stylized facts) は、新古典派経済学の生産関数に沿って経済が成長すると考えるとうまく説明することができない。というのも、生産関数が一定であるのならば、労働者 1 人当たり生産量の増加は資本労働比率の増加よりも小さいはずである。また、供給量が増え続ける資本の収益率は下がるはずである。

したがって、生産関数がシフトしていると考えざるをえない。そこで Solow (1957) は、生産関数のいかなる種類のシフトも技術変化としてとらえ、労働者 1 人当たり生産量の変化を、技術変化による部分と、労働者 1 人当たり資本による部分に分割する手法を提示した。Solow は、労働者 1 人当たり生産量の変化から労働者 1 人当たり資本の変化による影響を取り除くことで、技術変化を表すソローの技術指数 (Solow technology index)

<sup>4</sup> 成長会計の背後にある中心的な考えは、産出物の成長が、種々の投入物の成長に帰属可能な要素と、投入物の成長に帰属されない残差成長率に分割できるということである (Helpman, 2004, pp. 21–22, 邦訳, p. 21)。

<sup>5</sup> 以下の説明については後述する図 1 も参照のこと。図 1 において、点  $a$  から点  $b$  への移動が労働者 1 人当たり生産量 ( $Q/L$ ) と資本労働比率 ( $K/L$ ) をほぼ同じ率で上昇させていくものであるのに対して、同一の生産関数に沿った移動では労働者 1 人当たり生産量の増加は資本労働比率の増加よりも小さいことが確認できる。

$A(t)$ を推計している。<sup>6</sup> Solow は 1909 年から 1949 年にかけての米国のマクロデータを用いて、期間中の労働者 1 人当たり生産量の増加のうち、実に 87.5% が技術変化によるものであるという結果を得ている（残りの 12.5% は労働者 1 人当たり資本の増加によるものである）。

### 1.3. 新古典派成長理論による技術変化の取り扱いの問題点

1950 年代後半以来、経済成長の研究者は、残差としてとらえられた技術変化をより正確に特定・測定し、技術進歩に関する現象を成長理論に適合させることに集中してきた。Nelson と Winter は代表的な方法として、生産関数を定式化する際に全要素生産性 (total factor productivity) や資本や労働の利用効率 (efficiency of labor or of capital) を表す項を付け加える方法を挙げている。<sup>7</sup>

Nelson と Winter は新古典派成長理論による技術変化の取り扱いには問題があるとして、いくつかの問題点を指摘している。

#### 1.3.1. 識別問題 (The identification problem)

まず、新古典派成長理論による技術変化の取り扱いの問題点として、経済成長のうち、(A)どの程度が投入要素の増加によって生じており、(B)どの程度が技術変化によって生じているのかを明らかにできないという問題を指摘する。すなわち、生産関数がシフトすると考えるとしても、どのような技術変化が起きたのかに関して仮定を置かなければ、(A)投入要素の増加によって生じた経済成長と(B)技術変化によって生じた経済成長を識別できない。

このことを明らかにするために用いられているのが Figure 8.1 と Figure 8.2 (p. 200, 邦訳, pp. 246–247) である (図 1)。同じ点  $a$  から点  $b$  への経済成長であるとしても、(ア) Hicks 中立的な技術変化が起きたと仮定する場合 (Figure 8.1) には技術変化の経済成長への寄与が相対的に小さく推計され、(イ) 労働集約的な技術変化が起きたと仮定する場合 (Figure 8.2) には技術変化の経済成長への寄与が相対的に大きく推計される。すなわち、Figure 8.1 における経済成長 ( $\Delta_{11} + \Delta_{12}$ ) と Figure 8.2 における経済成長 ( $\Delta_{21} + \Delta_{22}$ )

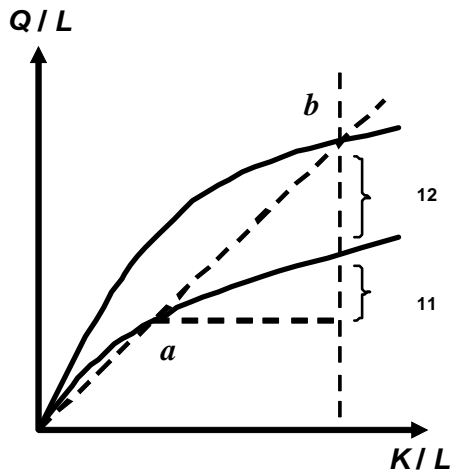
<sup>6</sup> Solow (1957) による技術指数の推計方法やその値については付録 A を参照のこと。

<sup>7</sup> もちろん、成長理論の分野では 1980 年代後半以降に技術変化をモデルの中に内生化したいいわゆる内生的成長理論が発展している。

図1 経済成長の識別問題

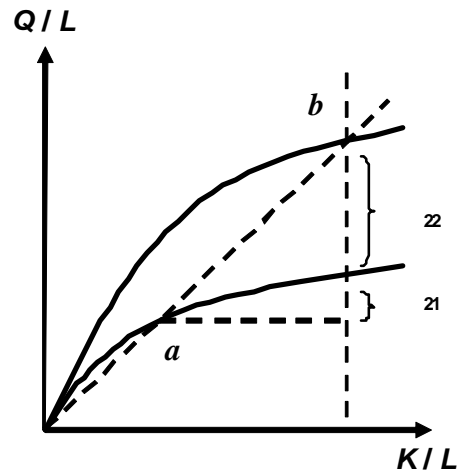
(ア) Figure 8.1

ヒックス中立的な技術変化の場合



(イ) Figure 8.2

労働集約的な技術変化の場合



出所) Figure 8.1、Figure 8.2 (p. 200, 邦訳, pp. 246-247) より筆者作成

は同じ大きさであるが、どのような技術変化が起きたと仮定するかによって、経済成長に対する技術変化の寄与の大きさが変わってくるのである（技術変化 = 生産関数のシフトによって生じた経済成長の大きさを表す  $\Delta_{12}$  と  $\Delta_{22}$  の大きさが異なる）。この二つの推計はどちらも間違っているわけではなく、他のデータを使わないかぎりどちらかに決めることはできない。

