

第 3 章

投入・産出エネルギー比と 日本の農業地域

3.1 地域的な作物生産の投入・産出エネルギー比

作物生産のエネルギー効率を示す指標が、投入・産出エネルギー比である。作物生産のエネルギー効率は、農地に投入される化石燃料エネルギーと、そこから産出される食料エネルギーとの比率（投入・産出エネルギー比）によって示される（Odum, 1971）。前章では、日本における作物生産を事例として、産業連関分析と積み上げ法を利用した簡便法により、個々の作物生産の効率性を定めた。その結果、いも類を高位効率作物、穀類と豆類を中位効率作物、果樹と露地野菜を低位効率作物、施設作物を極低位効率作物とすることができた。

しかし、これらは個々の作物に対する評価であり、現実の作物生産を反映していない。現実の地域では、通常、複数の圃場で複数の作物が栽培されていたり、あるいは、一つの圃場でも複数の作物が組み合わせられて栽培されている。これら複数の作物生産の効率性を考慮することによって、エネルギー効率から地域の特徴を説明することが可能になる（Nihei, 2000）。本研究では、複数の作物が生産される地域を想定したうえで、地域的な投入・産出エネルギー比の効率性を検討する。そのために、まず、ある地域内で生産されるすべての作物に投入される化石燃料エネルギーと、そこから産出される食料エネルギーにより、地域的な投入・産出エネルギー比を算定する。具体的には以下の式（4）による。

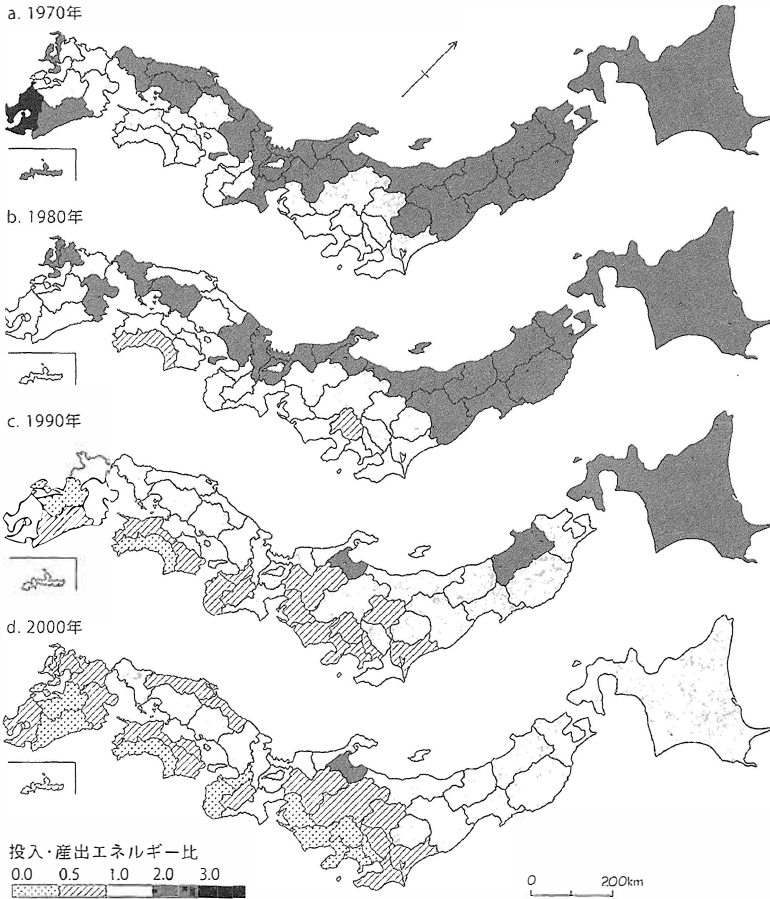
$$Q_j = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i S_i}{\sum_{i=1}^n \varepsilon'_i S_i} \quad (4)$$

ただし、 Q_j は地域 j における投入・産出エネルギー比、 ε_i は作物 i の産出エネルギー (J/m^2)、 ε'_i は作物 i の投入エネルギー (J/m^2)、 S_i は作物 i の栽培面積 (m^2)、 n は地域 i で栽培される作物の数、または栽培面積の比率 (%) である。

この式を実際の作物生産に適応するためには、次の二つの仮定が必要である。一つめは、すべての作物生産において、農業資材のエネルギー集中度は均一と見なすことである。例えば、農業資材の一部門である肥料は、アンモニア、硫酸アンモニウム、尿素、リン酸、窒素肥料などに細分類できるが、本研究では、これらをまとめて、肥料という区分でエネルギー集中度を算定する。算定の精度を高めるためには、より詳細な分類の産業連関表を使用する必要があると考えられる。二つめの仮定は、本研究で用いる投入・産出エネルギー比の値は日本全体の平均であるため、同じ作物であれば、どの地域で生産されていてもエネルギー効率は均一と解釈することである。この点を改善して、算定の精度を高めるためには、地域ごとに集計された生産費のデータを使用して、個々の作物の投入・産出エネルギー比を地域ごとに調節する必要がある。

ここで、本研究で用いる投入・産出エネルギー比の表示方法を説明する。一般的に投入・産出エネルギー比の値は、(1) 投入エネルギーに対する産出エネルギーの比率 (産出 / 投入)、または、(2) 産出エネルギーに対する投入エネルギーの比率 (投入 / 産出) によって示される (Pimentel et al., 1973)。作物生産の場合、産出食料エネルギーが投入化石燃料エネルギーを上回る場合もあるため、前者の投入エネルギーに対する産出エネルギーの比率を用いることが多い (Bayliss-Smith, 1982)¹⁾。また、前者の表示方法は、エネルギー効率が低いほど数値が大きくなるため、エネルギー効率の高低を瞬時に判別しやすいという利点もある。後者の表示方法は、製造業や輸送業など、産出エネルギーに比較して、投入化石燃料エネルギーの量が非常に大きくなる産業で主に使用される。

第2図は、上記の式 (4) を、都道府県スケールの作物生産に適用した結果である。ここでは便宜的に、投入・産出エネルギー比の階級を、投入に対する倍数 (0.5, 1.0, 2.0, 3.0) で区分した。1970年の算定結果では、投入・産出エネルギー比が最も高いのが鹿児島であり、最も低いのが山梨と高知となった。投入・産出エネルギー比が2.0を超える地域が、北海道、東北、北陸、近畿、中国の各地方にかけて広く分布する。一方、関東、中部、四国、九州の北部で



第2図 日本における作物生産の投入・産出エネルギー比の変化（都道府県別）

資料：第8表，農林業センサス。

は、投入・産出エネルギー比が2.0を下回る都府県が分布する。1980年になると、山梨県と高知県において、投入・産出エネルギー比が1.0を下回った。また、中国と九州地方において、投入・産出エネルギー比が低下した複数の県がある。

