

《論 文》

学習曲線の基礎

高 橋 伸 夫

1. はじめに

同じ製品を何個も作り続けていると、1 個当たりの生産コストが徐々に減少していくという現象が見られることがある。つまり、生産性の面で進歩が見られるというわけだが、より正確に言えば、単位当たりの生産コスト（あるいは単位当たりの直接労働時間）が、ある減少率で減少していくパターンは、これまで進歩関数 (progress function), 学習曲線 (learning curve), 経験曲線 (experience curve) などと呼ばれて研究されてきた。

このように、製造の経験を通して生産性向上の点で進歩が見られることは learning by doing（行動による学習）とも呼ばれ、今日では様々な製品分野で報告されてきているが、もともとは飛行機製造に関して発見されたのが最初だった (Dutton, Thomas, & Butler, 1984). 1925 年に米国のライトパターソン空軍基地 (Wright-Patterson Air Force Base) で司令官 Leslie MacDill の指揮の下で作成された報告書で、学習効果が最初に発見、報告されたといわれている。それから 11 年後の 1936 年になって、学習曲線の最初の論文が公開された。それが、後に広く引用されることになる Curtiss-Wright 社の主任技師兼部長の T.P. Wright の論文である。本稿でも後ほど詳しく取り上げる Wright (1936) は 1922 年から飛行機の累積生産機数にともなうコストの変化を調べて、累積生産機数と労働コストを両対数グラフにプロットすると、ほぼ直線になることを見出した。

製造機数が 2 倍になる毎に、1 機を製造するのにかかる労働コストが、一定の率、例えば 10%, 20% といった進歩率で低下することが発見されたのである。

この曲線は、後に、対数線形 (log-linear) モデルと呼ばれることになるが、より正確に表現すれば、累積生産量で n 番目の製品の単位当たり生産コストは、

$$f(n) = an^b$$

のような進歩関数で表現される。ここで、 a, b は定数であるが ($a > 0, -1 < b < 0$), $n=1$ のとき $f(1)=a$ となることから、 a は最初の製品の生産コストを表していることになる。また、生産コストではなく直接労働時間を使うことを好む研究者もいる。なぜなら、1 時間当たりの報酬は通常、時間的に変化するし、インフレの影響も受けるためである。本来は、直接労働時間を使う方を選択すべきであろうが、生産コストを使った研究が多いというのもまた事実である。

対数線形型の進歩関数では、累積生産量が 2 倍になると

$$f(2n) = a(2n)^b = an^b 2^b = 2^b f(n)$$

と単位当たりの生産コストが 2^b 倍になる。そこで、

$$p = 2^b$$

のことを学習率といい、 $1-p$ のことを進歩率 (progress ratio) という (例外的に、Dutton, Thomas, & Butler (1984) は $-b$ のことを progress rate と呼んでいるが、これは一般的ではない)。例えば、 $b = -0.322$ のとき学習率 $p = 0.8$ で 80% 学習曲線ということになる。こ

第1表 進歩率、学習率と b の関係

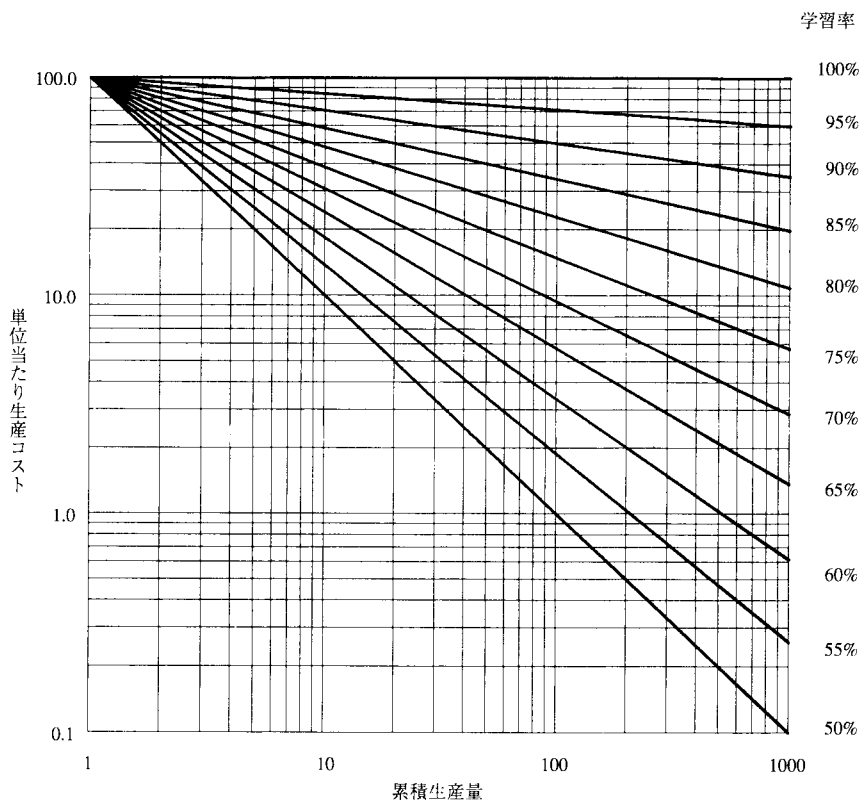
b	学習率	進歩率
0.000	100%	0%
-0.074	95%	5%
-0.152	90%	10%
-0.234	85%	15%
-0.322	80%	20%
-0.415	75%	25%
-0.515	70%	30%
-0.621	65%	35%
-0.737	60%	40%
-0.862	55%	45%
-1.000	50%	50%

のとき、累積アウトプットが2倍になる毎に20%の進歩率で単位コストが低減する。 $p=2^b$ は $b=\log_2 p$ のことなので、進歩率、学習率と b の関係は第1表のように求められる。両対数グラフを使った時に、学習率の違いによって、学習曲線の傾きがどのようになるのかは第1図で示した。通常のグラフでは第2図のよう

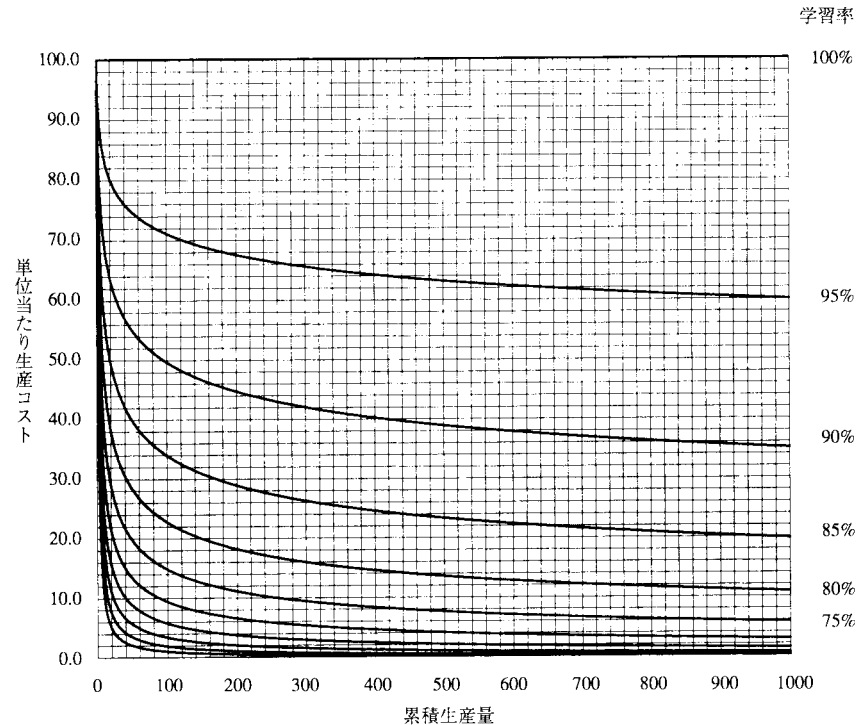
になる。どちらの図でも、最初の製品の生産コスト a を100としている。

本稿では、原点に立ち返って、こうした製造の現場において見出されてきた進歩関数すなわち学習曲線に的を絞って、考察を行いたい。ただし本稿では、単位当たり生産コストまたは単位当たり直接労働時間と累積生産量との関係を両対数グラフにプロットして描いたものを学習曲線と呼ぶことにし、それが関数形で表現されたものを進歩関数と呼ぶことにする。これは、本稿が引用している原論文との用語法上の整合性をできるだけ維持するためで、(A) 経営学系の文献では、両対数グラフを使って曲線を描いてみせ、対数線形型の形状が現れることを強調することが多いので、学習曲線という用語が広く用いられるのに対して、(B) 経済学系・工学系の文献では、回帰分析を使って関数を推定する研究が多いので、進歩関数という用語が広く

第1図 学習率と学習曲線（両対数グラフ）



第2図 学習率と学習曲線（通常のグラフ）



用いられることに配慮したものである。

また本稿では「経験曲線」という用語を原則として用いない。なぜなら、少なくともPPM以降、経験曲線は「経験則」とであるというニュアンスが強すぎるからである。産業、企業、製品を問わず、学習率80%前後の対数線形型経験曲線が既知の事実であるかのような扱いは明らかに行き過ぎである。本稿の目的も、本来、その真偽を含めて研究対象とすべきと主張することにある。PPM以降の経営学では、ややもすれば応用面ばかりが強調され、経験曲線自体は経験則として前提にされてきた。そのために、学習曲線に関する多くのかつ貴重な基礎研究の知的財産が、今日の経営学では、まさに失われた世界のようにほとんど忘れ去られてしまっているのである。

しかし学問的にも、適切な応用を図るためにも、学習曲線という現象それ自体を解明する基礎研究こそが重要なのである。そしてこれまでのところ、少なくとも、(a) なぜ対数線形型の

曲線になるのか、またいくつかの派生型の存在が指摘されているが、なぜそうした現象が生じるのか、その理由と条件を理論的に解き明かす分析、(b) 進歩率の差がどのようにして生じるのかの分析、については既に基礎的な研究が積み重ねられてきている。

