

日本の主要4産業の技術進歩のパターンと学習効果

—1970, 80年代の比較— (上)*

佐久間昭光

目次 (上)

1. はじめに
2. P. デヴィッドの技術進歩モデル
3. 日本の集積回路産業と自動車産業における技術進歩 (デヴィッド・モデル)
4. 生産要素価格, 学習効果と技術進歩のパターン
5. 推定方法とパラメーターの標準誤差の計算

付録 データと変数の定義

(下)

6. 経験変数, 回帰式
7. 日本の主要4産業における技術進歩
 - 7.1. 集積回路産業の技術進歩のパターン
 - 7.2. 自動車, コンピュータ, 鉄鋼産業の技術進歩のパターン
 - 7.3. 分析結果の要約とインプリケーション
8. 集積回路産業の技術進歩のパターンの変化と発展段階
9. 結び

1 はじめに

本稿では, 日本の代表的産業である集積回路, 自動車, コンピュータ, 鉄鋼の4産業を取り上げ, 1971年から90年の20年間にわたるそれぞれの産業の技術進歩のパターンの推定を行なう。そして, 技術進歩のパターンと産業の発展段階との関連およびそのパターンの変化の要因についての考察を進めていく。

W. J. アバナシーは, 技術集約型の産業の技術の発展段階を流動的段階

(fluid)と固定化の(rigid)段階に二分し、流動的段階ではプロダクト・イノベーションに、また固定化の段階ではプロセス・イノベーションに開発の焦点が向けられるとしている¹⁾。本稿では、製品のデザインが安定し、産業の技術が流動的段階から固定化に向かう段階および固定化の段階における、個々の産業のプロセス・イノベーションの特質を分析する。

プロセス・イノベーションを計測する場合のキー変数は、「経験」「知識」「学習」という概念である。「技術変化一般は経験に帰することができ、生産活動それ自体が問題を提起し、それに対する望ましい反応が時間をつうじて選択されていく」²⁾。知識の増大は労働の熟練度を高め、労働生産性を向上させるだけではなく、さらに、それは生産設備の改良にも向けられ、資本生産性も同時に向上させるのである。知識の増大は、生産要素価格の変動と並んで、資本、労働に関する技術選択を決定する重要な要因であり、これらの変数の間には安定した関係(技術進歩のパターン)が成立するものと考えられる。ここでは、「経験」「知識」の量を累積生産量、累積粗投資によって具体的に測定し、この関係が産業の技術の発展段階に対応してどのように変化して行くかについての考察を進めていく。

具体的に言えば、技術が固定化に向かう産業の初期段階においては、初期時点で選択された技術の下でも、製品の構造、生産のプロセスに関する知識は生産量の拡大とともに増大し、製品、プロセスの改良を実現させていく。知識の増大によって労働と資本の生産性が十分に大きく向上し、また二つの生産性の上昇率がほぼ同等であれば、企業は、生産要素の相対価格の変動とは独立に、初期時点での資本・労働比率を維持しながら単位費用の最小化を実現することができる³⁾。

しかし、単位費用の低減、製品の標準化にともなって産業の産出量が増大し、その技術が固定化の段階に入ると、技術はそれ自体の内部論理にしたがい、自然の経路に沿った発展を遂げるようになる⁴⁾。この段階では、資本による労働の代替を進展させるインセンティブが強くなり、単位費用を最小にする資本、労働の選択を行なうためには、企業は学習による資本と労働の生

産性の上昇率の大きさだけではなく、生産要素の相対価格の変動をも考慮に入れなければならない。この段階で予測される技術進歩のパターンは、相対的にその価格が上昇傾向にある生産要素（労働）を節約するようなものになるであろう。

従来の研究では、技術変化の問題は、1国の資源付与の状態と生産要素価格の変動との関連で取り上げられてきた。代表的な文献を見ると、農業の分野では、誘導的技術進歩という視点から、日本、アメリカにおける農業の技術進歩の方向性が検証されている⁵⁾。また工業の分野では、19世紀のアメリカとイギリスの繊維産業における技術進歩のパターンの計測が行なわれている⁶⁾。これらの研究では、長期間にわたるデータにもとづいて技術進歩の計測が行なわれており、結論的には、相対的に希少な資源を節約する方向で技術進歩が進展してきたことが実証されている。

現在の状況では、賃金・資本コスト比率は趨勢的に上昇しており、技術進歩が誘導的であれば、それは一般的には労働節約的な偏向性をもつことになるはずである。しかし、後に示すように、学習効果を明示的に導入して技術進歩のパターンを分析すると、先端技術産業ではこの一般傾向とは異なった中立的な技術進歩が計測される。

本稿のもう1つの視点は、70年代と80年代の技術進歩のパターンを比較することにある。80年代においては、大企業を中心に安い資本コストで資金調達する道が開け、またこの間に70年代に比べて、より急速に生産プロセスにおけるエレクトロニクス化が進展している。相対的に安くなった資本コストとエレクトロニクス化によって、従来はそれが不可能であったような分野で、資本による労働の代替が急速に進展しているものと予測される。ここでは、4つ産業の技術進歩のパターンの分析をつうじてこの点に関する検証を試みる。

以下、本稿は、(上)、(下)に分けて掲載し、1節から5節までを(上)とし、6節から9節までを(下)とする。まず、2節では、P. Davidの学習をとまなう技術進歩モデルを検討し、3節ではこのモデルを用いて、1971-

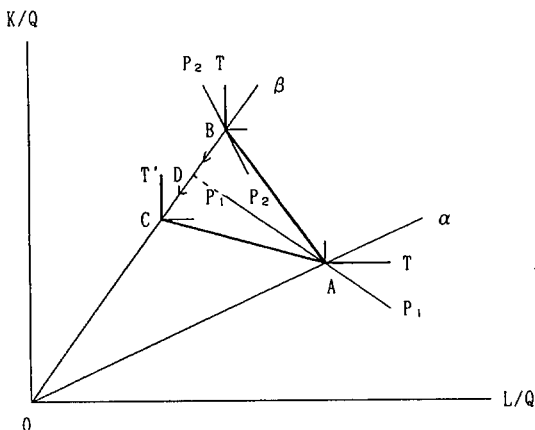
90年の期間における集積回路産業と自動車産業の技術進歩のパターンを検証する。4節では、生産要素価格と学習効果を明示的に導入し、本稿で用いる計量モデルとヒックス、ディヴィドの技術進歩の偏向性の関連について述べていく。このモデルの計量分析の結果は、(下)の7節で示すことにし、そこでは、日本の主要4産業の技術進歩のパターンに関する計測を行ない、その産業間の比較および産業内の時系列上の比較をつうじて、産業の発展段階と技術進歩のパターンの変化との関係についての考察を進める。また8節では、集積回路産業における20年間の技術の発展を後づけ、7節で計測されたこの産業の技術進歩のパターンの変化の要因をさらに詳しく検討する。最後に9節において、本稿のファイディングに関する要約を行ない、そのインプリケーションを述べることにする。