例えば、同一時点で異なる投入係数を持つ複数の企業のクロスセクション・データを使うことで、(A)投入要素の増加によって生じた経済成長と(B)技術変化によって生じた経済成長を識別できると考えられている。同一時点の企業は同じ技術的知識を持っていると仮定されているからである。しかしながら、もしこれらの企業が同じ経済にいるのであれば、投入要素の選択が異なるのは、各企業が同一時点で異なる要素価格に直面しているか、同一の要素価格に対して各企業が異なる技術的な選択を行っているか、のどちらかになる。これらは新古典派的な定式化には反するため、クロスセクション・データを用いて推計を行うことは理論と矛盾してしまう。

### 1.3.2. いくつかの重要な概念的問題とマイクロデータとの不整合

次に、新古典派成長理論が、(1)イノベーションにともなう不確実性、(2)イノベーションで得た知識の公共的側面、(3)企業の行動や運のばらつき、といったマイクロレベルでの技術変化についての知見と整合的でないという問題を指摘する。

Nelson と Winter は、新古典派の定式化における、企業はどの時点においてもいまままでにどの企業にも使用されたことのない技術も含めた幅広い技術的可能性の中から選択を行える、という仮定を非現実的なものであると批判する。例えば、図 1 で下側にある最初の生産関数において点  $a$  よりも右側の部分は、これまで企業が経験してきたよりも高い資本労働比率での生産を意味している。現実には経験されている投入要素の組み合わせから遠く離れた組み合わせを使用する生産についての技術的知識がわかっているとするのは現実的な仮定ではない。使われたことのない技術の探索はイノベーションと同じ性質を含んでいると考えれば、いまままでに経験されたことのない領域にまで生産関数に沿って移動するという新古典派による経済成長の説明の中心概念は否定されなければならない。

新古典派のモデルにイノベーションを接合して修正されたモデルも存在するが、(1)イノベーションにともなう不確実性、(2)イノベーションで得た知識の公共的側面、(3)企業の行動や運のばらつき、といったイノベーションに関する特徴は取り入れられていない。<sup>8</sup>

この問題点は、新古典派成長理論がマイクロレベルでの技術変化についての知見と整合的でないことを意味している。イノベーションには洞察が重要でありイノベーターの洞察は一般人とは大きな差がある、一度ブレイクスルーが起こると他者によって模倣や改良がなされる、ある時点で存在する企業間には、使用している技術、生産性、収益率の点でかなりの違いがある、といったことが明らかになっている。このような個人間や企業間の差は単純に最大化の概念では説明できず、知識、最大化能力、運、といったものの違いを取り入れなければ説明できない。

## 1.4. 小括

新古典派成長理論が、経済成長をもたらす重要な要因である技術変化をうまく取り扱えていないことが明らかになった。(1)イノベーションにともなう不確実性、(2)イノベーションで得た知識の公共的側面、(3)企業の行動や運のばらつき、といった技術変化の特

<sup>8</sup> Nelson と Winter が言及しているいくつかの研究や (pp. 203–204, 邦訳, pp. 250–251)、1980 年代後半以降の成長理論のモデルでは、これらの点のある程度はモデルの中に組み込まれている。

徴が取り入れられていないのである。これらの特徴が取り扱えないのは、技術変化によって成長が引き起こされる時の本質的な特徴である企業間の差異やシステムの不均衡が、均衡や利潤最大化といった新古典派の概念と相容れないからである。経済成長および経済成長をもたらす技術変化を正しく取り扱うためには、進化的アプローチを採用する必要がある。

## 2. 第9章 「経済成長の進化モデル」

第9章では、第8章の議論を受けて、ミクロレベルの企業行動からマクロレベルの経済全体の集計量までを統合的に説明する進化的アプローチに基づいたシミュレーション・モデルを構築する。

進化的アプローチとは以下のような考え方に基づいている。企業は所与の外的条件に対して行動を定めるさまざまな能力、手続き、意思決定ルールを持っているとみなされる。企業はいままでとは異なる行動の仕方を発見し、考慮し、評価するという探索を行う。市場環境の中で利益を上げている企業は拡大し、損失を出している企業は縮小する。個々の企業を取り巻く市場環境は、例えば生産物の供給と投入要素への需要が製品価格と要素価格に影響を与えるように、ある程度は企業行動全体のシステムに対して内生的である。

第9章で構築される進化的アプローチに基づいたモデルは、イノベーションの結果が確率的に定まるという意味で(1)イノベーションにともなう不確実性を含み、模倣が行われるという意味で(2)イノベーションで得た知識の公共的側面を含み、イノベーションおよび模倣の選択と結果が確率的に決まるという意味で(3)企業の行動や運のばらつきを含むモデルである。そして、個々の企業が生産コスト低減のためのイノベーションを行うこのモデルは Solow (1957) が利用した 1909 年から 1949 年にかけての米国のマクロデータによく似た時系列データを生成する。すなわち、経済成長の進化モデルは、(A) 利潤最大化ではない企業の行動ルールを設定しているという点で企業の意思決定についての実証研究と整合的であり、(B) 企業の多様性、イノベーション、技術の普及に関するミクロレベルの知見に整合的であると同時に、(C) マクロレベルの経済全体の振る舞いを説明できるという点で新古典派のモデルよりも優れている。