本稿の目的は、学習曲線に関するこれらの「失われた」基礎研究を整理して、その成果を提示することにある。本稿の結論は、基礎研究からの理論的帰結として、

- ① 製品の製造プロセスが多数の工程または作業に分割されていて、そのそれぞれで、より低コストで済む技術的代替案が探索されている時には、対数線形型の学習曲線を描いて生産コストが低減する。

ただし、これは、製品の製造技術が工程レベルあるいは部品レベルで考えても、既存のものが全く使われていない「完全な新製品」の場合に限られる。その意味では、20世紀に入ってから

ら登場した飛行機は、Wright (1936) が観察を始めた 1922 年頃には、まだ量産が始まったばかりで、かなり理想的な状態に近かったことになる。しかし、通常はこのようなことはありえないので、その場合には、次の二つのことがいえる。

- ② 学習曲線は、累積生産量が増えてくると対数線形型で近似されるが、厳密には初期凹性が見られるはずである。すなわち、 $f(n)=an^b$ ではなく、 $f(n)=a(n+k)^b$ の形になるはずである ($k>0$)。
- ③ すべての部品、完成品について、進歩率が同じ（すなわち、 b が同じ）であることは、論理的にありえないし、実証データでも否定されている。言い換えれば、進歩率はそれぞれの製品に固有のものである。

これらは、これまで経験曲線の分野で暗黙のうちに信じられ、普及してきた「迷信」を否定するものであり、①②は第 3 節で、③は第 4 節で論証される。実は②③どちらの現象も、進歩のプロセスを最初からではなく、途中から観察しているために見られる現象である。

そしてこの他にも、(c) 学習曲線のもっている心理的効果、より最近ではさらに (d) 異なった組織の間でも学習は移転するのか、といった点に関しても研究が行われてきている。本稿では、これらについてもそれぞれ第 5 節、第 6 節で考察することにしよう。実は、経験曲線については、なぜ対数線形型の形状をとるのかという問題以外にも、次のような疑問が出されていた (cf. Abernathy *et al.*, 1983, p. 19 邦訳 p. 41)。

- (i) すべての競争状況の組合せや、すべての産業、さらに、ある産業に属するすべての企業に妥当するのか。
- (ii) 経営者が精力的に働かない場合にも妥当するのか。
- (iii) 経験のもたらす便益は、設備や技術を買うことによって獲得可能なのか。

ところが、そのいずれについても、「失われた」基礎研究が既に答を出していたのである。(i) については ③(第 4 節) のことであり、(ii)(iii) についてはそれぞれ (c) の第 5 節、(d) の第 6 節が対応している。

しかし基礎研究の整理をする前に、まずは経験曲線の迷信が生まれるまでの学習曲線の応用の歴史を概観しておこう。それは基礎研究のまるでパラレル・ワールドとして存在してきた。

2. 学習曲線の発見と応用

学習曲線の発見と進歩率の推定

学習曲線に関する最初の文献である Wright (1936) は 1922 年から飛行機の生産機数にとりなうコストの変化を調べてみた。グラフにすると、累積機数が増えるにしたがって、労賃の原材料費に対する比率(=労賃/原材料費)が当初 80% だったものが、150 機で 20% にまで低下しているとともに、同じような曲線でコスト自体も低下していた。このように、Wright (1936) はもともと労働コストや直接労働時間に関する学習曲線についてではなく、コスト全体に関するこうした現象が起こる要因についての考察を行ったのである。そのうち学習曲線効果に該当するのは、各種要因の中の一つ、量の効果 (effect of quantity) に関する考察の部分で、それは次のようなものであった。

Wright によれば、労働者が実践を通じて熟練していくことはよく知られている。特に、動作の経済性について時間研究が行われた時はそうである。このことは特に組立作業についていえる。累積生産量が増えれば、労働者が狼狽し混乱するような変化も減ることが予想される。機械機具を設備して量産態勢をとることもできるし、それと手続の標準化により、あまり熟練していない労働者を使用することができるようになる。機械・製品と設備の段取り時間も減少する。累積生産量 n と単位当たりの平均労働コスト c との関係を実際のデータで調べると、両対数グラフにプロットすると直線になり、傾き

$$b = (\log c) / (\log n)$$

はほぼ $b = -0.322$ であった。つまり、両者の間には、 $c = an^b$ で描かれる関係があるという証拠である。そして、この曲線では、どの機数からでも飛行機の数が増えたと、単位当たりの平均労働コストは 80% になるのである。ただし Wright の原論文では単位当たりの平均労働コストではなく、その逆数 $F = 1/c$ が使われていた。そのため原論文の両対数グラフの縦軸は $1/F$ になっているし、 $(\log F) / (\log n) = 0.322$ と正負の符号も逆になっていた。その点だけが、今日の一般的な進歩関数とは異なる。）

こうして Wright (1936) によって発見された学習曲線は、第二次世界大戦中、戦争遂行上必要な船舶、航空機の製造に必要なコストと時間を予測する方法を探していた米国政府の契約担当者によって関心がもたれ始めた。船舶に関しては、戦争中に政府の造船契約担当者によって作成されたデータに進歩関数を当てはめ、進歩率を求める試みが Searle (1945) により発表されている。航空機に関しては、1949 年までに、Alchian が RAND Corporation 向けに、第二次世界大戦中の航空機製造のデータを使って Wright の現象との関係を分析した論文を完成させていたが、軍事機密扱いのデータを使っていたために 1963 年になってようやく Alchian (1963) として公開された。戦後の工作機械については、Hirsch (1952; 1956) の研究もある。この他にも、学習曲線に関するレポートや企業の内部文書が多数存在していたこともわかっているが、本稿では学術雑誌に公表されたものだけが扱われる。ただし、第 4 節で後述するように Alchian にせよ Hirsch にせよ、いずれも対数線形型の曲線は現れたものの、進歩率には大きなばらつきが見られたことを明確に指摘していたことには注意がいる。

経営のツールとしての学習曲線の応用

こうした基礎研究が行われている頃、ほぼ同時並行して学習曲線の応用が始まる。製造業者

にとっては、単位当たりの労働時間やコストを予測できればありがたいわけだが、Andress (1954) は、第二次世界大戦時に航空機産業で開発された学習曲線を使えば、予測は容易かつ精確になるとして、学習曲線の応用を唱えている。そこでは、基礎研究に見られるような学習曲線に対する醒めた目ではなく、学習曲線の信頼性をことさら強調して売り込もうとする姿勢が見られる。Andress (1954) の論文は、こんなエピソードで始まる。

学習曲線が航空機産業以外の製造業にも共通して使えることは、偶然の出来事で示された。第二次世界大戦中、家庭電器メーカーの経営者が西海岸の大手航空機メーカーの経営者と出会った時、航空機メーカーの経営者が、100,000 台目の冷蔵庫のコストを 10% の精度で当てるという賭けをして、鉛筆と定規と両対数グラフだけで、航空機同様に学習曲線を使って、162.50 ドルとはじき出し、賭けに勝ったのである。実際のコストは 162.00 ドルで、50 セントしか違わなかったという。

学習曲線はなぜそれほど信頼に足るのか。Andress (1954) によれば、軍 (armed services) が Stanford Research Institute のスポンサーになって、第二次世界大戦で作られた航空機の大部分をカバーした直接労働投入量の統計的研究を行わせた。戦闘機、爆撃機等の様々なカテゴリーで平均 (average experience) を求めると、最初の 1 機の労働量は異なるものの、学習率はほぼ同じ 80% だと結論したというのである。この結論は、同様の分析をした Alchian (1963) の結論とは全く異なるので困惑するが、Andress (1954) は、このことをもってして、学習曲線の信頼性を主張し、その用途として、①価格設定、②内製・外注の決定、③生産計画、④資金計画などを挙げるのである。実際の使用例としても、①では戦後の空軍と航空機メーカー (Standard Aircraft Company)、朝鮮戦争勃発時の陸軍と銃身メーカー (Webster Machine Company) との間でそれぞれ行われた学習曲線を使った価格交渉の例、②では

1952年の航空機メーカー (Lee Aircraft Company) の例が取り上げられている。そして、航空機産業以外でも、エレクトロニクス、家電、住宅建設、造船への適用は有効であり、また機械も既に適用例があるとしている。しかし、直接労働がほとんどない基礎化学、プラスチック、石油精製等にとっては学習曲線はあまり価値がないとも述べている。

それを引き継ぐように、Hirschmann (1964) は、基本的な議論を Andress (1954) に依拠しながら、彼が学習曲線が適用できない産業の典型例だと考えていた石油精製を取り上げた。個々の触媒分解装置 (catalytic cracking unit) は時間とともに階段状に能力が向上し、年を経た触媒分解装置ほど、達成能力が設計 (計画) 能力をより上回るようになることをデータで示した。累積処理バレル数と10万バレルを処理するのに要する日数とを両対数グラフにプロットすると直線になり、この他、装置停止後の立ち上げに要する時間、保守と停止に要する労働時間、能力1バレル当たりの建設コストも年とともに減少する傾向がある。産業全体についてみると、米国の石油精製産業全体では、1860年以来的累積精製量 (バレル) と1バレル精製当たりに要する平均直接労働時間を両対数グラフにプロットすると学習曲線を示唆する直線的な関係が見られる。さらに電力、製鉄でも同様に産業全体で学習曲線を示唆する関係が見られたのであった。

ただし Andress (1954) は、組立作業は機械作業に比べて、改善が速いので、航空機産業の場合、直接労働投入量の75%が組立作業なので学習率は80%程度であるが、例えば、組立作業と機械作業の割合が1:3と逆転すれば、改善率は10%に低下し、学習率は90%程度になるだろうとも記述していた。にもかかわらず、Hirschmann (1964) は、80%という数字が色々な曲線で出現することをことさら強調した論文になっている。