2 P. ディヴィドの学習・技術進歩モデル

P. David は次の二つの仮定にもとづいて、学習過程を含む技術進歩モデルを展開している⁷⁾。その仮定の第一は技術進歩の局所性である。すなわち、学習をつうじて得られる知識が局所化しているなら、生産関数のシフトは企業(ないし経済)が現時点で操業している地点に局所化される⁸⁾。図1は横軸、縦軸にそれぞれ労働係数 L/Q 、資本係数 K/Q を測り、2つの技術 α, β のみが利用可能な場合の生産フロンティアを示したものである。現時点での生産フロンティアが $TBAT$ で示されるとき、生産要素の現行の相対価格が P_2/P_1 で表される傾きをもつなら、単位費用を最小にする技術は β となる。

技術進歩の局所性を仮定すると、技術 β が何らかの理由で(例えば単位費用の最小化)ひとたび選択されたならば、技術進歩は技術 β の近傍でのみ起こり、技術 α のもとでは、それが選択されず、学習の機会がなかったために技術進歩は起こらない。このような状況では、図1のD点を越えるような技術進歩が起こった後の新たな生産フロンティアは、 $T'CAT$ で表されることになる。この新たなフロンティア上では、賃金・資本コストの相対価格が、傾き P_1/P_2 で表されよう低い水準に変化しても、費用最小化の観

図1 学習効果と技術選択



点からは技術 β が選択し続けられる。言い換えれば、十分大きな技術進歩とその局所性を仮定するときには、単位費用を最小にする技術の選択は、賃金・資本コスト比率の変動とは独立に行なわれることになる。

技術進歩の局所性の仮定のもとでは、図1における技術 β は学習効果によって、BからCへと左下の方向に向かって改良されていく。このときに問題となるのは、資本・労働比率がどのように変化していくかということである。この点に関して、P. ディヴィッドは次のような仮説をおいている。

「実際に生産を行なっている β 技術のもとで経験によって生み出される『新しい(技術上の)変異』の写像は、その密度が β 線の周りの極く近くにおいて最大となるような頻度分布を持つと仮定するのが最も自然である」⁹⁾。

この仮説のもとでは、資本と労働は、経験にもとづいて同等の割合でその質的効率性を増大していき、技術 β は図1の原点の方向に向かって進歩していくことになる。この局所的技術進歩の方向は資本・労働比率を一定にした技術進歩であり、この意味で中立的な技術進歩である。なお、この仮説が妥当せず、資本・労働比率が増大(減少)するような技術進歩をディヴィッドの意味で労働節約的(資本節約的)技術進歩とすることにする。

ここでは、のちの議論との関連でディヴィッドの技術進歩の中立性、偏向性をさらに厳密に定義しておくことにしよう。まず、労働係数および資本係数をそれぞれ l_c, k_c とし、それぞれは経験の大きさを表す量 I の関数であるとする。ここで、任意の $I > 0$ に対して $l'_c(I), k'_c(I) < 0$ と仮定する。すなわち、資本、労働係数は、それぞれ経験の蓄積とともに低下していくものとする。このとき、任意の $I > 0$ に対して、労働と資本係数の低下率（生産性の増加率）が相等しいとき、すなわち、

$$\frac{d \ln l_c(I)}{dI} = \frac{d \ln k_c(I)}{dI} \quad (1)$$

であるとき、技術進歩はディヴィッドの意味で中立的であると定義する。また、労働係数の減少率が資本係数のそれより絶対値で大きいとき（労働生産性の増加率が資本生産性のそれより大きいとき）、技術進歩はディヴィッドの意味で労働節約的であり、逆の場合には資本節約的であると定義する¹⁰⁾。

一般的に、労働、資本係数はともに経験変数の関数であり、この変数を媒介にして2つの係数の間には、関数関係が成立する。3節で見るとおり、係数 l_c, k_c の間に $k_c = a + bl_c$ (a, b は定数 $b > 0$) という線形の関係が想定されるとき、ディヴィッドの意味で技術進歩が中立的、労働節約的、資本節約的であるための必要十分条件は、それぞれ $a=0, a>0, a<0$ であることは容易に確かめられる。次節では、 $k_c = a + bl_c$ のタイプの回帰を行ない、集積回路産業と自動車産業の技術進歩のパターンの計測を行なうが、以上の議論から、ディヴィッドの意味での技術進歩のパターンは、次の基準にもとづいて判定されることになる。すなわち、回帰係数 b が正で有意にゼロと異なり、切片 a がゼロと有意に異なる場合には、その技術進歩は中立的であり、また係数 b に関しては同じ条件の下で、切片 a が正（負）で有意にゼロと異なる場合には、技術進歩は労働節約的（資本節約的）である。

3 日本の集積回路産業と自動車産業における技術進歩

(ディヴィド・モデル)

この節では、産出量の指標として、不変価格で測った粗産出量（生産額／デフレーター）を用いて、日本の集積回路産業と自動車産業の技術進歩のパターンの推定を行なう¹¹⁾。なお、資本と労働の計測方法は本稿をつうじて同一のものを用いており、データの出所および変数の計測の方法は、(上)の付録で示してある。

図2は、集積回路産業、自動車産業の1971年から90年までの労働係数、資本係数の動きをプロットしたもので、70年代、80年代、および71-90年の20年間にわたる2つの係数の動きの趨勢線も引かれている。2つの産業において、労働係数と資本係数の組はいずれも20年間をつうじて、図の右下から左下に向かって下落しており、労働生産性、資本生産性は、共に変動を伴いながらも、着実に向上していることが分かる。また、この図から、2つの産業において、70年代と80年代では、技術進歩の大きさ、方向性が大きく異なっていることが読み取れる。

