

第 1 部

農業のエネルギー効率と その時間的・空間的变化



現代農業には、大量の化石燃料エネルギーが使用されており、それが農業のエネルギー効率を大きく低下させているといわれている。農業に投入されるエネルギーには、化石燃料エネルギー以外にも、太陽エネルギーや人間の労働力のエネルギーなど、様々な種類のものがある。同時に、農業で産出するエネルギーもまた、食料になるエネルギーとそうでないものがある。第 1 部では、まず、従来の研究をレビューした上で、どのエネルギーに注目すべきであるのかを検討する（第 1 章）。また、実際の算定においては、産業連関表や作物生産費などの統計資料をデータとする簡便法を使用して、複数の作物のエネルギー**効率**を複数年で推計することを試みる（第 2 章）。さらに、農業のエネルギー効率の時間的・空間的な変化の実態を、日本全体と関東地方という二つの地域スケールで分析する（第 3 章・第 4 章）。

第 1 章

農業のエネルギー効率

1.1 はじめに

1.1.1 農業のエネルギー効率

農業の本質的な目標は、太陽からのエネルギーを作物に効率的に固定させて、人間の生活に必要な食料や繊維を生産することにある。しかし、実際に農業に従事する農家は、一般的に経済的利益を追求するため、必ずしもエネルギー効率のよい生産を行うとは限らない。特に先進国における農業では、農業従事者の労働を軽減させたり、作物の生長を促進させるために、農業機械、農薬、化学肥料などの様々な農業資材が使用されている。このため、これらの農業資材に含まれる化石燃料エネルギーが、現代農業のエコロジカルな効率性を著しく低下させている (Odum, 1971)。

ここでいうエネルギー効率とは、農業に投入されるエネルギーと、そこから産出する食料エネルギーとの比率（産出エネルギー / 投入エネルギー）とする。この値が大きくなるほど、エネルギー効率の高い農業と見なすことができる。農業のエネルギー効率を大きく低下させる要因となる化石燃料エネルギーには、ガソリンや重油などの農業機械を動かす燃料に加えて、農薬や肥料などの農業資材の生産に投入されるものが含まれる。

農業のエネルギー効率は、作物の種類や生産方法の化石燃料エネルギーへの依存度によって、時間的・空間的に変化する。例えば、産業革命以前の自給的な農業と比較して、機械化が進んだ現代の農業では、1人あたりの農業従事者が耕作する面積は飛躍的に増大した。また、野菜や果樹などの園芸作物の生産では、ビニールハウスなどの施設を使用することによって、収穫時期を人工的にコントロールできるようになった。このように、現代の農業生産システムは、

人間の労働を補充する化石燃料エネルギーの投入によって維持されており、化石燃料エネルギーへの依存度が高い地域・時代ほど、農業のエネルギー効率が低くなると予想される。

農業に投入される化石燃料エネルギーと、農業のエネルギー効率の低下が社会的に注目されるようになったのは、1970年代の石油危機であった¹⁾。当時、先進国の農業はすでに、化石燃料エネルギーの投入に大きく依存しており、石油や石油製品の価格高騰によって、農産物の価格が著しく上昇した。このような社会的・経済的な背景によって、農業のエネルギー効率の低さを示した研究は、先進国における食料生産の危機を訴えた。

しかし石油危機が過ぎても、農業の化石燃料エネルギーへの依存度が低下することはなかった。それは、農業本来の目標である食料エネルギーの生産効率よりも経済的な効率性（収益）を追求しなければ、現代の農業経営を維持することが困難になるためである。日本の事例を見ても、経済の高度成長期とその直後に実施された主要な農業政策は、農道や圃場などの基盤整備と、野菜や果樹などの選択的拡大部門への集中的な支援とに分けられる（山本ほか、1987）。このような日本の農業を大きく変えてきた農業政策の目標の一つは、農業の経済的な効率性を高めることによって、農業経営に従事する人たちが、第二次・第三次産業に匹敵する収入を得られるようにすることであった。

1990年代以降、農業のエネルギー効率に関する研究は、環境と農業の相互関係が強く意識されるようになった。例えば、投入される化石燃料エネルギーの増加は、自然環境への負荷を増加させる指標として捉えられるようになった（Giampietro et al., 1992b）。また、農薬や化学肥料を介した化石燃料エネルギーの使用は、農地の土壌を改変したり、作物の生長をコントロールするという意味において、人為的な環境の改変と見なされることもある。化石燃料エネルギーの投入を減らした低投入型農法は、自然環境や人体に配慮した持続的な農業の典型とされた（Lockeretz, 1988）。

また、農業のエネルギー効率は、食料生産や人口問題と密接に関連するテーマである（Giampietro et al., 1992a）。グローバルスケールで見ると、増加を続ける人口と食生活の変化が、食料不足をもたらすことが危惧されるようになった（ブラウン、1995）。日本においても、国内で生産される食料エネルギーの

少なさが社会的な問題となっている。近年の日本における食料自給率は、熱供給量ベースで約4割と低迷している。輸入品に大きく依存した現代日本の食料供給体制は脆弱であり、エネルギー効率から見て、より効率的で持続的な農業生産の実現が望まれる。

1.1.2 農業のエネルギー効率に注目する意義

筆者が専門とする農業地理学の分野において、今日、農業のエネルギー効率に注目した研究を行う大きな意義は、(1)農業の地域的な特徴の解明と、(2)環境問題と食料生産への提言にあると考えられる。地理学は「所変われば品変わる」要因を追究する学問である。そのなかでも農業地理学は、経済地理学の一分野と位置づけられ、農業生産活動を指標として、地域の特徴や変化の要因を説明するものである。

