

近代技術における物質変換・エネルギー変換（I）

河宮信郎

1. 序 論

本稿では近代工業文明における物質・エネルギー変換の特質とその歴史的限界を扱う。そのために、産業革命以来の主要な——経済的な効果の大きい——技術を取り上げ、その熱学的な特性を明らかにする。科学技術を批判的に論じるさいに、主要な社会的コンテキストは技術と科学・経済・資源・環境との関連である。これらを扱うとき、論理的次元では技術の定義、歴史的次元では時代区分がさしあたって問題となるであろう。

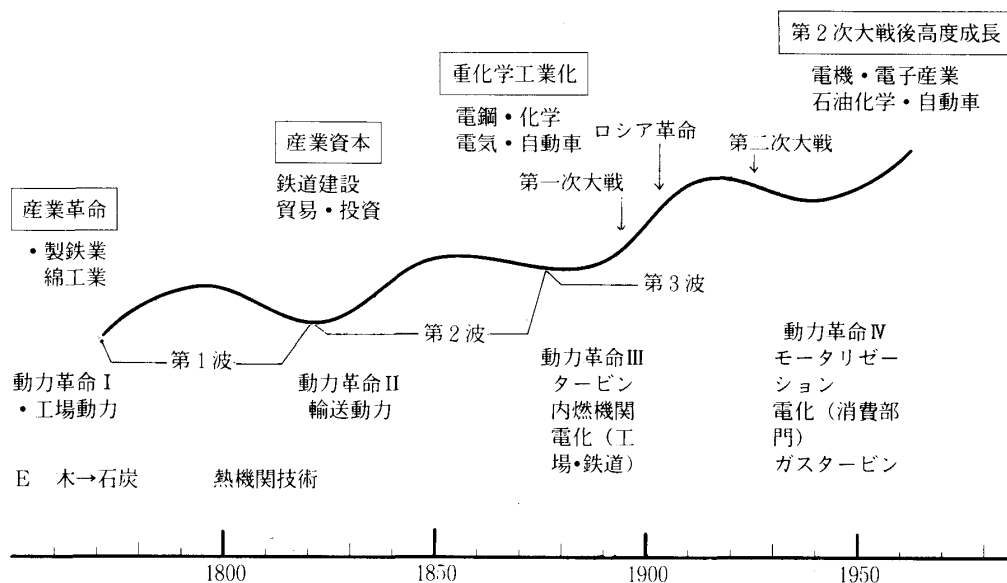
技術の定義を巡っては技術論者の間で長期にわたる論争が行われ、なお決着したとはいえない。この点に関してはモノグラフの労作^(1,2)もあり詳論することは主題から離れるので、筆者の見解を簡単にまとめたものを補論として本論のあとにまわした。

近代工業技術の発展段階は社会経済史との関連が密接なので、どのような基準でどのような時代区分をとるかをまず明らかにしよう。時代区分としては、第Ⅰ期・産業革命期（18世紀末～1830）、第Ⅱ期・産業資本主義の時代（1831～1880）、第Ⅲ期・重化学工業時代（1881～1947）、第Ⅳ期・大戦後高度成長と環境危機の時代（1948～現在）にわけるとする。この区切りはほぼ各時期の主導産業部門を担う基幹技術——エネルギー技術、物質変換技術・情報技術に大別される——が産業化の域に達した時点に対応する。

第Ⅰ期の主導産業は製鉄業と綿工業である。第Ⅱ期には、鉄道建設その他交通・運輸部門の急成長がそれに加わり、第Ⅲ期には製鋼・合成化学・電気部門が著しい発展をみせた。米国ではこの時代に自動車・家庭電気製品のような耐久消費財産業が確立した。第Ⅳ期には、西欧・日本に自動車・家電・住宅などの耐久消費財産業が発展し、石油産業や半導体エレクトロニクス部門が急伸した。この最後の段階では、工業体系による物質・エネルギー変換の規模が巨大になり、地球環境の自然的な自己維持機能を大規模に破壊するに至った。

この区分法は技術一般ではなく主導産業の継起・変遷という点に着目したものであり、コンドラチェフの長期循環論⁽³⁾やE.マンデルの『資本主義の長期波動』⁽⁴⁾の考え方と密接な関連をもつ（図1参照）。しかし、筆者はこの継起的变化を循環あるいは波動としてではなく、むしろ工業技術体系の構造変動と捉えたい。すなわち、この過程が利潤率や成長率の上昇・下降を交互に伴うことをもってただちに循環ないし波動とみなすよりも、その経済的「波動」をになう工業体系の実態が不可逆的な変態を遂げている点に注目するのである。循環ないし波動というのは、この経済活動を成長率や利潤率という特定の座標軸に投影したかぎりにおける評価にすぎない。たしかにそれらは経済活動に携わる

図1 コンドラチェフの長波モデル



出所：中村丈夫編『コンドラチェフ景気変動論』亜紀書房（1978）、
 実線はコンドラチェフ、点線は筆者。（一部改変）

ものにとって最大の関心事であろうが、しかしあくまで経済活動の実態ではないのである。実際、利潤量や経済規模を指標にとれば循環でも波動でもなくほぼ一方的な増大であったことは明白であろう。

なおマンデルの波動論では、停滞から上昇への転換点を区切りとして第Ⅰ波（18世紀末～1848）、第Ⅱ波（1848～1893）、第Ⅲ波（1893～1940 or 48）、第Ⅳ波（1940 or 48～現在）が示される。この時代区分は、ほぼコンドラチェフの大循環論を再現・延長したものになっているが、理論的にはコンドラチェフやシュンペーターを踏襲するものではなく、むしろそれらを批判する意図をもって提唱されている。すなわち彼らはこの経済変動を資本主義の内生的な要因に基づくと考えるが、マンデルはその変動における下降局面は資本主義の利潤率の長期低落化傾向（内生的要因）の現れと考え、他方で上昇局面はこの傾向を打ち消して余りある歴史的な与件（外生的要因）の働きであるとみる⁵⁾。

本稿の時代区分と経済的な長期変動とはほぼ一致している。異なる点は第Ⅱ、第Ⅲ期の始まりが10数年ずれていることだけである。なお本稿での第Ⅳ期と経済的な第Ⅳ波とは一致しているが、この期間にはやや特殊な点がある。それは半導体エレクトロニクスやLD転写法などこの期に開発された技術がただちに産業化されたことである。ただし、他の主導部門つまり石油化学工業や自動車産業、家電などは大戦前に基本技術が確立されていた。