## 2.1. モデル<sup>9</sup>

### 2.1.1. モデルの基本的な前提

第9章のシミュレーション・モデルでは、企業は労働と資本という二つの投入要素を用いて単一の同質な製品を生産している。ある時点の企業の状態は  $(a_l, a_k, K)$  という三つの変数の組 それぞれの投入要素についての投入係数の組で表される技術  $(a_l, a_k)$  と資本  $K$  によって表される。資本  $K$  は離散的な非負の整数で表され、資本が正の企業は参入企業、資本がゼロの企業は潜在企業とみなされる。各企業は保有する技術を用いて100%の設備稼働率で生産を行う。

モデルには投入係数の組で表される100の技術が存在しており、企業はこれらの技術のうちの一つを使用している。<sup>10</sup> これらの技術を投入係数の対数座標空間に図示したものが Figure 9.1 である (p. 216, 邦訳, p. 263)。産業全体の投入係数の値は、各企業が採用している技術の投入係数を各企業の資本で加重平均することによって得られ、その時間経路 (time path) をこの平面上に描くことができる。

$t$  期における産業の状態は、 $t$  期における企業の状態のリストで表される。産業の総生産量と総労働需要  $L_t$  は産業の状態によって決定され、賃金率  $w$  は期ごとに労働供給曲線にしたがって決定される。製品価格は常に1と等しい。そのため、資本への収益は生産量から賃金支払いを引いたものとなる。

探索と投資などに関する確率的な推移規則を個々の企業に個別に適用することによって、産業の状態が変化していく。

### 2.1.2. 探索

技術変化は企業の探索を通じて生じる。探索は新たな技術を獲得することであり、新た

<sup>9</sup> 前述のように、第9章は Nelson and Winter (1974) と Nelson, Winter, and Schuette (1976) をもとにして書かれており、用いられているシミュレーション・モデルもこれらの論文と同様のものである。さらにいえば、Nelson and Winter (1974) の Table I (p. 897) と第9章の Table 9.1 (pp. 218–219, 邦訳, p. 267)、Nelson, Winter, and Schuette (1976) の Table II (p. 105) と第9章の Table 9.2 (p. 221, 邦訳, p. 269) の表中の数字もまったく同じであることから、第9章と Nelson and Winter (1974) と Nelson, Winter, and Schuette (1976) とで行われているシミュレーションの試行も同一のものであると考えられる。そこで、パラメータの設定などの細部については Nelson and Winter (1974) と Nelson, Winter, and Schuette (1976) を適宜参照しながらシミュレーション・モデルの解説を行う。

<sup>10</sup> これらの技術は、Solow (1957) のデータに基づき、投入係数の対数座標空間内の、 $a_l$  の値が 0.46 から 0.18、 $a_k$  の値が 1.2 から 4.6、で表される長方形の領域の中に一様に分布するようにランダムに選択されたものである (Nelson, Winter, & Schuette, 1976, pp. 98–99)。

な技術の獲得を通じて各企業は生産コストを低減させる。企業は満足基準を満たしていない場合にのみ探索を行い、十分な利潤を上げられ満足基準を満たしている場合には探索を行わず既存の技術を保持する。このモデルでは、資本収益率 16% が企業が探索を行うかどうかの基準となる。<sup>11</sup>

探索によって発見された技術は、既存の技術よりも高い利益をもたらす場合のみ次期の技術として採用される。既存の技術と新たな技術の比較はその期の賃金率  $w$  を用いて行われる。ただし、既存企業は新たな技術の投入係数を正確に知ることはできず、投入係数の値を誤って評価してしまう可能性がある。その結果、現在の技術よりも収益性の低い技術を採用してしまうこともある。比較に用いられる新たな技術の投入係数の値は、真の値ではなく、真の値と独立の正規乱数を掛け合わせたものである。既存企業は新たな技術の投入係数を 3 分の 1 の確率で 20% 以上誤って評価してしまう。<sup>12</sup>

探索には、現在の自社の技術を漸進的に改善するイノベーション（局所的探索）と、他の企業が用いている技術を利用する模倣、の二つがある。企業はある期にイノベーションと模倣の両方を行うことはできず、パラメータ  $IM$ （模倣の重視度）によって定められる確率  $IM$  で模倣が、確率  $(1 - IM)$  でイノベーションが行われる。模倣の重視度は既存企業と潜在企業では異なる値を取るため、既存企業の模倣の重視度を  $IM_1$ 、潜在企業の模倣の重視度を  $IM_2$  とする（Nelson, Winter, & Schuette, 1976, pp. 100–101）。

#### 2.1.2.1. イノベーション：局所的探索

イノベーションは局所的探索（local search）として行われる。すなわち、企業が現在使用している技術と近い技術ほど発見されやすい。技術間の距離は対数をとった投入係数の

<sup>11</sup> 探索を行う基準となる資本収益率 16% は、償却率  $D$ 、配当率  $R$ 、目標収益率  $TRR$ 、という三つの数字を足し合わせたものである（Nelson, Winter, & Schuette, 1976, p. 95）。 $R$  が 0.02 の時は  $TRR$  は 0.10、 $R$  が 0.06 の時は  $TRR$  は 0.06、とすることで、 $D = 0.04$  を足し合わせた数字が 0.16 となるように調整されている（Nelson, Winter, & Schuette, 1976, p. 101）。

