九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

持続的社会のための農業の再評価

中村，修
九州大学農学部農政学教室

栗山，純
九州大学農学部農政学教室

https://doi.org/10.15017/23518

出版情報：九州大學農學部學藝雜誌. 48 (3/4), pp.195-210, 1994-03. 九州大學農學部
バージョン：
権利関係：

九大農学芸誌 (Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.)
第48巻 第3・4号 195-210 (1994)

持続的社会のための農業の再評価

中村 修・栗山 純
九州大学農学部農政学教室
(1994年1月13日受理)

Evaluation of Agriculture for the Sustainable Economy

Osamu NAKAMURA and Jun KURIYAMA
Seminar of Agricultural Policy, Faculty of Agriculture,
Kyushu University 46-07, Fukuoka 812

はじめに

われわれが経済的に「生産」だとみなしていることを注意深く観察すれば，それが単なる地球の資源の「加工」にすぎないで物質的・エネルギー的には何も生みださず「消費」しかしていないことに容易に気づくことができる．

例えば，多くの工業生産の場合，また近代化された農業の場合，そこでは経済的な価値は増加し「生産」されているのだが，その経済的「生産」のために自然のストック（資源，化石燃料）が消費されている，という奇妙な現象が起こっている．

「奇妙な」というのは，我々は自然を消費しているにもかかわらず，それを生産という言葉で表現しているからだ．

我々が親の莫大な遺産を引き継いだと仮定する．その遺産はいくら莫大でも限界があるから，使えば使うほど減少していくだろう．それゆえ，その遺産を引き継いだ我々は，その遺産を消費することを，けっして生産などとは言わない．

ところが，この遺産が地球規模の石油や資源になると，我々は，石油や資源を消費して商品に加工することを生産と呼ぶようになる．

自然を消費しているにもかかわらず，それを経済的には生産と認識しているのだ．

しかし，自然消費の上に立つ経済的生産が長い将来にわたって持続することは不可能である．ましてや，有限な自然を消費して経済が無限に拡大することもない．

そこで本稿では，経済的には生産と評価されるが，物的・エネルギー的には消費しかしていないという逆転した現状について，農業，および工業について論じる．

さらに，工業社会を支えた熱力学の視点から，自然の消費を生産と評価する経済学について分析を加え，持続的な経済社会とは，農業の生産を基礎にした社会ではないかという提案をおこなう．

I 農業におけるエネルギー収支

I－1 生態系のエネルギーフロー

○生態系のエネルギーフロー

46億年前に地球が誕生し，35億年まえに地球上に生物が誕生した．人類が誕生したのは，地球の歴史からいえばほんのわずかの500万年まえである．そして，現在に至る人類の500万年の歴史の大半，人類は採集・狩猟によって生きてきた．

農業の歴史はわずか1万年であり，工業の歴史はわずか数百年である．

生物が35億年まえに誕生してから現在まで，生物活動のエネルギーは太陽に依存してきた．太陽から地球に達するエネルギーは年間17万8千テラワット（TW）であり，それは現在の人類が消費するエネルギー（化石燃料など）の1万5千倍である．この巨大な太陽エネルギーがあってはじめて，35億年にわたる生物の生存が可能であった．

生物社会（ここでは生態系とよぶ）では，緑食植物を食べて生活している植食動物，それを食べる肉食動物といった食物のつながり（食物連鎖）がある．この食物連鎖の出発点が植物による太陽エネルギーの固定である．

食物に照射された太陽の光エネルギーの約80%は植物に吸収される．吸収された光エネルギーの大部分は熱エネルギーとして葉から失われるが，ごく一部が化学エネルギーとして光合成に使われ，植物の体内に固定される．なお，本稿でエネルギーの生産という場合，植物による太陽エネルギーの固定を指す．

生物学では，植物のおこなう生産を第一次生産という．また，植物を食べた動物が体内に有機物をつくりだすことを第二次生産という．一般には，植物を生産者，動物と消費者とし，さらに植物や動物の遺体を分解するとでエネルギーを得ている生物がおり，それを分解者という．

実際の生態系のエネルギーは，単純な一つの流れではなく，複雑な網の目のような流れである．しかし，植物による太陽エネルギーの固定が，すべての生物活動の原動力であることはまちがいない．

ちなみに，生態系における生産，消費という概念は生物学特有のものではなく，経済学から借用した概念である．

しかし，経済社会では消費行為だけおこなう消費者という存在があるが，生物社会では消費だけおこなうような生物はいない．例えば，つい最近まで人間は植物や小動物の消費者であったが，同時に虎やライオンなどに食べられる生産者的存在でもあった．立場が変われば，すべての生物が生産者であり，同時に消費者である．生態系での生産，消費という概念は，あくまで便宜的な関係を示す言葉でしかない．

○採集・狩猟生活のエネルギー収支

ここでは，500万年の人類の歴史を支えた採集・狩猟生活でのエネルギー収支をみてみる．

採集・狩猟生活は過酷なものであるという印象があるが，実際は，労働時間は短く，余暇は豊富にあった，というのが最近の研究で明らかにされている．*1

ブッシュマンの場合，成人の労働は週に1.5～2日であり，わずかこれだけの労働で本人だけでなく扶養家族（4～5人）に必要な食糧を採集だけで獲得していた．人間の採集労働のエネルギー投入によって，生存のためのエネルギーが獲得されたのである．

もし，1人の週に2日の労働で4人の扶養家族のための1週間分の食糧が獲得されたとすれば，獲得できたエネルギーは28人・日分の生存のためのエネルギーであり，それは同時に28人・日分の労働エネルギーとする．そしてそのために費やされた労働エネルギーは2人・日分である．

つまり，2単位のエネルギーを投入して28単位のエネルギーを獲得したことになる．それゆえ，ブッシュマンのエネルギー効率は14ということになる．

アフリカのハドザ族でも，食物獲得の時間は，1日わずか2時間以下であった．わずかこれだけの労働で，アメリカの栄養基準を満たす食糧を確保していた．ハドザ族は農耕民にとりかこまれているにもかかわらず，つい最近まで農業を拒否してきた種族である．それは，自然が豊富なため，わざわざ煩雑な技術と労働を投入してまで食糧を獲得する必要がなかったからだ．農業をすることで労働時間が増え，余暇を失うことにつながることも，ハドザ族が農業を拒否した理由である．*2

ハドザ族の周囲の自然資源はあまりにも豊かであるために，採集以上の労働と技術を投入してまで，耕作する必要がなかったのである．*3

自然が十分に豊かであり，その豊かさを享受する人間の数が少ないところでは，採集・狩猟という生活は快適なものであった．ほとんど無限といえる太陽エネルギーを固定した植物とその果実，および魚や動物という豊かな自然に囲まれていたからこそ，人間は500万年にわたって生存のためのエネルギーを採集・狩猟という簡単な方法で確保し，生きてこれたのである．

Ⅰ－2　耕地のエネルギー収支

○近代化農業のエネルギー収支

現在，人口が55億人を越え，自然が貧しくなった地球で採集生活に戻ることは不可能である．そこで，ここでは耕地におけるエネルギー収支を考える．

人間は1日に2400kcalの熱量と微量の必須アミノ酸，ビタミン，ミネラルを摂取すれば栄養的には十分である．この熱量は600gのデンプンから得ることができる．*4

われわれ人間は社会的な存在であるが，それ以前に生物として存在している．人間が生物として存在する条件の一つが，2400kcalの熱量と微量の栄養素である．

稲は太陽エネルギーによって成長し，穂や茎にエネルギーを固定する．太陽エネルギーの0.6%が穂として固定される．しかし，野性種ではなく栽培種の稲が穂を実らせるため には太陽エネルギーだけでなく農耕という人間の労働が加えられる必要がある．*5

人間は太陽エネルギーと人間の労働のエネルギーを利用して作物を栽培してきた．太陽エネルギーは，高エントロピーのエネルギーでエネルギー密度が低く，そのままでは人間の利用に向かない．そこで，人間が意識的に作物を栽培することで，密度の低い太陽エネ