これらの動きを統計的に検証するために、労働係数を説明変数とし、資本係数を被説明変数とする回帰分析を行なうことにする。回帰式は、

$$(K/Q)_t = a + b(L/Q)_t + u_t$$

と表される。ここで、 Q, K, L, u はそれぞれ粗産出量、資本ストック、労働投入量および攪乱項を、また添字 t は時間（年）を表す。ここでの回帰分析の目的は、2つの産業の技術進歩のパターンを分析することであり、労働係数が資本係数を決定するという因果関係を前提にするものではない。

表1は、2つの産業に関して、6年、10年、20年の期間について上の回帰を行なったもので、どの回帰式も、労働係数は資本係数の有意な説明変数であることを示している。このことは、2つの産業のいずれの期間においても、労働、資本に対して共通な要因（学習効果）が作用し、それらの効率性が同時に改善されてきたことを意味している。

図2 集積回路産業と自動車産業の技術進歩

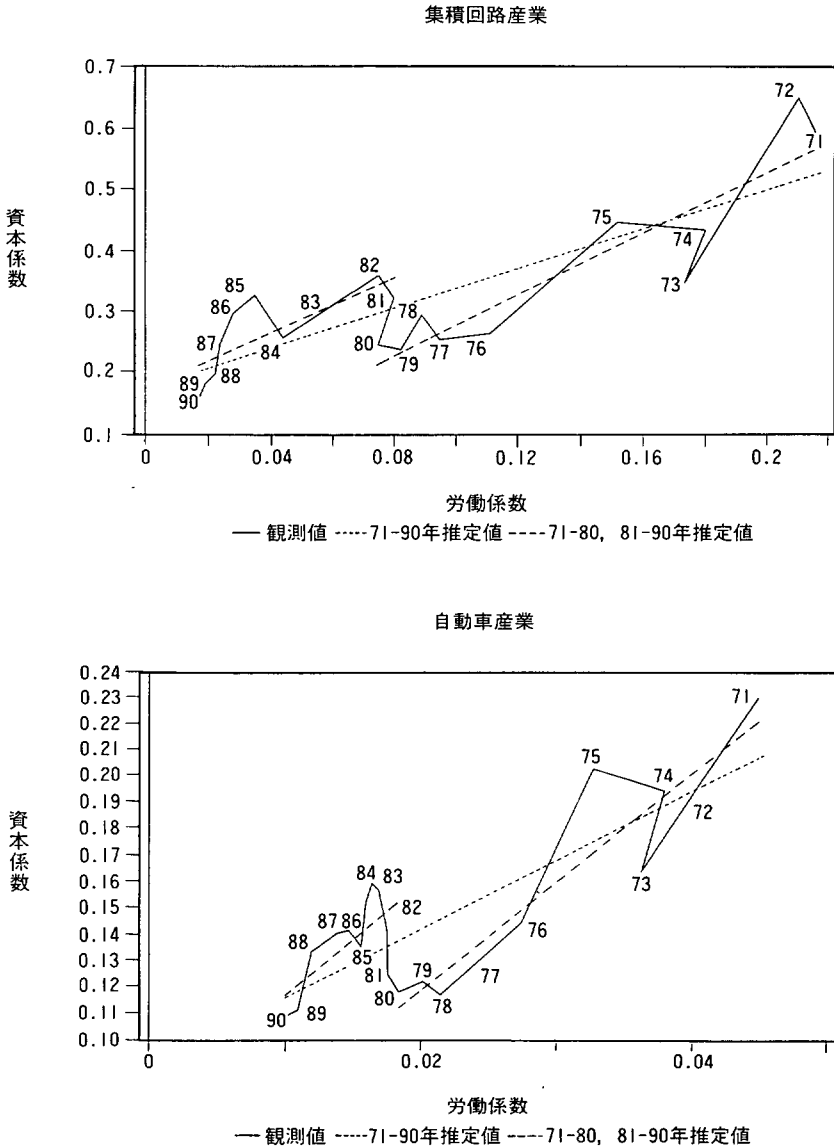


表1 技術進歩のパターン (ディヴィッド・モデル)

集積回路産業					
期間	切片	L/Q	TD	\bar{R}^2	$D. W.$
1971-90	0.171** (0.026)	1.646** (0.237)		0.713	1.394
1971-90	0.031 (0.432)	2.446** (0.289)	0.134** (0.037)	0.830	2.116
(A) 1971-80	0.026 (0.055)	2.506** (0.373)		0.831	
(B) 1981-90	0.174** (0.029)	2.242** (0.619)		0.574	
1975-80	0.028 (0.061)	2.568* (0.590)		0.782	
1985-90	-0.007 (0.026)	9.879** (1.043)		0.947	
自動車産業					
期間	切片	L/Q	TD	\bar{R}^2	$D. W.$
1971-90	0.090** (0.010)	2.626** (0.411)		0.677	0.900
1971-90	0.035* (0.015)	4.159** (0.467)	0.040** (0.010)	0.834	0.761
(C) 1971-80	0.036* (0.018)	4.146** (0.555)		0.859	
(D) 1981-90	0.073** (0.022)	4.298** (1.477)		0.454	
1975-80	-0.001 (0.028)	5.810** (1.130)		0.836	
1985-90	0.048* (0.019)	6.380** (1.497)		0.775	

(注1) 被説明変数は資本変数で、説明変数は労働係数 (L/Q) と期間ダミー変数 (TD) である。ダミー変数 TD は、71-80年ならば0で、81-90年ならば1である。

(注2) () 内は、推定値の標準誤差を示し、**、*は、回帰係数がそれぞれ有意水準1%、5% (片側) でゼロと異なることを示す。

2つの産業の6年を計測期間とする回帰では、自動車産業85-90年の場合を除いて、2節の基準からみると技術進歩はいずれも中立的になる。これは技術環境が安定的であった期間を選んで計測した結果であるが、特定の短期間をとれば、ディヴィッドの技術進歩の局所性仮説が妥当することが示されている。

また、表1から、計測期間が長くなるほど、労働係数の回帰係数は小さくなることを読みとることができるが、このことは次のように解釈することができる。短期においては、大きな技術変換がない限り、同一技術のもとで技術進歩は学習効果によって主導され中立的となる。しかし、長期においては、同一の技術(図1の α あるいは β)の下では、学習はその限界に到達するため、より学習の機会の大きい技術(より資本・労働比率の高い技術)への変換(α から β への変換)が起こり、新たに、その技術の下での学習による技術進歩が進展する。技術変換が起こる長期においては、学習効果による原点に向かう動きと、技術変換効果による資本・労働比率が増大する動きを同時に観測することになる。計測期間が長くなるほど、技術変換の頻度が大きくなり、両者の動きを合成した長期の回帰係数は小さくなるのである。

