

日本における作物生産の投入・産出エネルギーの算定

仁 平 尊 明

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| I 序論 | IV 投入化石燃料エネルギーの算定 |
| II 従来の研究 | IV-1 化石燃料のエネルギー集中度 |
| II-1 投入産出エネルギー比の特色 | IV-2 工業製品のエネルギー集中度 |
| II-2 エネルギー効率に関する研究の展開 | IV-3 農業資材のエネルギー集中度 |
| III 算定の枠組 | V 作物生産の投入産出エネルギー比 |
| III-1 作物生産システムとエネルギーの流れ | V-1 1990年の投入産出エネルギー比 |
| III-2 投入エネルギーの種類とその限定 | V-2 1970-1985年の投入産出エネルギー比 |
| | VI 結論 |

キーワード：投入化石燃料エネルギー，産出食料エネルギー，積み上げ法，産業連関分析，エネルギー効率

I 序 論

農業の本質的な目標は、太陽エネルギーを作物に固定させて、食料や繊維、また、他の産業で使用される製品を効率的に生産することである。しかし、農家は、高い収益を得られる経営を採用するため、必ずしもエネルギー効率の高い生産を行うとは限らない。とくに先進国においては、作物の生長を促進させたり、労働を軽減させるために、農業機械、農薬、化学肥料などの工業製品が大量に使用されている。このような工業製品の形態で投入される化石燃料エネルギーが、農業のエネルギー効率を大きく低下させる原因となっている (Odum, 1971)。

自然の土地組成を改変し、動植物の成長を人工的に操作するという意味において、圃場への化石燃料エネルギーの投入は、環境負荷を増加させている (Giampietro, Gerretelli and Pimentel, 1992)。化石燃料エネルギーの投入を押さえた低投入農業は、自然環境に配慮した持続的な農業の一形態であり (Lockeretz, 1988)、その実践に向けた最初の段階が、農業生産活動のエネルギー効率を具体的な数値で示すことにある。

このような問題意識から、本報告は、エネルギー効率という視点から地域的な環境問題に提言していく学問の端緒として、作物生産のエネルギー効率を算定するための簡便法を提示することを目的とする。本研究でいうエネルギー効率とは、作物生産に投入される化石燃料エネルギーと、そこから産出する食料エネルギーとの比率 (産出/投入) とする。したがって、この投入産出エネルギー比の値が大きいくほど、エネルギー効率が高い作物生産であるといえる。

II 従来の研究

II-1 投入産出エネルギー比の特色

作物生産の投入産出エネルギー比は、先進工業国における作物生産の効率の低さを示す指標として使用されてきた (Lockeretz, 1977; Bayliss-Smith, 1982). 例えば、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であるが (Briggle 1980)、パプアニューギニアの焼き畑において、ヤム、タロ、キャッサバを栽培した場合の値は16.5となる (Rappaport, 1971).

作物生産の投入産出エネルギー比は、投入される工業製品の量・質や作物の種類によって時間的・空間的に変化する。例えば、アメリカ合衆国全体のトウモロコシ栽培の投入産出エネルギー比は、1910年には5.8であったが、農業機械、農薬、ハイブリッド種子などの工業製品の使用量が増加したことにより、1985年には2.9に低下した (Pimentel et al., 1990). また、1970年代中期のカリフォルニア州におけるメロン栽培の投入産出エネルギー比は0.1であった (Johnson and Chancellor, 1980). このように、エネルギーとしてカウントされるブドウ糖が少ない野菜類や果樹は、穀類やイモ類よりも投入産出エネルギー比が必然的に小さくなる。

ところで、光合成は、太陽エネルギーを植物体に固定するプロセスであり、光の強度や気温によって変化する。したがって、生態学的には、直達日射量が多い低緯度の地域ほど、単位面積あたりのエネルギー生産量が高くなる (Shantz and Piemeisel, 1927; Phillipson, 1966). 川喜田 (1949) は、樺太から台湾までの地域を8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、沖縄県における農業の生産力指数の84MJ/haという値と温量指数の204.0度という値は、それぞれ北海道の約4倍であった。

しかし、農業生産活動には人間の労働力や工業製品に含まれる化石燃料によるエネルギー代替 energy subsidy があるため、植物の生態学的な特性だけに注目して、作物生産のエネルギー効率を議論するのは不十分である (Norum, 1983). 工業製品の形態で投入される化石燃料エネルギーは、高緯度の地域においても生産性の高い農業を可能にした。さらに、経済的な価値を持つのは、通貨と交換される部分に固定された太陽エネルギーであることも理由の一つである (Odum and Odum, 1976).

II-2 作物生産のエネルギー効率に関する研究の展開

作物生産のエネルギー効率に関する研究は、1970年代のオイル危機以降、化石燃料エネルギーの投入に重点が置かれるようになった。その多くは、一種類または少数の商品作物を取り上げたり (Avlani and Chancellor, 1977; Hudson, 1975; Heichel, 1978)、一国全体または広域的な地域を対象とした化石燃料エネルギー使用を議論している (Steinhart and Steinhart, 1974; Blaxter, 1975; Newcombe, 1976; Deleage et al., 1979; Zucchetto and Jansson, 1979).

まず、これらの研究の中でも、一種類か少数の作物生産を対象としたものを検討する。Avlani and Chancellor (1977) は、1974年におけるカリフォルニアの小麦生産の投入産出エネルギー比を5地点

のサンプル調査から計算し、州の平均では灌漑耕地で1.9、非灌漑耕地で2.9であることを明らかにした。Hudson (1975) は、バルバドス島におけるサトウキビ生産の投入産出エネルギー比を計算し、手作業と畜力を主体とした栽培方法の値は5.4であり、機械化した栽培方法では2.7であることを明らかにした。また、Heichel (1978) は、アメリカ合衆国ミネソタ州南西部においてトウモロコシとマメ科作物を輪作した場合の投入産出エネルギー比を、作物の生育日数に注目して計算した。その結果、トウモロコシの連作で6.1、トウモロコシとダイズの輪作で6.7、トウモロコシとアルファルファの輪作で8.1、トウモロコシ・ダイズ・ベッチ（ソラマメ科の飼料・緑肥作物）の輪作で8.2であった。

これらの研究が現代の作物生産の非効率性を特定の地域の事例から明らかにしたのに対して、広域的な地域に注目した研究の多くは、伝統的な農法や他国の事例と比較しながらエネルギー効率を議論した。Newcombe (1976) は、1971年の香港における作物生産の投入産出エネルギー比は0.8であり、1930年代の中国時代の7.7と比較してエネルギー効率が大きく低下したことを明らかにした。また、Zucchetto and Jansson (1979) は、スウェーデンのゴトランド島を取り上げ、1972年のトラクターを使用した作物生産の投入産出エネルギー比は1.2であり、Stanhill (1974) によるイスラエルの露地野菜に特化した作物生産の0.4と比較して3倍の値であることを指摘した。

さらに、作物生産のエネルギー効率を示す値は、生産から消費までのどの段階を算定するかによっても変化する。Blaxter (1975) は、イギリス全体の作物生産について、農場から農産物が出荷された時点の投入産出エネルギー比は比率は0.6であり、それが食品に加工されると0.3まで低下することを明らかにした。Deleage et al. (1979) によると、フランスにおける農業の投入産出エネルギー比は2.4であるが、畜産によって消費される穀類に含まれるエネルギーを差し引くと、0.3まで低下する。また、Steinhart and Steinhart (1974) は、アメリカ合衆国のフードチェーン、すなわち、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だったのが、1970年になると0.12まで低下すると指摘した。これらの結果が示すように、農業の工業化に伴うエネルギー効率の低下は、生産から消費まですべての段階にあてはまる。