ルギーを植物によって固定，濃縮し人間に利用可能なエネルギーとして利用することができるようになった．これが農耕である．

現在の世界の食糧生産は「緑の革命」以降，急激に増加したが，にもかかわらず，世界の人口 の20%は十分な食糧を得ていない．

このような食糧不足の原因としていくつか考えられる．経済政策の不備，および農地の確保以上に人口が増加したことなどがそうだ．さらに，エネルギー的な視点からは肉食の増加があげられるだろう．

例えば，近代化された畜産では，畑作物であるトウモロコシなどを飼料として牛を育てている．そこで得られる肉1kcalのために，トウモロコシ10kcalが消費されている．人間がそのままトウモロコシを食べれば10kcalを得ることができるのに，牛を迂回して肉として食べることでエネルギー効率は10分の1へと低下している．

現在55億人の世界の人口は，毎年1億人づつ増加し，2030年には90億人に達する予定である．

88年の世界の穀物収穫量は17.4億tであった．たとえば米はデンプンを主成分とし，人間は米1gから4kcalの熱量を得ている．もし，2030年に90億の人間が米を主食にエネルギーを獲得するとしても，約25億t（20%の籾穀を含む重量）の米が必要になる．だが，穀物を牛などに食べさせ，その肉を人間が食べれば，必要な穀物の量はもっと増えることになる．

明らかに，地球上での人間にとってのエネルギー収支は破綻しようとしている．つまり，地球規模での飢饉である．

その飢饉を回避するために，農業の生産性を高めるための技術が検討されているが，その技術体系そのものに大きな欠陥が生じている．近代化された農業でのエネルギー収支の破綻である．

近代化された農業では，作物の収量は増え，労働時間は短くなる傾向がある．ところが，そのために農業機械や，農薬，化学肥料などが大量に使用されている．それらは化石燃料の大量消費によって得られたものだ．

例えば，チッ素肥料は空中チッ素固定技術によって大量に生産されるようになった．それまではチリとペルーのグアノ（鳥の糞）鉱にしかなかった貴重な資源である．空中チッ素の固定では，原料は空気と水（水素）で，ほぼ無尽蔵である．しかし，空気からチッ素を分離するためには大量な電気が必要で，発電のために化石燃料を消費する．また，水素原料は水ではなく天然ガスなどの化石燃料を用いる．それゆえ，合成アンモニアは化石燃料の産物である．

オダム（Odum, H.T.）は太陽エネルギー以外の，人為的に生産システムに投入されるエネルギーを，補助エネルギーとよんだ．農地に降り注ぐ太陽エネルギーと比較すれば，当初，化学肥料や機械などの形で人為的に投入される石油などのエネルギーは補助と呼ぶにすぎないほど少量であったが，農業の近代化が進むにつれてその割合が急激に増加してきた．そこでオダムは，近代化された農業によって栽培されたバレイショは，太陽エネルギーによってではなく，石油によってうみだされたバレイショであると述べた．*6

ピメンテル（Pimentel, D）は石油ショックをきっかけに，近代化された農業におけるエネルギー収支を計算した．*7

メキシコにおける人力，畜力による栽培．アメリカにおける機械（＋化学肥料）を利用した栽培にわけて比較したのが表Iである．

化石燃料・化学肥料に依存した機械生産の場合，単位面積あたりの収量は一番大きい．しかし，エネルギーの消費量もずば抜けて大きい．そのため，エネルギー投入産出比は3つの中で一番小さい．

人間の生存のためのエネルギーを獲得するのが農業の本来の役割であったはずだ．その農業において，エネルギーの産出投入比が落ちるということは，技術として後退したという意味を持つのではないだろうか．

ピメンテルは農業以前の採集生活の場合もブッシュマンの事例から計算しているが，投入産出比は3.9である．ブッシュマンの例では，1人の1日3時間の労働で約4人分・日 の食糧が採集できている．これは近代化された農業のエネルギー効率3.5とほぼ同じである．つまり，高度な科学技術も機械も何も使わない採集と，科学の粋を凝らし自然の資源を大量に消費し

表I トウモロコシ生産におけるエネルギーの投入と産出（ha当たり）

	人　力	畜　力	機　械
収　　量 kg	1944	941	7000
労働時間	1144	383	12
投入エネルギー　千kcal	642	770	6958
産出エネルギー　千kcal	6901	3340	24500
産出投入比	10.7	4.3	3.5

Pimentel, D. (1984) : Energy analysis of the environmental role in agriculture. In G. Stanhill ed. "Energy and Agriculture"より作成

た近代化農業のエネルギー効率同じである，ということだ．

○生産と消費の逆転

日本ではピメンテルの研究に刺激され宇田川が水稲のエネルギー効率について計算した．宇田川，およびその後の計算によれば，1950年の水稲のエネルギー投入産出比は1.5であったが，90年は0.2を下回っている．それは，10のエネルギー（労働，および化石燃料）を投入して2のエネルギー（米）を回収しているという意味である．つまり，日本の稲作では，エネルギーは生産されず，消費だけがおこなわれている．

農業の本来の目的とは，人間が存在するためのエネルギーの確保であった．そこから考えれば，近代化された農業におけるエネルギー効率の低下は，（人間を生かすための）農業技術としては明らかに後退している．

生産したエネルギー以上にエネルギーを投入し消費することは，それは生産ではなく，消費と考えるのが妥当である．

化石燃料の消費に依存したこのような奇妙な「生産」が今後，数百年も持続することはない．百年後には化石燃料が枯渇することは明らかである．

このような農業では将来，人間は生きていくことができない，ということでもある．

人間は500万年間にわたって採集によって生き続けてきた．また，1万年間農耕によって生存のための食糧を獲得してきた．ところが，わずか百年にも満たない近代化された農業は，確実にエネルギー収支を悪化させ，地球規模での飢えを準備しつつある．

にもかかわらず，農業の近代化がなぜ発展とみなされてきたのだろうか．

ここで引用する資料（ピメンテル，宇田川ら）が用いられる場合，農業近代化におけるエネルギー効率の低下だけが批判の対象として捉えられていた．

エネルギー的に後退した技術がなぜ農民に広く受け入れられたのか．この点は議論されてこなかった．

そこで本稿では，エネルギー効率低下という農業近代化の「結果」を批判するのではなく，エネルギー効率低下をもたらした「原因」を明らかにする．

人力よりも畜力，さらに機械と農業技術が発展してきたのは，そこでの労働が楽で，簡便であり，苦しい労働からの解放というだけではない．

ピメンテルのデータを加工してそれぞれの労働時間当りの収量（kg/時間）を比較すると，人力1.7，畜力2.5，機械583となる．機械による生産性が他を圧倒していることがわかる．ここが重要なポイントである．

経済社会における一農業経営者の場合，最初に投下した貨幣の何倍の貨幣が戻ってくるかが，もっとも重要な関心事である．農地でどのような作物がどれほど収穫されるかは，むしろ次の課題である．

どれくらい利益をあげるのかという経済的な課題を掲げた場合，3つの事例では，もっとも近代化された機械使用が，最大の収益をもたらしている．

経済社会の中におかれた個別の農業経営者にしてみれば，機械を利用した農業近代化は経済的に成功したものとして，見えるであろう．

ただし，農地における経済的成功は土地の再生産，エネルギー効率という意味では失敗していく．しかし，一時的であれ農業の近代化が最高収益を農民に提示したのは事実である．そして，こうした経済的成功をもたらした農業技術こそが発展した技術として農民や農学研究者に受け入れられていったのである．

エネルギー効率では後退した近代化農業技術であったが，農民に受け入れられた理由は，その経済性という1点だけであった．

それゆえ，近代化が進むにつれて，農業のエネルギー効率は低下していく．生産されているのに，エネルギー的には何も生産されていないどころか浪費されているという，逆転現象が農業のあらゆるところで見られるようになっていく．

例えば，トマト栽培におけるエネルギーの投入状況を比較してみた．露地栽培，ハウス栽培，水耕栽培と，施設が重装備になるに従って，エネルギーは多く消費されている．それぞれの栽培方法で，100gのトマトを1個栽培するためには，灯油に換算すると，露地18cc，ハウス45cc，水耕68ccが消費されている．もはやトマトは太陽エネルギーと人間労働の産物ではなく，石油の産物ということができる．