次に2つの産業の70年代と80年代の技術進歩のパターンの違いを見ておくことにしよう。集積回路産業では、表1の回帰式(A)、(B)の切片の推定値の符号は共に正であるが、(A)のそれは有意にゼロと異ならず、(B)のそれは有意にゼロと異なる。この結果を前節の基準にしたがって判定すると、集積回路産業の70年代、80年代の技術進歩はそれぞれ中立的、労働節約的であったことになる。集積回路産業では、このように70年代、80年代で技術進歩のパターンが大きく異なるが、この点の詳しい検討は本稿(下)の8節で行なうことにする。

この技術進歩のパターンの変化は、資本・労働比率(K/L)を時間(t)で回帰した、つぎの回帰式によっても確認することができる(カッコ内は標準誤差、以下同じ)。

$$\begin{array}{ll} \text{70年代} & \ln(K/L)_t = 0.872 + 0.023t, \quad \bar{R}^2 = 0.092. \\ & \quad (0.101) \quad (0.017) \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{80年代} & \ln(K/L)_t = 1.421 + 0.103t, \quad \bar{R}^2 = 0.747. \\ & \quad (0.132) \quad (0.021) \end{array}$$

この回帰の結果は、70年代においては、集積回路産業の資本・労働比率は時間とは無相関で、10年間をつうじてほとんど変動はなく、ほぼ一定の値をとっていたことを示している。しかし、80年代においては、資本・労働

働比率は、年率10.3%の高率で持続的に上昇している。この2つの回帰によっても、集積回路産業の1970年代と80年代の技術進歩は、それぞれ、ディヴィドの意味で、中立的、労働節約的であったことが確認できる。

引き続き、表1によって、自動車産業の技術進歩のパターンを見ておくことにしよう。表1の(C)、(D)式は、この産業の技術進歩パターンは、70年代の緩やかな労働節約的な傾向から、80年代の明かなそれへと変化していることを示している。また、この点を集積回路産業の場合を同じように、資本・労働比率の時系列での動きで見ると、次のようになる。

$$70 \text{ 年代} \quad \ln(K/L)_t = 1.534 + 0.028 t, \quad \bar{R}^2 = 0.490. \\ (0.055)(0.009)$$

$$80 \text{ 年代} \quad \ln(K/L)_t = 2.027 + 0.040 t, \quad \bar{R}^2 = 0.783. \\ (0.043)(0.007)$$

自動車産業においては、70年代においても資本・労働比率は年率で2.8%の有意な増加傾向を示し、80年代にはその増加率は4%で、増加傾向が一層強くなっており、ディヴィドの意味での労働節約的傾向がより鮮明になったことが確認できる。

表2は、表1の回帰式(A)、(B)、(C)、(D)について、次の4つの組み合わせで、2つの回帰式の切片、勾配、回帰全体それぞれが有意に異なるか否かの分散分析の結果を示したものである。その組み合わせは、(1)集積回路産業の70年代と80年代、(2)70年代の集積回路産業と自動車産業、(3)

表2 70年代と80年代、集積回路産業と自動車産業の比較 (F検定)

回帰の組	切片	勾配	回帰全体
IC 70/IC 80	13.410 (1,17)**	9.861 (16,1)	6.403 (2,16)*
IC 70/auto 70	3.340 (1,17)	1.007 (16,1)	8.452 (2,16)
auto 70/auto 80	17.943 (1,17)**	132.35 (16,1)*	2.166 (2,16)**
IC 80/auto 80	15.113 (1,17)**	3.515 (16,1)	7.381 (2,16)**

(注1) 数字はF-値を、(,)は分子、分母の自由度を示す。また**, *は2つの回帰の組の切片、勾配、回帰全体が等しいという帰無仮説が、それぞれ有意水準1%、5%で棄却されることを示す。

(注2) IC, AUTOはそれぞれ集積回路、自動車産業を、また70, 80はそれぞれ70年代80年代を示す。

自動車産業の70年代と80年代、(4)80年代の集積回路産業と自動車産業の4つである。ここでは、この分散分析の結果を見ながら、この節の分析の結果を要約することとする。

(1) 集積回路産業においては、70年代と80年代では、回帰式の切片、回帰全体は、それぞれ1%、5%水準で有意に異なる。この産業の70年代の技術進歩はディヴィドの意味で中立的であり、80年代のそれは労働節約的であることは、すでに見てきたが、分散分析の結果はこの結論を補完するものである。集積回路産業は70年代と80年代では異なった技術トラジェクトリ-上に位置していることが確認される。

(2) 70年代の集積回路と自動車産業の比較では、2つの回帰式は切片、勾配、回帰全体のすべてにおいて有意に異ならない。70年代においては、集積回路産業の技術進歩は中立的で、自動車産業のそれは弱い労働節約的な傾向があることをみてきたが、2つの産業の技術進歩のパターンの間には統計的な有意な差はないことが示されたことになる。この結果は、2つの産業の技術選択に対して、70年代には何らかの産業横断的な共通の要因が作用していたことを示唆している。

(3) 自動車産業においては、70年代と80年代では、回帰の切片は1%水準で有意に異なることが示されている。このことは、この産業では80年代に入り労働節約的な傾向がより強くなってきたことを意味する。

(4) 80年代においては、2つの産業の技術進歩はともに労働節約的になっているが、切片は集積回路産業の方が1%水準で有意に大きい。このことは集積回路産業では、80年代には頻繁に技術変換が起こり、短期日の内に自動車産業より労働節約的傾向が強くなったことを示している。

この節では、ディヴィドの技術進歩モデルを日本の集積回路産業と自動車産業に適用し、2つの産業の技術進歩のパターンを分析してきた。これらの産業では、労働係数も資本係数も共に時系列的に相関を持ちながら低下していることを見てきた¹²⁾。この節の分析は、ディヴィドの技術進歩の中立性の仮説は、一般的に成立するのではなく、特定の産業の特定期間、特に学習の

