

研究論文

労働とエネルギー資源からのエクセルギーの生産性に関する考察

A Consideration on Productivity of Exergy from Labor and Energy Resources

福田 研二*

Kenji Fukuda

(原稿受付日2000年9月29日, 受理日2001年4月11日)

Abstract

An indivisible relation between exergy of labor as well as of the energy resources and the real economics are theoretically shown. In discussions on historical changes of productive activities of human beings from agriculture to industries, the proof of the theory of labor and the existence of upper ceiling on GNP are given. The essential role of exergy in the market economy system in terms of productivity of goods, their exchange are discussed.

1. はじめに

GNP（国民総生産）とエネルギー消費の間には驚く程良い相関があることが知られている。本論文はその理由、ならびに経済の生産活動におけるエクセルギーの役割について理論的に考察したものである。

本論文では、食料や資源からのエクセルギーおよび、労働による機械仕事の経済における役割を主として議論する。ここで、エクセルギーとは熱力学の用語で、熱エネルギーや化学エネルギーなどの「エネルギーの質を、周囲環境を基準として、可逆変化によって得られる仕事を尺度として表わしたものである。従って、仕事＝労働はエクセルギーそのものである。熱力学の第二法則はエクセルギーの和が、可逆変化の場合は保存されるが、一般的には不可逆変化の存在によって減少していくことを述べている。

さて、人間という熱機関にとって、食料（という化学エネルギーのエクセルギー）はその採取に要する労働力以上の労働力をそれを摂取することによって得られるという意味で、労働力（「労働エクセルギー」と称する）の余剰を産む。同様に、エネルギー資源も、燃焼・転換によって、採掘に要するエクセルギー以上のエクセルギーの余剰を産む。いうまでもなく、余剰の存在は交換を旨とする経済において本質的役割を果たす。そしてこれらのエクセルギーの余剰は物理的に存在するために、実体経済を反映すると考えられる。本論文では、人類の経済的歴史におけるエクセルギーの役割を鳥瞰しながら、この結論を導いていくことにする。

本論文は5章からなる。第2章では、食料から得られるエクセルギーとそれを摂取して得られる労働エクセルギーの関係、食料から労働エクセルギーの余剰が発生することを述べる。第3章では、農業部門で産まれた労働エクセルギーの余剰を利用することによって、工業部門が発生すること、工業製品を食料と交換する際、同じ労働時間で生産される製品は等価で交換される、いわゆる労働価値説が成立すること等を示す。第4章では、エネルギー資源からのエクセルギーも労働エクセルギーも経済の生産現場では区別できないこと、それらが同時に生産活動に投入される場合も労働価値説が成立すること、そのときのGNPと生産性の関係、さらにその生産関数が労働と資源からのエクセルギーの関数として表現されること等を示す。

これらによって、従来の経済学においては原材料（中間投入財）程度にしか扱ってこられなかったエネルギーの、いわば経済における極めて重要な役割を明らかにする。

2. 食料によるエクセルギーの余剰

食料は人間という熱機関にとって、「エクセルギーの余剰」 ΔE を産みだす。すなわち、人は食料を摂取することによって、食料を採取するために必要な労働力（エクセルギー）以上の労働力を得ることができる。一見、一定のエクセルギーの投入によって、これよりも大きなエクセルギーを得ることは熱力学の原理に反している。しかし、これが見かけ上できるのは、太陽エネルギーが植物を育て差額 ΔE を補填しているためである。農業における労働の生産性、市場経済の開始、労働の価値について考察する。

2.1 狩猟、採集生活から農業へ

原初的には、食料の獲得は狩猟や採集が主であった。農業の発生前夜、約一万年前には人口は約400万人であった

*九州大学工学研究科環境システム科学研究センター教授
〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

が、集約的な農業生産が始まり、同時に人口が急増加を始め紀元前後には1億人を突破した¹⁾。比較的豊かであったと考えられる狩猟、採集生活から、何故、労働強化を伴う農業への転換が起こったのかという疑問に対し、ポンティンは、自然の生態系において食物連鎖の頂点として存在が許された人類の人口が飽和に達し、人口密度が高い地域では、条件の悪い土地に住み着くことを余儀なくされた、いわば人口増加の圧力が農業の起源となったと述べている¹⁾。