1990年の結果では、投入・産出エネルギー比の低下がより顕著に見られる。特に、関東、中部の太平洋岸、紀伊半島、四国、九州の各地方において、投入・

産出エネルギー比が1.0を下回るようになった。なかでも高知、熊本、沖縄では、投入・産出エネルギー比が0.5以下まで低下した。一方、北海道、東北、北陸の各地方では、1970年と比較して投入・産出エネルギー比が低下している県が多いものの、1.0以上の値を維持している県がほとんどである。2000年の結果では、さらに投入・産出エネルギー比が低下する。南関東、東海、近畿地方においても、投入・産出エネルギー比が0.5以下まで低下した県が見られる。また、2.0以上の投入・産出エネルギー比を維持している県は富山県だけとなった。

このように、個々の作物生産の投入・産出エネルギー比をもとにして、地域全体の投入・産出エネルギー比を示すことが可能である。さらに、地図化の結果、地域的な作物生産の投入・産出エネルギー比の値によって、その地域において生産される作物の種類が、ある程度まで推定できると予想される。例えば、地域的な作物生産の投入・産出エネルギー比が1.0を下回ると、果樹や野菜などの低位効率作物の生産が盛んになり、それ以上では、水稻やいも類などの中位・高位効率作物の生産が盛んになると指摘できそうである。しかし、そのような指摘をするためには、地域的な投入・産出エネルギー比をもとにして、効率性の基準を設定する必要があると考えられる。次節以下では、地域的な投入・産出エネルギー比の効率性を設定し、さらに、それに基づいた現実の作物生産を検討する。

3.2 地域的な作物生産のエネルギー効率

作物生産の投入・産出エネルギー比は作物によって異なり、さらに、ある地域で生産される作物の組み合わせも多様である。本研究では、典型的な作物の組み合わせから、地域的な作物生産のエネルギー効率を検討する。そうすることによって、投入・産出エネルギー比の数値から、ある地域で栽培される作物の種類をある程度予測することが可能になる。さらに、農業地域区分の指標として、投入・産出エネルギー比の数値を使用することも可能になると予想される。ここでは、地域的な作物生産のエネルギー効率を検討する際、日本において最も広い面積で栽培されている水稻を組み合わせの基本とする。いま、水稻

の栽培面積の比率を S_r 、その他の作物の栽培面積の比率を S_o とすると、式 (4) は以下のように変形できる。

$$Q_{ro} = \frac{\varepsilon_r S_r + \varepsilon_o S_o}{\varepsilon'_r S_r + \varepsilon'_o S_o} \quad (5)$$

$$S_r + S_o = 1 \quad (6)$$

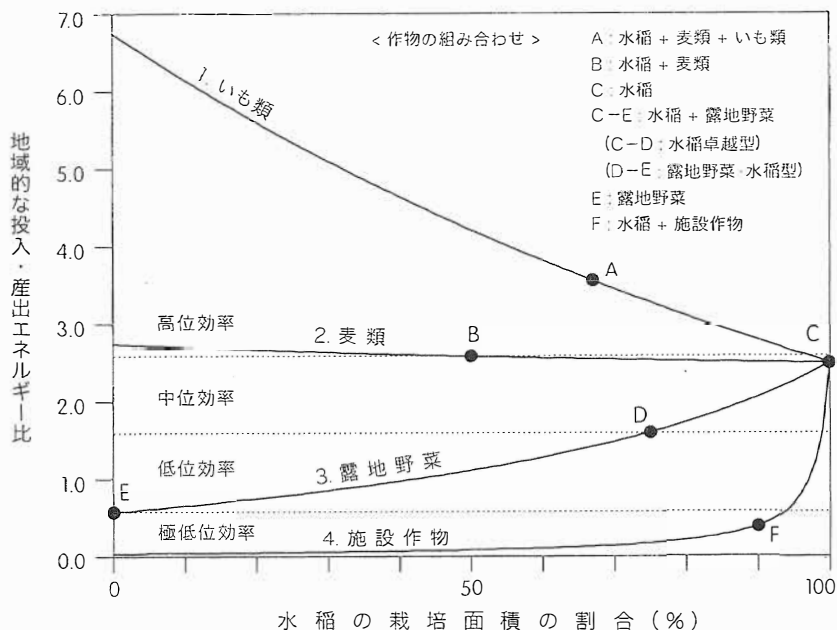
次に、水稲と組み合わせて栽培される作物として、いも類（高位効率作物）、麦類（中位効率作物）、露地野菜（低位効率作物）、施設作物（極低位効率作物）を想定する。これらの式に、1990年の作物生産の投入エネルギーと産出エネルギー（第8表を参照）を代入すると、その解は第3図の曲線1～4となる。以下、これらの曲線に基づいて、作物の組み合わせとエネルギー効率の値の関係を検討する。

まず、ある地域において水稲だけが生産される場合を想定する。その場合、水稲の栽培面積は100%であるため、地域的な作物生産の投入・産出エネルギー比の値は2.5となる（第3図a：C点）。また、水稲と麦類の面積割合がそれぞれ50%の地域を想定すると、地域的な投入・産出エネルギー比の値は2.6となる（第3図a：B点）。これら水稲単作型の地域、および、水稲と麦類の二毛作型の地域など、穀類の割合が高い地域では、地域的な投入・産出エネルギー比の値は2.5前後になると予想される。

ここで、水稲単作型および水稲と麦類の二毛作型を想定した地域よりも高い値（2.7以上）を示す地域を「高位効率地域」と定義する。作物の組み合わせの曲線から判断すると、高位効率地域においては、中位効率作物である穀類や豆類、あるいは、高位効率作物であるいも類が主に生産される作物になると予想される（第3図b）。例えば、ある地域において、水稲、大麦、かんしょが同じ面積で生産されており、かつ大麦と水稲の投入・産出エネルギー比が同じであると仮定すると、地域の投入・産出エネルギー比は3.6となる（第3図a：A点）。

次に、高位効率地域よりもエネルギー効率が低い例として、水稲と露地野菜が生産される地域を想定する。水稲と露地野菜の典型的な栽培比率を想定するのは困難であるため、ここでは経験的に、露地野菜の割合が25%以上の地域

a. 投入・産出エネルギー比のグラフ



b. エネルギー効率

エネルギー 効率	投入・産出 エネルギー比	生産が予想される作物				
		いも類	麦類 豆類	水稻	露地野菜 果樹	施設作物
高位	2.7～	◎	○	○	△	△
中位	1.7～2.6	△	○	◎	△	△
低位	0.7～1.6	△	○	○	◎	△
極低位	～0.6	△	△	○	○	◎

面積の割合 ◎ 高 ○ 中 △ 低

第3図 作物の組み合わせとエネルギー効率区分 (1990年)