農業地理学では、**農業**の地域的な特徴を解明するために、様々な視点と方法が用いられてきた。なかでも数多くの研究が蓄積されてきた農業地域区分に関しては、農業的土地利用の割合、ウィーバー法などの統計分析、および因子分析やクラスター分析などの多変量解析などの方法が利用されてきた（松井, 1943a, 1943b, 1943c, 1943d; 尾留川, 1950; 桜井, 1973）。その一方で、フィールドワークから得られたデータに基づいた定性的なアプローチも盛んに行われてきた。そのような研究には、産地形成論、地域システム論、フードシステム論などの視点がある（松井, 1967; 伊藤, 1993; 荒木, 2002）。さらに近年では、GISやデジタルマッピングを利用した空間分析も進んでいる（仁平, 2006）。

このように多様な農業地理学のアプローチのなかで、農業のエネルギー効率はどのように位置づけられるのだろうか。まず、農業のエネルギー効率は、栽培される作物の種類、使用される農業資材、栽培方法などの様々な要素によって導き出されるため、総合的な指標として利用できると考えられる（Nihei, 2001）。また、農業のエネルギー効率は、食料エネルギーを産出するという農業の本質に基づいたものであり、これまでの経済地理学では研究の蓄積が少なかった、地域のエコロジカルな特性を把握できるという利点もある。

次に、2番めの意義である環境問題への提言について、農業に投入される化石燃料エネルギーを量的に把握することは、環境負荷の低減に向けた基礎的な

データを提示することに結びつく。現在の産業化した農業は化石燃料エネルギーに大きく依存しており、そこから産出する作物を口にすることは「石油を食べる」ことであると形容される（マイヤーズ・ケント，2006）。農業に投入される化石燃料エネルギーの量を、農地または農作物の産地スケールで解明することは、持続的な農業の実践や、環境保全型農業への移行に向けた提言をしていくために重要である。

また、今後の食料生産に対する提言は、日本のように食料の生産基盤が脆弱な国において特に必要とされる。日本人は伝統的に、多毛作や資源の再活用などにより、小規模な農地を最大限に活用してきた（石川，2003）。しかし、経済の高度成長期以降、集約的な園芸農業が発展した一方で、小麦やコーンスターチなどの穀類と加工品が大量に輸入されるようになった。このような農業の集約化と農産物流通のグローバル化を背景に、日本の食料自給率は著しく低下した。農業のエネルギー効率が、いつどこで低下したのか、その要因は何であるかを考察することが、将来の食料生産のあり方の提言に結びつくと考えられる。

1.1.3 本研究の課題

これまで説明してきた農業の効率性に関する社会的な背景と学術的な意義をふまえて、本研究では次の三つの課題を設定する。一つめは、農業のエネルギー効率が変化した度合いを、具体的な数値で示すことである。二つめは、農業の地域差を抽出したり、農業地域区分を実施するための総合的な指標として、農業のエネルギー効率を使用することである。三つめは、エネルギー効率から見て特徴があるいくつかの作物産地を対象として、エネルギー効率の変化と産地の維持メカニズムを考察することである。

最初の課題は、環境問題や食料生産への提言に対して基礎的なデータを提供すると同時に、次の課題である農業の地域変化を分析するための基礎的な資料ともなる。本研究では、農業の時間的・空間的な変化を分析するために、複数の作物のエネルギー効率を経年的に算定することを試みる。その際、大量の数値計算に対応するために、従来の算定方法を改良した簡便法を用いる。

二つめの課題は、農業の地域的な特徴を解明するという、農業地理学の視点にも関連する。個々の作物生産のエネルギー効率は、地域的な農業生産活動に

も反映されるものであり、農業地域区分の指標として使用できると予想される。例えば、化石燃料エネルギーが大量に使用されている園芸農業が盛んな地域では、農業のエネルギー効率が低くなり、反対に、穀類やいも類などの食料供給型の作物栽培が盛んな地域では、エネルギー効率が高くなると予想される。本研究では、そのようなエネルギー効率の特徴を明示するための基準を設定する。また、地図化によって、日本の農業のエネルギー効率が時間的・空間的にいかに変化したかを示し、その要因を農業統計の分析から考察する。

三つめの特徴は、現実の作物産地は、農業的土地利用、栽培作物、農家、農業経営、農家組織などの様々な要素から構成されることである。これらの農業地域を構成する諸要素および要素間の関係は、社会的・経済的な環境の変化の下で時間とともに変化する。そして、そのような構造変化の結果、作物の産地が維持される（仁平，2007）。本研究では、エネルギー効率が低い産地から高い産地までを取り上げ、現地調査より得られたデータに基づいて、産地がいかに維持されてきたのかを考察する。それによって、統計分析だけでは説明できない地域変化のメカニズムを解明することができる。なお、本研究で取り上げる農作物と家畜の表記方法は、基本的に農林業センサスに依拠する。

1.2 従来の研究

1.2.1 農業におけるエネルギー効率の一般的な特徴

先進国においては、農業機械や農薬などの形態で大量の工業製品が農業に使用されている。そして、工業製品そのものに含まれたり、それを生産するために使用された化石燃料エネルギーが、農業のエネルギー効率を低下させる（Lockeretz, 1977）。農業の効率性を示す指標が、投入・産出エネルギー比であり、それは先進国における農業の効率の低さを示すために用いられた（Bayliss-Smith, 1982）。

例えば、Briggle (1980) によると、アメリカ合衆国ネブラスカ州における小麦生産の投入・産出エネルギー比は3.8と算定された。それに対してRappaport (1971) は、パプアニューギニアの伝統的な焼畑農業でヤム、タロ、キャッサバを生産した場合、その投入・産出エネルギー比は16.5になると算

定した。このように、先進国における現代農業と発展途上国などに残存する伝統的な作物栽培とでは、効率性を示す値が大きく異なってくる。これは、先進国においては、様々な工業製品によって人間が行う農作業、すなわち労働のエネルギーが、化石燃料エネルギーによって代替されるためである。

