

Title	鉄鋼産業における構造変化の分析
Sub Title	Empirical analysis of structural change in the iron and steel industry
Author	荒木, 義明
Publisher	慶應義塾経済学会
Publication year	1979
Jtitle	三田学会雑誌 (Keio journal of economics). Vol.72, No.6 (1979. 12) ,p.835(143)- 846(154)
JaLC DOI	10.14991/001.19791201-0143
Abstract	
Notes	研究ノート
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-19791201-0143

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

鉄鋼産業における構造変化の分析

荒 木 義 明

1. 問題の所在

産業革命を経験した国々では、それを機に人口の増加と一人当たり生産物の飛躍的増大が生起している。その背景には、経済規模の拡大と、それに必然的に随伴する構造変化がある。本稿では、このような構造変化が、如何なるメカニズムによって生じるかということ、鉄鋼産業について分析する。ただ、ここで用いられる方法は、鉄鋼産業に固有なものではなく、基本的⁽¹⁾に全産業に対して適用可能なものである。

ここで、構造変化とは、厳密には、W. Leontiefの投入産出体系における投入係数行列の変化を指している⁽²⁾。この構造変化の原因は、基本的には、資本の特性(property)が変化することに求められる。そこで、資本の特性を陽表的に導入した生産関数を定式化することによって、上記の課題に対処していくことにしよう。

周知のように、鉄鋼産業は、化学産業などと同様、規模の経済性が強く作用する産業である⁽³⁾。本研究では、資本の特性として工学的変数を導入することによって、規模の経済性の意味をより立入って分析することにした。

まず、鉄鋼産業の分析のための単位を、次の三つの代表的な生産プロセスに置く。すなわち、製鉄・製鋼・圧延の各プロセスである⁽⁴⁾。更に各生産プロセスにおける主要な技術変化を次の二点に集約する。すなわち、(1)各プロセスにおける個々の資本設備の原料処理の大

容量化、(2)処理速度の高速化がこれである。たとえば、製鋼プロセスにおいては、前者は、平炉や転炉の炉内容積の拡大に、後者は、各炉の炉内反応速度の上昇にそれぞれ代表される。製鋼プロセスにおける平炉法と転炉法は、上記の技術的特性や投入物の種類と量が異なるので、そこに代替関係が存在する。生産規模の拡大や各投入物の相対価格の変化は、この代替を促進するように作用する。ここで重要なのは、製鋼プロセスにおける各製法間の代替が、それぞれの技術的特性や投入物相対価格に依存するだけでなく、他のプロセス(製鉄・圧延)との技術的補完性の程度によって、それらのプロセスの特性変化とも、相互依存関係を持つということである。

以下、次節では、鉄鋼産業の技術的特性と戦後の構造変化に関する説明と観察事実を記述する。第三節では、資本の特性概念を導入した分析モデルを提示し、理論変数と観察変数との対応を考察する。

鉄鋼産業における構造変化が、各生産プロセスの技術的特性と投入物相対価格の変化に、また各プロセス間の相互依存関係と最終製品の市場規模に究極的には起因していることを、自律度の高い関係式で示したいと思う。

2. 鉄鋼産業における

技術的特性と観察事実

現時点に至るまでの我が国粗鋼生産のピークの年である1973年の生産量と、1955年のそれを比較すると、

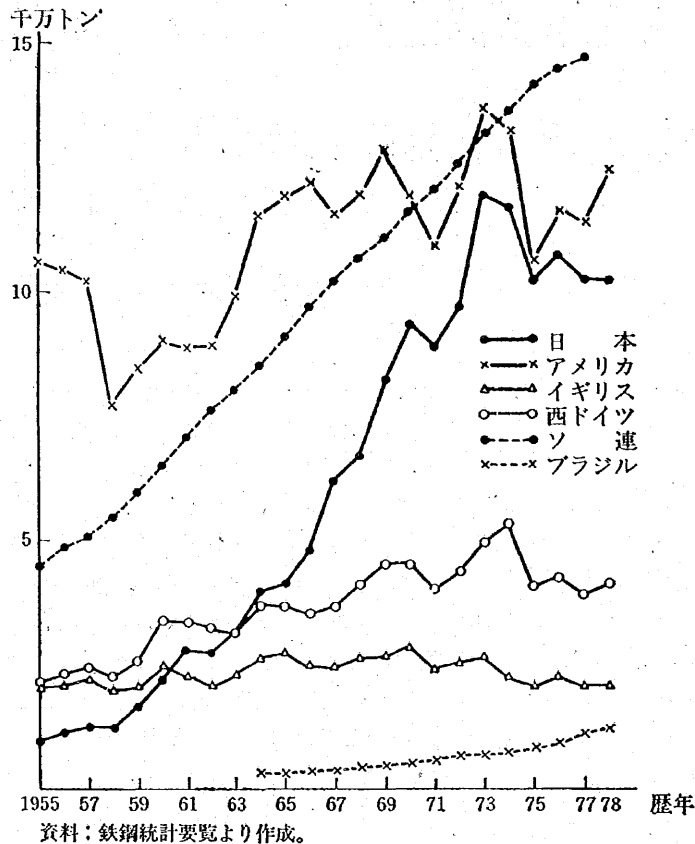
注(1) 先駆的業績として、Chenery [3]、小尾 [1] などがある。筆者は、この研究での分析と同様な方法を建築物について適用したことがある(荒木 [2] 参照)。

(2) この定義は、Leontief [4] p. 19 による。

(3) Ozaki [7] 参照。

(4) この三つのプロセスの説明は、次節で行う。

第1図 各国の粗鋼生産量の推移



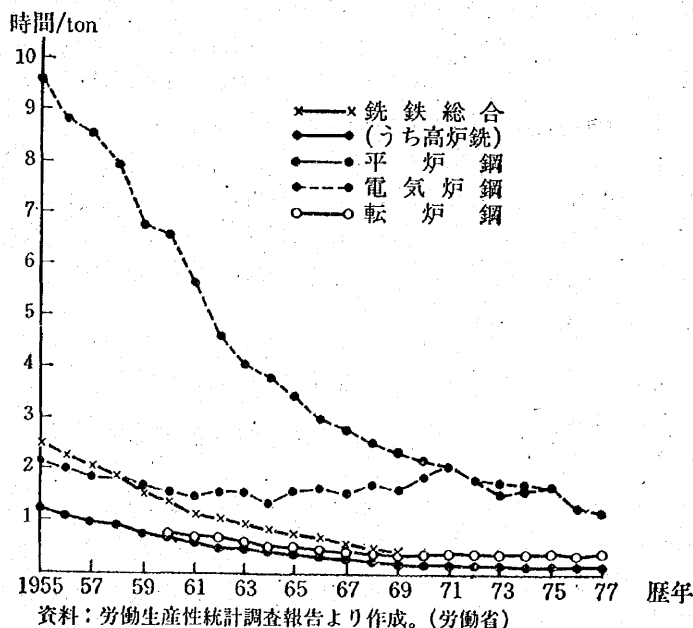
前者は後者の約12.7倍に達する(第1図参照)。諸外国と比較しても、このような長期に亘って高い成長率を持続した国は、ソヴィエトを除いて、この期間中にはない。またこの間の我が国の実質GNPの伸びは、約5.2倍であったから、鉄鋼産業の成長が、国内他産業に比しても顕著なものであったことが分る。このような生産規模の拡大を背景にして、各投入物の投入係数も変化した。とりわけ、労働投入係数は、各プロセスにおいて著しく低下している(第2図参照)。鉄鋼産業における各投入物の投入係数の変化は、また単に生産規模の拡大のみに依っているのではなく、異なった生産方法の間の代替(たとえば、製鋼プロセスにおける平炉法から転炉法への生産シフト)にも起因している。このことを、より深く分析するために、その準備として現代の製鉄法の主要な生産プロセスを簡単に説明する(第3図参照)。