このずれに関しては、G. メンシュウの考え方が参考になる。彼は、研究開発にも波動的な起伏があり、そのピークがむしろ経済的な長期波の不況・停滞期にあたっていると主張した。彼は、経済的低迷期に革新的な研究開発が群生的に生じて、上昇過程への転換を可能にし、逆に技術開発の「手詰まり」stalemateが下降期への転換を余儀無くすると考えた⁵⁾。メンシュウの見解では、長期的停滞が技術革新をトリガーし、逆に技術革新の停滞が停滞期のトリガーになる。これに対して、マンデルの理論

では、歴史的——経済学的には外生的な——諸要因による利潤率の上昇が、投資を活性化し、技術開発のストックを現実の産業過程に動員する⁽⁶⁾。そして、上昇・活況期の終焉は資本主義の内生的な要因である利潤率の長期低落傾向によってもたらされる⁽⁷⁾。この理論のほうが説得的であるが、いずれにせよ、上昇局面ではすでに開発された技術が産業化されるのであり、技術開発の時期が上昇局面に先立つのは当然ということになる。

技術革新が産業化されるのは上昇局面が主であるが、技術開発の時期は上昇局面に同調する場合——ホイットニーの繰綿機やモールス電信機、半導体技術、LD 転炉法など——もあり前の期の活況期に開発され次の上昇期に活躍するもの——ベッセマー法・平炉法や石油合成化学など——もある。この点に関しては、メンシュのように技術革新を網羅的に扱うよりも、本稿のように局面を主導する基幹的なエネルギー・物質・情報の変換システムを分析するほうが明快な解釈が可能になるであろう。

2 第 I 期 産業革命の社会熱学

T・S・アシュトンの『イギリス産業革命』⁽⁸⁾によれば、英国産業革命を特徴づけるものは「他のどの時代にもどの地方にも類例を見出しがたいほどの急激さで押し寄せた……農業・交通・工業・商業および金融における各種の革新であった」。それによって、「食糧・燃料・鉄・糸および輸送の不足のために生じていた障害が、いずれが先ということもなく、一斉に急激にとりのぞかれた。そして、ちょうど、ある一つの産業の進路に生じた障害が他の産業の進路にも充血を惹き起こしていたように、こんどは障害の除去が広範な解放をもたらした」。

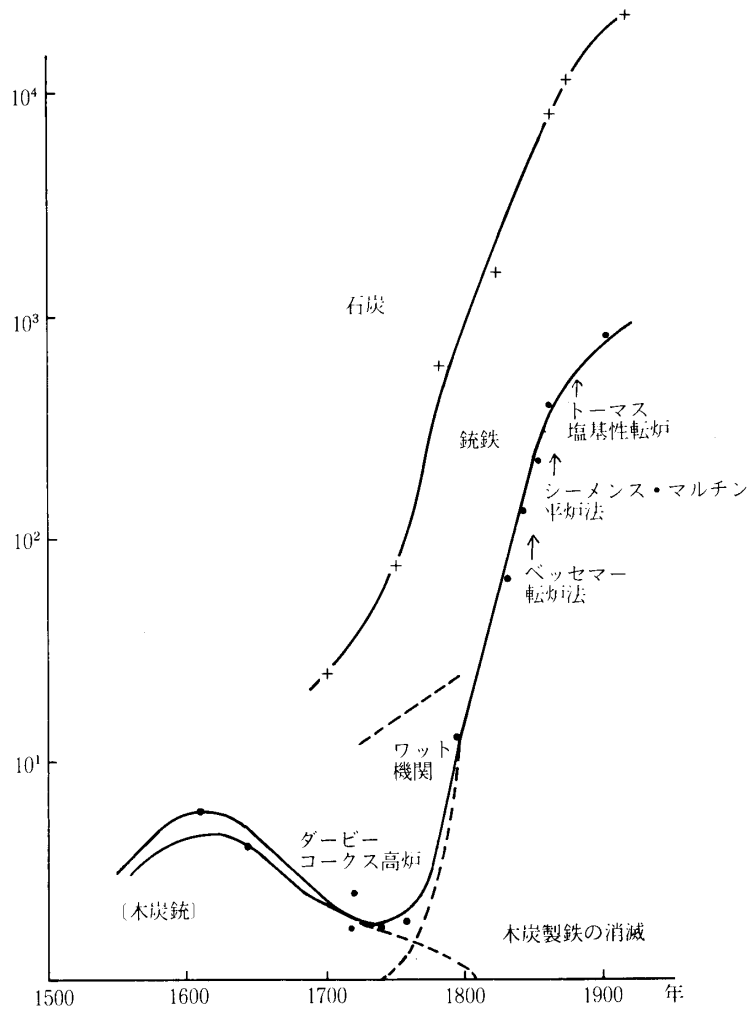
イギリス資本主義と大工場制工業を生み出した産業革命は、この相乗的な障害の堆積から連鎖反应的なブレークスルーへの転換であった。この過程は、経済史的にも技術史的にも膨大な研究が蓄積されているが、ここでは製鉄業・蒸気機関・綿工業におけるエネルギー代替に焦点を合わせる。

2-1. 製鉄業

産業革命以前、鉄は農林産物であった。燃料の木炭は鉄鉱石の数倍必要で、その原木はさらにその十倍を要した。大量の木材を運ぶ動力は馬で、その維持には一頭 2 ha の牧草地が必要であった。送風用の水車もまた、森林を集水域とする水力の所産である。こうして、森林・牧草地・耕地（労働力）、そしてそれらの産物の成育に必要な時間が、鉄生産を支えていた。すなわち、鉄は土地集約的、時間集約的な産物であった。

この時代においては木材は最も汎用の工業資源だった。現在の工業体系では、エネルギー資源は主に化石燃料、構造材料は鉄鋼とコンクリート、機能材料はより特殊な金属・半導体・セラミックなどと截然とした分担があるが、当時はエネルギー資源も構造用材料——船舶・家屋・家具から機械・器具の材料——もともに木材で賄われていた。鉄や煉瓦の製造に木質燃料を使うと、これは構造材料になる木材を消費して構造材料をつくることになり、熱学的には不利な迂回生産になる。したがって、森林資源の不足が顕在化した 17 世紀には石炭への代替が真剣に追求された。

図2 イギリスの石炭・鉄生産と技術革新



データ点は、L.ベック・中沢護人『鉄の歴史』II巻第4分冊、たたら書房（1981）、p.435およびB. R. Mitchell & P. Deane, *Abstract of British Historical Statistics*, Cambr. Univ. Press, (1962) による。

