

# エネルギー資源代替における 技術進歩の役割とその限界

——収穫逡減法則の熱力学的考察——

河 宮 信 郎  
日 比 野 省 三

## § 1 はじめに

人間社会も、それを支える生態圏も、エネルギーの流れに駆動される物質代謝によって存立している。このエネルギーの流れは、保存量としてのエネルギー量と、非保存量としてのエントロピー量の変化によって規定されている。したがって人類がエネルギーとエントロピーという概念を獲得するはるか以前から、それらは人類社会を厳しく制約してきた。実際、人類はその形態毎に、エネルギーを、仕事、水力、熱、石炭、石油等と呼びまたエントロピーを、無秩序、廃熱、不純物等と呼んで、その獲得あるいは除去に腐心してきた。

ところで、“エネルギー”の重要性は早くから知られ、自然科学のみならず経済や社会思想のレベルでも十分な比重をもって扱われてきた。しかるに「エントロピー」は、重要性においてエネルギーに優るとも劣らない存在であるにもかかわらず、科学技術以外の分野では永らく知られないできた。

『自然弁証法』<sup>(1)</sup>において優れたエネルギー論を披瀝した F. ENGELS も、エントロピー概念を十分に理解していたとは言難い。S. WEIL の『科学について』<sup>(2)</sup> はエントロピーの社会的意義を適切に照射しているが、端緒的な試みであって広く知られてはいない。近年、経済学は急速にエントロピー概念への関心を深めつつあるが、これを稔りあるものとするために

は、“エントロピー”を物理化学系における理論的な量としてのみならず、工業技術のレベルでの実践的な量(後述)としても考察する必要がある。

本稿では技術史を素材として、エネルギーおよびエントロピーの歴史内存在としての態様を明らかにする。その際、エネルギーの形態変換、エントロピーの移転作業において「収穫逡減性」と呼ばれるべき制約が現われてくる。これは経済学における「収穫逡減の法則」よりも広義の概念で、且つ経済学的法則の科学的根拠をなすべきものと考えられる。この両者の関係についても考察を試みる。

§ 2 資源代替のパターン

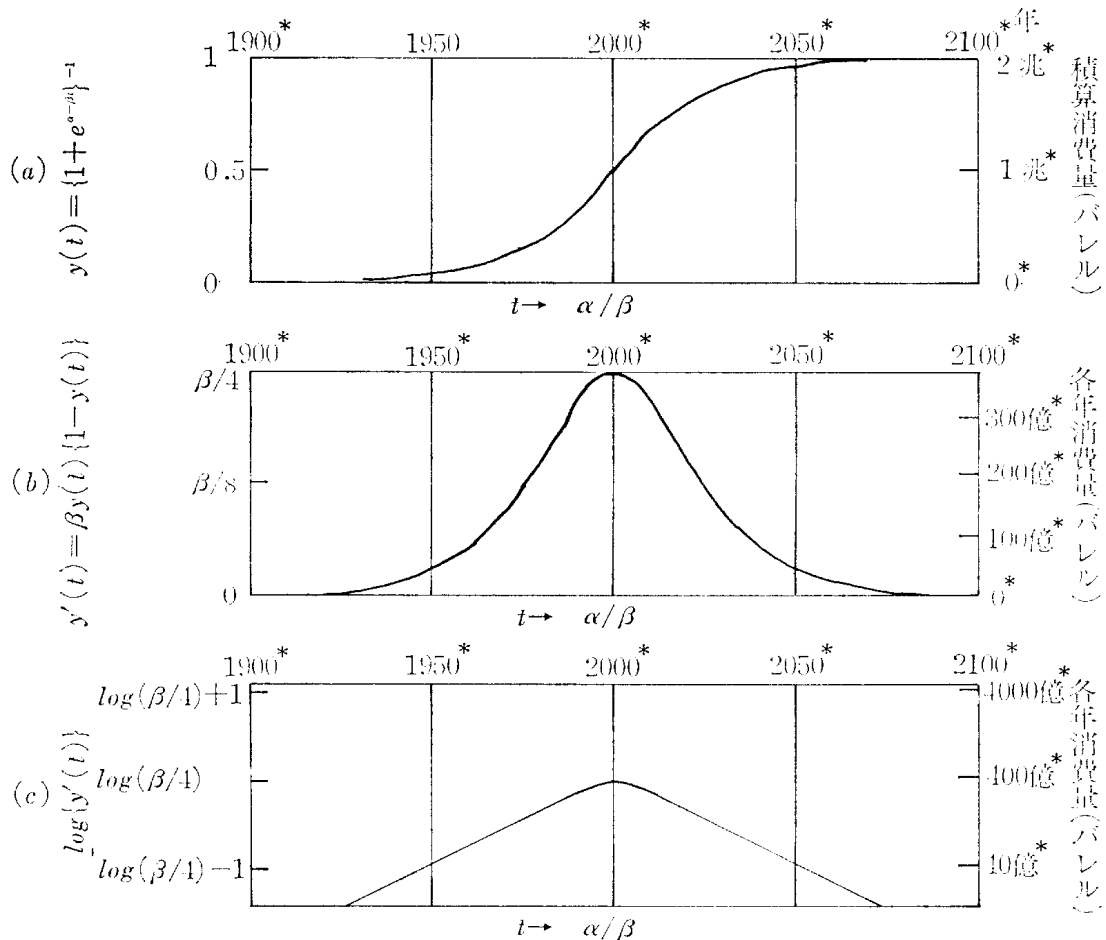


図1 ロジスチック曲線(左および下側の目盛)と石油資源(右および上側の目盛)

(a) ロジスチック曲線 (b) その時間微分 (c) (b) の半対表示

指数関数的に成長していたシステムがやがて成長鈍化・停滞の時期を迎えるとき、その過程はロジスチック曲線で表わされることが多い。全変化量を1に規格化した表現は

$$y = \frac{1}{1 + \exp(\alpha - \beta t)}$$

で与えられ、図1 (a) で表わされる。

石油消費量を例にとると、積算消費量は可採埋蔵量を規準として図1 (a) で表わされ、年々の消費量は、その微分

$$y' = \frac{\beta \exp(\alpha - \beta t)}{\{1 + \exp(\alpha - \beta t)\}^2} = \beta y(1 - y)$$

で与えられる (図1 (b))。ここで、括弧内の数値を目盛に採ると、各曲線は実際量を与える。微分  $y'$  は、中央部 ( $t = \alpha / \beta$  近傍) 以外では指数関数的であるから、対数で表示すると図1 (c) のようなパターンを得る。

このロジスチック型の変化は、ある資源Aが別の資源Bによって代替される場合にも現われ、AとBの市場シェアが図1 (a) のように変化する。馬野は、その著『石油危機の幻影』においてこのことを指摘し、さらにそれ

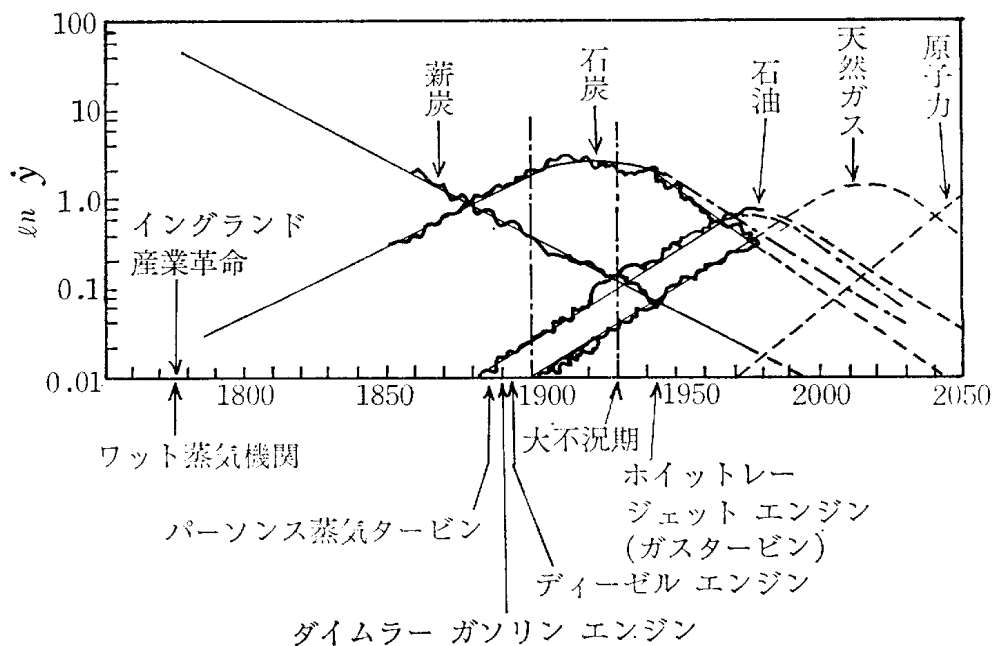


図2 各種エネルギーの占有率の経年変化

を3項以上の場合に拡張して、図2のような1次エネルギーの歴史的遷移パターンを得た。<sup>(3)</sup>

彼はこの資源代替プロセスに関し以下の諸点を主張する。

このような遷移は、「経済的必然」によって生じたものであるが、同時に「技術的必然」を体現している。すなわち薪炭→石炭→石油→天然ガス→高温ガス炉（他の型の原子炉は破綻する）の変化は、「より清浄」な資源への移行であって、石油から石炭への全面的逆行はあり得ない。<sup>(4)</sup>

彼の主張は、資源物質中の炭化水素濃度および水素／炭素比の大きさをただちに「清浄」度と考えるかぎりにおいて、天然ガスまでは正しい。

しかし清浄さの一般的測度として資源のエントロピー状態を考慮に入れると、彼の主張の一般性は崩れる。たとえば薪炭から石炭への代替は、4節以下で明らかにするように、高エントロピー（より不純）の資源への代替であった。それゆえにこの代替過程には高い技術障壁が立ちはだかり、かつそれに伴う環境汚染は甚だしいものとなった。

他方、石炭から石油への移行は、より低エントロピー資源への移行であったから技術障壁はなかった。蒸気機関、石炭化学は、内然機関、石油化学への十全な基礎を提供した。後者は、前者よりも原理的にはむしろ単純である。

低エントロピー資源（たとえば石油）は、単純な技術によって利用が可能となり、高エントロピー資源（たとえば原子力）は、複雑な技術を介してのみ利用できる。前者は、大量・高速・確実・効率等の要求に容易に応えることができる。そのためにそれらが“高度の技術”と見なされがちである。しかしその威力は、基本的には原資源の低エントロピー性に由来するのであって、技術はその媒体に過ぎない。

### § 3 エネルギーとエントロピー

“エネルギー”という語は、自然科学では保存量を表わすが、社会的には非保存量を意味している。したがって後者を定量的に表現するためにはエネルギーとエントロピーとを組み合わせられてつくられる、自由エネルギー、

エクセルギー (available energy), *essergy* といった関数が必要となる。

われわれが利用し消費し得るのは、エネルギー自体ではなく、エネルギーの流れ——非平衡から平衡へ向う——である。したがって、エネルギーの利用価値は非平衡性を表わす測度によって評価される。

エクセルギーは、ある量のエネルギーを、熱力学第2法則および環境条件（常温・常圧等）の制約下で、仕事に変換したとき得られる仕事量に相当する。<sup>(5)</sup> R. B. EVANS はこれを化学系を含む場合に拡張し “*essergy*” を得た。<sup>(6)</sup> これを環境温度で割ると “熱力学的情報” となる。これは槌田の提唱した “物理価値”<sup>(7)</sup> を包含し、より一般化された測度である。ここでは、この EVANS の測度を改めて “物理価値” と呼ぶことにする。

自由エネルギーは、環境条件が露わに入っていない（真空あるいは宇宙空間を外界としている）ため、エネルギーの利用価値の表現としては、間接的なものにとどまる。

以上のうちで、物理価値（熱力学的情報）が、エントロピーと同次元で非平衡の尺度としては最も普遍的であるが、一般にはエクセルギーの方がよく利用されている。本稿では、定量的分析をしないから、エネルギーの形態分類をその都度表示することとし、非平衡測度を直接に提示しないことにする。

L. BRILLOUIN によれば、エネルギーは下記のように分類される。<sup>(8)</sup> 上級のものほど単位量のエネルギーがより多量のエクセルギーまたは物理価値を含んでいる。

上級 (E I) 力学・電磁気エネルギー

中級 (E II) 化学エネルギー

下級 (E III) 熱

“エントロピー” は、古典熱力学、統計力学、情報理論で、それぞれ固有の定義が与えられる。ただしそれらは同一の物理系に対しては相互に整合的である。

このうち情報理論による定義、すなわち離散的状态  $i$  の事象確率を  $p_i$  として

$$S = - \sum_i p_i \ln p_i$$

とするものが最も一般性をもつ。なぜならこのエントロピーの最大化原理から、平衡・非平衡熱力学、古典・量子統計力学の体系が展開できることが、E. T. JAYNES (1957)<sup>(9)</sup>、M. TRIBUS, P. T. SHANNON, R. B. EVANS (1966)<sup>(10)</sup> らによって証明されているからである。