第3図 生産プロセスの概略

原料採掘→原料輸送→
(鉄鉱石・石炭など)
原料事前処理→製鉄→
製鋼→加工→製品輸送→販
(圧延、鍛造など)
売

製鉄に限らず、一般に生産分析には、生産プロセスという概念が、きわめて重要である。しかしながら、このプロセスを数限りなく細分化していくのではなく、類似の自然法則に従うものを一括して一つのプロセスとしたり、総生産コストに占めるウェイトの高いプロセスをとりあげれば、当面の経済分析には十分有用である。このような原則によって、鉄鋼一貫製鉄所の生産プロセスを大

第2図 品目別トン当り直接労働投入時間



注(5) 構造変化の経済分析という視点から、説明している。なお、工学的な点は、三本木〔9〕や日本鉄鋼協会〔8〕などを参考にした。

別すると、製鉄・製鋼・圧延の三プロセスに代表される。以下、この三プロセスの技術的特性をみよう。

(i) 製鉄プロセス

自然界において鉄 (Fe) は、通常酸素 (O) と結びついて存在している。すなわち、赤鉄鉱 (Fe_2O_3) や磁鉄鉱 (Fe_3O_4) などがその主な種類である。鉄と酸素は、電気的な力で結合しているの、加熱することによって、これら原子間の結合力を弱め、還元剤 (コークスに含まれる炭素) を用いて鉄と酸素を分離⁽⁶⁾させる。このように加熱による還元反応を行って、鉄鉄をとり出す装置が溶鉄炉 (高炉ともいう) である。溶鉄炉で生産される鉄鉄は、炭素分が多く、他の鉄石やコークス中のイオウなどの不純物が混合されているので、次の製鋼プロセスでこれらの成分を鋼の最終用途に応じて調整する。第2図や第6図にみられるように、我が国の溶鉄炉は、戦後一貫して労働投入係数やコークス⁽⁷⁾比を低下させてきている。それらを実現できた理由には、原燃料事前処理、複合送風 (重油吹き込みなど)、送風設備・制御機器の改良・高圧操業などの技術変化があげられよう。溶鉄炉に関するこれらの諸々の技術変化は、次の二点に集約できると考えられる。それは、①溶鉄炉の大容量化 ②還元反応処理速度の上昇である。

(ii) 製鋼プロセス

先述したように、溶鉄炉で生産された鉄鉄の中には、炭素を始めイオウ、リンといった物質が多く含まれているので、これらを酸化させて分離することによって、鋼を生産するのが、このプロセスである。従って、製鉄プロセスが、鉄鉄石や焼結鉄の還元反応を主としたのに対して、製鋼プロセスは、鉄鉄やスクラップ⁽⁸⁾の酸化反応を主とする。製鋼プロセスには、現在のところ大別して三種類の生産方法がある。

まず第1の方法は、転炉法である。この方法は、溶鉄炉で生産された溶鉄 (溶けた鉄鉄) を転炉内に移し、ランスから高圧で酸素を吹きつけることで酸化反応を行う。周知のように、この反応は発熱反応であるので、酸素以外特に燃料は要しない。反応速度が非常に早く、炉の設計も比較的単純なので、炉の大容量化も容易で、かつ平炉に比べると資本財コストが低いのが特徴であ

る。最近時は、れんがの改良などにより、炉体寿命も伸びている。第2図にみられるように、製鋼プロセスにおける三つの生産方法のうちで、労働投入係数が最も低い。また第4図にあるように、各国とも、製鋼プロセスにおいて転炉法による生産比率が上昇しているのは、上記の理由の他に、液体空気から純酸素をとり出す技術の確立も大いに寄与していることを付記しておく。

第2の方法は、電気炉法である。この方法には、アーク式と高周波誘導式の2つの方式があるが、前者が一般的に使用されている。電気炉法で用いられる原料は、転炉法とは異なりスクラップの使用比率が高い。従って、溶鉄炉との補完性は、それだけ弱いことになる。アークに超高压の電流を流すことによって熱源を得るので、電力を大量に使用する。この方法は、特に高級鋼の生産に優位性を持っている。反応速度は、転炉ほどではないが、平炉よりも早い。ただ、価格の比較的不安定なスクラップを原料としているので、景気変動の影響を特に受けやすい欠点がある。

最後に説明する方法は、平炉法である。原料は、鉄鉄、スクラップのどちらでも比較的自由に調節できる。燃料には、重油とコークス炉などから出る一酸化炭素ガスを使用する。反応速度は、三方法のうちで最も遅く、第2図にみられるように、労働投入係数もあまり低下していない。また、設備の設計上の理由から、設備コストも高い。しかも、生産された鋼の品質改良の面でも、転炉法や電気炉法に比べて、かなり遅れている。こうした理由から、戦後、平炉法は急速にその生産シェアを低下させている (第5図参照)。

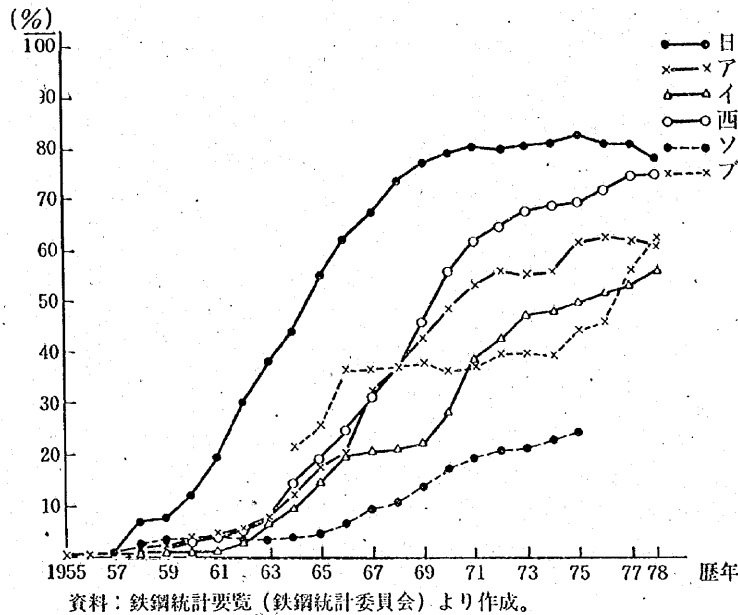
以上のような製鋼プロセスにおいて、鉄鋼産業の構造変化を考察する上で重要なことは、次のような点である。まず、製鋼プロセスの技術変化は、各製法とも種々あるが、結局のところ、①各炉の炉内容積の拡大と②酸化反応処理速度の高速化という傾向を持っている点で共通している。ただその程度が、各製法間で異なるだけである (第7図参照)。次に、製鉄プロセスとの補完性の程度が、各製法間で異なっている。それは、転炉法において最も強く、電気炉法において最も弱い。従って、前者の原料コストは、製鉄プロセスにおける生産コストに依存し、後者は、スクラップ価格に依存している。製鋼プロセスにおける各製法の普