製鉄業は最大の木材消費産業であり、英国製鉄業は17世紀以降恒常的な木炭不足に悩まされていた。ガラス、煉瓦など窯業部門の燃料が薪炭から石炭に代替され、煤煙を嫌う都市の暖房用燃料さえ石炭（コークス）に置き換えられつつあった。しかし、最大の需要部門であった製鉄業で、石炭燃料への代替ができなかったのである。

なぜなら、燃料は窯業やアルコール蒸留では単なる熱源であるが、製鉄業では熱源と原料を兼ねており、燃料中の炭素は鉄に溶けてその成分となる。したがって、前者の石炭化は順調に進んだが、後者への石炭利用は失敗が続いた。木炭は、純粋な炭素に近く、しかも不純物の灰分はアルカリ性で鉄に有害な硫黄分と燐を除く働きをもつ。これと逆に、石炭は硫黄や燐を含んでいる。

製鉄業にとって幸いなことに、

都市部での石炭使用のために石炭を乾留してコークス（骸炭）にする技術が開発された。これは本来タール分を除いて煤煙を減らすための技術であったが、硫黄分を減らすのに有効な方法である。

こうして、有害な不純物の少ない鉱石と石炭を利用したコークス高炉製鉄が可能になった。この石炭製鉄は、1713年に A. Darby によって開発された⁽⁹⁾。

この待望久しい技術の開発にも関わらず、イギリス製鉄業の停滞はなお続いた。実際、図2に示した鉄生産量の動向が示すように、英国産鉄量の急速な伸びは18世紀末まで生じなかった。

じつは、このコークス製鉄によって、原燃料は木炭から石炭に代替されたが、高炉送風の動力を確保することはかえって困難になった。すなわち、コークスは揮発分が失われているだけに燃えにくく、木炭高炉よりもはるかに強力な送風機を必要とする。ところが、当時の大動力源は水車であったが、大水力の水車自体が稀少化していた。実際、ダービーのコークス高炉では水力の不足を補うために、ニューコメン機関による揚水で送風用水車を動かしていたという⁽¹⁰⁾。この蒸気機関は熱損失99.4%と

いう低効率の機関で、産炭地以外では使用に耐えないものであった。コークス高炉単独では、燃料の石炭化——土地制約からの脱却——を果たしたものの、動力の土地依存性を未解決のままに残した。この隘路を突破し、動力まで石炭化することに成功したのがワット蒸気機関だった（次項参照）。したがって、このコークス高炉がイギリス製鉄業の躍進をもたらすのは、18世紀末であり基本発明から約70年も遅れたのである。ちょうどこの時期1783年に、銑鉄から練鉄をつくる新しい精錬炉——パドル法——が発明された。これは一種の反射炉であるため、この精錬法によって木炭でなく石炭で練鉄（炭素分が少なく靱性の高い鉄）をつくるのが可能になった。製銑と製鋼がともに石炭で行えるようになり、鉄が木材や石材に替わる最も汎用の工業材料になった。

2-2. ワットの蒸気機関

蒸気機関技術における James Watt (1736-1819) の最大の貢献は、独立式（シリンダー外）復水器の発明による熱効率の向上である（1769年に特許取得）。この方式によって、始めて真の蒸気圧機関が可能になった——これに先行したニューコメン機関は大気圧機関で、蒸気は真空をつくる役割をしたに過ぎない。このほか出力密度を高める複動機関の発明（1782年）や出力安定化のための遠心调速器の特許（1787年）など多数の技術的発明・改良があるが、これらも高い効率を前提として始めて有効性を発揮する。

しかし、ワット機関は在来のニューコメン式機関（効率約0.06%）に比してほぼ4倍の効率をもつ画期的なものであったが、なお熱損失が98%近い（図2参照）。さらに、工作精度と材料強度の制約から、出力密度も限られていた。たとえば、50馬力機関でシリンダー径864mm、ピストン行程2140mm、ハズミ車の径5490mm、重量が約5トンという巨大なものであった⁽¹¹⁾。

ワット機関が紡績業よりも前にまず排水と製鉄送風に用いられたことは銘記されるべきである。すなわちそれは、ただちに「大工業の万能原動機」になり、「工業都市の生みの親」⁽¹²⁾ になったわけではない。実際、もしこの機関を都市の工業用に用いるとしたら、石炭は馬車・馬船で運搬しなければならず、それには大量の馬と牧草地が依然として必要となったはずである。

排水と高炉送風の動力を担ったことがきわめて重要であるのは、当時の英国鉱山業が収穫逡減的な状況に苦しんでいたからである。すなわち、図2に示したように木炭製鉄が続いていた間に、石炭の生産・消費が急増期に入り、他の金属鉱山とともに深掘による出水や採掘条件の悪化に悩まされていたのである。

3. 綿工業

産業革命を主導した産業部門は通例綿工業と考えられている。しかし、製鉄・鉱山業の重要性が綿工業のそれに優るとも劣らぬものであったことを忘れてはならない⁽¹³⁾。非西欧世界との関係を考える場合にも、つねにこの二部門の意味を考えておく必要がある。

さて産業革命期のイギリス綿工業を世界史的視点から扱うとき、この時期の西欧世界の物産が相対的には貧弱であったことに留意する必要がある。西欧はとくにアジア全域や他の熱帯地域から綿花・

絹・茶・陶器・香辛料など輸入したいものが沢山あった。しかし、その見返りに輸出すべき魅力ある商品を西欧はもっていなかった⁽¹⁴⁾。

原因は、西欧の生態的生産力の貧弱さのためおよび文化の質、西欧の特産品である毛織物と銑鉄は「世界商品」にはならなかった。当時、地域的・用途的に限られた需要をもつのみであった。もっとも高い鉄生産能力は卓越した武力を保証し、西欧が自らの欲するものを他の地域から暴力的に奪い取ることを可能にし、西欧は遠慮なくその可能性を利用したのであった⁽¹⁵⁾。

これとは対照的に、高度の綿業技術から生み出されるインド綿布（キャラコおよびモスリン）は文化・気候・階級を超えてだれもが好む衣料であった。しなやかで強く肌触りの優れた薄地の綿布の発明（プロダクト・イノベーション）こそ世界商品を創出した基本的な発明にほかならない。英国産業革命を論じるとき、あいつぐ繊維機械の発明による労働節約的な技術革新（プロセス・イノベーション）に焦点が合わされるのであるが、その功績は、世界商品となりつつあった綿布の製造・販売をインドから奪いとることを可能にした点にある⁽¹⁴⁾。