農業は、狩猟・採集よりも労働量は多いものの、食物生産の労働生産性、即ちエクセルギー増倍率

$$K_F = E_L/E_F \dots\dots\dots (1)$$

が高いという大きなメリットがある (E_L : 食物から得られるエクセルギー, E_F : 食物生産に投入するエクセルギー)。この K_F 値 (普通は分母, 分子ともにエネルギーで計算している) について, 農業経済学や経済人類学と呼ばれる学問分野の多くの研究者達が数値を与えている。例えば, アマゾンに住む原住民マチゲンガ族について行われた調査結果によれば, 菜園労働で17, 漁労で1.4, 森林食物は0.8, カラハリのサン族の場合, 年820時間働いて一人当たり115万カロリー収穫したのに対し, 雲南省農民は1,129時間働いて906万カロリー産出したということである²⁾。これらの数値は, いわば, 労働強化を代償として労働の生産性 K_F が高まったことを意味している。ここでは, 労働の生産性 K_F に着目したい。

$$K_F = 1 + \Delta E/E_F \dots\dots\dots (2)$$

なので, K_F が1よりも大きいほどエクセルギーの余剰 ΔE が大きくなる ($\Delta E = E_L - E_F$)。

明らかに $\Delta E > 0$ であれば, すなわち, 食料採取のために投入するエクセルギーよりも, それを摂取して得られるエクセルギーの方が大きければ, 人はただ食料を採取するばかりでなく, 人口を拡大し, またその他の生産活動もあわせて行う労働力の余剰を持つことができる。定住生活の開始によって増えた道具や, 家, 調理器具, 家事用具, 衣服等の需要に応える形で, ΔE を利用してこれらを生産し, 製品を交換すること, すなわち市場経済が発生したと考えられる。

2.2 原初的労働の価値

分業が始まった初期は, 調理や農耕機具, 織物, 陶器などの手工業製品, 食料, 家畜などが交換されたであろう。原初的には, それらの価値は, A・スミスが明らかにしたように, 生産のために要する労働時間で測られたと考えられる。一時間で捕れる鹿と, 二時間で捕れるビーバーとが等価で交換されるならば, 鹿の方が魅力的だと思うだろう³⁾。

人が生存するために一日に食料から摂取するエクセルギーを F (食物J/人・日), 扶養人口を N (人), 食物生産者数を m_F (人), 食物生産者が食物生産のために一日に投入する労働時間を t_F (h/日), 食物生産者の単位時間あたり投入する労働エクセルギーを r_F (労働J/人・h), 投入労働エクセルギーあたり, 生産した食物の食物エクセルギー, すなわち食物生産の労働生産性を K_F (食物J/労働J) とすれば, 社会が一日あたり生産し, 摂取する食物エクセルギー FN (食物J/日) は

$$F = K_F \alpha_F t_F r_F \dots\dots\dots (3) \\ \alpha_F = m_F/N$$

で表される。ここで, 食物から得られるエクセルギーは成長や睡眠, 体温の維持など, 一見, 労働とは無関係に消費される部分がある。生産活動に投入される労働との関係を特定していないため, ここでは労働と食物のエクセルギーとを区別している。さて, (3) 式を通して, 右辺の食物生産のために投入される全労働エクセルギー $m_F t_F r_F$ (労働J/日) と, 左辺の, 全人口が一日に必要とする食物のエクセルギー FN (食物J/日) とが結びついている。そして, ここで, 人が一日働くことによって, 少なくとも一日以上の糧を得る ($K_F > 1$) ことによって, 初めてエクセルギー価値の余剰が発生するという条件を課すことにする。すなわち,

$$F = t_F r_F \dots\dots\dots (4)$$

これは, 人を, 食料という資源を消費して労働という仕事をする熱力学的熱機関として取り扱う際に, 食料摂取→労働への変換において無駄がないいわば理想的な熱機関とすることに相当している。これによって, 労働エクセルギー (労働J) と食物エクセルギー (食物J) とを等置することができ, 議論は極めて簡単化できる。

3. 農業と工業における労働の生産性とGNP

農業によって移動から定住生活へと生活様式が変化した, 同時に経済的状況も劇的に変化したと考えられる。すなわち, 定住するようになって, 移動性確保のために保有が制限されていた生活物資の量が格段に増え, また, 農業の方が狩猟・採集よりも余剰 ΔE が大きいので労働力の余裕も増えた。さらに, 食料以外の物資の量と種類の需要が増すにつれて, 分業が進み, 市場における交換=市場経済の基本的仕組みが誕生した。食料といういわば絶対的な必需品 (故に価値尺度として採用される) とは異なる工業製品の交換価値, その生産と交換について議論する。