注(6) 炭素分が、1.7~4.6%程度含まれており、炭素分の少ない鋼と区別される。

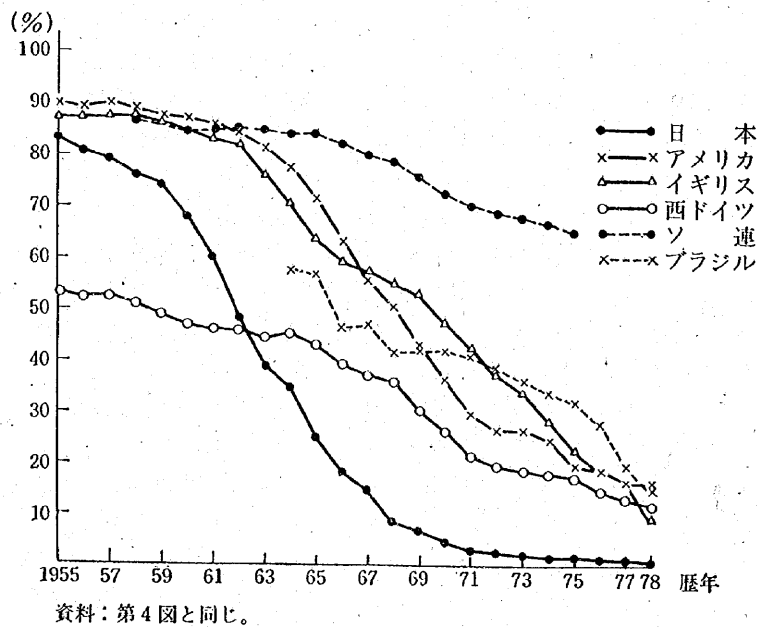
(7) 出鉄量トン当りコークス消費量。

(8) 他産業や家計、製鉄所内部で発生する。

第4図 製鋼プロセスにおける純酸素転炉法の生産比率



第5図 製鋼プロセスにおける平炉法の生産比率



及の程度は、上記の技術的特性や生産規模、各必要投入物の相対価格、そして産出される鋼の品質水準によって決定される。

(iii) 圧延プロセス

注(9) 条鋼類には、軌条、形鋼、棒鋼、線材などがあり、建築・土木用が多い。鋼板類には、冷延鋼板、ブリキなどがあり、機械・建設用に用いられる。鋼管は、水・ガスなどの配管用やボイラ用などがある。外輪は、客貨車や電車に使用される。特殊鋼は、いわば高級鋼が多く、ステンレス鋼や高抗張力鋼などがあり特殊な用途を持っている。

最終的な鉄鋼生産物の種類は、厳密に分類すると約5万種にのぼる。

多種多様な最終用途に応じて、鋼の加工方法の種類も多い。鉄鋼製品を大別すると、①条鋼類 ②鋼板類 ③鋼管 ④外輪 ⑤特殊鋼の5種類程度になろう。

製法は、上記の製品の各々について異なり、更に製品の形や大きさに応じて資本設備が異なる場合が多い。加工方法は、圧延（塑性加工）、鋳造、切削、溶接などがある。圧延は、鋼材に力を加えることによって、所与の規格に合わせて加工することをいう。圧延は、他の加工方法に比べると、製品の精度や加工速度などの面で特に利点があるので、ほとんどの鋼材は、圧延プロセスで加工される。圧延プロセスには、熱間加工と冷間加工とがあり、前者で処理された鋼材のうち、最終用途に応じた精度、表面状態などの条件によって、後者を採用するかどうかが決められる。圧延プロセスにおける技術変化は、圧延機本体のみならず、制御機器や計測機械などにも及び実に多様であるが、究極的には、次の二点に代表させられよう。それは、①材料となる鋼片の大型化と、②圧延加工速度の上昇である。

3. 構造変化の分析

のための理論設定

ここで考察すべき問題を明確にするために、前節での観察事実を簡単に要約しておく。まず、鉄鋼産業に

における主要な生産プロセスでは、労働力やコークスなどの投入係数が、過去20年程の間に著しく低下していることである。第二には、その背景にある技術変化として、各プロセスとも、①原料処理の大容量化と②処理速度の上昇という二点で、共通の傾向を持ってい

鉄鋼産業における構造変化の分析

ることである。第三には、特に製鋼プロセスにおいて、溶銑を原料とする転炉法の生産シェアが上昇し、酸化反応速度が相対的に遅く、設備コストなども高い平炉法の生産シェアが、低下する傾向のあることである。従って、これらの製法間の代替によって、鉄鋼産業全体としての各種投入物の投入割合が変化している。最後に、これらの構造変化が起こる背景には、市場規模や、各投入物の相対価格の変化、そして各製法間の技術的特性の差異があるということを指摘した。以下、これらの観察事実を踏まえて、構造変化の分析をするための理論設定を行うことにする。

(1) 生産関数

鉄鋼生産ということ、工学的観点から簡潔に述べると次のようになる。まず原料である鉄鉱石に含まれる鉄 (Fe) と酸素 (O) 及び他の元素を、コークスに含まれる炭素を使って高熱で分離し (製銑)、更に種々の鉄鋼製品の原料になるように鉄と各元素の成分調整を行い鋼をつくる (製鋼)。こうしてできた鋼を、各用途に応じて精整・加工 (特に圧延) する。ただ、電気炉メーカーは、スクラップを原料とするので、溶銑炉を持たずに、製鋼プロセスから始める。製銑・製鋼・圧延の各プロセスとも、生産方法や資本財ごとに、詳細な工学的研究がなされているが、その関係式は多くの場合かなり複雑である。⁽¹⁰⁾ しかも、鉄鋼生産全体に互いの共通な関係式を、簡潔に示すことは、現在のところ実際的には不可能である。そこで、ここでの経済分析に有用なように、次のような単純化された生産関数をもって、その近似式としたい。

H. B. Chenery によると、資本設備の設計法則を表わす工学的生産関数は、次の二段階に分けられる。第1段階は、所与の産出物を得るための原料変形の際

に必要な投入産出物特性の関係を明示することである。これは、次のような原料変形関数によって一般的に表現される。

$$\text{原料変形関数 } q = q(k, \xi, E_r) \quad (1)$$

q : 生産能力, k : 原料特性, ξ : 産出物特性
 E_r : エネルギー必要量

第2段階は、エネルギーを供給するに必要な諸要素の組合せを決定することであり、これは、諸要素の特性の関数として表現される。

$$\text{エネルギー供給関数 } E_r = E(\pi_j) \quad (2)$$

π_j : 諸要素の特性

ここで、(2)式を(1)式に代入したものが、工学的生産関数と呼ばれる。

ところで、鉄鋼の各生産プロセスにおいて、原料は運動をしており、そのことからエネルギー必要量は、主としてそれらの物質の運動量に依存している。たとえば、製銑や製鋼プロセスでは、物質の化学反応や移動が、エネルギー必要量に影響し、更に圧延プロセスでは、圧延機のワーク・ロールと鋼材との摩擦力の大きさが、それに影響を与える。そこでエネルギー必要量を、主として資本の特性、すなわち資本設備の単位時間当たり原料処理能力の関数と考えて次のように定式化する。原料密度一定とすると、資本設備の原料処理能力は、体積 (s) と物質移動速度 (v) の関数である。体積は、一般に、高さ (a) と底面積 (b) の関数であるから、結局エネルギー供給関数は、

$$E_r = E(a, b, v) \quad (3)$$

となる。(3)式を(1)式に代入し、更に原料特性 (k) と産出物特性 (ξ) を所与とすると工学的生産関数は、

$$q = q^{(1)}(a, b, v) \quad (4)$$

となる。

鉄鋼産業の技術変化が、①原料処理の大容量化と②

注(10) たとえば魏氏による鉄鉱石の還元速度式は、

$$R_e^* = \frac{\pi d p' \phi N 273 (x - x_e) / 22.4 t}{(1/K_f) + (dp/2Ds) \{ (1 - fs)^{-1/2} - 1 \} + \{ (1 + fs)^{3/2} Re (1 + 1/K_e) \}^{-1}}$$