実際、18世紀の繊維機械の開発においてとくに重要な役割をしたものは、単に労働生産性を引き上げるだけでなく製品の質を向上させるものであった。まず、アークライト（じつは発明家というより事業家、真の発明者はトマス・ヘイスその他）の水力紡績機が縦糸になりうる綿糸を紡げるようにしたこと、クロンプトンのミュール機が細くて強い紡糸を供給して、インド産のモスリンに対抗しうる綿布の製造を可能にした⁽¹⁶⁾。

しかし、最終的な英国綿業の勝利は、米国南部の奴隷制綿花プランテーションによる原料供給によってもたらされた。アメリカで栽培されるリクチ綿はエジプトやインドで栽培されていた綿花よりも繰綿が困難であったために、18世紀末にはむしろ衰退の傾向にあった。これを逆転し、アメリカを世界最大の綿花供給地にしたのは、E. ホットニーの繰綿機（特許1794年）であった。この機械を奴隷による強制労働で稼働しえたことが、米国の綿花栽培の世界制覇を可能にした。実際、1791年に世界綿産額の0.4%を占めるに過ぎなかった米綿は、1845年には88%を占めるに至った⁽¹⁷⁾。

マルクスがつとに喝破したように、これらの事実は作業機（Werkzeugmaschine）の開発による労働生産性の向上が工業上決定的な意義をもつことを示している。しかし、この機械の性能を全面的に発揮させた条件は容易な耕地拡大と奴隷制であった。すなわち、この作業機（労働手段）の効用を劇的にしたものは、ヨーロッパからの移民による原住民のジェノサイドでアメリカが未開・無住の地とされたこと、アフリカ人が強制的に移住させられ、あたかも家畜のように扱われ、売買されたことにはかならない。近代綿工業の驚異的發展を可能にしたのは、繊維機械の進歩である以上にアメリカ・アフリカ二大陸の住民の犠牲であった。

アシュトンが指摘した連鎖反動的なブレークスルーを一連の技術開発に帰することは間違いではないが、その技術開発が労働節約的である以上に土地節約的であったことに注意しなければならない。この場合、「土地の節約」の意味は多重である。

第一に、燃料・動力・構造材料を供給していた森林が石炭——濃縮された森林——と石炭による鉄で代替された。これらは、従来単に鉱物資源の利用と解釈されてきたが、実際は地球史的な過去にお

ける土地生産物であり、技術の役割は現在の土地生産物を過去の土地生産物で代替したところにある。

第二に、主な繊維原料が羊毛（動物繊維）から綿花（植物繊維）に替わり食物連鎖を一段下ったことで迂回生産による熱学的な損失を避けることができた。さらに綿花栽培は生態的生産力の旺盛な亜熱帯地帯で行われた。こうして綿工業に必要な英国の土地は工場用地だけになった。

これと関連して、米国の綿花生産は、原住民の殺戮とアフリカ人の強制連行という二重の犠牲を伴った。そしてそれは英国工業にとって、土地と労働力——これもまた土地（耕地）の生産物である——との略取という二重の土地節約効果をもっていた。19世紀前半の綿工業の驚異的發展は、アフリカ・アメリカ二大陸原住民を犠牲にして獲得されたものである。技術革新を経済成長の最大の要因とみなす常識的な議論は、開発された技術を成立させる歴史的与件と技術との相関を軽視ないし無視している。

最後に、これらの要因は市場経済のレベルでは土地節約的といえるが、絶対的な意味では土地と時間を浪費する性格をもっている。たとえば、炭田の形成には膨大な時間が掛かっており、生態的生産力の長年にわたる蓄積土地の繰り返し利用は空間的な表現に還元すれば広大な土地に相当する。工業技術は地質学的な時間にわたって形成・蓄積された資源を瞬時のうちに消費する。近代工業の特質である物質変換・エネルギー変換の高速性を補償するのは資源形成に要した億年単位の時間にはほかならない。

注 経済学的には「迂回」はより複雑・高度な生産手段を利用することを意味しており、直接的な生産より望ましいものと考えられている。しかし、経済学的には「迂回」であるものが技術的にはむしろ直接化——「迂回」の除去——であることが少なくない。たとえば往復式蒸気機関から蒸気タービンへの発展は、工程の直接化・連続化である。技術的にはエネルギーや物質の変換効率は決して100%に達しないから工程上の迂回は効率ひいては経済性を下げる。

3. 輸送動力の登場と産業資本主義

産業革命期とつぎの段階との境界を1830年としよう。この年を画期としたのは、蒸気機関が輸送用動力として産業化されたからである。すなわちリヴァプール・マンチェスター間の旅客鉄道が開通し、蒸気機関が移動用動力としての地歩を確立した。1831年には、ファラディ〔英〕とヘンリー〔米〕が電磁誘導の現象を発見し、その応用として30年代に電気通信技術が開発された。またこの頃から、産業革命が西欧・アメリカに波及し、世界的な工業化が進展した。と同時にそれはまた最初に工業化した西欧諸国が他の世界を植民地化していく過程でもあった。

3-1 高圧蒸気機関の発展と蒸気力交通機関

ワットの蒸気機関は、先行する蒸気機関の数倍の熱効率をもっていたが、なお石炭消費量も大きく、出力は最大でも80馬力弱であり、それには巨大な建屋が必要であった。機関の重量ないし容積あたりの出力が低いことが、輸送動力への応用を妨げた致命的な欠陥であった。したがって、産業革命以降

も輸送動力は、陸地では馬、海洋では帆船であった。馬動力を最も効率的に使う方法が運河に馬船を通すことであったので、莫大な労力を費やして運河の建設が進められた。蒸気機関のための石炭はじつに馬動力によって運ばれていたのである。

19世紀に入って、材料技術や加工技術が進歩すると、高い蒸気圧を用いる機関が製作されるようになり、1804年にトレヴィシックが最初の蒸気機関車をつくった。スチーブンソンは、25年にストックトン・ダーリントン間、31年にリヴァプール・マンチェスター間の鉄道を完成させた。これ以降鉄道建設が加速度的に進む様子を図3に示した。これをみると、世界的には1880年以降——すなわち第3期重化学工業化の時代——のほうが建設テンポは大きい。にもかかわらず、この第2期の主導部門を鉄道建設とみることは適切である。この期にはまだ鋼（練鉄）生産の主体は極めて労働集約的なパドル法であり、鉄道建設は鉄鋼需要と動力需要の中核を占めていた。実際、1830年に実用の域に到達した蒸気動力が1850年には積算79万馬力に達し、定置機関の50万馬力を大きく凌ぎ、輸送部門が最大の動力消費産業になっていたのである⁽¹⁸⁾。