しかし、学習曲線に関する広範な文献レビューを行った Yelle (1979) によれば、1960

年代までは、進歩関数、学習曲線の文献のほとんどは軍事的応用とそれに続く産業でのコスト管理への応用に焦点を当てており、いずれも限定された範囲内での応用を扱っていたとされる。学習曲線をトップ・マネジメントの政策決定に応用するという点でのパイオニアの仕事が、Conley (1970) と Abernathy & Wayne (1974) である。

1970年にボストン・コンサルティング・グループ (BCG) によって、レポート “Perspectives on experience” が出されたとされるが、一般には入手が困難なので、当時のBCGの副社長 Patrick Conley の論文 Conley (1970) がよく引用される。そこでは、学習曲線効果 (learning-curve effect) は直接労働課業だけに特有のものではなく、新工場の立ち上げやオートメーション化された作業に至るまで、企業内の大部分の活動に応用できると主張された。そして、コストの各要素が学習曲線効果で減少することで、総コストも合成学習曲線 (composite learning curve) に従い、生産量が倍になるごとにある固定した比率で低減すると考えられるとしたのである。こうして、Conley (1970) は、総コストを考えることにし、この経験曲線 (experience curve) をコストの統制と予測にとどまらず、価格と利益の予測に用いることを主張したのである。この論文はBCGのレポートの多くのアイデアを反映したものであるといわれ、既にBCGマトリックスの原形も取り上げられている。BCGは経験曲線を使って、競争下の製造コストを評価する。最も多くの単位を生産している生産者が学習によって最も低い単位コストで生産できるというのが主な仮定である。このことから、戦略的観点からは、成功する企業は、その製品の最大の生産者となって市場支配を達成する戦略をとっている企業ということになる。

こうしてBCGがマーケティング政策に焦点を当てて議論しているのに対して、Abernathy & Wayne (1974) は、大企業のトップ・マネジメントの製造政策に関する論文である。

彼らはフォード自動車のモデル T, モデル A の経験を、政策決定行動を説明するためにいかに経験曲線を使っているかの例として使っている。フォード社は学習現象を追求し、価格競争には成功したが、このことで組織的に硬直し、自動車に対する消費者の嗜好が変化した時にそれに即座に反応できず、結局はゼネラル・モーターズに長期にわたって首位を明け渡すことになってしまったのである。

Conley (1970) によって提出された経験曲線のアイデアは、その後 Nathanson (1972) によってテストされ、石油化学産業における競争の武器として価格予測に焦点が当てられる。さらに、BCG によって PPM (product portfolio management) として洗練された手法に仕上げられたことで、経験曲線による分析は、経営学分野、特に経営戦略論の分野で頻繁に見られるようになった。しかし学習曲線の基礎研究の成果を踏まえれば、もともと真偽のほども定かではない産業レベルでの対数線形型経験曲線を前提として、価格戦略を組み立てることには無理がある。そもそも、Hirschmann (1964) は Andress (1954) を、さらに Conley (1970) は前二者を引用しているが、これらの論文は、Hirsch (1956) や Alchian (1963) といった、学習率のばらつきを明確に指摘した基礎研究を引用すらない。また、経験曲線という用語が登場したのも Conley (1970) が最初ではない。彼は引用していないが、“experience curve” という用語自体は、遅くとも既に Hall (1957) が航空機産業における学習曲線に対して用いている。自分達にとって都合の良いデータや主張だけを引用し、そうではないものを無視するという姿勢が、その後の応用研究を歪めてしまったことは否定しきれない。そのため、基礎研究と応用とはまるでパラレル・ワールドのように存在することになり、PPM の経験曲線以降の世代にとって、まさに「失われた」基礎研究となってしまったのである。

価格を使った学習曲線の屈折

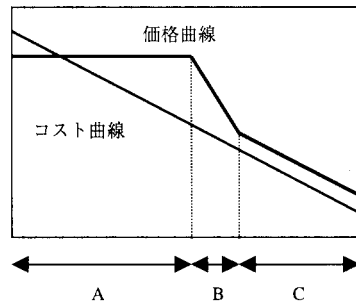
今日、経営学の多くの文献で登場する経験曲線は、単位当たりの生産コストではなく、価格を用いて描かれている。しかし、そもそも価格を使って学習曲線を描こうとすると、結局、市場での競争状況が影響して、曲線が直線にはならず屈折してしまい、分析には適さない。Conley (1970) によれば、一般に、価格で見た経験曲線は屈折し、コストで見た経験曲線との関係で示すと、新規参入者に対する価格政策の有無によって、次の二つの形のどちらかになることが見出されたとしている。しかも①の方が支配的だとされ、トランジスタやポリ塩化ビニールの例が示されている。

- ① A, B, C の三つのフェーズに分かれている。まず、当初は、導入価格は初期コストよりも幾分低く設定される。この価格水準はフェーズ A の間はほとんど下がらない。この間に累積生産量が増えてコストはどんどん低下するので、次第に大きな利益が出るようになる。しかし、この導入価格の維持が長過ぎると、今度は新規参入者が現れ、マーケット・シェアを食われることになる。そして、攻撃的な競争者が価格を主要な武器としてマーケット・シェアを争うようになり、フェーズ B に入る。こうした価格競争で価格が急激に下落して、コストを上回る適正なほどよい水準に到達すると、フェーズ C に入り、その後はコストの低下に沿って価格も低下するようになる。こうして、価格曲線の傾きは第 2 表のように変化する。
- ② 二つのフェーズに分かれている。最初は①のフェーズ A と同じである。しかし、導入価格で利益が出るようになると、新規参入を思いとどまらせるために、早い時期から①のフェーズ C と同様に、コストの低下に沿って価格も低下させるようになる。

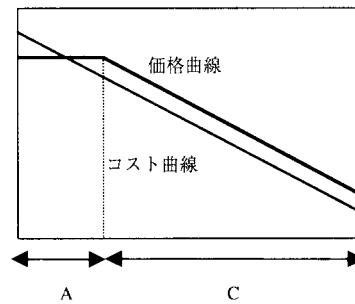
縦軸に単位価格・単位コスト、横軸に累積生産量をとった両対数グラフで、①②の理想的な曲

第3図 価格曲線の屈折

①の理想的曲線



②の理想的曲線



第2表 価格曲線のフェーズと屈折

フェーズ	価格曲線の傾き
A	ほとんど下がらない
B	約60%の急勾配
C	70~80%: コスト曲線と同程度

線を描くと、第3図のようになる。

3. 学習曲線の探索理論的基礎

それでは、学習曲線はなぜ対数線形型をしているのだろうか。実は、Wright (1936) の対数線形モデルがこれまでも、そして現在でもまだ、断然もっとも広く使われているモデルであるにもかかわらず、どんな状況にあっても Wright の対数線形モデルがいつも最良の適合モデルとなっているというわけではない。Carlson (1961) は、Wright の発見以来、学習曲線の多くのバージョンが提案されていることを紹介している。しかし、進歩関数の関数形については、いくつかの先行研究があるものの、いずれも進歩関数の性質の一部を説明しているだけで、しかも多くのモデルが、人間行動や技術的なものとは直接的に関係していないという欠点があった (Muth, 1986)。

一方、Greenberg (1971) は事故の発生について、Kneip (1965) は故障の発生についても、対数線形モデルが使えることを見出している。実は Hirschmann (1964) でも同様の指摘がなされていたが、このように生産コストや直接労

働時間ではない他の領域でも対数線形型の曲線が現れるということは、Wright (1936) が挙げていたような理由、すなわち、製造方法が変化したこと、生産量が増えることを期待して量産態勢をとり、大量生産に合ったデザインを採用したこと、といった製造過程固有の要因だけではなく、こうしたプロセスに共通した何らかのロジックが存在することを示唆している。

こうした中で、どうして学習曲線が対数線形型の形状をとるのかについて、その理論的基礎を明らかにする画期的な研究が、Wright (1936) 以来ちょうど50年を経て Muth (1986) によって発表された。Muth (1986) によれば、

- (a) 進歩関数については、 n 番目の製品にかかる労働時間または製造コスト c との関係プロットした曲線が、 $c = an^b$ で表される幂関数 (power function) の形で近似できる対数線形性。

という Wright (1936) 以来の対数線形型の基本モデルの他にも、

- (b) 初期凹性 (initial concavity)
 (c) 改善の不規則性 (irregularity of improvement)
 (d) 高原効果 (plateau effect)

などの性質・現象も分かっている。

そこで、Muth (1986) は探索理論の立場から、こうした学習曲線の形状の理論的根拠を明らかにしている。本稿ではまず (a) 対数線形型

の基本モデルに関して、Muth (1986) のモデルの一部を修正して、技術的代替案の母集団からの無作為探索 (random search) を行うことで、より低コストの技術を採用していくという単純なモデルを考え、進歩関数が冪関数になることを示そう。このことで、対数線形型学習曲線が生じる理論的な根拠と条件を明らかにできる。さらにその基本モデルの拡張によって (b) 初期凹性も説明できることを Muth (1986) を参考にしながら示すことにしよう。(c)(d) についても探索理論の観点から説明ができる。(d) については後でさらに詳しく検討する。

(a) 対数線形型の基本モデル

ここでの基本的なモデルは、次の仮定に基づいている。

仮定 1. 製造コストの低減は、技術的 (あるいは経営的、行動的) 代替案の母集団からの独立な無作為抽出つまり無作為探索によって、より低コストで済む技術的代替案が発見された場合に生起する。

仮定 2. 探索は生産活動によって促される。つまり、技術的代替案の母集団から無作為抽出された標本の大きさ n は累積生産量 y に比例する。このとき、 i 番目の技術的代替案の抽出は第 i 期に行われたものとし、期数 i は累積生産量 y に比例して増大するものとする。

仮定 3. 製造プロセスは一つかそれ以上の製造作業 (operation) から構成されている。各製造作業において、技術的代替案に関する探索が独立に行われ、より低コストの技術的代替案が発見されたならば、即座に採用され、次の期には効果を現し、コスト低減が達成される。 (下線部が Muth モデルからの修正部分である)

