

作物生産の投入産出エネルギー比による農業地域区分の試み

仁 平 尊 明

I 目的	IV 考察
II 方法	IV-1 日本
III 作物生産地域のエネルギー効率の変化	IV-2 都道府県
	IV-3 作物生産のエネルギー効率と経済性
	V 結論

キーワード：作物生産，投入産出エネルギー比，化石燃料エネルギー，食料エネルギー，農業地域

I 目 的

現代農業には、農薬、化学肥料、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る。これらの化石燃料エネルギーが、とくに先進工業国における農業の生態学的な効率を著しく低下させるといわれる (Odum, 1971; Pimentel et al., 1973)。自然の土地組成や植物の生長を人為的に改変・促成させるという意味において、化石燃料エネルギーの多投入は環境負荷とみなされる (Giampietro et al., 1992)。近年の環境問題に対する社会的関心の高まりを考慮しても、作物生産のエネルギー効率の把握は、農業地理学が取り組まなければならない重要な課題のひとつであるといえる。

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。日本における作物生産の投入産出エネルギー比を最初に算定したのは、科学技術庁資源調査会 (1979) である。さらに、Nihei (2000) は、その方法を援用しながら、産業連関分析と積み上げ法を用いた簡便法を考案し、作物生産の投入産出エネルギー比を複数年次で算定した。その概要は、1970~1990年の投入産出エネルギー比 (産出/投入) の平均が6.8~9.1のイモ類を高位効率作物、1.7~3.9の穀類とまめ類を中位効率作物、0.6~1.1の果樹と露地野菜を低位効率作物、0.04の施設作物を極低位効率作物とするものであった。

個々の作物生産の投入産出エネルギー比が算定できれば、地域的な作物生産に対しても、エネルギー効率を確定できるようになると考えられる。また、エネルギー効率を示す値によって、地域内で生産される作物もある程度予想できるのではないだろうか。Nihei (2000) は、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、野菜などの園芸農業が盛んになり、エネルギー効率が低い地域と指摘できそうだと述べた。しかし、実際には、地域的な作物生産の投入産出エネルギー比の値を区切る基準がないため、その数値からエネルギー効率の高低を述べることはできず、また、そこで生産される作物を予想することも困難である。これらの点が解決できれば、投入産出エネル

ギー比を用いて、エネルギー効率というエコロジカルな視点から農業地域を区分することが可能になると考えられる。以上のような問題意識から、本研究では、地域的な作物生産の投入産出エネルギー比の効率性の基準を設定し、近年の日本における作物生産に適用することから、農業地域区分を行う指標としてのエネルギー効率の有効性を検討したい。

II 方 法

作物生産のエネルギー効率は、投入化石燃料エネルギーと産出食料エネルギーの比率（投入産出エネルギー比）によって示される（Bayliss-Smith, 1982）。一般に、投入産出エネルギー比は、（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）や、（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）で示される。工業や輸送業など、産出エネルギーに比べ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は、（2）の比率がよく用いられる。しかし、農業の場合、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¹⁾、（1）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た方が、エネルギー使用のイメージをつかみやすい。すなわち、エネルギー効率が高いほど、数値が大きくなるのである。このような観点から、本研究では、地域の投入産出エネルギー比を示す値として、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にする。また、その値は、小数点以下1桁で示すことにする。

地域の投入産出エネルギー比は、地域内で生産されるすべて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から算定される。具体的には以下の式による。

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

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 の収穫面積 (m^2)、 n は地域 j で生産される作物の数、または収穫面積の比率 (%) である²⁾。

ひとつの地域で生産される作物の組み合わせと、各作物の投入産出エネルギー比は多様であるため、地域の投入産出エネルギー比の効率性と作物の種類を第1式から予想することは困難である。ここで、地域のエネルギー効率を示す目安となる投入産出エネルギー比の値を、典型的な作物の組み合わせから検討する。その際、日本において最も広い面積で生産される水稻を、組み合わせの基本とする。いま、水稻の収穫面積の比率を S_r 、その他の作物の収穫面積の比率を S_o とすると、第1式は以下のように変形できる。

