

1C3 製造業の技術革新誘発構造の時代的変遷に関する実証分析(1960-1990)

○渡辺 千仍 (国際応用システム分析研究所)

1. 序 論

最近、製造業の研究開発離れや、技術の限界生産性の低下がつとに指摘されている[1]。本分析は、このような最近の懸念すべき兆候を技術革新誘発構造の視点に立って実証的分析を試みたものである。すなわち、技術を労働・資本・原材料・エネルギーと斉合的な生産要素と位置づけ、技術革新誘発構造を労働・資本・原材料・エネルギーの技術への代替努力ととらえて、1960-1990の構造変化を分析し、冒頭の兆候が代替努力の減退によるものであることを明らかにした。

2. 技術革新誘発構造-生産要素の技術への代替

企業が外生的な制約に直面すると、制約の強くなった生産要素を制約の緩い生産要素に代替することによって生産の維持に努める。日本の場合、後者はすぐれて技術に期待され、技術の選択はマクロ的にはこのようにビヘービアに沿う(例えば、[2],[3])。典型的には、1973年及び1979年の石油危機によるエネルギー価格の急騰(図1)に対し、日本の製造業は、生産要素としてのエネルギーを技術による代替(省エネ技術等)、次いで資本による代替(省エネ設備、生産設備の合理化等)により対処し、一定の生産の維持に成功した(図2)。そして、

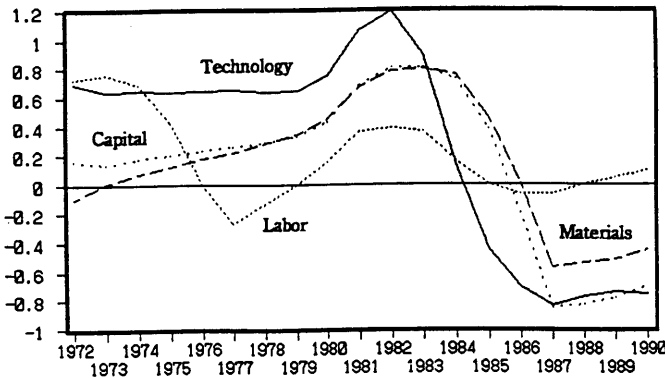


Fig. 2 Trends in Substitution of Energy to Other Production Factors in the Japanese Manufacturing Industry (1972-1992)

- a Trends in elasticity of substitution of energy (E) to production factors X (X: L, K, M and T) σ_{xe} can be measured by the following equation:

$$\sigma_{xe} = \frac{[\Delta(X/E)/(X/E)]}{[\Delta(Pe/Px)/(Pe/Px)]}$$
 where Pe and Px are prices of energy and production factor X respectively.
 σ_{xe} is equivalent to coefficient b in the following equation and can be measured by regression analysis:

$$\ln(X/E) = a + b \cdot \ln(Pe/Px)$$
- b Trends in the figure illustrate coefficient b in the above equation by means of regression analysis with 8 degrees of freedom by plotting $\ln(X/E)$ on the time scale taking the last quarter of the period examined.