資料: 第8表。

を露地野菜・水稻の混合型と呼び、それ未満の地域を水稻卓越型と呼ぶことにする²⁾。ここでは、露地野菜・水稻の混合型を「低位効率地域」(投入・産出エネルギー比: 0.7 ~ 1.6) と定義し、低位効率地域と高位効率地域の間を「中位効率地域」(1.7 ~ 2.6) と定義する。

低位効率地域における投入・産出エネルギー比は、露地野菜の比率が増加するに従って低下し、露地野菜が 100% で 0.6 となる (第 3 図 a: E 点)。低位効率地域では、露地野菜や果樹などの低位効率作物や、穀類などの中位効率作物などが多様な比率で生産されていると予想される。また、中位効率地域では、水稻、麦類、豆類などの中位効率作物が主な作物になると予想される。

さらに、地域的な投入・産出エネルギー比が、露地野菜・水稻型よりも低い値 (0.6 以下) を「極低位効率地域」と定義する。極低位効率地域では、施設作物などの極低位作物、および露地野菜や果樹などの低位作物を中心としながらも、水稻をはじめとする中位効率作物が、多様な比率で生産されていると予想できる³⁾。

以上のように、水稻を基準とした作物の組み合わせを考慮すると、地域的な投入・産出エネルギー比の値は、高位効率から極低位効率までの四つの段階に区分することができる。さらに、それぞれの効率性の地域において生産される作物も、ある程度まで予想できる。これと同じ方法により、他年のエネルギー効率を算定した結果が第 9 表である。これらの値が、農業地域区分や作物産地の事例を説明するための基礎データとなる。

ただし、現実の地域では、複数の作物が多様な比率で生産されているため、地域的な作物生産のエネルギー効率から、その地域で生産される作物を正確に推定することは難しい場合もある⁴⁾。ここで提示したエネルギー効率区分は、エネルギー論 (energetics) の視点により、地域的な作物生産を総合的に説明するための目安である。したがって、地域的なエネルギー効率と作物に関する議論は、現実の作物生産と照らし合わせる必要がある。以下の節では、地域的な作物生産のエネルギー効率と実際の作物生産との関連を、日本全体と都道府県のスケールにより検討する。

第9表 地域的な作物生産のエネルギー効率（1970～2000年）

エネルギー 効率	地域的な投入・産出エネルギー比						
	1970年	1975年	1980年	1985年	1990年	1995年	2000年
高位	2.7～	3.3～	3.0～	3.2～	2.7～	2.3～	3.0～
中位	1.8～2.6	2.4～3.2	2.0～2.9	2.1～3.1	1.7～2.6	1.2～2.2	1.4～2.9
低位	0.7～1.7	1.0～2.3	0.9～1.9	1.0～2.0	0.7～1.6	0.4～1.1	0.4～1.3
極低位	～0.6	～1.0	～0.8	～0.9	～0.6	～0.3	～0.3

資料：第8表，第3図。

3.3 作物生産のエネルギー効率の時間的・空間的变化

3.3.1 日本全体の変化

本項では、日本における作物生産のエネルギー効率の時間的・空間的な変化を説明するために、前出の式(4)と式(5)を日本全体と都道府県の二つのスケールに適用する。使用するデータは、単位面積あたりの投入化石燃料エネルギーと産出食料エネルギーには第2章の算定結果、作物の栽培面積（収穫面積）には農林業センサスとする。算定の対象とする作物は39種類であり、いくつかの作物については、次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の値を代替することにした。すなわち、(1) 陸稲とその他の穀類には穀類の平均値、(2) 大麦と裸麦には六条大麦の値、(3) その他の豆類には豆類の平均値、(4) すいか、いちご、未成熟とうもろこし、その他の露地野菜には露地野菜類の平均値、(5) 施設野菜と施設果樹には施設作物の平均値、(6) かき、うめ、くり、その他の果物には果樹類の平均値を代入した⁵⁾。

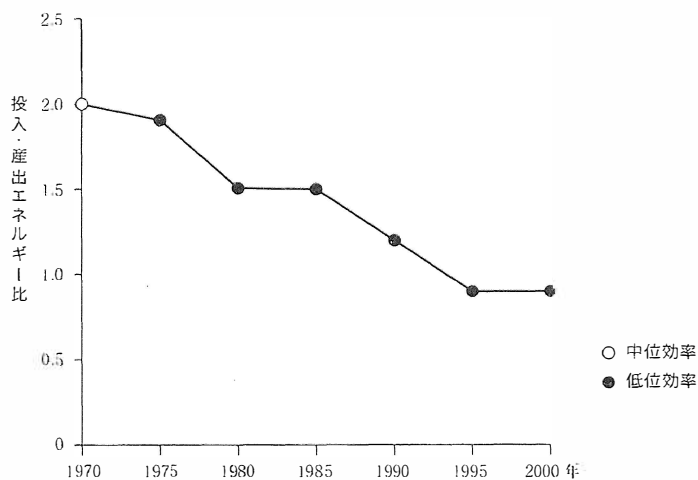
以上の手順によって、日本全体の作物生産のエネルギー効率の変化を示したグラフが第4図aである。投入・産出エネルギー比の値は1970年に2.0であったが、1990年には1.2まで、2000年には0.9まで低下した。効率性で見ると、1970年は中位効率に分類されたが、その後は低位効率に分類されている。第2章の第8表で示したように、個々の作物生産の投入・産出エネルギー比は、年次ごとに大きな変化はない。したがって、日本における作物生産の投入・産出エネルギー比とエネルギー効率の低下は、作物の栽培面積の変化によるところが大きいと考えられる。

ここで、日本において栽培されている主な作物の栽培面積の変化を検討する。第10表に示すように、1970～2000年において、栽培面積が大幅に減少した作物は、水稻、いも類、その他の穀類である。ほぼ横ばいか漸減した作物が、露地野菜、果樹、豆類であり、増加したのが施設作物である。また、作物の合計栽培面積は、1970年の452万haから2000年の230万haに減少している。エネルギー効率の分類ごとに見ると、中位効率作物である水稻の栽培面積は、1970年の290万haから2000年の147万haへと約50%まで減少した。同様に高位効率作物であるいも類は、25万haから9.7万haまで減少した。一方、極低位効率である施設作物は、全作物に占める面積の割合は低いものの、1970年には9千haであったのが、1990年には4.7万haへと約5倍に増加した。