<sup>12</sup> 新たな技術の投入係数を誤って評価してしまうという記述は既存企業（a firm in business）についてのものである（p. 212）。同じような誤りが潜在企業に対しても生じるかは定かではない。既存企業の探索と潜在企業の探索は異なると書かれており必要な時に言及すると述べられているが（p. 213）、該当する箇所は第 9 章では見つけられなかった（Nelson, Winter, and Schuette (1976) にも同様の記述があるが、該当する箇所として既存企業と潜在企業の模倣の重視度の違いが言及されている。この部分は第 9 章では割愛されている）。潜在企業の探索について熟慮（contemplate）という語を用いていることから、潜在企業については新たな技術の投入係数を誤って評価することはないと設定している可能性があるが、その点については第 9 章や Nelson, Winter, and Schuette (1976) からは明らかにできない。

差の絶対値を加重平均したものとして表される。技術  $h$  と技術  $h'$  の距離  $D(h, h')$  は、

$$D(h, h') = WTL \left| \log a_i^h - \log a_i^{h'} \right| + WTK \left| \log a_k^h - \log a_k^{h'} \right|$$

ただし、 $WTL + WTK = 1$

となる。

傾きがパラメータ  $IN$  (イノベーションの容易さ) である線形の減少関数にしたがって、既存の技術から距離が遠い技術ほど発見される確率は低くなる。また、パラメータ  $WTL$  (探索の労働節約への偏向) の値を変えることで、労働節約的な技術あるいは資本節約的な技術を発見しやすいというイノベーションの偏り (bias) を生じさせられる。局所的探索に関するより具体的な説明は付録 B を参照のこと。

#### 2.1.2.1. 模倣

企業は模倣によって他の企業が用いている技術を利用することもできる。このモデルではどの技術を模倣するかは、産業内で各技術が使用されているシェアに比例した確率に応じて決定される。すなわち、企業にとってどの技術がベスト・プラクティスであるかは明らかではなく、幅広く利用されている技術が注目を集めるという普及モデルと同じ仮定をおく。

#### 2.1.3. 投資

既存企業の資本の変化 (規模の変化) は以下のような推移規則に従って生じる。

まず、既存企業の資本は確率的に減少する。すなわち、資本は 1 単位ごとに各期に償却率  $D (= 0.04)$  の確率で壊れて失われうる。

次に、既存企業は利潤に応じた投資を行う。利潤  $\pi K$  は、売上  $Q$  から賃金支払い  $wL$  と配当  $RK$  を引いたものである ( $\pi K = Q - wL - RK$ )。<sup>13</sup> 資本が負にならない限り、利潤  $\pi K$  が正であろうが負であろうが利潤分だけ投資が行われる。<sup>14</sup> パラメータ  $R$  (配当率) によって企業が投資可能な額を変化させられる。

<sup>13</sup> 原文ではこの部分での賃金率は大文字  $W$  で表されているが、本稿では後の労働市場の数式との整合性を保つために小文字  $w$  で賃金率を表した。このほか、Table 9.1 では  $W$  が用いられる一方で、Table 9.2 では  $\Delta w$  が用いられるなど賃金率に関して大文字か小文字であるかについて揺らぎが散見されるが、どちらも同じものを指していると考えて問題はない。

<sup>14</sup> 資本は整数値を取るため、正確には利潤  $\pi K$  の小数点以下を四捨五入した値だけ投資が行われる。

#### 2.1.4. 参入

潜在企業は、自身の持っている技術を使用することで現在の製品価格と賃金率のもとで資本収益率 16%以上を達成できる場合には、0.25 の確率で参入する。参入時の資本は 5 から 10 までの整数の一様分布から確率的に決定される。もちろん、資本収益率 16%以上を達成できない潜在企業は、次期も潜在企業のままである。

#### 2.1.5. 労働市場

賃金率  $w$  は、労働に対する外生的な供給と内生的な需要によって決定される。 $t$  期の賃金率  $w$  は、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $g$  を定数として、 $t$  期の総労働需要  $L_t$  に基づいて以下のように決定される。

$$w = a + b \left( \frac{L_t}{(1+g)^t} \right)^c$$

ここで、歴史的に観察された値と大体一致するように、労働の供給状況を示す  $g$  は労働供給曲線が年率 1.25% で右へシフトしていくように設定される。<sup>15</sup>

#### 2.1.6. モデルの要約

これまで述べてきたモデルを要約すると以下の通りである。

企業の技術と資本によって、各企業の労働投入量と生産量を決定する。各企業の労働投入量と生産量を集計することによって、産業全体の総労働需要と総生産量が決定される。産業全体の総労働需要から賃金率が定まる。この賃金率を用いて各企業の資本収益率と利潤が決定される。

潜在企業と資本収益率が 16% を下回る既存企業は探索を行う。探索を行う企業は、イノベーションと模倣のどちらかを行う。企業は、既存の技術と探索で発見された新しい技術を比較し、より収益性の高い技術を次期の技術とする。資本収益率が 16% 以上の企業と、探索によってより収益性の高い技術を発見できなかった企業は、次期も既存の技術を使い続ける。

既存企業の資本は、償却率  $D$  に従って確率的に減少すると同時に、利潤  $\pi K$  分だけ投資

<sup>15</sup> 具体的には、定数の値は、 $a = 0$ 、 $b = 0.000018$ 、 $c = 2$ 、 $g = 0.0125$ 、と設定されている (Nelson, Winter, & Schuette, 1976, pp. 97–98)。