記号は、 dp : 鉄鉱石の粒子径 (cm), ϕ : 鉄鉱石の形状係数, N : 鉄鉱石の単位容積 (cm^3) 当りの粒子数, x : ガス中 CO のモル分率, x_e : 平衡時の CO のモル分率 (cm^3/sec), t : 鉄鉱石の温度 ($^{\circ}\text{K}$), K_f : 境膜物質移動係数, Ds : ガス境膜内拡散係数 (cm^2/sec), fs : 鉄鉱石の還元率, Re : 反応速度定数, K_e : 平衡定数, R_e^* : 総括反応速度を表わす (三木本 [9] 第2巻 p. 110 参照)。

(11) たとえば、溶銑炉の中を流れる原料を、円筒を流れる粘性流体として単純化して考えると、Navier-Stokes の運動方程式から、次の Hagen-Poiseuille の式が導出できることが知られている (ランダウ [10] p. 51~p. 109 参照)。

$$Qe = \frac{\pi R_c^4}{8\nu} \left(\frac{\Delta Pr}{l} \right) + \rho g e$$

ここで、 Qe : 流量, π : 円周率, R_c : 円筒の半径, ν : 粘性係数, ΔPr : 上下の圧力差, l : 円筒の高さ, ρ : 流体の密度, ge : 重力定数

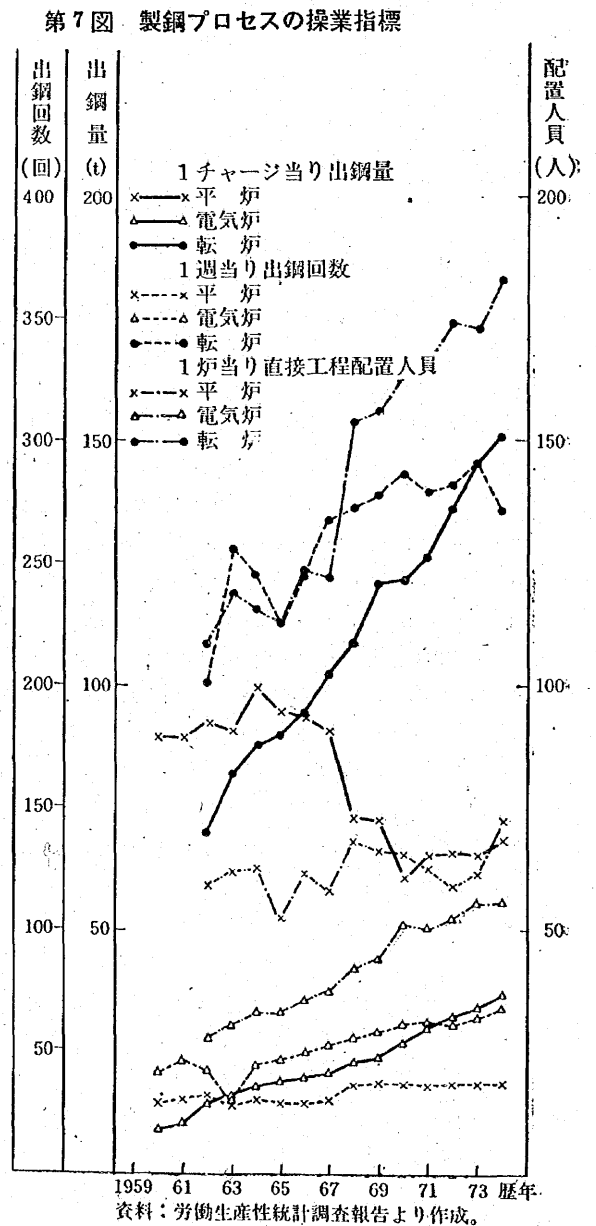
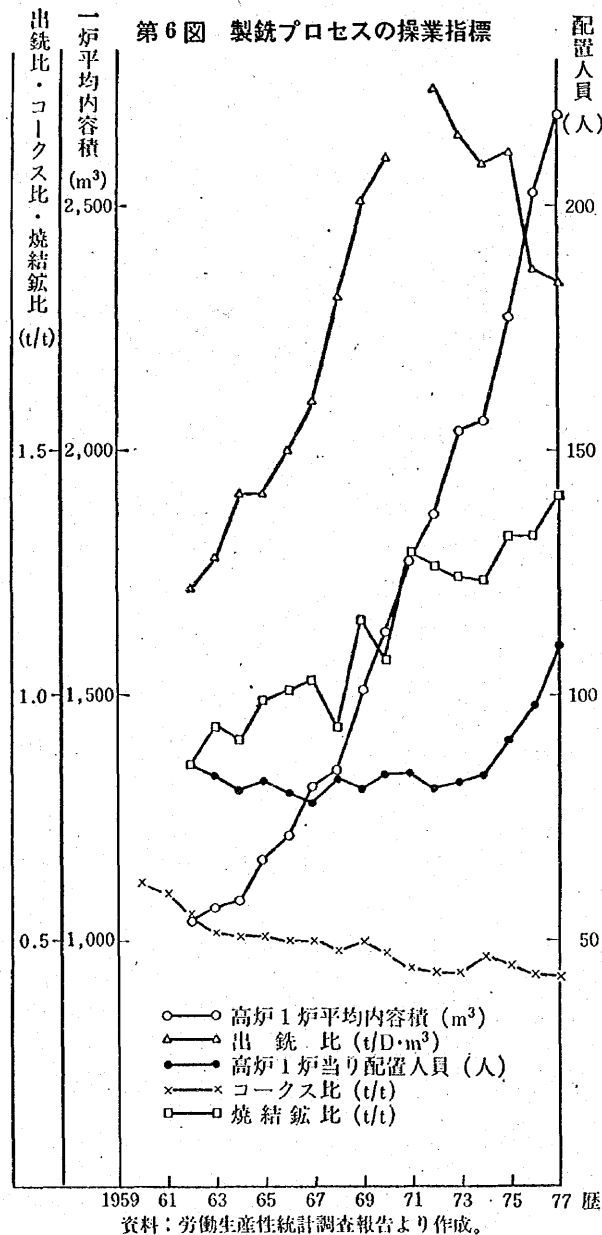
この式から、原料の流量は、炉の高さ、底面積、流速などの関数であることが推察できる。

処理速度の上昇に代表されることは先述したが、(4)式で示された工学的生産関数において、 a と b によって前者を、 v によって後者を表現していることになる。以下製鉄・製鋼・圧延の各プロセスごとに生産関数の理論変数に対応する観察変数を考察していくことにする。

(i) 製鉄プロセス

製鉄プロセスにおいて、原料を直接処理する主要な

資本設備は、溶鉄炉である。鉄鉱石や焼結鉱は、コークスや石灰とともに、この溶鉄炉に入れられて鉄鉄となる。従って、生産能力 q は溶鉄炉の出鉄能力 Q_i に、高さ a は溶鉄炉の炉高 A_i に、底面積 b は溶鉄炉の炉床面積 B_i に、更に移動速度 v は出鉄比(炉内容積当り一日の出鉄量) V_i に、それぞれ対応できよう。第6図にみられるように生産量の拡大の背景には、炉内容積の拡大と出鉄比の上昇がある。また、同図は出鉄比を変動させることによって、生産調整も可能であるこ



注(12) 炉高と炉床面積のデータは得られなかった。しかし、炉内容積の拡大とともに、 A_i/B_i 比は低下する傾向があることが知られている(三本木〔9〕第2巻参照)。

とを示している。

ii) 製鋼プロセス

製鋼プロセスにおける主要な資本財は、転炉、電気炉、平炉である。ここで、生産能力 q は各炉の出鋼量 Q_s に、高さ a は各炉の炉高 A_s に、底面積 b は各炉の炉底面積 B_s に、更に移動速度 v は各炉の単位期間当り出鋼回数 V_s に、それぞれ対応できると考えられる。単位期間当り出鋼回数が多いことは、炉内での化学反応速度や物質移動速度が早いことを結果として表わしていることになる。第7図にみられるように、1チャージ当り出鋼量⁽¹³⁾や出鋼回数の面で、転炉法が優れていることが分る。また、同図は、出鋼回数を変動させることで、生産調整も可能であることを示唆している。