農業の投入・産出エネルギー比のもう一つの特徴として、作物の種類や使用される工業製品の違いによって、時間的・空間的にその値が変化することが挙げられる。例えば、アメリカ合衆国におけるとうもろこし生産の投入・産出エネルギー比の平均は、1910年には5.8であったのが、1985年には2.9にまで低下した(Pimentel et al., 1990)。その原因は、ハイブリッド種子の普及、農薬使用の増加、大型の農業機械の導入など、農家における工業製品の購入量が増加したことにあるといわれる。さらに、1970年代中期のカリフォルニア州におけるメロン生産では、投入・産出エネルギー比はわずかに0.1であった(Johnson and Chancellor, 1980)。このように、穀類やいも類と比較して野菜類や果樹は、産出エネルギーとしてカウントされる炭水化物の量が少ないため、投入・産出エネルギー比が必然的に小さくなる。

植物である農産物が炭水化物を生成するプロセスである光合成は、太陽光の強度や気温によって変化する。したがって、作物が単位面積あたりで生成するエネルギー量は、例えば低緯度で晴天率が高い地域など、直達日射量が多く、気温が高い場所ほど多くなる(Shantz and Piemeisel, 1927; Phillipson, 1966)。川喜田(1949)は、光合成に基づく農業の生産力には地域的な差異があることに注目し、樺太から台湾までの地域を八つの地区に分けて、作物の生産力指数(耕地1 haあたりの産出エネルギー)と温量指数(積算温度の一種)が正比例関係にあることを明らかにした。その結果、例えば、沖縄県における農業の生産力指数(84 MJ/ha)と温量指数(204.0度)は、それぞれ北海道の約4倍に達するというように、西南日本において作物の生産力が高くなるという傾向が明らかになった。

しかし、このような植物の生態学的な特性だけに注目して農業のエネルギー効率を論じることは適当でない。それは、現在の農業生産活動には、工業製品に含まれる化石燃料エネルギーによるエネルギー代替(energy subsidy)があるためである(Norum, 1983)。このエネルギー代替によって、現代の農業では耕

起や除草などの作業に費やされる人間の労働が大幅に減少し、1人の農業労働力で管理できる耕地の面積が飛躍的に増加した。また、人間の労働を補助するばかりでなく、ビニールハウスなどの施設によって温度や湿度をコントロールすることができ、地域の気候条件をある程度まで克服することも可能になった。農業のエネルギー代替に関して注目できることは、そのほとんどが経済的価値である通貨と交換できることである (Odum and Odum, 1976)。そのため、ジュールやカロリーなどの熱量単位ばかりでなく、通貨の単位でもエネルギー量を把握することが可能である。

1.2.2 投入・産出エネルギー比の地域的差異

次に、農業の投入・産出エネルギー比の時間的・空間的な差異に関する研究成果を概観する。それらの研究を、作物の数と地域スケールに注目して区分すると、(1)1種類または少数の商品作物を対象としたものと、(2)国家スケールまたは広域的なスケールで広がる農業を対象としたものとに分けられる。

まず、1種類の作物を対象として、投入・産出エネルギー比を算定した研究を検討する。Avlani and Chancellor (1977) は、1974年のカリフォルニア州における小麦生産の投入・産出エネルギー比を、非灌漑耕地 (nonirrigated land) と灌漑耕地 (irrigated land) を含む五つの地点のサンプル調査から算定した。その結果、非灌漑耕地の値が2.9であったのに対して、動力燃料や農業資材が使用される灌漑耕地では1.9という低い値となった。また、Hudson (1975) は、西インド諸島のバルバドス島を対象として、さとうきび生産の投入・産出エネルギー比を、機械化の程度に注目して計算した。その結果、家畜と手作業による生産方法の値は5.4であるのに対して、トラクターなどを使用する機械化した方法では2.7まで低下することが示された。

また、複数の作物の輪作体系に注目した研究では、Heichel (1978)^{*)} が、アメリカ合衆国のミネソタ州南西部のコーンベルトを対象として、とうもろこしとまめ科作物の輪作に注目した。作物の生育日数を考慮した彼の計算によると、とうもろこしを連作した場合が6.1であるのに対して、とうもろこしと大豆の輪作では6.7となった。また、とうもろこしとアルファルファの組み合わせでは8.1となり、さらに、とうもろこし・大豆・ベッチ (そらまめ科の飼料・緑

肥作物) という3作物の組み合わせでは、8.2までその値が大きくなった。このように、作物生産の投入・産出エネルギー比は、農業資材の投入の度合いと、作物の輪作体系によっても変化する。

以上の研究が事例地域の値を算定したのに対して、一つの国や広域的な地域を対象とした研究では、伝統的な農法や他国の農業と比較しながら農業の効率性を比較検討していることに特徴がある。例えば、Newcombe (1976) は、1971年の香港における農業の投入・産出エネルギー比を0.8と算定した。これは1930年代の中国時代における値が7.7であったことと比較して、農業の近代化とともにエネルギー効率が大きく低下したことを示している。

また、Zucchetto and Jansson (1979) は、北緯57度に位置するスウェーデンのゴトランド島を対象として、地域全体の耕種農業(穀類・飼料作物・野菜など)と畜産について、投入エネルギーと産出エネルギーを算定した。その結果、トラクターの導入が進んだ1972年における投入・産出エネルギー比は1.2であり、馬耕が行われていた1940年代と比較して、約10分の1にエネルギー効率が低下したことを明らかにした。しかし、野菜栽培に特化したイスラエルの値が0.4になるという Stanhill (1974) の結果と比較すれば、ゴトランド島の効率性は高いことが指摘された。

農業の投入・産出エネルギー比は、農産物の生産から消費までの様々な段階の効率性を測るためにも使用されてきた。例えば、Blaxter (1975) は、イギリスの事例により、農場から作物が出荷された時点の投入・産出エネルギー比は0.6であるのに対して、食品に加工された段階では0.3まで低下することを明らかにした。また、Deleage et al. (1979) によると、フランスにおける農業と畜産を合わせた投入・産出エネルギー比は2.4であるが、畜産部門において飼料とされる穀類の生産に使用された化石燃料エネルギーを考慮すると、その値は0.3まで低下した。また、アメリカ合衆国のフードシステムを算定した Steinhart and Steinhart (1974) によると、食料の生産から消費までの一連のシステムにおける投入・産出エネルギー比は、1910年には1.1であったのが、1970年になると0.12に低下することが明らかになった。このように、工業製品の使用増加に伴うエネルギー効率の低下は、農場での生産の現場ばかりでなく、流通から消費までの様々な段階に見られる。