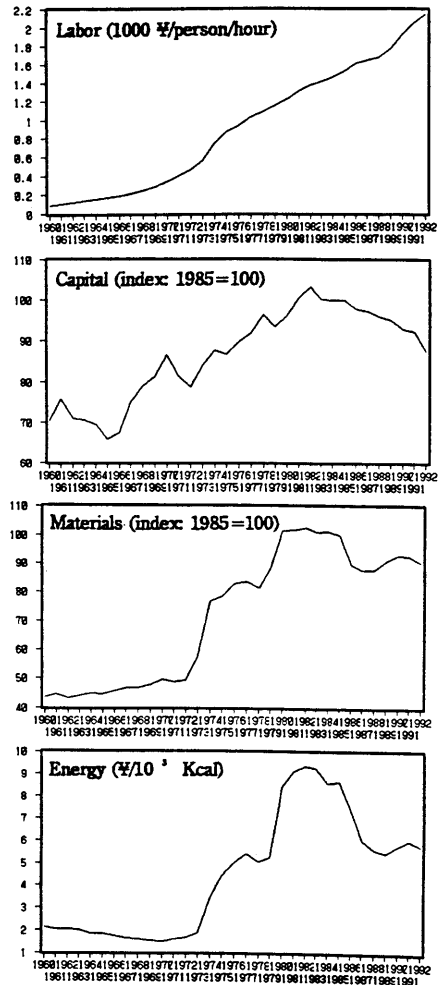


Fig. 1 Trends in Prices of Production Factors in the Japanese Manufacturing Industry (1960-1992)

a Sources: see Table 1

これは技術革新の面からは、大きな誘発要因となった[4]。だが、この誘発要因は、1983年からの石油価格の下落とともに減退することとなった(図2)。

日本の技術革新の誘発構造は、歴史的にこのような生産要素間の代替、すなわち、各時代毎の制約の強い生産要素の技術への代替努力に符合する[3]。

各生産要素の技術への代替は、両者の相対価格に支配される。外生的要因によってある生産要素の価格が技術価格より高騰した場合には、技術への代替が選択され、当該生産要素の生産性向上のための技術革新が誘発される[2]。

このような視点に立って各生産要素の対技術相対価格(各生産要素価格/技術価格:計測方法は後出)の推移を見ると(図3)、いずれも第2次石油危機の1979年をはさむ1978-1980年に大きく構造変化し、①労働は、ほぼ水平から1985年以降再上昇、②資本は、急減、③原材料(エネルギー以外の中間投入)は、急減から1986年以降水平化、④エネルギーは、急減していることが伺われる。

このような、労働を除く生産要素の技術相対価格の急減は、それぞれの技術への代替すなわち技術革新誘発構造を大きく変え、この構造変化が最近の研究開発離れや、技術の限界生産性低下の構造的要因となっていることが想像される。

3. 技術代替弾性値の計測

3.1 分析のフレームワーク

以上の仮説を検証するために、日本の製造業を対象に各生産要素の技術への代替動向を分析した。生産要素X、Yの価格を P_x 、 P_y とすると、両者の相対価格の変化によるYのXへの代替弾性値 σ_{xy} は、

$$\sigma_{xy} = [\Delta(X/Y)/(X/Y)] / [\Delta(P_y/P_x)/(P_y/P_x)] \quad \text{..... ①}$$

で表される。式①の σ_{xy} は、次式のbに等しい¹⁾。

$$\ln(X/Y) = a + b * \ln(P_y/P_x) \quad \text{..... ②}$$

技術を他の生産要素と齊合的に位置づけ、それぞれの価格を計測し、②式にあてはめれば、各生産要素が、他の生産要素に対して独立とみなした場合のそれぞれの生産要素毎の技術への代替弾性値を計測し、技術への代替のマクロ的イメージを分析することができる²⁾。