しかし，ここでもピメンテルのトウモロシ栽培同様，よりエネルギーを消費するトマト栽培の収益が大きい．よりエネルギーを消費したほうが，より多くの利益を得ている．一方，エネルギー消費の少ない露地栽培ではトマトを生産しているにもかかわらず経済的な損失が生じている．表II

経済的活動として農業を営む農民の場合，損失が生じる露地栽培をやめてハウス栽培，水耕栽培へと転換していくのは当然であった．

これを，ここ20年の卸売市場でのデータで見てみよう．図1は福岡市の卸売市場での1971年と1988年

のトマトの出荷状況，価格変動である．露地栽培が主体であった1971年は，トマトの出荷のピークは夏であった．それゆえ夏の旬の時期は価格も安く，逆に冬との価格差は大きかった．

その後，減反政策や輸入農産物の増加によって経営を圧迫された農民は，より高い農産物価格を求めて，旬以外の時期にトマト栽培をおこなうようになる．その結果が1988年の出荷状況である．ここでは，年間を通してほぼ均等にトマトが生産・出荷されている．

いまや農業では，エネルギー収支に関していえば，生産と消費という概念がまったく逆転してしまった．しかも，エネルギー収支が悪いほど，経済的にはすぐれているという皮肉な状況である．

しかし，人間は実質的には食物のエネルギーを獲得して生存しているのである．貨幣によって生きているのではない．

貨幣や経済によって，農業のエネルギー収支が悪化するということは，経済が生物としての人間の生存を脅かしているということではないだろうか．

表II　トマトの生産におけるエネルギーの投入（10a当たり）

	露地	ハウス	水耕栽培
収量　kg	6791	9809	19000
純収益　万円	−34	39	67
投入エネルギー　千kcal	106	365	1143

福岡農業改良普及所調べ　1989年度の実績より

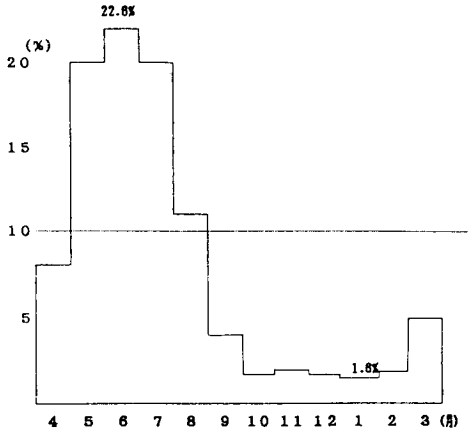


図1－1　トマトの月別入荷量百分率（1971年）

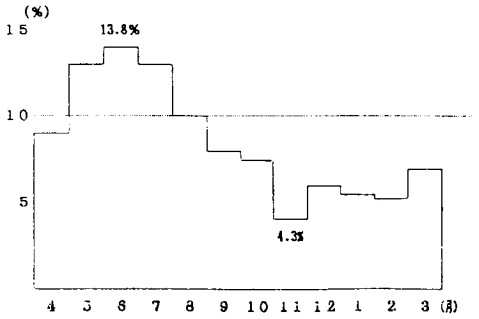


図1－2　トマトの月別入荷量百分率（1988年）

図1－3　トマトの月別価格（1971年）

図1－4　トマトの月別価格（1988年）
福岡県調べ　kg当たり価格　86年基準実質価格

II　エネルギー消費の経済発展

II－1　工業生産におけるエネルギー収支

○GNPとエネルギー消費

ここでは，現在の経済社会をになう工業生産のエネルギー収支について検討する．

経済活動においてエネルギーの消費は重要な位置を占めている．図2は各国のGNPの生産と石油に換算したエネルギーの消費量をあらわしている．図で見る限り，エネルギー消費の多い国ではGNPの生産も大きく，逆にエネルギー消費が少ない国ではGNPの生産は小さいという相関関係が見られる．バラツキは各国の状況の差である．例えば，カナダは緯度が高く気温が低いので暖房のためにエネルギー消費量は増える．また，ポーランドは省エネの技術が遅れているためGNP生産の割にエネルギー消費が多い．逆に，スイスは金融によって，また日本もコンピュータ産業などの省エネルギー産業によって，少ないエネルギーでGNPの生産がおこなわれている．

日本では，1955年から70年にかけてエネルギーの消費とGNPの生産が比例している．その後，石油ショックをきっかけに日本では，省エネ，産業構造の転換によってGNPの生産をあげながらも，エネルギーの消費は増やさずにすすんできた．エネルギー多消費型の鉄鋼，素材型産業などの工場を東南アジアなどに移転し，日本での生産を中止し，付加価値が大きくエネルギー消費の少ない情報産業へと転換したのだ．

しかし，エネルギー消費がなければ，経済活動は不可能である．そして，エネルギー消費が多いほど，経済的価値の生産も大きい．

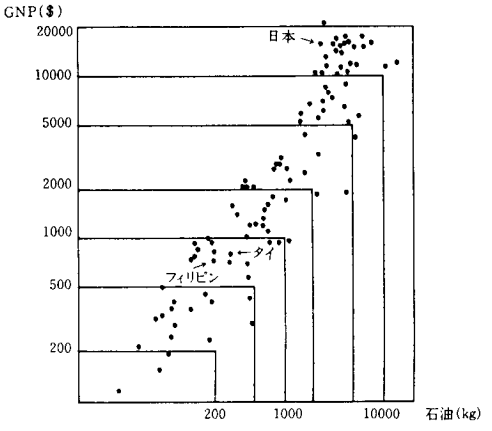


図2　国民一人あたりのエネルギー消費（石油換算）とGNP生産
「世界国勢図会　'90～'91版」より作成

○エネルギーの生成と生産

89年，日本のエネルギーの86%が石油，石炭，天然ガスなどの化石燃料で，9%が原子力，5%が水力である．これを燃料別に分析を加える．

石炭，石油，天然ガスなどの化石燃料は，名前のとおり数億年前の生物の遺骸が変化した「化石」燃料である．石油は生物，特に藻類やプランクトンなど下等生物の遺骸とされている．これらが水底に堆積し，その中の有機物が重合してケロジェン（油母 kerogen）とよばれる複雑な高分子になる．石油はケロジェンを含む岩石（石油根源岩）が地中深く埋没するとき，地熱の作用を受けたケロジェンから分解してできたものだ．石炭もまた生物の化石燃料である．草や木など陸上の高等な植物が埋もれて地下で熱や圧力を受けてできたものである．現在消費している石油の大半は数億年～20億年前に生成されたものである．

なお，石油が地中で生じることを「生成」といい，地中から採掘され人間の手によって利用されることを「生産」という．

「生産」とは，経済的価値（具体的には貨幣）に転換したという意味である．だが，ここでいう「生産」とは地球の石油の消費でしかないことは，議論するまでもない．

世界全体では1960年には26億トンの化石燃料が「生産」されている．90年には75億トンだから，わずか30年で3倍ちかい増加である．なお，現在の消費量の伸びを勘案すれば，約1兆バーレルの埋蔵量が確認されている石油であっても，可採年数はわずか45年である．*8 なお，化石燃料は太陽エネルギーを植物が有機物という形で固定したものだから，燃焼して利用すると炭酸ガスが発生する．炭酸ガスは地球温暖化の原因となっている．

水力発電は，太陽エネルギーによって上昇した水蒸気の位置エネルギーを利用したものである．

次に，原子力はウランを燃料にして発電し電力を取り出すものだ．しかし，ウランの精製，発電所の建設，核廃棄物の処理には大量の石油が消費されており，そのエネルギー収支（原子力発電所が稼働するための石油の消費量と原子力によって生じた電気）はマイナスである．単に石油のエネルギーをウランという形で迂回して，しかも効率悪く燃焼させているものが原子力発電である．*9

水力発電をのぞけば，石油の生産も，原子力の生産

もエネルギー的には，まったく生産などおこなわれていないことに気がつく．

このようなエネルギーの消費によって，日本だけでなく世界各国の経済活動が営まれ，経済的価値が生産されている．

農業の場合，エネルギー効率が低下したといっても，農地では具体的な農作物が生み出されていた．しかし，工業生産の場合は化石燃料や地球の資源の加工にすぎず，具体的には何もうみだしていない．