そこで、労働時間または製造コスト x が n とどのような関係にあるのかを考えてみよう。いま、ある作業について、第 $n-1$ 期までに累積生産量に比例して $n-1$ 個の技術的代替案が探

索されたとしよう。そのうち第 i 期に探索された技術的代替案による製造コストを確率変数 $X_{(i)}$ で表す。このとき第 n 期に可能となる最小製造コストを確率変数 X_n で表すことにすると、これは直前の第 $n-1$ 期までに探索された $n-1$ 個の独立同分布の確率変数 $X_{(i)}$, $i=1, \dots, n-1$ のうちの最小値で表されることになる。つまり各確率変数 $X_{(i)}$, $i=1, \dots, n-1$ の分布関数を $F(x)$ で表すと、 X_n の分布関数 $G_n(x)$ は、

$$\begin{aligned} G_n(x) &= \Pr\{X_n \leq x\} = 1 - \Pr\{X_n > x\} \\ &= 1 - \Pr\{X_{(1)} > x, X_{(2)} > x, \dots, X_{(n-1)} > x\} \\ &= 1 - (\Pr\{X > x\})^{n-1} = 1 - (1 - F(x))^{n-1} \end{aligned}$$

となる。

もし確率分布が区間 $[0, 1]$ の一様分布ならば、 $F(x) = x$ で

$$G_n(x) = 1 - (1 - x)^{n-1}$$

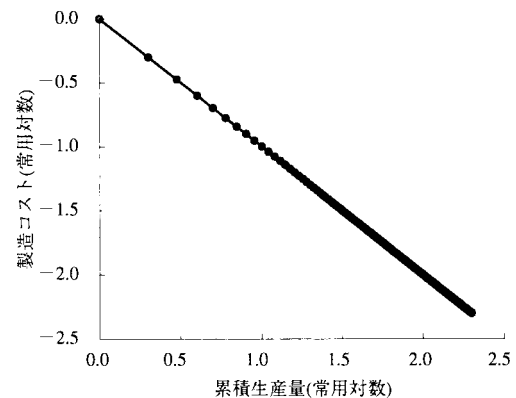
したがって、

$$E(X_n) = 1/n = n^{-1}$$

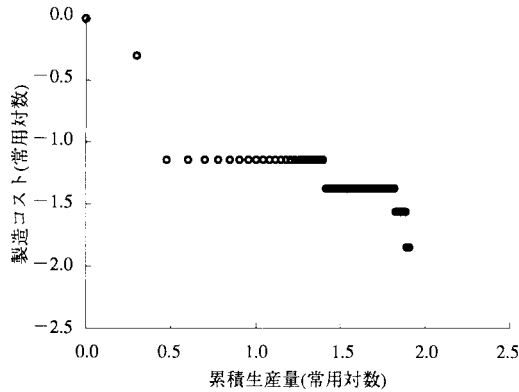
となる。このとき両対数グラフで第 2 期以降の製造コストの期待値をプロットすると、完全に直線上にのることになる。第 1 表と見比べればわかるように、これは進歩率、学習率ともに 50% の学習曲線を描くことになる。第 1 期については、まだ技術的代替案の探索の結果は現れておらず、コストは最大の状態であると考え、初期状態は分布の上限 $X_{(1)} = 1$ であると仮定するならば、完全に同じ直線上にのることになる (第 4 図)。

このことを実際にシミュレーションで確かめ

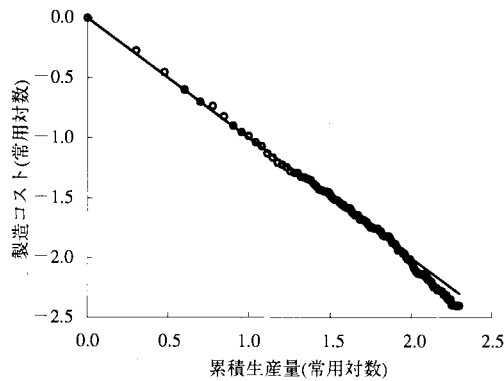
第 4 図 基本モデルの期待製造コスト



第5図 個々の作業レベルでの進歩関数のシミュレーション



第6図 作業数100の製造プロセスの進歩関数のシミュレーション



てみよう。いま製品の製造プロセスを初期コストで100等分するような100の作業に分割したと仮定しよう。各作業では独立に改善作業が行われる。このとき、ある一つの作業を抜き出して、その進歩関数を見てみると、階段状のものになる（第5図）。しかし、100の作業を組み合わせた製造プロセス全体で見ると、変化はより滑らかになり、進歩関数は直線に近づくようになる（第6図）。一様分布の場合だけではなく、理論的には、大標本理論では、 $F(x) = cx^k$ のタイプの分布関数（ $k=1$ のときは一様分布になる）のとき、進歩関数は冪関数の形になることが知られている（Muth, 1986）。そこで、次の命題が得られる。

命題1. いま、ある製品の生産活動が十

分多くの作業に分割されていると仮定する。

(i) 個々の作業で、より低い製造コストで済む技術的代替案が無作為探索されるとき、その探索回数が累積生産量に比例して増大するならば、その製品の単位当たり製造コストは累積生産量の冪関数で表される。(ii) 個々の作業で、あるパフォーマンス z を向上させる技術的代替案が無作為探索されるとき、その探索回数が、ある変数 y に比例して増大するならば、 z は y の冪関数で表される。

以上のことから、まず(i)では、このモデルによって、進歩関数が冪関数の形になることが説明できたことになる。しかも進歩関数が冪関数になるための条件も明らかになった。そして(ii)からは、製造コストに限らず、各種のパフォーマンスが、一体どのような変数との間で冪関数の関係を示すことになるのかを、これらの条件に照らして探ることが出来るようになる。

さらに上述の基本モデルを若干拡張することで、進歩関数の次のような性質も説明することができる。

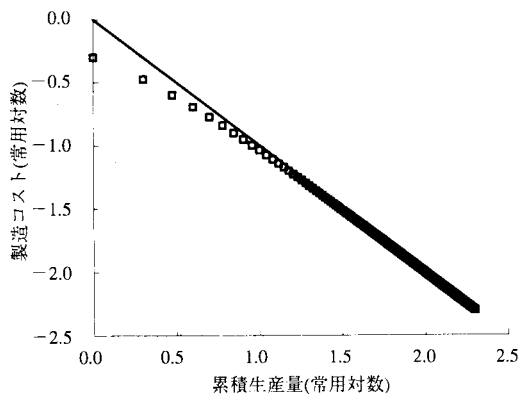
(b) 初期凹性 (initial concavity)

既存研究の中には、製造開始の初期の頃に下向きに凹になる傾向をもったデータが見つかることがある。正確には、 $f(n)=an^b$ ではなく、 $f(n)=a(n+k)^b$ のようになる（ $b<0$ ）といわれている。この k （ $k>0$ ）の部分は、(a)基本モデルの仮定2で、最初の製品を作る前に、既に類似の製品での経験や事前計画という形で探索が始まっていることを許せば、その事前の探索を表していると説明することができる。

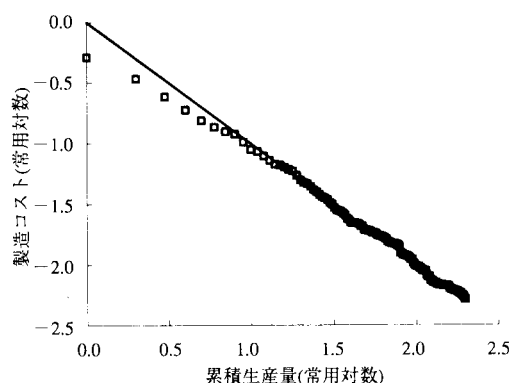
実は Muth (1986) のオリジナルのモデルでは、このように第1期で既に技術的代替案の探索の成果が現れるということを仮定していたので、確率変数 X_n は $n-1$ 個ではなく、 n 個の独立同分布の確率変数 $X_{(i)}$, $i=1, \dots, n$ のうちの最小値で表されることになっていた。もし確率分布が区間 $[0, 1]$ の一様分布ならば、

$$G_n(x) = 1 - (1-x)^n$$

第7図 Muth モデルの期待製造コスト



第8図 Muth モデルの進歩関数のシミュレーション (作業数 100 製造プロセスの場合)



したがって,

$$E(X_n) = 1/(n+1) = (n+1)^{-1}$$

ということになる。これは、両対数グラフでは初期凹性のある曲線となる (第7図)。このことはシミュレーションでも示することができる (第8図)。 n が大きくなれば、大標本理論で、 $F(x) = cx^k$ のタイプの分布関数 ($k=1$ のときは一様分布になる) のとき、進歩関数は冪関数の形になることが知られており、ほぼ直線になる。

(c) 改善の不規則性 (irregularity of improvement)

既存研究の中には、改善が突然不連続に進行する現象が見られる (Abernathy & Wayne, 1974)。これについては、基本的には技術的代替案の発見のプロセスがランダムであることが

ら説明ができる。特に製造プロセスを構成する作業数が少ない時には、全体の進歩関数は滑らかさを失い、個々の作業に関する階段状の進歩関数の痕跡が残るので、改善はより不連続に見えることになる。

作業数が多い場合には、本質的には不連続な改善であっても、見た目には限りなく連続しているように見えるようになってしまうが、(a) 基本モデルの仮定3の「即座の採用」を拡張すればこうした現象を説明できる。実際、機械に耐久性があることや生産停止の機会費用がかかることから、より低コストの技術が発見されたとしても即座には採用されず、いくつか貯めておいて一度に多くの変更を行っていることも現実の不連続性に影響していると考えられる。つまり即座に採用するのではなく、仮定3で技術的代替案が一定期間ごとあるいは一定額ごとにまとめて採用されることを許すように拡張すると、作業数が多い場合にも、改善の不連続性が明示的に現れるようになる。

(d) 高原効果 (plateau effect)