このような理論的定義によるエントロピーに対して、“実践的”なエントロピー定義を考えることができる。すなわち技術的営為において、エントロピーは、原則として人間にとって〈好ましくないもの〉として立ち現われてくる。このエントロピーを、注目するシステムから実際に（技術的に）除去するのにどれ程のエクセルギーあるいは物理価値が消費されるかを、そのエントロピーの測度とする方法である。

たとえば、A, B 気体各 1 モルを混合すると

$$\Delta S_{\text{mix}}^i = 2 R \ln 2$$

の混合エントロピーが生じる。これを分離するには、理想半透膜を用いて温度  $T_0$  で  $2 RT_0 \ln 2$  の仕事を投入する必要がある。（常圧下で混合エントロピーはないものとする）。

しかし、現実にはそれらを液化して分溜しなければならないと考えられる。そこでそれに要する仕事量を  $T_0$  で割ったものを、混合エントロピー量  $\Delta S_{\text{mix}}^r$  と考えるのである。real な  $\Delta S_{\text{mix}}^r$  は ideal な  $\Delta S_{\text{mix}}^i$  より桁違いに大きい。 $\Delta S^r / \Delta S^i$  は一種の第 2 法則効率で、技術水準の指標となる。われわれが実践的にかかわりあうエントロピーは常に前者であるから、経済・技術の分析には前者を用いるべきである。 $\Delta S^r$  は当然技術水準に依存する量であり、 $\Delta S^i$  はその極限值ということになる。本稿では、エントロピーという語を必要に応じて  $\Delta S^r$  の意味で用いる。

#### § 4 エネルギー資源の代替と技術の変革

——薪炭から石炭へ——

薪炭 (E II) は、人類史の大部分にわたって、熱 (E III) 供給する唯一

の1次エネルギーであった。工業化の時代に至って始めて、それは石炭によって根本的に代替された。その過程の典型として近世イギリスを例にとり薪炭→石炭のエネルギー代替がどのような技術的・経済的過程として実現したかを考えてみる。

### (1) 前 史

人類は熱を化学エネルギー（EⅡ）から得、仕事（EⅠ）を主要には自らの筋肉によってあがなった。それを人・畜力以外でまかなうことは、つねに高度の技術——水車・帆船・時計等——を要した。

ところで、熱機関（EⅡ→EⅢ→EⅠ）を実用化するはるか以前に、人類は“火”（EⅡ→EⅢ）によって、労働（EⅠ）を節約する方法を見出していた。焼畑がそれである。（金属の加工——鍛造・圧延・曲げ等——を鑄造で代位するのもその例と考えるとよい。）

しかしEⅠをEⅢで代位する方法は、熱力学的には拙劣で無駄の多いやり方である。実際、焼畑はその土地をしばしば荒蕪地化して、それを行った人々を苦しめた。しかし、焼畑法を放棄するためには、農具が発達して人力（EⅠ）が効率的な作業をなし得ることが保証されていなければならない。（もちろんこれは単なる必要条件であって、歴史的には土地所有形態貢課制度等の方が重要であろう。）

ところで、優れた道具をつくるためには、鉄の製錬と加工が必要である。そしてそのためには、大量の木炭、ひいては森林伐採が必要である。もし鉄の製造・加工が農具に限られていたら、焼畑による森林破壊に対し、製鉄のための森林破壊は僅少なものとどまり、鉄工業は全体としては、環境保護的に機能し得たかもしれない。

しかし、実際には鉄の生産は、圧倒的に都市——商業と軍隊——のためであった。したがって都市の産業・貿易の発展は、ただちに森林ストックの激しい蚕食を意味していた。<sup>(11)</sup>

### (2) 木炭製鉄——木炭高炉の成立・発展・衰退——

高炉法成立以前、鉄は鉄石の直接還元によって製造されていた。鉄鉄石は炭素で還元されるが、その反応を律速していたのは送風量（EⅠの限界）

であった。そのため炉温 (E III) が不足して、できた鉄は半溶融の状態にとどまっていたのである。

水車の大型化 (E I 増大) によって、送風が強化されると、反応速度が大きくなって炉温が上昇し (E III 増大) 鉄が溶融する。すると溶鉄が直接接触する炭素を吸収して融点降下を生じ、さらに流動性を増す。その結果銑鉄と滓は連続的・自動的に液相で分離し、鍛錬 (E I) 工程は不要となる。このため生産性は飛躍的に向上するが、エネルギー生産性 (熱効率) は低下する。<sup>(12)</sup> この方法では鉄鉱石をいわば過剰に還元するからである。したがって上下の向流法で熱経済を図るため高炉となる。

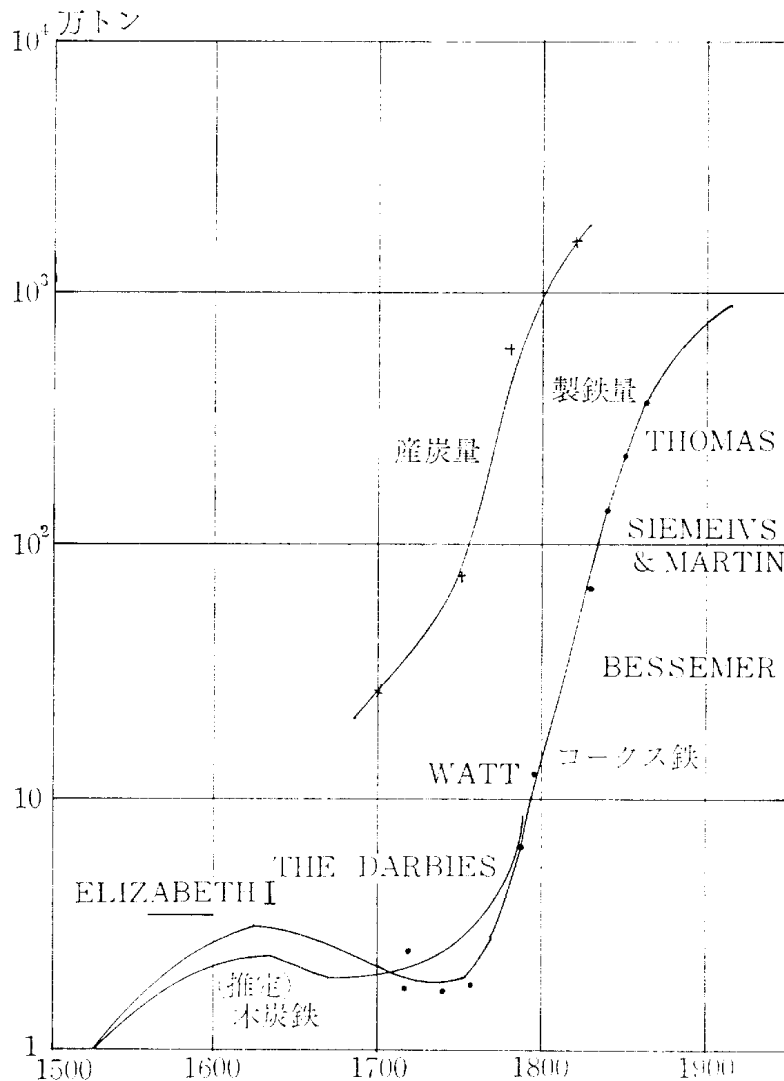
高炉銑は、一方で直接鑄鉄として用いられ、他方では精錬炉で脱炭して鍛鉄あるいは鋼として用いられた。後者の工程では、再溶解のために新たに木炭を要した。この高炉法は、エリザベス I 世時代 (1558—1603) のイギリスで大々的に発展し、そのためイギリスの森林資源 (ただし、馬車と水路で製鉄所から可搬距離内にあるものは、急速に蚕食されていった。<sup>(13)</sup>

17世紀になると、植民地アイルランドの森林を容赦なく収奪したが、1641年の暴動で製鉄所が破壊された。結局英製鉄業は1620年代以後停滞し早くから発展したサセックス地方では衰退が生じた。当時、森林の困渇によって燃料用木材の価格は一般物価のほぼ3倍の率で騰貴した<sup>(14)</sup> といわれており、石炭製鉄は16世紀以来執拗に試みられていたのである。

しかしながら17世紀を通じて、種々の試みが実用化に至ることなくことごとく失敗した。その原因は、石炭が鉄に有害な不純物を多量に含んでいるためである。石炭で鉄がつかれないのではなく、ただ製品の質が粗悪で実用にならなかったのである。

言いかえれば木炭から石炭への代替を阻んだのは石炭の混合エントロピー  $S_{\text{mix}}^{\text{f}}$  が大きいことであった。高エントロピー資源を処理する代替技術の開発が“間に合わなかった”ために、英国製鉄業は16世紀の急伸状況から一転し、17世紀中葉には停滞乃至後退さえ見るにいたった(図3参照)。





データ上の点は,

B. R. MITCHELL & P. DEANE, *Abstract of British Historical Statistics*, Cambr. Univ. Press. (1962), 140 による。

図3 イギリスの鉄・石炭生産

(3) 石炭製鉄—コークス高炉・バドル法・蒸気機関

英鉄工業自体は、技術的優位を利用して加工部門に特化しつつ、輸入鉄に依存して発展した。そのため、英国では鉄の生産量と消費量のギャップが拡大し、これが石炭製鉄技術への社会的ニーズとなっていた。

他方、技術的障害のない部門では燃料の石炭依存が急速に進んだ。このため都市部で媒煙による汚染が激化した。それを緩和する対策として、石炭を乾溜してコークスにする技術が発達した。揮発性の不純物（硫黄、アンモニア等であるが当時必ずしもその本性は解っていなかった）が除去さ

れるから、消費地での汚染は減ったが、その分コークス産地の汚染は増大した。当時のコークス炉は開放式であった。

このコークスを利用することによって、製鉄の石炭化が大巾に前進した。しかしコークス高炉の信頼性、安定性、鉄の品質を保証するには、複雑な炉内反応を適切に制御する必要があった。

DARBY 父子によるコークス高炉の成功は図4に示されたような複雑な連関を解決して始めて達成されたものである。コークスは炭素と灰分か

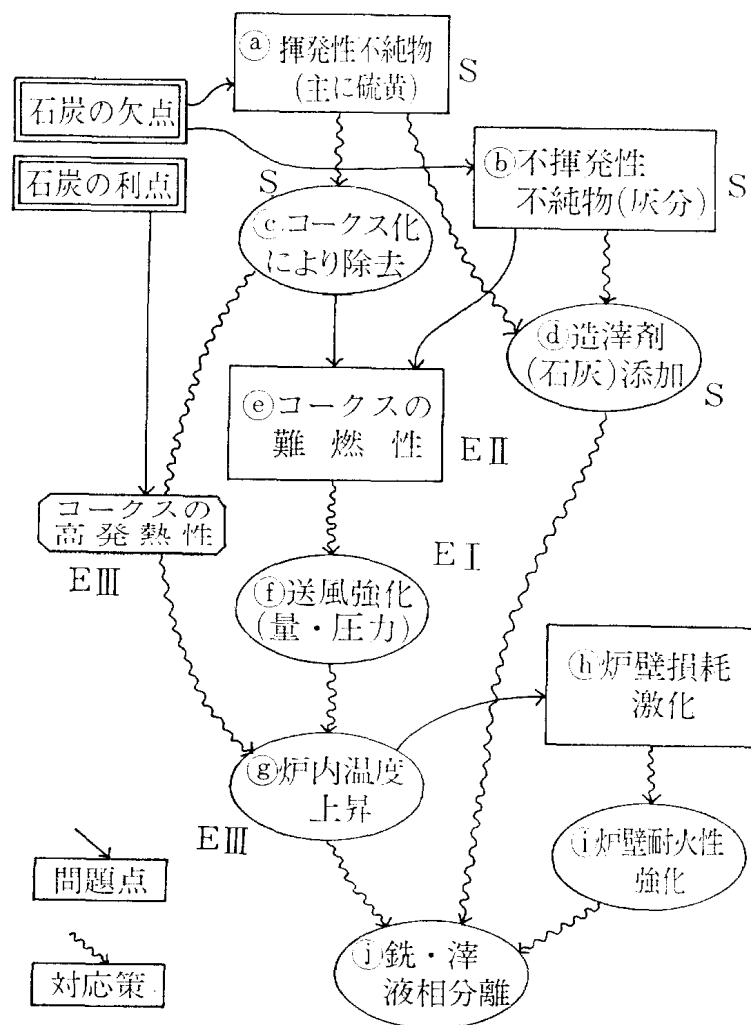


図4 コークス高炉技術の成立

らなり、石炭よりもさらに燃えにくい。これは送風強化を要請すると同時に、灰分を流動的に滓に移行させる工夫を要求する。強力な送風は、炉温を上昇させて炉の損耗を激化するが、他方鉄・滓の流動性を増す。結局、