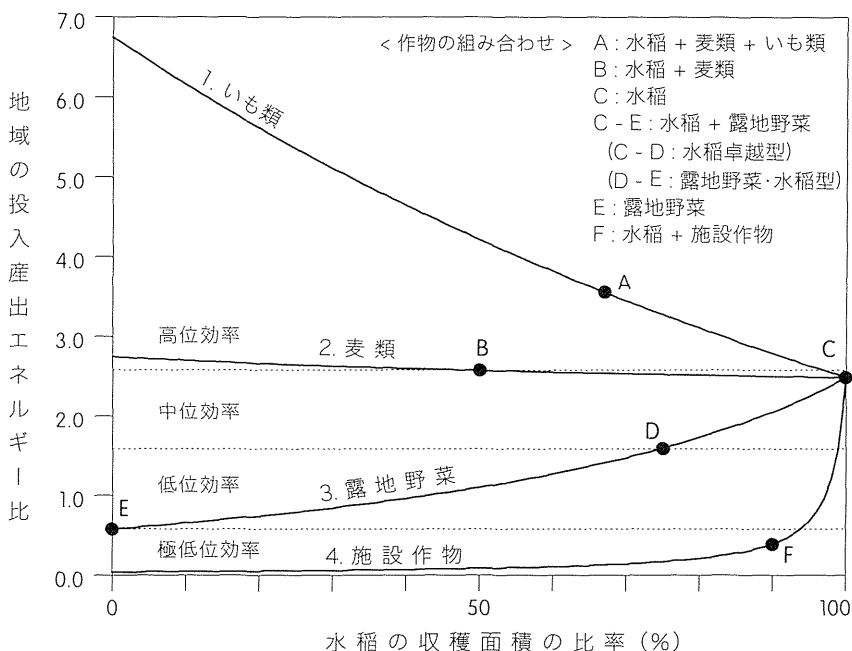
$$Q_{ro} = \frac{\varepsilon_r S_r + \varepsilon_o S_o}{\varepsilon'_r S_r + \varepsilon'_o S_o} \quad (2)$$

$$S_r + S_o = 1 \quad (3)$$

次に、水稲と組み合わせて生産される作物として、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）をとりあげる。この式に、Nihei (2000) によって算定された1990年の各作物の平均値を代入すると、その解は第1図の曲線1～4となる。

水稲単作の場合、水稲の収穫面積の比率が100%であると仮定すると、投入産出エネルギー比は2.5となる（第1図a：C点）。また、米麦二毛作の場合、水稲と麦類の収穫面積の比率がそれぞれ50%であると仮定すると、投入産出エネルギー比は2.6となる（第1図a：B点）。ここでは、水稲単作と米麦二毛作よりも投入産出エネルギー比が高い値（投入産出エネルギー比：2.7以上）を「高位効率地域」とする。高位効率地域においては、中位効率作物と高位効率作物が主な作物になると予想される（第1図b）。例えば、ある地域において水稲、大麦、甘藷だけが同じ面積で生産されてお

a. グラフ



b. エネルギー効率区分

エネルギー効率	投入産出エネルギー比	代表的な作物				
		いも類	麦類 まめ類	水稲	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			○	○	○

第1図 作物の組み合わせとエネルギー効率区分 (Nihei (2000) のデータより作成)。

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1図a：A点）。

次に、高位効率地域の次にエネルギー効率が低い組み合わせとして、水稲と露地野菜を考える。水稲と露地野菜の典型的な収穫面積の比率を想定するのは困難であるため、経験的に水稲の比率が75%以上を水稲卓越型とする（第1図a：C～D点）³⁾。ここでは、水稲卓越型の中でも、上述の水稲単作と米麦二毛作よりも低い値（1.6～2.6）を「中位効率地域」とする。中位効率地域では、水稲、麦類、まめ類などの中位効率作物が主な作物になると予想される。