が行われ、次期の資本が決定される。潜在企業は、自身の持っている技術を使用することで現在の製品価格と賃金率のもとで資本収益率 16%以上を達成できる場合に正の資本で産業に参入してくる。

以上のような過程を経て、各企業の次期の状態は確率的に決定され、各企業の状態のリストである次期の産業の状態も決定される。

## 2.2. 初期条件およびパラメータの設定

モデルの初期条件は、Solow (1957) で用いられたデータに対応するように設定される。シミュレーションの第 5 期における値が Solow の 1909 年の値に近似するように設定が行われる。既存企業の持つ技術の投入係数、資本、賃金率、労働供給曲線、の初期条件を Solow のデータに対応するように設定すると、企業の平均資本収益率や産業の労働分配率と資本分配率も Solow のデータと近似する。

産業内には 35 の企業が存在し、初期状態では 15 の企業が既存企業、20 の企業が潜在企業となっている。配当率  $R$  が 0.02 の試行では各既存企業に 20 単位の資本を、 $R$  が 0.06 の試行では 22 単位の資本を割り当てる。これらの初期資本の値は初期状態において純投資の期待値がほぼゼロとなるように設定されている。<sup>16</sup>

このモデルにはすでに述べてきた通り、イノベーションの容易さ  $IN$ 、模倣の重視度  $IM$ 、配当率  $R$ 、探索の労働節約への偏向  $WTL$ 、という四つのパラメータが存在している。これら四つのパラメータについてそれぞれ二通りの値を設定し、それぞれに対応するダミー変数  $X_{IN}$ 、 $X_{IM}$ 、 $X_R$ 、 $X_{WT}$ 、で表す。<sup>17</sup>

以上のような初期条件およびパラメータの設定のもとで、50 期間のシミュレーションを実行する。パラメータの値を変更することによって生じる 16 通りのシミュレーションの試行には、四つのダミー変数の値を用いて二進法で 0000 から 1111 までの番号付けをする。

<sup>16</sup> 初期の産業の総資本が 300 単位の場合 (配当率  $R$  が 0.02 の場合)、資本 1 単位は 1929 年の 5 億米ドルにほぼ対応する (Nelson, Winter, & Schuette, 1976, p. 99)。

<sup>17</sup> Nelson, Winter, and Schuette (1976, pp. 100–101) によれば、ダミー変数に応じた各パラメータの設定は以下の通りである。 $X_{IN} = 0$  の時は  $IN = -6.0$ 、 $X_{IN} = 1$  の時は  $IN = -4.5$  である。 $X_{IM} = 0$  の時は  $IM_1 = 0.2$  かつ  $IM_2 = 0.0$ 、 $X_{IM} = 1$  の時は  $IM_1 = 0.4$  かつ  $IM_2 = 0.2$  である。 $X_R = 0$  の時は  $R = 0.02$  かつ  $TRR = 0.10$ 、 $X_R = 1$  の時は  $R = 0.06$  かつ  $TRR = 0.06$  である。 $X_{WT} = 0$  の時は  $WTL = 0.5$ 、 $X_{WT} = 1$  の時は  $WTL = 0.6$  である。

## 2.3. 結果

### 2.3.1. シミュレーションの結果と Solow (1957) のデータの比較

シミュレーション・モデルを実行した結果は、Table 9.1 (pp. 218–219, 邦訳, p. 267)<sup>18</sup> に示されているように Solow (1957) が示した実際に観察されたマクロ集計量の時系列データと似たものであった。シミュレーション・モデルにおいても、平均変化率が Solow のデータとほぼ同じである技術進歩が発生した。各試行における産業の平均投入係数の時間経路および Solow のデータにおける投入係数の時間経路との比較は Figure 9.2 から Figure 9.6 (pp. 222–224, 邦訳, pp. 270–272) に示されている。また、技術進歩とともに労働者 1 人当たり生産量、賃金率、資本労働比率は上昇し、一方で資本収益率は一定であった。シミュレーションの結果をコブ・ダグラス型生産関数に対して回帰させた結果、決定係数  $R^2$  は十分に大きな値となった (Table 9.3, Table 9.4, p. 225, 邦訳, p. 273)。

### 2.3.2. パラメータの変化が産業全体に与える影響

イノベーションの容易さ  $IN$ 、模倣の重視度  $IM$ 、配当率  $R$ 、探索の労働節約への偏向  $WTL$ 、という四つのパラメータの変化が、産業全体の集計量である、第 40 期におけるソローの技術指数  $A(40)$ 、第 40 期における資本労働比率  $K/L(40)$ 、第 40 期における四社集中度  $C_4(40)$ 、に与える影響を調べるために、ダミー変数を用いた線形回帰を行っている (pp. 230–232, 邦訳, pp. 278–280)。得られた結果は、以下の通りである。

まず、イノベーションが容易であるほどソローの技術指数は大きい値となった。これはミクロレベルで大きなイノベーションがより簡単に達成されるほど、マクロレベルでの全要素生産性の上昇率は高くなるという結果である。

次に、配当率が高いほど資本コストが上昇し投資が行いにくくなり資本集約度は低下する。探索の労働節約へ偏向しているほど、また、イノベーションが容易であるほど、資本集約度資本集約度は上昇する。