送風強化・炉壁の耐火性向上・媒溶剤（石灰）の添加という対策によって、コークス高炉技術が成立する。これは石炭の欠点（高エントロピー性）を石炭の長所（高発熱性）で補完する方法で、木炭高炉の操業条件を大きく変更するものであった。<sup>(15)</sup>

ところがこの画期的な技術、コークス高炉もそれだけでは、英国製鉄を起死回生させるものとはならなかった。

コークス銑は、木炭銑より質が劣るうえに、精錬工程は依然として木炭に依存していた。またコークス高炉は、石炭、鉱石、大型水車の存在を立地条件としていた。さらに悪いことに、石炭自体が需要の増大に応じて増産（1700年に、250万トン）される過程で、採掘条件の悪化をきたし、収穫逓減的な状況にあった。<sup>(16)</sup>

DARBY 父子のコークス高炉成功から英国製鉄業の劇的な蘇生・発展まで、半世紀以上の遅れが生じたのは、上記の問題点が未解決だったためである（図3参照）。

ところが、J. WATT 以後の蒸気機関は、これらの障害をことごとくとり除くことに成功した。それは坑内排水を引受けて採掘条件の悪化を阻止し、高炉送風を引受けて水車の場所的・工率的・季節的制約から解放し、さらに原料・製品の輸送を容易にして工場の立地条件を緩和した。<sup>(17)</sup> そして石炭製鉄は、蒸気機関製造のために原材料を潤沢に提供した。

そのため1780年代に入ると、英国製鉄業はコークス高炉に全面的に移行し、その後1世紀に亘ってゆるぎない覇権を確立した。そして丁度その時期に、耐え難い隘路となっていた精錬工程もまた“コークス化”されたのである。それが P. ONIONS, H. COURT によるパドル製鋼法（1783）である。<sup>(18)</sup>

これは反射炉精錬であって、間接加熱だから、石炭中の不純物が鉄を汚染しない。これもまた石炭の欠点＝不純性を、石炭の長所＝高発熱性で補完する方法であった。もっとも間接加熱による熱効率の低下は、いかに石炭が豊富といえども大きな負担ではあった。しかしこの熱収支の根本的改善は1世紀後の平炉法を俟たなければ実現しない（後述）。

## § 5 資源のエントロピーと利用技術の役割

前節で、石炭製鉄の技術が石炭の不純性（混合エントロピー）を、石炭の高発熱性によって補償することを見た。

したがって、石炭製鉄は木炭製鉄よりも、より多くの熱量を必要とする。<sup>(19)</sup> その結果、廃熱として生じるエントロピーも、当然前者により多く発生する。すなわち、資源のエントロピーが高いとき、それを利用するプロセスで発生するエントロピーも、それに応じて高く（エントロピー増幅）なる。もちろん技術の進歩は、このエントロピーの“増幅度”を小さくするであろうが、1以下にはできない。これは熱力学第2法則による制約であって、いかなる技術もこの制約を越えることはできない。

このように資源のエントロピー状態は、技術にとっては〈任意に処理することができない〉性質のものである。したがって技術の役割と限界を知るためには、エントロピー論からの分析が必要かつ有効である。

ここで、石炭製鉄が石炭の高エントロピー性を、どのように“処理”したか、不純物除去と熱経済という二つの面から検討してみよう。

### (1) 不純物

コークス化は、石炭中の硫黄等の揮発性不純物による鉄の汚染を防ぐために行われる。ところが鉄中に入るのを阻まれた硫黄は、亜硫酸ガスとなって大気を汚染する。技術は、硫黄が“何を汚染すべきか”を指定する（必ずしも自覚的ではなく）のであって、汚染現象自体を消滅させるのではない。

19世紀後半の石炭化学の進歩によって、コールタールが重要な化学原料となったから、レトルト式の乾溜が一般化した。これは有害な廃棄物を高価な医薬品や染料に変えるものであった。ところが、このプロセスも決して問題を解消しはしなかった。すなわちコールタールの化学処理をする酸化工程ではやはり S は  $\text{SO}_2$  になって大気中に出る。捕収して硫酸化しても、やがては硫酸塩として環境に出、水圏あるいは土壌を汚染する。つまり有害物質は、有価物としてより長い時間社会システムに滞留するのみで

あって、有害性を失ったわけではないのである。

また様々の化学薬品や染料も、安全なものに分解されないかぎり（それにはさらに費用あるいはエネルギーが要る）生物システムには異質のしばしば毒性の高い）有機物として、蓄積され、拡散されることになる。この潜在的脅威という点では石油化学製品も同じで、PCB、BHC 等の悪名高いものの外、ありふれた塩ビが燃焼時に有毒ガスを発生する等、製品自体が、顕在的にあるいは潜在的に有害物質であるものが多い。<sup>(20)</sup>

製・精錬にとまなうスラグも同様の問題点をもつ。固型酸化物で安定性はより高いが、量的に膨大である。高炉セメント、道路用パラストとして再資源化されてきたが、これらも、有用になったことが、無害になったことを意味しない。日本の場合、1.2億トンの粗鋼をつくるのに、約4000万トンのスラグが出る。この2000万 $\text{m}^3$ のスラグを道路パラストとして1mの厚さで拡げると、50m巾の道路にして40万kmの長さになる。これだけの道路を必要の有無にかかわらずつくり続けなければならない。

このような状況が続けば、それだけで生態系に重大な障害をもたらすだろう。かといって、海岸に埋立てればそれは海浜としての生態系を破壊せずにはおかない。スラグは、海水に浸漬されれば、硫化水素その他の有害物質を浸出するから硅砂の代りにはなり得ない。さしあたってはセメントに転用し、かつその分だけ本来のセメントの生産量を削減する他ないだろう。その場合も、表土を多量のコンクリートで被覆しつつけることの可否が改めて問われなければならない。

われわれがまず憂慮すべきことは、資源の不足ではなくて廃棄物の過剰である、という K. E. BOULDING の指摘は至言である。<sup>(21)</sup>

このように混合エントロピーは、産業廃棄物として環境中に一方的に蓄積され、慢性的ときには急性的に環境・生態圏を破壊する。これを防ぐためには、廃棄物を保管する土地が必要になる。例えばそれを地下資源を掘り出した坑道に埋め戻さなければならない。そしてそれに要するエネルギー・資材のために、余分に地下資源を掘り出さねばならない。それ自体が背理であるうえに、地下水の汚染が問題となる。<sup>(22)</sup>

要約すると、石炭製鉄は高エントロピー資源への移行によって、森林資源の有限性から解放された。これによって工業システムは、土地の稀少性・収穫逡減性を解消したかにみえるが、同時に環境の（汚染許容量の）狭隘性を出現させた。しかしながら後者は前者と異り「市場」に現われなかったから、経済学からかえりみられなかった。

## (2) 熱経済

これにひきかえ、熱収支の改善は、他の弊害を副生することなく熱的エントロピーの排出を減らした。混合エントロピーの場合とどこが異なるのであろうか？ 廃棄物を資源として再利用するのではなく、熱を廃棄しないからである。表現上は廃熱・廃ガスの再利用であるが、実体上は明らかに違うプロセスなのである。

「熱経済」は、熱風炉、転炉、平炉技術の基本原理となって、製鉄製鋼過程を根本的に変革した。これらの変革は、設備ひいては固定資本の巨大化を技術的に要請し、産業資本主義から独占資本主義への移行を必然化した点で、産業革命に次ぐ重要性をもっている。

まず高炉の熱風化が J. B. NEILSON によって1828年に発明され、コークス原単位を3割も節約した。ドイツでは1831年から K. F. von KÖRNER, F. de FAUL らが炉頂炎による加熱送風を試みた。<sup>(23)</sup> 熱風吹込は、たちまち高炉操業の標準方式となる。ところで、2段階製鉄法の成功以来、製鉄業は高炉による高い生産性と精錬炉の低い生産性のギャップに苦しんできた。熱風炉は、高炉を効率化して一層その格差を甚だしくした。つぎに来るべきものは、バドル法にとって代わる新しい製鋼法であった。

最初に、H. BESSEMER の転炉法（1856）が現われた。これは溶けた銑鉄に空気を吹込むだけで、過剰の炭素・硅素等が酸化され不揮発性不純物はスラグ化する。その燃焼熱のために、外部から加熱する必要はなく、20～30分で脱炭が完了するという効率的なものであった。ところがこの方法では、磷分が除去できないため、特殊な低磷鉍石にしか適用できなかった。<sup>(24)</sup>

アメリカでは、メサビ鉍床とペンシルバニア炭からの銑鉄に BESSEM-

ER 法が適用できた。これに助けられて、米国製鉄業はイギリスを急追し19世紀末にはこれを追い抜いた。

BESSEMER による技術突破に続いたのは、SIEMENS 兄弟と P. MARTIN の平炉法であった。これはパドル法と同じく間接加熱で銑を溶解したが、廃ガスの熱を蓄熱室を介して送入空気に移した。この熱経済によって、鋼をも熔融状態にすることができ、且つ過剰の炭素を鉍石環元に利用して、投入銑より多量の鋼を得ることもできた。このように合理的な操業法を蓄積して、効率を改善し、製鋼法の本流となった。

他方転炉によって脱磷を行うためには、塩基性のスラグをつくらなければならないことがわかっていた。そのためには炉壁自体を塩基性耐火煉瓦でつくらなければならないが、この困難を長年の研究と試行で克服したのが、G. THOMAS であった。<sup>(25)</sup>

THOMAS 転炉は、磷を熱源として利用しつつ脱磷することができたので、従来、磷分が高いために見捨てられていた、広大なミネット鉍床を一挙に資源化して、ドイツ、フランス、ベルギーの製鉄業を飛躍させた。就中、ミネット鉍をルール炭と結合したドイツ鉄鋼業は、銑鋼一貫方式—高炉から出る溶銑を直接精錬炉に入れて鋼にする。すなわち製鋼には燃料が不要となる—を開発して、19世紀中にイギリスと並び、20世紀に入るとそれを追い越してしまった。この過程で、製炭・製銑・製鋼の技術的・資本的結合が実現され、独占資本が成立した。<sup>(26)</sup> そのため製鉄業における英独の対立関係は、そのまま帝国主義的対立の激化となって顕在化した。

なおこの THOMAS 転炉では、転炉滓の磷分が肥料として役立った（トーマス磷肥）から、熱経済・不純物処理・廃棄物資源化が一つの技術の中に結合されていたことになる。

要するに、不純物（混合エントロピー）処理と並んでエネルギー収支の改善（熱的エントロピー生成の減少— 7節参照）は、19世紀の技術革新を主導し、そこにおいて矚目すべき発展が実現された。それは世界経済の様相を一変させるに足るものであった。

このような進歩にもなお、限界があるものとしなければならないである

うか。熱収支の改善は、無駄に捨てる熱量が減少するにつれて飽和する。この状況は7節の熱機関効率の向上と同様の経過をたどる。製鉄技術ではこの後、高炉にも平・転炉にも、空気の一部あるいは全部を酸素に代えて吹込む方法が発展した。これらは炉内反応における熱損失を防ぐが、予め空気から酸素を液化・分溜するエネルギーが必要だから、全体として熱経済になるとは限らない。また近年、溶鋼を直ちに圧延行程に接続する連続鑄造法が急伸しつつあるが、これらは生産性とか品質が主目的になっていると考えられる。

## § 6 技術変革と収獲逡減性—経済学パラダイムの技術依存性

石炭製鉄の確立以前、「土地の稀少性」や「収獲逡減の法則」によって最も深刻な制約を被っていた部門は、農業よりもむしろ工業であった。なぜなら鉄工業における地下資源および森林資源の利用は、略奪型農業よりも一層“略奪的”性格をもっていたからである。

18世紀末、イギリス工業はほぼ20万トンの銑鉄を消費していたが、これがどれ程の森林消費に相当したかを調べれば、その深刻さが解る。

銑鉄1トンの製造、精練、加工に10トンの木炭を要するとし、それをつくるのに100トンの原木を要するものとする、20万トンの銑鉄に対し2000万トンの原木が必要となる。森林ストックをヘクタール当り200トンとみると、10万ヘクタールの森林伐採が必要である。<sup>(27)</sup> グレート・ブリテン島の面積2200万ヘクタールの5%を製鉄用森林リザーブと考えると、可採年数は11年ということになる。