3.1 均衡状態における農業と工業における労働生産性

今, 食物生産 (以降, 農業で代表させる) と食物以外の

製品を製作する工業の二経済主体を考える。

一日、一人当たりの工業製品需要を G' (個/人・日)、その食料換算の価格を p_G (食物J/個)、労働の量的生産性を κ_G' (個/労働J)、工業就労者数を m_G 、工業における労働時間を t_G (h/日) とすると次式が成立する。

$$p_G G' = p_G \kappa_G' \alpha_{GtGrG} \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha_{GtGrG} = m_G / N$$

α_{GtGrG} は製品に投入する労働エクセルギー量である。また、 $G = p_G G'$ (食物J/人・日) は食物と交換しても良いと考える、いわば絶対尺度としての食物によって換算された、単位労働による生産物の交換価値、あるいは等価交換される食物エクセルギー量である。(3) 式と組み合わせると次式を得る。

$$G'/F = g' = \dots\dots\dots (6)$$

$$(\kappa_G' / \kappa_F) (\alpha_G / \alpha_F) (t_{GrG} / t_{FrF})$$

ここで、 α_F や α_G はそれぞれの扶養家族などを含み、 $\alpha_F + \alpha_G = 1$ とする。さて、同じ生産量で、農業と工業就労者ともに、各余剰生産物の交換によって食料と工業製品を等しく入手できるための条件は

$$G' p_G \alpha_F = F \alpha_G : \text{交換条件} \dots\dots\dots (7)$$

である。(7) 式は、生産された工業製品 $G'N$ の内、 $G'm_G$ は工業就労者自身が消費し、 $G'p_G m_F$ の売り上げによって工業就労者が必要とする食料 Fm_G を購入するという条件になっている。以降、 $r_G = r_F = r$ 、 $t_G = t_F = t$ とする。(3)、(6)、(7) 式より、

$$\kappa_G = \kappa_F = \kappa \dots\dots\dots (8)$$

$$\kappa_G = p_G \kappa_G' \dots\dots\dots (9)$$

$$Y = F + G = \kappa_F L ; \quad L = rt \dots\dots\dots (10)$$

$$G = G' p_G$$

$$G' = \kappa_G' \Delta L \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta L = L - F / \kappa_F = F (1 - 1 / \kappa_F)$$

$$\kappa_F = 1 / \alpha_F \sim 1 / \tilde{E} ; \quad \tilde{E} \sim \text{エンゲル係数} \dots\dots\dots (12)$$

を得る。ここで、 κ_G は、単位労働エクセルギーの投入によって生産される製品と等価交換される食物エクセルギーを表しており、単位労働によって生産される製品の(食物換算の)交換価値とすることができる。

さて、 ΔL は食料を摂取することによって得られるエクセルギーから、食料を採取するために要するエクセルギーを差し引いた正味の労働エクセルギーの余剰であり、これに労働の量的生産性を乗じたものが、食料以外に生産できる製品量 G' となる((11) 式)。また、 $1 / \kappa$ は全生産物の交換価値 $Y = G + F$ に対する食料 F の比率であるからエンゲ

ル係数 $\tilde{E}$ を表している。

以上の方程式群からいくつかの重要な内容を引き出すことができる。まず、(8) 式から、同一量の労働投入によって生産される製品は等価交換される。すなわちK.マルクス⁴⁾によって述べられた「労働価値説」が証明される。また(10) 式は、労働によって最大限生産することができる生産物の食料換算の価値の上限、即ちGNPの上限値が、食料生産の生産性 $\times$ 食費 $\kappa_F L = \kappa_F F$ で与えられることを意味している。あるいは、(11) 式から、享受することができる工業製品量は、労働エクセルギーの余剰 ΔL に、量的生産性 κ_G' を乗じた値に限られる。なお、この関係は、経済主体が何体あっても同様になりたつことを容易に示すことができる。

$$\kappa_G = \kappa_H = , , = \kappa_F \dots\dots\dots (13)$$

$$Y = F + G + H + , , = \kappa_F L \dots\dots\dots (14)$$

結局、本論文では価値の普遍尺度として労働 (= 食物) エクセルギーを採用することを提案している。これは、スミスやマルクスによる価値の尺度としての「労働」、リカード⁵⁾による「穀物」を一般化し定式化した概念になっている。なお、「労働価値」は、その語感から「労働の交換価値」、すなわち単位労働によって生産される食物エクセルギーの交換価値 κ_F を指すこととするのが最も混乱が少ないと思われる。このように定義すれば、(8) 式は、単位労働によって生産される製品の交換価値は労働価値と等しいということを表している。