このように、作物生産のエネルギー効率に関する研究の多くが、作物の種類、生産地域、生産から消費までの段階を限定したのは、エネルギーフローを正確に捉えようとしたためである。しかし、投入産出エネルギー比の分析には、研究の目標によって計算方法が異なるという問題が必然的に附随する (Dovring, 1985)。例えば、どの化石燃料エネルギーを考慮するか (Jones, 1989)、人間の労働力のエネルギーをいかに扱うか (Giampietro and Pimentel, 1990) などである。投入産出エネルギー比の算定手順には様々なものがあるが、それらの結果は研究目的を達成するために考案された方法による「最善の推定値」なのである (Pimentel, 1980)。

近年における作物生産のエネルギー効率を扱った研究は、算定の精度を高めるよりも、人間社会と自然環境との関わりなど、エコロジカルなテーマや持続的発展に関する問題を強調するようになった。例えば、低投入農法による農業の持続的発展 (Gibbon et al., 1995)、環境負荷の軽減 (Soussan, 1992)、人口増加と食料生産の問題 (Giampietro, Bukkens and Pimentel, 1992) などにおいて、農業のエネルギー効率を援用した議論がなされている。

なお、1970年代から1980年代の初頭にかけては、化石燃料エネルギーを取り扱った様々な研究が行われており、作物生産のエネルギー効率はその一端にすぎない。1971年には、Scientific American誌でエネルギー特集が組まれている (Starr, 1971)。また、当時のエネルギー効率に関する興味深い研究テーマとして、産業全体の経済活動と投入化石燃料エネルギーとの相関関係 (Costanza, 1980)、エネルギー政策や食料政策への提言 (Slessor, 1973; Baughman and Hnyiliczka, 1975)、産業連関分析による化石燃料エネルギー使用の予測 (Carter, 1974)、エネルギー節約と時間節約の両刀論法 (Weinberg, 1977)、油料種子による燃料の代替 (Stewart et al., 1981) などの特記できる。

Ⅲ 算定の枠組

Ⅲ-1 作物生産システムとエネルギーの流れ

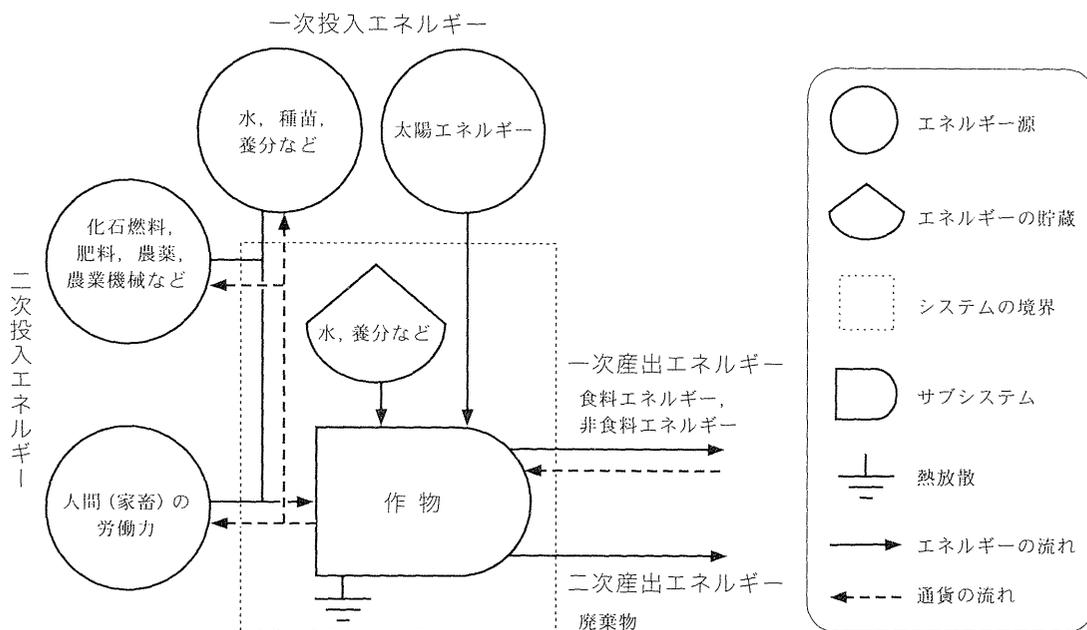
作物生産の投入産出エネルギー比を算定するための最初の段階は、作物生産を一つのオープンシステムと考えて、そのエネルギー収支を捉えることである (Odum and Odum, 1976)。しかし、生産システムを維持するエネルギーの種類は多く、その流れも複雑であるため、あらかじめどのエネルギーに注目するかを定義する必要がある。本節では、概念図を示すことにより、作物生産の投入産出エネルギー比の算定で注目すべきエネルギーを述べる。

農業生産システムを構成する基本要素は、個々の圃場である。地域的な農業生産システムのサブシステムであると解釈できる圃場は、作物生産システム crop system と呼ばれる (Loomis and Connor, 1992)。作物生産システムは、作物や土壌などの圃場内に配置される物質ばかりでなく、水分、肥料、耕作方法、輪作体系など、人為的に投入される農業資材や栽培技術によっても構成される。作物生産システムは外部とエネルギー交換によって維持されるオープンシステムであり、その構成要素は耕作者の意思決定によって直接的に制御される。

作物生産システムの投入エネルギーは、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植物体に直接取り込まれるものであり、太陽エネルギー、水、養分など、代替不可能なエネルギーである。また、自然エネルギーが起原である種苗も、一次投入エネルギーに区分される。一次投入エネルギーは、土壌に蓄えられた水分や養分など、次回の作物生産に持ち越される場合もあるが、基本的に一回の作物生産で消費されて、その一部が収穫物となる。

二次投入エネルギーは、人間の労働力や畜力、農薬や農業機械のような工業製品など、ある程度の代替が可能なエネルギーであり、人工的に圃場に投入されるものである (Van Ittersum and Rabbinge, 1997)。これらのエネルギーは、農業生産活動の単位面積あたり、または、単位労働時間あたりの生産性を高めるために使用される。二次投入エネルギーのほとんどは収穫物に固定されないが、そのようなエネルギーは、作物生産システム内で熱放散 heat sink として消費されたものと解釈できる。

本稿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とする。その理由は、(1) 化石燃料エネルギーは、通貨と反対方向に流れるため、農業資材の取引金額から容易に計算できること、(2) 化石燃料エネルギーの投入量は、工業製品の使用量によって大きく異なるため、作物生産の工業化の度合いを特徴づけていると考えられるためである。なお、一次投入エ



第1図 作物生産システムとエネルギーの流れ

エネルギーは代替不可能なエネルギーであるが、工業製品として圃場に投入される製品については、その輸送や製造過程で使用される化石燃料エネルギーを算定することにする。

作物生産の産出エネルギーもまた、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。さらに、一次産出エネルギーは、収穫された作物に固定されるエネルギーであり、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、他の産業の原料として消費される。とくに食料や繊維は、人間の体温を維持するという点で重要な生産物である。二次産出エネルギーは、収穫物の中の廃棄される部分や、経済的な取引の対象にされないエネルギーである。

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。食料エネルギーの生産は、人間が消費する栄養分を提供するという意味において、農業の本質的な目標である。このエネルギーは、人間の体内で消化吸収する農産物に固定されるものであり、収穫物の可食部分に含まれる熱量から直接計算できる。したがって、生産物そのものにはエネルギーを含んでいても、人間の体内での消化吸収率が定まっていない食料については、食料エネルギーは無いものとしてカウントされる。例えば、海苔などの藻類やキノコ類など、人間の体の中で固定されるエネルギー量が定まっていない食料である（資料：科学技術庁資源調査会、1982）。

