経営管理

第9回：コストと生産性の管理と改善（2）

1. 修正済み労働生産性
2. 全要素生産性（TFP）
3. 学習効果とその測定

東京大学経済学部
藤本隆宏

「‡:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

1. 修正済み労働生産性

横並び（apple to apple ）の比較のために必要

(1) 製品構成（プロダクトミックス）に関する修正
(2) 内製率に関する修正
(3) 自動化率に関する修正
(4) 稼働率に関する修正　生産量＝Q　投入量＝I　生産能力＝C
稼働率 ＝u=Q/C　修正前生産性＝Q/I

・・ この時、稼動率修正済生産性は　Q/I÷u＝C/I　？過剰修正？

工学的アプローチと、統計的アプローチ

事例：日米企業の米国自動車組立工場の比較（米国MITのIMVP）

例：自動車組立工場の生産性比較

工場	NUMMI	フラミンガム
溶接作業者数	400	500
溶接ロボット数	170	10
溶接スポット数/台	3850点	2500点
支払い労働時間/日	8時間	8時間
実働時間/日	7.5時間	7.23時間
生産台数/日	940台/2交替	736台/2交替
溶接・組立作業者数	1660	2800
溶接・組立ロボット数	0	0
製品容積（高x長x幅）/台	565立方インチ	712立方インチ
オプション組立コスト/台	48ドル	104ドル
時間当たり人件費/人	25ドル/人・時間	25ドル/人・時間

資料：J. Krafcik

自動車メーカーの組立工場における生産性(1989年)

著作権処理の都合で、この場所に挿入されていた
図を省略させていただきます

James P. Womack, Daniel T. Jones, Daniel Roos
『リーン生産方式が、世界の自動車産業をこう変える』
（The Machine That Changed the World）

自動車メーカーの組立工場における品質(1989年) ＜適合品質＞

著作権処理の都合で、この場所に挿入されていた
図を省略させていただきます

James P. Womack, Daniel T. Jones, Daniel Roos
『リーン生産方式が、世界の自動車産業をこう変える』
（The Machine That Changed the World）

製品開発の生産性

・・基礎データ

自動車製品開発国際比較の基礎データ

		日本	アメリカ	欧州量産	欧州高級	平均
	企業（組織）数	8	5	5	4	22
	プロジェクト数	12	6	7	4	29
	発売時期	1981-85	1984-87	1980-87	1982-86	1980-87
開発成果	開発工数（百万時間） （平均・最大・最小）	Av. 1.2 Min. 0.4 Max. 2.0	Av. 3.5 Min. 1.0 Max. 7.0	Av. 3.4 Min. 2.4 Max. 4.5	Av. 3.4 Min. 0.7 Max. 6.5	Av. 2.5 Min. 0.4 Max. 7.0
開発成果	開発期間（月） （平均・最大・最小）	Av. 42.6 Min. 35.0 Max. 51.0	Av. 61.9 Min. 50;2 Max. 77.0	Av. 57.6 Min. 46.0 Max. 70.0	Av. 71.5 Min. 57.0 Max. 97.0	Av. 54.2 Min. 35.0 Max. 97.0
開発成果	総合商品力（TPQ） （平均・最大・最小）	Av. 58 Min. 23 Max. 100	Av. 41 Min. 14 Max. 75	Av. 41 Min. 30 Max. 55	Av. 84 Min. 70 Max. 100	Av. 55 Min. 14 Max. 100
プロジェクトの複雑さ	標準小売価格（１９８７米ドル）	9238	13193	12713	31981	14032
プロジェクトの複雑さ	車輌サイズ（プロジェクト数）					
プロジェクトの複雑さ	軽自動車	3	0	0	0	3
プロジェクトの複雑さ	サブコンパクト（大衆車）	4	0	3	0	7
プロジェクトの複雑さ	コンパクト（小型車）	4	1	3	1	9
プロジェクトの複雑さ	中・大型車	1	5	1	3	10
プロジェクトの複雑さ	ボディ・タイプ数	2.3	1.7	2.7	1.3	2.1
プロジェクトの複雑さ	仕向地					
プロジェクトの複雑さ	国内市場のみ	3	3	0	0	6
プロジェクトの複雑さ	先進国以外の市場に輸出	1	2	2	0	5
プロジェクトの複雑さ	先進国市場に輸出	8	1	5	4	18
プロジェクトの範囲	共通部品率	18%	38%	31%	30%	27%
プロジェクトの範囲	調達部品のタイプ					
プロジェクトの範囲	部品メーカーの標準品（A）	8%	3%	10%	3%	7%
プロジェクトの範囲	承認図方式の部品（B）	62%	16%	38%	41%	44%
プロジェクトの範囲	貸与図方式の部品(C)	30%	81%	52%	57%	49%
プロジェクトの範囲	部品メーカーの開発参加度（A + B×0.7）	52%	14%	36%	31%	37%
プロジェクトの範囲	開発工数内製率（推定）	57%	66%	62%	63%	61%

資料：クラーク・藤本，Product Development Performance，1991.

修正済み開発生産性の推定手順 （統計法の例）

プロジェクトあたり製品開発工数（生産性）

n＝29、うち日本12、北米6、
欧州量産車7、欧州高級車4

プロジェクト内容データ

n＝29

・製品の複雑さ（価格）（平均14032ドル）
・ボディタイプ数（平均2.14）
・新規・内部設計比率（平均0.44）、他

↓

地域別に集計・平均 → 修正前の平均生産性

日本 120万人・時、北米 350万人・時、
欧州量産車 340万人・時、
欧州高級車340万人・時

↓

多重回帰分析（被説明変数＝工数、説明変数＝プロジェクト内容変数と地域ダミー変数）

修正前工数 ＝-3993 + 0.061 [価格] + 7500 [新規・内部設計比率] + 729 [ボディタイプ数]
+1421 [北米ダミー] + 1211 [欧州量産車ダミー] + 1331 [欧州高級車ダミー]

総ての回帰係数は5%水準で有意；決定係数＝0.76；工数は1000人・時単位
ダミー変数は、その地域ならば1、そうでなければ0をとる離散変数である。

↓

地域別の平均「修正済み開発生産性」を推定

「平均的内容のプロジェクト」を想定。プロジェクト内容変数の平均値（上記）を回帰式に代入。

日本の平均生産性（修正済み） ＝ -3993 + 0.061x14032 + 7500 x0.44 + 729 x 2.14
北米の平均生産性（修正済み） = 日本の平均生産性（修正済み）+ 1421
欧州量産車の平均生産性（修正済み） = 日本の平均生産性（修正済み）+ 1211
欧州高級車の平均生産性（修正済み） = 日本の平均生産性（修正済み）+ 1331
修正済み生産性の地域平均推定値の差は、地域ダミー変数の回帰係数そのものに他ならない。

↓

地域別の修正済み平均生産性

日本 170万人・時、北米 310万人・時、
欧州量産車 290万人・時、
欧州高級車310万人・時

プロジェクト別の修正済み開発生産性指数

上記の回帰式におけるプロジェクトごとの残差項に
地域ダミーの回帰係数を足して推定。

資料：藤本・クラーク『製品開発力』ダイヤモンド社、Fujimoto『The Evolution of a Manufacturing System at Toyota Oxford Unversity Press』等より筆者作成。