水稲卓越型よりも水稲の収穫面積の比率が低い地域を、露地野菜・水稲型と呼ぶことにする。露地野菜・水稲型の投入産出エネルギー比は、露地野菜の収穫面積の比率が増加するに従って減少し、比率100%で0.6となる（第1図a：E点）。ここでは、露地野菜・水稲型の値（1.5～0.6）を「低位効率地域」とする。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が主な作物になると予想される。

最もエネルギー効率が低いのは、施設作物との組み合わせである。施設作物は投入化石燃料エネルギーが非常に大きいため、収穫面積の比率がわずかに増加するだけでも投入産出エネルギー比が大きく低下する。例えば、水稲単作地域の中で、施設作物の収穫面積の比率が10%まで増加した場合、地域の投入産出エネルギー比は0.4まで低下する（第1図a：F点）。また、水稲、麦類、いも類が3分の1ずつ生産されている地域で、水稲の収穫面積の比率のうち10%を施設作物に変えた場合、投入産出エネルギー比は0.5まで低下する。ここでは、投入産出エネルギー比が露地野菜・水稲型よりも低い値（0.5以下）を「極低位効率地域」とする。極低位効率地域では、中位効率作物に加えて、施設作物や露地野菜など低位・極低位作物の生産に特徴がみられるようになると予想される。

以上のように、水稲を基準とした作物の組み合わせから、地域の投入産出エネルギー比を、高位効率から極低位効率まで4段階に区分し、それぞれを代表する作物を示すことができた。他の年についても同様に算定した結果が、第1表である。実際の地域には様々な作物が様々な比率で生産されているため、地域の投入産出エネルギー比の値から、そこで生産される作物を正確に述べることは不可能である。ここで提示したエネルギー効率区分は、エネルギー論energeticsからみた地域的な作物生産の特徴を知るための一つの目安standardである⁴⁾。

第1表 地域的な作物生産のエネルギー効率（1970～1985年）

エネルギー効率	投入産出エネルギー比（年）			
	1970	1975	1980	1985
高位	2.7 -	3.3 -	3.0 -	3.0 -
中位	1.8 - 2.6	2.4 - 3.2	2.0 - 2.9	2.0 - 2.9
低位	0.7 - 1.7	1.0 - 2.3	0.9 - 1.9	0.9 - 1.9
極低位	- 0.6	- 0.9	- 0.8	- 0.8

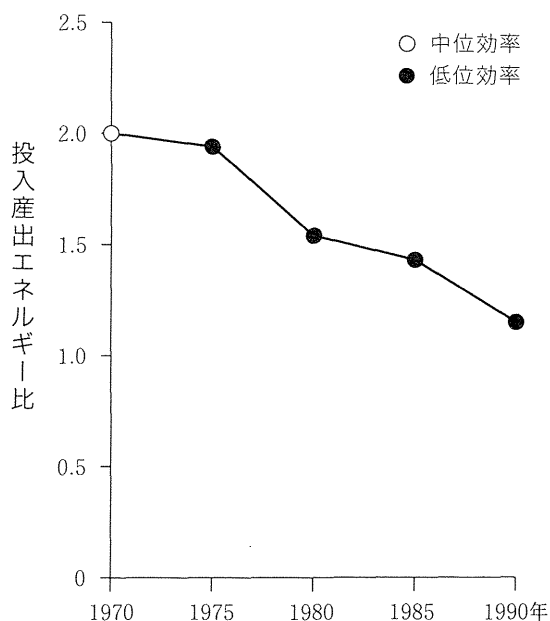
(Nihei (2000) より作成)。

Ⅲ 作物生産地域のエネルギー効率の変化

ここで、地域的な作物生産のエネルギー効率の変化を示すため、第1式を日本全体と都道府県のスケールに適用する。投入化石燃料エネルギーと産出食料エネルギーの資料はNihei (2000) の結果を使用し、収穫面積は農業センサスと世界農林業センサスのデータによる。対象とする作物の種類は38種類であり、いくつか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は、次のように代替した。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) その他のマメ類、クリ、ウメにはマメ類の平均値、(4) スイカ、イチゴ、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⁵⁾、(6) 柿とその他の果物には果樹類の平均値である。