3.2 農業における労働の生産性

κ_F は、工業製品生産における労働の量的生産性 κ_G' とは異なり、労働量やその強度、道具、機械、肥料、投入エネルギーとともに、特に自然環境に大きく影響されている。すなわち、労働の対象が工業製品とは違って見かけ上明確ではなく、土であったり水であったりする。種を蒔くときの労力はそれほど大きくはなく、むしろ、自然の営みを補助する仕事に近い。必ずしも、最大限の常時的ハードワークによって収穫が増えるわけではなく、気候や天気の状態とのタイミングがむしろ重要である。しかし、それにもかかわらず、ある集団を維持するために必要な食料を得るために働く以上に、なおも余る余剰労働力は、まさしく、食料以外にその集団が享受することができる製品を生産する労働力であるということは疑いようがない。

人口が増え、土地の限界生産性が低下したり、耕地を増すとしても痩せた土地を利用するようになったり、あるいは食料調達のために遠方まで遠征したりして多大な労力がかかるようになる(いわゆる収穫逡減)と κ_F は1に近くなっていくだろう。そして、ついには、 $\kappa_F \sim 1$ では、ひたすら休まず、ただ食べるためだけに働く状態となってい

る。こうなると、当然種は維持できない。従って $\kappa_F > 1$ は人が種を維持して、経済活動を行うための必要最低限の条件であるといえる。

近世における κ_F は (12) 式を用いて α_F からおよその値を知ることができる。1900年で1.6⁶⁾、さらに、1840年代の長州藩では、農業部門と非農業部門の最終消費は、それぞれ銀5万7千貫、4万4千貫であった⁷⁾ ことから $\kappa_F = 1.7$ と見積もることができる。

3.3 労働生産性の格差と貧富差の発生

農業における農耕牛馬の利用は、経済学的にはある重要な変化を意味すると考えられる。狩猟・採集を主とする集団内には所有の概念はなく、収穫は必要に応じて全員に分け与えられた¹⁾。しかし、農業とともに分業が進み、所有の概念が発生し、ある者Aが、牛馬という他の労働力を利用して、自らの労働生産性を上げることに成功したとする。農業や家畜の利用においては、まだ誰にも行き亘る太陽エネルギーの恩恵による動植物の利用であったが、農耕における牛馬の利用は、一部の者Aの「自らの労働力とカウントできる労働力の拡張」に他ならない。Aの労働力は見かけ上 $k (> 1)$ 倍に増倍する。つまり、同じ時間だけ労働しても、Aは、牛馬を所有しない者と比べて生産量が多くなる。この時、Aに帰属する生産物の生産において投入される労働エクセルギーは、A自身のそれと、牛馬のその和である。後者が表面上カウントされないことによって、農民間で見かけ上の生産性 κ に差が生じる。牛馬の利用は、ある意味では単位時間当たりの実質的投入労働量の増大＝労働の強化であるが、Aから見れば労働生産性の向上になっている。製品価格の区別はないのだから生産量に比例した収入がある。かくて、農民Aは他よりも多くの収入を得、先んじて資本を形成することができる。また、農業生産物の需要が一定であれば、一部の農民は余剰労働力となる。

3.4 農業から工業への過渡的過程

農業において、労働生産性が向上するにつれて余剰労働力が発生する。しかし、新たに工業が発生し、経済成長を牽引するためには、単に余剰労働力の存在だけが必要条件ではないと考えられる。

工業製品の量的需要がその生産量よりも上回る初期の過渡的段階を考える。すなわち、 G' ((5) 式) は一人当たりの平均需要であり、これは実際の一人当たりの需要 G'' (例えば洗濯機一台) より小さい。従って、構成員のすべてが G' を購入するのではなく、一部の裕福な農民が G'' を購入する。この状況が成立するためには、すでに農民の所得差があり裕福な層が存在するか、あるいは資本の蓄積がある程度進んでいることが必要である。

さらに、この段階においては需要が供給を上回るため、

生産者はその製品価格 p_G を高く設定し $\kappa_G / \kappa_F > 1$ とすることができる。しかし、そのためには、その製品が社会に適合しており、人々にとって魅力があり、高く評価される必要がある (電気がなければ洗濯機は無用の長物である)。また、この逆は工業就労者の一部が食料を得られないことであるから、初期にはあり得ないことである。つまり、 $\kappa_G / \kappa_F > 1$ は工業が新規産業として成立する条件になっている。