<sup>18</sup> Nelson と Winter は Solow (1957) のデータでは負の技術進歩 (技術指数の減少) が 11 回起きたと指摘しているが、実際には、1909 年から 1910 年、1914 年から 1915 年、1916 年から 1917 年、1919 年から 1920 年、1925 年から 1926 年、1926 年から 1927 年、1927 年から 1928 年、1929 年から 1930 年、1931 年から 1932 年、1936 年から 1937 年、1945 年から 1946 年、1946 年から 1947 年、にかけての 12 回である。また、Table 9.1 の注では 1944 年から 1949 年の技術指数の値を訂正したと書かれているが、実際に Solow (1957) の Table I (p. 315) の値から変更が加わっているのは 1943 年から 1949 年の値である。訂正前の Solow (1957) においても技術指数の減少が発生した回数は 12 回である。

最後に、模倣が重視されるほど四社集中度は低下する。これは模倣が頻繁に行われることで、接戦の競争 (closer race) が行われるからである。

## 2.4. 小括

結論として、第9章で構築された個々の企業が生産コスト低減のためのイノベーションを行う経済成長の進化モデルは、Solow (1957) が利用した1909年から1949年にかけての米国のマクロデータによく似た時系列データを生成することができた。新古典派成長理論のモデルと同じ程度、実際に観察されたマクロ集計量を説明できる。

第9章のモデルは、利潤最大化と均衡という概念の代わりに探索と淘汰 (search and selection) という概念を用いている点で新古典派のモデルと異なっている。企業は利潤最大化を行うわけではなく、収益性のシグナルに反応して技術を選択し投資決定をする。いかなる時点でも企業間で使用している技術や収益性にはばらつきがあり、モデルは均衡状態にあるわけではない。また、利用可能な技術の集合が存在するだけであり、明確な生産関数も存在しない。

第9章のモデルは、新古典派成長理論がうまく取り扱えていない技術変化を、ミクロレベルの知見と統合的に取り扱っている。すなわち、イノベーションの結果が確率的に定まるという意味で(1)イノベーションにともなう不確実性を含み、模倣が行われるという意味で(2)イノベーションで得た知識の公共的側面を含み、イノベーションおよび模倣の選択と結果が確率的に決まるという意味で(3)企業の行動や運のばらつきを含んでいる。

すなわち、経済成長の進化モデルは、(A)利潤最大化ではない企業の行動ルールを設定しているという点で企業の意思決定についての実証研究と統合的であり、(B)企業の多様性、イノベーション、技術の普及に関するミクロレベルの知見に統合的であると同時に、(C)マクロレベルの経済全体の振る舞いを説明できるという点で新古典派のモデルよりも優れている。

## 謝辞

本稿を執筆するにあたり東京大学大学院経済学研究科の高橋伸夫先生から多大なご指導を賜りました。また、東京大学大学院経済学研究科修士課程の川島美紀氏、徐寧教氏とのディスカッションにより理解を深めることができました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- Helpman, E. (2004). *The mystery of economic growth*. Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press. 邦訳, エルハナン・ヘルプマン (2009) 『経済成長のミステリー』大住圭介, 池下研一郎, 野田英雄, 伊ヶ崎大理 訳. 九州大学出版会.
- Jones, C. I. (1998). *Introduction to economic growth*. New York: W. W. Norton. 邦訳, チャールズ・I・ジョーンズ (1999) 『経済成長理論入門』香西泰 監訳. 日本経済新聞社.
- Nelson, R. R. (1973). Recent exercises in growth accounting: New understanding or dead end? *American Economic Review*, 63(3), 462–468.
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1973). Toward an evolutionary theory of economic capabilities. *American Economic Review*, 63(2), 440–449.
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1974). Neoclassical vs. evolutionary theories of economic growth: Critique and prospectus. *Economic Journal*, 84(336), 886–905.
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press. 邦訳, リチャード・R・ネルソン、シドニー・G・ウィンター (2007) 『経済変動の進化理論』後藤晃, 角南篤, 田中辰雄 訳. 慶應義塾大学出版会.
- Nelson, R. R., Winter, S. G., & Schuette, H. L. (1976). Technical change in an evolutionary model. *Quarterly Journal of Economics*, 90(1), 90–118.
- Solow, R. M. (1957). Technical change and the aggregate production function. *Review of Economics and Statistics*, 39(3), 312–320. 邦訳, R・M・ソロー (1988) 「技術の変化と集計的生産関数」『資本 成長 技術進歩 (新装増補改訂版)』福岡正夫, 神谷傳造, 川又邦雄 訳. (pp. 73–94), 竹内書店新社.
- Solow, R. M. (2000). *Growth theory: An exposition (2nd ed.)*. New York: Oxford University Press. 邦訳, ロバート・M・ソロー (2000) 『成長理論 第2版』福岡正夫 訳. 岩波書店.

付録 A Solow (1957) における技術指数の推計の誤り

第 9 章では、Solow (1957) のデータを用いてシミュレーション・モデルを実際に観察されたマクロデータの値に近似させている。この Solow (1957) は第 8 章の解説部分でも述べたとおり残差として技術変化をとらえる分析手法を提示した成長理論における重要な文献であるが、実はこの論文で行われている技術指数  $A(t)$  推計には誤りが生じている。そこで、この付録 A では Solow (1957) に存在する技術指数  $A(t)$  の推計の誤りを指摘し、誤りを正して再計算を行った値を記載する。



Solow (1957) は、生産関数のいかなる種類のシフトも技術変化としてとらえ、労働者 1 人当たり生産量の変化を、技術変化による部分と、労働者 1 人当たり資本による部分に分割する手法を提示した。Solow は、1909 年から 1949 年にかけての米国のマクロデータを用いて、技術変化を表すソローの技術指数  $A(t)$  の各年の値を推計している。