Ⅲ-2 投入エネルギーの種類とその限定

作物生産システムはオープンシステムであるが、その投入産出エネルギー比がしばしば1.0を上回る。これは、投入エネルギーのすべてが計算に含まれるためではないからである。本節では、作物生産システムに投入されるエネルギーの中で、どれを算定に含めるかを検討する。

作物にとって最も重要なエネルギーは、太陽エネルギーである。植物は太陽エネルギーからブドウ糖を作り出し、それを炭水化物、タンパク質、ビタミン類などに転換する。しかし、作物生産の投入産出エネルギー比の計算では、太陽エネルギーが省かれることが多い。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* によって変化する。しかし、太陽エネルギーは作物の可食部分以外にも固定されるため、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²⁾。

太陽エネルギーを考慮しないもう一つの理由は、その莫大なエネルギー量にある。地表に到達する太陽エネルギーをすべて考慮した場合、他のエネルギーが極めて小さく評価される。例えば、極端な例であるが、東京における1年間の全天日射量は420万MJ/10aに達するが(資料：国立天文台、1996)、そこで水稻を生産した場合、可食部分に固定される太陽エネルギーは0.19%にすぎない。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。

種苗は圃場に定植されて作物として成長し、それ自体がエネルギーを含むものであるから、作物生産システムのサブシステムと捉えることができる。しかし、種子と種苗のエネルギーを作物ごとに捉えるのは困難である。本研究では種苗に含まれる自然のエネルギーを考慮せず、種苗の生産と輸送に使用された化石燃料エネルギーを計算に含めることにする。現在ではほとんどの農家が種苗を農協や種苗会社より購入しているため、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分のエネルギーは、水路や灌漑施設の建設費と維持費から算定することができる(吉野、1980)。しかし、農業水利のエネルギー使用は、人間の労働力や工業製品のエネルギーが複雑に絡み合うため、漠然としている。本研究では、農業水利のエネルギー使用を計算から除外することにする。

植物は根から吸収する窒素からタンパク質を合成するように、圃場に投入される肥料もまた、作物の成長に不可欠な要素である。養分を供給する肥料や堆肥もそれ自体がエネルギーを含むものである。しかし、本研究ではそれらを種苗と同様に工業製品とみなすことにして、農家外部から購入された肥料に含まれる化石燃料エネルギーをカウントする。

作物生産に使用される様々な工業製品は、現代農業のエネルギー効率に大きな影響を与えるものであり、投入産出エネルギー比の算定で最も注目すべき投入エネルギーである。農薬、燃料、農業機械などの工業製品に含まれるエネルギーは、それらの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ことができる。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燃料や電力から算定することができる。

人間の労働力や畜力は、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。人間の労働力のエネルギーは、労働者がおかれた社会の生活水準によって大きく変化する(Van Heemst et al., 1981)。すなわち、人間は1日約10MJ(2400kcal)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依存しているのである(Giampietro et al., 1993)。例えば、アメリカ合衆国における農業従事者一人の1日の労働エネルギーは594MJに相当

するという (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という. それ以外でも, 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. 人間の労働力は労働時間などの他の指標で示すべきである (Jones, 1989). なお, 家畜による耕起や運搬は現在の日本の作物生産ではほとんど行われないため, 算定に含めないことにする³⁾.

IV 投入化石燃料エネルギーの算定

IV-1 化石燃料のエネルギー集中度

前章で述べたように, 本稿では, 圃場に投入される工業製品に含まれる化石燃料エネルギーを, 作物生産の投入エネルギーとして計算する. 計算の手順は次の3つの段階をとる. すなわち, (1) 化石燃料のエネルギー集中度 energy intensity, (2) 工業製品のエネルギー集中度, (3) 農業資材のエネルギー集中度の算定である.

エネルギー集中度とは, 工業製品1円あたりに含まれるエネルギーを示す値 (J/円) である. エネルギー集中度は, 工業製品の生産費を, その製造・輸送に投入されたエネルギー (または製品そのものに含まれるエネルギー) で除すことで計算できる. 具体的には以下の式による.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i + X'_i)}{\sum_{i=1}^n (\beta_i x_i + \beta'_i x'_i)} \quad (1)$$

ただし, α は化石燃料のエネルギー集中度 (J/円), X_i は化石燃料 i の国内総生産 (円), β は化石燃料 i の単位熱量 (J/g, J/m³, J/リットル), x_i は化石燃料 i の国内生産量 (g, m³, リットル), n は化石燃料に分類される製品の数, ダッシュの符号は輸入品を示す. 科学技術庁資源調査会 (1979) は, 輸入品を計算から除外しているが, 日本では大量の化石燃料が輸入されること, また, 次の計算で使用する「接続産業連関表」の投入表には製品の原料として輸入品が含まれることから, 本研究では輸入品を考慮することにする.

使用する資料は, 化石燃料の単位熱量には, 「総合エネルギー統計」(資源エネルギー庁長官官房企画調査課, 1991), 化石燃料の国内生産量と輸入量には, 「エネルギー統計年報」と「エネルギー生産・需給統計年報」(通商産業大臣官房調査統計部, 1977, 1981, 1986, 1991), 国内総生産と輸入額には, 「接続産業連関表」(総務庁, 1985, 1995) である. 作物の収穫のサイクルは基本的に1年であるが, 「接続産業連関表」は5年ごとに発行されるという制約があるため, 投入産出エネルギー比の算定も5年ごとに行うことにする.

「接続産業連関表」に記載される化石燃料は5つの部門, すなわち, (1) 石炭・亜炭, (2) 原油, (3) 天然ガス, (4) 石油製品, (5) 石炭製品である. これらの部門は, 「エネルギー生産需給統計

年報」の化石燃料部門と次のように対応させることができる。すなわち、「石炭・亜炭」は、「原料炭」、「一般炭」、「無煙炭」、「亜炭」に、「天然ガス」は、「天然ガス（国産のみ）」と「NGL（輸入のみ）」に、「石油製品」は、「揮発油」、「ナフサ」、「ジェット燃料（国産のみ）」、「灯油」、「軽油」、「重油」、「潤滑油」、「LPG」に、「石炭製品」は、「コークス」に対応する。ただし、「亜炭」は1970、1985、1990年でデータがなく、また、「重油」の単位熱量にはC重油の値をあてはめる。

各製品のエネルギー集中度を1970年から1990年まで5年ごとに算定した結果が、第1表である。「石炭・亜炭」、「原油」、「天然ガス」など、他の工業製品の原料となる化石燃料部門のエネルギー集中度は、製品として加工された石油製品と石炭製品よりも高くなる。言い換えれば、加工された工業製品は、原料となる化石燃料エネルギーよりも、単価あたりのエネルギー量が多くなる。これは、原料を加工する時点で、経済的な付加価値が生じると同時に、エネルギー消費が伴うためである。

化石燃料のエネルギー集中度の平均は、1970年に4340kJ/円と最も高く、それ以降の年では730～1400kJ/円である。化石燃料のエネルギー集中度は、原油価格に反比例して変動するため、1973年の石油危機以降、原油価格が上昇した結果、化石燃料のエネルギー集中度が低下したといえる。実際、原油のエネルギー単価は、1970年に4円/リットルと最も安く、1975年以降、20～47円/リットルと高くなっている。

日本における化石燃料のエネルギーの総産出量は、1970年の20PJ（PJ＝10×10¹⁵J）から1990年の25PJに増加した。1990年のエネルギー総産出量は、200リットルのドラム缶で32億本に相当する。換言すれば、日本人は一人一日あたり15リットルの石油に相当する化石燃料エネルギーを使用することになる。なお、「総合エネルギー統計」によると、日本における総エネルギー供給量は1970年の13PJから1990年の19PJに増加している。この研究では、在庫変動や統計誤差を考慮していないため、エネルギー総産出量はこの値よりも若干高くなっている。