機会が大きい新産業の立ち上がりの時期に妥当することを示している。また、ここでは、産業の技術進歩は、その成熟化にともない、労働節約的傾向が強くなることが指摘される。

以上の点に関しては、経験変数、生産要素価格を明示的に導入した技術選択に関する計量モデルのもとづいて、本稿の(下)においてさらに詳細な分析を行なうこととし、次節ではこの準備のために、経験変数を導入した場合のヒックスの技術進歩の偏向性とその計測に関するレビューを行なうことにする。

4 生産要素価格、学習効果と技術進歩のパターン

2節で見たように、P. ディヴィドの技術進歩モデルは、技術進歩の局所性と学習による労働、資本係数の比例的低下という2つの仮説のもとづいて展開されている。ディヴィドの仮説のインプリケーションは、ひとたび選択された技術の下で学習の機会が十分大きいならば、賃金・資本コスト比率の一般的上昇傾向にもかかわらず、労働係数と資本係数は比例的に低下するということであった。2, 3節で展開したディヴィド・モデルでは、経験変数は労働係数と資本係数の媒介変数として、これら2つの経済変数の間の関係を導くのに用いられたが、経験変数自体と2つの変数の間の直接の関係は示されなかった。また、生産要素の相対価格は、局所性の仮定から、技術選択に直接影響を与えないとされたが、この仮説自体もまた検証されるべき仮説である。

以下では、これらの点を具体的に検証するために、技術進歩の局所性の仮定に代えて、生産関数はグローバルにシフトすると仮定する。本稿の(下)の分析では、この仮定のもとで、局所性仮説は技術進歩一般の状況にはなく、特定の産業の特定の発展段階に妥当することが示される。

ここでは、資本 K 、労働 L に関して1次同次で、かつ2つの生産要素に関してともに増大的な(augmenting)次のような生産関数を想定する。

$$Q = F(E_R K, E_L L) \quad (2)$$

ここで、 Q は産出量を表し、また、資本、労働の増大係数 E_K, E_L は、ともに経験の蓄積量 (I) の関数で、 $dE_K/dI, dE_L/dI > 0$ である。また産出量、資本、労働、および経験の蓄積量はすべて時間 t の関数である。簡単のために時間 t の記号は省略する。

代替の弾力性を σ で表すと、資本ストックと労働の増加率の差は、労働と資本の限界生産性の増加率の差と労働と資本の増大係数の増加率の差の加重平均として、次のように表することができる¹³⁾。

$$\hat{K} - \hat{L} = \sigma(\hat{Q}_L - \hat{Q}_K) + (1 - \sigma)(\hat{E}_L - \hat{E}_K) \quad (3)$$

ここで Q_L, Q_K はそれぞれ労働、資本の限界生産性を表し、記号 \hat{X} は、変数 X の時間 t に関する増加率、すなわち、 $d \ln X / dt$ を表す。

$\sigma = 1/(1 + \rho)$ と置き、積分定数を $(1 + \rho)^{-1} \ln(\alpha/\beta)$ とし、(3) を時間 t に関して積分すると、

$$\ln \frac{K}{L} = \frac{1}{1 + \rho} \ln \frac{\alpha}{\beta} + \frac{1}{1 + \rho} \ln \frac{Q_L}{Q_K} + \frac{\rho}{1 + \rho} \ln \frac{E_L}{E_K} \quad (4)$$

となる。さらに、資本、労働の増大係数 E_L, E_K の経験変数に関する増加率をそれぞれ λ_L, λ_K (一定) とすると、

$$E_L = \exp(\lambda_L I), \quad E_K = \exp(\lambda_K I) \quad (5)$$

であり、(4) 式は次のように表せる。

$$\ln \frac{K}{L} = \frac{1}{1 + \rho} \ln \frac{\alpha}{\beta} + \frac{1}{1 + \rho} \ln \frac{Q_L}{Q_K} + \frac{\rho}{1 + \rho} (\lambda_L - \lambda_K) I \quad (6)$$

ここで、資本、労働の限界生産性が、それぞれ実質賃金率 (w) と実質資本コスト価格 (r) に等しいものとし、(6) 式の第1, 2, 3項の係数をそれぞれ a, b, c と置けば、(6) 式は、次のように表すことができる。

$$\ln(K/L) = a + b \ln(w/r) + cI \quad (7)$$

(7) 式に、OLS (Ordinary-least square) を適用すれば、資本・労働比率、要素価格比率、経験変数のデータから、これらの変数間の量的関係を計測することができる。

さらに、生産関数の1次同次性の仮定から導かれた(4)式から、CES

(Constant-elasticity of substitution) 生産関数を導くことができる¹⁴⁾. 生産関数 (2) は, 生産要素 K, L に関して1次同次であるから,

$$F(E_K K, E_L L) = E_L L F(E_K K / E_L L, 1)$$

であり, $f(ck) = F(E_K K / E_L L, 1)$ と関数 f を定義する. ここで, $c = E_K / E_L$, $k = K / L$ である. この関数 f を用いると, $Q_L = E_L (f - ckf')$, $Q_K = E_K f'$ であるから, (4) は,

$$\frac{f - ckf'}{cf'} = \frac{\beta c^\rho k^{1+\rho}}{\alpha}$$

と書け, さらにこの式を書き直すと,

$$\frac{cf'}{f} = \frac{1}{k} - \frac{(\beta/\alpha)c^\rho k^{\rho-1}}{1 + (\beta/\alpha)c^\rho k^\rho}$$

となる. 積分定数を $\ln c - \rho^{-1} \ln \alpha$ として, 上の式を k について積分すれば,

$$f(ck) = (\alpha(ck)^{-\rho} + \beta)^{-1/\rho}$$

を導くことができる. 関数 f の定義から, 生産関数 F は (8) 式のように, CES 生産関数として表すことができ, さらに (5) 式を仮定すると (9) 式が導かれる.

$$Q = [\alpha(E_K K)^{-\rho} + \beta(E_L L)^{-\rho}]^{-1/\rho} \quad (8)$$

$$Q = [\alpha(K \exp(\lambda_K I))^{-\rho} + \beta(L \exp(\lambda_L I))^{-\rho}]^{-1/\rho} \quad (9)$$

逆に, CES 生産関数 (8) ((9)) から限界生産性 Q_L, Q_K を計算し, $\ln(Q_L/O_K)$ を求めた式を $\ln(K/L)$ について解けば, (4) ((6)) 式を導くことができる.