実際には、製鉄所と製炭地を結ぶ輸送機関は馬車と船であったから、可搬距離内の森林しか利用されないし、樹種も限定（雑木）されていた。したがって製鉄用木炭の窮迫が、ただちにイギリス全土の森林の枯渇を意味したのではない。1次エネルギーという点では、むしろ送風・加工用の動力源たる水力の方が一層窮迫していたという見解もある。<sup>(28)</sup>

さて、イギリスの石炭埋蔵量の20%強、200億トンの石炭から製鉄用コークス120億トンがとれるとする。これは木炭の1.7倍の火力をもつから、



木炭200億トン，森林1億ヘクタールに相当する。このように石炭製鉄と蒸気機関の結合は，土地の稀少性，収穫逡減性という運命的な桎梏から，製鉄業を劇的に解放した。

こうして開かれた地平の上で始めて，イギリス工業ひいてはイギリス産業資本は，自然条件ないし農林業にほとんど左右されない“自己増殖的”成長を遂げることができたといえよう。

ところで産業革命以後を対象とした諸経済学は，上記のような技術の役割とその限界——資源代替は，土地の稀少性および収穫逡減性を環境の（汚染許容量の）狭隘性に転換したにすぎない——をどこまで対自的にとらえ得たであろうか。

D. RICARDO の経済学は，「穀物」（土地生産物を理論的に抽象化した表現で労働量をも換算的に表現し得る）による「穀物」の生産という実体論的な分析視角をもっていた。最劣等地（地代ゼロ）における穀物の労働生産性から穀物価格が決まり，主要にはそれが賃金水準を決める。これが農業における利潤率を決め，ひいては経済全体の利潤率を制約する。ここでは，土地収穫逡減の法則は，通時的・動態的なレベルにおいて重要な意味をもっていた。<sup>(29)</sup>

ここで彼の議論を援用して，工業システムにおける「穀物」としての石炭を考え「石炭」（燃料・コークス製鉄・蒸気機関等を表わす）による「石炭」の実体的拡大再生産——これは熱力学的価値を測度として，産出／投入が1を上回る当時唯一の鉱工業部門——を仮定すると，この部門の生産性は当然石炭鉱業の利潤率に発して，工業部門全体の利潤率に効いてくる筈である（この論理は，石炭を石油に代えても成立する）。

ところで，工業の石炭依存性の歴史的意義と限界を考察することは，後 W. S. JEVONS によって果された。限界効用理論の一方の始祖である彼が，RICARDO も MARX も行わなかった実体論的分析を敢えて行い工業技術が，エネルギー資源の慇懃に対して全く無力であることを示したのである。<sup>(30)</sup>

しかし，19世紀における技術の発展は，RICARDO や JEVONS の憂

慮を事実問題としては顕在化させなかった。したがって RICARDO に続いた J. S. MILL は、収穫逡減は一次産業（農業・鉱業）にとって重大な制約であること、しかし技術がそれを緩和する（とくに鉱業において）という“常識的”な見解を示した。<sup>(31)</sup>

K. MARX は、MILL の“常識的”見解を、MALTHUS, RICARDO の継承および一層の俗流化として徹底的に批判した。<sup>(32)</sup> たしかに MARX は土地収穫逡減の法則を説明原理とすることなく、地代論さらには価値論を展開して RICARDO を越えた。しかしこのことは、土地収穫逡減の法則が法則として無効になったことを意味しない。むしろ、それは、J. LIEBIG によって動・植物界の物質循環の立場から、植物栄養学的な基礎づけを与えられた。<sup>(33)</sup>（これは、後 E. A. MITSCHERLICH による収量逡減法則の関数的表現——後述——につながる。）

ところが MARX は、一方で LIEBIG の物質代謝論を「卓見」として賞讃しながら、他方 LIEBIG が、自らの理論を、MILL 流の収穫逡減則の自然科学的根拠と見なしたことを、「でまかせ」(aufs Geratewohl) だと攻撃している。<sup>(33)</sup> しかし、資本論第1巻における MARX の収穫逡減則批判は、農業における労働生産性の向上をもって、ただちに逡減性への一反証とみなしており、LIEBIG—MITSCHERLICH 的な収穫逡減則を論駁し得る自然科学的内容を欠いている。これは後の LENIN の「収穫逡減『法則』批判」(二重括弧は LENIN) においても同様である。

MARX の LIEBIG 理論に対する反撥およびその受容に関しては、椎名の論文「マルクスとリービヒ」が適確な分析を提示しているので、ここではその結論だけを紹介しよう。<sup>(34)</sup> すなわち、MARX は（そして ENGELS も）LIEBIG 理論を全体として受容したのである。このことは LENIN 以後のマルクス主義経済学者の一般的理解（むしろ誤解か）を覆えすものであって、特にその重要性が指摘されなければならない。

しかし、たとえ収穫逡減法則を認めるとしても、それは農業に関わるのみであって、資本主義経済の主導部門としての工業は、そのような制約から解放されたのではなかつたらうか。

かつては「無償の自然力」(MARX)としての水力(“水車”ではない)は、工業上決定的に重要な動力源であり、工業の発展は木炭以上に水力資源の収穫逓減性によって制約されていた。

ところで、水力(E I)を石炭火力(E II)に替えたとき、後者の中に「無償の自然力」がないとは言えない筈である。石炭は採掘しなければならぬが、水力も貯水・導水設備なしでは利用できない。石炭を代替した石油(E II)にしても、アラブ産油国の受取る利権料は水力所有者の受取る「差額地代」と論理的に等しいと考えられる。しかしその歴史的コンテクストには決定的相違がある。18~19世紀、技術の進歩は工業における差額地代の比重を、一方的に低下させつつあった。しかし今日、技術の進歩は石油価格中の利権料部分の増大をくいとめる力をもたない。

これまでの考察から以下のような立論が可能になる。

(1) 産業革命が収穫逓減的な水力資源と木炭を、石炭資源で代替したことによって、産業資本の“自立的”発展が可能になった。

(2) 産業革命は、低エントロピーのエネルギー(E I)である水力を、高エントロピーのエネルギーである火力(E II→E III)によって代替し、エントロピー生成を爆発的に増大させた。これは、(水力のある)「土地の稀少性」を、ただちに(エントロピーを捨てるべき)「環境の狭隘性」へと転化した。

(3) ところが、経済学はこのことに気づかず、その大系内で「土地」の比重を一方的に低下させながら、共役的に「環境」の比重を高めようとはしなかった。このエントロピー論的な視角の欠如のために、経済学は「環境」や「公害」を“新しい問題”と意識することになった。

(4) 石炭から石油への資源代替は、高エントロピー資源から低エントロピー資源への代替という、歴史的に特異(一次的)なものであった。

(5) 収穫逓減的な石油資源には代替資源が存在しない。したがって現存の工業システムの発展は、長期的には石油資源の消尽と共に終息する。石炭困窮に関する JEVONS の考察は、石油困窮に対してもあてはまる。

(6) 動態的意味における収穫逓減性は、工業化された経済にとって一

貫して重要な問題である。

なお A. MARSHALL の生産関数による収穫法則の取扱いについても触れるべきであるが、これについては9節および参考文献<sup>(35)</sup>を参照されたい。

## § 7 熱機関における技術進歩と収穫逡減性

熱機関の熱効率  $\eta$  は、技術的には工率を熱“消費”の時間率で割ったものとして定義される。この  $\eta$  が、熱機関技術の進歩によってどのように向上したかを図5に示す。半対数表示で、わずかに飽和の傾向を示して

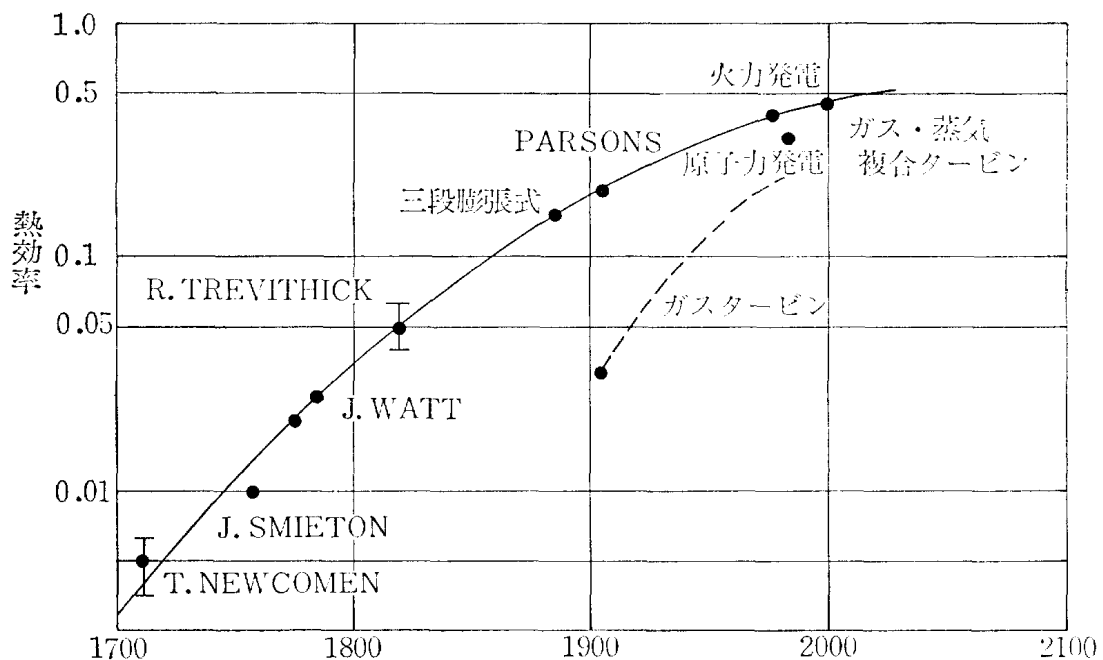


図5 熱機関効率の発展

いるが、ニューコメン機関から蒸気タービンに至る  $\eta$  の向上は、数百倍に達している。しかし、これは現時点で急激に飽和し、今後の発展に多くを期すことはできないと考えられる。

なぜならば、効率  $\eta$  を向上させるには、熱源温度  $T$  を上昇させなければならないが、 $T$  上昇による  $\eta$  の上昇が収穫逡減的だからである。すな

わち、低温熱源の温度を環境温度  $T_0 (=27^{\circ}\text{C}, 300\text{K})$  に等しいとして  $\eta$  は

$$\eta = 1 - \frac{T_0}{T}$$

であり、 $T$  が  $\Delta T$  だけ上昇したとき  $\eta$  の増分  $\Delta\eta$  は、 $\Delta T = T_0$  として、

$$\Delta\eta = \frac{d\eta}{dT} \Delta T = \frac{T_0^2}{T^2}$$

であり、 $T^2$  に反比例する。<sup>(36)</sup> これはカルノー機関に対する表式で、これを、現実の熱機関に対する熱効率  $\eta^*$  とともに図6に示す。 $\eta^*$  は、理想状態の  $\eta$  より低い極限值に向って、より急速に飽和している。

$\eta$  と  $\eta^*$  の差がなぜ生じるかという、思考上の機関  $\eta$  は、完全な断熱性、滑らかさ、強さをもった素材で構成されるのに、現実の機関は、熱