第1表 化石燃料のエネルギー集中度（1970～1990年）

		年：	1970	1975	1980	1985	1990
化石燃料のエネルギー集中度（kJ/円）							
分類コード	部 門						
0711 ^{a)}	1101 ^{b)}	石炭・亜炭	5,488	2,099	2,078	2,141	3,213
0721 ^{a)}	1301 ^{b)}	原油	9,536	1,754	832	924	1,981
0731 ^{a)}	1302 ^{b)}	天然ガス	5,610	2,155	894	804	1,950
2111 ^{a)}	3210 ^{b)}	石油製品	3,146	1,159	564	511	911
2121 ^{a)}	3291 ^{b)}	石炭製品	1,717	857	659	687	782
		平均	4,340	1,398	731	739	1,263
原油のエネルギー単価（円/リットル）			4	22	47	42	20

a) 昭和55-60-平成2年接続産業連関表の分類コード（1980～1990年）。

b) 昭和45-50-55年接続産業連関表の分類コード（1970・1975年）。

資料：総務庁（1985、1995）、資源エネルギー庁長官官房企画調査課（1991）、通商産業大臣官房調査統計部（1977、1981、1986、1991）。

IV-2 工業製品のエネルギー集中度

工業製品のエネルギー集中度は、産業連関分析input-output analysisを用いて算定する。レオンティエフの産業連関分析は、産業間の通貨の流れを分析して、将来の経済構造を予想することに応用された(Leontief, 1951)。しかし、産業連関分析は産業間のエネルギーフローを把握するためにも応用できる(Krenz, 1974)。本研究では、工業製品のエネルギー集中度を計算するために、Bullard and Herendeen (1975)が考案したエネルギー収支式を参考にする。彼らの式は、

$$\gamma_j X_j = \sum_{i=1}^n \gamma_i T_{ij} + \delta_j \quad (2)$$

ただし、 $\gamma_j X_j$ は製品 j の全エネルギー産出(J)、 γ_j は製品 j のエネルギー集中度(J/円)、 X_j は製品 j の国内総生産(円)、 T_{ij} は製品 j に投入される製品 i の金額(円)、 δ_j は製品 j が自然から取り出したエネルギー(J)、 n は取引行列の製品の数である。

本研究ではあらかじめ化石燃料のエネルギー集中度を計算しておくことで、第2式を以下のように簡略化する。

$$\gamma_j X_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i T_{ij} \quad (3)$$

ただし、 n は取引行列の化石燃料の数である。この式は、製品 j に直接投入される化石エネルギーだけを計算するものであり、行列変換することなく γ_j を求めることができる。この式は、科学技術庁資源調査会(1979)の計算方法を簡略化したものでもある。科学技術庁資源調査会(1979)は、直接投入エネルギーに加えて、間接投入エネルギー(一次間接投入と二次間接投入エネルギー)を考慮している。しかし、間接投入エネルギーの計算は、エネルギー集中度の平準化の作業であるといえる。すなわち、間接投入エネルギーの次数を増加させるほど、すべての製品のエネルギー集中度は同じ値に近くなるのである。直接投入エネルギーだけを考慮した本稿の算定方法は、化石燃料エネルギーが農業生産に与えるインパクトを直接的に把握するという目的に対して、最良の値を簡便に提示できるものと考えられる(Nhei, 2000)。

この算定で使用する資料は、「昭和55-60-平成2年接続産業連関表」の179部門統合小分類表の投入表(総務庁, 1995)と、「昭和45-50-55年接続産業連関表」の158部門統合小分類表の投入表(総務庁, 1985)である。作物生産の投入産出エネルギー比の計算に必要な工業製品は6種類、すなわち、(1)その他の非食料作物、(2)化学肥料、(3)合成樹脂、(4)農薬、(5)その他の特殊産業用機械、(6)電力である⁴⁾。

産業連関分析では、輸入品のエネルギー集中度の算定が不可能であるため、工業製品のエネルギー集中度の算定には、輸入品を除くことにする。したがって、例えば、輸入農薬だけを使用して作物を生産した場合でも、その農薬のエネルギー集中度は国産品と同じ値で計算されることになる。なお、「昭和55-60-平成2年接続産業連関表」によれば、国内総生産額に占める輸入品の比率は、化学肥

料で7%、合成樹脂で5%、農薬で39%、その他の特殊産業用機械で7%、電力で0%であり、農薬を除いてさほど多くない。

これらの工業製品のエネルギー集中度を計算した結果が、第2表である。電力部門のエネルギー集中度は224～849kJ/円であり、各年とも他の工業製品と比較して極めて高い値である。これは、電力部門には化石燃料部門から直接投入されるエネルギーが多いためである。例えば、1990年の計算において、化石燃料部門からの投入金額の比率は電力部門では44%に上るのに対して、他の工業製品では0.4～12%にすぎない。なお、電力部門の化石燃料部門からの投入金額の比率は1970年に70%を占めていたが、1990年には44%まで低下している。これは、原子力や水力など、火力以外の発電方法の占める割合が高くなったためである。

IV-3 農業資材のエネルギー集中度

この節では、工業製品のエネルギー集中度の計算結果から、「作物生産費調査」に記載されている農業資材のエネルギー集中度を算定する。カウントする農業資材は6種類、すなわち、(1) 種苗、(2) 肥料、(3) 農薬、(4) 光熱動力、(5) 園芸施設、(6) 農業機械とする。「作物生産費調査」には13の費目があり、本稿で省いた7つの費目は、その他の諸材料、水利、賃貸料および料金、建物及び土地改良設備、成園、畜力、労働である。

種苗費には、種苗の生産が含まれる「その他の非食料作物」のエネルギー集中度を対応させる。肥料費は化学肥料、土壤改良剤、肥料、堆肥などの購入費用からなる。これらの大部分は化学肥料の購入費と解釈し、肥料費には「化学肥料」のエネルギー集中度を対応させる。除草剤や殺虫剤からなる農薬には「農薬」のエネルギー集中度を対応させる。農業機械の費用は、トラクター、耕耘機、コンバイン、暖房機などの1年あたりの購入費と原価償却費からなる。農業機械の費用には、これら農業機械の生産が含まれる「その他の産業用特殊産業用機械」のエネルギー集中度を対応させる。

光熱動力費は、農業機械を運転するための燃料や電力の費用である。したがって、「石油製品」と「電力」のエネルギー集中度から光熱動力のエネルギー集中度を算定する。また、光熱動力のエネルギー集中度は、露地作物と施設作物で別々に求めることにする。露地作物には水稻のデータを、施設

第2表 工業製品のエネルギー集中度 (1970～1990年)

(kJ/円)

分類コード	部 門	年					
		1970	1975	1980	1985	1990	
0116 ^{a)}	0015 ^{b)}	その他の非食料作物	81	29	23	11	32
2011 ^{a)}	3118 ^{b)}	化学肥料	45	27	72	68	86
2041 ^{a)}	3117 ^{b)}	合成樹脂	36	17	5	21	12
2074 ^{a)}	3118 ^{b)}	農薬	45	27	12	9	4
3029 ^{a)}	3603 ^{b)}	その他の特殊産業用機械	21	6	4	2	2
5111 ^{a)}	5110 ^{b)}	電力	849	555	237	224	314

a) 昭和55-60-平成2年接続産業連関表の分類コード (1980～1990年)。

b) 昭和45-50-55年接続産業連関表の分類コード (1970・1975年)。

資料：第1表、総務庁 (1985, 1995)。

作物にはモデルとした千葉県旭市のビニルハウスのデータをあてはめた（仁平，1998）。

光熱動力のエネルギー集中度を計算した結果が第3表である。光熱動力費のエネルギー集中度は、石油製品と電力の使用比率によって決定され、その割合が高いほど値が高くなる。施設作物の値は露地作物よりも82倍も大きくなるにもかかわらず、その石油製品の使用率は83%と露地作物よりも2%だけ高いにすぎない。したがって、施設作物のエネルギー集中度は729kJ/円と露地作物の716kJ/円よりも若干高くなるという結果を得た。