石油を採掘し，ガソリンを「生産」しても，それは単なる消費にすぎない．石油や石炭を燃やして電気を「生産」しても，それもまた地球の資源の消費にすぎない．

しかし，より多くのエネルギーを消費すればするほど，より多くの経済的価値が生産されるという経済社会の奇妙な評価によって，エネルギーの消費は「生産」と呼ばれ，その「生産」が年々拡大されている．45年後の枯渇に向かって．

○化石燃料の高い経済効率

89年，日本では原油に換算して5億Kl のエネルギーを消費して，世界でももっとも高い経済生産を誇っている．この高い経済性をエネルギー消費との関連で分析してみる．

仮に3億年かけて生成した石油を，わずか100年で使いきるとする．単純に考えても，化石燃料を使用する人間は，現在の植物の蓄積を利用するよりも，時間的に300倍の高い 効率を得ることができる．同じエネルギーを消費しようとすれば，太陽エネルギーを植物によって300年もかけて固定する時間が必要である．化石燃料を使用することで，時間を 節約し，時間当たりの経済効率を上昇させている．

石油を代替する場合，自然のエネルギーとしてもっとも利用可能なのは薪であろう．そこで石油に依存せず，薪を使うとどれほどの森林面積が必要かを試算してみた．

太陽エネルギーを毎年固定する森林から，森林が再生可能な状態で薪を拾ってきて，それをエネルギーとして利用する．薪は4500kcal/kgである．また，日本の森林の薪の純生産量は約13 t /ha，実際に採集できる薪を5 t /haとすると，2250万kcal/haとなる．

日本で年間に消費される原油5億Kl（原油1 l は9250kcal）のエネルギーを薪で対応すれば，約2億haの森林が必要になる．これは日本の国土面積3750万haの5倍以上になる（ちなみに，日本の水田面積は200万haである）．さらに，薪を集める労働力を20 ha当たり1人としても，薪の採集に一千万人の労働力が必要になる．

薪にかわって化石燃料を利用することで，時間ばかりでなく，空間（土地）や労働をいかに節約しているかわかる．

つまり，化石燃料の使用は，実質的に森林や農地などの耕作可能な面積を拡大することであり，同時に労働を省略できるということである．

それゆえ，工業生産や近代化農業において化石燃料を消費すればするほど経済効率がよくなるのは当然であった．

II－2　産業革命とエネルギー革命

○エネルギー革命としての産業革命

ここでは，工業を中心とした産業社会が誕生するイギリスの産業革命をエネルギーの視点から分析する．

産業革命は様々な工業機械の発明によるものだが，同時にその機械を動かすエネルギー資源の革命ということができる．なぜなら，石炭が製鉄用燃料と工場動力として登場しなかったら，産業革命は成立しなかったからだ．

当時のイギリスにおいて移動用の動力は，人力と畜力であり，製粉などの動力には水車が使われていた．また冶金，パン焼き，煉瓦・陶器製造などの手工業には薪が使われていた．家庭の暖房でも薪が使われていた．

産業革命以前のイギリスでは，工業資源は森林であり，住宅や燃料だけでなく，機械や交通機関も木製であった．製鉄も木炭高炉でおこなわれていた．森がすべての工業生産の源であった．

しかし，増加する工業生産に対応して人間の労働を獲得するためには食糧用の畑が必要であり，馬のためには牧草地が必要であった．薪の獲得ためには森が必要であった．食糧にも，牧草にも，薪にもすべて，太陽エネルギーを固定するための土地が必要であった．しかし，イギリス一国の土地の面積は限られていた．

植物が光合成をおこなう土地の面積が，農業の生産だけでなく，当時のイギリスの工業生産をも支配していたのである．

それゆえ，工業の発達は森の国イギリスの森林伐採をすすめ，やがてイギリスの森林は16世紀にはすっかり荒廃し枯渇してしまった．

ところが，石炭の利用が土地の制限を外した．石炭を燃料として使うことで，土地の面積に制限された薪の使用から脱却することができたのだ．また，石炭を動力源として使うことで，馬や人間の労働に依存する

必要もなくなった．

イギリスでは1880年1.5億t，1913年2.9億tの石炭が採掘されている．石炭6千kcal/kg，薪4500kcal/kg，森林の薪の生産量5t/haとすれば，1880年には約4000万ha，1913年には約8000万haの森林に匹敵する土地を石炭によって節約したことになる．イギリスの面積は2440万haである．

産業革命がエネルギー革命といわれるゆえんはここにある．

○熱機関と熱力学の誕生

イギリスでは土地不足を原因とする燃料不足という圧力から，石炭を燃料や動力源に使う技術が発明された．家庭でも薪から石炭へと燃料は転換し，産業界でも，薪に依存した製鉄法から，石炭を利用したコークス製鉄法へと転換する．

蒸気機関によって石炭を燃やして，石炭を採掘し，石炭を輸送できるようになった．すると，こうした蒸気機関自身が石炭を必要とするようになり，石炭の需要はさらに増加した．イギリス各地の炭坑は掘りすすめられ，坑道は深くなり，消費地から遠い炭坑での採掘も進み，石炭の価格の上昇や，枯渇が問題になってきた．

そこで，熱機関のエネルギー効率をあげるための技術が求められるようになる．

初期の熱機関であるニューコメン機関の熱効率はわずか0.5%であった．つまり，1000kcalの熱量のエネルギーを石炭で与えても，動力として取り出せるエネルギーは5kcal分である．その後，改良されたワットの機関の熱効率は2%である．ワットの改良によって，燃料としての石炭の消費は4分の1に減らすことができた．

ワットが復水器を発明して熱効率をあげるまで，石炭が安価に入手できる炭鉱でしか蒸気機関は稼働できなかった．それほど効率が悪かった．ワットは復水器の発明で特許をとり，改良機関の所有者が石炭使用料の減少によって節約した経費の3分の1を受け取るようにした．この特許で3器のポンプが稼働している一つの炭鉱からだけで，ワットは年に4万8千マルクを受け取ることができた．

こうした産業界からの要求によって，科学者・技術者は蒸気機関に改良を加えていった．その結果，蒸気機関は19世紀はじめには船の推進力として利用され，さらに高圧蒸気による機関車が走るまでになった．蒸気機関の熱効率は10%を越え，15%にまでなろうとしていた．熱効率の上昇によって同じ仕事をえるための燃料の消費は大幅に減少していった．

この過程で生まれ，活躍したのが熱力学である．熱力学とは，熱と仕事に関する科学のことである．

1814年にはカルノー（Sadi Carnot, 1796-1832）が「火の動力，および，この動力を発生させるのに適した機関についての考察」（広重徹訳：熱機関の研究　みすず書房　1973）によって，熱機関を科学的に分析した．熱の産む動力（仕事）にはいかなる原理的制約があるのか，というのがカルノーの問題意識であった．

カルノーは，熱機関によって得られる最大効率は，熱源と冷却器の温度差だけで決定されるというカルノーの定理をうみだした．

その後，マイヤー，ジュールにより熱力学は発展し，熱力学第一法則が提唱される．

$$dU = dQ - dW$$

dUは内部エネルギーの変化

dQは（$dQ > 0$なら）系によって受け取られる熱．（$dQ < 0$なら）系から開放される熱．

dWは（$dW > 0$なら）系によっておこなわれる仕事．（$dW < 0$なら）系に対しておこなわれる仕事である．

この式は現在では，熱も仕事同様エネルギーの一つの形態である，というもので「エネルギー保存則」として知られる．

当時は「熱と仕事は等価に変換される」と主張されていた．

しかし，仕事は100%すべて熱にかわるが，熱は100%すべて仕事にかわることはない．これを明らかにしたのが，クラウジウス（Rudolf Julius Emanuel Clausius, 1822-88）である．