鉄道と世界貿易の発展のなかで、海運が依然として帆船が中心であったのは興味深い（図4参照）。蒸気機関を輸送動力にするさいの致命的な制約が馬力あたりの重量が大きすぎることにあったことを考えると、鉄道への応用より船への応用が容易であったように思われる。実際、1807年にフルトンはワット・ボルトン工場製の蒸気機関を乗せた汽船で試験航海に成功している。しかし、蒸気機関の燃料消費が大きいため、大洋汽船では積荷の大部分は船自体のための燃料だった⁽¹⁹⁾。帆船は風待ちという点で自然の制約に従わなければならないが、機関とエネルギー源を積載しないため船の容積の大部分を船倉にできる。最終的に、帆船が汽船に敗れるのは第IV期（19世紀末）に入ってからであった。この交替は、熱機関の効率化と比出力の増大および鋼生産における技術革新、そして時間がコス

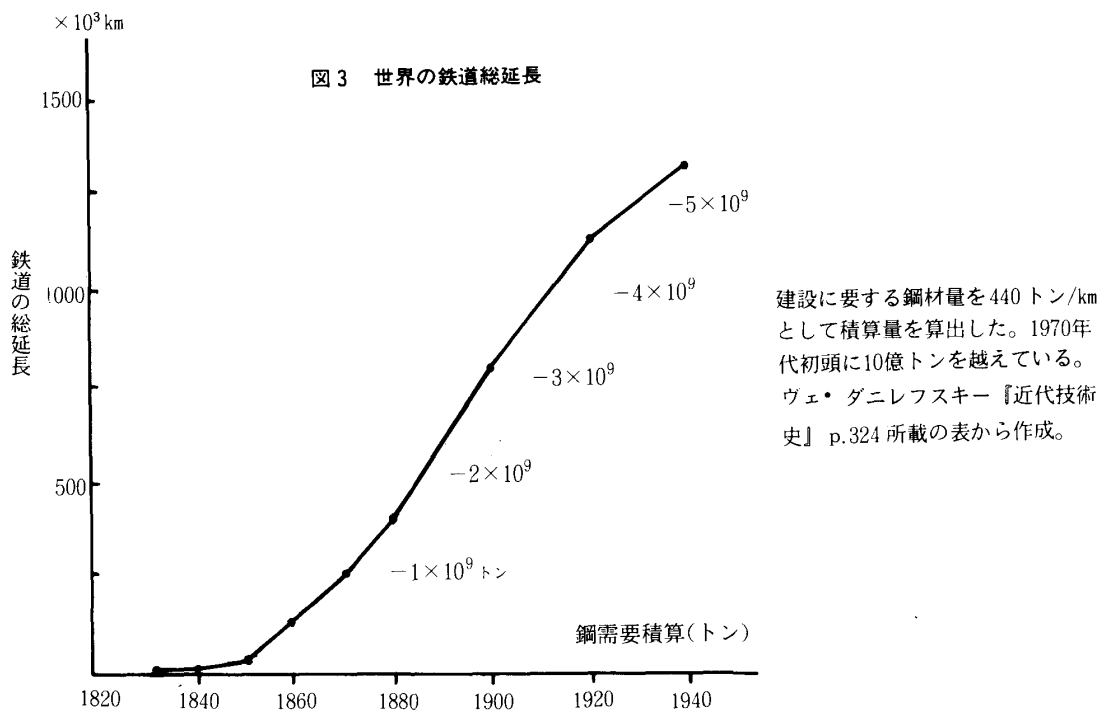
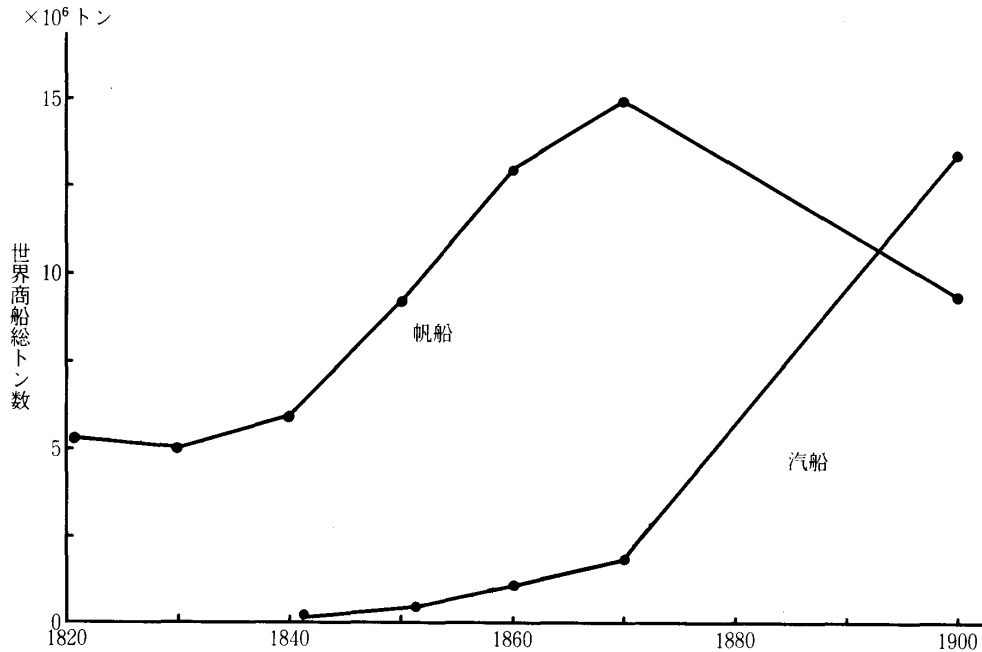


図4 商船の総トン数



ト因子として重要になったことなどの条件がそろって始めて起こったのである。

3-2 製鉄業と石炭鉱業

工業の発展とくに鉄道路線の拡大は膨大な鉄需要を生み出した。1830～50年の間、大ブリテン鉄道10000 kmの建設に700万トン以上の鉄が消費された⁽²⁰⁾。この間英国(U.K.)の銑鉄年産は90万トンから270万トンに増大したが、鋼ないし錬鉄に精錬されたのはその一部であった。鉄道用には鋼と錬鉄が用いられたので、鉄道が製鉄業に占める比重の大きさが理解できる。製銑・製鋼部門の需要が急伸していたので、高炉・製鋼技術の革新に対する社会的要求は切実であった。

これに応えた技術開発として、まずニールソンの熱風高炉がある(特許1828年)。この方法は高炉への送る空気を予熱しておくもので、29年にクライド冶金工場で行われた試験では銑鉄1トンあたりのコークス所要量を8トン強から2トン強に引き下げた⁽²¹⁾。この技術は数年のうちに英国内に広まり、製鉄業に計りしれない貢献をした。また40年代には、炉頂ガスが熱源に利用されるようになり、製鉄業の熱経済がいっそう促進された。