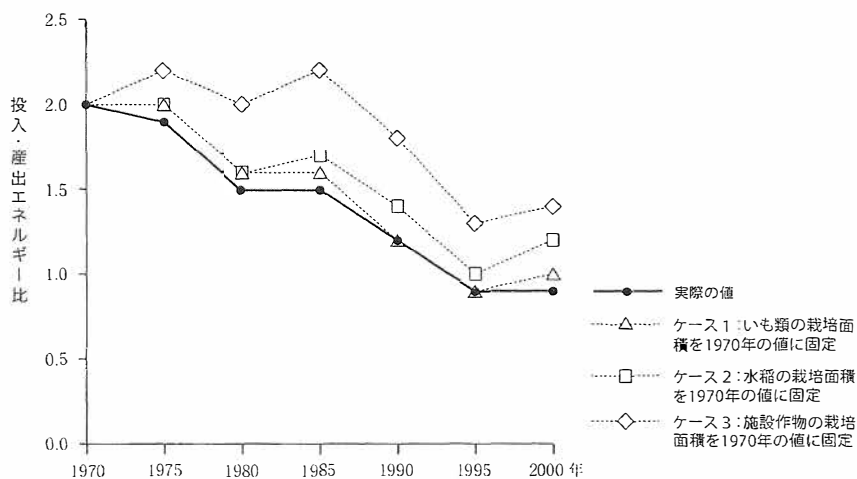
このような栽培面積の増減をふまえて、日本において作物生産のエネルギー効率が低下した要因を検討する。ここでは、一つの作物の栽培面積が1970年から変化がないと仮定して、2000年までの投入・産出エネルギー比の変化を示す。この方法によると、2000年に最も高い投入・産出エネルギー比を示した作物が、全体のエネルギー効率の低下に最も大きな影響を与えたことになる。その結果、第4図bに示すように、水稻の栽培面積を1970年の値に固定した場合、2000年の投入・産出エネルギー比は1.2となった。同様に、いも類の栽培面積を固定した場合は1.0となり、施設作物の栽培面積を固定した場合は1.4となった。したがって、作物の栽培面積の増減から見て、日本における作物生産のエネルギー効率が減少した最大の要因は施設作物の増加であり、次いで水稻の減少にあるといえる。

全作物の栽培面積に占める施設作物の割合は、2000年においてもわずか2%にすぎない。しかし、施設作物の栽培には、単位面積あたりに莫大な化石燃料エネルギーが投入されるため、日本全体の作物生産のエネルギー効率の変化にも大きな影響を与える。2000年の日本における施設作物の投入化石燃料エネルギーは 0.9×10^{15} kJと推定される。これは、すべての作物生産に投入される化石燃料エネルギーの4割を超える量である⁶⁾。

a. 投入・産出エネルギー比とエネルギー効率の変化



b. 投入・産出エネルギー比の変化モデル



第4図 日本における作物生産のエネルギー効率の変化

資料: 第3図, 第8表, 第9表, 農林業センサス。

第 10 表 日本における作物の栽培面積 (1970 ~ 2000 年) (1,000ha)

年	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
水 稻	2,896	2,471	2,309	2,061	1,849	1,897	1,469
麦 類	564	211	284	327	375	204	208
いも類	248	157	142	142	123	102	97
豆 類	131	141	145	127	125	30	67
露地野菜	360	338	340	312	318	222	228
果 樹	312	322	307	270	242	220	187
施設作物	9	20	30	38	49	47	45
合 計	4,520	3,660	3,556	3,277	3,081	2,722	2,302

※麦類には陸稲とその他の穀類を含む。

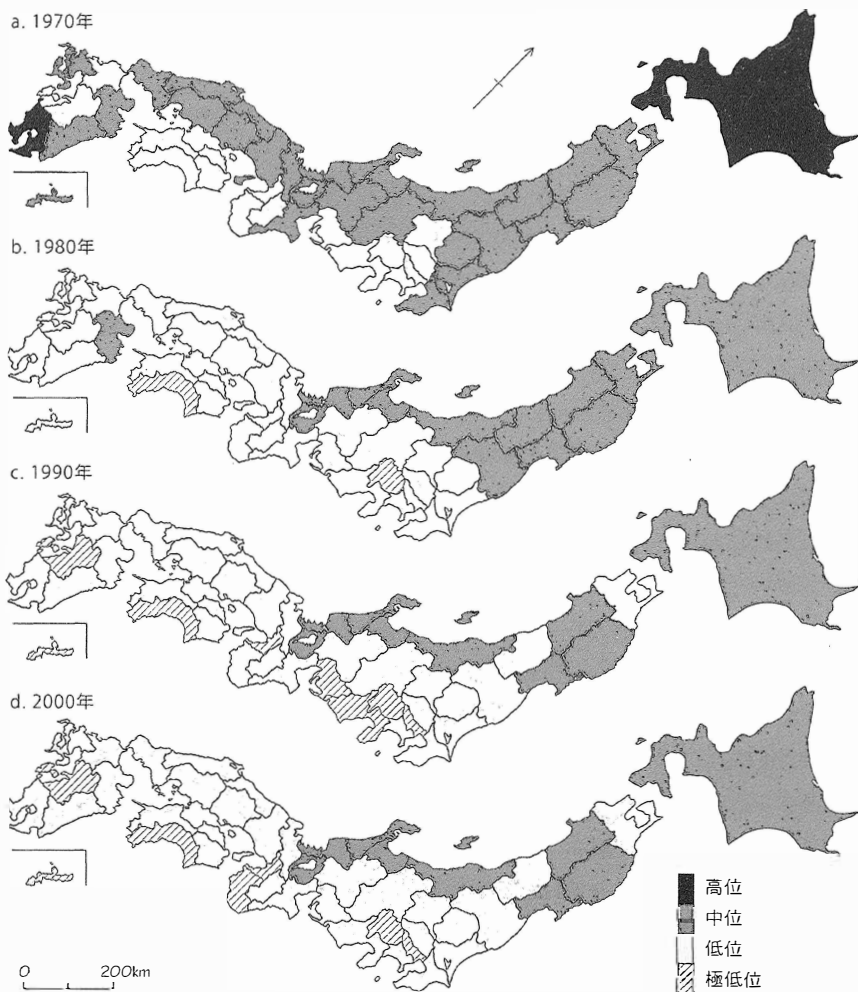
資料：農林業センサス。

3.3.2 都道府県スケールのエネルギー効率の変化

(1) 作物の種類とエネルギー効率

次に、地域的な作物生産のエネルギー効率がいかに低下したかを、都道府県スケールで分析する。第 2 図で示した都道府県別の投入・産出エネルギー比の値を、エネルギー効率に置き換えたものが第 5 図である。その結果、高位効率地域に区分される地域（都道府県）は、1970 年の北海道と鹿児島だけであった。中位効率に区分される地域は、1970 年には 29 であったが、1980 年には 12 に減少し、1990 年と 2000 年には 9 となった。この結果とは対照的に、低位効率に区分される地域は 1970 年には 16 であったのが、1980 年には 32 まで増加し、それ以降は横ばいとなる。さらに、極低位効率に区分される地域は、1970 年には存在しなかったのが、1990 年には 8 まで増加した。このように、都道府県スケールから見た作物生産のエネルギー効率は、1970 年から 1990 年にかけて大きく低下した。以下、1970 年と 1990 年の地図に着目して、エネルギー効率と作物の栽培面積の関係を説明する。