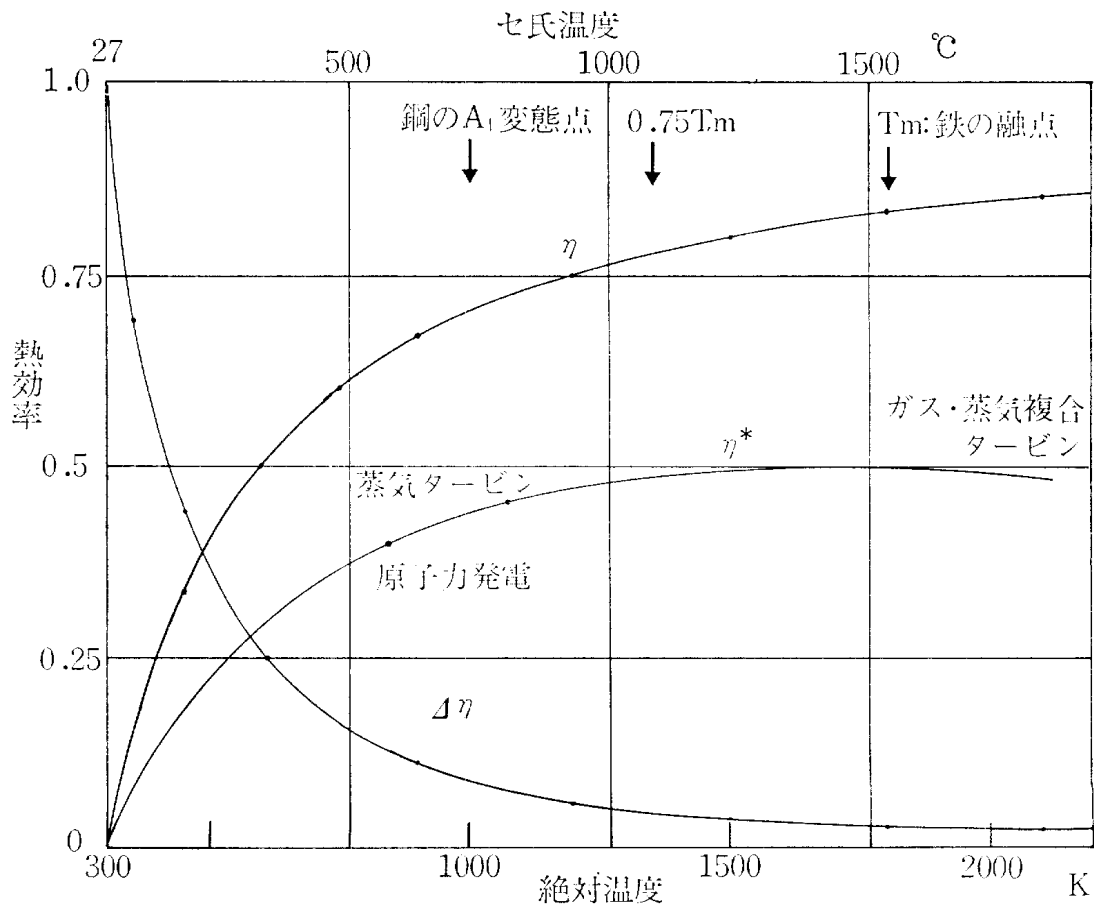


図6 理想・現実熱機関の効率

の漏れ，摩擦，耐熱限度をもつ材料でつくられるためである。現用の耐熱合金より高い性能の耐熱合金を用いれば，熱効率の向上は得られるが，設備費がそれ以上に高価について経済的にひきあわない。現に実用されているガスタービンと蒸気タービンを直列につないで，石油・石炭の火炎温度を最大限に利用する試みが計画されている。<sup>(37)</sup> この場合，本来の蒸気タービンで40%の熱効率が得られ，ガス・タービンで数%の  $\eta$  上昇が期待されるが，その費用は，蒸気タービン本体以上のものになる。このとき熱源温度が上がってくると，材料強度が劣化しないように強制冷却しなければならない。これは直ちに熱損失を意味するから， $T$  上昇による  $\Delta\eta$  を減殺する。

結局熱機関の性能は，材料技術によって限定される。これは極めて一般的な現象で，原子力発電の熱効率が蒸気タービンより低いのも，材料の放射線損傷に対する耐性からきまってくる。さらに高速増殖炉とか核融合とかの実現性が疑問視されるのも，諸材料の耐熱性，照射損傷耐性の限界にもとづいている。

すなわち，ハード・エネルギー路線の行手を阻む技術要因で最大のものは，材料の性能不足である。そこで，材料技術の飛躍的進歩 (break-through) は期待できないのか，ということが問題になるが，これは次節で検討する。

ここでは，経済速度——エネルギー変換における収穫法則——について触れておこう。

図6の  $\eta^*$  は，むしろ実用機関の上限を示すものであって，実際の効率は機関の規模や作動条件に応じて，この  $\eta^*$  よりさらに小さくなる。

これをエネルギー変換レート（時間率）の関数として考えると，ある経済速度，つまり効率最高の動作点を得られる（図7参照）。なぜならば，変換速度が遅すぎると，熱リークおよび摩擦が支配的となって効率が低下し，変換速度が速すぎると，カルノー過程（準静過程）からの解離が大きくなって効率が低下するからである。

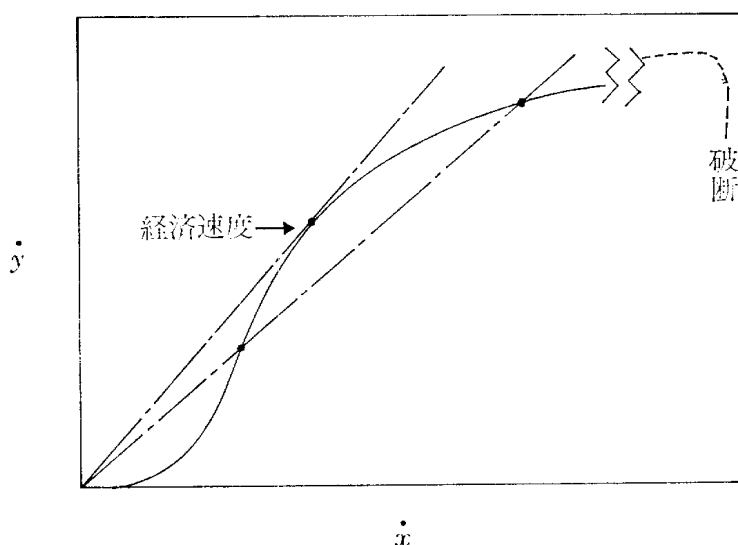


図7 熱機関の燃料消費率 $\dot{X}$ と、 $\dot{Y}$ の関係

したがって工業化社会でエネルギー変換の基軸を占める熱機関は、経済速度——共時的収穫逓減——と、熱効率の上限——通時的収穫逓減——の制約下におかれており、今後大きな発展の余地はない。(これに反して、社会的レベルでのエネルギー利用効率は、私的交通機関の公共交通機関への転換等によって大々的に改善される余地がある。しかしこの問題についての分析は、他の文献<sup>(38)</sup>にゆずる。

## § 8 エネルギー代替と材料工学—材料開発における収穫逓減性

材料開発における問題は、材料技術がすでに十分発達しており、それゆえに今後の発展余地が小さくなっている、という点にある。発達の程度というものは“要求される性能”によってよりも、まず、“発達可能性の極限”によって規定されざるを得ないからである。その理由は次節で検討する、MITSCHERLICHの法則と類比的に考察することができる。

まず古くて新しい材料である鉄を見てみよう。鋼の焼入、ステンレス、耐熱鋼、高速度鋼、高張力鋼と鉄合金は、“単なる鉄”から見ると想像を越えた機能を果してきた。

しかし、それらは鉄が地球上で最も豊富な金属元素の1つであること、鉄が炭素で還元できること、面心立方 (FCC) →→体心立方 (BCC) 転移

をすること、多種多様の金属、非金属を固溶すること、固溶元素、温度、加工度の関数として FCC—BCC変態が多様な現われ方をすること——一言でいえば周期律表上の鉄位置の特殊性——に由来している。要するにわれわれは、鉄元素の価電子状態の特性を、様々な方面に引き出して利用しているのである。

軽合金としてのジュラルミン、さらにそれを凌ぐチタン等々新材料として出現してくる金属は、まず地金の融点や比重によって基本的な（構造不敏感な）性質がきまってしまう。電気用の合金では、まず銅地金の電氣的物性が問題になる。

合金や化合物は、単一元素では得られない多彩な物性をわれわれに提供してくれる。たとえば熱伝導の合金、化合物の硬超伝導体は、元素超電導とは桁違いの電流密度を許容し、その性能の限界は知られていない。しかしこの場合性能は、超伝導線担体の電磁応力に対する降伏強度によって限定される。これは銅合金の強度の問題に還元される。

エレクトロニクス機器の中核である半導体デバイスは、その特性を本質的にゲルマニウム、あるいはシリコンの元素特性に負っている。同じ4価のダイヤモンドは卓越した超硬物質である。この C—C 結合を両隣の B—N 結合におきかえると、立方晶窒化硼素 (CBN) が得られる。これはより安価に合成でき、対酸化性がより大きい点で工業的には利用価値が大きい<sup>(39)</sup>が、その性能は、ダイヤモンドに匹敵するのであって、それを遠く凌駕するわけにはいかない。

工業社会が主に依存する有機体起源のエネルギー——石炭、石油、天然ガス——は、主要な工業材料（構造用）である鉄（合金）を精製することができ、他方鉄鋼材料は、それらの化学エネルギーを利用する機器をつくるに十分な性能をもっている。しかし、一旦、そのエネルギー領域を越えてより高温・強力・高密度のエネルギーに対応しようとする、鉄鋼材料は、一挙にその限界を露呈する。そして困ったことに、その穴を埋める材料は容易には見つからない。

鉄は、量的に他金属の追隨を許さないうえに、凝集力（融点、強度等に



関係)においてすべての単純金属に優り、遷移金属において中位を占める。したがって、鉄に耐えられない温度や力学的負荷は、他の金属にも不可能な、あるいは過重な負担となる。

融点とか、化学的耐性とか、特定の項目で鉄に優る金属はあっても、それが稀少資源であれば、コストが大巾に増加する。そうでなくても、精錬、加工が困難であれば利用し難い。タングステンやニオブのような高融点金属は、稀少で強度/重量比に難があり、セラミックスその他の化合物材料は、強度に問題がある。結局、高級耐熱材料としては、コバルト、ニッケル基合金が賞用されるが、これらが鉄属(VIII a 属)元素であることは偶然ではない。

化合物材料や、それらと金属・合金との複合材料は、ガス・タービンのように、火炎温度を最大限有効に利用し得る装置をつくる可能性をもっている。しかしその場合も、発電のような大規模なエネルギー変換にまで適用できるか否かは疑問である。

他方、高速増殖炉や高温ガス炉の開発に伴って材料に求められる課題は高温、重照射、高応力、熱応力等、極めて過酷である。<sup>40)</sup> そのような材料は、“技術の未発達”のためではなく、“物質の化学結合論的限界”のために、実現し難いというべきであろう。高速増殖炉開発の蹉跌は、プルトニウムとウラン238の利用を不可能にして、軽水炉の継続的使用を破綻させ、核融合炉がバベルの塔に過ぎないことを暴露する結果になるだろう。

これは、われわれがもの(材料)にいかなる性能を要求するか、という視座(これまでは有効であった)を離れて、もの(物性)がわれわれにいかなる性能を提供し得るかを、尋ねることによって明らかになる。

## § 9 農業における技術革新と収穫逡減性

本稿では、これまで「収穫逡減性」という言葉を定義することなく、平衡・非平衡熱力学的現象、資源の採り尽し、あるいは(技術的)可能性の採り尽し、といった広汎な事象に用いてきた。そこでこのような逡減性と経済学的な収穫法則との関係を直接考察しておく必要があるであろう。

そこで、古典経済学で問題となった、土地収穫逡減の法則を、J. S. MILL にならって二つの側面——技術の進歩が収量を増大（「労働」・「費用」不変）する場合と、「労働」・「費用」を節減（収量不変）する場合——から検討してみよう。

まず収量増加を制限する要因として、MITSCHERLICH の収量逡減の法則を考える。この法則が主張するのは、ある要素  $x$  が制限因子となっているため、収量  $y$  が最大可能収量  $A$  より少ないとき、 $x$  を増加させて得られる収量の増大率  $dy/dx$  が、 $C$  を定数として

$$\frac{dx}{dy} = C (A - y)$$

で与えられるということである。<sup>(41),(42)</sup> これを  $x=0$  のとき  $y=0$  という条件で解くと

$$y = A (1 - e^{-cx})$$

となる（図8参照）。これは制限因子が複数の場合にも拡張されている。

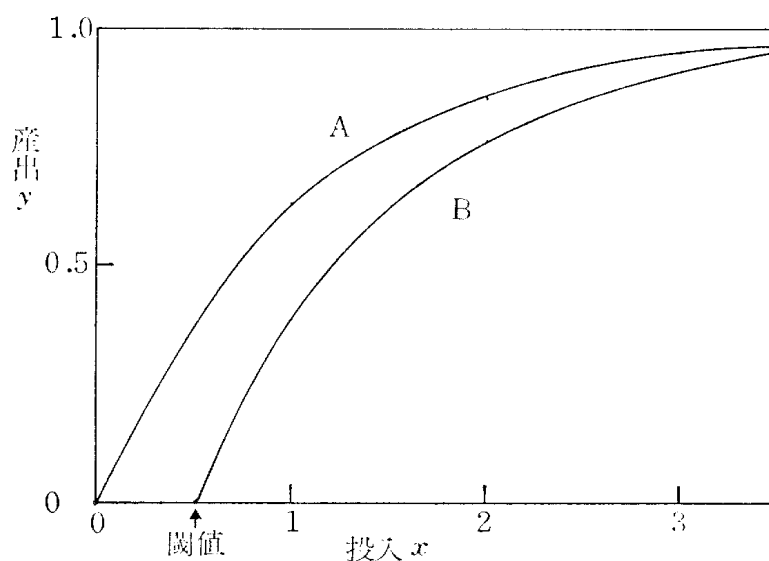


図8 生産要素 $x$ と産出 $y$ の関係  
生産性は $y/x$ で表わされ、Aでは一方的に減少し、Bでは逡増・定常・逡減となる。

この関数形は、自動制御理論における一次遅れ系の応答と同じ構造をしている。より一般的な関数形として、図7の点線で示される不感部分のある形を考えると、経済速度を示す図7と同じS字型曲線（sigmoid）になる。実はこの曲線の  $x$ ,  $y$  は、単位生産期間当りの量、すなわち厳密には