こうして銑鉄生産の著しい合理化に対して、それに続く製鋼工程は依然としてパドル法によっていた。これは反射炉の一種で銑鉄を溶融し、送風しつつ人力で攪拌して脱炭するもので、数日の時間と過酷な労働を要する技術であった。パドル法は18世紀末の時点では画期的な製鋼法であったものが、19世紀中葉には堪え難い桎梏に変わりつつあった。

19世紀後半に入ると、新しい製鋼法があいついで発明された。これらの新法のパドル法に対する優位性は、精錬温度が高いため鋼が完全に溶融し、銑滓との分離が自動的に行われる点にあり、まとめて溶鋼精錬と呼ばれる。パドル法では鉄は半溶融で、銑滓との分離に力学的な仕事——人力による攪

煉作業——が必要だったのである。

56年にベッセマーは転炉による鋼精錬を公開実験した。溶銑に空気を吹き込み、原料銑の炭素（および珪素）を燃焼させて脱炭すると同時にその反応熱で鋼を溶融した（鋼は原料銑よりも高い融点をもつ）。この画期的な方法で10トン以上の銑鉄を10分程度の時間で練鉄ないし鋼に変えることができた。これはパドル法では数日かかる処理量である。ベッセマー転炉法は、米国の無磷鉍石には最適の製鋼法であり、19世紀末以降のアメリカ鉄鋼業の急成長を支える技術となった。

64年にジームス兄弟とマルタン父子による平炉法が実用化された。この方法は蓄熱室で予熱された空気と燃料ガスを反射炉で燃やして、銑鉄に屑鉄、屑鋼または鉄鉍石を混ぜて溶融処理することにより、鋼を得る方法である。いわばパドル炉と熱風炉とを結合したようなもので、転炉法より時間もかかり燃料（粉炭でよい）も必要なのであるが、良質の鋼を廉価に得ることができ、転炉法を凌いでほぼ1960年代まで製鋼法の首座を占めた。

これらの製鋼法は、磷を含む鉄鉍石に適用できないという欠点をもっていた。S.G.トーマスは、強酸性の酸化磷を塩基性の鉍滓に吸収させて除くことを考え、そのために塩基性の耐火物で内張した転炉を造った（1879年）。トーマス転炉は、従来無価値と見なされていた含磷鉍石を一挙に優良資源に変えた。磷は優れた熱源であり、しかも廃棄物の含磷鉍滓は磷肥料（トーマス磷肥）となったからである。しかし、この技術は創始国のイギリスよりも大陸ヨーロッパの鉍石に適しており、とくに英国の最強の競争者となったドイツの製鉄業を躍進させたのであった。

これらの製鋼技術革新と経済との関連で重要なことは、1）新製鋼法は第Ⅱ期に開発されたが本格的な産業化は第Ⅲ期に起こること、2）主要な技術創始国であったイギリスでかえって旧式のパドル法が根強く続いたこと、3）むしろアメリカやドイツなど後発国の工業発展を推進したことなどである。コンドラチェフ波動との関連では、「革新的技術が生まれるのは停滞期であるのか拡張期であるのか」がしばしば論争的になる。この期の製鋼技術革新に関しては、ベッセマー法と平炉法とが上昇局面で生まれ、トーマス法が下降局面で生まれている。そして、それらがいずれも全面的な工業化を迎えるのは次の期の上昇局面においてである。このことは、発明の時期よりも設備投資が活発化する時期のほうが技術体系の交替という点で重要であることを示しているといえよう。

3-3 電気の利用と情報伝達の技術

H.C.エルステッド（Denmark）による電流の磁気作用の発見（1820年）、M.ファラディ（英）による電磁誘導の発見（1831年）、J.ヘンリー（米）による自己誘導電流の発見（1832年）電動機と発電機をはじめ電気機械技術の基礎を提供した。しかしこの場合、電気の実用化はエネルギー部門ではなく情報通信部門で始まった。当時は電気をボルタ電池から得ていたので、きわめて高価であり動力源としては蒸気機関にはとうてい競争しえなかった。しかし、伝達速度がずば抜けて速い点で電気は他の媒体の追随を許さない性能をもっており、通信に用いる場合にはそれは高価という制約を補って余りある特性であった。他方、電燈などは通信より原理的に単純な装置でありながら、エネルギー消費率が高いために実用化が遅れた。

電気技術は科学（基礎）から応用（技術）への展開という数少ない例——一般的には、蒸気機関から熱力学が生まれたように逆のほうが多いが——とみなしうる。しかしこの場合でも、電気化学的な方法——水の電気分解による泡の発生を利用する——による通信が F.サルヴァ（Spain, 1804）や S. T.フォン・ゼンメルンク（独, 1809）によって試みられるなど、電気物理学に先だつて応用研究があったのである。当初は、アルファベットの 26 字を送るために、26 対の回線が必要だと考えられており、電線敷設はきわめて高価だった。

電磁式通信機は、K. F. ガウスと W. E. ウェーバー（独）によって 1833 年に発明され、35 年に P. C. シリング（露）は磁針の振れを利用した電信機を発明した。これを改良して、C. ホートストンと W. F. クック（英）が 5 針式電信機をつくった。これは 6 本の通信線で 5 本の磁針を動かしてアルファベットの 1 字を指示する装置で、最初の実用機となった。しかし、5 針式通信機で一部の回線が故障したときに、残りの回線だけで通信することに成功した。

1837 年に、S. F. B. モールス（米、本職は画家だった）は長短符号の組合せ（モールス符号）で 26 文字を 1 対の回線で送ることができた。送信側は打鍵で回路を開閉し、受信側はその電流で働く電磁石が長短符号を自動記録する方式であり、電気通信の決定版として 1 世紀以上にわたって使われた。まもなく符号を文字に変換して記録する印字機が M. H. フォン・ヤコビ（露）によって試作され（1850 年）、ヒューによって実用化された。

都市を結ぶ公共電信回線の建設が 1840 年代から始まり、51 年にはドーヴァー海峡を渡る海底電信線が敷設された。57 年には大西洋横断の電信線が設置されたが、断線や故障などトラブルが続き 1865 年に漸く定常的な交信が可能になった。72 年にはインド～オーストラリア間の電信が開通し、総延長 32 万 km に及ぶ世界的な電信回線網が完成した。電信線の敷設には巨費を要したが、商取引や西欧諸国の植民地支配などの政治経済的な動機からこの後も増設が続いた。