第 11 表は、1970 年と 1990 年の都道府県における作物の栽培面積の割合を、エネルギー効率ごとにまとめたものである。高位効率における作物の栽培面積の割合は、水稻、いも類、麦類の順に高く、特にいも類は全国平均の約 4 倍に上る。いも類の内訳を見ると、鹿児島におけるかんしょの栽培面積 (4.3 万 ha) と、北海道におけるばれいしょの栽培面積 (6.8 万 ha) は、全国で最大の値であった。



第5図 日本における作物生産のエネルギー効率の変化（都道府県別）

資料：第3図，第8表，第9表，農林業センサス。

1970年に中位効率に区分される地域は、東北、北陸、中部、中国、九州に広く分布していた。中位効率地域における作物の栽培面積の比率は、全国平均とほぼ同じか、水稻の割合が若干高い。これらの地域には、水稻の栽培面積の上位5県のうち4県、および麦類の栽培面積の上位5県のうち4県が含まれる⁷⁾。

第 11 表 作物生産のエネルギー効率と栽培面積の割合（1970 年と 1990 年）

年	エネルギー 効率	都道府県 の数	栽培面積の割合（％）						
			いも類	水 稲	麦 類	豆 類	果 樹	露地野菜	施設作物
1970	高 位	2	22.4	46.3	13.5	10.0	2.9	4.8	0.1
	中 位	29	4.0	71.0	8.7	2.2	6.7	7.3	0.1
	低 位	16	4.1	51.9	14.4	1.6	13.9	13.5	0.6
	極低位	—	—	—	—	—	—	—	—
	合計	47	4.8	63.4	10.9	2.3	9.0	9.3	0.3
1990	高 位	—	—	—	—	—	—	—	—
	中 位	9	2.3	76.1	9.0	5.2	1.6	5.4	0.4
	低 位	30	2.9	58.1	9.4	3.8	11.9	12.2	1.6
	極低位	8	2.6	41.0	3.9	1.7	23.2	21.8	5.8
	合計	47	2.7	58.6	8.4	3.7	11.9	12.6	2.1

※麦類には陸稲とその他の穀類を含む。

資料：第 5 図，農林業センサス。

1970 年に低位効率に区分される地域は、関東地方よりも南西に分布する。低位効率地域における作物の栽培面積の比率は、果樹、露地野菜、施設作物の値が高く、いずれも全国平均の約 2 倍である。低位効率地域には、果樹の栽培面積上位 5 県のうち 3 県、施設の面積上位 5 県のうち 3 県、および露地野菜の栽培面積上位 5 県のうち 1 県が含まれる⁸⁾。

次に、1990 年におけるエネルギー効率の分布と栽培作物を検討する（第 5 図 c）。作物の栽培面積の割合を 1970 年の値と比較すると、露地野菜、果樹、豆類、施設作物で高くなり、水稲、麦類、いも類で低くなった（第 11 表）。1970 年に中位効率地域に区分される地域は、北海道、東北、中部など、北日本から日本海側に残存する。中位効率地域における作物の栽培面積の比率は、全国平均と比較して水稲が 20% 高い。また、1970 年の中位効率地域の平均と比較しても、水稲が 5% 高くなった。1990 年の中位効率地域には、水稲の栽培面積上位 5 県のうち 4 県が含まれる⁹⁾。

1990 年に低位効率に区分される地域は、関東、中部、近畿、中国、四国、九州に広く分布する。低位効率地域における作物の栽培面積の割合は、全国の平均値とほぼ一致する。1970 年の中位効率地域の平均と比較すると、果樹と露地野菜が 4% 低下し、水稲が 7% 高くなった。1990 年の低位効率地域には、

露地野菜の栽培面積上位5県のうち3県が含まれる¹⁰⁾。

1990年に極低位効率に区分される地域は、東京（地域的な作物生産の投入・産出エネルギー比：0.5）、山梨（0.5）、静岡（0.5）、大阪（0.5）、高知（0.3）、熊本（0.4）、沖縄（0.2）である。極低位効率地域における栽培面積の割合は、全国の平均値と比較して施設が約3倍、果樹と露地野菜が約2倍と高い。また、極低位効率地域には、施設の面積上位5県のうち3県と、果樹の栽培面積上位5県のうち1県が含まれる¹¹⁾。

このように、エネルギー効率と栽培作物の組み合わせは、地域的な作物生産の実態を反映していると考えられる。すなわち、高位効率では、いも類、麦類、水稻の割合が高く、それに相当する地域は1970年の地図だけに見られた。中位効率は、水稻の割合が高い地域であり、東北から北陸にかけての水稻の産地があてはまる。一方、低位効率は、露地野菜や果樹の割合が高い地域であり、関東以西に分布する。これらは、都市近郊や輸送園芸地域などの野菜・果樹の産地を含む地域である。低位効率地域のなかでも、施設作物と園芸作物の割合が特に高い地域は、1990年になると極低位効率に区分されるようになった。

（2）エネルギー効率の低下と作物の組み合わせ

1970年と1990年の都道府県スケールの分析では、作物生産のエネルギー効率が低下した地域と変化しなかった地域が見られた。さらに、エネルギー効率が低下した地域には、(1) 高位効率から中位効率・低位効率、(2) 中位効率から低位効率、(3) 低位効率から極低位効率への変化があった。ここでは、作物生産のエネルギー効率が低下するパターンと栽培作物の種類を検討する。本研究では、ある地域で生産される複数の作物の特徴を把握するために、修正ウィーバー法を使用する¹²⁾。

第6図は、作物生産のエネルギー効率と修正ウィーバー法による作物結合タイプ（代表的な作物の組み合わせ）の変化を、1970年と1990年で分析したものである。修正ウィーバー法で算定の対象とした作物は、いも類、水稻、麦類（およびその他の穀類）、豆類、露地野菜、果樹、施設作物の7類型とする。作物の結合タイプを示す略字は、Pをいも類、Rを水稻、Wを麦類、Bを豆類、Vを露地野菜とする。

算定の結果、1970 年では、12 種類の作物結合タイプが抽出できた。具体的には、R (都道府県の数:23), RW (10), RF (4), RWP (2), RV (1), RWF (1), RPB (1), RWV (1), RPWV (1), RWPV (1), RPFV (1), RWFV (1) である。同様に、1990 年の算定結果では、11 種類の作物結合タイプが抽出できた。具体的には、R (21), RW (5), RF (5), RV (5), RFV (3), FV (2), RWV (2), RP (1), RWF (1), RWPB (1), RPWF (1) である。1970 年の作物結合タイプはいずれも R を含んでいたが、1990 年には R を含まない組み合わせも出現した。