労働(L)、資本(K)、原材料(M)、エネルギー(E)、及び技術(T)からなる生産関数及びそれぞれの価格

1) ②式の両辺を時間で微分すると、
 $[\Delta(X/Y)/(X/Y)] = b * [\Delta(P_y/P_x)/(P_y/P_x)]$

2) 生産要素間の代替程度を正確に比較するためには、トランスログコスト関数による分析が必要。

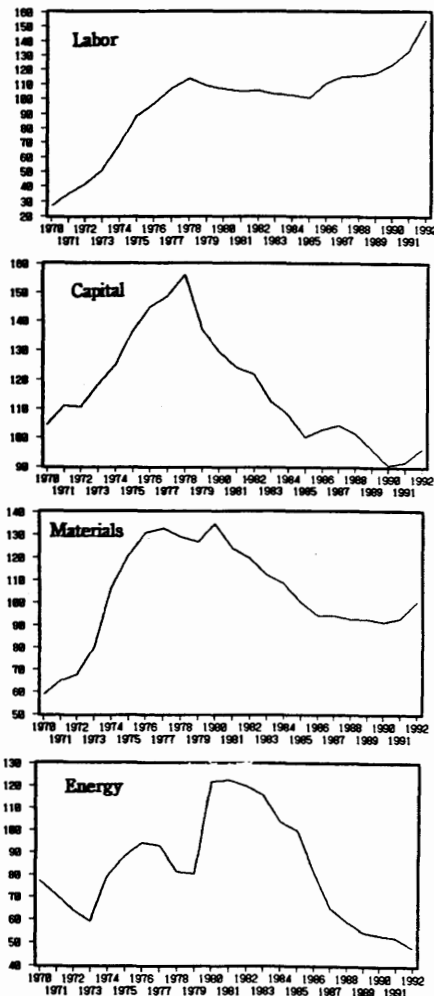


Fig. 3 Trends in Relative Prices of Production Factors in Comparison with Price of Technology (RPT) in the Japanese Manufacturing Industry (1970-1992) - Index: 1985=100

a RPT is ratio of prices of production factors (P_x) and price of technology (P_T): $RPT = P_x/P_T$

b Source: see Table 1

P_l、P_k、P_m、P_e、P_t及び生産Yからなるコスト関数を推定して(表1)、両関数から技術を含む各生産要素のトレンド及びそれぞれの価格を計測し、②式に基づいて各生産要素毎の技術への代替弾性値を計測した。技術はテクノストック(T)によって計測し、その価格(P_t)はテクノストック1単位当たりの総技術開発支出(GTC: 研究開発支出+技術輸入支払い額)によって計測した。技術を他の生産要素と斉合的に位置づけるため、L、K、M、Eに含まれる技術要素は控除した。従って、計測した技術は、「研究開発費、その労働・資本・原材料・エネルギー構成、研究開発に使用した研究者数及びその研究時間、研究設備ストック及びその稼働率・原材料及びエネルギー使用量、技術輸入額、研究開発から商業化に至るリードタイム及び技術の陳腐化率」によるものであり、それ以外の質的ファクター例えば革新性等は計測に含まれない。

3.2 データ構築

分析用のデータ構築及びベースデータは表1に示す通りである。構築したデータの検証結果は図4に示す通り、他の統計データと対比して妥当なものと判断された。

Table 1 Framework of the Analysis

General concept

$$\begin{aligned} \text{Production: } Y &= f[(L-Lr), (K-Kr), (M-Mr), (E-Er), T], \\ T &= h(Lr, Kr, Mr, Er) \\ \text{Gross cost: } C &= c(Y, P_l, P_k, P_m, P_e, P_t) = (GLC-GTC_l) + (GCC-GTC_k) \\ &\quad + (GMC-GTC_m) + (GEC-GTC_e) + GTC \\ GTC &= GTC_l + GTC_k + GTC_m + GTC_e \\ &\text{(under the assumption of the linear homogeneity of the cost function)} \\ \text{Prices: } P_l &= (GLC-GTC_l)/(L-Lr), P_k = (GCC-GTC_k)/(K-Kr), P_m = (GMC-GTC_m)/(M-Mr), \\ P_e &= (GEC-GTC_e)/(E-Er), \text{ and } P_t = GTC/T. \end{aligned}$$