まず、1970年から1990年までの日本全体の作物生産に適用した結果が第2図である。日本全体の投入産出エネルギー比は、1970年の2.0から1990年に1.2に減少した。すなわち、日本における作物生産のエネルギー効率は20年間で60%減少し、中位効率から低位効率に変化したといえる。

個々の作物生産の投入産出エネルギー比の値は、20年間でさほど大きな変化がみられないため、日本における作物生産のエネルギー効率の低下は、収穫面積の変化によるところが大きいと考えられる。分析の対象とした20年間で面積が大きく変化した作物は、水稻、いも類、施設作物である(第2表)。1970年から1990年にかけて、水稻の収穫面積は290万haから185万haに減少し、いも類は25万haから12万haに減少した。施設作物の面積は、1万haから5万haに増加した。また、すべ



第2図 日本における作物生産のエネルギー効率の変化
(Nihei (2000) のデータ、第1図、第1表、農業センサス世界農林業センサスより作成)。

ての作物の収穫面積は、452万 ha から 308 万 ha に減少した。

次に、1970年と1990年の都道府県へ適用した結果が第3図である。1970年における都道府県の投入産出エネルギー比は、鹿児島県の3.1から高知の1.0までの値をとり、地域のエネルギー効率は、高位効率から低位効率までの3段階に区分できる（第3図a）。高位効率地域には、鹿児島県と北海道があてはまる。高位効率地域における作物収穫面積の比率は、水稲、いも類、麦類が高く、とくにいも類の値は全国平均の4倍である（第3表）。なお、鹿児島県におけるサツマイモの収穫面積（4.3万 ha）と北海道におけるジャガイモの収穫面積（6.8）は全国最大であった。

第2表 日本における作物収穫面積の変化

年	(1,000ha)				
	1970	1975	1980	1985	1990
水稲	2,896	2,471	2,309	2,061	1,849
その他の穀類	564	211	284	327	375
いも類	248	157	142	142	123
まめ類	131	141	145	127	125
露地野菜	360	338	340	312	318
果樹	312	322	307	270	242
施設作物	9	20	30	38	49
合計	4,520	3,660	3,556	3,277	3,081

(農業センサス・世界農林業センサスより作成)。



第3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）
 (Nihei (2000) のデータ，第1図，第1表，世界農林業センサスより作成)。

第3表 都道府県別のエネルギー効率と作物収穫面積

年	エネルギー効率	都道府県の数	収穫面積の割合						
			いも類	水稻	麦類, その他の穀類	まめ類	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

(第3図, 世界農林業センサスより作成)。

中位効率地域に区分されたのは、34府県である。これらの府県は、東北、北陸、中部、中国、九州地方に広く分布する。中位効率地域における作物収穫面積の比率は、全国平均とほぼ同じであるが、水稻の値が若干高くなる。中位効率地域には、水稻収穫面積の上位5県のうち4県（北海道25万ha、新潟17、秋田11、宮城11、福島11、茨城10）、および、麦類収穫面積の上位5道県のうち4県（茨城7.3、北海道4.7、栃木4.1、熊本3.7、千葉3.0）が含まれる。

低位効率地域は11都府県であり、関東、東海、近畿、四国地方に分布する。低位効率地域における作物収穫面積の比率は、果樹、露地野菜、施設作物の値が高く、全国平均の約2倍である。低位効率地域には、果樹収穫面積の上位5県のうち3県（愛媛3.7万ha、青森1.7、和歌山1.7、熊本1.6、静岡1.6）、露地野菜収穫面積の上位5県のうち1県（千葉2.7、愛知2.3、北海道2.2、茨城2.1、埼玉2.0）、および、施設作物面積の上位5県のうち3県（高知1.1千ha、静岡0.9、愛知0.6、茨城0.5、千葉0.5）が含まれる。