園芸施設費は、被覆用ビニル、暖房機、灌漑設備など、園芸施設の建設費と償却費からなる。ここでは、被覆用ビニルと暖房機で使用されるエネルギーを算定する。被覆用ビニルには「合成樹脂」、暖房機には「その他の特集産業用機械」のエネルギー集中度をあてはめる。それぞれの費用の使用比率は旭市のモデル施設から計算することにする。その結果、園芸施設のエネルギー集中度は、第3表に示すようになった。園芸施設費の33%を占めるビニル製品（合成樹脂）が、エネルギー使用の94%を占めることに特徴がある。

第4表は、以上の手順から算定された農業資材のエネルギー集中度の結果である。1970年から

第3表 光熱動力と園芸施設のエネルギー集中度（1990年）

部門	原料	対応する分類 コード a)	原料のエネルギー 集中度 (kJ/円)	原料の生産費 (円/10a)	全生産費に占め る原料の割合 (%)	エネルギー 需要 (MJ/10a)	エネルギー 集中度 (kJ/円)
光熱動力 (露地作物)	石油製品	0711	811	2,580	81	2,092	
	電力	5111	314	612	19	192	
	合計			3,192	100	2,285	716
光熱動力 (施設作物)	石油製品	0711	811	217,820	83	176,660	
	電力	5111	314	43,365	17	13,619	
	合計			261,185	100	190,279	729
園芸施設	被覆用ビニル	2041	12	84,950	22	1,052	
	カーテン用ビニル	2041	12	40,750	11	505	
	暖房機	3029	2	57,600	15	94	
	その他の資材	-	-	204,088	53	-	
	合計			387,388	100	1,651	4

a) 昭和55-60-平成2年接続産業連関表の分類コード。

資料：第1表，第2表，農林水産省経済局統計調査部（1992c），筆者の現地調査。

第4表 農業資材のエネルギー集中度（1970～1990年）

(kJ/円)

年：	1970	1975	1980	1985	1990
種苗	81	29	23	11	32
肥料	45	27	72	68	86
農薬	45	27	12	9	4
光熱動力					
（露地作物）	2,706	1,043	502	456	716
（施設作物）	2,765	1,058	510	463	729
園芸施設	15	6	2	7	4
農業機械	21	6	4	2	2

資料：第1表，第2表，第3表。

1985年までの光熱動力費における燃料と電力の使用比率は、1990年の値で代用した。農業資材のエネルギー集中度は、光熱動力で最も高い値を示すが、これは、化石燃料からのエネルギー供給量が多いためである。2番目に高い値を示す部門は、肥料と種苗である（1990年では、それぞれ86kJ/円と32kJ/円）。しかし、これらの値は、光熱動力のエネルギー集中度と比較して、8分の1から22分の1にすぎない。その他の農業資材のエネルギー集中度もまた、1990年で2～4 kJ/円と極めて小さい。したがって、作物生産におけるエネルギーの投入量は、光熱動力の使用量に大きく影響されると予想される。

農業資材のエネルギー集中度は、化石燃料のエネルギー集中度に比例しながら、年ごとに大きく変動する。例えば、1985年と1970年を比較すると、全農業資材のエネルギー集中度の平均は5.6倍、光熱動力のエネルギー集中度（施設作物）は6.0倍の値である。しかし、農業資材のインフレ率を考慮すれば、以下の章で算定する作物生産の投入産出エネルギー比は、農業資材のエネルギー集中度ほど年変動が少なくなると予想される。

V 作物生産の投入産出エネルギー比

V-1 1990年の投入産出エネルギー比

一つの農業資材に含まれる化石燃料エネルギーは、農業資材の生産費とエネルギー集中度から算定することができる。すべての農業資材の化石燃料エネルギーの総和が、作物生産に投入される化石燃料エネルギーとなる。このような投入エネルギーの算定方法は、積み上げ法process analysis⁵⁾と呼ばれる。積み上げ法は、接続産業連関表に記載されていない産業部門の投入化石燃料エネルギーを計算するために必要な方法である（内山、1996）。

本節で使用する資料は、1970年から1990年まで5年ごとの「作物生産費調査」（農林省農林経済局統計調査部、1972a, b, c, d, 1976, 1977a, b, c；農林水産省経済局統計調査部、1982a, b, c, d, 1987a, b, c, d, 1992a, b, c, d）、および、「日本食品標準成分表」（科学技術庁資源調査会、1982）である。作物生産費調査で算定に含むのは、各項目における農家の購入金額であり、自給品を除外する。また、本稿では、農業資材の詳細な部門を無視するため、例えば、農業機械の場合、コンバインと暖房機は同じエネルギー集中度として算定される。このような簡便な方法は、多数の作物を複数年次で計算する場合には適当であると考えられる。

第5表は、1990年の32の作物について、生産に投入される化石燃料エネルギーと、そこから産出する食料エネルギーの比率を示したものである。作物生産の投入産出エネルギー比の値は、従来の研究と同様に、小数点以下一桁の数値で示すことにする。ただし、投入産出エネルギー比の値が極めて小さい施設野菜に対しては、小数点以下2桁の数値とする。以下、投入産出エネルギー比の値と作物の特徴を検討する。

最もエネルギー効率が低い作物はいも類であり、投入産出エネルギー比の平均は6.8である。いも類の効率が低いのは、産出食料エネルギーが多いためである。いも類の投入化石燃料エネルギーは2GJ/10aであるのに対して、産出食料エネルギーは14～15GJ/10aであり、他の作物の2～15倍の値で

第5表 作物生産の投入・産出エネルギー (1990年)