Data construction

$$\begin{aligned} Y \text{ (production)} &= (1985 \text{ gross cost}^{**}) \quad 1985 \text{ gross cost: gross cost at 1985 fixed prices} \\ L \text{ (labor)} &= (\text{number of employed persons}^{**}) \times (\text{working hours}^{**}), \\ K \text{ (capital)} &= (\text{capital stock}^{**}) \times (\text{operating rate}^{**}), \\ M \text{ (materials: intermediate inputs except energy)} &= (1985 \text{ intermediate inputs}^{**}) \\ &\quad - (1985 \text{ gross energy cost}^{**}), \\ E \text{ (energy)} &= (\text{final energy consumption}^{**}), \text{ and} \\ T \text{ (technology)} &= GTC_{t-m} + (1-\rho)^t T_{t-1}, \\ &\quad GTC_{t-m}: \text{gross technology cost in time } t-m \\ &\quad m: \text{time lag from R\&D to commercialization}^{**} \\ &\quad \rho: \text{rate of obsolescence of technology}^{**} \\ Lr \text{ (labor for technology)} &= (\text{number of researchers}^{**}) \times (\text{working hours}^{**}) \\ Kr \text{ (capital stock of R\&D: KR)} &= (\text{operating rate}^{**}) \\ KRt &= GTC_{kt} + (1-\rho_{kr})KRt-1 \\ &\quad \rho_{kr}: \text{rate of obsolescence of capital stock for R\&D (inverse of the average of} \\ &\quad \text{lifetime of tangible fixed assets for R\&D}^{**}) \\ Mr \text{ (materials for R\&D)} &= \dots \\ Er \text{ (energy for R\&D)} &= \dots \\ GLC \text{ (gross labor cost)} &= (\text{income of employed persons}^{**} + \text{income of unincorporated} \\ &\quad \text{enterprise}^{**}) \\ GCC \text{ (gross capital cost)} &= (\text{gross domestic product}^{**} - \text{gross labor cost}) \\ GMC \text{ (gross materials cost)} &= (\text{intermediate input} - \text{gross energy cost}) \\ GEC \text{ (gross energy cost)} &= \text{expenditures for fuels and electricity}^{**} \\ GTC \text{ (gross technology cost)} &= \text{R\&D expenditure and payment for technology import}^{**} \\ GTC_l \text{ (R\&D expenditure for labor)} &= \dots \\ GTC_k \text{ (R\&D expenditure for capital)} &= \dots \\ GTC_m \text{ (R\&D expenditure for materials)} &= \dots \\ GTC_e \text{ (R\&D expenditure for energy)} &= \dots \end{aligned}$$

Sources of data

- *1 Annual Report on National Accounts (Economic Planning Agency)
- *2 Year Book of Labor Statistics (Ministry of Labor)
- *3 Statistics of Enterprisers' Capital Stock (Economic Planning Agency)
- *4 Annual Report on Indices on Mining and Manufacturing (MITI)
- *5 Industrial Statistics (MITI)
- *6 Economic Statistics Annual (The Bank of Japan)
- *7 Comprehensive Energy Statistics (Agency of Natural Resources & Energy)
- *8 Report on the Promotion of Research Industry (Institute of Economic Research, Japan Society for the Promotion of Machine Industry, 1990)
- *9 Report on the Survey of Research & Development (Management and Coordination Agency)
- *10 Survey on Researchers for the Promotion of Basic and Leading Science & Technology (Institute for Future Technology, 1990)
- *11 Corporate Tax Law (MITI)
- *12 Quarterly Report on Unincorporated Enterprise (Economic Planning Agency)

3.3 分析結果

1955-1992の38年間を対象に、②式をもとに、自由度8の移動時系列相関により、労働・資本・原材料及びエネルギーそれぞれの技術への代替弾性値を計測した結果は、表2に示す通りである。表2に基づき、それぞれの弾性値を、相関分析期間(各10年)のうち最も代表的な動向を示すと考えられる3/4期(8年目)³⁾にプロットして示した結果は図5に示す通りであり、図5により各生産要素の技術への代替動向のマクロ的イメージを把握することができる。