時間率  $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$  であって, 図7の諸量と類似している。

土地収穫は, 結局, 単位量の土地 (日照, 雨量等を含めてもよい) を媒介とした物質代謝であって, その物質代謝がある経済速度をもつのは当然である。技術進歩が, 品種, 耕作様式, 肥料形態等を改善すれば, 定数  $C$  を増大させることができるだろう。しかし, この改良にも耕作地の自然条件に応じて限界がある。

このような収量の逡減的性格は, 一般的に広く認められているといえよう。むしろ問題なのは, 農業の機械化, 化学肥料, 薬品依存による労働生産性の向上が何を意味するかである。この場合, 労働量  $L$  の節減が機械・設備費用  $K$  の増大と相関しており, 生産関数  $Y(L, K)$  は図9のよう

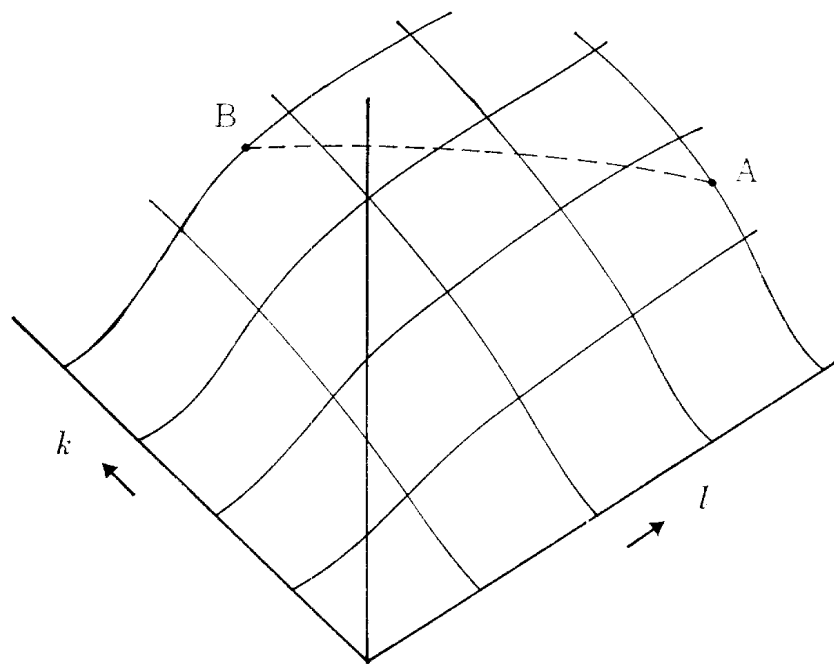


図9 生産要素L (労働), K (資本) に対する生産関数

に図式化される。技術進歩によって, 生産条件は労働集約的な状態(A点)から, 資本集約的な状態(B点)に移動すると考えられる。すなわち, 労働生産性  $Y/L$  の増大は資本生産性  $Y/K$  の低下によって相殺されており, 原点からの“距離”  $R = \sqrt{L^2 + K^2}$  に対する全生産性  $Y/R$  を考えることが可能だとすると, これは収穫逡減的であると考えてよいであろう。

$L$  のかわりに人・畜力による仕事量  $W$  をとり,  $K$  のかわりに, それ

の製造・設置・運転に要するエネルギー  $E$  をとると、 $Y/W$  の増大に比して、 $Y/E$  の低下が甚だしいことは容易に理解できる。実際、農業におけるエネルギー生産性の低下は実証的研究によって確認されている。ここでは大局的に、アメリカ農業を例に、力学エネルギー源である人・馬からトラクターへの移行に伴って、工率と収量の関係がどう変わったかを検討してみる。

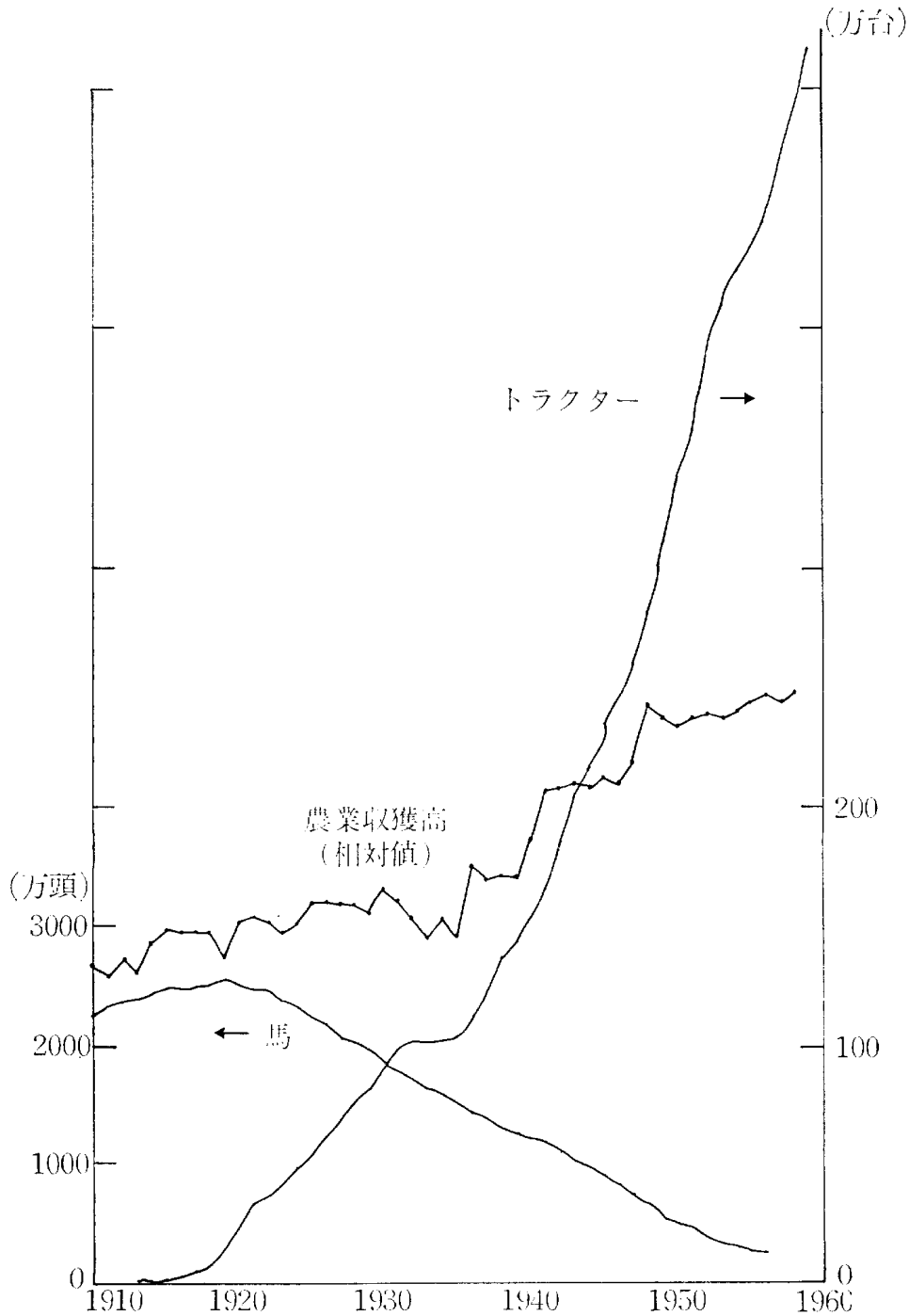


図10 アメリカ農業における畜力から機械力への変遷

アメリカ農業は、1900～1930年の間、図10で示されるように収穫高において停滞していた。発展を制約していたのは、農業用の動力で、2500万頭の役馬のため全農場の4分の1が飼料用地に割かれていた。したがって、収穫高の増大が、1920年代から加速度的に進展した農業用機械の導入と軌を一にしているのは当然である。

この傾向は第2次大戦後、品種改良、灌漑設備、農薬、化学肥料等の適用と相俟って一層推進され、収穫高を2倍にし、農業人口は半分以下に減った。1960年頃には、約1300万人強の農民がトラクター500万台、トラック300万台、コンバイン100万台以上を保有していた。<sup>(43)</sup> 各機械の平均馬力を、トラクター30、トラック200、コンバイン50とみると8億馬力になる。これを馬1頭1馬力とみて、1910年頃の2500万馬力と比較すると、30倍以上になる。

結局、収穫を2倍にするため、動力を30倍にしなければならなかったのであるから、農業の動力当りの生産性は15分の1に低下したことになる。これは動力としての人力を算入していないが、1人10分の1馬力として、100万馬力のオーダーだから大勢に影響しない。他方、機械製作のためのエネルギーを評価すれば、動力当り生産性の低下はさらに甚だしいことになる。<sup>(44)</sup>

ではなにゆえに、この過程がアメリカ農業の行き詰りを打開した輝かしい“break-through”とされているのだろうか。それは労働生産性が約8倍に増大し、それに応じて収益も上昇したためであろう。労働生産性の上昇がエネルギー生産性の低下に遠く及ばなかったにもかかわらず収益が上昇したことは、1次エネルギーの価格の相対的低廉性に負っていた。したがって化石燃料の収穫逓減状況に対しては、“近代化”された農業は、工業と同じような脆弱性をもっている。

アメリカ農業が、この拡張された意味における収穫逓減性を免れていないとすると、全世界の農業も同様であると考えられる。実際、開発途上国の人口と農業生産は、あたかもマルサス理論を再検証するかのよう状況にあり、ソ連・東欧地域の農業生産も不振を極めている。その原因は、ま

ず収穫逡減則よりも、社会・経済体制の欠陥に求められるべきであろうが、収穫逡減性を、経験に照らして否定する根拠は失われていると考えられる。

しかし、ここからただちに、経験主義的に法則化された「土地収穫逡減法則」が、LIEBIG, MITSCHERLICH の理論によって植物栄養学的に基礎づけを与えられ、それが改めて20世紀の世界農業の経験から再検証された結論するのは早計である。

実をいうと、これらの理論は“真の”逡減法則といえるかどうかなお疑問の余地がある。すなわち注目した成分の不足を緩和したとき、収量が逡減的に増加するのであるが、この逡減性はその成分への収量依存性から生じるのか、それともその成分が十分になるにしたがって、未知の何らかの要素が律速となって、そのために現象的に逡減性が現われてくるのか、両者の区別が不明確であるからである。

論理的には、あらゆる要素が十分に補給されたときには、投入に比例した（逡減的でない）収穫が得られる、と主張する余地が残っている。実際 LIEBIG の非収奪的、「合理的」農業の提唱にはこのようなニュアンスが含まれている。しかし、あらゆる成分を追跡して、その過不足がないように調節することができたとしても、そのときには物質代謝の速度が律速となる。つまり投入量がある時間的・空間的密度を越えれば、かえって植物成長を損うことになるのである。

すなわち、物質収支の立場（平衡論）からの「逡減性」が除去されると速度論（非平衡論）的な「逡減性」が現われてくる。これは熱機関の効率のところでも論じたことと同じ構造の問題である。農業における逡減性も、一般的な逡減性の特殊な現われと考えることができる。<sup>(45)</sup>

## § 10 代替エネルギー開発の不毛性

農業機械化において見られたエネルギー生産性の大巾な低下は、農業部門だけにとどまらない、高度産業社会に一般的な現象である。その他に顕著な例としては、公共輸送システムの衰退と私的輸送システムへの移行、