熱いお湯が入ったコップに氷を入れる．しばらくすれば氷は溶けてしまう．しかし，自然の状態では，この水が再度，お湯と氷に戻ることはない．

平面をころがるボールは面との摩擦によって，やがて止まる．運動エネルギーが熱に転換した結果だ．しかし，この熱によって再びボールがころがりだすことはない．

自然現象は一つの方向に進み，その逆には進まない．これを自然の不可逆性という．

クラウジウスは熱と仕事に関する数学的考察をおこなうなかで，エネルギーとは別の状態量を発見し，これをエントロピーと名づけた．

自然の様々な運動において，エントロピーは必ず増大することをクラウジウスは発見した．それゆえ，増

大したエントロピーによって自然の運動はもとには戻らない．

クラウジウスは自然の非可逆性をエントロピー増大則によって説明した．

クラウジウスが発見した熱力学第二法則はエントロピー増大則とよばれ，第一法則（エネルギー保存則）と対比されている．

熱力学が登場するまで支配的であったニュートン力学（古典力学）の世界では，摩擦も空気抵抗もない空間で永久に続く運動が論じられていた．ここでは可逆的な運動が論じられていた．

それまでニュートン力学を学んでいた科学者は，真空中の落下や完全に滑らかな面上での運動こそ「真の運動」「本来的な運動」として考え，空気抵抗や摩擦による運動の減衰は，真の運動を隠ぺいする，非本質的因子として，とらえていた．

ニュートン力学では，考察対象を具体的環境から孤立させ，数学的，幾何学的に単純化・理想化された自然が論じられたのである．

単純化・理想化された空間のなかでは，摩擦も抵抗もないため，理論的には運動は永遠に持続した．この空間を設定することで，可逆的な運動を論じることが可能であった．

しかし，自然の中では，熱は高いところから低いところにしか移動せず，その逆にはけっして移動しない．

この自然の非可逆性を原理とする物理学が提唱された．これが熱力学である．熱力学は古典力学で「非本質的」とみなされた（摩擦や空気抵抗による）運動の減衰を，つまり自然の非可逆性を運動の一つの本質としてあらわした．

それゆえ熱力学は「巨視的物理学理論全般に制約を与える自然界の上位理論」[*10] として位置づけられる．

なお，当時のニュートン力学の科学としての影響力は相当なものであった．物理学者ばかりでなく，科学的にふるまい考えようとするすべての人は，経済学者も含めて，ニュートン力学の考え方（単純化・理想化された空間における運動）を，彼ら自身の科学的分析方法に取り入れようとしていた．[*11]

○古典力学の世界の崩壊

熱機関のエネルギー効率を高め，熱と仕事の関係を解明するために発展した熱力学は，クラウジウスによって一つの体系として完成していった．同時に，従来の支配的な古典力学（ニュートン力学）の自然観，世界観をぬりかえていく．

その具体的で代表的なものが，熱力学による永久運動の否定である．

当時，科学者や技術者によって永久機関の研究は盛んにおこなわれていた．ワットによる蒸気機関の改良だけで，多くの燃料が節約され，大きな利益を得ることができたのだ．ましてや，燃料を不要とし，そこから永久に仕事のエネルギーを取り出すことができる永久機関を発明することができれば，どれほど賞賛され，巨大な利益を得ることができるか，と科学者や研究者が考えても不思議ではなかった．

永久運動を研究した多くのものは，有名な科学者でもあった．紀元前287年に生まれた 数学者アルキメデスだけでなく，近代的な科学者であるジェニー紡績機の発明者リチャード・アークライト，蒸気機関を完成したジョージ・スチーブンソンたちも永久機関を求めた．

科学者である彼らが不可能な永久機関を求めたのは，彼らの時代には熱力学第二法則が明らかにされておらず，永久機関が不可能であることが科学的に証明されていなかったからだ．

「永久運動はまじめな主題であった．多くの発明家たちが大衆に与えるような明らかにつまらないものではない．錬金術師と同様に，永久運動を求めた人々は，それに全力を注いだ科学者であった．個人の無知ではなく，その時代に得られていた科学知識や機械知識の限界が足かせとなっていたのである」[*12]

クラウジウスによって熱力学が体系化されるまで，運動の法則はニュートン力学によって論じられていた．そして，ニュートンの運動の法則では，永久運動は否定されていなかった．

そのような時代の限界の中で，多くの科学者が永久機関に真面目に取り組み，失敗していた．

熱力学第一法則（エネルギー保存則）では，無からエネルギーを次々と生み出すことは不可能であることを証明している．なぜなら，エネルギーは一定であるからだ．

次に，熱力学第二法則（エントロピー増大則）では，エネルギーは一定でも，そのエネルギーは劣化していくことが証明されている．それゆえ，外に仕事もせず，外から仕事もされずに永久に運動を続ける機関さえ存在しないことも，また証明された．

ニュートン力学では理論上可能であった永久機関は，熱力学のもとではもはや非科学的なものとして描かれるようになった．

○クラウジウス

熱力学を体系づけたクラウジウスは，そこで得た科

学的認識から，石炭という化石燃料に依存する工業社会の限界を説く．

1885年，クラウジウスはボン大学総長として講演をおこなった．これは「自然界のエネルギー貯蔵とそれを人類の利益のために利用すること」[*13]としてまとめられている．

「いまやわれわれは力学的エネルギーの消費に関してはすばらしい時代に生きている．経済学的には，いかなる財も，その時期に再生産されうる分量を越えて消費することは許されないという一般的な法則がある．この法則によれば，われわれが消費できる燃料は森林の成長によって新たに生産される分量だけであるはずだった．しかし，実際には，われわれは全く違うやり方をしてきた」[*14]

として，化石燃料に依存した工業社会を批判する．科学（熱力学）に従うかぎり，無からエネルギーは生まれない．それゆえ，人類は植物が太陽エネルギーを固定した以上のエネルギーを，使い続けることは不可能である．

「現在，われわれはそれ（石炭）を消費する際，まるで莫大な遺産を消尽する幸せな相続人のようにふるまっている．あたかも無尽蔵であるかのように消費されている」[*15]

また，クラウジウスは，イギリスが今後このまま石炭を採掘し続けると，いずれ枯渇するだろうと，予言していた．

「もし，石炭の年間消費が現在の量で一定に保たれると仮定すると，埋蔵量はあと1100年をまかなえるであろう．しかし，もし消費量が最近20年間と同じ増加率で増大しつづけると，石炭鉱床はあと250年で掘り尽くされてしまうだろう．たとえこの数字が厳密に正確なものとはいえないにしても，そのような危機の到来が不可視の未来にあるのではなく，人間の一生と比べてもそう長いとはいえない期間が問題となる」

さらに，「発展した科学技術によって，いずれ化石燃料に代わる新たなエネルギー源が，生み出されるのではないか」という幻想を批判する．これは，原子力や，核融合によってあたかも無限のエネルギーが取り出せるかのように議論されている現在のエネルギー事情にも通じるものだ．

「こんな異論が唱えられる．石炭鉱床が尽きるよりもずっと前に，熱をつくり出すための新しい手段が発明されるにちがいない，だから心配する必要はない，と．こういう意見は，物理学の根本原理にまったく背反している．いかなるエネルギーの生産も，それに相当した他のエネルギーの消費なしには，絶対に不可能である．石炭層のなかに存在する潜在的なエネルギーの蓄えが形成されたのは，太陽が地球に，植物の成長に必要な放射熱の形で，人類の発生に先立つ長い間，潜在的なエネルギーを送ってきたおかげである．もし，この蓄えが消尽されてしまたら，他のエネルギー源を見出す手段は，たとえ科学がもっと進歩しても手に入らない．」[*16]

それゆえ，人類の明るい未来をもとめるなら，化石燃料の消費を抑える社会へと転換する必要がある，とクラウジウスは主張する．

「これから先数世紀の課題は，自然から与えられたエネルギー源の消費に関してある主の節約(eine weise Oekonomie)を導入すること，および特に，古い時代からの遺産として大地にあり何物によっても代替できない諸資源の浪費を防ぐことである．転換の開始が早ければ早いほど，未来によい結果が得られるであろう」[*17]