従って、初期には工業の方が、農業よりも一人当たりの所得は大きい。工業では資本の形成が容易に進み、農民には飢餓感が続く。さらに、製品生産量 G' が増えるにつれ、 F の需要は変わらないので g' 比が増えなければならない。すなわち、工業において、労働の強化、 t_G の増大、あるいは農業から工業への人口移動が起こる。

しかし、製品生産量 G' が G'' に達し、需要が飽和した状況で κ_G がさらに増せば、今度は労働量 $\alpha_{G'G''}$ が過剰になる。雇用主は雇用者の数を減らそうとする動機を持つ。余剰になった労働は再び新規産業を求めなければならない。また、初め高く設定できた工業製品価格は低下し $\kappa_G = \kappa_F$ に漸近する。これは、製品需要が頭打ちになるにつれて競争が激化し、価格低減競争が始まるためである。

4. 生産過程におけるエネルギーの利用

食料と同様に、エネルギー資源は、燃焼・転換によって、採掘に要するエクセルギー以上のエクセルギーの余剰 ΔE を発生する。ここでも余剰を産む力があることは、エネルギー資源も価値の生産機能としての資格を持つことを意味している。資源からのエクセルギーの生産活動における労働との関係、GNPや生産関数について論じる。

4.1 エネルギーの交換価値の分配

エネルギー資源によるエクセルギーは、それ自身交換価値を持つ製品としても売買されるから、エネルギー資源は採掘・燃焼・転換のプロセスによって少なくとも $e\Delta E$ だけの交換価値の余剰を産み出す (e : エネルギー単価 (食物J/資源J))。 $e\Delta E$ がどのように分配されるか見てみよう。エネルギー (資源によるエクセルギー) として電力を考え、1 kgの資源から Z (資源J/kg) の電力を取り出すことができるでしょう。また、採掘業者、精製業者、ならびに電力事業者からなる社会において生産、消費活動がエネルギーのみである場合を考える。採掘業者は、燃料資源1kgを採掘するために要したエネルギー X (資源J/kg) のコスト eX に利益 Δ_1 を上乗せた価格 $C_1 = eX + \Delta_1$ で精製業者に資源を販売する。次に、精製業者はその原料の値段 C_1 に燃料1 kgを精製するために要したエネルギー Y のコスト eY 、ならびに利益 Δ_2 を上乗せた $C_2 = C_1 + eY + \Delta_2$ で電力事業者に資源を販売する。最後に、電力事業者は正味発生した電力

ZをeZで販売して、 $\Delta_3 = eZ - C_2$ なる利益を得る。全体の利益は $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = e\Delta E$ 、 $\Delta E = Z - X - Y$ (>0)であるので、結局、燃料から発生するエクセルギー価値の余剰 ΔE は、そのまま交換価値の余剰 ΔV に転換され、すべての社会構成員に分配される。ここで、人の特殊な機能として、エネルギー資源から得られる余剰の交換価値 $e\Delta E$ をより大きい交換価値に転ずることが4.4節で述べられる。

4.2 労働エクセルギーと熱力学的エクセルギーの関係

他のエネルギー源を利用する形態は、工業においては、人力を単なる動力として使う奴隷制や、限りなく人を単純労働に使うベルトコンベア式労働集約型工業としてまず現れた。これらは、他者の労働力を利用すること＝実質的労働の強化によって、その主人や資本家の労働生産性をあげている。

A・スミスはピン製造業を例³⁾にとって、分業が生産性を上げる大きな要因であると述べている。人海戦術における分業においては、人はまさに食料で動く熱機関＝機械であり、人の労働力は単なる熱力学的エクセルギーそのものである。分業においては、生産と直接結びつかない無駄な動きを排除することができ、また生産と結びつく要素的労働行為において、投入するエクセルギーの強度も増すことができる。ここでは、労働の強化やその利用効率が向上した結果、量的生産性 κ_e が上がる。

これは道具を使う場合も同様である。道具を使う瞬間には投入エクセルギーは大きく、かつ生産に集中している。例えば槌子、鋸、ハンマー、弓、. . . どのような道具を使って、一定の機械仕事を、道具の特定の部分で発揮させようとしても、その仕事はその元となるエクセルギーを変換したものであり、それを越えることはできない。結局、労働の各瞬間の時間的経緯を追えば、労働エクセルギーは熱力学的エクセルギーそのものである。