図5により、1960年代初めから1990年までの間のマクロ的イメージを見ると、

- ① 労働は、一貫して技術への代替の方向に推移し、特に、第2次石油危機以降それが強まった(生産ラインへのロボットの導入等)が、1980年代末に至って弱まりを見せ始めた。これは労働の量的側面の技術への代替がサーチレートし、より困難な質的側面の代替に遭遇しつつあることを示唆するものである。
- ② 資本は、60年代から70年代初めにかけて大きく技術への代替が進んだが、第1次石油危機以降相対的に鈍化し、80年代初め以降急速に弱まり補完の方向に転じた。これは、すぐれて資本価格の低下の結果対技術相対価格が低下し、技術への代替動向が減殺され、技術革新性の低い資本の装備の方向に転じたことによるものと思われる。
- ③ 原材料は、60年代から70年代にかけて、一定レベルで技術への代替が進んだ、80年代初め以降の価格低下にとともない、急速に代替が弱まり、補完の方向に転じた。
- ④ エネルギーも、60年代から70年代にかけて一定レベルで技術への代替が進み、特に第2次石油危機以降は、代替が急進したが、1983年以降の国際石油価格の下落と軌を一にエネルギー価格が下落したことにとともない、エネルギー研究開発が影を薄め、技術代替は鈍化し、80年代半ばから補完に転じた。

3) 実態分析との照合結果によるものであり、理論的には、別途統計理論面からの検証が必要。

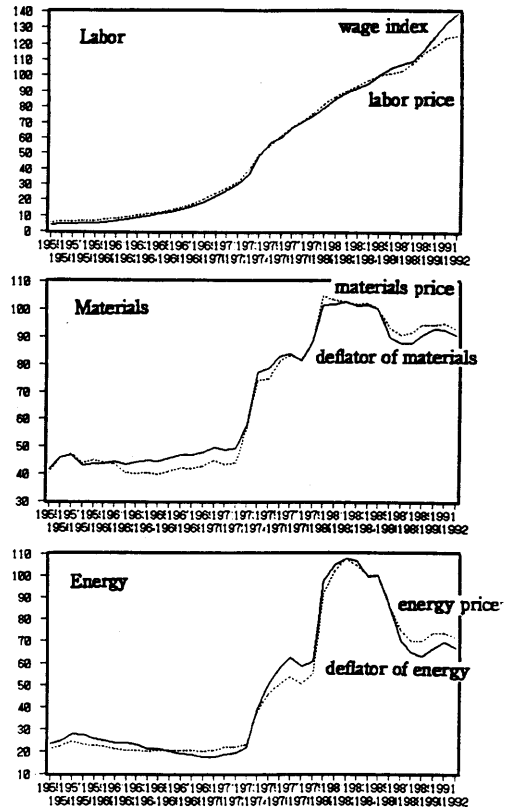


Fig. 4 Assessment of the Measured Production Factors: Correlations between Measured Prices and Related Deflators in the Japanese Manufacturing Industry (1955-1992)

a. Correlations between measured labor price (Pl) and wage index (Wl), materials price (Pm) and deflator of materials (MD), energy prices (Pe) and deflator of energy (ED) in the Japanese manufacturing industry over the period of 1955-1992 are as follows:

	adj. R ²	DW
$\ln P_l = -0.84 + 1.09 \ln W_l$ (35.39)	0.972	1.06
$\ln P_m = -1.56 + 0.90 \ln MD$ (28.89)	0.959	2.08
$\ln P_e = -0.34 + 1.04 \ln ED$ (28.69)	0.958	1.43

where Wl: wage index, MD: overall wholesale price index for intermediate materials except energy, and ED: overall wholesale price index for fuel and electric power.

3.4 分析結果の考察

各生産要素毎の技術への代替動向に関する以上の分析結果を見ると、一貫して価格上昇を続ける労働を除き、他の生産要素はいずれも80年代初め以降の価格低下によって技術への代替動向が薄れ、80年代初めから中頃にかけて補完に転じている。その結果、80年代半ば以降の日本の製造業の技術代替は、労働のみにシフトし、80年代初めまでの資本・原材料・エネルギーを含め、すべての生産要素が大なり小なり、技術代替を指向した構造と大きく変容を遂げたことが伺われる。