作物	生産費 (1000円/10a)		投入化石燃料エネルギー (MJ/10a)					収量 (kg/10a)	産出食料 エネルギー (MJ/10a)	投入産出 エネルギー比 (産出/投入)
	種苗	肥料	農薬	光熱動力	圃芸施設	農業機械	合計			
水稻	61	691	29	2,285	—	69	3,147	533	7,830	2.5
小麦	25	593	12	824	—	23	1,508	353	5,335	3.5
六条大麦	24	720	7	878	—	21	1,695	258	3,658	2.2
裸麦	35	604	11	1,192	—	38	1,919	313	4,467	2.3
二条大麦	22	572	5	752	—	21	1,412	317	4,495	3.2
穀類の平均	33	636	13	1,186	—	34	1,936	361	5,157	2.7
かんしよ	23	660	9	1,429	—	18	2,133	2,887	14,868	7.0
ばれいしよ	31	684	25	1,058	—	25	2,140	4,347	13,997	6.5
いも類の平均	27	672	17	1,243	—	22	2,137	3,617	14,433	6.8
大豆	23	361	16	1,255	—	21	1,709	207	3,612	2.1
小豆	25	677	15	721	—	19	1,488	249	3,531	2.4
いんげん	19	529	15	739	—	13	1,418	177	2,466	1.7
豆類の平均	22	522	15	905	—	18	1,538	211	3,203	2.1
きゆうり	239	6,971	230	12,451	45	113	21,102	10,077	4,635	0.2
トマト	234	4,810	78	6,400	465	65	12,269	6,093	4,082	0.3
なす	262	8,433	267	10,466	92	94	19,681	9,641	7,231	0.4
ピーマン	117	3,985	28	6,175	34	76	11,501	5,786	5,092	0.4
キャベツ	64	1,654	29	1,611	—	57	3,610	4,839	4,839	1.3
はくさい	86	2,907	102	2,185	—	37	5,640	7,179	3,590	0.6
ねぎ	109	2,692	81	5,855	—	79	8,929	3,126	3,532	0.4
レタス	61	2,154	45	1,703	25	26	4,048	1,997	999	0.2
たまねぎ	56	1,717	47	1,696	1	35	3,854	6,254	9,131	2.4
ほうれんそう	35	1,657	6	1,686	0	19	3,596	1,578	1,657	0.5
だいこん	75	1,704	78	2,639	0	50	5,212	8,792	6,594	1.3
にんじん	93	2,446	71	2,713	29	57	5,521	5,117	6,857	1.2
さといも	53	1,641	40	1,812	2	34	3,590	1,852	4,649	1.3
露地野菜類の平均	114	3,290	85	4,415	53	57	8,350	5,564	4,837	0.6
きゆうり (施設)	1,101	13,971	381	204,473	1,879	191	222,360	14,548	6,692	0.03
トマト (施設)	631	6,942	216	110,723	1,159	114	120,079	9,569	6,411	0.05
なす (施設)	1,019	11,540	392	152,487	1,978	177	167,349	11,812	8,859	0.05
施設野菜類の平均	917	10,818	330	155,894	1,672	161	169,929	11,976	7,321	0.04
みかん	81	1,787	110	4,037	24	32	5,990	3,402	6,260	1.0
なつみかん	145	3,923	174	8,140	60	45	12,342	3,210	5,104	0.4
りんご	77	1,635	86	3,564	2	48	5,336	2,792	5,835	1.1
日本なし	122	2,809	132	4,363	38	64	7,407	2,542	4,245	0.6
もも	107	1,522	112	4,241	6	85	5,965	2,520	3,905	0.7
ぶどう	116	1,944	103	4,388	112	55	6,602	1,606	3,757	0.6
果樹類の平均	108	2,270	120	4,789	40	55	7,274	2,678	4,851	0.7
全作物の平均	162	2,967	92	17,654	186	57	21,267	4,188	5,569	0.3

資料：第4表、農林水産省経済局統計調査部 (1992a, 1992b, 1992c, 1992d), 科学技術庁資源調査会 (1982)。

ある。周知のように、中央アメリカ原産のさつまいもは、17世紀中頃に日本にもたらされると、食料エネルギーを多産することから飢饉の際の救荒作物として各地で栽培されるようになった。第2次世界大戦以降1960年代までは、澱粉加工の原料や飼料用として広く栽培された。現在でも加工用・生食用ともに広く生産されているが、例えば、加工用さつまいもと大麦の二毛作の畑は、水稻の単作と比較して、2.5倍の食料エネルギー生産量がある（仁平ほか、2000）。

いも類に次いでエネルギー効率が高いのは、穀類とまめ類である。これらの作物の投入産出エネルギー比の平均は、それぞれ2.7と2.1である。これらの作物の投入化石燃料エネルギーは、水稻を除いて1.4～1.9GJ/10aであり、そのほとんどが光熱動力と肥料からもたされる。穀類の中でも、水稻の投入化石燃料エネルギーは2GJ/10aと多いが、これは農業機械によって使用される燃料の比率が高いためである。水稻作では、耕耘、代かき、田植え、収穫などの農作業において、トラクターや田植機などの農業機械を使用する頻度が他の穀作よりも多くなる。

果樹と露地野菜の多くは、産出食料エネルギーが投入化石燃料エネルギーを下回る。これらの作物の投入産出エネルギー比の平均は、それぞれ0.7と0.6である。これらの作物生産で使用される化石燃料エネルギーのうちもっとも投入量が高い部門は、光熱動力（4～5 GJ/10a）と肥料（2～3 GJ/10a）である。これらは、穀類の生産に投入される光熱動力と肥料の熱量よりも3～4倍ほど高い値である。また、収穫物の重量と比較して、産出食料エネルギーが少ないことも、果樹と露地野菜の投入産出エネルギー比が低くなる理由である。例えばきゅうりの場合、収穫物の重量は10aあたり15tと水稻の20倍であるにも関わらず、産出エネルギーは水稻よりも少ない。きゅうりの重量の96%は水分であるため、100gのきゅうりに含まれる熱量はわずか46kJにすぎないためである。

最もエネルギー効率の低い作物は施設野菜であり、その投入産出エネルギー比の平均は0.04である。施設野菜の生産には、光熱動力から莫大なエネルギー（156GJ/10a）が投入される。また、園芸施設、農業資材、農薬、肥料のエネルギー量も他の作物と比較して多い。施設野菜の生産では、施設内の気温を管理するため、暖房機で使用される重油や灯油が消費される。例えば、冬季から春季にかけて出荷するきゅうり栽培では、C重油を燃やすことによって、ビニルハウス内の気温は冬季でも30℃に保たれるのである（仁平、1998）。

V-2 1970-1985年の投入産出エネルギー比

1990年と同様の方法で、1970年から1985年まで、32の作物生産の投入産出エネルギー比を計算した結果が第6表である。前章で示したように、農業資材のエネルギー集中度は年ごとに大きく異なる。しかし、個々の作物の投入化石燃料エネルギーと産出食料エネルギーの値には、さほど大きな年変化はみられない。1970～1990年までのすべての年において、全作物の投入産出エネルギー比の平均は0.3となる。

投入産出エネルギー比の平均から、作物のグループを4つに区分することができる。すなわち、（1）いも類が「高位効率作物（投入産出エネルギー比の平均：6.8～9.1）」、（2）穀類とまめ類が「中位効率作物（1.7～3.9）」、（3）果樹と露地野菜が「低位効率作物（0.6～1.1）」、（4）施設作物が

第6表 作物生産の投入産出エネルギー比 (1970～1985年)