次に、1990年の結果である。都道府県の投入産出エネルギー比は、北海道の2.3から沖縄の0.2までの値をとる。地域のエネルギー効率は、中位効率から極低位効率までの3段階に区分できる（第3図b）。作物の収穫面積の比率を1970年と比べると、露地野菜、果樹、マメ類、施設作物で高くなり、水稻、麦類、いも類で低くなった（第3表）。

極低位効率地域は、東京（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収穫面積の比率は、全国平均と比べて、施設作物の値が約3倍、果樹と露地野菜の値が約2倍と高くなっている。また、極低位効率地域には、施設作物の面積の上位5県のうち3県（熊本6.6千ha、茨城3.2、愛知2.5、静岡2.3、高知2.3）、果樹収穫面積の上位5県のうち1県（愛媛2.5万ha、青森2.1、和歌山1.7、長野1.6、熊本1.3）が含まれる。

低位効率地域は、11都府県から31府県に増加した。これらは、極低位効率地域を囲むように、関東、中部、近畿、中国、四国、九州地方に広く分布する。低位効率地域における収穫面積比率は、

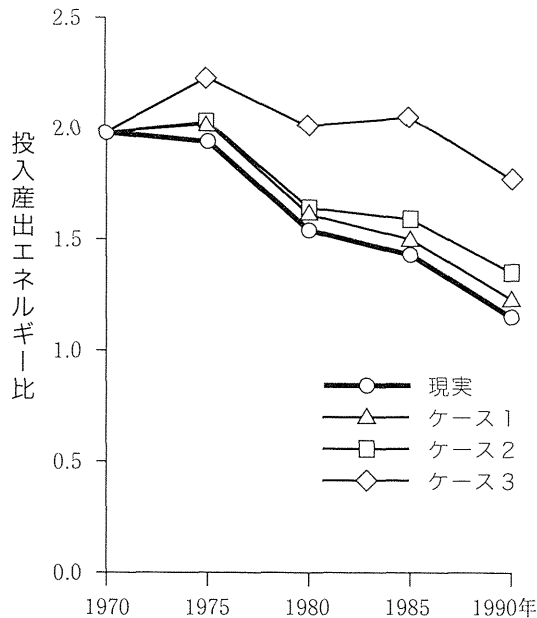
全国平均とほぼ一致する。また、1970年の中位効率地域の収穫面積比率と比較すると、果樹と露地野菜が4%低下し、水稲が7%増加した。低位効率地域には、露地野菜収穫面積の上位5県のうち3県（北海道4.9万ha、千葉2.2、茨城1.8、長野1.7、青森1.4）が含まれる⁶⁾。

中位効率地域は、34府県から9道県に減少した。これらの道県は、北日本から中部日本にかけて、とくに日本海側に分布する。中位効率地域における作物収穫面積の比率は、全国平均と比べて水稲の値が20%高く、また、1970年の中位効率地域の平均と比べても、水稲の値が5%高いことに特徴がある。1990年の中位効率地域には、水稲収穫面積の上位5県のうち4県（北海道14.3万ha、新潟12.6、秋田10.3、宮城9.2、福島8.7）が含まれる。

IV 考 察

IV-1 日本

ここでは、日本における作物生産のエネルギー効率が減少した要因を、作物の収穫面積の変化から検討する。具体的には、一つの作物の収穫面積を1970年の値に固定して、1990年までの投入産出エネルギー比の変化を示すことにする。この方法によれば、1990年に最も高い投入産出エネルギー比となった作物が、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。対象とする作物は、収穫面積が大きく変化した水稲、いも類、施設作物の3種類とする。まず、水稲の収穫面積を1970年の値に固定した場合、1990年の投入産出エネルギー比は1.4となる（第4図）。同様に、イモ



ケース1：いも類の収穫面積を1970年の値に固定
 ケース2：水稲の収穫面積を1970年の値に固定
 ケース3：施設作物の面積を1970年の値に固定

第4図 投入産出エネルギー比の低下モデル

(Nihei (2000), 農業センサス・世界農林業センサスより作成)。

類の収穫面積を1970年の値に固定した場合、1990年の投入産出エネルギー比は1.3となり、また、施設作物の面積を1970年の値に固定した場合、投入産出エネルギー比は1.8となる。したがって、エネルギー効率が減少した最大の要因は、施設作物の増加にあり、次いで水稲の減少にあると考えられる。