本格的機械工業に至る前の初期の工業化においては、分業や道具の使用による生産性の向上がGNP増加の主な原動力になっていると考えられる。

4.3 工業における労働の生産性の意味

工業において、人が、機械を導入し、動力源としてエネルギー資源からのエクセルギーを利用するようになって、農耕における牛馬の場合と同様に、経済的恩恵を享受するのは人間だけである。上の議論から、資源からのエクセルギーを利用することは、結局、全体の労働の強化を自らの生産性の向上とする一形態であることが理解される。換言すれば、他者のエクセルギーを利用することは自らの労働力を増強することであり、その意味で資本は生産手段たる道具の拡張になっている。人は、生産活動において、(労働力＋道具)という組み合わせから(エクセルギー＋

機械)という組み合わせを開発し、生産性を増強したのである。

ところで、工業部門は、農業部門が生産した真の価値＝労働エクセルギーの余剰を消費し、交換価値を生産する部門であり、製品は最大限ニーズにうまく応えて高く売る＝食物と交換する部門になっている。すなわち、工業部門の価値は需要に応じて始めて消費者によって評価され、その総量は農業部門で生産した以上を越えることはできない。勿論、分業や道具、機械という手段によって「量的生産性」を増加させることができる。しかし、結局は労働価値説の基本原則が働き、同じ労働時間で生産された製品は、工業製品も農業製品も等しく交換される((8)式)。

4.4 労働と資源のエクセルギーの併投入による生産

結局、熱力学的(＝資源の)エクセルギーと労働エクセルギーは、交換現場では区別する必要があるが、生産現場では区別する必要がない。従って、生産過程においては、それらの量的生産性 κ' と γ' を個別に導入し、両者の寄与を足し合わせれば良い。

$$p_j K_j' = K_F \dots \dots \dots (15)$$

$$Y = \sum_j G_j = K_F L = \kappa_{aF} L + \gamma_{aF} E \dots \dots \dots (16)$$

$$\alpha_j = G_j / Y \dots \dots \dots (17)$$

を得る。ここで、Eは一人当たり投入した資源からのエクセルギー、 α_j はj産業の就労人口比、 K_j' はエネルギー資源を利用した場合の量的生産性である。なお、ここでは簡単のため、エネルギー資源の価格はゼロに近いとしている⁸⁾。従って、総生産額は $K_F L$ で、エネルギー資源を使うことによって λ 倍に増加している。

$$\lambda = K_F / \kappa_F \dots \dots \dots (18)$$

$$= \kappa_{aF} / \kappa_F + \gamma_{aF} E / \kappa_F L$$

$$E = E_T' * \eta * \theta \dots \dots \dots (19)$$

E_T' ：全一次エネルギー消費量； η ：機械の熱効率

θ ：消費エネルギーのうち産業部門への投入割合

ところで、工業部門において労働の量的生産性を向上するためには、無駄な運動を除去すること、各運動におけるインパクトを強める二方法が考えられる。後者は労働を強化することであるが、ある程度の時間持続できる労働の強さはそれほど大きくはなく前者の効果の方が大きい。また、ここでは、全人口をいずれかの部門の労働者としてカウントしているので、議論はむしろ平均的なものである。人の基礎代謝量は凡そ100W、また生体の持続できる熱効率は18%と見積もられるので、 $L \sim 20W/人$ とする。一方、資源のエクセルギーについては、生産をすべて機械によって行うようにしたとしても、エネルギーからエクセルギー＝機械仕事への転換効率を考慮しなければならない。1980年

の一人当たりの一次エネルギー消費量は4.7kW, このうち約55%が産業部門で使われる⁷⁾ので, $E=4.7*0.55*\eta\sim 780W$ ($\eta\sim 0.3$ と仮定), 従って $E/L\sim 40$ と見積もる. よって, エネルギーを消費して生産活動をすることによって,

$$\lambda \sim K_{aF}/K_F + 40 \gamma_{aF}/K_F \dots\dots\dots (20)$$

倍程度の総生産量を増加させるということができる.

なお, ここで製品に「体化」したエクセルギーを求めるためには, 投入したエクセルギーからさらに機械や労働の余分な動き, 付属機械の運転, 物の移動や照明などを差し引き, 原材料分子に熱力学的仕事として作用し, 物質変化や運動を引き起こすエクセルギーを求めなければならない. しかし, ここでは, 労働の場合も同様, 投入した全エクセルギーを用い, これと体化したエクセルギーとの比を量的生産性に集約させているのである.

4.5 GNP, エネルギー弾性値, 生産関数

K_{aF} は, 結局, 絶対的数値が与えられる食料生産のそれを考えれば良い. 現在の食料生産の生産性 K_F はエネルギーの大量消費時代以前のそれとほぼ等しいとして, $K_{aF}\sim K_F\sim 1.6$ (1900年)程度と見積もられる.