作物	1970				1975				1980				1985			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
水稻	15	2,788	7,154	2.6	30	2,506	7,712	3.1	53	2,678	7,183	2.7	105	2,941	7,742	2.6
小麦	7	1,976	3,733	1.9	11	1,156	3,831	3.3	18	1,239	4,722	3.8	26	1,471	5,990	4.1
六条大麦	6	2,329	4,864	2.1	9	1,192	5,275	4.4	18	1,620	5,388	3.3	24	1,549	4,467	2.9
裸麦	8	1,621	3,268	2.0	16	1,462	4,081	2.8	28	1,677	4,723	2.8	36	1,688	5,451	3.2
二条大麦	6	1,721	4,141	2.4	12	1,237	4,055	3.3	17	1,409	4,467	3.2	24	1,291	4,027	3.1
穀類の平均	8	2,087	4,632	2.2	16	1,511	4,991	3.3	27	1,725	5,297	3.1	43	1,788	5,535	3.1
かんしよ	7	1,263	12,427	9.8	14	1,181	14,930	12.6	20	1,554	12,829	8.3	23	1,581	14,744	9.3
ばれいしよ	8	1,315	11,000	8.4	21	1,442	10,037	7.0	27	1,934	13,369	6.9	34	1,779	12,407	7.0
いも類の平均	8	1,289	11,713	9.1	17	1,312	12,483	9.5	24	1,744	13,099	7.5	28	1,680	13,576	8.1
大豆	4	609	2,844	4.7	12	956	3,316	3.5	19	1,325	3,228	2.4	28	1,339	4,677	3.5
小豆	5	706	2,425	3.4	12	981	2,226	2.3	21	1,385	1,446	1.0	26	1,335	3,261	2.4
いんげん	4	703	2,563	3.6	13	1,043	1,811	1.7	20	1,413	2,480	1.8	27	1,279	3,274	2.6
豆類の平均	4	673	2,611	3.9	12	993	2,451	2.5	20	1,374	2,385	1.7	27	1,318	3,737	2.8
きゅうり	75	16,419	3,702	0.2	77	5,626	1,914	0.3	164	11,926	3,487	0.3	214	13,366	4,025	0.3
トマト	75	11,788	4,288	0.4	126	10,787	5,454	0.5	142	9,634	5,649	0.6	187	10,776	4,904	0.5
なす	64	9,041	5,795	0.6	108	8,092	7,583	0.9	154	9,445	5,106	0.5	174	10,558	5,818	0.6
ピーマン	44	9,430	2,369	0.3	74	6,916	3,259	0.5	115	9,549	4,504	0.5	129	7,918	4,146	0.5
キャベツ	18	3,871	4,046	1.0	33	2,720	4,538	1.7	50	3,324	4,481	1.3	56	3,024	5,525	1.8
ねぎ	17	2,870	2,865	1.0	36	2,131	3,695	1.7	50	3,075	3,878	1.3	54	2,949	4,289	1.5
はくさい	24	5,611	4,180	0.7	41	3,659	4,353	1.2	70	5,589	3,627	0.6	94	6,743	3,312	0.5
レタス	39	3,802	781	0.2	48	4,786	1,247	0.3	66	3,269	1,296	0.4	73	3,992	1,264	0.3
たまねぎ	17	3,248	5,919	1.8	29	2,389	6,890	2.9	45	3,244	7,610	2.3	52	2,991	8,350	2.8
ほうれんそう	14	2,867	1,311	0.5	37	2,729	1,728	0.6	37	2,581	1,739	0.7	40	2,905	1,895	0.7
だいこん	19	3,652	5,245	1.4	49	3,228	4,844	1.5	79	4,550	6,493	1.4	83	3,890	7,501	1.9
にんじん	32	5,765	4,383	0.8	53	4,645	4,540	1.0	66	3,999	5,513	1.4	83	3,996	5,919	1.5
さといも	21	4,331	3,416	0.8	26	2,214	4,930	2.2	41	3,525	4,450	1.3	49	3,248	4,287	1.3
露地野菜類の平均	35	6,361	3,715	0.6	57	4,609	4,229	0.9	83	5,670	4,449	0.8	99	5,873	4,710	0.8
きゅうり(施設)	332	117,323	4,618	0.04	628	224,580	5,902	0.03	1,100	288,176	6,141	0.02	1,275	266,881	5,805	0.02
トマト(施設)	198	87,574	5,841	0.07	350	103,061	6,342	0.06	558	93,336	7,223	0.08	725	119,286	5,850	0.05
なす(施設)	344	216,317	6,477	0.03	551	163,638	9,218	0.06	974	162,023	9,059	0.06	1,049	138,806	8,996	0.06
施設野菜類の平均	291	140,405	5,645	0.04	510	163,760	7,154	0.04	877	181,178	7,474	0.04	1,016	174,991	6,884	0.04
みかん	38	6,237	5,314	0.9	51	4,234	6,344	1.5	71	4,301	5,744	1.3	83	4,766	5,961	1.3
なつみかん	29	5,078	4,183	0.8	52	4,696	6,230	1.3	112	7,456	7,505	1.0	123	7,202	6,028	0.8
りんご	22	3,933	5,885	1.5	41	3,740	5,536	1.5	75	4,437	6,195	1.4	93	4,211	5,355	1.3
日本なし	30	4,971	6,725	1.4	62	4,425	6,638	1.5	77	4,239	6,055	1.4	109	5,423	5,147	0.9
もも	31	6,048	3,917	0.6	61	5,833	4,546	0.8	83	5,137	3,945	0.8	100	4,563	2,916	0.6
ぶどう	40	16,808	2,910	0.2	91	22,727	3,398	0.1	80	4,381	3,292	0.1	107	4,180	3,363	0.8
果樹類の平均	32	7,179	4,822	0.7	60	7,609	5,449	0.7	83	4,992	5,456	1.1	103	5,058	4,795	0.9
全作物の平均	50	17,563	4,643	0.3	87	19,063	5,200	0.3	139	20,732	5,401	0.3	166	20,248	5,522	0.3

a 生産費 (1000円/10a), b 投入化石燃料エネルギー (MJ/10a), c 産出食料エネルギー (MJ/10a), d 投入産出エネルギー比 (産出/投入)

資料: 第4表, 農林省農林経済局統計調査部 (1972a, b, c, d, 1976, 1977a, b, c), 農林水産省経済局統計調査部 (1982a, b, c, d, 1987a, b, c, d, 1992a, b, c, d), 科学技術庁資源調査会 (1982).

「極低位効率作物 (0.04)」である。

また、各作物のグループについて、投入化石燃料エネルギーと産出食料エネルギーとを別々に検討した場合、投入産出エネルギー比とは異なった区分ができる。作物グループを、投入化石燃料エネルギーの高い順に並べると、(1) 施設野菜 (投入化石燃料エネルギーの平均: 140~181MJ/10a), (2) 果樹と露地野菜 (5~8 MJ/10a), (3) 穀類 (2 MJ/10a), (4) いも類とまめ類 (1~2 MJ/10a) となる。いも類とまめ類を除いて、作物生産の投入産出エネルギー比と反対の順番である。また、作物グループを、産出食料エネルギーが高い順に並べると、(1) いも類 (12~14MJ/10a), (2) 施設作物 (6~7 MJ/10a), (3) 穀類 (5~6 MJ/10a), (4) 果樹と露地野菜 (3~5 MJ/10a), (5) まめ類 (2~4 MJ/10a) となる。単位面積あたりの産出食料エネルギーの平均は、穀類よりも施設作物の方が高いことに注目できる。

最後に、作物生産に投入される金額の変化を検討する。通貨にはインフレ率があるため、1970年から1990年まで一貫して、金額をベースに作物のグループを区分することは困難である。したがって、1990年の場合について、作物グループを高い順から並べてると、(1) 施設野菜 (投入金額の平均: 917千円/10a), (2) 露地野菜と果樹 (108~114千円/10a), (3) 穀類, いも類, まめ類 (22~33千円/10a) となる。また、すべての作物の投入金額の平均は、1970年の50千円/10aから1990年の162千円/10aへと3.2倍に増加し、投入化石燃料エネルギーの平均は、1970年の18GJ/10aから1990年の21GJ/10aへと1.2倍に増加した。このように、投入化石燃料エネルギーと産出食料エネルギーは、通貨のインフレ率よりも変動が少ないという点で、作物生産の時間変化の特徴を分析するための優れた指標になると予想される。

VI 結 論

農業の本質的な目標は、太陽エネルギーを効率的に植物に固定させて、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を行うとは限らない。とくに、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る。このような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。本稿は、エネルギー効率の視点から地域的な環境問題へ提言していくための手掛かりとして、日本において栽培される32の作物の投入・産出エネルギーを、1970年から1990年まで5年ごとに算定した。

作物生産のエネルギー論的・生態学的な効率を示す指標が、投入産出エネルギー比である。本稿では、産業連関分析と積み上げ法を援用した簡便法を案出することにより、作物生産で使用される工業製品の化石燃料エネルギーと、人間の体内で吸収される食料エネルギーとの比率を提示した。算定の結果、作物生産のエネルギー効率から、いも類を「高位効率作物 (1970~1990年の投入産出エネルギー比の平均: 6.8~9.1)」, 穀類とまめ類を「中位効率作物 (1.7~3.9)」, 果樹と露地野菜を「低位効率作物 (0.6~1.1)」, 施設作物を「極低位効率作物 (0.04)」と区分することができる。また、エネ