(iii) 圧延プロセス

前の二つのプロセスが製錬といわれ、主として化学反応処理に重点があるのに対して、圧延プロセスは、固体の変形(塑性加工)処理が中心である。圧延プロセスにおける主要な資本財は、圧延機である。最終製品の種類によって、圧延方法や資本財が異なることは先述した。そこで、ここでは最も生産ウェイトの大きい鋼板類を例に説明する(他の種類の製品も基本的には、同様な方法を適用できる)。圧延前の鋼材と圧延後の鋼板との運動量の保存則と、圧延機の仕事を考慮すると、まず生産能力 q は最大鋼板生産量 Q_r に、高さ a は、鋼材厚さの倍率 A_r' / A_s' (A_s' : 圧延前の鋼材の厚さ、 A_r' : 圧延後の鋼板の厚さ⁽¹⁴⁾) に、底面積 b は鋼板の断面積 B_r

に、移動速度 v は粗圧延機の圧延速度 V_r に、それぞれ対応する。以上の観察変数を対応させることによって、戦後の圧延技術変化(鋼片の大型化によって、圧延前と圧延後の鋼の加工比を高め、かつ圧延速度を上昇させる)の主要な部分を説明できると思われる。

(2) 費用方程式

工学的観点からすると、投入物は、原料(materials)と加工処理要素⁽¹⁵⁾(processing factors)とに大別できる。前者は、産出物に物理的に組み込まれる投入物であり、後者は、原料を産出物に変換するためにのみ使用される投入物である。原料使用量は、各生産プロセスにおける加工処理空間の体積と処理速度⁽¹⁶⁾とに依存しているのに対し、加工処理要素は、同一空間を形成する表面積と処理速度とに大きく依存している。このことが、産出量と加工処理要素との非線型関係をもたらす主要な原因になっていると考えられる。もちろん、加工処理要素の種類によって、この関係の程度は様ではない。更に加工処理要素の投入量は、制御機器の発達や、生産能力にはほとんど影響しない要因(環境汚染防止対策、エネルギー効率改善対策など)によっても、増減する。従って、これらの事情を考慮して、工学的変数(資本の特性)と加工処理要素の投入量との関係を明示する必要がある。それは、次のような投入関数で表わされる。

$$x_{ij} = x_{ij}(a_j, b_j, v_j, \bar{g}_j) \quad (5)$$

x_{ij} : j プロセスにおける i 投入物の投入量

$\bar{g}_j$: j プロセスにおいて、生産能力 q_j には影響しないが、投入量 x_{ij} には影響する変数(外生

注(13) 溶鉱炉と同じく、炉高と炉底面積のデータが得られなかったため、出鋼1回当りの出鋼量を図示している。転炉の場合、炉内容積の拡大と共に、 A_s/B_s 比は溶鉱炉の場合とは逆に上昇する傾向がある(三本木〔9〕第3巻参照)。

(14) 圧延の仕事の一指標として、工学的には、圧下率 $\eta = \frac{A_r' - A_s'}{A_s'}$ がよくとられる。これを使うと鋼材厚さの倍率は、 $\frac{1}{1 - \eta}$

となる。なお板幅の増加は、板幅・板厚比が大きい場合、ほとんど無視してよい(三本木〔9〕第6巻参照)。また鋼板以外の製品の場合には、高さ a には、圧延前と圧延後の鋼材断面積比 B_r' / B_s' を対応させる。

(15) Chenery〔3〕参照。加工処理要素としては、資本財、労働力、エネルギーなどがあげられる。

(16) いま溶鉱炉を、円柱形として単純化した例を考える。円柱の体積は、 $S = ab(a$: 高さ、 b : 底面積)である。これに対し表面積は、 $T = 2b \left(1 + \frac{a}{r_c}\right)$ (r_c : 半径)である。従って、表面積・体積比は、 $T/S = \frac{2}{a} + \frac{2}{r_c}$ となって、半径や高さが大きくなればなる程低下する。すなわち、溶鉱炉の表面積単位当り材料費(鉄皮やれんがの使用面積当り費用)が不変であれば、炉内容積が大きくなるにつれて、生産物単位当り溶鉱炉(資本財)費用は低下する。また、炉内反応速度の上昇も通常同様な結果をもたらす。資本財のほかエネルギーや労働力投入量についても、多くの工学的研究から体積よりも表面積により大きく依存しているようである。

(17)
的に処理する)

各生産プロセスにおける費用方程式は、

$$c_j = \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} \quad (6)$$

 c_j : j プロセスにおける総費用 p_i : i 投入物の価格

費用方程式を設定する場合、特に問題となるのが資本費の取扱いである。利子費と減価償却費の計算方法は種々あるが、ここでは次のような簡略法を用いる。まず利子費については、現実の支払利子費（これは、各企業の財務内容によって異なる）ではなく、機会費用としてのそれを考える。従って、 t' 期間の利子費総額 R は、当該資本財購入総額を $P_k \cdot K$ (P_k : 資本財価格, K :

資本財投入量) として、

$$R = (1+r)^{t'} P_k K - P_k K \\ \approx t' r P_k K \quad (7)$$

 r : 期間当り利子率ゆえに、期間当り平均利子費は、 $r P_k K$ である。次に、減価償却率 d を通常の費用計算で使われている定率法で定義すると、

$$d = 1 - \sqrt[t'']{S_v / P_k K} \quad (8)$$

 t'' : 耐用期間 S_v : 資本財残存価額

(8)式から明らかなように、減価償却費は、資本財の耐用期間 t'' によって大きく影響される。市場均衡の立場からすれば、耐用期間 t'' は本来、内生変数でなければならないが、ここでの研究では、これを外生的

に扱うことにする。なお、租税を考慮に入れると、会計学的な耐用期間（たとえば、税法などで規定されているもの）と実際の生産活動における耐用期間（たとえば、各炉の炉体寿命）との総費用に与える効果は異なることに注意せねばならない。この分析では、単純化のために租税を考慮に入れず、かつ耐用期間については、後者の意味で使用することにしたい。

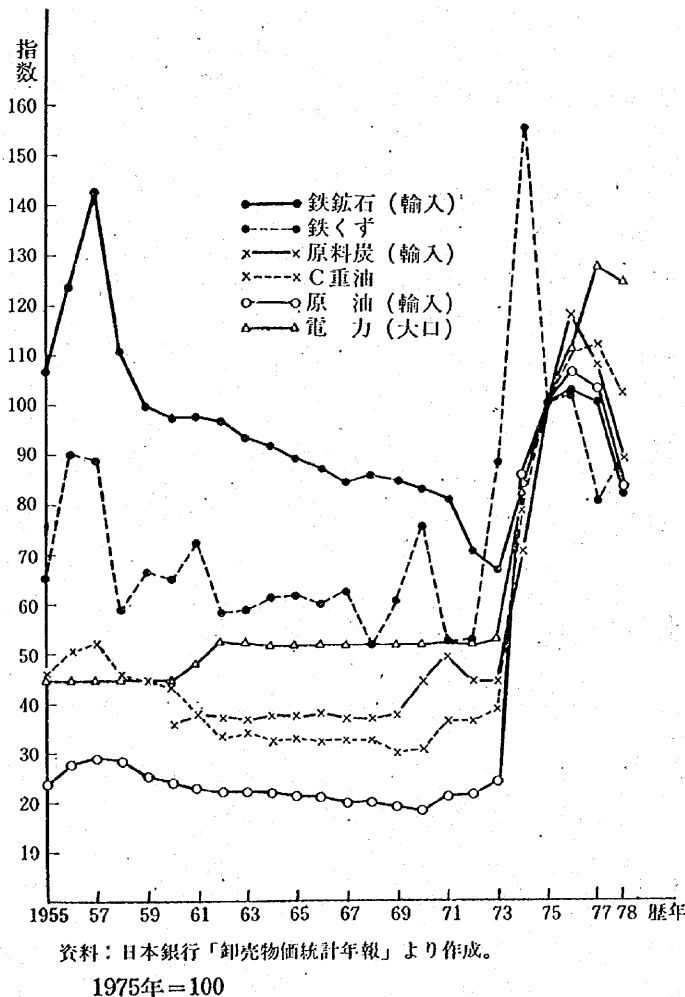
期間当り資本費は、(7), (8)式から、近似的に $(r+d)P_k K$ となる（資本財残存価額 $S_v=0$ と仮定）。