以上、農業のエネルギー効率を扱った研究成果を概観したが、そのほとんどが、作物の種類や地域などの条件を限定した算定を行ってきた。その理由は、化石燃料エネルギーの投入に伴うエネルギー・フローを、なるべく正確に把握しようとしたためである。しかし、投入・産出エネルギー比の算定には、研究の目的や視点によって、異なった計算方法を考案・使用しなければならないという問題が必然的に付随する (Dovring, 1985)。例えば、農業には多種多様な製品から化石燃料エネルギーが投入されるが、どのエネルギーをカウントするのか (Jones, 1989)、また、人間の労働力のエネルギーをどのように取り扱うのか (Giampietro and Pimentel, 1990) などの問題がある。

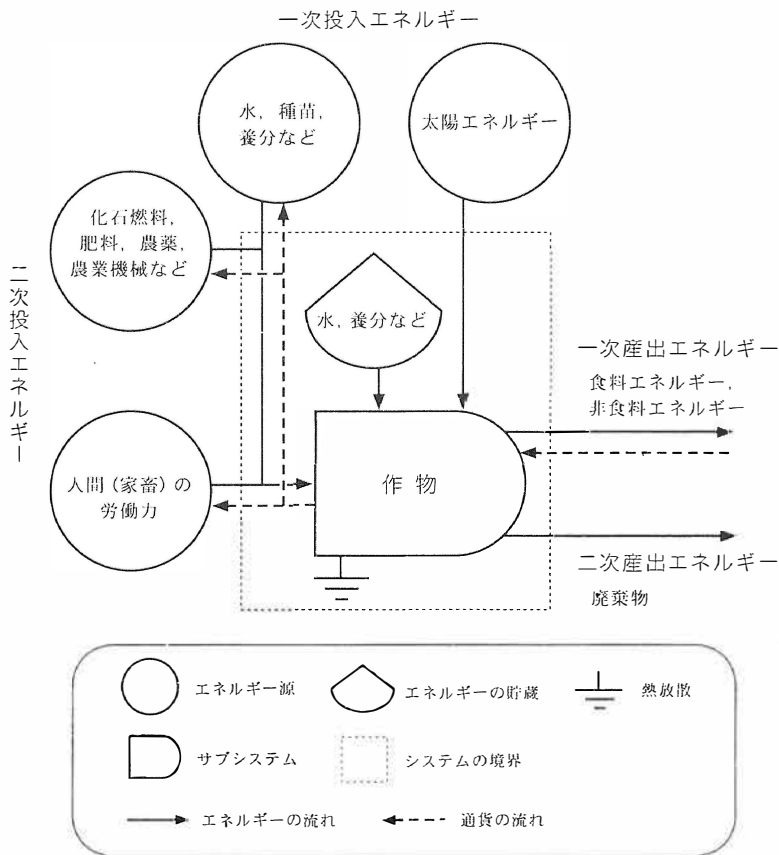
投入・産出エネルギー比の算定方法には様々なものがあるが、それらの結果は研究の目的を達成するための「最善の推定値」である (Pimentel, 1980)。また、農業のエネルギー効率に関する研究の視点は、1990年代以降になると算定の精度を高めるよりも、人間社会と自然環境とのかかわりや、農業の持続的発展などのエコロジカルな側面を強調するようになった。例えば、低投入型農法による農業の持続的発展 (Gibbon et al., 1995) や環境負荷の低減 (Soussan, 1992)、人口増加と食料生産の問題 (Giampietro et al., 1992a) などである。

1.3 農業におけるエネルギー使用

1.3.1 作物生産システム

農業のエネルギー効率を扱う本研究の課題の一つは、農業生産活動の時間的・空間的な変化の特徴を示すことである。そのためには、算定の精度を高めるよりも、複数の作物の投入・産出エネルギー比を複数年で算定できる方法を工夫する必要がある。

農業の投入・産出エネルギー比を算定するための最初の段階は、作物生産システムに注目することである (Odum and Odum, 1976)。すなわち、作物が生産されている圃場を一つのシステムとして捉え、そこに投入されるエネルギーと、そこから産出するエネルギーを把握することである。しかし、作物生産システムに関連するエネルギーの種類は多く、その流れも複雑であるため、どのエネルギーに注目して算定するかをあらかじめ決めておく必要がある。ここでは、



第1図 作物生産システムとエネルギー・フロー

作物生産システムのエネルギー収支を模式的に示した第1図に基づいて、本研究の算定で注目するエネルギーの種類を説明する。なお、畜産については、輸入飼料の取り扱いが難しいことから、本研究では算定の対象外とする。

個々の圃場は、作物生産の基本的な単位であり、作物生産システム (crop systems) として解釈することができる (Loomis and Connor, 1992)。作物生産システムは、ある地方や国などの様々なスケールで展開する作物生産を構成しているサブシステムでもある。また、作物生産システムは、外部とのエネルギー交換によって維持されるオープンシステムと解釈される。その構成要素は、圃

場で作物生産に従事したり、圃場を管理する人の意思決定によって、直接的・間接的に制御される。

作物生産システムを構成する要素は、作物、土壌、水分などの自然的な要素が主体となる。このシステムは人間の管理によってコントロールされるため、外部から人為的に投入（インプット）される要素もある。例えば、土壌中の水分を作物の生育に適した状態に調整するための灌漑、または、農業従者の労働を補助する農業機械の投入などである。また、作物生産システムからは、食料や繊維などの産出（アウトプット）がある。産出には、ある種の食料など、人がその場で摂取できるものもあるが、その多くは、第二次産業の原料や第三次産業の商品として、産地から離れた場所で加工される。