ギーという指標は、通貨のインフレ率よりも変動が少ないという点で、作物生産の時間・空間的变化の特徴を分析するための優れた指標になると予想される。

小稿は、2001年3月に筑波大学へ提出した博士論文の一部を、日本語に翻訳して加筆修正したものである。小稿を、博士論文の副査を担当して下さり、2002年度をもって筑波大学を退官される高橋伸夫先生に献呈したい。

注

- 1) オープンシステムには、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という特徴がある。オープンシステムには熱力学第二法則が適用されるため、システムの中で熱放散するエネルギーを除けば、産出エネルギーは投入エネルギーよりも少なくなる (Bertalanffy, 1968)。
- 2) キビヤモロコシなど、禾本目 *gramineous* に多い C4 植物 *dicarboxylic acid cycle plant* は、最も高い光合成率をもつことで知られる (Krebs, 1972)。
- 3) 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年代までである。当時編纂された労働医学心理学研究所の報告者には、農業従事者が一日で消費する食料エネルギー量の他に、水稲作と麦作の耕耘と整地に、牛馬の畜力が使用されていたことが記されている (労働医学心理学研究所, 1951)。
- 4) なお、これらの工業製品の中には2つの「接続産業連関表」で名前が異なる部門がある。まず、「昭和55-60-平成2年接続産業連関表」のコラムコード (分類コード) 2041の「合成樹脂 *synthetic resins*」は、「昭和45-50-55年接続産業連関表」では、コラムコード3117の「合成樹脂 *plastic*」になる。同様に、3029の「その他の特殊産業用機械 *other spacial industrial machinery*」は、3603の「産業機械 *industrial machinery*」に、5111の「電力 *electric power for enterprise*」は、5110の「電力 *electric power supply*」になる。また、2011の「化学肥料 *chemical fertilizers*」と2074の「農薬 *agricultural chemicals*」は、3117の「化学肥料・農薬 *chemical manure and pesticides*」に統合されている。
- 5) 積み上げ法を用いた典型的な研究として、Chapman (1975) による原子力発電所のエネルギー使用を試算したものがあげられる。この研究では、原子炉の投入産出エネルギー比は、25年間運転すると仮定して10.2~16.5であり、発電所建設に費やされたエネルギーを産出する時間 (payback time) は1.2~2.4年であることが明らかになった。また、積み上げ法を用いて作物生産の投入産出エネルギー比を計算した典型的な研究が、科学技術庁資源調査会 (1979) によって行われた。その研究では、「作物生産費調査」の「労働費」を除いた12の費目について投入エネルギーを計算した。本稿では、本文中で言及したように、エネルギー使用が漠然としていると判断される7つの費目を除いた。これらの費目を除外することによって、作物生産におけるエネルギー使用の過大評価も避けられると予想される。

統計資料

国立天文台 (1996)：『理科年表 平成9年』。
 資源エネルギー庁長官官房企画調査課 (1991)：『総合エネルギー統計 平成2年度版』。
 総務庁 (1985)：『昭和45-50-55年接続産業連関表』。
 総務庁 (1995)：『昭和55-60-平成2年接続産業連関表』。
 科学技術庁資源調査会 (1982)：『四訂 日本食品標準成分表 (二版)』。
 通商産業大臣官房調査統計部 (1977)：『昭和50年エネルギー統計年報』。
 通商産業大臣官房調査統計部 (1981)：『昭和55年エネルギー生産需給統計年報』。

通商産業大臣官房調査統計部 (1986)：『昭和60年エネルギー生産需給統計年報』。
 通商産業大臣官房調査統計部 (1991)：『平成2年エネルギー生産需給統計年報』。
 農林省農林経済局統計調査部 (1972a)：『昭和45年産果実生産費』。
 農林省農林経済局統計調査部 (1972b)：『昭和45年産米生産費』。
 農林省農林経済局統計調査部 (1972c)：『昭和45年産麦類・工芸作物等の生産費』。
 農林省農林経済局統計調査部 (1972d)：『昭和45年産野菜生産費』。
 農林省農林経済局統計調査部 (1976)：『昭和50年産

- and environment" (edited by Morse, S. and Stocking, M.), London: UCL Press, 31-68.
- 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.
- 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.
- Krenz, J. H. (1974): Energy per dollar value of consumer goods and services. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **3**, 386-388.
- Leontief, W. W. (1951): Input-output economics. *Scientific American*, **185**(4), 15-21.
- 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.
- Nihei, T. (2000): Energy efficiency of crop production in Japan, 1970-1990. *Geographical Review of Japan*, **73B**, 27-45.
- Newcombe, K. (1976): Energy use in Hong Kong food system. *Agro-Ecosystem*, **2**, 253-276.
- 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, 390p., 392-749p.
- 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, 57p.
- 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.
- Pimentel, D. (1980): *Handbook of energy utilization in agriculture*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 475p.
- 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.
- 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.
- 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.
- Van Heemst, H. D., Nerkelijin, J. J., and van Keulen, H. (1981): Labour requirements in various agricultural systems. *Quarterly Journal of International Agriculture*, **120**, 178-201.
- Van Ittersum, M. K. and Rabbinge, R. (1997): Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, **52**, 197-208.
- Weinberg, A. M. (1977): Of time and the energy wars. *Nature*, **269**, 638.
- Zucheto, J. and Jansson, A. (1979): Total energy analysis of Gotland's agriculture: a northern temperate zone case study. *Agro-Ecosystems*, **5**, 329-344.

- 内山洋司 (1996) : 『Creative Chemical Engineering Course 9 : 私たちのエネルギー — 現在と未来—』培風館, 165p.
- 科学技術庁資源調査会編 (1979) : 『衣・食・住のライフサイクルエネルギー』大蔵省印刷局, 418p.
- 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.
- 仁平尊明 (1998) : 千葉県旭市における施設園芸の維持と技術革新. 地理学評論, **71A**, 661-678.
- 仁平尊明・岡本友志・藤永 豪・二村太郎・大森祐美・森本健弘 (2000) : 茨城県ひたちなか市におけるサツマイモ生産・流通の地域的性格. 地域調査報告, **22**, 133-169.
- 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』135-158, 電力新報社.
- 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.

Estimation of Input and Output Energy for the Crop Production in Japan

Takaaki NIHEI

A large amount of fossil fuel energy is used in modern agriculture. From an ecological aspect, the fossil fuel energy fixed in industrial products such as chemical fertilizers and herbicides makes agriculture inefficient. Agricultural practices need to be aware of energy efficiency to implement low input management and to reduce the environmental impact.

Input-output energy ratio (output/input), which is calculated by input fossil fuel energy and output food energy, has been used as an index to explain the efficiency of agriculture. This study demonstrates a method of calculating the input-output energy ratio for Japanese crop production by means of input-output analysis and process analysis. The requisite data sources for the calculation are "Yearbook of Production, Supply and Demand of Petroleum, Coal and Coke," "Linked Input-output Tables" and "Production Cost of Crops."

The results of the calculation for 32 crops every five years from 1970 to 1990 show that the energy efficiency of Japanese crop production is classified into four degrees, i.e., high efficiency crops (potatoes: the average input-output energy ratio from 1970 to 1990 is between 6.8 and 9.1), middle efficiency crops (grain and beans: 1.7-3.9), low efficiency crops (fruits and field vegetables: 0.6-1.1) and very low efficiency crops (greenhouse vegetables: 0.04).

The yearly difference will not exert a great deal of influence on the input-output energy ratio of crop production when the inflation rate of agricultural materials is taken into account. Energy is therefore useful as an index to show temporal and spatial changes in the characteristics of regional crop production since it is not influenced to a great extent by monetary inflation rate.

Key words: input fossil fuel energy, output food energy, process analysis, input-output analysis, energy efficiency