既存研究の中には、生産が追加されても、ついには改善が全く見られなくなる現象が時々見られる。高原状態 (plateauing) と呼ばれるこの現象は、最初に Conway & Schultz (1959) によって観察されたが、その後、Baloff (1966; 1971) によって詳しく研究された。高原状態の研究についての詳細な検討は後の節に譲るが、Muth (1986) によれば、この現象も、(a) 基本モデルの仮定2で、製造を続けていても技術的代替案の探索を停止して構わないというように拡張すれば、Lippman & McCall (1976) の仕事探索 (job search) の理論と類似のモデルで説明できる。すなわち、探索コストを考えれば、いつかは探索することによって得られる期待利得が探索コストを下回るようになり、探索は停止され、高原状態になることが説明できるのである。

4. 進歩率に差が生じる理由

進歩関数として、対数線形モデルもしくはその派生モデルを仮定して議論を進めていくことにしても、進歩率がどの程度の値になるのかというパラメーターの推定の問題が残されている。Yelle (1979) や Dutton & Thomas (1984) が指摘するように、進歩率の推定値は産業、製品、時間によって実質的にかなり異なっているということは事実として知られている。そのことを第二次世界大戦後の早い時期に指摘していたのが Alchian である。しかし経験曲線では、個々の生産者レベルでも、産業全体レベルでも妥当するということが強調され、むしろ進歩率にあまり差がないことが暗に主張されていた。そのため、進歩率に違いがあるという現象を説明することへの関心は低く、現象解明のための実証的な証拠も少ない。そこで注目されるのは、進歩率に差が生じる理由についてデータに基づいて考察した Hirsch の研究である。ここでは、Alchian と Hirsch 二人の研究を取り上げよう。

航空機産業における進歩率の差の指摘

Alchian (1963) の論文はもともと RAND Corporation 向けに 1949 年までに完成していたが、軍事機密扱いのデータを使っていたために、それまで公開されていなかったものである。データはすべて *Source Book of World War II Basic Data; Airframe Industry, Vol. I* によっているが、これは Aeronautical Monthly Progress Reports (AMPR's) を基にしている。この *Source Book* の中で、(i) その施設で 1000 機以上作られているモデルで、(ii) その施設で作られた 100 機までのデータが利用可能で、しかも (iii) 累積機数 100 機までは各月の直接労働の 60% 以上が（下請けなどではなく）その施設で行われたモデル、という条件を満たしたモデル・施設組合せ (model-facility combination; MFC) を選ぶと、爆撃機 9、戦闘機 8、訓練機 3、輸送機 2 の計 22 が該当し、これらが分析された。

進歩関数あるいは学習曲線は航空機産業と米空軍で計画・予測に使われる道具の一つである。累積生産機数 n が増えるにしたがって、機体 1 ポンド（約 453 g）当たりの直接労働量 m が低下することは圧倒的な証拠により明白で議論の余地はない。そこで、次のように問題が検討されている。

- ① 低減傾向がいつまで続くかについては、どの MFC でも、グラフで判断する限り、低減傾向が止まる形跡はなかった。
- ② 両対数グラフにプロットすると負の傾きをもった直線 $\log m = a + b \log n$ ($a > 0$, $-1 < b < 0$) となる程度については、16 の MFC で相関係数が 0.9（決定係数 $R^2 = 0.81$ ）を超え、残り六つの MFC で相関係数が 0.8（決定係数 $R^2 = 0.64$ ）を超えた。
- ③ すべての MFC について、進歩曲線の a と b は共通なのかを検討するために、爆撃機、戦闘機、訓練機の各カテゴリー（輸送機は二つしかなかったので分析しなかった）の中で、 a と b それぞれについて分散分析を行った。MFC 間平方和と MFC 内平方和を求めて、 F 値を求めた結果、どのカテゴリーにおいても、 a でも b でも統計的に有意な差があることが分かった。つまり、②のように対数線形的な関係はあっても、それは各 MFC ごとに異なる切片と傾きをもっており、各 MFC にユニークなものであることがわかった。
- ④ 産業平均進歩曲線 (industry-wide average progress curve) から導かれる予測はどの程度信頼できるか検討するために、輸送機を除いた 20 の MFC を一つの大きなサンプルに統合し、産業全体の進歩曲線を求めた。この進歩曲線を $n = 0$ から $n = 1000$ までの区間で積分して、最初の 1000 機までの累積直接労働必要量を求めた。これは 1 ポンド当たりの必要量なので、機体の重さによって必要量が変わってくる。そこで、輸送機を含めた各 MFC に

ついて、デザイン修正による機体重量の変化を補正した上で、機体の重量をかけて、予測値 (predicted value) P を求めた。これと、実際の値 (actual value) A との乖離を、各 MFC について、 $|(P-A)/A|$ として計算し、これを実際の労働時間数 (man-hour) で加重平均したものは 25% になった。

- ⑤ 機体カテゴリー別の平均進歩曲線についても、同様に求めて、輸送機を除いた各カテゴリーで、それぞれの平均進歩曲線を使って、同様の予測を行うと、予測値と実際の値の乖離は平均して 25% になった。
- ⑥ 各 MFC について、最初の約 1 年分のデータを使って、進歩関数を推定し、それをもとにして、残りの部分の累積直接労働必要量を求め、実際の値と比較した。予測値と実際の値の乖離は平均して 22% だった。ただし⑤で除いていた輸送機の二つの FMC を今度は含めているが、その内一つの FMC の乖離は 116% にもなっていて、全体の平均を押し上げている。

つまり、航空機産業では、高原状態に陥ることもなく(①)、対数線形型の学習曲線が観察されたが(②)、にもかかわらず、学習曲線は各 MFC ごとに異なる切片と傾きをもっており、各 MFC にユニークなものであった(③)。したがって、産業平均や機体カテゴリー別平均を使って累積直接労働必要量を予測すると実測値との間に平均 25% の乖離が生じたのである(④⑤)。

組立工程と機械加工工程の進歩率の推定

それでは、どうして進歩率には差が生じるのであろうか。Hirsch (1952; 1956) は一つの工場の中で製品レベルで進歩関数を推定し、平均で見ると組立工程の進歩率は機械加工工程の進歩率の約 2 倍と進歩が速く、そのため、進歩の大部分は組立工程で起きることになると指摘している。しかも完成品である機械の種類に

よって、機械加工工程と組立工程の両工程の割合が異なる。結論的には、機械加工工程で進歩率が低くなっている理由は、モデルが新しくなっても、部品はしばしば同じ物を使っているためと考えられるが、このことをこれから詳しく見ていくことにしよう。

Hirsch (1952) の研究対象は、米国の大手の工作機械メーカー (machine tool manufacturer) である。第二次大戦後は織機や建設機械も作っていた。この会社が製造している 20 種の製品のうち、第 3 表のような 7 種が取り上げられるが、いずれも新製品もしくは新モデルで、生産は一つの大きな工場で行われている。対象となる 1946-50 年の 5 年間、直接労働力は 930 人から 3600 人の間で変動していた。

生産は部品の製造／機械加工 (machining) と組立 (assembling) に分けられる。毎月、トップが製造計画を決定する。これにより、各タイプの機械を期日までに何台出荷するかが生産マネジャーに指示される。こうしてロット・サイズが決められると、生産マネジャーは約 2 万点の部品を自社工場内で作り、約 1 万点の部品は部品メーカーに外注する。すべての部品が揃ったところで、組立が行われ、最初は小さなユニットに組み立ててから、最終的に完成品へと組み立てられる。各機械は分離した組立フロアで、所与の大きさの組 (crew) が組立に当たる。したがって組立工程では、部品と労働者の比率は固定していて、増産はより多くの組が増産分のユニットの組立に当たることで行われる。

必要な労働量 (labor) と生産量の関係を考えるにあたって、生産期間が重なるような場合、日々あるいは月々の生産量を問うことはしばしば意味がない。生産規模を表すのは、日々あるいは月々の生産量よりもロット・サイズの方である。そこで、直接労働量とロット・サイズの関係进行分析しよう。(a)「織機」：最初の 21 ロット、約 600 台、(b)「半自動タレット旋盤 1」：27 ロット、約 500 台の 2 種類の機械が分析対象となった。各ロットの生産期間は最

第3表 Hirsch の調べた工作機械製造における進歩率

製造している機械の機種	全 体		機 械 加 工		組 立	
	進歩率	R^2	進歩率	R^2	進歩率	R^2
半自動タレット旋盤 1 ^{a)}	18.1	0.93	6.4	0.48	27.5	0.82
半自動タレット旋盤 2 ^{b)}	24.8	0.95	20.2	—	30.8	—
自動工作機械 1	18.8	0.79	13.2	0.72	25.5	0.79
自動工作機械 2	20.8	0.84	14.1	0.78	28.6	0.84
自動工作機械 3	16.5	0.70	10.4	0.49	23.7	0.80
自動工作機械 4	18.1	0.73	13.5	0.98	23.2	0.43
織機 (textile machine)	17.5	0.79	—	—	—	—
多目的建設機械	20.0	0.82	20.1	0.75	19.0	0.35
全 体	19.3	—	14.1	—	25.6	—

a) Hirsch (1952) では「半自動工作機械」とされていたが、Hirsch (1956) で「半自動タレット旋盤」(turret lathe) であったことが明らかになった。

b) Hirsch (1956) で追加されたが、理由は明らかではない。

初の頃は7ヶ月から後では5ヶ月に変動している。一つの製品についての機械加工と組立に必要な人時(man-hour)が記録され、それらを足し合わせることで、機械加工時間と組立時間が求められる。その合計を各製品についてロットごとに求めたものが総直接労働投入量である。この機械1台当たりに必要な直接労働量を被説明変数とし、累積ロット数、ロット・サイズを説明変数とした回帰分析が行われた。その結果、累積ロット数は有意だったが、生産規模を表すロット・サイズは有意ではなかった。