4. 技術代替減少の波及

生産要素の技術代替の減少は当該生産要素の限界生産性の低下をもたらす(表3)。

Table 3 Correlations between Elasticities of Technology Substitution for Production Factors and Marginal Productivity of Respective Production Factors in the Japanese Manufacturing Industry in the 1980s

		R ²	DW
Labor	MPL = 0.81 + 0.44 Lag2 (T/L) (13.48)	0.933	1.71
Capital	MPK = 0.25 + 0.01 Lag0 (T/K) (6.47)	0.747	1.52
Materials	MPM = 0.99 + 0.02 Lag4 (T/M) (10.17)	0.928	2.56
Energy	MPE = 0.74 + 0.16 Lag2 (T/E) (10.29)	0.913	1.44

その結果、労働を除くすべての生産要素の限界生産性を低下または停滞をさせ、80年代後半以降の「技術選択の労働代替シフト化」をもたらすこととなった(図6)。

各生産要素の限界生産性の変化は一定のタイムラグをもって技術の限界生産性に影響する(表4)。

Table 4 Contribution of Marginal Productivities of Production Factors to Marginal Productivity of Technology in the Japanese Manufacturing Industry (1976-1991)

$$\ln MPT = 4.83 + 0.86 \text{Lag3} (\ln MPL) + 1.30 \text{Lag3} (\ln MPK) + 3.23 \text{Lag3} (\ln MPM) + 0.10 \text{Lag3} (\ln MPE)$$

(7.53) (3.39) (3.10) (3.18)

R² 0.929 DW 1.97

Table 2 Trends in Elasticity of Technology Substitution for Production Factors in the Japanese Manufacturing Industry (1955-1992 by moving correlations with 8 degrees of freedom)

	Labor T/L	Capital T/K	Materials T/M	Energy T/E
1955-1964	1.34*	1.39*	(0.39#)	(-0.51#)
1956-1965	1.16*	1.19*	1.08**	(0.65#)
1957-1966	1.08*	1.12*	1.25*	1.22**
1958-1967	1.05*	1.11*	1.27*	1.62*
1959-1968	1.06*	1.20*	1.32*	1.71*
1960-1969	1.08*	1.27*	1.33*	1.47**
1961-1970	1.13*	1.31*	1.31*	(0.89#)
1962-1971	1.21*	1.37*	1.30*	(0.28#)
1963-1972	1.27*	1.59*	1.31**	(-0.18#)
1964-1973	1.28*	1.93*	1.29**	(-0.07#)
1965-1974	1.21*	2.79**	1.12**	(0.49#)
1966-1975	1.09*	2.81*	1.17*	0.64*
1967-1976	1.03*	2.45*	1.15*	0.65*
1968-1977	0.98*	2.30*	1.12*	0.64*
1969-1978	0.96*	2.04*	1.10*	0.65*
1970-1979	0.96*	1.98*	1.08*	0.66*
1971-1980	1.01*	1.89*	1.06*	0.64*
1972-1981	1.06*	1.52*	1.07*	0.65*
1973-1982	1.19*	(0.81#)	1.18*	0.75*
1974-1983	1.43*	(-0.13#)	(0.53#)	1.07*
1975-1984	1.53***	-0.29**	-1.06**	1.20**
1976-1985	(-0.53#)	-0.23**	-1.02*	(0.90#)
1977-1986	(-1.90#)	-0.23**	-0.85*	(0.14#)
1978-1987	(0.16#)	-0.29**	-0.87*	(-0.45#)
1979-1988	2.17***	-0.40*	-0.84*	-0.71***
1980-1989	2.76***	-0.35**	-0.83*	-0.84*
1981-1990	2.69***	-0.23***	-0.90*	-0.77*
1982-1991	2.25**	(-0.21***)	-0.95**	-0.74*
1983-1992	1.63*	(-0.37#)	-0.94***	-0.76*

a Trends in elasticity of technology (T) substitution for production factor X (X: L, K, M and E) σ_{tx} can be measured by the following equation:

$$\sigma_{tx} = \left[\frac{\Delta (T/X)/(T/X)}{\Delta (P_x/P_t)/(P_x/P_t)} \right] \text{ where } P_x \text{ and } P_t \text{ are prices of production factor X and technology respectively. } \sigma_{tx} \text{ is equivalent to coefficient b in the following equation and can be measured by regression analysis: } \ln(T/X) = a + b \ln(P_x/P_t)$$

b Marks on figures indicate significance of t-value:
* : significant at the 1% level, ** : significant at the 5% level, *** : significant at the 10% level, and # : not significant