つぎに, ヒックスの技術進歩の中立性, 偏向性の判定基準について見ていくことにしよう. 技術進歩によって, 生産関数がグローバルにシフトするとき, 通常, 生産要素の分配率が変化するが, 中立的技術進歩とは生産関数のシフトの前後で, 各生産要素の分配率が変化しない技術進歩と定義される. 資本・労働比率を一定にしたとき, 資本分配率を変化させない技術進歩はヒックスの意味で中立的であり, また, 同じ条件のもとで資本分配率を増加(減少)させる技術進歩は労働節約的(資本節約的)と定義される¹⁵⁾.

生産関数の1次同次性を仮定し、代替の弾力性を σ 、資本分配率を π で表すと、 π の増加率は、

$$\hat{\pi} = (1-\pi)[\hat{Q}_K - \hat{Q}_L - (1-\sigma)(\hat{K} - \hat{L})/\sigma]$$

と表すことができる¹⁶⁾。資本・労働比率が一定であれば、

$$\hat{\pi} = (1-\pi)(\hat{Q}_K - \hat{Q}_L)$$

となり、 $\hat{\pi}$ の符号は、資本と労働の限界生産性の増加率の差($\hat{Q}_K - \hat{Q}_L$)の符号と同じになる。また、資本・労働比率は一定で、資本、労働の増大係数の増加率を λ_L, λ_K として、 $\sigma = 1/(1+\rho)$ と置くと、(3)式は次のように表せる。

$$\hat{Q}_K - \hat{Q}_L = \rho(\lambda_L - \lambda_K)(dI/dt)$$

本稿で用いる経験のストックを表す量は、すべて時間の単調増加関数であるから、 $dI/dt > 0$ である。したがって、 $\hat{Q}_K - \hat{Q}_L$ および $\hat{\pi}$ 符号は、 ρ と $(\lambda_L - \lambda_K)$ の符号によって決定されることになり、ヒックスの意味での技術進歩の中立性およびその偏向性は次のように分類されることになる。

- (1) $\rho = 0$ あるいは $\rho \neq 0$ でかつ $\lambda_L = \lambda_K$ ならば、中立的。
- (2) $\rho > 0$ のとき、 $\lambda_L > \lambda_K$ ならば、労働節約的(資本使用的)。
 $\lambda_L < \lambda_K$ ならば、資本節約的(労働使用的)。
- (3) $\rho < 0$ のとき、 $\lambda_L < \lambda_K$ ならば、労働節約的(資本使用的)。
 $\lambda_L > \lambda_K$ ならば、資本節約的(労働使用的)。

(6)と(7)式の比較から明らかのように、(7)式の a, b, c をOLSで推定することによって、パラメータ ρ および $(\lambda_L - \lambda_K)$ の値の推定値が得られ、ヒックスの技術進歩のパターンを判定することができる。

さらに(7)式を計測することによって、2節で定義したディヴィッドの技術進歩の偏向性も測定できることが示される。労働係数および資本係数をそれぞれ l_c, k_c とし、それぞれが経験変数を I の関数とすると、(7)式は、

$$\ln(k_c/l_c) = a + b \ln(w/r) + cI$$

と書ける。この式を時間 t で微分すると、

$$\hat{k}_c - \hat{l}_c = b(\hat{w} - \hat{r}) + c(dI/dt)$$

となる。技術進歩の局所性の仮定が成立すれば、生産要素の相対価格の変動は、資本・労働の選択に影響を与えないから、 $b=0$ であり、また、 $dI/dt > 0$ であるから、2節の定義によれば、(7)式の経験変数 I の係数 c が、0, 正, 負に応じて、技術進歩はディヴィドの意味で、それぞれ、中立的, 労働節約的, 資本節約的になる。したがって、(7)式を計測することによって、ヒックスの意味での技術進歩のパターンだけではなく、ディヴィドの技術進歩の局所性の仮説 ($b=0$)、そのパターンに関する仮説 ($c=0$) も同時に検証できることになる。

代替の弾力性を推定し、技術進歩のパターンを検証するには、(7)式に OLS を適用することで十分であるが、ここでは増大係数の増加率 λ_K, λ_L を個別に測定し、経験変数が資本、労働の効率化に対して与える影響を分離して計測したい。また事前の計測では、要素の相対価格 (w/r) と経験変数 (I) の間には、高度の多重共線関係があることが明らかになっている。ここでは、これらの問題に対処するために、P. Yeung and T. L. Roe (1978) による推定計測方法を採用することにする。

まず、CES 生産関数を表す (9) 式から、 t 時点での資本と労働の限界生産性を計算し、それぞれを実質資本コスト r_t 、賃金率 w_t とに置き換えて、さらにこれら2つの式の両辺の対数をとって、 $\ln(Q/K)_t, \ln(Q/L)_t$ について解けば、

$$\begin{aligned} \ln \frac{Q}{K} &= \frac{1}{1+\rho} \ln \alpha + \frac{1}{1+\rho} \ln r_t + \frac{\rho \lambda_K}{1+\rho} I_t \\ \ln \frac{Q}{L} &= \frac{1}{1+\rho} \ln \beta + \frac{1}{1+\rho} \ln w_t + \frac{\rho \lambda_L}{1+\rho} I_t \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで (10) を推定する回帰式を、

$$\begin{aligned} \ln(Q/K)_t &= \beta_1 + \beta_2 \ln r_t + \beta_3 I_t + u_{1t} \\ \ln(Q/L)_t &= \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 \ln w_t + \beta_3 I_t + u_{2t} \end{aligned} \quad (11)$$

とする。P. Yeung and T. L. Roe の方法の特徴は攪乱項 u_{1t}, u_{2t} が OLS の仮定を満たすものとして、(11) の2本の式を1つの回帰式として、OLS に

よってパラメーター β_1, \dots, β_5 を同時に推定する点にある。

(10)と(11)の比較から明らかなように、(10)式のCES生産関数のパラメーター $\alpha, \beta, \rho, \lambda_K, \lambda_L$ は(10)式の回帰の真の係数 β_1, \dots, β_5 の関数として次のように表せる。

$$\alpha = \exp(-\beta_1/\beta_3), \beta = \exp(-(\beta_1+\beta_2)/\beta_3), \rho = (1/\beta_3) - 1, \quad (12)$$

$$\lambda_K = \beta_4/(1-\beta_3), \lambda_L = \beta_5/(1-\beta_3).$$

β_i の推定値を $b_i (i=1, 2, \dots, 5)$ とすると、パラメーター $\alpha, \beta, \rho, \lambda_K, \lambda_L$ の推定値は(12)式の β_i に b_i を代入することによって求めることができる¹⁷⁾。また代替の弾力性 σ の推定値は b_3 である。パラメーター $\alpha, \beta, \rho, \lambda_K, \lambda_L, (\lambda_K - \lambda_L)$ の推定値の標準誤差は5節で示す方法で計算される。