作物生産システムからの産出は、投入の条件によって地理的に異なってくる。例えば、降水量や日射量などの気候条件、耕土の肥沃度などの土壌条件によって生産できる作物の種類が変化する。また、圃場の地代などの経済的な条件によっても、生産物の種類が規定される。圃場の地代は、都市から離れた場所であったり、1人で管理できる面積が広くなるほど低くなる。経済地理学的には、地代が低い地域ほど、作物生産が粗放的になり、面積あたりの経済的な産出が低下する傾向がある（山本，1994）。

1.3.2 作物生産システムのエネルギー・フロー

ここで、作物生産システムに投入されるエネルギーと、そこから産出されるエネルギーの種類を説明する。まず、作物生産システムに投入されるエネルギーは、一次投入エネルギーと二次投入エネルギーとに分けられる（第1図）。一次投入エネルギーは、作物などの植物に直接的に取り込まれるものであり、代替不可能なエネルギーである。具体的には、太陽エネルギー、水、各種ミネラルなどの養分が相当する。植物である種苗も、作物生産システムに投入される一次投入エネルギーと解釈することができる。一次投入エネルギーは、基本的には1回の生産で消費されて、その一部が収穫物となって、産出エネルギーになる。ただし、土壌に蓄えられた水分や養分など、次の生産に持ち越される要素は、システム内のエネルギー貯蔵と見なされる。

二次投入エネルギーは、人工的に圃場に投入されるものであり、ある程度の

代替が可能なエネルギーである (Ittersum and Rabbinge, 1997)。具体的には、人間や家畜の労働力のほか、それらを補助する農業や農業機械などの工業製品を挙げることができる。これらのエネルギーは、農業の単位面積あたり、または、単位労働時間あたりの生産性を高めるために投入されるものである。特に工業製品は、化石燃料エネルギーの投入としてカウントすることが可能である。二次投入エネルギーは、作物生産システム内で植物体に固定されることはなく、熱放散 (heat sink) として消費されると解釈される。

本研究で注目する投入エネルギーは、二次投入エネルギーの一部である化石燃料エネルギーである。作物生産に投入される化石燃料エネルギーの特徴は、(1) 通貨によって算定できること、(2) 作物生産システムの種類によってその投入量が異なることにある。まず、(1)の特徴として、作物生産システムに投入されるエネルギーとそこから産出されるエネルギーの一部は、通貨に交換される。したがって、エネルギーとは反対方向に流れる通貨をエネルギーに換算できれば、エネルギー量を把握することが可能である。また、一次投入エネルギーは基本的に代替不可能なエネルギーであるが、種苗や灌漑用水などの作物生産システムで使用される製品や施設に対しては、その製造や輸送の過程で使用された化石燃料エネルギー（二次投入エネルギー）を算定することが可能である。

また、(2)の特徴として、作物生産に投入される化石燃料エネルギーは、工業製品への依存度によって変化する。例えば、同じ種類の野菜であっても、自給的な栽培方法と商品として出荷するための栽培とでは、使用する工業製品の種類と金額が異なってくる。さらに、ビニールハウスなどの施設栽培では、単位面積あたりに使用される化石燃料エネルギーが莫大になる。このように投入される化石燃料エネルギーは、国家スケールの工業化の段階や農家個人の意思決定などに応じて時間的・空間的に変化するものである。そのため、投入化石燃料エネルギーは、農業のエコロジカルな特徴ばかりでなく、地域的な作物生産システムの特徴を示す指標として使用することが可能である。

次に、作物生産システムからの産出エネルギーもまた、投入エネルギーと同様に、一次産出エネルギーと二次産出エネルギーとに分けられる。一次産出エネルギーは、収穫物に固定されたエネルギーであり、食料エネルギーと非食料

エネルギーとに分けられる。一次産出エネルギーは、食料として人間が直接消費したり、他産業の原料として使用される。二次産出エネルギーは、収穫物のなかでも廃棄されてしまう部分や、経済的な取引の対象とされず、通貨と交換されないエネルギーである。そのため、二次産出エネルギーを正確に推計することは難しい。

本研究で注目する産出エネルギーは、一次産出エネルギーの一部である食料エネルギーとする。食料エネルギーは、人間の生命を維持するという点で、農業の本質に結びつく重要な生産物である。農産物に固定されたエネルギーのなかで食料エネルギーに変換されるのは、人間の体内で消化・吸収される部分である。具体的には、収穫物の可食部分の質量とそこに含まれる熱量により、食料エネルギーを算定することが可能である。すべての農産物にエネルギーは含まれるが、人間の体内での消化・吸収率が定まっていない品目については、食料エネルギーはないものと解釈する²⁾。

1.3.3 投入エネルギーの種類とその限定

前述のように、作物生産システムは、外部とエネルギー交換をしながら自らの機能を維持するオープンシステムと解釈できる。オープンシステムのエネルギー収支は、熱力学の第二法則によって説明できる (Bertalanffy, 1968)。そのため、作物生産システムのなかで熱放散するエネルギーを除外すれば、産出エネルギーは投入エネルギーよりも必ず少なくなる。しかし、従来の研究成果を見ても分かるように、作物生産システムの投入・産出エネルギー比は、しばしば 1.0 を上回る。その理由は、投入・産出エネルギー比の算定には、すべての投入エネルギーがカウントされるわけではないためである。本項では、作物生産システムに投入されるエネルギーのなかでも、どれを算定に含めるかを検討する。

農作物にとって最も重要なエネルギーは、一次投入エネルギーの太陽エネルギーである (第 1 図)。植物は光合成によって、太陽エネルギーと水分と二酸化炭素より、ブドウ糖を作り出す。さらに、ブドウ糖を炭水化物、タンパク質、ビタミン類などの養分に転換する。このように太陽エネルギーは、光合成という生化学反応を促進させるという意味で重要な要素であるが、作物生産の

投入・産出エネルギー比の計算では、その熱量は省略されることがほとんどである。その理由の一つは、植物の光合成率の計算が複雑であるためである。光合成率は、植物の種類、温度、相対照度 (relative light intensity) などによって変化するが、太陽エネルギーは可食部分以外にも固定されるため、作物の光合成率と産出食料エネルギーの量は必ずしも比例しない³⁾。