天然製品のプラスチック製品による代替，あるいはエア・コンディション等のミクロ的な“省力化”“快適化”がマクロ的には，エネルギー浪費として機能する。

B. COMMONER は，これを石油が「エネルギー生産性の高い」システムを市場から駆逐し，それを「エネルギー生産性の低い」（石油消費を拡大する）システムによって代替する過程と総括した。<sup>(46)</sup> この結果，拡大されたエネルギー消費は，大気中の NO，SO<sub>2</sub>，CO<sub>2</sub> 等を増加させて環境の危機を招き，石油の賦存量が尨大であるにもかかわらず，その枯渇が日程にのぼるに至った。

エネルギー危機といえは，直接にはこの点を指すのであるが，長期的に見ると，むしろ化石燃料の賦存量が環境容量に対して過大であること，すなわち可採埋蔵量の過半を消尽することが大気・水圏の変化と生態圏の破壊をもたらすことの方が重要であろう。<sup>(47)</sup>

つまり石油・天然ガスを，エネルギー換算で他の1次エネルギーに代替していくことは許されず，エントロピー換算で代替していかなければならない。すなわち石油または天然ガスは，汚染量においてそれと同等以下の石炭に代替されなければならない。これは当然，エネルギー換算では数分の1に減少することを意味する。他方，利用サイドでこれだけの削減を実施できるのであれば，石油のままでも使用期間はその分だけ延長できる。そうなれば石炭が利用価値量において石油を代替することにはならず，その意味では石炭のみならずオイルシェール，タールサンドといった“汚い”資源は，局所的利用は可能としても，石油・天然ガスを代替する基本的資格を欠いている。この“汚さ”あるいは高エントロピー性は，技術的処理によって克服できる性質のものではないのであって，採鉱量に見合った汚染物質が生態圏上に蓄積されることは不可避である。処理技術は，蓄積の様式を変更するだけであり，蓄積物が拡散（エントロピー増大）しないように保つために，さらにエネルギーを投入（エントロピー生成）しなければならない。

この悪循環は，原子力開発においてはもっと顕著に現われる。それは化

学物質による汚染を，放射能汚染によって“代替”するものである。原発推進論者は放射能汚染防止は建前として掲げるが，実質的にこの代替を推進する。気体性の放射性元素や低レベル放射能の拡散が，長期間続くことによる原子炉周辺の汚染が問題であると同時に，ウラン・テイル（ $U^{235}$ を抽出した残りの部分）および使用済燃料の蓄積自体が原子力開発の可否をきめる問題となる。

これらは処理技術の発展と高速増殖炉（FBR）の実用化を“期待”して貯蔵されているが，FBR，高温ガス炉は材料上の制約から先へ先へと延びテイルと使用済燃料の堆積が破局的に進行する可能性が高い。その原因は材料が高温・熱応力・重照射・高応力負荷等に耐えられないことで，これは技術的というより，物性論的な限界である。そしてたとえFBRが実用化されても，プルトニウムと高レベル放射性廃棄物の蓄積は加速される一方である。

現行の，および将来想定される原子力は，設備費が嵩み資本生産性が劣悪である。この状況は，それが商業ベースで自立した産業技術になる可能性自体をゆるがしており，民間用原子力発電の創業者たち——ジェネラル・エレクトリック，ウェスチング・ハウス，バブコック&ウィルコックス——が，発電用原子炉部門の放棄を企図していると伝えられている。<sup>(48)</sup> もっともこの点は，赤字補充，危険負担等において国家資金に寄生するシステムが保証されれば，放棄には至らないかもしれないが，それは産業技術としての破綻を告白するに等しい。

しかし，成算のない企画に国家が，惜し気もなく巨費を投じる傾向は，原子力開発に止まらない。その象徴的な事例は，通産省工業技術院が100億かけた「スターダスト'80計画」である。これは，一括収集した都市ゴミを粉碎して分離し，紙類をパルプに再生，厨介類は堆肥に，プラスチックは熱分解して燃料ガスに，金属も資源化するという装置の開発が目的であった。結局この装置はゴミ分別に経費がかかり過ぎて，トイレット・ペーパー5万本をつくったのを唯一の実績として，解体されることがきまった。<sup>(49)</sup> 機械的（マクロ的）に分別可能なものを一旦粉碎して混合し，後に



分子的（ミクロ的）に分離するという熱力学的に愚劣なアイデアが、途中どこからもチェックされることなく壮大なプロジェクトに成長して、国家資金を蚕食するという過程は、産官複合体の無責任さと退廃を遺憾なく示している。

同じ通産省が350億を投じて開発するバイオマス（生物化学エネルギー）資源も、同様な結末を約束されている。アメリカ農業のところでみたように、かつてアメリカ農地の4分の1から得られたバイオマスは2500万馬力の動力を支えた。しかし今日では、同じ収穫量を得るのに10億馬力が使用される。したがって熱機関が生化学的エネルギーと同じ効率をもち得たとしても、それを賄うのにアメリカの農地の10倍が必要になる。バイオマスを動物にではなく、熱機関に“喰わせる”ことは、酔狂以外のなにものでもない。

これらの、あるいは太陽炉のようなプロジェクトは、結論（成否を問わず）が出るから資金浪費にも自ら限界がある。ところが核融合は、明確なアセスメントの上に打切りを決めない限り、巨大プロジェクトの筆頭に位置して、資金と資源の浪費を無制限に続けていく危険が大きい。高速増殖炉さえ材料的に困難であるから、核融合発電が“バベルの塔”に終ることは確定的である。<sup>50)</sup> このことを最もよく知っているのは核融合研究に関わる人々であり、彼らは希望や信仰ではなく、客観的見通しを社会に対して伝えるべきであろう。

石油資源を全体として代替するエネルギーが、少なくとも短期的には存在しないことは、各種の将来予測<sup>51)</sup>で明らかにされてきた。しかしその理由は、基本的には石油以外の資源が、石油より汚ない（高エントロピー）ことによるのであり、原理的には技術の手に負えない問題である。したがって長期的にも代替エネルギーは存在しないことになる。

## § 11 収穫法則と規模の問題

工業システムにおいては、規模に関する収穫逡増の現象が非常に顕著であった。ただし、J. ROBINSON が指摘しているように、MARSHALL

の定式化した規模に関する収穫法則は、<sup>(52)</sup> MILL 以前の経済学者達が考えていた収穫法則とは異った領域に適用される（ただし無関係ではない）。本質的には、後者は何らかの資源ストックの採り尽しと関連しており、前者はその採り方に関するものである。

前者については、WATT 機関の頃から、機関規模を単に拡大することだけで熱効率が著しく改善されることが知られていたし、化学産業では装置の大規模化による容器の比表面積の縮少によって、設備効率を増大させてきた。

エネルギー変換の効率が規模に強く依存することは、その変換が原理的に劣っていることを示す。発電機、モーター、化学電池、生化学的過程のようなプロセスは、効率の規模依存性が小さく、カルノー機関では規模依存性が存在しない。逆に、あるプロセスが大規模化によってしか効率改善ができないことは、その技術が質的に発展していないことを意味する。核融合研究が装置の大規模化以外に策をもたないというのも、それが人工的な（天体的でない）エネルギー変換方式としては、原理的に拙劣な——高い熱源温度が効率を高めないで装置を損傷する——ものだからである。

ではこの規模に関する収穫法則 (rate of returns) は、常に逡増的であろうか。近代経済学では、規模の増大に対して経営者の能力の適応に限界があるとして、やがては逡減的になると説くのであるが、あまり説得力のある仮説とはいえない。このような考え方は、企業規模と装置規模とを区別していないため、経済・経営上の諸因子と技術上のそれとを個別的に（あるいは相関的に）考察していくことができない。

近年、「適正規模」に関する考察・主張が、市場原理の枠を越えた経済学を志向する立場からなされるようになったが、ここでは、技術的な側面（装置の規模）に問題を限定しておく。

まず、生産量の増大が生産過程の強度因子（温度・圧力・磁場等）を高めることによって達成される場合には、7節で熱源温度について論じたことがより一般化された形で成立すると考えられ、そこから収穫逡減性が導かれる。

生産量増大が装置の容量増大による場合には、生産量が装置容積に比例し、建設費が装置表面積に比例するかぎり、比表面積に反比例的に設備コストが低下する。また高温の系、たとえば熱機関や炉では比表面積減少が熱損失を小さくして、経常コストを下げる。

ところで、このような規模の経済といえども無制限に成立するとは考え難いが、それではどのような限界があるだろうか。これについては、主にシステム論的な考察が有益である。

まず装置の巨大化は、その装置の制御を困難にする。もちろん制御系自体がより強力なパワーを持つものに換えられるが、それは制御困難性への対応であって、困難性そのものを解消するものではない。これは航空機やタンカーの巨大化と、操縦性の関係等において典型的に現われる。

また信頼性工学の立場からみても、大規模装置1個よりは、その半分の容量の装置2個の方が、信頼性が高い。要するに、定常的な運転が保証されるかぎり、大規模装置の方が効率的であり得るが、制御の困難性は事故につながり、事故・故障による被害は、大規模のシステム程甚だしい。

さらに、当該装置とそれ以外のシステムとの間の、物質・エネルギー授受における広義のインピーダンス整合も、装置規模がある基準を越えて過大になると、急速に困難になる。たとえば、100万KW級の大規模コミュニティ発電（廃熱を生活用熱源として利用する）といったシステムは、熱の給配に巨額の費用を要するため実現し得ないであろう。ところが今日では100万KW級の原子力発電所は何ら特別大規模といったものではない。

そのほか大規模化はリードタイム（計画から実現までの期間）を長くする等の欠点をもち、さらにここで触れなかった環境の問題を考えると、規模への制約は一層厳しいものになるはずである。（規模に関する原理的な検討は E. F. SCHUMACHER<sup>(53)</sup> を、技術的な検討は A. LOVINS<sup>(54)</sup> を参照されたい。）

## § 12 結 び

則のために、農業が指数関数的に成長し得ないことが、究極的には工業を含む経済システム全体の成長を阻むものと考えられていた。技術進歩が収穫逓減則を緩和することは知られていたが、農業においては技術よりも自然条件への依存度が大きいため、その効果は限定されていると考えられた。他方工業システムでは、技術進歩による生産性の向上が支配的に機能するとみなされていたが、工業的發展も究極的には工業人口を養うべき農業生産によって制約される筈であった。

ところがそのような危機は、その後1世紀半にわたって現実化しなかった。しかるに現在では逆に、工業システムの成長が石油の“収穫逓減”的状况のために危ぶまれるに至った。さらにこのことは、本来の工業のみならず、機械化された農業にもそのままあてはまる。実は MALTHUS——RICARDO の危機を擬制的に解消させたものは、農業の工業化による労働生産性の向上にほかならなかったのであって、これは当然の結果である。

ここで改めて、技術進歩がこの隘路を克服し得るか否かが問われてくる。産業革命に始まる工業化が、少くとも工業部門における収穫逓減性の軛をとりはらったのは、技術進歩が水力・薪炭といった1次エネルギーに関わる差額地代の社会的意義を解消させていったためである。

ところが現代の技術は、石油利潤の世界経済における意義を滅殺する力を持たず、逆に石油の高騰をもって、代替エネルギー開発への駆動力としているのである。先進工業国はスタグフレーションおよび武器輸出——エネルギーの浪費の産物であり、その原因となる——と省エネルギー以外に産油国に対する *bargaining power* を持っていない。そしてそれが将来改善される見通しをもたないのである。

しかも現代の“ハード”な科学・技術は、その発展の頂点において、このように頼りない歴史的機能しか果し得ないことを自覚し、かつ外に向って告白する用意ができていない。

一般の工業技術（機械化された農業を含む）は、地下ストック（資源）を、大量のエネルギーを投入して地上ストック——最終的には生態圏に有害な廃棄物の集積——に変換するプロセスであって、地下資源の枯渇より

も廃棄物の過剰に苦しめられている。産業革命期に土地の稀少性という呪縛から解き放たれたかに見えた工業システムが、土地というより廃棄物を集積すべき物理的空間の稀少性に悩まなければならなくなっている。<sup>(55)</sup>

就中、原子力の利用は奇怪な機能を果している。原子力発電は、経済的にひきあい、エネルギー収支からみても黒字であるとされているが、それは、高レベル廃棄物を今数万年あるいは数十万年保管していくための、エネルギー、資材、労働力の積立をしていないからにすぎない。

これらの龐大な負担は、負の遺産として子孫（後続世代）に強制的に相続させられる。つまり、現代の先端的エネルギー技術は、（差額地代としての）石油利権料を“自力”で減殺する代りに、後続世代のエネルギー、物質、労働力を収奪するメカニズムを開発しているのである。