Solow (1957) の行った技術指数の推計方法を大幅に要約すれば、(ア)集計したデータをもとに各年の「技術指数の変化率  $\Delta A(t)/A(t)$ 」を算出し、(イ)1909 年の技術指数  $A(1909)$  を 1 と置き、 $A(t+1) = A(t)(1 + \Delta A(t)/A(t))$  という計算式に基づき「技術指数の変化率  $\Delta A(t)/A(t)$ 」を用いて各年の「技術指数  $A(t)$ 」を計算する、という作業を行っている。<sup>19</sup> このように、技術指数  $A(t)$  の算出は、 $t$  期の値を用いて  $t+1$  期の値を計算するというように帰納的に行われるため、一度値を間違えてしまうと以後の値もすべて間違った値となってしまう。

このようにして計算されたものが Table 9.1 (pp. 218–219, 邦訳, p. 267) にも掲載されている技術指数  $A(t)$  の値であるが、実は(ア)の段階でミスが生じているため途中から誤った値となってしまう。具体的には、(i) 1931 年の技術指数の変化率  $\Delta A(1931)/A(1931)$  の値が本来は -0.023 であるところを 0.023 と正負の符号を逆にしている点と、(ii) 1942 年の技術指数の変化率  $\Delta A(1942)/A(1942)$  の値が本来は約 0.041 であるところ 0.016 と計算してしまっている点、の二点で誤りが生じている。後者のミスについては Nelson と Winter も気付いており 1943 年から 1949 年の技術指数  $A(t)$  の値を修正しているが、<sup>20</sup> 前者のミスには気付いていないため、結果として 1932 年以降の技術指数  $A(t)$  の値は誤った値となってしまう。

そこで、Solow (1957) の集めたデータをもとに技術指数  $A(t)$  およびその変化率  $\Delta A(t)/A(t)$  の値を計算しなおしたものを表 1 に記載した。表 1 の 列は計算しなおした正しい値の  $A(t)$  であり、 列は計算しなおした正しい値の  $\Delta A(t)/A(t)$  である。比較のため、 列には Solow (1957) の Table I (p. 315) における  $A(t)$  の値、 列には同じく Solow (1957) の Table I における  $\Delta A(t)/A(t)$  の値、 列には第 9 章の Table 9.1 (pp. 218–219, 邦訳, p. 267) における  $A(t)$  の値を記載した。指摘したように、1931 年と 1942 年における  $\Delta A(t)/A(t)$  の値が、計算しなおした値と Solow (1957) の

<sup>19</sup> 詳細な計算手順は以下の通りである。まず、さまざまなデータソースから「雇用労働力の割合」、「資本ストック」、「総労働時間」、「労働者 1 人当たり生産量」、「資本分配率」といったデータを集める。次に、「雇用労働力の割合」、「資本ストック」、「総労働時間」から、「労働者 1 人当たり資本  $K/L$ 」を計算する。続いて、

$$\text{「労働者 1 人当たり生産量の変化 } \frac{\Delta Q/L}{Q/L} \text{」}$$

から「資本分配率  $S_k$ 」と

$$\text{「労働者 1 人当たり資本の変化率 } \frac{\Delta K/L}{K/L} \text{」}$$

をかけたものを引くことによって「技術指数の変化率  $A(t)/A(t)$ 」を算出する。すると、1909 年の技術指数  $A(1909)$  を 1 と置くと、「技術指数の変化率  $A(t)/A(t)$ 」を用いることで各年の「技術指数  $A(t)$ 」の値を計算できる。なお、ここでは Solow (1957) で用いられている記号ではなく、第 9 章で用いられている記号を使用している。

<sup>20</sup> 本稿脚注 18 でも指摘しているように Nelson と Winter は 1944 年から 1949 年の技術指数の値を訂正したと書いているが、実際に変更されているのは 1943 年から 1949 年の値である。

Table I における値では異なっており（表 1 内の黄色い網掛けのセル）、以後の  $A(t)$  の値に影響を与えていることがわかる。<sup>21</sup>