開発生産性の回帰分析

地域・戦略ダミー変数 →

価格（複雑さ代理変数） →

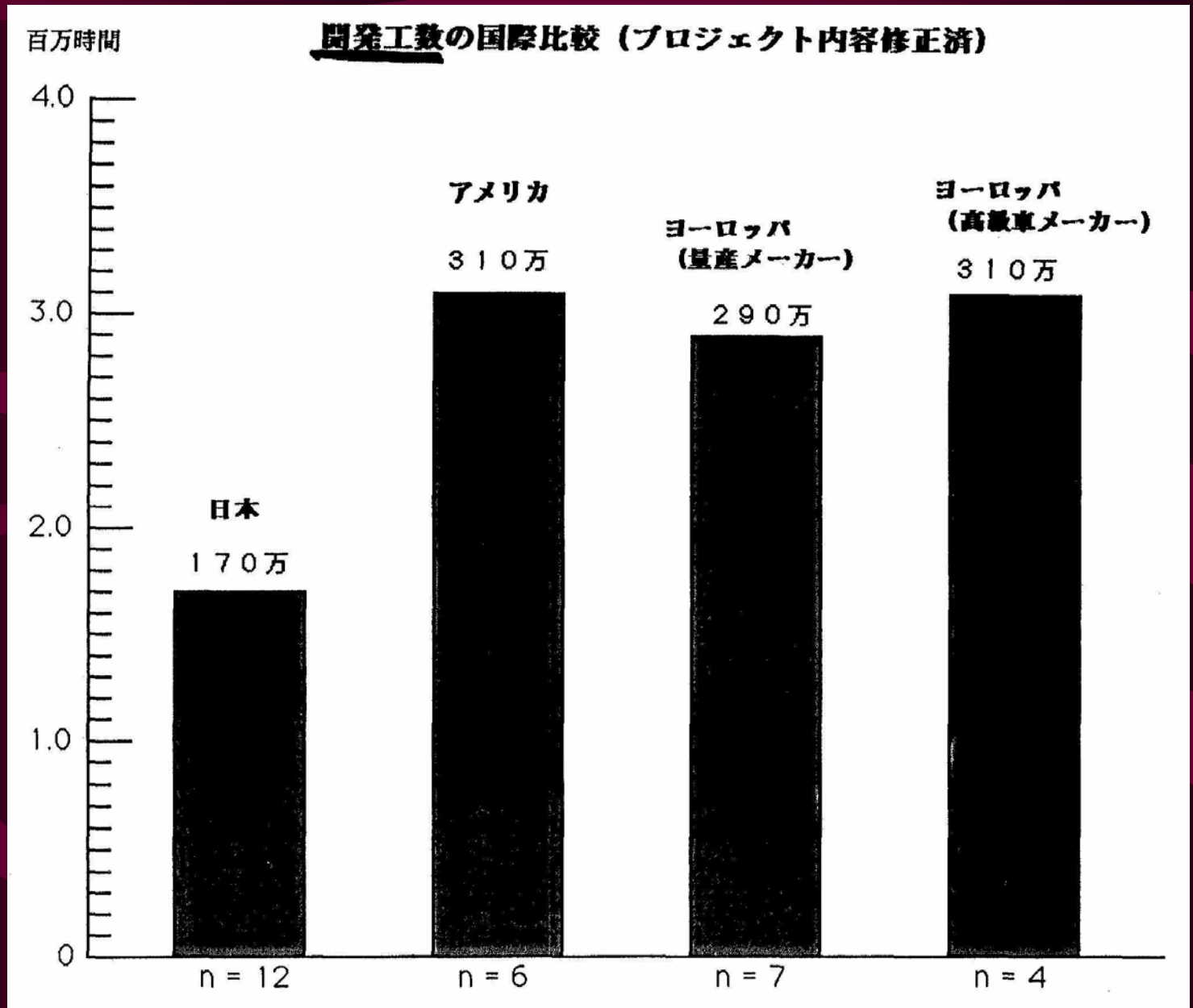
ボディ・タイプ数 →

共通部品、
部品メーカーによる開発 →

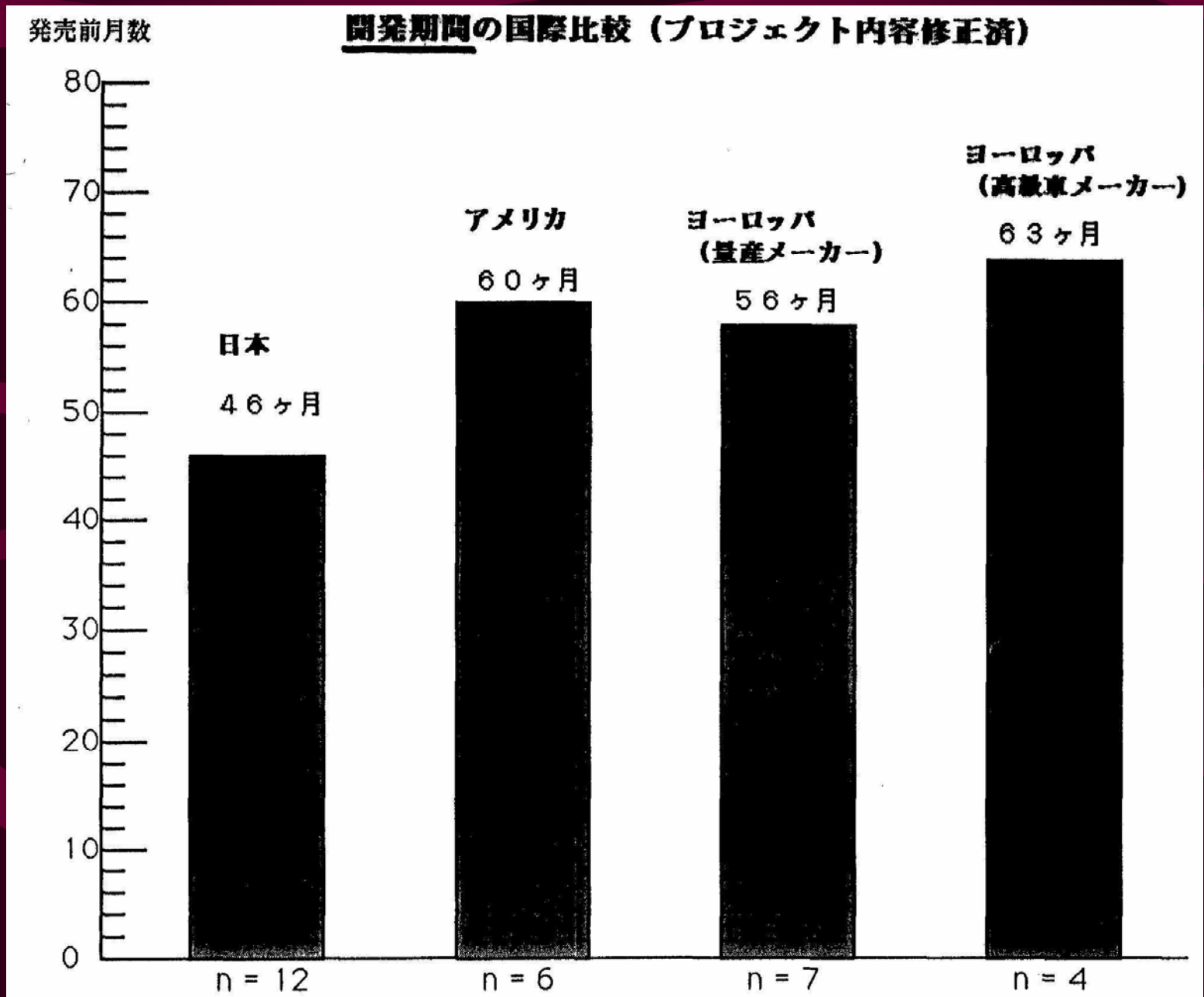
Independent Variable / Dependent Variable: Model	開発工数（1000時間） Engineering Hours (000 H)					
	EH1	EH2	EH3	EH4	EH5	EH6
Constant	1,155	1,155	-1,329	-7,710	-7,713	-6,779
U.S. Company	2,323† (724)	2,323† (738)	1,794* (768)	1,075# (575)	1,073# (602)	1,521* (581)
European Company	2,263† (604)		1,510# (772)	801 (577)		1,302* (556)
European Volume Producer		2,252† (702)			805 (616)	
High-End Specialist		2,281* (852)			785 (1021)	
Retail Price ($000)			0.050 (0.038)	0.071* (0.028)	0.072# (0.038)	0.050# (0.028)
Number of Body Types			530# (291)	874† (222)	873† (230)	738† (229)
Innovativeness (pioneering component)			742 (680)	828 (490)	825 (526)	
Innovativeness (major body change)			912 (592)	554 (434)	558 (482)	
Unique Parts Ratio (1 - C)						
In-House Component Engineering Ratio (1 - S)						
Project Scope Index (NH)				9,656† (2,090)	9,655† (2,141)	10,103† (2,202)
Sample Size	29	29	29	29	29	29
Adjusted R-squared	0.38	0.33	0.40	0.69	0.67	0.64
Degrees of Freedom	26	25	22	21	20	23