労働投入に関しては、資本の特性のうちでも制御機器の及ぼす効果が大きく、生産現場においても計測機器の監視労働が増加している。鉄鋼産業でも製造業一般と同様に、間接部門の就業者比率が上昇しているのは、このことと無関係ではないことを特に指摘しておきたい。

エネルギーについては、製鉄プロセスではコークスや重油を使用し、製鋼プロセスでは転炉は酸素、電気炉は電力、平炉は重油や一酸化炭素ガスを主として投入する。圧延プロセスでは、電力と重油が主要エネルギー源である。

最後に、原料については、まず製鉄プロセスでは、鉄鉱石や焼結鉄を用いる。製鋼プロセスでは、転炉は溶鉄、電気炉はスク

第8図 主要投入物の価格指数



注(17) たとえば、窒素酸化物やイオウ酸化物の濃度規制に対しては、煙突を高くすることが有効であることが知られている（三本木〔9〕第2巻参照）。その場合、 $\bar{g}$ には、煙突の高さ $\bar{G}$ が対応する。

ラップを用い、平炉は比較的投入原料の種類を選択が自由であることは既述した。主要原料の選択に従って、前のプロセスとの技術的補完性と、原料以外の必要投入物の種類が確定される。第8図に、主要原料とエネルギーの相対価格の推移が示されているが、高度成長期を通じて溶鉱炉＝転炉法の原燃料相対価格が低下していることが分る。

(3) 構造変化分析のための理論モデル

以下の理論モデルでは、各プロセスとも同様に適用可能であるので、プロセスを指定することはない。まず生産関数((4)式)については、次のように特定化する。

$$Q = \alpha_0 A^{\alpha_1} B^{\alpha_2} V^{\alpha_3} \quad (9)$$

($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ はパラメーター、なお Q, A, B, V は、前に説明した q, a, b, v の諸変数にそれぞれ対応する。)

次に投入関数を特定化するに当って、原料投入量 M は、生産能力 Q に比例すると仮定する。すなわち、

$$M = \mu Q \quad (10)$$

(μ は、パラメーター)

加工処理要素の種類については、資本財、労働力、エネルギーにそれぞれ代表させる。各々の投入関数の型を特定化するに当っては、5つのケースを考慮する。すなわち、

Case I

$$\left. \begin{aligned} L &= \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 V + \beta_4 \bar{G} \\ K &= \gamma_0 + \gamma_1 A + \gamma_2 B + \gamma_3 V + \gamma_4 \bar{G} \\ E &= \delta_0 + \delta_1 A + \delta_2 B + \delta_3 V + \delta_4 \bar{G} \end{aligned} \right\} (11)$$

(L, K, E は、労働、資本財、エネルギーの投入量をそれぞれ表わす。 β, γ, δ で示されるものは、すべてパラメーター。なお、 $\bar{G}$ は、生産能力には影響しないが、各投入物の投入量には影響する変数を表わし、条件をつけて固定する。従って、上式中、 $\beta_0 + \beta_4 \bar{G} = \beta_0, \gamma_0 + \gamma_4 \bar{G} = \gamma_0, \delta_0 + \delta_4 \bar{G} = \delta_0$ のようにまとめてパラメーターとして処理する。以下のケースでも、基本的には同じ取扱いをするため、変数 $\bar{G}$ を陽表的に示すのは省略する)。

Case II

$$\left. \begin{aligned} L &= \beta_0 + \beta_1 A^2 + \beta_2 B^2 + \beta_3 V^2 + \beta_4 AB + \beta_5 BV \\ &\quad + \beta_6 VA + \beta_7 A + \beta_8 B + \beta_9 V \\ K &= \gamma_0 + \gamma_1 A^2 + \gamma_2 B^2 + \gamma_3 V^2 + \gamma_4 AB + \gamma_5 BV \\ &\quad + \gamma_6 VA + \gamma_7 A + \gamma_8 B + \gamma_9 V \\ E &= \delta_0 + \delta_1 A^2 + \delta_2 B^2 + \delta_3 V^2 + \delta_4 AB + \delta_5 BV \end{aligned} \right\} (12)$$

$$+ \delta_6 VA + \delta_7 A + \delta_8 B + \delta_9 V$$

Case III

$$\left. \begin{aligned} L &= \beta_0 + \beta_1 A^2 + \beta_2 B^2 + \beta_3 V^2 + \beta_4 A + \beta_5 B + \beta_6 V \\ K &= \gamma_0 + \gamma_1 A^2 + \gamma_2 B^2 + \gamma_3 V^2 + \gamma_4 A + \gamma_5 B + \gamma_6 V \\ E &= \delta_0 + \delta_1 A^2 + \delta_2 B^2 + \delta_3 V^2 + \delta_4 A + \delta_5 B + \delta_6 V \end{aligned} \right\} (13)$$

Case IV

$$\left. \begin{aligned} L &= \beta_0 + \beta_1 A^2 + \beta_2 B^2 + \beta_3 V^2 \\ K &= \gamma_0 + \gamma_1 A^2 + \gamma_2 B^2 + \gamma_3 V^2 \\ E &= \delta_0 + \delta_1 A^2 + \delta_2 B^2 + \delta_3 V^2 \end{aligned} \right\} (14)$$

Case V

$$\left. \begin{aligned} L &= \beta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2} V^{\beta_3} \\ K &= \gamma_0 A^{\gamma_1} B^{\gamma_2} V^{\gamma_3} \\ E &= \delta_0 A^{\delta_1} B^{\delta_2} V^{\delta_3} \end{aligned} \right\} (15)$$

費用方程式((6)式)については、ここで4種類の投入物を考えているので、

$$C = wL + P_c K + P_e E + P_m M \quad (16)$$

(w, P_c, P_e, P_m は、賃金率、単位資本費用、エネルギー価格、原料価格をそれぞれ示す。なお単位資本費用 $P_c = (r + d)P_k$ である。)

この理論モデルにおける費用最小化関式は、費用方程式(16)式を、生産関数(9)式を制約にして、投入関数((11)式～(15)式)を考慮しつつ、説明変数 A, B, V について最小化すればよいことになる。ただし、原料投入量 M については、生産能力 Q に比例するので、単純化のために最小化する費用は、加工処理要素のみの費用とする。すなわち、

$$C' = C - P_m M = wL + P_c K + P_e E \quad (17)$$

である。

生産関数(9)式を制約にして、費用方程式(17)式を最小化するための必要条件は、

$$\frac{C'_A}{Q_A} = \frac{C'_B}{Q_B} = \frac{C'_V}{Q_V} \quad (18)$$

(ここで、 C'_X, Q_X は、 C', Q を、説明変数 X で1回偏微分していることを示す。)