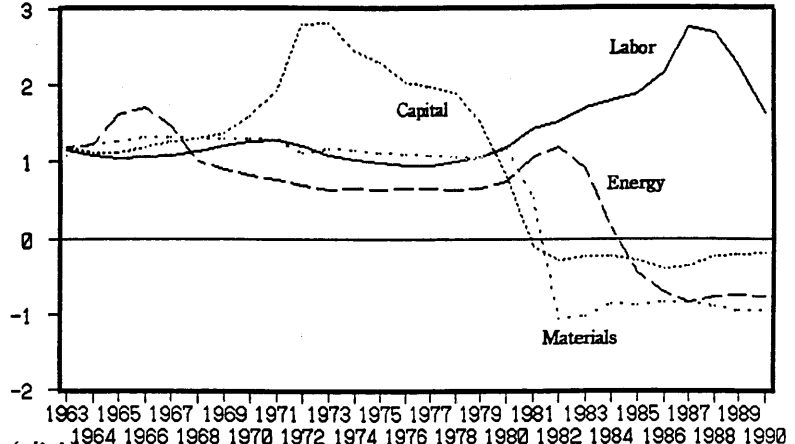


Fig. 5 Trends in Elasticity of Technology Substitution for Production Factors in the Japanese Manufacturing Industry (1960-1992)

a Trends in elasticity of technology (T) substitution for production factor X (X: L, K, M and E) σ_{tx} can be measured by the following equation:

$$\sigma_{tx} = \left[\frac{\Delta (T/X)/(T/X)}{\Delta (P_x/P_t)/(P_x/P_t)} \right] \text{ where } P_x \text{ and } P_t \text{ are prices of production factor X and technology respectively. } \sigma_{tx} \text{ is equivalent to coefficient b in the following equation and can be measured by regression analysis: } \ln(T/X) = a + b \ln(P_x/P_t)$$

b Trends in the figure illustrate coefficient b in the above equation by means of regression analysis with 8 degrees of freedom by plotting on the time scale taking the last quarter of the period examined.

表4を見ると技術の限界生産性に及ぼす労働の限界生産性は、資本や原材料のそれに比べて小さいことが伺われる。従って、「技術選択の労働シフト化」は、技術全体の限界生産性の低下をももたらす悪循環に帰結する。

5. 考察

80年代初め以降の価格低下は、「技術選択の労働シフト化」をもたらし、技術全体の限界生産性低下の悪循環の要因となった。最近の懸念すべき兆候は、このような構造変化に起因するものと思われる。

- このような状況からの脱却を図るためには、
- ① 資本・原材料・エネルギーの対技術相対価格是正のための技術価格の低減、すなわちテクノストックの質的向上、及び
 - ② 労働の質的側面の技術代替の促進、が不可欠である。

図7は、仮に1980年から年率5%の割合でテクノストックの質的向上を図ったとした場合の資本の対技術相対価格及び技術の資本代替弾性値をシミュレートしたものであり、相対価格の是正及びそれとともなう技術代替回復への効果が伺われる。