資料：クラーク、藤本(1991)　P385

修正済みの開発工数(開発生産性)



修正済みの開発期間（開発リードタイム）



2. 全要素生産性 (TFP、Total Factor Productivity)

全要素生産性とは・・・

「集計された投入と集計された産出との比率」

「産出1単位あたりの実質トータルコスト」

「実質タームでみた収入とコストの関係」

「ある期の産出量のうち生産関数で説明できない部分」

全要素生産性の上昇率とは・・・

「投入の増加で説明できない産出の増加」

・・・つまり、生産関数のシフト("技術進歩")

全要素生産性の定式化

一般に、生産関数　f (Lt, Kt)　とすると、

t期の全要素生産性は　Qt / f (Lt, Kt)

Qt = t期の産出量

Lt = t期の労働投入量

Kt = t期の資本投入量

全要素生産性上昇率の計算

（1）各生産要素（労働、資本など）について、
物的要素生産性（例えば　Yt / Lt ）の上昇率を計算する。

（2）実質要素価格でみた分配率を計算する
例えば労働分配率なら、
w･Lt /（w･Lt + r･Kt）　（Paasche法）
または、 w･Lt-1 /（w･Lt-1 + r･Kt-1）　（Laspeyres法）

（3）各要素ごとに、生産性上昇率と分配率をかけて、それらを
足したものが、全要素生産性上昇率（近似）である。

・・・しかし、実際には、測定は難しい（特に資本投入量の計算）

全要素生産性(Total Factor Productivity) の測定

	価額表示の投入・産出		価格デフレータ	第2期の投入・産出を実質化	投入・産出の物量的成長率	物的要素生産性上昇率
	第1期	第2期	2期／1期			
	A	B	C	D = B/C	E = D/A	F：Eより作成
産出量 (Y)	p^1Y^1	p^2Y^2	p^2/p^1	p^1Y^2	Y^2/Y^1	-
原材料 (M)	q^1M^1	q^2M^2	q^2/q^1	q^1M^2	M^2/M^1	$\frac{Y^2/Y^1}{M^2/M^1}$
労働力(L)	w^1L^1	w^2L^2	w^2/w^1	w^1L^2	L^2/L^1	$\frac{Y^2/Y^1}{L^2/L^1}$
資本(K)	r^1K^1	r^2K^2	r^2/r^1	r^1K^2	K^2/K^1	$\frac{Y^2/Y^1}{K^2/K^1}$

第1期の全要素生産性

$$TFP^1 = \frac{p^1Y^1}{q^1M^1 + w^1L^1 + r^1K^1}$$

第2期の全要素生産性

$$TFP^2 = \frac{p^1Y^2}{q^1M^2 + w^1L^2 + r^1K^2}$$

（第1期を基準として）

全要素生産性上昇率　(ラスパイレス法)

$$\frac{TFP^2}{TFP^1} \fallingdotseq C^{M1}\left(\frac{Y^2/Y^1}{M^2/M^1} - 1\right) + C^{L1}\left(\frac{Y^2/Y^1}{L^2/L^1} - 1\right) + C^{K1}\left(\frac{Y^2/Y^1}{K^2/K^1} - 1\right)$$

ただし、

$$C^{M1} = \frac{q^1M^1}{q^1M^1 + w^1L^1 + r^1K^1}$$

$$C^{L1} = \frac{w^1L^1}{q^1M^1 + w^1L^1 + r^1K^1}$$

$$C^{K1} = \frac{r^1K^1}{q^1M^1 + w^1L^1 + r^1K^1}$$

‡

Robert H.Hayes, Steven Wheelwright, Kim B.Clark
『Dynamic Manufacturing: Creating the Learning Organization』 Free Press 1988
pp142-148（データを一部変更）

全要素生産性上昇率の算出：数値例

		第1期			第2期		要素生産性上昇率
		コスト構成比	要素投入量	要素生産性	要素投入量	要素生産性	(2期／1期)
投入量	原料1（キロ）	40%	25.99	O.852	29.08	O.852	0%
	原料2（平米）	20%	19.41	1.141	20.95	1.183	+3.68%
	エネルギー（百万BTU）	5%	51.30	0.432	56.19	0.441	+2.08%
	労働力（千人・時間）	25%	4.73	4.681	5.31	4.667	-0.30%
	設備（千機械時間）	10%	3.22	6.876	3.60	6.876	0%
	産出量（千個）	—	22.14	—	24.78	—	—

全要素生産性（TFP）上昇率	0.4 x 0% + 0.20 x 3.68% + 0.05 x 2.08% + 0.25 x (-0.30%) + 0.1 x 0% = **0.77%**

資料： Hayes, Wheelwright and Clark, Dynamic Manufacturing. pp142-148. (データを一部変更)

注：ウェイト付けはラスパイレス法による。また、単純化のため、運転資本に関する項目は割愛した。

全要素生産性に影響を与える要因（Hayes,Clark らの研究、1985）

アメリカの3社12工場の膨大な月次データを測定

log (TFP) = b0 + b1 log (累積生産量) + b2 log (稼働率) + B3 log (説明変数 X)

分析結果：

・不良率、原料スクラップ率の増加　→　全要素生産性にマイナスの影響

・仕掛品在庫の増加　→　全要素生産性にマイナスの影響

・当期の新規投資額　→　全要素生産性にしばらくマイナスの影響
（新規投資がもたらす混乱→調整コスト）

・設計変更、生産量変動　→　全要素生産性にしばらくマイナスの影響
（工程撹乱要因→調整コスト）

３．学習効果とその測定（生産性の向上を説明する）

学習効果（習熟効果；learning effect）・・・

狭義には、「特定の作業あるいは工程に関する熟練の獲得」

学習曲線（習熟曲線）・・・

製品１個あたり直接労働工数（m: 人・時）は、
累積生産量 (N) の減少関数である。

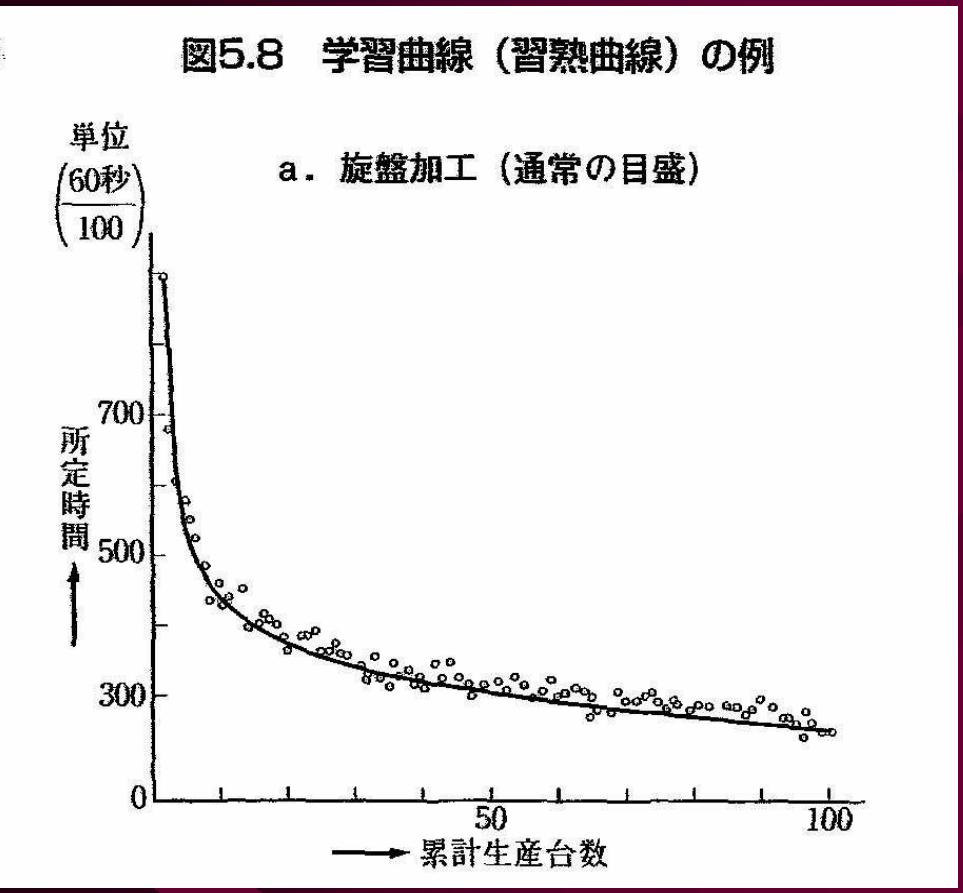
アメリカの軍用航空機機体の生産
（Alchian,*Econometrica*, 1963 ）