人類の明るい未来とは，「太陽から放射によって今後のなお永続的に供給されるエネルギーで間に合わせるよう」な社会への転換である．

植物が固定するエネルギーのみを利用する社会とは，農業生産を基本にした社会である．このような農的社会こそ，熱力学的に持続可能な社会であると，クラウジウスは結論づけた．

III　経済学におけるエネルギー

○ジェボンズ「石炭問題」

クラウジウスが講演をおこなう20年前，イギリスの経済学者ジェボンズは1865年に「石炭問題」[*18]を出版した．

そのなかで，世界の工場として君臨しているイギリス経済が石炭に依存していることを力説した．そして，ジェボンズは石炭の代替物して提案されているものを一つ一つ検討したが（当時，石油の埋蔵量は不確かであった），実際に石炭を代替できるものはなかった．

ここでの結論は，有限な諸資源に依拠する工業は，短期的な繁栄しか望めない，というものだった．

そして，たとえ不本意ではあっても，経済活動の永続性は農業によってしか保証されない，という結論に至った．[*19]

クラウジウスが物理学の立場から工業社会の限界を言う前に，経済学者であるジェボンズが，エネルギー源としての石炭を分析することで，同じ結論に至ったことは注目に値する．

さらに両者ともが，持続的な社会として農業をあげている．

○ポドリンスキーとエンゲルス

ウクライナで生まれたポドリンスキー（Serhii Andriiovych Podolynsky, 1850-91）は，経済学によって実質的なエネルギーの生産と消費を評価しようと試みた．

ポドリンスキーは，人間社会の経済活動は，太陽エネルギーを固定した植物の消費によって成り立っていると考えた．

自然のなかでは，人間の労働が加わる農耕によって，さらに人間の労働が加わらない植物によっても太陽エネルギーは固定されていた．

一方，リカードやマルクスの経済理論に従えば，人間の労働だけが価値をうみだしていた．

そこでポドリンスキーは，農耕では人間の労働が加わることで，自然状態よりもより多くのエネルギーが固定されるのではないか，と考えた．

労働を加えることで，自然状態よりもより多くの太陽エネルギーを固定していれば，それこそが，経済学で定義する「人間の労働のみが価値をうみだす」という具体的な指標になるのではないか，と考えた．

表IIIはポドリンスキーが分析したものである．ここでは，森林や入手が入っていない草地よりも，人間の労働が加えられた人工的な牧草地，小麦畑のエネルギー生産量が大きい．

人間の労働が加わることで，自然状態よりも太陽エネルギーはより多く固定されることがわかった．

このようなエネルギー分析が，マルクスの労働価値説を補完し，さらに具体的背景になるだろうと考えて，ポドリンスキーはマルクスに彼の論文を送り，意見を求めた．*20

しかし，マルクスは直接答えず，エンゲルスがかわって答えた．

エンゲルス自身は，エネルギーがどのように生産され，消費されるかを正しく認識していた．

「労働によるエネルギーの貯蔵は本来はただ耕作においておこなわれるだけだ」「これにたいして，すべての工業部門においてエネルギーはただ支出されるだけだ」*21

ところが，エンゲルスは，人間の労働が加わることで実質的に増加するエネルギーを計算することは不可能に近い，という理由でポドリンスキーの論文を無視してしまった．

「農業の場合は，人間の労働だけでなく肥料などのエネルギーもはいってくるので，計算は複雑になる．工業の場合，例えば布の場合，布が漂白されたり染色された場合は，複雑すぎていっさいの計算ができなくなる．経済的な諸関係を物理的なエネルギー量であらわそうとすることは，まったく不可能なことだ」*22

さらにエンゲルスは「物理的なものと経済的なものをポドリンスキーはごちゃ混ぜにしている」と批判している．

しかし，エンゲルスが不可能といったエネルギーの

表III　1870年代フランスの各種生態系における1ヘクタール・1年当りの生産量とエネルギー投入量（ポドリンスキーによる）

生態系の種別	生産量（kg）	生産量（kcal換算値）	エネルギー投入量（kcal）
森林	900（乾重量）	2,295,000	ほとんどゼロ
入手の入っていない草地	2,500（乾し草）	6,375,000	ほとんどゼロ
人工的な牧草地	3,100（乾し草；種子分を差し引いた正味量）	7,905,000	37,450（50馬・時 プラス 80人・時）
小麦畑	800　小麦 2,000　麦わら （種子を差し引いた正味量）	8,100,000	77,500（100馬・時 プラス 200人・時）

注）エネルギー換算においては，木材，乾し草，麦わらについて2,550kcal/kg，小麦について3,750kcal/kg．人畜力に関しては，645kcal/人・時，データの出典は，S.Podolinski : Le Socialisme et l'Unité des Forces physiques *La Revue Socialiste* 8 (20 Juin 1880) 353-365.

計算が可能であることはいうまでもない．エンゲルスのポドリンスキーに対する批判は，十分に吟味されたものではなかった．

もし，ポドリンスキーの意見を受けとめ，発展させていれば，工業生産の限界をエンゲルス，マルクスは考えることができたはずだ．しかし，エンゲルスとマルクスはポドリンスキーの議論を無視し，葬り去った．

エンゲルスがポドリンスキーを無視した背景として，科学者としてのエンゲルスの熱力学への認識の欠如を指摘することができる．

エンゲルスは「フォイエルバッハ論」の中でエネルギーをこのように語っている．

「もろもろの力－力学的力とその補足物であるいわゆるポテンシャル・エネルギー，熱，輻射（光，あるいは，輻射熱），電気，磁気，化学的エネルギーは，すべて不変的運動のさまざまな現象形態であり，これは一定の割合でたがいに移行しあうので，その結果，消滅する一つの現象形態の一定量の代わりに別の現象形態の一定量がふたたび現れ，こうして，自然の運動全体はある形態から他の形態へ転化するこういう不断の過程に還元される」*23

これは，熱力学第一法則（エネルギー保存則）の説明である．しかし，エネルギーは一定で不滅だが，エンゲルスがいうように熱がふたたび仕事にかわることはない．明らかに，エンゲルスは熱力学第二法則（エントロピー増大則）を理解していなかった．

エンゲルスは熱力学の知識不足によって「人間の労働だけがエネルギーをより増加させる」というポドリンスキーの主張する重要な意味を理解できなかったのである．

物理学者であるクラウジウス，近代経済学者であるジェボンズなどが，エネルギー問題こそが経済社会の重要な課題である，と論じていたこの時代に，エンゲルスはポドリンスキーの貴重な議論を，エンゲルス自身の遅れた科学認識によって無視してしまった．

その後，エンゲルスは熱力学という科学の洗礼を受けないまま，マルクスとともに経済学を論じていく．マルクス経済学において重要な位置をしめる労働価値説は抽象的な経済的価値の生産を軸に議論されていた．

もし，ポドリンスキーの議論をエンゲルスが受けとめていれば，抽象的な経済的価値の生産を具体的なエネルギーの生産によって測定することが，その後の経済学によって可能になっていたかもしれない．

しかし，エンゲルスはそうしなかった．

その後の経済学者もそうしなかった．

その結果，エネルギーの消費こそが経済的価値の生産である，というまったく矛盾した現在の経済状況が引き起こされたのである．

エンゲルス以後，現代の経済学の主流は，近代経済学・マルクス経済学を問わず，より大量のエネルギーを消費することが，より大きな経済的価値の生産であるという，あやまった発展の方向をみいだしてしまった．

近代経済学，マルクス経済学ともに，熱力学の洗礼を受けない経済学として展開したということである．

○経済学のエネルギー分析の限界

化石燃料の消費を基礎に発展してきた工業社会と，それを分析して発展した経済学である．

経済社会における労働や商品の分析をさまざまな手法でおこなう経済学だが，その分析対象がエネルギーに向かうと，途端に歯切れが悪くなる．

経済学では，石炭や石油の採掘を「生産」と表現し認識している．「生産」された化石燃料は，様々なエネルギー源として利用され経済的価値を生み出しながら消滅していく．

ここに大きな矛盾がある．

化石燃料は地球上から消費されているにもかかわらず，それを経済学では「生産」と認識している，という点だ．

室田泰弘は「エネルギーの経済学」のなかで，エネルギーの経済性に分析を加えた．そこでは，短期2年，長期でも10年ほどの長さで，エネルギー価格の変動と経済社会全般に対する影響が細かく分析されている．