ここにおいて、通時的な収獲逡減の新しい段階が現われてくる。現代における“生産性”の向上が、後続世代の生存条件を一層収獲逡減的な状況に陥れることによって達成されるという状況である。環境破壊が一般にこのような本質をもっていることは自明であろう。エネルギー問題に限っても、後続世代は、乏しくなっていく化石燃料のうちますます多くを、負のエネルギー遺産の“償却”に充当しなければならなくなる。それが尽きた段階では、再び人力・水力・薪炭のように貴重なあるいは稀少な資源を否応なく環境の保全——怠れば生存自体への脅威となる——に割かねばならなくなる。そのような状況で、ポスト先進工業国の人民が味う苦難と恐怖は、現在の第3世界の人民を苦しめている飢餓以上のものとなるに違いない。

技術進歩それ自体が収獲逡減的である（製鉄技術、熱機関等の項参照）という状況を、擬制的に緩和すべく、現代の技術は、後続世代における生産性あるいは余剰生産物を先どりしてしまう手段を創出したことになる。このような状況は、長期的には単純再生産をも破壊して縮少再生産へと移行させると考えられる。つまり限界生産性が正值の領域で逡減する状態から負値領域へと移りつつあることを示す。<sup>(56)</sup>

しかし将来の生産性を犠牲にして現代のそれを向上させること自体は、

決して新しいことではない。資本主義的農業に顕著に見られるような短期的（たとえば借地期間内）な収量の最大化が、長期的な地力低下をもたらすことは、J. B. LAWES, J. H. GILBERT に対する LIEBIG の批判によって明らかにされており、以後、常識ともいってよいであろう。

ただし、現代の工業技術による環境破壊は、古典的農業における地力低下とは質量共に比較を絶する深刻な問題を生むのであって、同一の現象として括ることは妥当ではない。

ともかく、技術の機能、とくにその限界を考察するためには、熱力学的なレベルでは技術は、「価値」を創造することなく、もっぱらそれをあるシステムから他のシステムへ移転させるのみであることを再確認することが基本となる。歴史という対象は、エネルギー、エントロピーあるいは収穫法則といった少数の因子で分析するには、余りに複雑なものであるが、ここで指摘したいのは現代の工業文明においては、このように単純な規定で定量的あるいは半定量的に記述し得る部門が、社会システムの基幹部門となっている点である。

このことは同時に、現代および将来の工業技術のなし得ることとなし得ないことを、実は願望にすぎない“予測”から区別して、科学的及至技術論的に考察し得る可能性をも提供している。本稿は、その端著的な試みである。

最後に、本稿で扱わなかった重要な問題について触れておきたい。

まず、ここでは社会機構と科学・技術との関係を明示的に考察していない。従来 of 考察では、収穫逡減法則は、もっぱら土地所有制度との関連において扱われ、あたかもこれが土地収穫逡減性の原因（いかに重要であれ、それは条件である）であるかのようにみなされている。本稿ではそのような点を訂すことを当面の目標としたため、敢えて社会システムの分析を省いた。この点の不備は別の機会に補いたい。

また、太陽エネルギー等更新性エネルギーについての評価、および現在著しい発達の上にある情報処理技術についての評価——たとえば〈情報社会〉化がエネルギー多消費型社会の克服につながるか否か等——が本稿

では省かれているので、別の機会に論じたい。

なお、ここでは現代の工業技術が石油（および天然ガス）に替るエネルギー源を見出し得ないことを多方面から明らかにしたが、このことは直ちに、〈石油枯渇が急速なテンポで進行する〉と主張するものではないことを断っておきたい。

先進工業国は、当面、スタグフレーションと省エネルギーの相乗効果で需要を抑制できるであろうし、長期的には、化石燃料の不足ではなく、むしろ、その総賦存量が環境容量に比べて過大であることの方が重要な問題となるであろう。この場合、人類が化石燃料を使用することなく地下に留め置くという一層困難な課題に直面することになる。

しかし、いずれの局面においても、ここで考察した種々の制約条件は、根本的な重要性をもちつづけるであろう。

最後に、本稿は過去5年間中京大学における情報科学の講義のために、筆者らが研究した結果を河宮が中心にまとめたものである。

#### 文献および脚注

- (1) F. ENGELS, 『自然弁証法』上, 大月, 国民文庫, 47f, 307 ff.
- (2) S. WEIL, 『科学について』, みすず, (1976) p. 135.
- (3) 馬野周二, 『石油危機の幻影』, ダイヤモンド社, (1980), 107.
- (4) 馬野周二, op. cit. 第4章
- (5) M. TRIBUS & E. C. McIRVINE, 「エネルギーと情報」, 小 黎訳, 『サイエンス』, 1 (1971) No.3, 145.  
西川兼康, 「有効エネルギーと熱力学第二法則による熱勘定」, 『九州大学生産科  
研報告』, 66 (1977), 35.  
高橋秀俊「価値尺度としてのエネルギー」, 『BUTSURI』, 33 (1978), 102.
- (6) R. B. EVANS, Ph. D. Thesis, Dartmouth College, 1969.
- (7) 槌田 敦, 「資源物理学の試み」, 『科学』(1978), 2, 3, 5月号
- (8) L. BRILLOUIN, 『科学と情報理論』, 佐藤洋訳, みすず (1969) 114 ff.
- (9) E. T. JAYNES, "Information Theory and Statistical Mechanics",  
Phys. Rev. 106 (1957) 620, 108 (1957) 171.
- (10) M. TRIBUS, "Information Theory and Statistical Mechanics", Phys.  
Rev. 106 (1957) 420~30, 108 (1957), 171~190.

- M. TRIBUS, P. T. SHANNON, & R. B. EVANS, "Why Thermostatistics is a logical consequence of Information Theory", *A. I. Ch. E. Journal*, 12, №2 (1966), 244~248.
- (11) L. BECK, 『鉄の歴史』, 中沢護人訳, たたら書房Ⅲ. (3), 331 f.
- (12) 中沢護人, 『鋼の時代』岩波 (1964), 51. O. JOHANSEN, 『鉄の歴史』, 三谷耕作訳, 慶応書房 (1942), 96f.
- (13) V. DANILEVSKY, 『近代技術史』, 岡 邦雄・榎本セツ訳, 三笠書房(1937), 176 f.
- (14) S. LILLY, 『人類と機械の歴史』, 小林・伊藤訳, 岩波, 143.
- (15) 中沢護人, *op. cit.* 50 ff.
- (16) M. W. FLINN "Abraham Darby and the Coak-Smelting Process", *Economica new ser.* 16 (1959) №101, Feb, 54.  
中沢護人 *op. cit.* 60 ff.  
T. S. ASHTON, *Iron and Steel in the Industrial Revotution*, chapt. Ⅱ, Manchester Univ, (1963).
- (17) V. DANILEVSKY, 『近代技術史』, 岡 邦雄, 榎本セツ訳, 三笠書房 (1937), 161 ff.
- (18) V. DANILEVSKY, *op. cit.*, 97ff.  
O. JOHANSEN, *op. cit.*, 171 ff.
- (19) ただし, 同水準の技術で考えた場合である。
- (20) 磯野直秀, 『化学物質と人間』, 中公新書 (1975), 16 f.
- (21) K. E. BOULDING, 『科学としての経済学』, 清水幾太郎訳, 日本経済新聞社 (1977), 54.
- (22) TIME, 1980, Sept., 22, p. 44.
- (23) O. JOHANSEN, *op. cit.* 309
- (24) 中沢護人, *op. cit.* 112 ff, 136 ff.
- (25) O. JOHANSEN, *op. cit.* 後編, 第1章, 10~12章.  
中沢護人 *op. cit.*, Ⅳ章.
- (26) 宇野弘蔵, 『経済政策論』, 弘文堂 (1954) 133 ff, 172 ff.  
武田隆夫, 『帝国主義論』上, 東大出版会, 117f.
- (27) 加藤 迪, 『資源からの発想』, 中公新書 (1979), 58 ff.
- (28) M. W. FLINN, "The Growth of the English Iron Industry", *Econom. History Review*, Aug. 1958, pp. 144-153.
- (29) W. J. BARBER, 『経済思想史入門』, 稲毛・大西訳, 至誠堂 (1973) 2章3節.
- (30) W. S. JEVONS, *The Coal Question*, Mcmillan (1865), A. M. Kelly (1965) (reprint).



- (31) J. S. MILL, 『経済学原理』, 岩波 (1959) 第1編12章.
- (32) K. MARX, 『資本論』 I, 第4編第13章第10節末尾の註.
- (33) J. LIEBIG, *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*, Braunschweig, (1841), 第3版.
- (34) 椎名重明, 『農学の思想』, 東大出版会 (1976), 第5章.
- (35) 佐藤和夫, 『生産関数の理論』, 創文社 (1975) 1 ff.
- (36) J. PRIEST, *Energy for a Technological Society*, Addison Wesley, 1975, 134.
- (37) 戸田忠俊・幡谷文男, 「高温ガスタービン, アルカリ金属蒸気タービンと材料」, 『金属学会会報』, 17 (1978), 289.
- (38) FORD 財団エネルギー政策プロジェクト, 『選択の時: アメリカのエネルギーの将来』, 松井・室田・星・児玉訳, ダイヤモンド社 (1975) とくに p. 235.
- (39) 『工業材料』, 28 (1980), p. 4.
- (40) 長崎隆吉, 古川和男, 菊地武雄, 奥 達雄編, 『原子炉材料ハンドブック』 日刊工業, (1977) 825.
- (41) 野口弥吉編, 『農学大事典』, 養賢堂, 1977, 1420.
- (42) 高井・早瀬・熊沢編, 『植物栄養肥料大事典』, 養賢堂 (1977), 527 ff.
- (43) 米国務省, *Agricultural Statistics* (1960), vol 2, 19ff.  
C. STARR, 「エネルギーと人間」, 崎川範行訳, 『サイエンス』1 (1971), No.12, 10.
- (44) エネルギー消費量は, 工率 (power)  $\times$  時間に対応するものであって, 動力量の比がそのままエネルギー消費量の比を表わすものではない。動物 (人間を含む) は, 働らいていないときにも, エネルギー (食糧) を消費するが, 機械は異なる。
- (45) たとえば土地収獲遞減性は, 土地所有制度を捨象して論ずることはできない。しかし, 後者は前者を条件づけているのであって, 原因自体ではない。
- (46) B. COMMONER, 『エネルギー』, 松岡信夫訳, 時事通信社 (1977), 203.
- (47) S. F. SINGER, 「生物圏における人類のエネルギー生産」, 『生態圏としての地球』, 第10章 (赤木昭夫訳), 共立 (1975).
- (48) 毎日新聞, 1980年7月1日 (朝刊), 西尾 漠, 『技術と人間』 (1980), No. 8.
- (49) 毎日新聞, 1980年8月23日 (朝刊).
- (50) 槌田 敦, 「石油文明が生んだバベルの塔」, 『科学朝日』 (1978) No.11, 51.  
「核融合発電の限界と資源物理学ノート」, 日本物理学会誌プレプリント (1976).
- (51) FORD 財団エネルギー政策プロジェクト, op. cit, 235. 米国務省, 環境問題委員会, "The Global 2000 Report to the President", 1980, 13章.
- (52) J. ROBINSON, 『異端の経済学』, 宇沢弘文訳, 日本経済新聞社 (1972), 98.
- (53) E. F. SCHUMACHER, *Small is Beautiful*, Harper & Row (1973), 63 ff.

- 54) A. LOVINS, 『ソフト エネルギー パス』, 室田泰弘・榎屋治紀訳, 時事通信社 (1979), 143 ff.
- 55) R. G. WILKINSON が, 『経済発展の生態学』 (斎藤・安元・西川訳, 筑摩書房, 1975) において, 産業革命的を, 資源の枯渇をチャレンジとして, それを克服する過程で生じた発展と見る考え方を提出し, これが, 経済学者達にかなり評価されているようである (たとえば, K. E. BOULDING 『地球社会はどこへ行く』 講談社 (1980), あるいは 公文俊平・広松渉, 「転換期の世界を考える」, エコノミスト, 1980 1・8, 1・15合併号の公文の発言等) このような見方は, 本稿での分析によって論駁されていると考えられる。ある資源の「稀少性」を“解消”するものは, 他の資源であって, 技術情報はその媒介項にすぎない。WILKINSON や BOULDING は, 両者を混同している。
- 56) 収穫逓減法則は,  $d^2Y/dX^2 < 0$  の形で表現される。これを満足する最も単純な関数形は  $Y = a + bx - cx^2$  となる。これは  $X > b/2c$  において  $dY/dX < 0$  となる。G. HARDIN のモデル (「共有地の悲劇」, 松井卷之助訳 『地球に生きる倫理』, 佑学社, 1975) は, 特異なものではない。ただ,  $dY/dX > 0$  となっても  $X$  の増加を停止し難い点に“共有地”の特殊性がある。