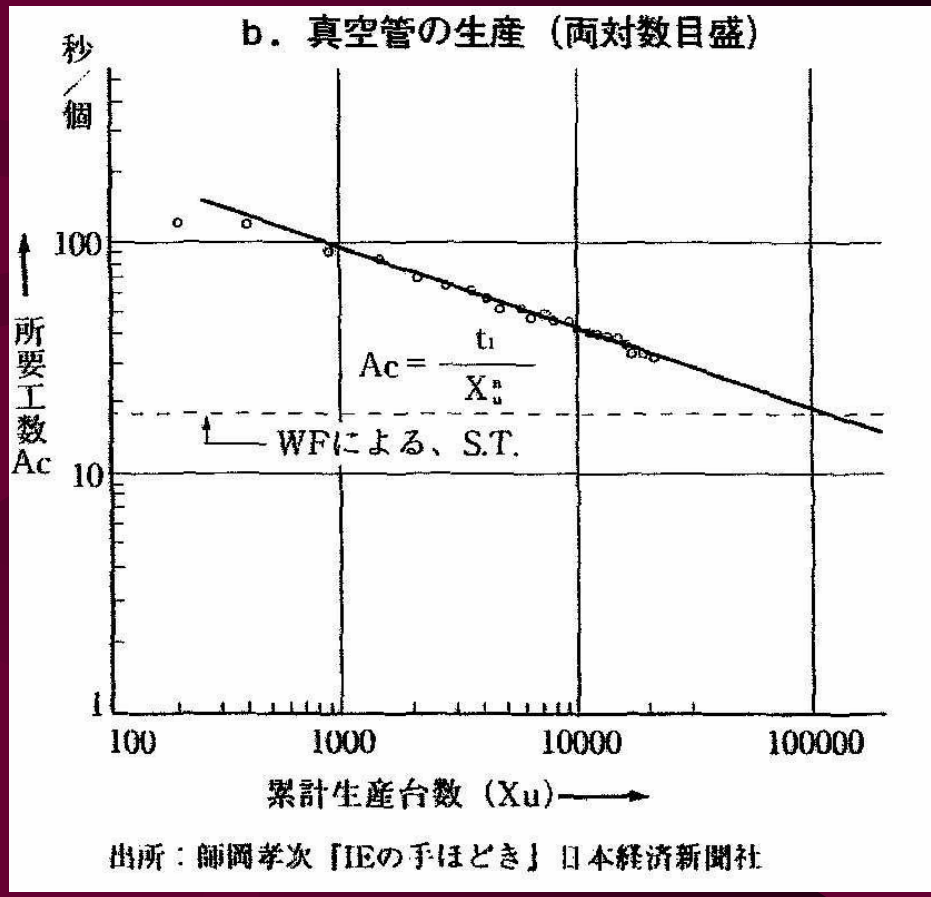
$m = a \cdot N^{b}$　　つまり　$\log m = \log a + b \log N$

で近似　（ただし、$b < 0$）

通常のグラフで見ると‥

両対数グラフで見ると‥





直線で近似

80%カーブ

$$\log \mathbf{m} = \log \mathbf{a} + \mathbf{b} \log \mathbf{N} \quad \cdots$$

累積生産量 **N** が一定比率増えると、直接工数 **m** も
一定比率下がる。

累積生産量 **N**が2倍に増えると、直接工数 **m** が **X** %になる。

これを「**X** %カーブ」という。典型的には「80%カーブ」。

このとき、b ≒ - 0.3

$\log \mathbf{m} = \log \mathbf{a} + \mathbf{b} \log \mathbf{N}$

$\log 0.8\,\mathbf{m} = \log \mathbf{a} + b \log 2\mathbf{N}$

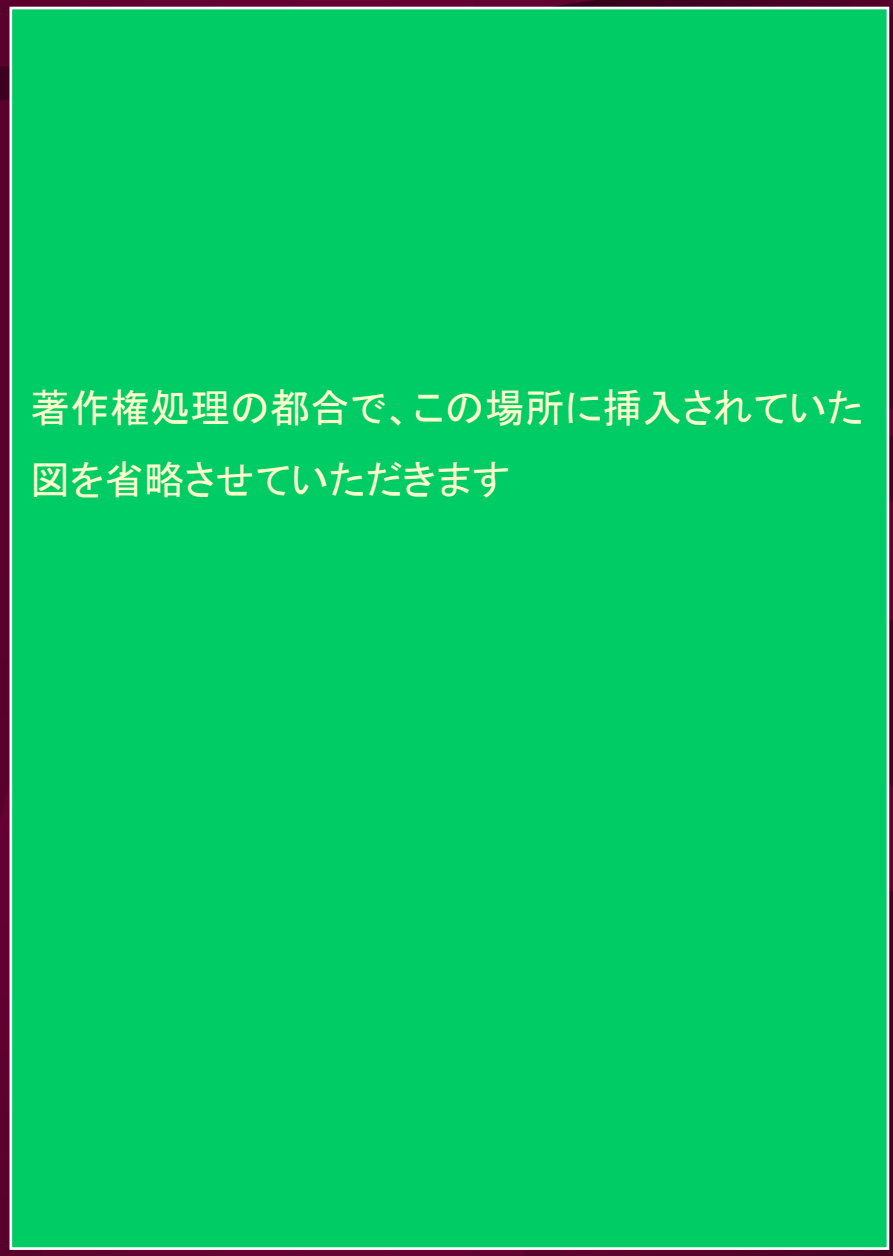
→ $\log 0.8 = \mathbf{b} \log 2$

→ $\mathbf{b} \fallingdotseq -0.1/0.3 \fallingdotseq -0.3$ （底10）

Distribution of Progress Rations Observed in Twenty-Four Field Studies

(n=126)

80%近辺の
カーブが中心



資料：”The History of Progress Functions as a Managerial Technology” Business History Review