作物生産のエネルギー効率と作物の組み合わせを見ると、まず、1970 年の高位効率地域 (第 6 図のグループ 1) は、水稻といも類を中心として、麦類または豆類が付随するというように、高位・中位効率作物の組み合わせからなる。また、1970 年の中位効率地域では、作物結合タイプが水稻単作の R で示される地域が 20 に達する (グループ 2)。これらの地域は、1990 年になると、8 地域が中位効率の水稻単作のまま変化せず、12 地域が低位効率の水稻単作へ変化した (グループ 6)。

1970 年の中位効率地域には、水稻と麦類、水稻と麦類といも類、水稻と露地野菜 (果樹) など、複数の組み合わせからなる地域が九つある (グループ 3)。1990 年になると、これらの地域のうち七つが、低位効率かつ複数の組み合わせのタイプ (グループ 7) に変化し、一つが極低位効率 (グループ 8) に変化した。このように、水稻単作とは対照的に、複数の作物を組み合わせで生産しているすべての地域で、エネルギー効率の低下が確認できた。1970 年の低位効率地域には、水稻に加えて、麦類または露地野菜や果樹などの中・低位効率作物との組み合わせからなる地域が 16 ある (グループ 4)。1990 年になると、これらの地域のうち九つが低位効率のまま推移し (グループ 6 とグループ 7)、七つが極低位効率地域に変化した (グループ 8)。

以上より、1970 年から 1990 年にかけて、作物生産のエネルギー効率の変化には大きく五つのパターンが見いだせる。すなわち、(1) 中位効率で水稻単作のまま推移した地域、(2) 中位効率の水稻単作から、低位効率の水稻単作に低下した地域、(3) 中位効率の複数組み合わせから、低位効率の複数組み合わせに低下した地域、(4) 低位効率のまま推移した地域、(5) 低位効率から極低位

a. 1970年

効 率 結 合 都 道 府 県
 タイプ

高 位	(グループ1)
	PRW 鹿児島 PRB 北海道
中 位	(グループ2)
	R 青森, 岩手, 宮城, 秋田, 山形, 福島, 新潟, 富山, 石川, 福井, 岐阜, 三重, 滋賀, 京都, 兵庫, 鳥取, 島根, 岡山, 広島, 山口
低 位	(グループ3)
	RW 茨城, 栃木, 佐賀, 大分 PRW 宮崎 PRWF 長崎 PRFV 沖縄 RWV 千葉 RF 長野
極 低 位	(グループ4)
	R 大阪, 奈良, 高知 RW 群馬, 埼玉, 徳島, 香川, 福岡, 熊本 PRWV 東京 RV 愛知 RF 静岡, 和歌山, 愛媛 RWF 山梨 RWFV 神奈川
	(該当なし)

b. 1990年

結 合 都 道 府 県
タイプ

(該当なし)
(グループ5)
PRWB 北海道 R 岩手, 宮城, 秋田, 新潟, 富山, 石川, 福井, 滋賀
(グループ6)
R 山形, 福島, 埼玉, 岐阜, 三重, 京都, 兵庫, 奈良, 島根, 岡山, 広島, 山口
(グループ7)
RW 栃木, 香川, 福岡, 佐賀, 大分 PR 鹿児島 PRWF 長崎 RV 千葉, 徳島, 宮崎 RF 青森, 和歌山, 鳥取, 愛媛 RWV 茨城, 群馬 RFV 神奈川, 長野
(グループ8)
R 高知 RF 山梨 RV 愛知, 大阪 RWF 熊本 RFV 静岡 FV 東京, 沖縄

※作物の結合タイプは土井(1970)による修正ウィーバー法により算定した。

作物結合タイプを示す略字は次のとおり：

P いも類, R 水稻, W 麦類, B 豆類, F 果樹, V 露地野菜

第6図 作物生産のエネルギー効率と作物結合タイプの変化

資料：第4図，農林業センサス。

効率に低下した地域である。

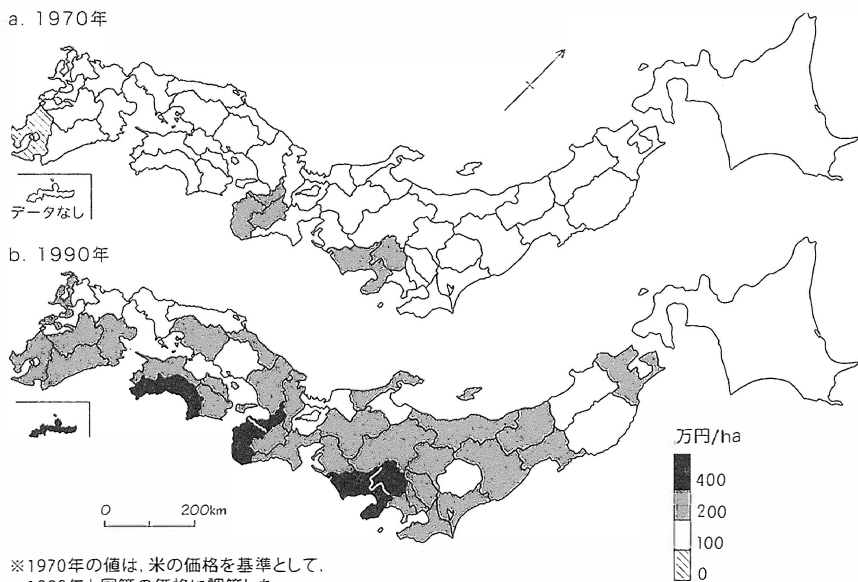
ここで、エネルギー効率が低下した上記のパターン (2), (3), (5) について、栽培作物の割合を検討する。まず、パターン (2) は、両年で同じ作物結合タイプで示されるものの、栽培作物の割合は、水稻が 77% から 75% へ微減し、いも類・麦類・豆類の合計も 11% から 10% へと微減した。一方、露地野菜と果樹は 12% から 14% へと微増し、施設作物は 0.1% から 1.2% へと増加した。パターン (3) の変化では、例えば千葉、宮崎、沖縄では W や R が外れたり、茨城と長野では V が含まれるなど、中位効率作物の減少と低位効率作物の増加が明確に見てとれる。さらに、パターン (5) では、水稻が 51% から 42% へと減少した一方で、露地野菜と果樹は 31% から 49% へと増加し、施設作物は 1.1% から 5.9% へと大幅に増加した。

このように、1970 年と 1990 年における作物生産のエネルギー効率と作物結合タイプの変化をみると、東北や北陸にかけては、水稻単作が卓越し、作物生産の効率性が維持されてきた。しかし、関東よりも南西の太平洋岸では、露地野菜や果樹の割合が高くなり、麦類や水稻の割合が低下したりして、エネルギー効率が低下してきた。また、修正ウィーバー法による組み合わせには現れなかったが、施設作物の増加も作物生産のエネルギー効率を低下させた大きな要因となっている。