また, γ_{aF} も, 結局, 食料生産についてのそれを考えれば良いが, 土地や気候条件, 牛馬, 施肥や機械エネルギーの投入によって異なる値をとる. 宇田川は, 1970年の水稻生産における投入エネルギーに対する産出エネルギーの比を0.38と見積もっている¹⁰⁾. ここで, γ_{aF} を求めるためには, 分母 (投入エネルギー) も分子 (産出エネルギー) もエクセルギーに直す必要がある. 分子については, 水稻のエクセルギーは, これを摂取して得られる仕事であるから, 効率0.2をかける必要がある. 分母については, 人の労働力を差し引き, また機械の動力や肥料生産におけるエネルギー消費量には効率をかける必要があるが, 大略0.2程度と見る. 従って, $\gamma_{aF}\sim 0.4$ である. 結局, 次の値を想定する.

$$K_{aF}\sim 1.6, \gamma_{aF}\sim 0.4 \dots\dots\dots (21)$$

1900年には一人当たり実質GNPは\$810, 1979年には\$8800と11倍になっている^{11, 12)}. この間, 大幅なエクセルギーの消費が行われたと考えられるので, $\lambda\sim 11$ はエクセルギー消費による総生産の増加と考えることができる. これと, 上述の (20) 式と対比させると $\gamma_{aF}\sim 0.4$ を得, ほぼ (21) の見積もりと一致する. (18), (21) 式から,

$$Y = K_{aF}L + \gamma_{aF}E \dots\dots\dots (22) \\ \sim 1.6L + 0.4E$$

とおくことができる. これより

$$(1-a)\Phi + a\Psi = 1 \dots\dots\dots (23)$$

$$\Phi = \phi + \xi; \Psi = \psi + \zeta + \sigma; \dots\dots\dots (24)$$

$$a = \gamma_{aF}E/Y, E = \eta E'$$

$\phi = (\Delta L/L)/(\Delta Y/Y)$: 労働力の対GNP弾性値

$\psi = (\Delta E'/E')/(\Delta Y/Y)$: エネルギー消費の対GNP弾性値

$\zeta = (\Delta \eta/\eta)/(\Delta Y/Y)$: 効率の対GNP弾性値

$\xi = (\Delta K_{aF}/K_{aF})/(\Delta Y/Y)$

$\sigma = (\Delta \gamma_{aF}/\gamma_{aF})/(\Delta Y/Y)$

を得る. これから, ψ は, 就労人口の増加率 ϕ , 労働生産性の増加率 ξ , (石油危機直後の我が国のように) エネルギー利用効率の増加率 ζ , σ が大きいときは1よりも小さくなり得ることなどがわかる.

我が国の明治以降の工業化時代には, 日露戦争 (1904), 第一次世界大戦 (1914), 反動恐慌, 金融恐慌 (1927) など種々の大きな社会・経済的変動を経験しているが, おおむね (恐慌期を除いて) $\Delta Y/Y\sim 3\%/年$, $\psi\sim 1.5$ 前後で推移している¹²⁾. 戦後, ψ はいったん減少し1以下になったが, 所得倍増計画 (1950) 以降, ψ は1を再び越えた. 1960年から石油危機直前1970年までの間 ψ は1.21と, 戦前と比べて鈍化した, 年率 $\Delta Y/Y\sim 10\%$ の高い経済成長を達成した. この間製造業における効率改善努力がなされており, 例えば粗鋼生産における消費エネルギー原単位は電力 (kWh/t) で2.1%/年の割合で低下し, 重油では10年の間に10分の1以下になっている. また, 製造業におけるエネルギー消費原単位は年率0.76%/年で低下¹⁰⁾するなど, 継続的省エネルギー努力が低い ψ の実現を説明すると考えられる. その後, 二度にわたる石油危機 (1973, 1978) の後, 1990年まで, $\Delta Y/Y$ は年率4%前後の成長を遂げたにもかかわらず, ψ は1を大きく割り込む (0.1~0.7) こ