経験曲線（experience curve）

累積生産量と、単位あたり実質総費用との間に、学習曲線と同様の右下がりのカーブが経験的に観察される

（ボストンコンサルティング）

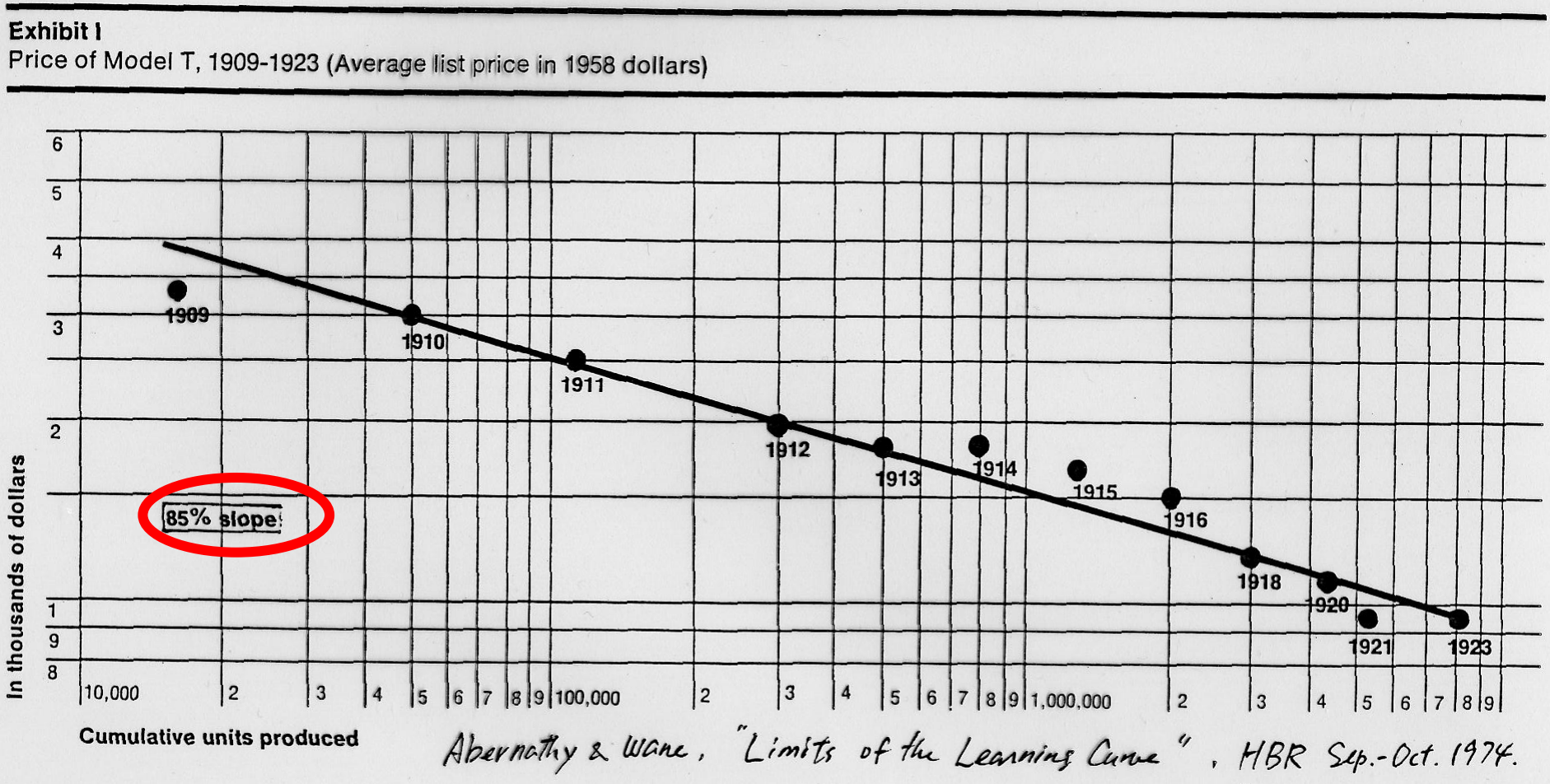
広義の学習曲線に含めることもできる。

コストデータは入手しにくいので、実質平均単価で代理することも多い。

ただし、マージン率が不変であることが前提条件。

Umbrella Pricing（ガスレンジのケース）ではこれが当てはまらない。

T型フォード（1909-23）の学習曲線（経験曲線の近似）



両対数グラフでほぼ直線　・・・　プロダクティビティ・ジレンマ

著作権処理の都合で、この場所に挿入されていた図を省略させていただきます

J.C.アベグレン、ボストン・コンサルティング『ポートフォリオ戦略』プレジデント社 1977（p.40 図9）

著作権処理の都合で、この場所に挿入されていた図を省略させていただきます

J.C.アベグレン、ボストン・コンサルティング『ポートフォリオ戦略』プレジデント社 1977（p.31図4　p.32 図5図6 p。41図10）

例:岩屋磁器の
各事業の
生産性上昇率

表 3－3 主要事業の比較（3）： 生産

		レリーフ	ベセラ	伝統磁器	タイル	化学関連製品
製造工場		上有田	山内第二	T窯	有田（本社） 山内第一	西有田 有田（本社） 山内第一 山内第三
生産能力		10面／月 （200平米／月）	4000-4500個／月 （卓立て換算）	5トン／月	85000平米／月 （小口平タイル換算1100万個）	400立米／月
最近の生産実績		10面／月	3000-3500個／月 （卓立て換算）	4.5トン／月	85000平米／月	300立米／月
窯の数		シャットル窯：1 電気炉：3	シャットル窯：4	本窯：1 素焼窯：1 電気炉：4	トンネル窯：4 その他：3	トンネル窯：2 シャットル窯：2 高温炉：2 電気炉：2
平均的なロットサイズ		1面（一品生産）	50個	2000個	1000平米 （小口平13.5万個）	通常10立米以下
品種数（月当り）		10 （全て異なる）	100	300	100-150	5 （西有田のケース）
生産スループットタイム		60日	15－30日	30日	30－90日	90日
生産量の季節変動		大	小	大	小	小
生産量の景気変動		小	小	大	大	大
機械台数（窯を除く）		1	5	8	150	27
有形固定資産額 （1990年、100万円）		35	61	42	600	350
生産要員数		21	28	30	180	86
製品原価構成	材料費	10%	20%	17%	32%	n.a.
	直接労務費	65%	45%	41%	34%	25%*
	減価償却費	5%	5%	0%	4%	n.a.
	その他経費	20%	30%	42%	30%	n.a.
歩留り（焼成工程）		99%	90%	96%	90%	94%
段取り替え時間		無し	2時間	1時間	2－4時間 **	4時間 **
仕掛品回転日数		60日	15日	30日	2－10日	7－30日
生産性上昇率 （1990／80年比）		50%	16%	30%	70%	30%

注： ＊＝ボールのケース
＊＊＝トンネル窯の段取り替えを除く

学習曲線をめぐる論点

・ライバルより先に生産して、学習曲線を速くかけ降りた方が勝ち？

それならば、単純な、先手必勝のマーケットシェア競争（BCG）

・・・しかし、

全ての企業、全ての工場は同じ学習曲線を共有しているのか？

・生産性の上昇は、累積生産量の関数か、時間の関数か？

例えば・・・生産量が一定の比率で伸びているとき、
生産性の向上が累積生産量の関数か時間の関数かは判別できない。

一定成長率下の経験曲線

著作権処理の都合で、この場所に挿入されていた図を省略させていただきます

J.C.アベグレン、ボストン・コンサルティング『ポートフォリオ戦略』プレジデント社 1977（p.30 図3）

個人学習と組織学習

- Individual Learning…繰り返し作業によって、特定作業を行うスキル、効率アップする。
- Organizational Learning…製品、工程、設備、作業方式、組織などの改善によって効率をアップする。Individual Learningもその1ファクターに含む。