しかし，室田は50年後に必ず訪れるであろう化石燃料の枯渇に対しては，一般的な経済学の枠組みでは答えられないとしている．

2～10年という期間において，エネルギーと経済の関係を論じることは可能であった．それはあくまで化石燃料に余裕があり，石油が枯渇しないという前提での議論である．

しかし，室田がエネルギーの現実を見れば見るほど，経済社会でのエネルギーの「生産」は，単なる消費でしかないことを認識せざるえない．

2～10年の期間を前提にしたエネルギーの議論をおこなうことは可能であっても，その議論が化石燃料が枯渇する50年先には，まったく意味のない議論になってしまうことを，論者自身が認識せざるえない．

さらに2～10年の単位でおこなうエネルギーの議論とは，より多い経済価値の生産のために，より多いエネルギーの「生産」，つまり消費を求める議論であ

る．

室田は50年という長期レベルでは化石燃料の枯渇を心配しながらも，2～10年というレベルでは化石燃料の消費を促すという，分裂した議論をおこなってしまった．

それゆえ，室田は短期間におけるエネルギーの経済分析を，否定的にまとめざるえなかった．

「単純な前提の上に立った精緻な分析のみを続けることは，むしろ有害ではないかとすら思えてくる」[*24]

経済学がいったんエネルギーに目を向ければ，エネルギーの消費を「生産」と認識してきた経済学自身の大きな矛盾の前で，立ちすくむしかなかった．

「(エネルギー的に持続的な社会とは) 効率を重視する代わりに多様性に意味を見出す社会であろう．また，物的成長よりもゆとりや環境の保護を重視する社会でもあろう．そこでは，労働は所得を得るための代償ではなく，それ自体が意義のあるものととらえられる．また基本的に規模の経済性が働かない社会であろう．もしそうだとすれば，このような社会を形づくる価値観は，近代工業化を支えてきたそれとは大きく異なると考えられる．

経済学ではこのような問題は本来的にふれられない．経済学で前提とされるのは，その社会で中心的な価値体系や技術体系であり，通常そのあり方自体は議論が踏み込まれない．したがって，ここで示唆したような価値体系や技術体系が社会の中心となれば，おのずからそれを前提とした新しい経済学が生み出される可能性がある」[*25]

いったんエネルギーと対置した経済学は，自らのパラダイムを放棄し，新たなパラダイムのもとでの経済学へと展開する必要がある，と室田は予感している．

○ボールディングのエントロピー経済学

1960年にシュレディンガーは「生命とは何か」[*26]のなかで，生きていることの意味を熱力学の視点から述べた．

熱力学第二法則では，エントロピーがたえず増大することが明らかにされた．

生物が生命活動を続けるとすれば，いずれ生命の内部にエントロピーが充満し，生命活動は停止する．そこで，生物は絶えずつくりだす余分なエントロピーを捨てることで生命を維持する，とシュレディンガーは定義した．

このシュレディンガーの理論を経済学に応用したのが，ボールディングであった．

「生産は，高いエントロピーをもつ『くず』を他の場所に生み出すという代償をまぎれもなく払ってエントロピーを分離し，高度の秩序をもつ低いエントロピーの『生産物』(商品) を作り上げる」と指摘した．[*27]

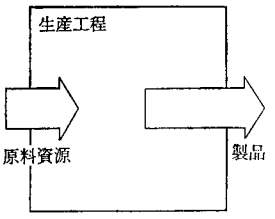
例えば，鉄鉱石から鉄を生産するとき，従来の経済学では図3aのように，原料資源を投入すれば製品が生産された．しかし，現実は図bのように，高エントロピーの原料資源が低エントロピーの鉄という製品になるには，化石燃料が燃やされ，高エントロピーの廃棄物が生じる．

高エントロピーの鉄鉱石が低エントロピーの鉄になるためには，それ以上に捨てられるエントロピーとエネルギーが必要である．

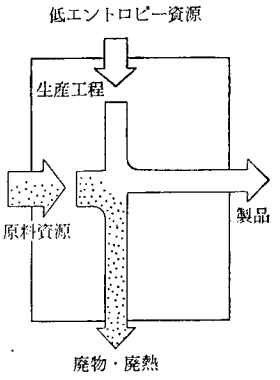
経済活動をおこなえばおこなうほど，高エントロピーの廃棄物や廃熱は避けられない．これは，近年の環境問題への指摘でもある．

生産と消費を繰り返すためには，低エントロピーの資源とエネルギーを必要とし，高エントロピーの廃棄物を排出しなければならない．

生産と消費，需要と供給が永遠に続くような議論が経済学ではおこなわれてきたが，それはエントロピー



(a) 通常の生産図



(b) エントロピー論的生産図

図3　生産活動における資源から廃物・廃熱への流れ

の視点からは誤りであることを，ボールディングは指摘した．

○エントロピー論と経済学

ボールディング以後，熱力学の立場から，様々な経済学批判が行なわれてきた．経済学者ジョージェスク・レーゲン（Nicholas Georgescu-Rogen）もその一人である．

彼は，マーシャル（Marshall, Alfred 1842–1924）のような注意深い経済学者であっても頭の中には力学的なエネルギー保存則しかない，と指摘している．

単純化・理想化された空間で永久に続く運動のように，経済社会とそこでの経済活動をとらえている，というのだ．

経済学者がニュートン力学的な自然認識レベルにとどまっているかぎり，生産－消費過程に投入されたエネルギーや物質のすべては，まさしく同量かつ同質に再びでてこなければならない．このプロセスでは生産と消費は永遠に継続する．

しかし，このプロセスを人間の生活から見れば，エネルギーや物質が利用可能な（available）状態から利用不可能な（unavailable）状態へと不断に劣化（degrade）していることがわかる．

それゆえジョージェスクは，科学の中でエントロピー法則ほど独特な地位を占めている人間臭い法則はないのではないかという．[*28]

天体の運動を論じたニュートン力学は，産業のために発展した熱力学に新しい座（自然観）を提供した．熱力学は，ニュートン力学全般に制約を与える自然界の上位理論として，いまや多くの科学者に認識されている．

ボールディングやジョージェスクが言うよう，現在の経済学がいまだニュートン力学に依存したものであり，熱力学の洗礼を受けていないならば，現在の経済学全般に制約を与える上位理論としての，（熱力学に依拠した）経済学の登場が求められる．

熱力学に依拠する経済学とは，従来の経済学を根本的にすべて否定するものではない．従来の経済学を認めながらも，非可逆的な自然の法則に基づいて，様々な制約と可能性を与えるものだ．

そして，そのような熱力学の法則に基づいた経済社会は，エネルギー的にも持続的な社会となりうる可能性がある．

持続可能な社会が具体的にどのようなものであり，どのような経済理論に基づいているかを，ここで議論する余地はない．

そこで，具体的なエネルギー価格を通して，持続可能な社会の一端を考えてみる．

例えば現在，化石燃料の加工品であるガソリン（8400kcal/l）は日本では120円/lで販売されている．

持続可能な社会では化石燃料の利用は最小限に抑えられ，再生可能な薪などに転換される．

薪（4500kcal/kg，5t/ha）を採集して燃料として利用すれば，その燃料は太陽があるかぎり生産可能な無限のエネルギーである．また，化石燃料を燃やせば炭酸ガスの増加が問題になるが，薪の燃焼では繰り返し植物に固定されるので，その心配はない．

そこで，薪採集のために1人の年間の労働で20haが可能であり，1haあたり5tの採集量と仮定する．ここでは，薪採集者のために年間500万円の賃金が支払われるとする．年間に採集される薪は100tであり，その熱量は4.5億kcalである．

薪は固形の燃料であり，ガソリンのように熱機関の動力の燃料として利用するには加工する必要がある．その加工のロスを考慮して，10分の1の4500万kcalがガソリン同様に内燃機関でも使いやすいエネルギーとして取り出せると仮定する．これは，ガソリン5400lに匹敵する量である．これに支払う薪採集労働者1人の年間の賃金500万円で考えれば，薪を加工したガソリンは1lあたり約千円になる．これは現在の価格の8倍である．ただし，この計算には森林の地代や薪からの加工の費用，流通費用などは含まれていない．