太陽エネルギーを算定に含めないもう一つの理由は、他の投入エネルギーと比較して、エネルギー量が莫大であるためである。地表に到達する太陽エネルギーを算定に含めた場合、他のエネルギーが極めて小さく評価されてしまう。例えば、東京における1年間の全天日射量は10aあたり420万MJに達するが(資料：国立天文台、1996)、その条件下で水稻を栽培した場合、可食部分に固定される太陽エネルギーは全天日射量の0.19%にすぎなくなる。本研究のねらいの一つは、化石燃料エネルギー投入の作物生産へのインパクトを解明することにあるため、太陽エネルギーは計算に含めないことにする。

次に、一次投入エネルギーと解釈される種苗、水、養分を検討する。まず、種苗は、圃場に定植されて作物となって生長し、それ自体がエネルギーを含む要素であるため、作物生産システムのサブシステムになる(第1図)。しかし、種子と種苗そのものに含まれるエネルギーを作物ごとに考慮すると、投入エネルギーの算定が非常に複雑になる。そのため本研究では、種苗に含まれる自然のエネルギーは考慮せず、種苗の生産と輸送に使用された化石燃料エネルギーを算定に含めることにする。現在では、ほとんどの農家が種苗を種苗会社や農協から購入しているため、種苗は工業製品と同等に扱うことができる。

作物生産に使用される水に含まれると解釈できる化石燃料エネルギーは、灌漑施設の建設費や維持費から算定することが可能である(吉野, 1980)。ただし、このような農業水利に関するエネルギー使用は、人間の労働力や工業製品によるエネルギー使用が複雑に絡み合うため、その内容は漠然としている。そのため本研究では、作物生産システムに投入される水のエネルギーを、投入・産出エネルギー比の計算から除外することにする。

一次投入エネルギーに区分される養分について、圃場に投入される肥料の主な元素は、窒素・リン酸・カリである。植物は根から吸収する窒素からタンパク質を合成するため、肥料の主元素のなかでも、窒素を含むものは作物の生長

に不可欠である。これらの元素を含む化学肥料や堆肥も、それら自体がエネルギーを含むものである。しかし本研究では、種苗と同じ理由により、化学肥料や堆肥を工業製品と見なしてエネルギー量を算定することにする。したがって作物生産に投入される養分として、農家外部から購入された肥料や堆肥に含まれると解釈できる化石燃料エネルギーを、投入エネルギーとして考慮することにする。

次に、二次投入エネルギーの一部である工業製品を検討する。農業機械、農薬、化学肥料、動力用燃料などの工業製品は、現在の農業のエネルギー効率に大きな影響を与える要素である。工業製品に含まれるエネルギーは、製造や輸送過程で使用された化石燃料エネルギーから算定する。また、農業機械の仕事量についても、その運転に使用された石油製品や電力などからエネルギー量を算定することが可能である。

二次投入エネルギーの一部である人間の労働力と畜力は、本研究では投入エネルギーの算定に含めないことにする。人間の労働力のエネルギーは、労働者がおかれた社会・経済的な生活水準によって大きく変化する (Heemst et al., 1981)。すなわち、人間は1日約 10MJ (2,400kcal) の最低限の食料エネルギーだけで生活しているのではなく、衣服、家財、自動車などの様々な工業製品のエネルギーに大きく依存している (Giampietro et al., 1993)。例えば、アメリカ合衆国における農業従事者1人の1日の労働エネルギーは 594MJ に相当する (Fluck, 1981)。また、Giampietro and Pimentel (1990) によると、先進国における農業従事者の労働力は1時間あたり 151MJ に換算することができる。このような人間が消費する工業製品以外でも、人間の労働力のエネルギーは、年齢や性別などの個人差によっても大きく異なるため、投入・産出エネルギー比の算定には含めるべきでない (Jones, 1989)。人間の労働力は、労働時間などの他の指標で示したり、工業製品の投入が少ない自給的な農業において考慮すべきである。

家畜による耕起や運搬などの農作業は、現在の日本の作物生産ではほとんど行われていない。日本において家畜が重要な農業労働力であったのは、高度経済成長以前の 1950 年代までであった。当時編纂された労働医学心理学研究所の報告者には、農業従事者が1日で消費する食料のエネルギー量のほかに、畜

力の使用量が記録されている（労働医学心理研究所，1951）。それによると，牛または馬による畜力は，水稻作と麦作の耕耘と整地のために使用されていた。

1.4 第1章のまとめ

農業の本質的な目標は，太陽エネルギーを効率的に作物に固定させて，人間の体温を維持するための食料や繊維，また，他の産業で使用される製品を作ることにある。しかし，農家は通常，高い収益を得られる経営形態を採用するため，必ずしもエネルギー効率の高い農業生産活動を営むとは限らない。特に先進国においては，作物の生長を促進させたり，人間の労働を軽減させるために，化学肥料，農薬，農業機械などの工業製品が大量に投入されている。これらの工業製品の形態で投入される化石燃料エネルギーによって，現代の農業のエネルギー効率は非常に低くなっているといわれている。

今日の日本における農業の特徴をエネルギー効率の視点で捉えることの意義は，農業の地域差の解明と，環境問題や今後の食料生産に提言していくことにある。これらをふまえて，本研究では，次の三つの課題を設定した。すなわち，(1) 日本農業のエネルギー効率が低下した度合いを具体的な数値で示すこと，(2) 農業の地域差を説明したり，農業地域区分を実施するための総合的な指標として，農業のエネルギー効率を使用すること，(3) 日本における農業のエネルギー効率が低下した要因を，産地スケールにおける農業の実態に基づいて考察することである。

作物生産のエネルギー効率を算定する場合，どのエネルギーをカウントするのかを設定する必要がある。本研究では，圃場スケールの作物生産システムに注目して，そこに投入されるエネルギーと，そこから産出するエネルギーを把握することにした。その結果，二次投入エネルギーの一部である投入化石燃料エネルギーと，一次産出エネルギーの一部である産出食料エネルギーに注目することが有効であると考えられる。ここでいう投入化石燃料エネルギーとは，農薬，肥料，動力燃料，農業機械など，エネルギー量が明確に算定できる農業資材である。また，種苗についても，その製造と輸送に使用される化石燃料エネルギーを算定することにする。これら農業資材のエネルギーは，投入金額か