①個人ラーニング

推進力

- インセンティブ・システム
- 訓練・コーチ
- 作業のシステム化
- trial & error

限界

- 肉体的限界
- インセンティブ不足
- 忘れてしまう
- 歩行距離など
- 実験をやめてしまう（現状安住）

②組織ラーニング

推進力

- 技術の変化
- 学習のトランスファー
- 作業の設計【分業化】
- 人員の配置転換
- 組織内のプレッシャー

限界

- satisfying (現状安住)
- 現状安住
- critical mass不足
- 知識獲得をやめてしまう

個人の学習効果と組織の学習効果

個人の学習効果：作業の繰り返しによる「慣れ」

インセンティブや訓練などが個人の学習を加速化する

肉体的な限界、記憶力の限界などにより制約される

組織の学習効果：製造ルーチンの改善による生産性向上

マネジメントのやり方次第で、組織の学習効果は大きく異なる

個人の能力の限界によっては制約されにくい。
（継続的な改善が可能）

学習曲線の利用目的:予測か目標か？

（1）将来の工数や製造コストの予測に利用
（例えば入札価格の決定など）

しかし、学習曲線が実用的な予測精度をもつことは少ない。

（2）学習曲線を、与えられたものではなく、
やり方しだいで勾配を変えられるものと考える

→　学習曲線を、達成目標とみなす。

（c.f. 80%カーブの「自己実現予言」効果）

予測としての学習曲線

飛行機の価格決定

〔第２表〕

生産号機数$_N$	1	2	4	8	16	32	64	102*	128	170*	256	300*	500*	512
$\log_2 N$	0	1	2	3	4	5	6	6.67	7	7.41	8	8.23	8.97	9
CA	1	0.900	0.810	0.729	0.656	0.590	0.531	0.495	0.478	0.458	0.430	0.420*	0.389*	0.387
UF	1	0.800	0.701	0.624	0.559	0.502	0.451	0.420*	0.405	0.389*	0.365	0.356	0.330	0.328