十分条件は

$$\left| \begin{array}{ccc} 0 & Q_A & Q_B \\ Q_A & (C'_{AA} - \frac{C'_A}{Q_A} Q'_{AA}) & (C'_{AB} - \frac{C'_A}{Q_A} Q'_{AB}) \\ Q_B & (C'_{BA} - \frac{C'_B}{Q_B} Q'_{BA}) & (C'_{BB} - \frac{C'_B}{Q_B} Q'_{BB}) \end{array} \right| < 0$$

$$\begin{vmatrix} 0 & Q_A & Q_B & Q_V \\ Q_A & (C'_{AA} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{AA}) & (C'_{AB} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{AB}) & (C'_{AV} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{AV}) \\ Q_B & (C'_{BA} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{BA}) & (C'_{BB} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{BB}) & (C'_{BV} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{BV}) \\ Q_V & (C'_{VA} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{VA}) & (C'_{VB} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{VB}) & (C'_{VV} - \frac{C'_A}{Q_A} Q_{VV}) \end{vmatrix} < 0 \quad (19)$$

(ここで, C'_{XY} , Q_{XY} , は, C' , Q を説明変数 X , Y で各 1 回ずつ偏微分していることを示す。)

ここで, 生産関数の偏導関数は,

$$Q_A = \alpha_1 \alpha_0 A^{\alpha_1-1} B^{\alpha_2} V^{\alpha_3} = \alpha_1 \frac{Q}{A},$$

$$Q_B = \alpha_2 \alpha_0 A^{\alpha_1} B^{\alpha_2-1} V^{\alpha_3} = \alpha_2 \frac{Q}{B},$$

$$Q_V = \alpha_3 \alpha_0 A^{\alpha_1} B^{\alpha_2} V^{\alpha_3-1} = \alpha_3 \frac{Q}{V},$$

$$Q_{AA} = \alpha_1(\alpha_1-1) \alpha_0 A^{\alpha_1-2} B^{\alpha_2} V^{\alpha_3}$$

$$Q_{BB} = \alpha_2(\alpha_2-1) \alpha_0 A^{\alpha_1} B^{\alpha_2-2} V^{\alpha_3},$$

$$Q_{VV} = \alpha_3(\alpha_3-1) \alpha_0 A^{\alpha_1} B^{\alpha_2} V^{\alpha_3-2}$$

$$Q_{AB} = Q_{BA} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_0 A^{\alpha_1-1} B^{\alpha_2-1} V^{\alpha_3},$$

$$Q_{AV} = Q_{VA} = \alpha_1 \alpha_3 \alpha_0 A^{\alpha_1-1} B^{\alpha_2} V^{\alpha_3-1}$$

$$Q_{BV} = Q_{VB} = \alpha_2 \alpha_3 \alpha_0 A^{\alpha_1} B^{\alpha_2-1} V^{\alpha_3-1}$$

(20)

費用関数の偏導関数については, 次の 5 ケースがある。

Case I

費用方程式

$$C' = H_1 A + H_2 B + H_3 V + H_4 \quad (21)$$

ここで,

$$H_1 = w\beta_1 + P_c\gamma_1 + P_e\delta_1, \quad H_2 = w\beta_2 + P_c\gamma_2 + P_e\delta_2,$$

$$H_3 = w\beta_3 + P_c\gamma_3 + P_e\delta_3$$

$$H_4 = w(\beta_0 + \beta_4 \bar{G}) + P_c(\gamma_0 + \gamma_4 \bar{G}) + P_e(\delta_0 + \delta_4 \bar{G})$$

他のケースでも, 定数 H は, 費用方程式(21)式と各々の投入関数から容易に求められるので, 以下では, H の式の内容は省略する。

費用方程式の偏導関数は,

$$\left. \begin{aligned} C'_A &= H_1, \quad C'_B = H_2, \quad C'_V = H_3 \\ C'_{AA} &= C'_{BB} = C'_{VV} = C'_{AB} = C'_{BA} = C'_{AV} \\ &= C'_{VA} = C'_{BV} = C'_{VB} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

上式を(20)式とともに, (18), (19)式に代入することによって, 費用最小化の必要条件と十分条件を求めることができる。以下同様である。

Case II

$$C' = H_1 A^2 + H_2 B^2 + H_3 V^2 + H_4 AB + H_5 BV + H_6 VA + H_7 A + H_8 B + H_9 V + H_{10} \quad (23)$$

$$C'_A = 2H_1 A + H_4 B + H_6 V + H_7,$$

$$C'_B = 2H_2 B + H_4 A + H_5 V + H_8,$$

$$C'_V = 2H_3 V + H_5 B + H_6 A + H_9,$$

$$C'_{AA} = 2H_1, \quad C'_{BB} = 2H_2,$$

$$C'_{VV} = 2H_3, \quad C'_{AB} = C'_{BA} = H_4,$$

$$C'_{AV} = C'_{VA} = H_6, \quad C'_{BV} = C'_{VB} = H_5$$

(24)

Case III

$$C' = H_1 A^2 + H_2 B^2 + H_3 V^2 + H_7 A + H_8 B + H_9 V + H_{10} \quad (25)$$

$$C'_A = 2H_1 A + H_7, \quad C'_B = 2H_2 B + H_8,$$

$$C'_V = 2H_3 V + H_9, \quad C'_{AA} = 2H_1,$$

$$C'_{BB} = 2H_2, \quad C'_{VV} = 2H_3,$$

$$C'_{AB} = C'_{BA} = C'_{AV} = C'_{VA} = C'_{BV} = C'_{VB} = 0$$

(26)

Case IV

$$C' = H_1 A^2 + H_2 B^2 + H_3 V^2 + H_{10} \quad (27)$$

$$C'_A = 2H_1 A, \quad C'_B = 2H_2 B, \quad C'_V = 2H_3 V,$$

$$C'_{AA} = 2H_1, \quad C'_{BB} = 2H_2, \quad C'_{VV} = 2H_3,$$

$$C'_{AB} = C'_{BA} = C'_{AV} = C'_{VA} = C'_{BV} = C'_{VB} = 0$$

(28)

Case V

$$C' = w\beta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2} V^{\beta_3} + P_c \gamma_0 A^{\gamma_1} B^{\gamma_2} V^{\gamma_3} + P_e \delta_0 A^{\delta_1} B^{\delta_2} V^{\delta_3} \quad (29)$$

$$C'_A = w\beta_1 \beta_0 A^{\beta_1-1} B^{\beta_2} V^{\beta_3} + P_c \gamma_1 \gamma_0 A^{\gamma_1-1} B^{\gamma_2} V^{\gamma_3} + P_e \delta_1 \delta_0 A^{\delta_1-1} B^{\delta_2} V^{\delta_3}$$

$$C'_B = w\beta_2 \beta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2-1} V^{\beta_3} + P_c \gamma_2 \gamma_0 A^{\gamma_1} B^{\gamma_2-1} V^{\gamma_3} + P_e \delta_2 \delta_0 A^{\delta_1} B^{\delta_2-1} V^{\delta_3}$$

$$C'_V = w\beta_3 \beta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2} V^{\beta_3-1} + P_c \gamma_3 \gamma_0 A^{\gamma_1} B^{\gamma_2} V^{\gamma_3-1} + P_e \delta_3 \delta_0 A^{\delta_1} B^{\delta_2} V^{\delta_3-1}$$

$$C'_{AA} = w\beta_1(\beta_1-1) \beta_0 A^{\beta_1-2} B^{\beta_2} V^{\beta_3} + P_c \gamma_1(\gamma_1-1) \gamma_0 A^{\gamma_1-2} B^{\gamma_2} V^{\gamma_3} + P_e \delta_1(\delta_1-1) \delta_0 A^{\delta_1-2} B^{\delta_2} V^{\delta_3}$$