注1 モールス信号は優れた符号方式で、今日の情報理論でいう最適符号化の要請をほぼ満たしている。すなわち、出現確率の高い文字に短い符号を、低い文字に長い符号を割り当て、英文の電送時間を最小にするような符号化（coding system）を採用したのである。文字伝達に複数の回線を使うかわりに記号群を用いるのであるから、伝達に要する時間は増大するが、設備費は節約できる。この点を補償するために、彼は不等長符号の特徴を活かした符号化方式を創案したのである。最適符号化の理論が確立したのは、1948 年の C. E. シャノン著『通信の数学的理論』によってであるから、モールスの先見がいかに卓越したものであったかがわかるであろう。

注2 海底電信は途中で信号増幅を行うことができない。したがって、遠距離通信の場合にはとくにきわめて微弱な電流を検出しなければならない。あまり高電圧で送信すると電線が焼損するからである。英国の W. トムソン（ケルヴィン卿）は微弱信号の検出法を考案して、海底通信の実用化に絶大な貢献をした。しかし、微弱信号の検出には時間がかかるのであり、送信速度は制限されたのである。通信速度と信号強度との相関を理論的に解明したのは、C. E. シャノンである（1948 年）。

情報の変換に関わる技術としてこの時期に登場したものは、自動計算機（1822 年）、写真（38 年）、

電話（76年）、蓄音機（77年）、電球（78～79年）などがある。しかし、これらはすべて19世紀末ないし20世紀（第Ⅲ波動）に入ってから産業化される。

たとえば、C.バベッジ（英）は蒸気力で駆動される「解析機関」を試作したが（1822年）、完成には到らなかった。しかし、彼は自動計算のために数値を記録・読出する仕組みなどを考案し、「自動計算機の父」と呼ばれる。また彼は大量生産の本質を複製（コピー）という概念でとらえるなど興味ある論考を残した。また、電話の発明者A.G.ベル（米）は視・聴覚障害児の教育者であり、教育上の経験から音声を振動として捉え、機械的振動と電氣的振動との相互変換を着想した。音声は記号（文字）よりはるかに多量の情報を含む。なぜなら、それは性別・年齢・音調などの情報を伴うからである。したがって同じ字数でも音声の場合にはより多量の情報を伝達しなければならず、信号の減衰距離（距離の巾乗で効く）に対して弱い。このため電話の普及は、電子信号の増幅が可能になってはじめて可能になったのである。通信技術の最も重大な制約要因は、海底電信の項でも述べたように信号の減衰であった。

T.A.エジソンは多彩な電気機械の発明者である。電話の改良、蓄音機、電球などなど電気技術の基軸となるような技術を多数考案している。蓄音機は音声信号の記録再生であるが、電話と異なり伝達距離が短いために19世紀末には実用化された。電球は直接には電気光のエネルギー変換であるが、白熱電球の研究におけるエジソン効果（熱電子放射）の発見が真空管エレクトロニクスの出発点になったために情報通信技術と深い関係がある。面白いことに、彼自身は交流技術を嫌ったために電力技術では立ち遅れてしまった。

3-4 「成長の限界」論と技術の可能性

産業資本の発展期に古典経済学者たちが、経済的成長の永続性を理論的に疑う視点をもっていたことは、今日の視点から興味深い。1972年にローマ・クラブ報告『成長の限界』22が発表され活発な論議を巻き起こしたとき、「限界」論に反発する人々は、『成長の限界』をネオマルサス主義と呼び、マルサスが予測した行き詰まりが技術進歩——土地生産性・労働生産性——の向上によって突破されたように、将来予測される限界も技術進歩によって克服可能であると考えた。はたしてマルサス的な予測は間違いか。そしてそれを「克服」したのは技術進歩なのか。

マルサスの『人口論』初版は1798年に出版された。この時代において経済における農業の比重は英国においてさえ圧倒的であった。リカードは、工業では収穫逡減法則が必ずしも貫徹せず収穫逡増もありうる、と考えていた。しかし、J.S.ミルは、鉱工業のほうが地下資源（非更新の土地生産物）に依存しているためにいっそう収穫逡減的である、と考えた⁽²³⁾。

実際、消費量1億トンのレベルに達していた19世紀中頃の英国石炭産業は、現実には収穫逡減的な状況にあった。労働条件は工業部門では全般的に改善されつつあったが、炭鉱部門ではきわめて過酷であった。蒸気力による炭鉱の機械化には厳しい限界があり、切羽での労働は人力によるしかなかった⁽²⁴⁾。また技術的に考えても、工業生産はひっきょう石炭エネルギーの変換過程であり、工業が発展すればするほど石炭産業における肉体労働への依存が強まった。「技術」は伝統的・農林業的な収穫逡

減を石炭産業のそれに転換する役割をしていたに過ぎない。工業経済の究極資源が石炭（化石燃料）であることは、ジェヴォンズ『石炭問題』⁽²⁵⁾ で明晰に分析されており、またエントロピー概念を定式化した物理学者のクラウジウスも同様の認識をもっていた⁽²⁶⁾。

農業部門自体の生産力も急速に増大し、飢餓の原因を耕地の絶対的な不足に帰することはできなかった。しかし、その生産力増大は南北アメリカ大陸における農地開拓に大きく依存している。そしてこの生産増大はアメリカ原住民の大量殺戮と土地強奪を代償として達成されたのである。アメリカ農業の発展は、しばしばマルサス理論への反証とされるが、耕地の拡大こそ最大の推進要因であったこと、高い労働生産性は異常に高いエネルギー・肥料消費によって購われていることを考えると、マルサス理論への反証どころかその例証と考えることさえできる。

これらの見方に対して、マルサス理論に呵責ない批判を浴びせたマルクスやエンゲルスは工業文明の将来や技術進歩の可能性を高く評価していた。彼によれば、工業は資本主義のもとでは行き詰まるが、社会関係を変革し社会主義化されたのちには労働生産性を不断に高めていくと考えていた。もちろん、現代の工業活動は、当時に比べて1次エネルギーレベルで100倍、消費サイドでは効率増大を考慮して数百倍の桁に達しており、マルクスが今日の世界をみてなお工業生産力の拡大を鼓吹するとは考えられない。そして、マルクス主義を奉じる共産党支配の国家群——自称「社会主義」または「人民民主主義」国家——は社会関係の変革をなおざりにして工業生産力の拡大を目指し、そしてその目的達成にも挫折しつつある。