5 推定方法と標準誤差の計算

この節では、(11)式の推定方法と(12)式から導かれるCES生産関数のパラメーター推定値の標準誤差の計算方法について述べることにする。

まず、データの数 n とし、推定する回帰式を

$$y = X\beta + u \quad (13)$$

とする。ベクトル u は攪乱項で $2n$ 個の要素を持ち、OLSの仮定を満たすものとする。ここで、 y, X, u, β は次のような要素を持つ。

$$y = \begin{pmatrix} \ln(Q/K)_1 \\ \vdots \\ \ln(Q/K)_n \\ \ln(Q/L)_1 \\ \vdots \\ \ln(Q/L)_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \ln r_1 & I_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \ln r_n & I_n & 0 \\ 1 & 1 & \ln w_1 & 0 & I_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \ln w_n & 0 & I_n \end{bmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} u_{11} \\ \vdots \\ u_{1n} \\ u_{21} \\ \vdots \\ u_{2n} \end{pmatrix}$$

$$\beta' = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5)'$$

P. Yeung and T. L. Roe (1978)においては、データ行列 X の第1列が $(1, \dots, 1, 0, \dots, 0)'$ となっているが、回帰係数をCES生産関数のパラメーター β に変換する式が異なるだけでは本質的な差異はない。

つぎに、CES生産関数のパラメーターの標準誤差の計算方法を示すことにする。CES生産関数(9)のパラメーターの推定値は、(12)式の β_i に回帰式

(13) の推定パラメーター b_i を代入することによって求められる。

ここで、簡単のために、 $\alpha, \beta, \rho, \lambda_K, \lambda_L$ の推定値を $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_5$ と表し、

$$\zeta_i = f_i(b_1, \dots, b_5) = f_i(b), \quad i = 1, 2, \dots, 5.$$

と書くことにする。 b の期待値を $E(b)$ で表し、 $f_i(b)$ を点 $E(b)$ でテーラー展開すると、

$$f_i(b) - f_i(E(b)) = \sum_{j=1}^5 f_{ij}(E(b))(b_j - E(b_j)) + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, 5. \quad (14)$$

ここで、 $f_{ij}(E(b)) = \partial f_i(E(b)) / \partial b_j$, $i, j = 1, 2, \dots, 5$. であり、 ε_i は剰余項を表す。 行列 $[f_{ij}(E(b))]$ を T と置き、 剰余項を無視すると、 (14) は、 行列、ベクトル表記で、

$$f(b) - f(E(b)) = T(b - E(b)) \quad (15)$$

と表される。 (13) 式のデータ行列およびその回帰の標準偏差の不偏推定値をそれぞれ $X, \hat{\sigma}$ で表すと、 (15) から、

$$\begin{aligned} E(f(b) - f(E(b)))(f(b) - f(E(b)))' &= T(b - E(b))(b - E(b))'T' \\ &= \hat{\sigma}^2 T(X'X)^{-1}T' \end{aligned} \quad (16)$$

と計算できる。 ここで、 (16) の最右辺の行列を W と定義する。

推定値 $\zeta_i (i=1, 2, \dots, 5)$ は、それぞれ平均を $f_i(E(b))$ とし、分散を行列 W の第 i 対角要素とする漸近的正規分布をする¹⁸⁾。 また、 ζ_i, ζ_j の共分散は行列 W の ij 要素 ($i \neq j$) によって与えられる。 したがって、パラメーター $\alpha, \beta, \rho, \lambda_K, \lambda_L$ の推定値 ζ_i の標準誤差は、行列 W のそれぞれの対応する対角要素の平方根によって与えられ、また $(\lambda_K - \lambda_L)$ の標準誤差は、同じ行列の第 ij 要素を w_{ij} とすれば、

$$\text{Var}(\lambda_K - \lambda_L) = w_{44} + w_{55} - 2w_{45}$$

の平方根によって与えられることになる。

付録 データと変数の定義

ここでは、本文で用いた変数の定義、その測定方法およびデータの出所について述べることにする。

Q 粗産出量

各年度の生産額(通商産業省『機械統計年報』)を国内卸売物価・品目指数(日本銀行『物価指数年報』)でデフレートして求める。

L 労働投入量

通商産業省『工業統計表』各年の従業員数による。

K 資本ストック

データは『工業統計表』の有形固定資産年初現在高、減価償却費、および『物価指数年報』の資本財物価指数である。

実質資本ストックの計算は次のように行なう。まず、名目の粗投資額を同年の資本財物価指数でデフレートし、各年度の実質粗投資を計算する(基準年1980年、以下同じ)。ここでは、名目粗投資は資本ストックの増加額に減価償却費を加えたものである。次に、各年度期首の実質資本ストックを以下の手順で計算する。最初に、分析期間の最初年度と最終年度である71年、90年年初の実質資本ストックを、それぞれの年の年初名目資本ストックを前年度の資本財物価指数でデフレートしたものと計算する。次に、71、90年度の実質資本ストックと t 年度の実質粗投資額をそれぞれ K_{71} 、 K_{90} および G_t とし、下の式から資本減耗率 δ が計算する。

$$K_{90} = \sum_{t=71}^{89} (1-\delta)^{89-t} G_t + (1-\delta)^{19} K_{71}$$

72~89年の実質資本ストックは、上で求めた δ を用いて、次の式に従って逐次的に計算する¹⁹⁾。

$$K_{t+1} = G_t + (1-\delta)K_t, t = 71, 72, \dots, 88.$$

AV 付加価値

工業統計表の付加価値額を同年の製造業デフレーター(経済企画庁編『国民経済計算年報』)でデフレートする。

CGI 累積粗投資

70年度期首の資本ストックに、各年度の実質粗投資額を累積加算し、各年度期首の累積粗投資額を算出する。ここでの、実質粗投資額は工業統計表

の投資総額から除却額を控除し、同年度の資本財物価指数でデフレートした値である。

CQ 累積粗産出量

70年度の粗産出量に、各年度のそれを累積加算し、各年度期首の累積粗産出量を計算する。

w 賃金率

工業統計表の現金給与総額を従業員数で除して、各年度の賃金率を計算する。

r 資本コスト

減価償却費率と利子率との和であり、減価償却費率は、工業統計表の減価償却費を期首の有形固定資産年初現在高で除したものである。また、利子率は、全国銀行約定平均金利を用いている。各年度の賃金率および資本コストは、1980年度のそれで除して指数化してある。