このようなエネルギーの消費は持続可能だが，高いエネルギー費用は産業に大きな影響を与えるはずだ．

まず，単に利益を目的としてエネルギーや資源を浪費するだけの産業は減少していくだろう．実質的に生存に必要な商品を生産する産業が，工業の中心になっていく．

工業の生産は，やがて自然の生産に制限されるまで落ちつくであろう．農業もまた，自然の制限の枠内に落ちつく．

このような社会では，農業の生産が基本になる．工業生産は生存のための最小限のものになるはずだ．そして，ここでの経済社会は自然と人間の実質的な生産，つまり農業生産を軸にした経済学によって論じられる．

このような農業生産を軸にした経済学の議論が今後の持続的経済社会を求める中で，必然的に行なわれるであろう．

さいごに

熱力学第二法則そのものを根底に据えて，地球上における再生可能資源の存在や生物の存続の理由を解明する研究は，歴史的にはまだ新しく，日本では1976年頃からはじまり，その後，エントロピー学会（1983年創立）において深い議論が展開されてきた.[*29]

本稿は，エントロピー学会での議論を整理し，新たな知見を加えてまとめたものである．本稿における新たな知見とは以下のものである．

① ピメンテル，宇田川のエネルギー収支の議論を踏まえて，農業でも，工業でも，より 化石燃料を消費することが，より多い利益を獲得することを明らかにした．また，その利益がさらにエネルギー収支を悪化させていた．

② 室田武，河宮の議論を踏まえて，化石燃料に依存した商品生産が，土地，時間，労働 節約的であることを，薪を使った具体的数字によって説明した．

③ 経済学は熱力学の洗礼を受けていないのではないかという，ボールディング，ジョー ジェスク＝レーゲン，玉野井芳郎，室田武らによる指摘，について，エンゲルスの熱力学的認識の欠如から論じた．

また，現代の経済学が熱力学の洗礼を受けていないのではないか，という視点でエンゲルス以後，ボールディング，ジョージェスク＝レーゲンなどの議論を整理した．

④ 室田泰弘の「エネルギーの経済学」の議論を批判的に整理した．室田が短期的な分析 によるエネルギー消費の促進と，長期的な枯渇問題によって，新たな経済学のパラダイムをもとめざるえなかった，という解釈を与えた．

⑤ 持続的な経済社会の基本は農耕にあるという視点で，エントロピー学会での議論を整理した．

以上があげられる．

従来の経済学のパラダイムは，現在の経済社会全体をおおうものであり，それゆえ現実的な経済学批判を試みれば，それは多面的にならざるえない．

エントロピー学会では，経済学ばかりでなく，物理学や様々な分野の研究者，現場の労働者によって，現在の経済社会の批判がおこなわれてきた．

これらを整理し，体系づけるための試論としたのが本稿である．それゆえ，本稿の論述は多面的にならざるをえず，また多面的ゆえに，（専門家から見れば）未整理な論述も避けられないものとなった．

しかし，本稿の目的は，細かく細分化された専門家の枠内で完結した論を提示するものではなく，「従来の経済学全般に制約を与える上位理論としての新たな経済学」の枠組みを，農業の立場から論じようとするものである．本論文はそのきっかけになったと考える．

文　献

宇田川武俊　1985　農業におけるエネルギー収支論，エントロピー　小野周ら　朝倉書店

宇田川武俊　1988　農業生産におけるエネルギーの投入と産出，土の健康と物質循環　日本土壌肥料学会編　博友社

倉谷洋之　1991　人と自然を活かす農業発展の議論，名古屋大学農学部農学科卒業論文

石井玲子　1992　近代化農業におけるエネルギー投入産出比に関する研究．九州大学農学部卒業研究

竹下　昭　1992　生産と消費の場における野菜の旬の喪失について．西九州大学・佐賀短期大学　紀要第22号

河宮信郎　1983　エントロピーと工業社会の選択．海鳴社

＊1 M・サーリンズ　1984　石器時代の経済学．法政大学出版局，東京

＊2 同上書，39頁

＊3 採集民の観察では，彼らは食糧を蓄えることをしないという報告がある．それは，彼らにとって，そうした行為が不要だからである．自然が豊富に与えてくれるところでは，安心して自然の豊かさに委ねることができるからだ．

＊4 瀬戸昌之　1992　生態系．有斐閣ブックス，東京

＊5 沼田真監修　1972　耕地の生態学．築地書館．東京

＊6 Odum, H. T. 1967 : Energestics of world food prodution In "The world food problem" p.59. The White House Washington DC.
なお，ここでは宇田川武俊　1988　農業生産におけるエネルギーの投入と産出，日本土壌肥料学会編：土の健康と物質循環，博友社．東京を参考にした．

＊7 Pimentel, D et al. 1973
Food Production and the Energy Crisis SCIENCE VOL, 182 New York

＊8 資源エネルギー庁　1992　総合エネルギー統計（平成3年度版），東京．

＊9 核廃棄物であるプルトニウムは，半減期が2万4千年という猛毒である．原子力発電所は安全で安価である，という建前ですすめられてきたが，2万4千年以上の保管と引換に発電するだけの経済性はない．日本における原子力発電のコストには核廃棄物の保管費用は含まれていない．つまり，核廃棄物の処理費用を計上せずに問題を先送りにしているからこそ原子力発電所が経営できるのである．これは日本の電力会社が地域独占という形態をとることではじめて成立するのものだ．アメリカなど電気事業が民営化されているところでは，

核廃棄物の処理費用を計上しなければならず，その負担が高い電気料金となってあらわれてきた．そのため石油火力発電や水力発電の安い電気との競争に負け，原子力発電所は倒産している．
*10 山本義隆 1990 力学と熱学，小野周ら編：熱学第二法則の展開．朝倉書店，東京．
*11 秋間ら訳 1986 ベー・エム・ゲッセン：ニュートン力学の形成，法政大学出版局，東京．
*12 高田ら訳 1987 アーサー・オードヒューム：永久運動の夢，朝日新聞社，東京，5頁
*13 河宮信郎訳 1990 自然界のエネルギー貯蔵とそれを人類の利益のためにりようすること，小野周ら編：熱力学第二法則の展開，朝倉書店，東京．
*14 同上書，103頁
*15 同上書，104頁
*16 同上書，104頁
*17 同上書，106頁
*18W. S. Jevons 1965 The Coal Question, The reprint of the 3rd edition, ed. by A. Flux, Kelly, New York
*19 室田武 1985 エネルギー問題の今日的課題 32頁
*20 室田武 1990 動力則・汚染則・再生則としての第二法則，小野周ら編：熱力学第二法則の展開，朝倉書店，東京．
*21 エンゲルス 1980 マルクス・エンゲルス全集35巻，大月書店，111頁
*22 同上書，110頁
*23 エンゲルス 1972 フォイエルバッハ論，大月書店，東京，57頁
*24 室田泰弘 1984 エネルギーの経済学，日本経済新聞社，東京，257頁
*25 同上書，257頁
*26 岡ら訳 1944 シュレディンガー：生命とは何か，岩波新書，東京．
*27 室田武 1990 カルノー，クラウジウスから生命の熱学へ，小野周ら編：熱力学第二法則の展開，朝倉書店，東京，193頁
*28 玉野井芳郎 1985 熱力学にどうアプローチするか，小野周ら編：エントロピー，朝倉書店，東京，276-278頁
*29 室田武 1990 動力則・汚染則・再生則としての第二法則，小野周ら編：熱力学第二法則の展開，朝倉書店，169頁

Summary

The meaning of economical production, agricultural and industrial production, is no more than processing of natural resources and is not creating anything in terms of material and energy. In other words, it is simply consumption.

However, economical production will not last forever if it results from only consumption of natural resources.

For the reason given above, the sustainable economcal society can be regarded as the society based on agricultural production in the sense of thermodynamics, which has supported the industrial society.