補論 技術の定義をめぐって

技術の定義に関しては、技術論者の中で長期の論争があり、これに関するモノグラフも多い。技術の定義に関わる二つの主要な考え方は、唯物論研究会に発する「労働手段」説⁽¹⁾と、武谷三男が唱えた「意識的適用説」⁽²⁷⁾とがある。このほか三木清の「行為の形」説や中井正一の「機能概念」による技術論などは、技術論論争では傍流にとどまったが、今日なお意義をもつと考えられる⁽²⁸⁾。

もちろん、「労働手段」論者も科学技術の研究開発における「意識的適用」の意義を否定するものではなく、ただそのような活動を技術ではなく労働過程に帰属させるのである。たほう、「意識的適用」論者も、技術の「現象形態」における労働手段の重要性を否定するものではない。しかし、それはあくまで労働力・労働手段と並ぶ技術の要因なのである（にすぎない）。

筆者は、近代工業技術を社会的物質代謝における物質・エネルギーの変換体系という総観的な視点から論じるので、技術の本質規定としてはとりあえず佐藤進による定義⁽²⁹⁾をとりたい。彼によれば、「技術は科学的知識のみならず、経験的知識をも包含したところの社会的知識（個人的知識に対して）や生産手段、それ故、人間が歴史的に獲得してきた知識や生産手段を利用して、対象的世界に働きかけ、加工し、人間にとって何らかの有用物をつくりだす人間の実践活動の形式、つまり生産の一定の仕方・方法である」。そして「この場合の実践活動は、社会的知識を利用したものであり、したがって類的形式、抽象的形式にとどまる。具体的形式は、技能として個人的知識なり個人的判断が組み込まれたものであり、人間の具体的実践は、技術と技能の統一として、言いかえれば技術は技能を通じて

のみ顕現される」。なお生産手段は労働対象をも含むが「労働手段の方が圧倒的に比重が大きい」という。(実践活動の形式という佐藤の定義は、三木清の「行為の形」説を想起させる。しかし、後者は生産過程に限定されていない点で「技術」の意味を拡散させるきらいがある。また、戸坂潤の考え⁽³⁰⁾にも近いように思われるが、その異同は別の機会に考えたい。)

第二に、科学技術論で扱われるべき主要な問題群はなにかということがある。ここでは、科学と技術の相関、技術発展と経済体制、技術と環境との関係、技術移転などを挙げ、それと技術の諸定義との関連を試論的に示しておきたい。簡明さのために、過度に単純化しているが、つぎのような対照が可能であろう。

	技術と科学	技術と経済体制	技術と環境破壊
手段説	外因重視的	社会主義性善説的	資本原罪説的
適用説	内因重視的	社会主義同罪説的	技術原罪説的
形式説	外因重視的	社会主義同罪説的	総合的

ただし、この表示は絶対的に内容を示すものではなく、示差的・対照的である。たとえば、「適用」論者における「内因重視」は「手段」論者よりも内因を重視する、という意味であって、外因（たとえば経済的動機）を無視ないし軽視するという意味ではない。技術プロセスによる環境破壊に関して、資本の責任を究明する点で「手段」論は重要な貢献をしてきたが、技術の国際移転などの問題では技術が「労働手段」の枠に収まらないことがクローズアップされているように思われる。

注

- 1) 中村静治『技術論論争史』青木書店(1975).
- 2) 嶋啓『技術論論争』ミネルヴァ書房(1977).
- 3) 中村丈夫『景気波動論』垂紀書房(1978).
- 4) マンデル,E.『資本主義発展の長期波動』岡田光正訳, 柘植書房(1990) p.34
Mandel, Ernest: *Long Waves of Capitalist Development*, Caimbridge U.P. (1980) .
- 5) マンデル、前掲書 51.
- 6) Mensch, Gerhard: *Stalemate in Technology-Innovations Overcome the Depression*, New York (1979) .
- 7) マンデル、前掲書 77.
- 8) アシュトン、T.S.『イギリス産業革命』中川敬一郎訳, 岩波文庫(1973) 71.
- 9) ベック, L. von,『鉄の歴史』Ⅲ(3), 中沢護人訳, たたら書房(1968) 161.
- 10) ベック,前掲『鉄の歴史』Ⅲ(3) 343.
- 11) ダニレフスキー,V.『近代技術史』岡邦雄・枅本セツ訳,三笠書房(1938) 143.
原データは Matchoss, C.: *Die Entwicklung der Dampfmaschine* B. I, S.972.
- 12) マルクス,K. 『資本論』I, 13章, 1節 注99, 新日本出版社(1983) 第3分冊 p 654.
- 13) ディーン, P.『イギリス産業革命分析』石井摩耶子・宮川淑訳(1973) 124.
- 14) 川勝平太『イギリス産業革命とインド——インド木綿の西方伝播』、『最初の工業国家を見る眼』所収, 早稲田大学出版部(1987) 179.

- 15) ヘッドリク, D. R. 『帝国の手先——ヨーロッパ膨張と技術』 原田勝正・多田博一・老川慶喜訳, 日本評論社 (1989).
- 16) ダニレフスキー, 前掲『近代技術史』 28.
- 17) ダニレフスキー, 前掲『近代技術史』 57.
- 18) ランデス, D.S. 『西ヨーロッパ工業史 1』 石原昭雄・富岡庄一訳, みすず書房 (1985).
Landes, D. S.: *The Unbound Prometheus—Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present*, Caimbridge U. P. (1969) .
- 19) ダニレフスキー, 前掲『近代技術史』 355.
- 20) ダニレフスキー, 前掲『近代技術史』 322.
- 21) ヨハンセン, O. 『鉄の歴史』 市川弘勝・鈴木章訳, 興亜書房 (1944) 278.
- 22) メドウズ, D.H. 他『成長の限界』 大来佐武郎監訳, ダイヤモンド社 (1972).
- 23) ミル, J. S. 『経済学原理』 I, 末永茂喜訳, 岩波文庫 (1936) 342.
- 24) 若林洋夫 『イギリス石炭産業の史的分析』 有斐閣 (1985) 147.
- 25) Jevons, W.S. : *The Coal Questions: an Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal Mines*, reprint of the 3rd edn, Augustus Kelly, New York (1965).
- 26) Clausius, L. : *die Energie Vorräthe der Natur und ihre Verwendung zum Nutzen der Menschen* (1888 年講演).
- 27) 武谷三男 「技術論」 『武谷三男著作集』 第 1 巻, 勁草書房 (1968).
- 28) 嶋啓, 前掲『技術論論争史』 60 ff.
- 29) 佐藤進 『科学技術とは何か』 三一書房 (1978) 47.
- 30) 戸坂潤 「インテリゲンチャ論と技術論技術論の再検討を提案する」 『戸坂潤全集』 第 2 巻, 勁草書房 (1966) 386 ff.