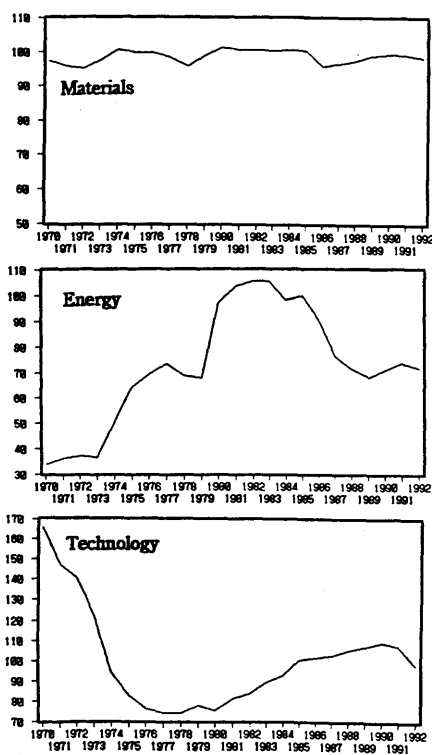
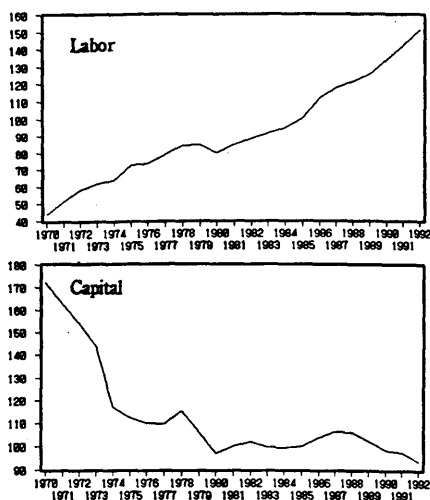


Fig. 6 Trends in Marginal Productivity of Production Factors in the Japanese Manufacturing Industry (1970-1990)
— Index: 1985=100

a Marginal productivity of production factor X (MPX) can be measured by the following equation:
 $MPX = (GX/GC) \cdot (Y/X)$

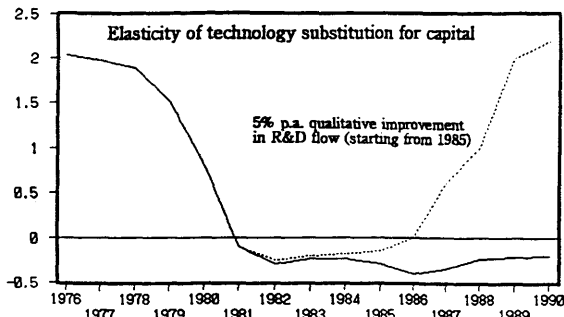
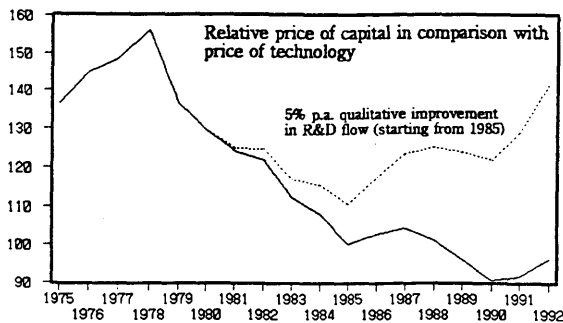


Fig. 7 Estimate of the Effects of Qualitative Improvement in R&D Flow on the Relative Price of Capital and Elasticity of Technology Substitution for Capital in the Japanese Manufacturing Industry (1975-1992)
— Under the assumption of 5% p.a. qualitative improvement in R&D flow starting from 1980

References

- [1] C. Watanabe, "An Analysis on Waning Trends in R&D Activities in the Japanese Manufacturing Industry", Abstract of Annual Conference on the Japan Society for Science Policy and Research Management (Tokyo, 1993).
- [2] C. Kennedy, "Induced Bias in Innovation and the Theory of Distribution", *Economic Journal* 54, September (1964).
- [3] Economic Planning Agency, *White Paper on the Japanese Economy* (Tokyo, 1985).
- [4] C. Watanabe, "Trends in the Substitution of Production Factors to Technology", *Research Policy* 21, No6 (1992).