$$C'_{BB} = w\beta_2(\beta_2-1) \beta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2-2} V^{\beta_3}$$

$$\begin{aligned}
& + P_e \gamma_2 (\gamma_2 - 1) \gamma_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2 - 2} V^{\gamma_3} \\
& + P_e \delta_2 (\delta_2 - 1) \delta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2 - 2} V^{\delta_3} \\
C'_{VV} &= w \beta_3 (\beta_3 - 1) \beta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2} V^{\beta_3 - 2} \\
& + P_e \gamma_3 (\gamma_3 - 1) \gamma_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2} V^{\gamma_3 - 2} \\
& + P_e \delta_3 (\delta_3 - 1) \delta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2} V^{\delta_3 - 2} \\
C'_{AB} &= C'_{BA} = w \beta_1 \beta_2 \beta_0 A^{\beta_1 - 1} B^{\beta_2 - 1} V^{\beta_3} \\
& + P_e \gamma_1 \gamma_2 \gamma_0 A^{\beta_1 - 1} B^{\beta_2 - 1} V^{\gamma_3} \\
& + P_e \delta_1 \delta_2 \delta_0 A^{\beta_1 - 1} B^{\beta_2 - 1} V^{\delta_3} \\
C'_{AV} &= C'_{VA} = w \beta_1 \beta_3 \beta_0 A^{\beta_1 - 1} B^{\beta_2} V^{\beta_3 - 1} \\
& + P_e \gamma_1 \gamma_3 \gamma_0 A^{\beta_1 - 1} B^{\beta_2} V^{\gamma_3 - 1} \\
& + P_e \delta_1 \delta_3 \delta_0 A^{\beta_1 - 1} B^{\beta_2} V^{\delta_3 - 1} \\
C'_{BV} &= C'_{VB} = w \beta_2 \beta_3 \beta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2 - 1} V^{\beta_3 - 1} \\
& + P_e \gamma_2 \gamma_3 \gamma_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2 - 1} V^{\gamma_3 - 1} \\
& + P_e \delta_2 \delta_3 \delta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2 - 1} V^{\delta_3 - 1}
\end{aligned}$$

上記の5ケースのなかで、投入関数が線型の場合 (Case I) について限界費用と平均費用を求めてみる (他のケースは省略)。

まず、費用最小化の必要条件は、(18)(20)式より、

$$\frac{H_1}{\alpha_1} A = \frac{H_2}{\alpha_2} B = \frac{H_3}{\alpha_3} V \quad (21)$$

(なお、十分条件は(19)(22)式より容易に求まる。)

各工学的変数の需要関数は、 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = \alpha$ として、

$$\begin{aligned}
A &= \left(\frac{1}{\alpha_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{H_2 \alpha_1}{H_1 \alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha}} \left(\frac{H_3 \alpha_1}{H_1 \alpha_3} \right)^{\frac{\alpha_3}{\alpha}} Q^{\frac{1}{\alpha}} \\
&= A' Q^{\frac{1}{\alpha}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{ここで } A' &= \left(\frac{1}{\alpha_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{H_2 \alpha_1}{H_1 \alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha}} \left(\frac{H_3 \alpha_1}{H_1 \alpha_3} \right)^{\frac{\alpha_3}{\alpha}} \\
B &= \left(\frac{1}{\alpha_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{H_1 \alpha_2}{H_2 \alpha_1} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha}} \left(\frac{H_3 \alpha_2}{H_2 \alpha_3} \right)^{\frac{\alpha_3}{\alpha}} Q^{\frac{1}{\alpha}} \\
&= B' Q^{\frac{1}{\alpha}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{ここで } B' &= \left(\frac{1}{\alpha_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{H_1 \alpha_2}{H_2 \alpha_1} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha}} \left(\frac{H_3 \alpha_2}{H_2 \alpha_3} \right)^{\frac{\alpha_3}{\alpha}} \\
V &= \left(\frac{1}{\alpha_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{H_1 \alpha_3}{H_3 \alpha_1} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha}} \left(\frac{H_2 \alpha_3}{H_3 \alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha}} Q^{\frac{1}{\alpha}} \\
&= V' Q^{\frac{1}{\alpha}}
\end{aligned}$$

総費用関数は、

$$\begin{aligned}
C &= C' + P_m M \\
&= (H_1 A' + H_2 B' + H_3 V') Q^{\frac{1}{\alpha}} + P_m \mu Q + H_4 \quad (22)
\end{aligned}$$

従って、限界費用と平均費用はそれぞれ

$$\frac{dC}{dQ} = \frac{1}{\alpha} (H_1 A' + H_2 B' + H_3 V') Q^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} + P_m \mu \quad (23)$$

$$C = (H_1 A' + H_2 B' + H_3 V') Q^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} + P_m \mu + H_4 Q^{-1} \quad (24)$$

(24)式から、限界費用、平均費用とも、結局技術的特性を表わす生産関数及び投入関数のパラメーター、各投入物の相対価格 (とりわけ原料の相対価格)、そして市場規模に依存していることを確認することができる。各生産プロセスにおいて、費用最小化がなされる過程で、原料の選定による前プロセスとの技術的補完性の程度が特に重要であることは、上式からも明らかである。

4. 要 約

鉄鋼産業における構造変化は、規模の経済性と呼ばれる技術変化によって生起する。その技術変化は、各生産プロセスにおいて、①原料処理の大容量化と②処理速度の上昇という資本特性の変化に集約し得る。従って、鉄鋼産業全体としての構造変化は、各製法間の資本特性の変化の程度と、他プロセスとの技術的補完性の程度及び各投入物の相対価格と製品の市場規模によって究極的には決定される。

かつて W. Leontief は、特定の経済のもつポテンシャルな発展過程を、動学的連立方程式の形で表現した。そこでは、投入係数行列や資本係数行列が中心的役割を果たしている。本研究は、それらの構造行列の時間的変化が、経済体系外の与件 (技術的特性、消費者の嗜好、資源の賦存量など) と、その経済のもつ過去の構造とに依存していることを明らかにする理論分析を行うための一過程をなすものである。

参 考 文 献

- [1] 小尾恵一郎「生産構造の計測と与件—生産関数計測における工学的資料の援用について」三田学会雑誌49巻第5号 (1956)。
- [2] 荒木義明「レオンティエフ体系における構造変化の分析—住宅生産を中心として—」三田学会雑誌71巻第4号 (1978)。
- [3] Chenery, H. B. "Process and Production Function from Engineering Data" in W. Leontief and others, Studies in the Stru-

注(18) Leontief [5], [6]参照。

- cture of the American Economy, Oxford University Press, New York, 1953, Ch. 8.
- [4] Leontief, W. "Structural Change" in Studies in the Structure of the American Economy, 1953, Ch. 2.
- [5] Leontief, W. "Dynamic Analysis", *ibid.*, Ch. 3.
- [6] Leontief, W. "The Dynamic Inverse", in A. P. Carter and A. Bródy(ed.) Contributions to Input-Output Analysis, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1970, Ch. 1.
- [7] Ozaki, I. "Economies of Scale and Input-Output Coefficients" in A. P. Carter and A. Bródy(ed.) Application of Input-Output Analysis, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1970, Ch. 13.
- [8] 日本鉄鋼協会「鉄と鋼」第61巻第5号, 1975年。
- [9] 三本木貢治他編著「鉄鋼工学講座」全11巻, 朝倉書店, 1972年。
- [10] ランダウ(エリ・デ), リフシッツ(イエ・エム)著竹内均訳「流体力学」1, 2巻, 東京図書, 1970年。

(慶應義塾大学大学院経済学研究科研究生)