そこで、機械加工・組立・全体の直接労働量 x_1 と累積生産量(ロット数) x_2 の関係をプロットしてみると、通常のグラフでは曲線になるが、両対数グラフでは直線になる。ただし、「織機」だけは、通常のグラフの方が決定係数が高くなる(原論文では自由度修正済み重相関係数が使用されているが、ここではそれを二乗した自由度修正済み決定係数を用いる)。

$$\log x_1 = a + b \log x_2 \quad \text{or} \quad x_1 = ax_2^b$$

ここで、 b は進歩弾力性 (progress elasticity) と呼ばれるが、

$$x_1 = ax_2^b, \quad x_1' = a(2x_2)^b$$

とすると、累積生産量が2倍になった時の直接労働量の減少率が分かる。

$$x_1'/x_1 = 2^b$$

となる。そこで、 $1-2^b$ を進歩率 (progress ratio) という。進歩率の定義から、ロット・サイズが安定していれば、ロット数で見ても、台

数で見ても、進歩率は変わらないことになる。

Hirsch (1956) では、Hirsch (1952) で1種類だけ取り上げられていた半自動の工作機械(これは実は半自動タレット旋盤であったことが明記される)にもう1種類の「半自動タレット旋盤 2」のデータも追加して8種類の機械の分析をしている。ただし、Hirsch (1952) では1946年から1950年までだったデータ収集時期がなぜか1951年までに変更になっているが、追加分を除いた7種類の機械については進歩率も重相関係数も一致しているので、同じものとして一枚の表に表すと第3表のようになる。全体での進歩率は16.5~24.8%で、平均19.3%であった。

進歩率の違い

実は Hirsch (1952) では、進歩率は5年間一定しており、進歩率(正確には進歩弾力性)は機械の種類の間で有意水準4%では差が見られたものの、4種類の自動工作機械の間では5%水準でも有意な差は見られなかったとしていた。もっとも、この有意な差がなかったとする誘導の仕方には作為的な感じは否めない。事実、Hirsch (1956) では「半自動タレット旋盤 2」を追加したが、この機械は進歩率が24.8%と高く、重相関係数も0.975(決定係数=0.95)と一番大きいもので、なぜこの機械を最初の分析から外していたのか疑問が残る。しかも Hirsch (1956) では、これを分析に入れた

ことで、機械の間で進歩率にあまり差がないと言おうとしていた Hirsch (1952) の結論のトーンは逆転する。進歩率は平均が 19.3%、範囲は 16.5~24.8% と広がり、分散分析の結果、今度は、これらの 8 種類の機械の進歩率の間には 1% 水準で有意な差があると結論を翻している。

それではなぜ進歩率に違いが生じるのだろうか。これに対して Hirsch (1956) は、モデルが新しくなっても、部品はしばしば同じ物を使っていることを理由として挙げた。実は、これこそが論理的に説得性が高い本質的な理由である。例えば進歩率 20% では、最初のロットと 2 番目のロットでは 20% 低減するのに対して、125 番目のロットと次の 126 番目のロットではたった 0.3% しか低減しない。いま仮に、この 125 番目のロットから、新しいモデルの部品として使用が始まったとすると、新モデルの最初のロットと 2 番目のロットといっても、この部品に関しては 0.3% しか低下せず、新モデル全体の進歩率を押し下げる効果がある。つまり、常識的には、それまでの経験を組み合わせることにより新製品は進歩率が高くなると考えがちだが、両対数グラフの学習曲線の場合にはまったく逆になるのである。しかも、新旧部品の割合によって、進歩率にはかなりの幅が生じることも容易に説明ができる。

しかもこのことで、なぜ組立工程と比べて機械加工工程では進歩率が低いのかといったことまでもが説明できる。モデルが新しくなれば確かに組立工程は刷新される。しかしモデルが新しくなっても、部品はしばしば同じ物を使っているために、そうした部品については機械加工工程の進歩を途中から観察していることになり、両対数グラフの学習曲線では進歩率は低くなってしまうのである（注：ただしこれは単純に、機械加工工程の方が改善の余地が少ない (Hirsch, 1952) ということを意味しないことには注意がいる）。実際、既に Hirsch (1952) でも指摘していたことだが、組立工程と比べて機械加工工程の進歩率は格段に低く、しかも完成

品である機械の種類によって、両工程の割合が異なっていた。同様のことは Andress (1954) も指摘している。Hirsch (1952; 1956) では、平均で見ると機械加工工程の進歩率は 14.1% と組立工程の進歩率 25.6% の約 1/2 になっている。しかも機械加工工程の進歩率は 6.4~20.2% (1% 水準で有意な差) で、組立工程の進歩率 19.0~30.8% (5% 水準で有意な差) と比べて、進歩が遅いだけでなく、ばらつきも大きかった。つまり進歩の大部分は組立工程で起きていることになる。

同時にこのことは、重大な論理的帰結をもたらす。いま仮に部品レベルで、すべての部品の進歩率が同じであったとしよう。しかし完成品のレベルでは、すべての部品が完全な新モデルでない限り、それらを組み立てた完成品のレベルでは、必ず部品の進歩率よりも低下することになるのである。実際には、すべての部品が新モデルであるということはいえぬ。既存の技術や部品を全く前提としない製品開発は、現代においては想像すらしにくい。つまり、すべての完成品について、進歩率が同じであることは論理的にありえないことなのである。しかも、このように最初の製品を作る前に、既に類似の製品での経験や事前計画という形で探索が始まっていれば、Muth (1986) のモデルになるはずなので、初期凹性が見られるはずである。

こうして、進歩関数の進歩率に差が生じること、そして、曲線に初期凹性が現れることがあるという現象は、いずれも、進歩のプロセスを最初からではなく、途中から観察しているために起こる現象だったのである。製品が各種部品から組み立てられたものである以上、そして、技術が突然出現したものでない以上、こうした現象は常に観察されることになる。言い換えれば、われわれは常に絶え間ない学習プロセスの途中を進歩関数という形で観察していることになるのである。

5. 高原状態と心理的效果

既に探索理論で考えると、探索によって得られる期待利得が探索コストを下回るようになると、探索は停止され、高原状態に陥ることを指摘した。言い換えれば、生産コスト低減の効果と比べて、探索コスト+設備更新コストが比肩するようになったとき、探索を続けるか停止するかは経営者の判断に委ねられることになる。そこで、高原状態が出現するためには心理的效果が重要になってくるのである。そのことを見てみることにしよう。

労働集約型産業の場合、学習曲線が労働者の学習の結果生じるというアイデアは受け入れやすい。しかし、機械集約型の産業であっても学習曲線効果が観察される。例えば、石油精製は、Andress (1954) も主張するように、学習曲線が適用できない産業の典型例だと考えられてきた。しかし Hirschman (1964) は、石油精製産業において、個々の触媒分解装置 (catalytic cracking unit) は時間とともに階段状に能力が向上し、年を経た触媒分解装置ほど、達成能力が設計 (計画) 能力をより上回るようになることをデータで示した。累積処理バレル数と10万バレルを処理するのに要する日数とを両対数グラフにプロットすると直線になり、この他、装置停止後の立ち上げに要する時間、保守と停止に要する労働時間、能力1バレル当たりの建設コストも年とともに減少する傾向がある。産業全体について見ると、米国の石油精製産業全体では、1860年以來の累積精製量 (バレル) と1バレル精製当たりに要する平均直接労働時間を両対数グラフにプロットすると学習曲線を示唆する直線的な関係が見られる。電力、製鉄でも同様に産業全体で学習曲線を示唆する関係が見られた。

しかし、そこでは、高原状態もまた観察されやすかった。実際、Baloff (1966) は機械集約 (machine-intensive) 型製造業から、製紙1社、電気めっき1社、鉄鋼2社、硝子1社の4業種5社で新製品・新プロセス立ち上げの28の

事例を研究し、そのうち20の事例で高原現象を観察している。実は、Hirschman (1964) のデータでも、彼自身は触れていないが、電力に関しては高原状態を観察することができる。

そこで、Baloff (1971) では、今度は三つの労働集約 (labor-intensive) 型製造業 ①大型楽器、②服飾、③自動車組立、を選んで、学習曲線モデルを適用し、その有用性を確認している。なお、Baloff (1971) は、両対数グラフで曲線的に直接労働時間やコストが低下する「立ち上げフェーズ」(start-up phase) とその後、一定に保たれる「定常状態フェーズ」(steady-state phase) に分けて考えている。

① 大型楽器：この10年間に一つの工場で生産された大型楽器の六つのニューモデル M1~M6。この会社では、それまで学習曲線の分析を試みたことがなく、単位当たりの直接労働時間と累積生産量のデータは、月次または四半期のコスト・データから直接求められた。六つのうち M1~M5 の五つについては、定常状態の兆候はなかったが、M6 については4ヵ月で定常状態に入っていた。立ち上げフェーズについて、データを対数に変換して回帰分析を行うと、決定係数は0.81~0.98で有意であり、学習率の推定値はM6が54.8%であったが、M1~M5は87.5%~90.5%でほぼ同じ水準だった。他とはパターンが異なるM6は、商業用に設計された特殊なもので、生産台数も少なく、一ヵ所で一台一台個別生産されていた。

② 服飾：カジュアル・ウェアの三つのスタイル・ライン (style line) A1~A3 で、別々の工場で立ち上げられた。新しいスタイル・ラインは通常は1年間生産されるが、今回は10~12ヵ月生産された。この会社では、それまで学習曲線の分析を試みたことがなく、単位当たりの平均直接労働負荷量と累積生産量のデータは、月次データから求められた。いずれも定常状

態の形跡はなく、データを対数に変換して回帰分析を行うと、決定係数は0.81～0.94で有意であり、学習率の推定値は75.3%～79.4%でほぼ同じ水準だった。

- ③ 自動車組立：新しい自動車モデルの立ち上げで、三つのブランドAG1～AG3については、それぞれのブランドについて全社的にすべての車種を総学習曲線 (aggregate learning curve) で要約したもので、会社側が立ち上げ現象の研究のために作成したデータによっている。四つ目のSM4は一つの組立工場で生産された同一ブランドのコンパクト・カーの1モデルに関するもので、工場の会計記録に基づいて1台当たりの平均直接労働時間の月次データをもとに分析している。AG1～AG3はすべて、累積生産台数が年間総生産台数のほぼ40%に達した所で定常状態に入っていた。しかしSM4は生産開始から9ヵ月たっても定常状態の形跡はなかった。立ち上げフェーズについて、データを対数に変換して回帰分析を行うと、AG1～AG3の決定係数はいずれも0.92で有意であり、SM4の決定係数は0.74だった。学習率の推定値は79.9%～90.4%だった。