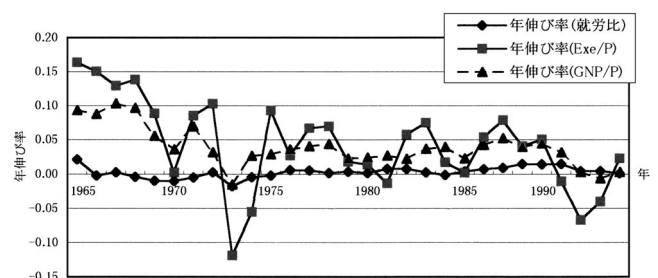


図1 就労比, エクセルギー, GNPの年伸び率

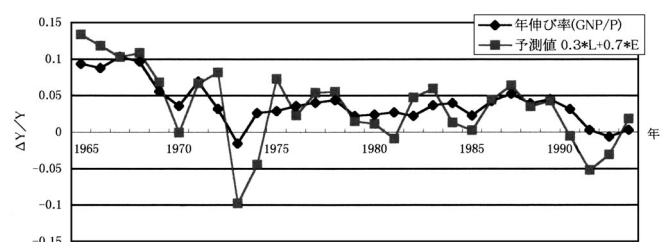


図2 一人当たりGNPの伸び率

ととなった。この時も、1973～1990年の間、単位量生産あたりのエネルギー消費原単位が製造業平均で47%も低下するなど¹²⁾、特に、産業部門における効率改善を柱とする省エネルギー努力によってこの低い ψ を達成していることは明らかであろう。

(24)式を用いて、産業部門のエネルギー消費量、生産指数あたりのエネルギー消費原単位、就労者人口のデータ等から ψ ならびに ϕ を評価することによって、経済成長率 $\Delta Y/Y$ を逆算することができる。比較的良く整備されている1965年以降のデータ¹²⁾ (図1)を用いて計算した結果を図2に示す。ここで a は期間中の平均値として0.7を仮定した。石油危機、バブル、その崩壊という大きな経済変動にもかかわらず、(22)式は実測値をよく再現することができている。

なお、(22)あるいは(23)式は生産関数の一表現になっている。コブ・ダグラス型生産関数と比べ、資本の代わりにエクセルギーが置き換えられた形になっているが、4.3で述べた対比から矛盾とは言えないであろう。また、短期的には両生産関数は一致する。すなわち、 $\Delta Y/Y = \Delta(\ln Y)$ などと置き換え、 a 、 ξ 、 ζ 、 σ を一定値として(23)式を積分すると、コブ・ダグラス型生産関数の表現

$$Y = AE^a L^{(1-a)} \dots\dots\dots (25)$$

$$= (A \eta^a) E^a L^{(1-a)}$$

を得る。ここでは、技術革新と説明されてきた因子がエクセルギーの利用効率や生産性の向上、 A (ξ 、 ζ 、 σ) η^a と明快な根拠を持つ形で表現されている。

5. 結言

日常の経済や政治世界においてエネルギーの役割は良く認識されているにもかかわらず、経済学ではエネルギーは単なる原材料＝中間投入財としか扱われておらず、労働や資本の役割ほどに本質的検討はなされていないのが現状である。しかし、生産活動における労働とエネルギーの熱力学的差異が認められず、その生産物の交換がすなわち経済であるという事実を直視すれば、エネルギーには、経済学において、従来以上に重要な地位が与えられなければならないことは明らかである。いずれにせよ、3Eと称せられる地球規模の問題群に取り組むためには、比較的不明であったエネルギーと経済との関係は、今後より一層明らかにされていかなければならないだろう。

参考文献

- 1) C. ポインティング, 緑の世界史, 朝日選書
- 2) 山内ひさし, 経済人類学への招待, ちくま書房
- 3) A. スミス, 諸国民の富, 岩波文庫
- 4) K. マルクス, 賃労働と資本, 国民文庫, 大月書店
- 5) 経済学辞典, 第3版, 穀物比率論, 457頁
- 6) 荏開津典生: 農業経済学, 岩波書店
- 7) 岡崎哲二: 江戸の市場経済, 講談社選書メチエ
- 8) 福田研二: エクセルギーと経済の関係に関する考察(その2), エネルギー資源学会19回研究発表会講演論文集, 163-168, 2000
- 9) C. チボラ, 経済発展と世界人口, ミネルバ書房
- 10) 宇田川武俊, 環境情報科学, 5 (2), 1976, 73-79
- 11) 岡崎哲二: 工業化の軌跡, 読売新聞社
- 12) エネルギー経済統計要覧 (EDMC96), 日本エネルギー経済研究所

協賛行事ごあんない

金属学会分科会

「自動車用材料の高温特性研究の最先端」

開催日時: 2001年12月7日(金) 9:50~16:30

開催場所: 川崎製鉄(株)東京本社30階A会議室

予約申込締切日: 2001年11月26日(月)着信

申込・問合せ先: 〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 (社)日本金属学会

TEL022-223-3685 FAX022-223-6312 E-mail:symposium@jim.or.jp