ら推定することが可能である。また、産出食料エネルギーとは、農産物のなかでも食料エネルギーに換算できるものであり、質量あたりの熱量から直接的に算定することが可能である。

注

- 1) 石油危機が起こった1970年代と、その後の1980年代にかけて、作物生産を含めて化石燃料エネルギーの使用と産業との関係をテーマにした多くの研究が蓄積された。その端緒は、1971年に発行された *Scientific American* 誌に、化石燃料エネルギーに関するテーマの特集が組まれたことにある (Starr, 1971)。その後に発表されたよく知られている研究テーマとして、(1) 国の経済活動と化石燃料エネルギー使用の相関関係 (Costanza, 1980)、(2) エネルギー代替による食料政策への提言 (Slessor, 1973; Baughman and Hnyilicza, 1975)、(3) 産業連関分析による将来的な化石燃料エネルギーの使用予測 (Carter, 1974)、(4) エネルギーの節約と時間の節約に関するジレンマ (Weinberg, 1977)、(5) 油料種子による燃料の代替 (Stewart et al., 1981) などを挙げることができる。
- 2) 日本食品標準成分表によると、人間の体内での消化・吸収率が定まっていない農産物には、きのこなどの菌類や、のりなどの藻類が該当する (資料: 科学技術庁資源調査会, 1982)。
- 3) きびやもろこしなどの禾本日 (gramineous) に多い C4 植物 (dicarboxylic acid cycle plant) は、高い光合成率をもつことで知られる (Krebs, 1972)。

資料

科学技術庁資源調査会 (1982): 『四訂 日本食品標準成分表 (二版)』。
 国立天文台 (1996): 『理科年表 平成9年』。

文献

荒木一視 (2002): 『フードシステムの地理学的研究』 大明堂, 265p。
 石川英輔 (2003): 『大江戸エコロジー事情』 講談社, 361p。
 伊藤貴啓 (1993): 愛知県豊橋市におけるつま物栽培地域形成の地理学。地学雑誌, **102**, 28-49。
 川喜田二郎 (1949): カロリー計算による土地生産力の量的表現—主として日本列島の場合—。社会地理, **19**, 6-10。
 桜井明久 (1973): 因子分析法および数値分類法による関東中央部の農業地域区分。地理学評

- 論, 46, 826-849.
- 仁平尊明 (2006): 農業経営に関する総合的な指標からみた日本の農業地域区分—多変量解析と GIS の適用—. 人文地理学研究, 30, 69-98.
- 仁平尊明 (2007): 地域は変化する. 松岡憲知・田中 博・杉田倫明・村山祐司・手塚 章・恩田裕一編『地球環境学—地球環境を調査・分析・診断するための 30 章—』古今書院, 106-109.
- 尾留川正平 (1950): 新基準による日本農業地域区分の体系 (第一報). 大塚地理学会編『田中啓爾先生記念大塚地理学会論文集』日黒書店, 237-244.
- ブラウン, L. R. 著, 今村奈良臣訳 (1995): 『だれが中国を養うのか? 迫りくる食糧危機の時代』ダイヤモンド社, 198p.
- マイヤーズ, N.・ケント, J. 監修, 竹田悦子・藤本知代子・桑平幸子訳 (2006): 『65 億人の地球環境』産調出版, 304p.
- 松井 勇 (1943a): 農業経営組織による郡の分類—昭和 13 年農家調査の分布解析の I. 地理学評論, 19, 1-16.
- 松井 勇 (1943b): 農業経営組織による我が内地地域区分—昭和 13 年農家調査の分布解析の 2 (1). 地理学評論, 19, 293-314.
- 松井 勇 (1943c): 農業経営組織による我が内地地域区分—昭和 13 年農家調査の分布解析の 2 (2). 地理学評論, 19, 396-414.
- 松井 勇 (1943d): 農業経営組織による我が内地地域区分—昭和 13 年農家調査の分布解析の 2 (3). 地理学評論, 19, 451-469.
- 松井貞雄 (1967): 渥美半島における温室園芸の地域形成と地域分化. 地理学評論, 40, 409-425.
- 山本正三・秋本弘章・村山祐司 (1988): 関東地方の農業地域構造. 人文地理学研究, 12, 139-163.
- 山本正三・北林吉弘・田林 明編 (1987): 『変貌する日本農村の地域構造』古今書院, 423p.
- 山本健児 (1994): 『経済地理学入門—地域の経済発展—』大明堂, 210p.
- 吉野昭朗 (1980): 農産物生産費調査費目のエネルギー濃度の産出. 茅 陽一編『エネルギー・アナリシス』電力新報社, 135-158.
- 労働医学心理学研究所編 (1951): 『水田単作地と二毛作地における農民の労働と栄養に関する調査報告』農林省農業改良局統計調査部, 218p.
- Avlani, P. K., and Chancellor, W. J. (1977): Energy requirements for wheat production and use in California. *Transactions of the ASAE*, 20, 429-437.
- Baughman, M. L. and Hnyilicza, E. (1975): Energy systems: modeling and policy planning. *Proceedings of the IEEE*, 63, 475-483.
- Bayliss-Smith, T. P. (1982): *The ecology of agricultural systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 112p.