いずれにせよ、一般に、労働集約型産業よりも機械集約型産業で高原現象が起りやすいといえる。その理由を Yelle (1979) は次のように整理している。

- ① 機械ペースの労働の割合が高いために、すぐに進歩率が小さくなってしまう。
- ② 技術的改善のため、より資本を投資することに対して経営側が気が進まない。
- ③ 前もって目標をいったん決めてしまうと、それが達成されたとしても新たな目標を設定しないという経営側の懐疑主義がある。新たな目標がなければ、管理者を動機づけるインセンティブがない。これを Hirschmann は天井心理 (ceiling psychology) と呼んだ。

実は、ここで取り上げた Baloff (1971) は、学習曲線に則った国防契約手続の心配のないものの中から、労働集約 (labor-intensive) 型製造業として ①大型楽器、②服飾、③自動車組立、を選んでいる。実際、Alchian (1963) の分析では、軍用機の製造で、高原状態が出現することはなかった。Baloff (1971) によれば、学習曲線は航空機産業から生まれたが、他の産業でも国防契約手続 (defence-contracting procedures) が浸透している場合には、学習曲線に則った契約が行われている可能性がある。そのため、学習曲線に基づく予測が自己成就予言 (self-fulfilling prophecies) となるように実際の結果も人為的に操作されている懸念があり、データの信頼性が疑問視されるというのである。逆にいえば、Baloff (1971) は自己成就予言的に学習曲線に則ってコストが下がる可能性を重要視していたのである。

それ以前に、既に石油精製や電力、鉄鋼の各産業の学習曲線を調べた Hirschmann (1964) は、むしろ心理的な側面を強調していた。すなわち、進歩は可能だと信じることで可能になる。例えば、航空機産業におけるコスト・プラス型の下請け契約の場合には、学習曲線を説明して結果の出し方を示せば、契約者が当初期待していた学習曲線に沿ってコストが下がる。また天井心理に対しても、学習曲線は進歩に終わりのないこと（すなわち、高原状態に陥らないこと）を期待させる効果がある。学習曲線の実践にとって最も重要な要素はビジョンとリーダーシップであり、改善の継続は、進歩が可能であるという信念から始まる影響の連鎖である。この連鎖が経営の実践の一部をなしているのであり、それ故に Hirschmann (1964) は学習曲線を経営の基本的なツールであると主張したのである。

つまり、労働集約型産業の学習曲線と比較すると機械集約型産業の学習曲線では、労働者よりも経営者の果たす役割が大きくなると考えられる。Conway & Schultz (1959) は、ある企業で高原状態にあった製品の生産ラインを他企

業に移したらまた学習が始まったことを見出しているが、このことは、その象徴的な出来事である。

6. 組織学習論的観点

実は、前述の Baloff (1971) の「定常状態」の扱いについては本質的な疑問がある。定常状態が観察されたのは、M6 と AG1～AG3 であったが、そのうち M6 と AG2 のグラフが示されている。しかし、いずれのグラフも両対数グラフであるにもかかわらず、定常状態に入ると、月次データでのプロットが累積生産量でほぼ等間隔に並んでいるのである。これは、累積生産量の伸び率がほぼ一定であることを意味していて、大幅な増産が行われていることを意味している。個別生産の楽器 M6 の場合でいえば、製造に当たるチーム数が増えること、全社の総計で考えている自動車ブランド AG1～AG3 の場合でいえば、生産ラインの数が増えていることが想像される。仮にそうであれば、Baloff (1971) のいう「定常状態」とは、品質管理上、既に管理状態に入った生産ラインを 2 交代制や 3 交代制に変更したり、あるいは他の工場でも立ち上げて増殖させている状態であるとも考えられる。そう考えれば、同じ自動車組立でも、一つの組立工場で生産される同一ブランドのコンパクト・カーの 1 モデルのケースである SM4 では、定常状態が観察できないことは合理的に説明できる。

実は、こうした分析は Baloff (1971) では行われていない。しかし、チーム数や生産ライン数が増やされると、進歩が足踏みをするのかどうかという問題は、そもそもそれを高原状態と呼んでいいのかどうかといった問題がある。しかし組織学習論の点からは興味深い研究テーマである。Baloff (1971) への疑問の直接的解決にはならないが、組織学習論的な観点から行われた学習曲線の研究を紹介しておこう。

既に述べたように、学習率の推定値は産業、製品、時間によって実質的にかなり異なってい

る。こうした学習率の違いを説明する潜在的な説明要因として示唆されてきたものを Yelle (1979) は個人学習である労働者の学習 (labor learning) と組織学習 (organizational learning) という二つのカテゴリーに分類整理している。もし作業者の経験に関わりなく生産性が不変ならば、学習は完全に組織と一体である。他方、組織が不変なのに生産性が向上するならば、学習は完全に作業者個人と一体である。それらの中間的なケースもありうる。Epple *et al.* (1991) はこれに第三のカテゴリー、他者の経験からの学習のケースを加えている。つまり、Dutton & Thomas (1984), Levitt & March (1988) が示唆するように、組織は他者が獲得した知識からの便益も享受するかもしれないのである。

この観点から、Epple *et al.* (1991) は、旧来の学習曲線モデルを一般化して使うことで、どうやってこうした組織の学習率の違いを説明できるかを調べている。例えば、組織が、工場の配置、装置、コンピュータ・ソフトウェア等といった生産プロセスの物理的側面である技術に具体的に表現されている (embody) とするならば、交替で工場を使う場合には同じ技術を使っているのであるから、物理的設備に表現された知識は、交替においても完全に移転されるはずである。それに対して、産業学習が主に個人個人の生産作業者に具体的に表現されているならば、交替における知識の移転は限定されるだろう。このことを調べたのが彼らの研究である。

そこで、1980 年代に 1 交替制で生産が開始されたが、その後 2 交替制になった北米の一つのトラック工場 (単一車種) でデータが集められた。分析に用いられたのは、1 交替制時期の 19 週間と 2 交替制に変更になってからの 80 週間のデータである。単位労働時間は、2 交替制に切り替わった時に一時的に増加している。そこで、この工場内での交替間の知識移転に焦点を当てて、次々と回帰式を一般化 (複雑化) して改良していく作業が繰り返された。その結果、最終的な回帰式では、次の 3 局面が

調べられた。

- ① 工場が1日1交替制から1日2交替制に変わった時の知識の繰越し (carry forward) : 繰越し率の推定値は $\rho=0.69$ (s.e. = 0.10) で 69% が繰越しになる。 ρ が 0 でも 1 でもないことは統計的に有意であった。
- ② 1日2交替制が実施されている中での交替間の知識移転 (transfer) : 移転率の推定値は $\theta=0.56$ (s.e. = 0.31) で、 θ が 0 でも 1 でもないことは統計的には 5% 水準では有意ではなかった (原論文では 10% 水準で有意としている)。
- ③ 時点間の知識移転つまり知識の持続性 (persistence) : 持続性の推定値は $\lambda=0.99$ (s.e. = 0.04) で、これは 1 年間 (52 週) で、 60% (= 0.99^{52}) ということになるが、持続性が 1 よりも小さいこと、すなわち、知識の減価償却は統計的には有意ではなかった。

つまり、すべての知識は物理的設備に表現されているわけではないし、また、すべての知識が個人個人の生産作業者に表現されているわけではないということは、工場が1日1交替制から1日2交替制に変わった時には、知識の繰越し率 69% として確認されたが (①)、交替間の知識移転の有無 (②)、知識の減価償却 (③) については確認できなかったことになる。

この他にも、学習曲線とは直接関係しないが、異なった組織の間での知識移転の検討が行われている。Argote, Beckman, & Eppe (1990) は、先発して操業を始めた組織よりも、後発の組織の方が生産性が高いということを見出している。また、要因をコントロールすることで、造船業において知識の減価償却の証拠も見つけている。また Zimmerman (1982) は、原子力発電所建設において、産業経験は建設の単位コストの有意な説明変数であるが、企業経験の方がより有意であるという学習の移転の証拠を見つけた。Joskow & Rose (1985) は、石炭火力

発電装置の建設コストでは、建築技師の経験や公益事業の経験が有意な説明変数で、産業経験が有意な説明変数ではないことを見つけた。

7. 量産態勢が引き起こす進歩

探索理論で言っているように、技術的代替案の探索によって生産コストが下がるとして、一体どのような技術的代替案が生産コストを低下させるのだろうか。進歩関数が見られる理由として、Hirsch (1952) は、

- ① 直接労働の進歩：新しい部品を機械加工するには、青写真を読んだり、機械の段取りをするのに余計な時間がかかる。組立の労働者は時間を節約する技法を発見し、ルーティン化されていく。
- ② 経営管理の進歩：生産・作業スケジュール、原材料・要員の流れの管理が向上する。後方の垂直統合で、原材料の流れが安定し促進される。技術と製造の間の調整が向上する。より良い生産管理技法が定着する。
- ③ 原材料の供給者の進歩：社外の部品供給業者でも同様の進歩を経験する。

の他に、

- ④ 技術部門の進歩：設計技師は最初は願望を込めて新製品を設計するが、経験を積んでくると、より寛容に経済性の観点から部品の再設計をするようになる。さらに新デザインの初期のロットは必要以上に堅固なモデル用になっているものである。学習により特殊な工具や固定装置 (holding device) の使用や改良、工場全体および個々の作業場の配置の改良、ルーティンや処理の改良、より合った原材料と設備の使用によって進歩する。