3.3.3 作物生産のエネルギー効率と経済性

本項では、エネルギー効率が大幅に低下した 1970 年と 1990 年に注目して、エネルギー効率と経済的な生産性の関係を検討する。第 7 図は、作物生産の経済的な土地生産性（耕地 1 ha あたりの作物の販売額）を都道府県別に示したものである。1970 年の土地生産性は、1990 年の値と比較しやすいように、米の価格を基準としたデフレーター（価格修正指数）により 1990 年の実質価格で示した¹³⁾。

1970 年の土地生産性は、ほとんどの地域で 1 ha あたり 100 ～ 200 万円の範囲に区分されるが、山梨、静岡、奈良、大阪、和歌山では 1 ha あたり 200 ～ 400 万円に達している。1990 年になると、山梨、静岡、大阪、和歌山、高知、沖縄では 1 ha あたり 400 万円に達し、その他の地域でも 1 ha あたり 200 万円



第7図 作物生産の単位面積あたり販売額の変化

資料：作物統計，生産農業所得統計，農村物価賃金統計。

を超えるようになった。これら経済的な土地生産性が高い地域は、関東地方以西に分布しており、エネルギー効率が低下した地域とほぼ一致する。これらの地域は、山がちであったり、都市化が進んでいるために、耕地面積が少ない地域でもある。そのため農家は、果樹や野菜などの園芸作物を導入し、耕地面積あたりの収益性を高めてきた。

経済の高度成長期とその直後の日本では、専門的な農家が、第二次産業や第三次産業に従事する世帯と同等の収入を得られることを目標に、様々な補助政策が施行された。例えば、農業機械の購入、土地の基盤整備、園芸作物への転換の奨励などがある。これらの政策は、単位面積あたり、または単位労働時間あたりの収益性を高める方向に向けられた。実際に、そのような政策や個々の農家の努力が農業経営の発展を支えてきたことは事実である。しかし、経済性を追求して、エネルギー効率を低下させた現代の作物生産は、人の体を維持するエネルギーを効率的に供給するという農業本来の目標から乖離している

(Giampietro et al., 1992).

また、生産環境を人工的に管理するという点において、環境への負荷も大きくなっていると考えられる。例えば、ビニールハウスやガラスハウスのなかで、温度や湿度を調節されながら作られる野菜は、単位面積あたりの収益性は高いものの、エネルギーの使用量も莫大である。特に、重油を燃やしながら冬季に出荷される施設野菜は、エコロジカルな視点から見て最も高価な作物であるといえる。

3.4 第3章のまとめ

現代農業には、化学肥料や農業機械などの形態で、大量の化石燃料エネルギーが使用されている。そのような人工的に投入さ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といわれている。従来の研究では、投入・産出エネルギー比の値そのものに注目して、農業のエネルギー効率が議論されてきたが、本研究では、投入・産出エネルギー比の値が示す効率性を規定することにした。それにより、投入・産出エネルギー比の値から、ある地域で栽培される作物をある程度まで予測することが可能となり、ひいては、エネルギー効率の視点により、農業地域の特徴が説明できるようになると予想されるためである。

その手順は、まず、個々の作物生産の投入・産出エネルギーと、水稻を基準とした作物の組み合わせを検討することから、地域的な作物生産のエネルギー効率を設定した。その結果、1990年のデータに基づいて算定をした結果、地域的な投入・産出エネルギー比が2.7以上を高位効率地域、1.7～2.6を中位効率地域、0.7～1.6を低位効率地域、0.6以下を極低位効率地域と見なすことができた。それぞれの効率で生産されている主な作物は、高位効率地域においては中・高位効率作物（水稻、麦類、いも類など）、中位効率地域においては中位効率作物（水稻、麦類など）、低位効率地域においては中・低位効率作物（水稻、露地野菜、果樹など）、極低位効率においては中・低・極低位効率作物（水稻、露地野菜、施設作物など）であると予想される。

これと同じ方法により1970年から2000年のエネルギー効率を算定し、その

区分を日本全体と都道府県スケールの作物生産に適用した。その結果、日本全体の作物生産のエネルギー効率は、1970年の中位効率（投入・産出エネルギー比：2.0）から低下を続け、2000年には低位効率（0.9）となった。作物別の栽培面積の変化より、エネルギー効率の低下の要因を分析すると、第一に施設作物の増加、第二に水稲の減少にあることが分かった。

さらに、都道府県スケールの変化を検討すると、特に1970年から1990年にかけて、作物生産のエネルギー効率が大きく低下したことが分かった。1970年には、北海道と鹿児島が高位効率地域に相当していたほか、中位効率地域も広い面積を占めていた。1990年になると、低位効率地域が卓越するようになり、特に関東より南西の太平洋岸においては、極低位効率地域も出現した。極低位効率地域は、露地野菜、果樹、施設作物などの園芸農業の割合が高くなった都府県と一致する。一方、1990年においても中位効率が維持されている地域は、麦類といも類の割合が高い北海道、および水稲の割合が高い東北・北陸地方である。

以上のように、作物生産のエネルギー効率には明確な地域性が見られた。作物生産のエネルギー効率は、農業の時間的・空間的な変化の特徴を説明するための総合的な指標になると予想される。本章では全国と都道府県スケールを対象としたが、地域変化との関連を確認するためには、よりミクロスケールの分析や、従来の農業地域区分との比較が必要である。

注

- 1) 作物生産の投入・産出エネルギー比が1.0を超える場合があるのは、第2章で説明したように、太陽エネルギーや人間の労働力など、算定の前提で省略されるエネルギーがあるためである。
- 2) 修正ウィーバー法による作物結合タイプの算定(本章の第3節と第4章で実施)によると、露地野菜の割合が25%以上になると、水稲と露地野菜の組み合わせが抽出された。また、露地野菜の割合が25%未満になると、水稲単作型になった。
- 3) ただし、水稲や麦類などの中位効率作物の面積が卓越する地域でも、極低位効率地域とすることがある。その理由は、施設作物のエネルギー効率に関連する。施設作物は、単

位面積あたりの生産に使用される化石燃料エネルギーが非常に多くなるため、栽培面積の比率がわずかに増加しただけでも、地域的な投入・産出エネルギー比が著しく低下する。例えば、水稻単作型の地域のなかで、施設作物の栽培面積の比率が10%まで増加した場合、地域的な投入・産出エネルギー比は0.4まで低下する（第3図a:F点）。また、水稻、麦類、いも類が3分の1ずつ生産されている高位効率地域を想定した場合でも、水稻の栽培面積の比率のうち10%が施設作物に転換すると、地域的な投入・産出エネルギー比は0.5まで低下する。