表 1 再計算した技術指数  $A(t)$  およびその変化率  $\Delta A(t)/A(t)$  の値

年	【列】 再計算した $A(t)$	【列】 再計算した $\Delta A(t)/A(t)$	【列】 Solow (1957) の $A(t)$	【列】 Solow (1957) の $\Delta A(t)/A(t)$	【列】 第 9 章の $A(t)$
1909	1.000	-0.018	1.000	-0.017	1.000
1910	0.982	0.039	0.983	0.039	0.983
1911	1.021	0.002	1.021	0.002	1.021
1912	1.022	0.040	1.023	0.040	1.023
1913	1.063	0.007	1.064	0.007	1.064
1914	1.071	-0.028	1.071	-0.028	1.071
1915	1.041	0.034	1.041	0.034	1.041
1916	1.077	-0.010	1.076	-0.010	1.076
1917	1.066	0.072	1.065	0.072	1.065
1918	1.143	0.014	1.142	0.013	1.142
1919	1.158	-0.076	1.157	-0.076	1.157
1920	1.071	0.072	1.069	0.072	1.069
1921	1.147	0.032	1.146	0.032	1.146
1922	1.184	0.010	1.183	0.011	1.183
1923	1.196	0.017	1.196	0.016	1.196
1924	1.216	0.035	1.215	0.032	1.215
1925	1.258	-0.011	1.254	-0.010	1.254
1926	1.245	-0.005	1.241	-0.005	1.241
1927	1.239	-0.006	1.235	-0.007	1.235
1928	1.231	0.020	1.226	0.020	1.226
1929	1.255	-0.043	1.251	-0.043	1.251
1930	1.202	0.024	1.197	0.024	1.197
1931	1.231	-0.023	1.226	0.023	1.226
1932	1.202	0.010	1.198	0.011	1.198
1933	1.215	0.072	1.211	0.072	1.211
1934	1.302	0.039	1.298	0.039	1.298
1935	1.353	0.060	1.349	0.059	1.349
1936	1.434	-0.010	1.429	-0.010	1.429
1937	1.420	0.021	1.415	0.021	1.415
1938	1.450	0.048	1.445	0.048	1.445
1939	1.520	0.050	1.514	0.050	1.514
1940	1.596	0.044	1.590	0.044	1.590
1941	1.666	0.004	1.660	0.003	1.660
1942	1.672	0.041	1.665	0.016	1.665
1943	1.741	0.071	1.692	0.071	1.733
1944	1.864	0.021	1.812	0.021	1.856
1945	1.903	-0.044	1.850	-0.044	1.895
1946	1.820	-0.017	1.769	-0.017	1.812
1947	1.789	0.016	1.739	0.016	1.781
1948	1.817	0.025	1.767	0.024	1.809
1949	1.862		1.809		1.852

出所) Solow (1957) Table I および Nelson and Winter (1982) Table 9.1 の数値をもとに筆者作成

<sup>21</sup> 表 1 に見られる 列と 列の値のわずかな差および 1931 年までの 列と 列・ 列の値のわずかな差は丸め誤差により生じている。

## 付録 B 第9章のシミュレーション・モデルにおける局所的探索

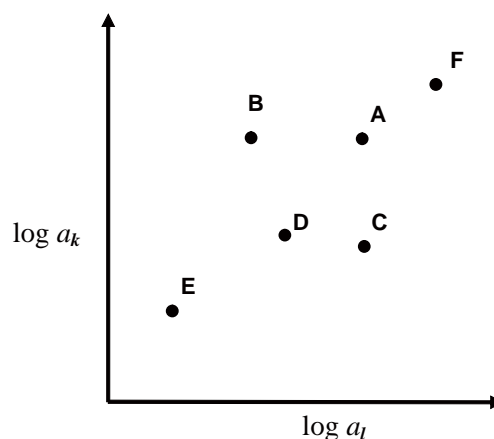
第9章のシミュレーション・モデルにおいて企業が行う局所的探索について具体例を用いて説明する。いま技術 A、B、C、D、E、F という六つの技術のみが存在しているとする。企業はこれら六つの技術のうちいずれかを採用しており、探索の結果に応じて他の技術を採用するか、現在採用している技術を使用し続けるかする。探索は、新たな技術の発見と現在の技術との比較による評価の二つの行動からなる。新たに発見された技術が現在の技術よりも優れている（収益性が高い）場合に、企業は新たな技術を採用する。

図2に示されているように、各技術は投入係数の値に応じて点 A、B、C、D、E、F として  $\log a_l \cdot \log a_k$  平面上の座標で示すことができる。ここで、投入係数  $a_l$  および  $a_k$  が小さい値を取るほど優れた技術であるため、これら六つの技術の中では技術 E がもっとも優れており、技術 F がもっとも劣っていることがわかる。また、技術 B は技術 A と比べて労働節約的であり、技術 C は技術 A と比べて資本節約的である。

いま技術 A を採用しているある企業  $i$  が探索を行うとする。探索は局所的探索 (local search) であるため、企業  $i$  が現在使用している技術 A と近い技術ほど発見されやすい。すなわち、企業  $i$  はどの技術も発見しうるが、例えば点 E は点 D と比べて点 A から遠い位置にあるため、技術 E を発見する確率は技術 D を発見する確率よりも小さい。技術 E が技術 D と比較してどの程度発見される確率が低いかはパラメータ  $IN$  (イノベーションの容易さ) の値によって変化する。

また、企業  $i$  が行う探索は労働節約や資本節約のどちらかに偏向しているかもしれない。例えば、パラメータ  $WTL$  (探索の労働節約への偏向) の値が小さくなった場合には (労働節約的な技術をより発見しやすくなった場合には)、労働節約的な技術である技術 B はより発見されやすく、資本節約的な技術である技術 C はより発見されづらくなる。

図2  $\log a_l \cdot \log a_k$  平面上に示された技術



出所) 筆者作成

このような探索によって発見された技術は収益性の試験によって採用されるか否かが決定される。仮に企業  $i$  が技術 F を発見したとしても、技術 F は技術 A よりも明らかに劣った技術であるために、企業  $i$  が技術 F の投入係数の評価を大きく間違えないかぎり収益性の試験を通過することはできず、技術 F が採用されることはない。

第 9 章のシミュレーション・モデルにおいて企業が行う局所的探索は以上のような特徴を持っている。

**赤門マネジメント・レビュー編集委員会**

編集長 新宅 純二郎

副編集長 天野 倫文

編集委員 阿部 誠 粕谷 誠 清水 剛 高橋 伸夫 藤本 隆宏

編集担当 西田 麻希

**赤門マネジメント・レビュー 9巻10号** 2010年10月25日発行

編集 東京大学大学院経済学研究科 ABAS/AMR 編集委員会

発行 特定非営利活動法人グローバルビジネスリサーチセンター

理事長 高橋 伸夫

東京都文京区本郷

<http://www.gbrc.jp>