* 本稿の作成過程で、三浦良造教授からご教示をいただいた。また本稿の(下)での計算処理では情報処理センターの坂本直志、牧野晋両助手にお世話になった。記して感謝したい。

- 1) W. J. Abernathy (1978), pp. 71-2.
- 2) J. K. Arrow (1962), p. 156.
- 3) 2節の論議を参照
- 4) G. Dosi (1984), pp. 13-16, R. R. Nelson and S. G. Winter (1977), pp. 56-60.
- 5) Y. Hayami, and V. W. Ruttan (1971), V. W. Ruttan, et al. (1978)
- 6) E. Asher (1972). P. A. David, (1975).
- 7) P. David (1975), pp. 57-91.
- 8) A. B. Atkinson and J. E. Stiglitz (1969), p. 573.
- 9) P. David (1975), p. 69.
- 10) 生産要素の価格を一定にすると、ヒックスの技術進歩の偏向性の定義とここで定義したディヴィドのそれとは同等になる H. P. Binswanger (1978), p. 42.
- 11) 佐久間 (1986), A. Sakuma (1994) では、この節と同じフレームワークで1971-82年の期間について分析を行なっている。そこでは、集積回路産業の場合、80-82年期間の労働係数、資本係数のビヘイヴィアが70年代のそれとは

異なることを指摘している。この節の分析は、80年代のデータを加え、70年代と80年代の比較に重点をおいている。

- 12) 労働係数と資本係数が共に正の相関を持ちながら時系列的に低下していくことは、一般的な傾向とは言えない。イギリスの1954-80年の製造業部門の労働生産性と資本生産性の関係の分析結果では、ほとんどの産業で労働生産性は上昇しているが、資本生産性は低下していることを示されている (L. Soete and G. Dosi (1983), pp. 57-58).
- 13) E. M. Drandakis and E. S. Phelps (1966), Appendix I, p. 827.
- 14) K. J. Arrow, H. B. Chenery, B. S. Minhas, and R. M. Solow (1961), pp. 229-30.
- 15) H. P. Binswanger (1978), pp. 43-4.
- 16) E. M. Drandakis and E. S. Phelps (1966), p. 827.
- 17) 本稿では、(12) 式の β の推定式が、P. Yeung and T. L. Roe (1978) のそれとは異なっている。具体的な計測方法については5節参照。
- 18) H. Theil (1971), pp. 373-74
- 19) D. W. Jorgenson (1965), p. 57.

参考文献

- Abernathy, W. J. (1978), *The Productivity Dilemma: Roadblock to Innovation in the Automobile Industry*, (Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press).
- Arrow, K. J., H. B. Chenery, B. S. Minhas, and R. M. Solow (1961), "Capital-Labor Substitution and Economic Efficiency," *Review of Economics and Statistics*, Vol. 43 (3), 225-250.
- Arrow, K. J. (1962), "The Economic Implications of Learning by Doing," *Review of Economic Studies*, Vol. 29, (June), 155-73.
- Asher, E. (1972), "Industrial Efficiency and Biased Technical Change in American and British Manufacturing: The Case of Textiles in the Nineteenth Century," *Journal of Economic History*, Vol. 32 (2), 431-42.
- Atkinson, K. B. and J. E. Stiglitz (1969), "A New View of Technological Change," *Economic Journal*, Vol. 79 (315), 573-78.
- Binswanger, H. P. and V. W. Ruttan (eds.) (1978), *Induced Innovation: Technology, Institution, and Development*, (London: Johns Hopkins University

- Press).
- Binswanger, H. P. (1978), "Induced Technical Change : Evolution of Thought," in Binswanger, H. P. and V. W. Ruttan, (eds.), 13-43.
- David, P. A. (1975), *Technical Choice, Innovation and Economic Growth : Essays on American and British Experience in the Nineteen Century*, (London : Cambridge University press).
- Dosi, G. (1984), *Technical Change and Industrial Transformation : The Theory and an Application to the Semiconductor Industry*, (London : Macmillan).
- Drandakis, E. M. and E. S. Phelps, (1966), "A Model of Induced Invention, Growth and Distribution," *Economic Journal*, Vol. 76, 823-40.
- Hayami, Y. and V. W. Ruttan (1970), "Factor Prices and Technical Change in Agricultural Development : The United States and Japan, 1880-1960," *Journal of Political Economy*, Vol. 78 (5), 1115-41.
- Jorgenson, D. W. (1965), "Anticipations and Investment Behavior," in J. S. Duesenberry et al., (eds.), *The Brookings Quarterly Economic Model of the United States*, (Chicago : Rand-McNally), 135-49.
- Nelson, R. R. and S. G. Winter (1977), "In Search of Useful Theory of Innovation," *Research Policy* Vol. 6, 36-76.
- Ruttan, V. W., H. P. Binswanger, Y. Hayami, W. W. Wade, and A. Weber (1978). "Factor Productivity and Growth : A Historical Interpretation," in Binswanger, H. P. and V. W. Ruttan (eds.), 44-87.
- 佐久間昭光 (1986), 「イノベーションと経験効果のダイナミクス」, 今井賢一編『イノベーションと組織』東洋経済新報社, 207-38.
- Sakuma, A. (1994), "The Dynamics of Innovation and Learning-by-Doing : The Case of the Integrated Circuit Industry," in R. Minami, K. S. Kim, F. Makino and J. Soe (eds.) *Acquisition, Adaptation and Development of Technologies*, (London : Macmillan), 165-90, (forthcoming).
- Theil, H. (1971), *Principles of Econometrics*, (New York, John Wiley and Sons, Inc).
- Yeung P. and Roe T. L. (1978), "A CES Test of Induced Technical Change," in Binswanger, H. P. and V. W. Ruttan (eds.), 243-260.

(一橋大学教授)