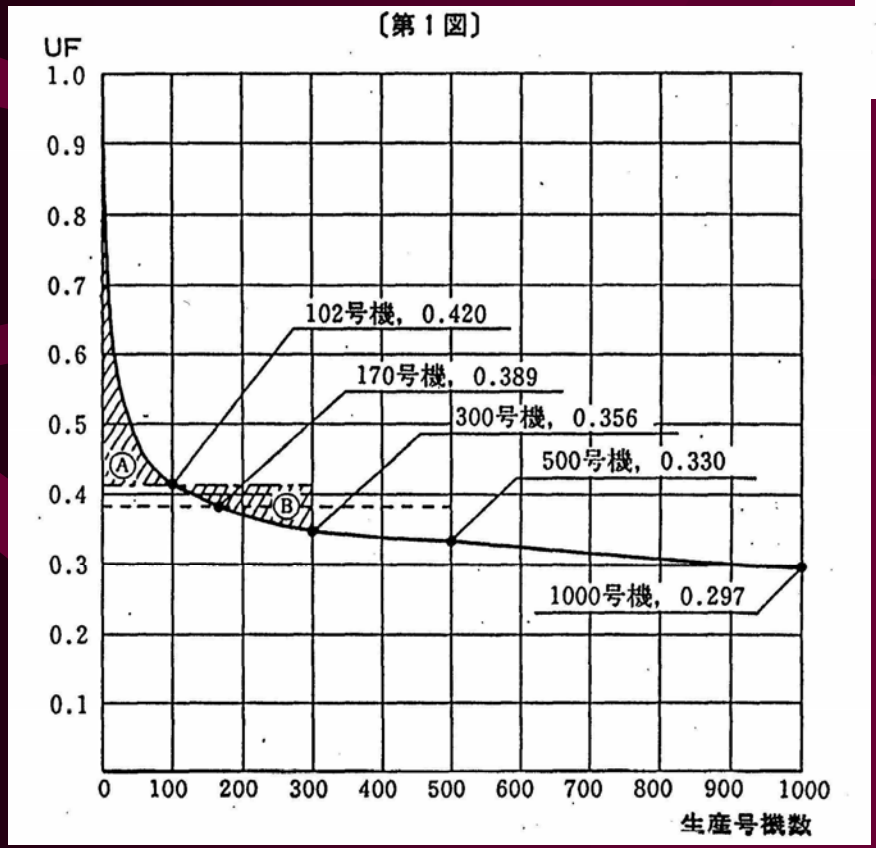
UF ：UNIT FACTOR　号機別工数

$UF_N = |CA_N \times N| - |CA_{N-1} \times (N-1)|$

米国では $UF = \left(\frac{R}{100}\right)^{\log_2 N}$ を用いる事が多いが，我国ではCA方式を用いる．

＊本文参照

〔第１図〕

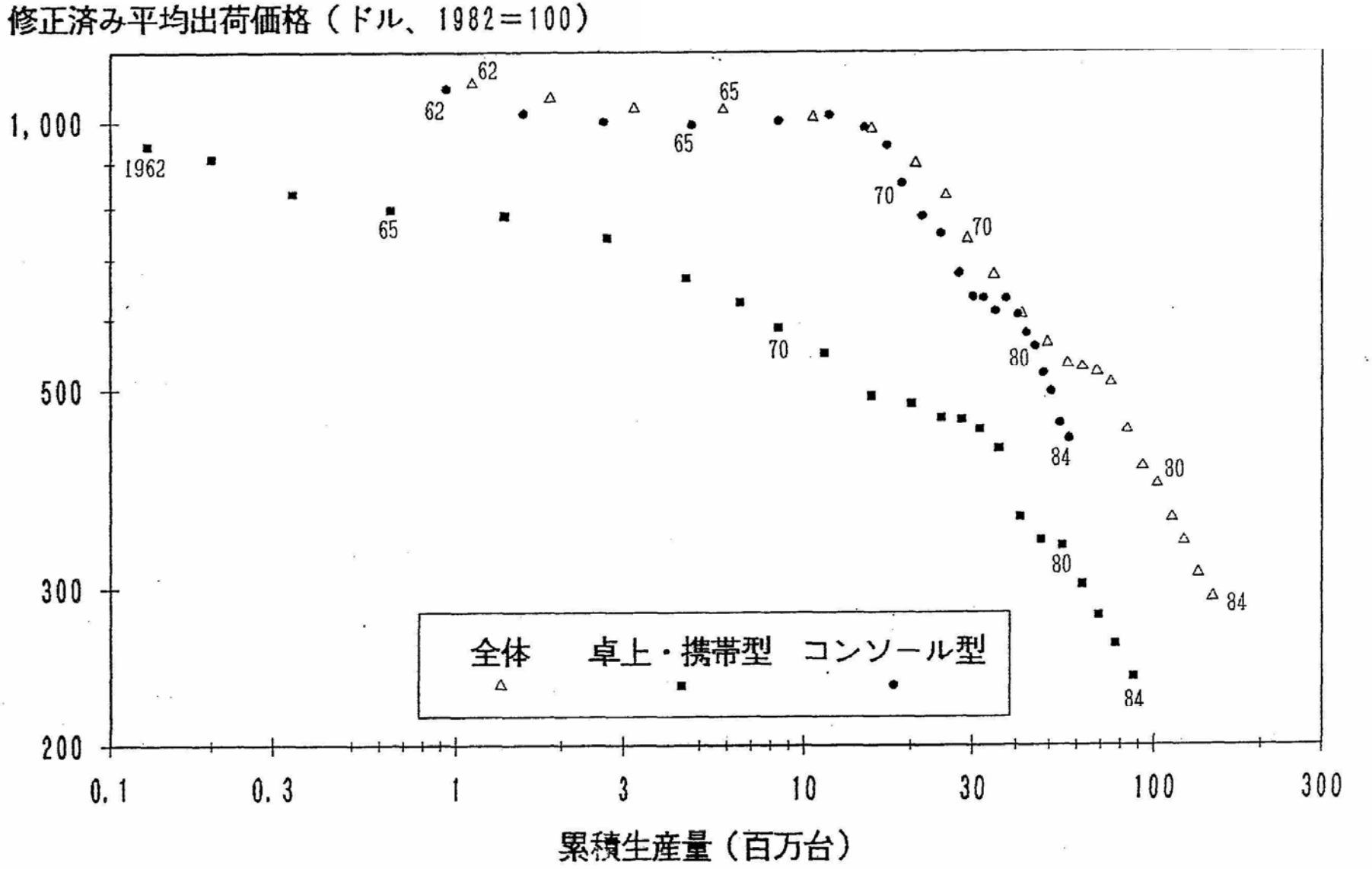


学習曲線は、製品間・工程間で異なるか？

航空機体のケース（Alchian）

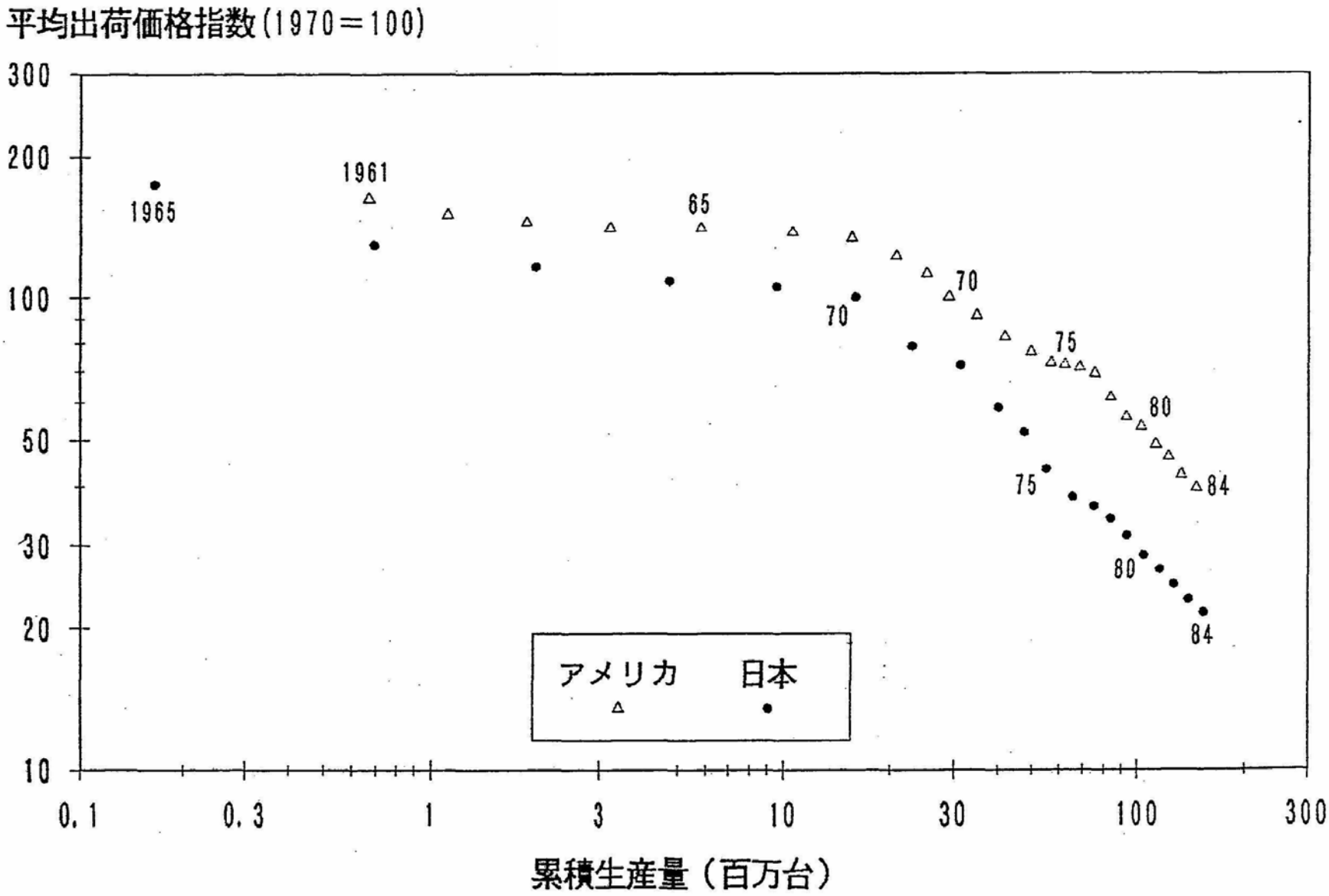
カラーテレビのケース（新宅）

アメリカ：タイプ別カラーテレビの経験曲線



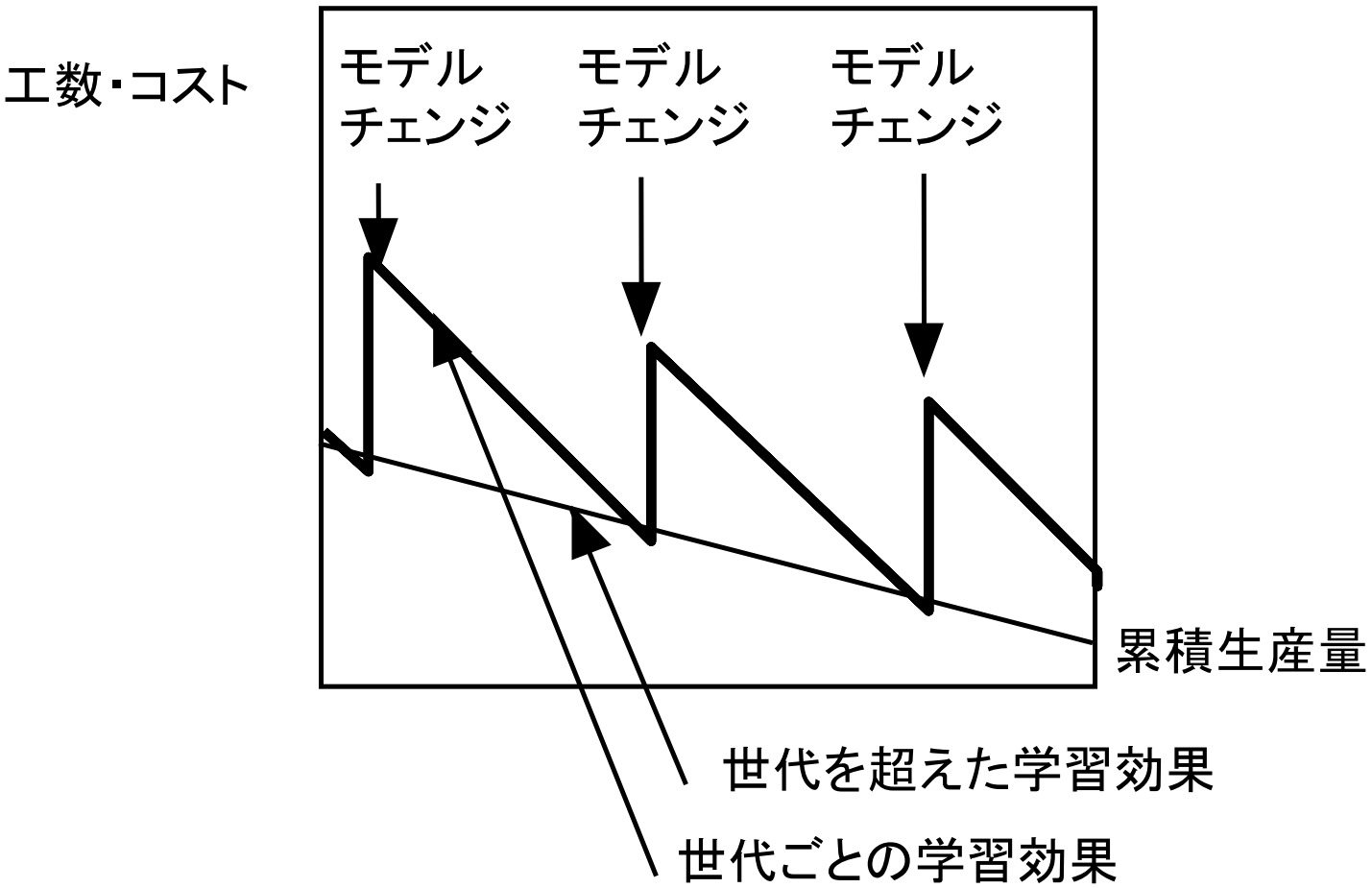
新宅純二郎『競争と技術転換』1991年

カラーテレビの経験曲線



新宅純二郎『競争と技術転換』1991年

モデルチェンジと学習効果



自動車の生産工数の例（富山）