- Bertalanffy, L. V. (1968): *General system theory: foundations, development, applications*. New York: G. Braziller, 295p. 長野 敬・太田邦昌訳 (1973): 『一般システム理論—その基礎・発展・応用—』みすず書房, 288p.
- Blaxter, K. L. (1975): The energetics of British agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **26**, 1055-1064.
- Briggle, L. W. (1980): Introduction to energy use in wheat production. In “*Handbook of energy utilization in agriculture*” (edited by Pimentel, D.), Boca Raton, Florida: CRC Press, 109-116.
- Carter, A. P. (1974): Applications of input-output analysis to energy problems. *Science*, **184**, 325-329.
- Costanza, R. (1980): Embodied energy and economic valuation. *Science*, **210**, 1219-1224.
- Deleage, J. P., Julien, J. M., Sauget-Naudin, N. and Sluchon, C. (1979): Eco-energetics analysis of an agricultural system: the French case in 1970. *Agro-Ecosystems*, **5**, 345-365.
- Dovring, F. (1985): Energy use in United States agriculture: A critique of recent research. *Energy in Agriculture*, **4**, 79-86.
- Fluck, R. C. (1981): Net energy sequestered in agricultural labor. *Transactions of the ASAE*, **24**, 1449-1455.
- Giampietro, M., Bukkens, S. G. F. and Pimentel, D. (1992a): Limits to population size: three scenarios of energy interaction between human society. *Population and Environment*, **14**, 109-131.
- Giampietro, M., Bukkens, S. G. F. and Pimentel, D. (1993): Labor productivity: a biophysical definition and assessment. *Human Ecology*, **21**, 229-260.
- Giampietro, M., Gerretelli, G. and Pimentel, D. (1992b): Energy analysis of agricultural ecosystem management: human return and sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **38**, 219-244.
- Giampietro, M. and Pimentel, D. (1990): Assessment of the energetics of human labor. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **32**, 257-272.
- Gibbon D., Lake, A. and Stocking, M. (1995): Sustainable development: a challenge for agriculture. In “*People and environment*” (edited by Morse, S. and Stocking, M.), London: UCL Press, 31-68.
- Heemst, H. D. van, Nerkelijn, J. J., and van Keulen, H. (1981): Labour requirements in various agricultural systems. *Quarterly Journal of International Agriculture*, **120**, 178-201.
- Heichel, G. H. (1978): Stabilizing agricultural energy needs: role of forages, rotations, and nitrogen fixation. *Journal of Soil and Water Conservation*, **33**, 279-282.
- Hudson, J. C. (1975): Sugarcane: its energy relationships with fossil fuel. *Span*, **18**, 12-14.
- Ittersum, M. K. van and Rabbinge, R. (1997): Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, **52**, 197-208.
- Johnson, H., Jr. and Chancellor, W. J. (1980): Cantaloupes. In “*Handbook of energy utilization in agriculture*” (edited by Pimentel, D.), Boca Raton, Florida: CRC Press, 209-217.

- Jones, M. R. (1989): Analysis of the use of energy in agriculture: approaches and problems. *Agricultural Systems*, **29**, 339-355.
- Krebs, C. J. (1972): *Ecology: the experimental analysis of distribution and abundance*. New York: Harper and Row, 694p.
- Lockeretz, W. ed. (1977): *Agriculture and energy*. New York: Academic Press, 750p. 高橋保夫監訳『食糧生産とエネルギー』農林統計協会, 438p.
- Lockeretz, W. (1988): Open questions in sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, **3**, 174-181.
- Loomis, R. S. and Connor, D. J. (1992): *Crop ecology: productivity and management in agricultural systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 538p. 堀江 武・高見晋一監訳『食料生産の生態学—環境問題の克服と持続的農業に向けて—1・2・3』農林統計協会, 180p., 257p., 263p.
- Newcombe, K. (1976): Energy use in Hong Kong food system. *Agro-Ecosystem*, **2**, 253-276.
- Nihei, T. (2001): Changes in the energy efficiency of regional crop production in Japan. *Geographical Review of Japan*, **74B**, 47-61.
- Norum, L. (1983): Problem formulation and quantification in energy analysis. *Energy in Agriculture*, **2**, 1-10.
- Odum, E. P. (1971, 初版 1953). *Fundamentals of ecology*, 3rd ed. Philadelphia: Saunders, 514p. 三島次郎訳 (1974, 1975): 『生態学の基礎 上・下』培風館, 367p., 749p.
- Odum, H. T. and Odum, E. C. (1976): *Energy basis for man and nature*. New York: McGraw-Hill, 197p. 市村俊英監訳 (1978): 『人間・自然・エネルギー』共立出版, 307p.
- Phillipson, J. (1966): *Ecological energetics*. London: Edward Arnold.
- Pimentel, D. (1980): *Handbook of energy utilization in agriculture*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 475p.
- Pimentel, D., Dazhong, W. and Giampietro, M. (1990): Technological Changes in Energy Use in U. S. Agricultural production. In “*Agroecology: researching the ecological basis for sustainable agriculture*” (edited by Gliessman, S. R.), New York: Springer-Verlag, 305-321.
- Rappaport, R. A. (1971): The flow of energy in an agricultural society. *Scientific American*, **225**(3), 117-132.
- Shantz, H. L. and Piemeisel, L. N. (1927): The water requirement of plants at Akron, Colo. *Journal of Agricultural Research*, **34**, 1093-1190.
- Slessor, M. (1973): Energy subsidy as a criterion in food policy planning. *Journal of Science of Food and Agriculture*, **24**, 1193-1207.
- Stanhill, G. (1974): Energy and agriculture: a national case study. *Agro-Ecosystems*, **1**, 205-217.
- Starr, C. (1971): Energy and power. *Scientific American*, **225**(3), 37-49.

- Steinhart, J. S. and Steinhart, C. E. (1974): Energy use in the U.S. food system. *Science*, **184**, 207-316.
- Stewart, G. A., Rawlins, W. H. M., Quick, G. R., Begg, J. E. and Peacock, W. J. (1981): Oilseeds as a renewable source of diesel fuel. *Search*, **10**, 107-115.
- Soussan, J. G. (1992): Sustainable development. In “*Environmental issues in the 1990s*” (edited by Mannion, A. M. and Bowlby, S. R.), Chichester: John Wiley, 21-36.
- Weinberg, A. M. (1977): Of time and the energy wars. *Nature*, **269**, 638.
- Zucchetto, J. and Jansson, A. (1979): Total energy analysis of Gotland's agriculture: a northern temperate zone case study. *Agro-Ecosystems*, **5**, 329-344.