と指摘している。そこで、締めくくりに、原点に帰って、Wright (1936) の技師らしい現場感覚に溢れた分析に触れておこう。

既に述べたように、Wright の関心は、進歩

関数で表現されるような量の効果だけではなく、コスト全体が低下する要因の分析にあった。この他にもいくつかの要因が挙げられており、学習曲線とも密接に関係しているので、整理しておくことにしよう。まず製造方法の変化が挙げられていた。これには3段階の発展がある。

- ① stick-and-wire-and-fabric 製造法：初期の頃は、木の梁（はり）と支柱を金属製の継ぎ手（joint）で取り付け、針金（wire）で束ねる製造法がとられていた。この方法はプロトタイプを速くかつ安く製造するには優れていた。しかし、もともと安上がりな方法にもかかわらず、この方法では、あれほどの急速なコスト低減が維持できたかどうかは疑わしい。
- ② welded-steel-fabric 製造法：次に①の方法に代わって、胴体部分を中心に鋼鉄製の管類を溶接する製造法が普及したが、まだ布（fabric）がカバーに使われ、木製の梁の使用も規則だった。時間節約の点で溶接作業の進歩には限界があったが、この製造法がとられたことで、ジグ（jig；使用工作機械の刃物に加工物を正しく当てるために用いる道具）のような道具と設備の使用が可能になり、そのことでかなり安く作れるようになった。
- ③ モノコック（monocoque；張殻（はりから））製造法：薄板を成形して、びょう（rivet）で繋ぎ合わせる製造法。この方法は特殊な工具や設備を必要とするために、プロトタイプや少量生産では50%から100%も高くつくが、大量生産ではコストが大幅に低減する。この製造法での原材料費は旧来に比べてわずかに高いが、労賃は大幅に低下したのである。

飛行機の生産では、労働はその大部分が部品の接合に関係している。既に述べたが、大量生産でも溶接（welding）は特に経済的な方法ではなかった。びょう打ち（riveting）も当時はまだコスト的に高かったが、機械器具を設備して量産

態勢をとる（tool）のに向いており、大量生産のための自動びょう打ち機の開発も将来行われると経済的に有望であると考えられていた。航空機にモノコック製造法を用いることは、構造的にも重量的にも空気力学的にも効率的だが、コスト的な観点からも大量生産には良い結果が期待されたのである。

どの製造法であっても、デザインを単純にする、部品数を減らす、部品のデザインを単純にする、鍛造品を使用するといった方策は、経済性のためには採用されるべきであるとも主張された。モノコック製造法では、びょう打ち回数を減らすことに加えて、様々なダイス型（打ち抜き型）を使った大型プレス機で大きな形のもを圧断することも労働力節約の可能性がある。鍛造品をダイス型で打ち抜いて作ることは、かなり少量でも割に合う。通常、25機の注文で多数の部品で鍛造品が使えるようになり、100機になると、ごく少数の部品を除いて鍛造品の方が経済的であるとされていた。

機体のサイズが大きくなるほどコストが低減するというサイズのコスト効果（effect on cost of size）も挙げられていた。なぜなら、

- ① サイズが大きくなったからといって、それに比例して部品数が増えるわけではない。
- ② 大きな飛行機では最小規格の部品が少なくなるので、ある程度扱いが容易になる。
- ③ ある範囲では、サイズが大きくなっても重量はそれほど増えない。乗組員や無線機（radio）や設備などは大きな飛行機の中に散らばって配置されるだけである。
- ④ 大きな飛行機の中の方が、小さな飛行機の狭苦しい場所で部品を扱うよりもやりやすい。

さらに原材料費も累積生産量にしたがって減少する。まず、無駄になる屑の量が減らせるからである。飛行機の重量とそれを作るのに必要だった原材料の重さを比べると、1機目から5機目までは、40%が屑になっていた。しかし、その量は急激に減り、25機目から50機目ま

では25%~30%に、100機目では20%にまで減少する。エンジン、スターター、プロペラ、車輪、アクセサリ等は通常、航空機メーカーの外部から調達される外注部品 (purchased material) である。原材料は95%曲線 ($b = -0.0732$) であるが、外注部品は88%曲線 ($b = -0.184$) であった。外注部品の方が労賃の割合が大きいためであろう。原材料費の低下には、供給業者がさまざまな段階で労賃を減らした効果が考えられる。しかも外注部品は本当は100機あるいは200機になるまでは直線にはならない。これは、供給業者が多くの航空機メーカーに部品を供給しているためである。また、大量に購入することで交渉により値引きをしてもらうことも考えられ、これでも原材料費は低下する。

このほか、完成品の飛行機のコストを計算するには、間接費 (overhead) の計算をしなくてはならない。Wright の原論文では間接費の70%を賦課している。完成品の飛行機のコストを両対数グラフに描くと、スタートから約100機目までは83%曲線、約1,000機目までは85%曲線、約10,000機目までは87%曲線、最後には(約100,000機目までは)90%曲線と変化している。この傾きの変化は、累積生産量が増えるにしたがって、労賃に比べて材料費の比率が相対的に大きくなっていったしであると考えられていた。

こうした Wright (1936) の分析のうちで、特に注目されるのが、最初の製造方法の変化についての分析である。Dutton & Thomas (1984) は、進歩率は所与の定数ではなく、多くの潜在的な政策変数によって影響される従属変数として取り扱われるべきだと主張し、学習曲線の研究から進歩を引き起こす要因の一つとして、規模の効果 (effects of scale) を挙げている。そして、生産量を増えることを期待して生産技術を変えること(機械器具を設備して量産態勢をとること(tooling)あるいは大量生産に合ったデザインを採用すること)によるコスト低減を指摘する。Wright (1936) の研究は

まさにそのことを例証していたことになるのである。

参考文献

- Abernathy, William J., Kim B. Clark, & Alan M. Kantraw (1983) *Industrial Renaissance*. Basic Books, New York. (望月嘉幸監訳『インダストリアル ルネサンス』TBS ブリタニカ, 1984)
- Abernathy, William J. & Kenneth Wayne (1974) "Limits of the learning curve," *Harvard Business Review*, Sept.-Oct., 109-119.
- Alchian, Armen (1963) "Reliability of progress curves in airframe production," *Econometrica*, 31, 679-693.
- Andress, Frank J. (1954) "The learning curve as a production tool," *Harvard Business Review*, Jan.-Feb., 87-97.
- Argote, Linda, Sara L. Beckman, & Dennis Epple (1990) "The persistence and transfer of learning in industrial settings," *Management Science*, 36, 140-154.
- Baloff, Nicholas (1966) "Startups in machine-intensive production systems," *Journal of Industrial Engineering*, 17, 25-32.
- Baloff, Nicholas (1971) "Extension of the learning curve: Some empirical results," *Operational Research Quarterly*, 22, 329-340.
- Carlson, John G. (1961) "How management can use the improvement phenomenon," *California Management Review*, 3(2), 83-94.
- Conley, Patrick (1970) "Experience curves as a planning tool," *IEEE Spectrum*, 7(6), 63-68.
- Conway, Richard W. & Andrew Schultz, Jr. (1959) "The manufacturing progress function," *Journal of Industrial Engineering*, 10(1), 39-53.
- Dutton, John M. & Annie Thomas (1984) "Treating progress functions as a managerial opportunity," *Academy of Management Review*, 9, 235-247.
- Dutton, John M., Annie Thomas, & John E. Butler (1984) "The history of progress func-

- tions as a managerial technology," *Business History Review*, 58, 204-233.
- Epplé, Dennis, Linda Argote, & Rukmini Devadas (1991) "Organizational learning curves: A method for investigating intra-plant transfer of knowledge acquired through learning by doing," *Organization Science*, 2, 58-70. In Michael D. Cohen & Lee S. Sproull (eds.), *Organizational Learning*. Sage, Thousand Oaks, 1996, 83-100.
- Greenberg, L. (1971) "Why the mine injury is out of focus," *Mining Engineering*, 23(3), 51-53.
- Hall, Lowell H. (1957) "Experience with experience curves for aircraft design changes," *N.A.A. (National Association of Accountants) Bulletin*, 39(4), 59-66.
- Hirsch, Werner Z. (1952) "Manufacturing progress function," *Review of Economics and Statistics*, 34, 143-155.
- Hirsch, Werner Z. (1956) "Firm progress ratios," *Econometrica*, 24, 136-143.
- Hirschmann, Winfred B. (1964) "Profit from the learning curve," *Harvard Business Review*, Jan.-Feb., 125-139.
- Joskow, Paul L. & Nancy L. Rose (1985) "The effects of technological change, experience, and environmental regulation on the construction cost of coal-burning generating units," *Rand Journal of Economics*, 16, 1-27.
- Kneip, J.G. (1965) "The maintenance of progress function," *Journal of Industrial Engineering*, 16, 398-400.
- Levitt, Barbara & James G. March (1988) "Organizational learning," *Annual Review of Sociology*, 4, 319-340. In Michael D. Cohen & Lee S. Sproull (eds.), *Organizational Learning*. Sage, Thousand Oaks, 1996, 516-540.
- Lippman, Steven A. & John J. McCall (1976) "The economics of job search: A survey, Part I & Part II," *Economic Inquiry*, 14, 155-189 & 347-368.
- Muth, John F. (1986) "Search theory and the manufacturing progress function," *Management Science*, 32, 948-962.
- Nathanson, D. M. (1972) "Forecasting petrochemical prices," *Chemical Engineering Progress*, 68 (11), 89-96.
- Searle, Allan D. (1945) "Productivity changes in selected wartime shipbuilding programs," *Monthly Labor Review*, 61, 1132-1147 (Under the supervision of Celia Star Gody).
- Wright, T. P. (1936) "Factors affecting the cost of airplanes," *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4), 122-128.
- Yelle, Louis E. (1979) "The learning curve: Historical review and comprehensive survey," *Decision Sciences*, 10, 302-328.
- Zimmerman, Martin B. (1982) "Learning effects and the commercialization of new energy technologies: The case of nuclear power," *Bell Journal of Economics*, 13, 297-310.

〔東京大学大学院経済学研究科・経済学部教授〕