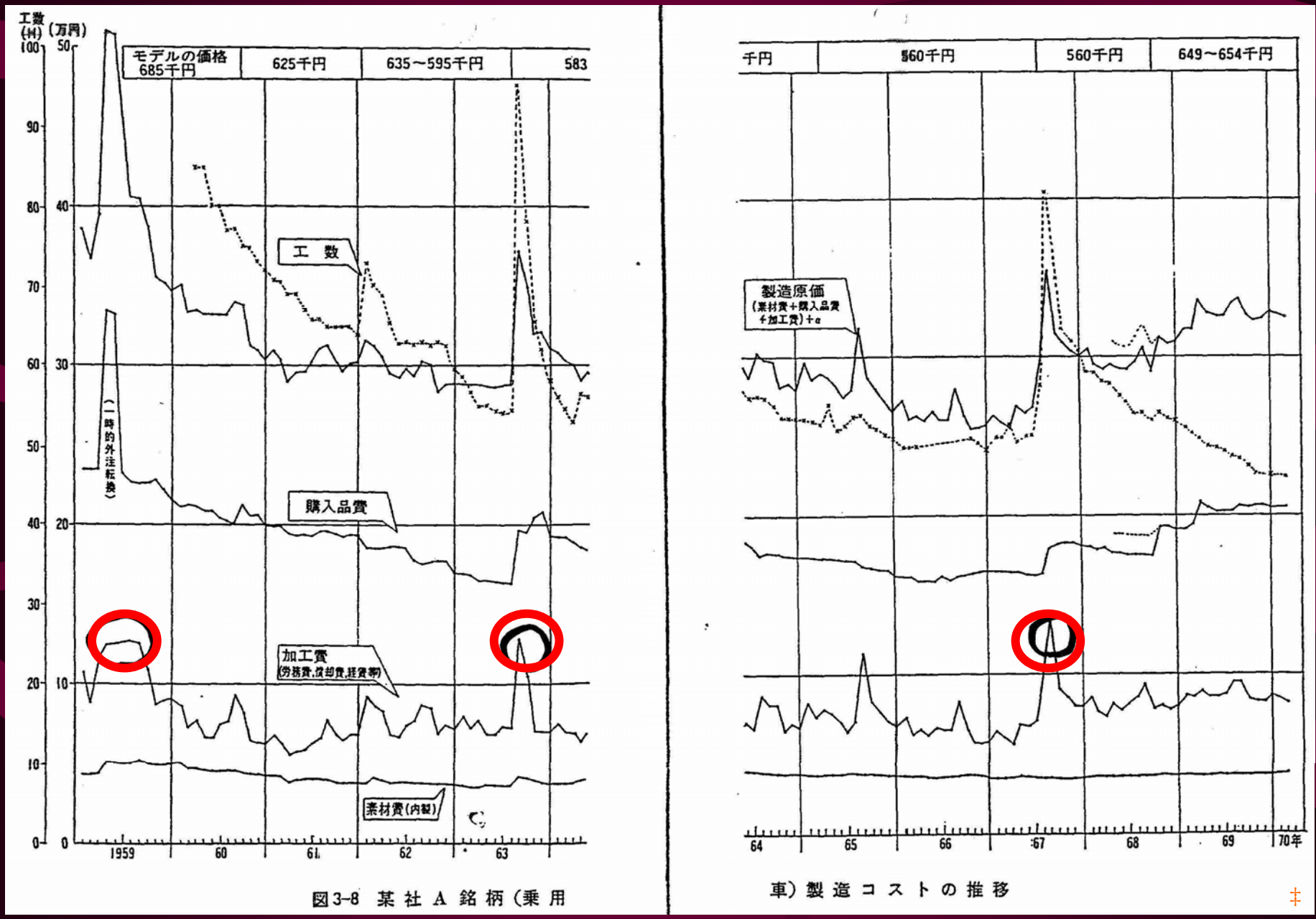


図3-8 某社A銘柄(乗用車)製造コストの推移

富山和夫『日本の自動車産業』東洋経済新報社（p.117 図3-8）

学習効果は、製品の世代間で移転するか？

- 時間軸に沿って、製品群が世代の連鎖になっている場合・・・
  （自動車、半導体など）

トータルの学習効果は、

（1）各世代ごとの学習曲線と

（2）世代を超えて共有される一般的な学習曲線とを

合成したものと考えられるかもしれない。

- あるいは、「学習方法の学習」の結果、世代が進むにつれて

学習スピードがアップする（bの値が変化）ことがあるかもしれない。

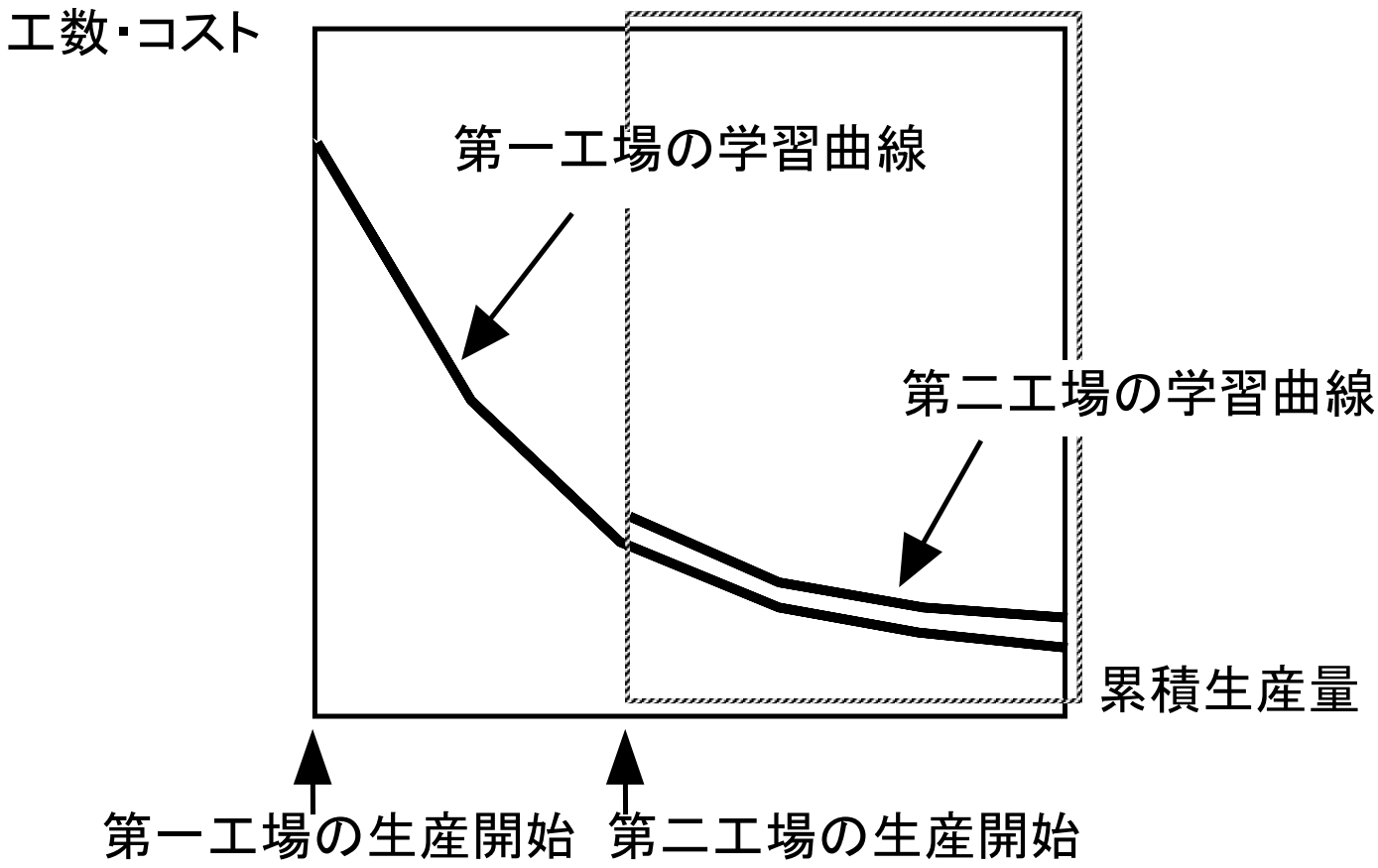
学習効果は、工場の世代間で移転するか？

・既存工場から新工場への学習効果の移転
（shared learning）？

もしあるならば、旧工場と新工場の学習曲線の形状は異なるはず。

（新工場のカーブは、切片が小さく、スロープも緩やか？）

学習効果の工場間移転の可能性



注：非対数グラフを想定している