- 4) 地域的な作物生産のエネルギー効率から、その地域で生産される作物をある程度までは予想できるが、次のような例外も想定される。例えば、第3図aにおいて、水稻が生産されている地域の投入・産出エネルギー比がとる値の限界は、曲線1（いも類）と曲線4（施設作物）に挟まれた領域である。この領域において、ある地域の投入・産出エネルギー比の値が0.6（極低位効率）であった場合、水稻の栽培面積の比率がとる理論的な範囲は0～97%となる。したがって、地域的な投入・産出エネルギー比の値が0.6（極低位効率）であっても、耕地のほとんどが水稻である場合も起こりうる。また、高位効率地域として、水稻・麦・かんしょがほぼ同じ割合で栽培されている地域を想定した場合、地域的な投入・産出エネルギー比の値は3.6（第3図a:A点）となる。しかし、現実では、地域的な投入・産出エネルギー比の値が3.0を超えることはほとんどない。その理由は、生産が卓越する地域を想定した場合、地域的な投入・産出エネルギー比の値が4.0を超えることはなく、3.0を超えることもまれである。その理由は、実際の地域では、穀類といも類のほかに、露地野菜などの効率の低い作物が生産されているためである。
- 5) 未成熟とうもろこしの投入・産出エネルギー比について、1990年以前の生産費は公表されていないが、『平成3年産野菜生産費』の結果により算定すると、その結果は0.6となった。これは、1990年の露地野菜の平均と同じであるため、未成熟とうもろこしは露地野菜に含めることにした。また、第2章では算定結果を省略したが、種実類に分類されるくりの投入産出エネルギー比は、1970・1975・1980年が0.6、1985年が0.5、1990年が0.8であった。これらは果樹の平均とほぼ同じであるため、くりは果樹に含めることにした。施設作物について、農林業センサスの施設作物の項目には栽培面積と施設面積のデータが記載されているが、本研究は施設面積によって投入・産出エネルギー比を算定ことにする。その理由は、施設園芸における化石燃料エネルギーの使用量の過大評価を避けるためである。例えば、九十九里平野における施設園芸の事例では、冬季には重油を消費して冬春出荷型のきゅうりが生産されるが、同じ施設で夏季には重油を使用しない雨よけ栽培で夏季出荷型のトマトが生産される（仁平, 1998）。
- 6) この数値はある条件のもとで算定された仮定である。実際の施設園芸で使用される化石燃料エネルギーは、作物の種類、栽培方法、地域によって差異がある。
- 7) 1970年農林業センサスによると、水稻の栽培面積の上位5県は、北海道（25万ha）、新

- 潟 (17), 秋田 (11), 宮城 (11), 福島 (11), 茨城 (10) であった。また、麦類の栽培面積の上位5県は、茨城 (7.3), 北海道 (4.7), 栃木 (4.1), 熊本 (3.7), 千葉 (3.0) であった。
- 8) 1970年農林業センサスによると、果樹の栽培面積の上位5県は、愛媛 (3.7 万 ha), 青森 (1.7), 和歌山 (1.7), 熊本 (1.6), 静岡 (1.6) であり、露地野菜の栽培面積の上位5県は、千葉 (2.7), 愛知 (2.3), 北海道 (2.2), 茨城 (2.1), 埼玉 (2.0) であった。また、施設面積の上位5県は、高知 (1.1 千 ha), 静岡 (0.9), 愛知 (0.6), 茨城 (0.5), 千葉 (0.5) であった。
- 9) 1990年農林業センサスによると、水稻の栽培面積の上位5県は、北海道 (14.3 万 ha), 新潟 (12.6), 秋田 (10.3), 宮城 (9.2), 福島 (8.7) であった。
- 10) 1990年農林業センサスによると、露地野菜の栽培面積の上位5県は、北海道 (4.9 万 ha), 千葉 (2.2), 茨城 (1.8), 長野 (1.7), 青森 (1.4) であった。また、麦類の場合は、北海道 (14.3 万 ha), 栃木 (2.8), 佐賀 (2.5), 福岡 (2.3), 茨城 (2.1) であり、いも類の場合は、北海道 (6.3), 鹿児島 (1.7), 茨城 (0.7), 千葉 (0.5), 長崎 (0.5) であった。このように、1990年における麦類といも類の栽培面積の上位5県は、北海道を除いてすべて低位効率地域に区分されるようになった。
- 11) 1990年農林業センサスによると、施設面積の上位5県は、熊本 (6.6 千 ha), 茨城 (3.2), 愛知 (2.5), 静岡 (2.3), 高知 (2.3) であった。また、果樹の栽培面積の上位5県は、愛媛 (2.5 万 ha), 青森 (2.1), 和歌山 (1.7), 長野 (1.6), 熊本 (1.3) であった。
- 12) ある地域で生産される代表的な作物の組み合わせを抽出する方法として、ウィーバー法 (Weaver, 1954a; 1954b) が使用されている。この方法では、複数の作物の栽培面積に基づいて、ある地域における代表的な作物の組み合わせを抽出する。本研究では、土井喜久一による修正ウィーバー法 (Doi, 1959; 土井, 1970) を適用して、地域的な作物の特徴を検討する。土井の修正ウィーバー法には、どのような栽培比率でも作物結合タイプを導き出せる利点がある。
- 13) デフレーターとは、名目値と実質値の差額を調整するための指数であり、本研究では農作物価賃金統計のデータを使用した。その結果、米の場合には1970年の価格を2.16倍すると、1990年と同等と見なすことができる。

文献

- 土井喜久一 (1970): ウィーバーの組み合わせ分析法の再検討と修正. 人文地理, **22**, 485-502.
- 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.
- Bayliss-Smith, T. P. (1982): *The ecology of agricultural systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 112p.
- Doi, K. (1959): Industrial structure of Japanese Prefecture. *Proceedings of I. G. U. Regional conference in Japan*, 310-316.
- Giampietro, M., Gerretelli, G. and Pimentel, D. (1992): Energy analysis of agricultural ecosystem

- management: human return and sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **38**, 219–244.
- Nihei, T. (2000): Energy efficiency of crop production in Japan, 1970–1990. *Geographical Review of Japan*, **73B**, 27–45.
- Odum (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., 749p.
- Pimentel, D., Hurd, L., Bellotti, A., Forster, M., Oka, I., Sholes, O. and Whitman, R. (1973): Food production and the energy crisis. *Science*, **182**, 443–449.
- Weaver, J. C. (1954a): Crop-combination regions for 1919 and 1929 in the Middle West. *The Geographical Review*, **44**, 560–572.
- Weaver, J. C. (1954b): Crop-combination regions in the Middle West. *The Geographical Review*, **44**, 175–200.