1990年における施設作物の収穫面積の比率は、1.6%にすぎない。しかし、施設作物は単位面積あたり投入される化石燃料エネルギーが非常に多いため、日本全体の投入産出エネルギー比の減少に大きな影響を与えるのである。なお、1990年における施設作物の投入エネルギーは0.8PJ (10×10^{15} J)に上り、すべての作物生産の約4割を占めると推定される。

IV-2 都道府県

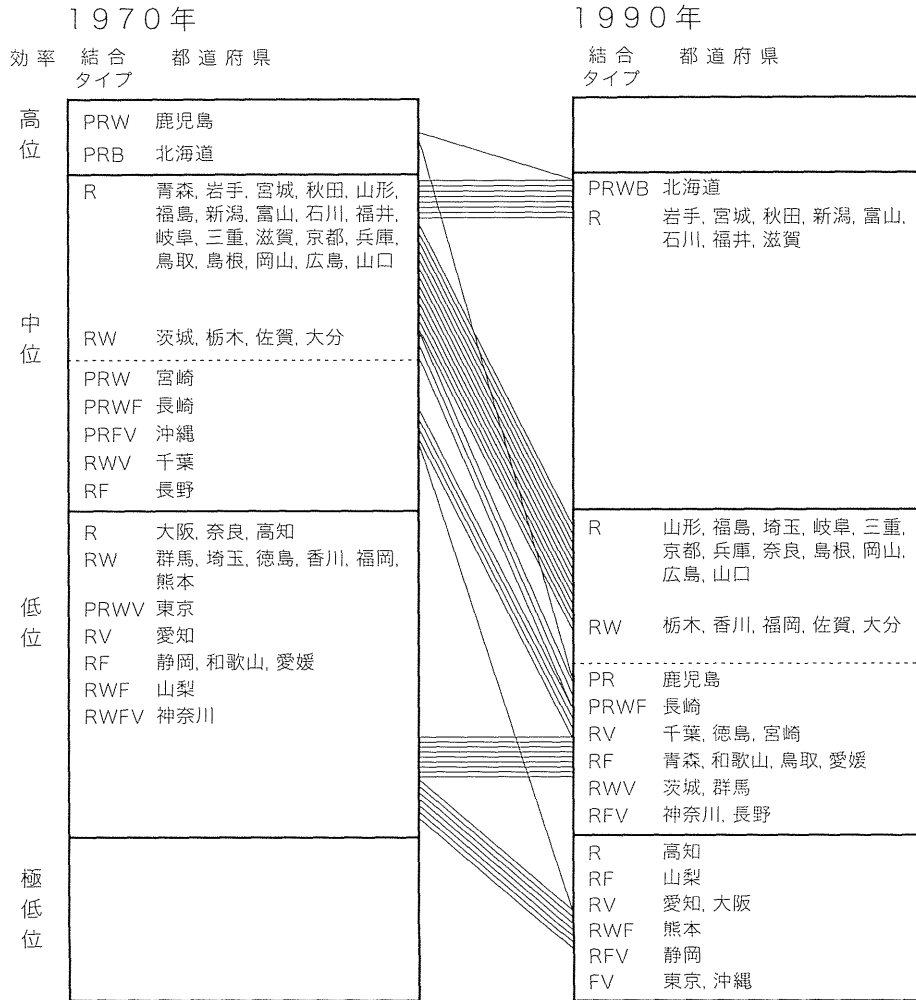
都道府県スケールでは、修正ウィーバー法を用いて、エネルギー効率と作物の組み合わせの県別変化を検討する(第5図)。作物結合タイプを示す略字は、Pがイモ類、Rが水稲、Wが麦類、Bがマメ類、Vが露地野菜である。

1970年の高位効率地域における作物結合タイプは、鹿児島県のRWPと北海道のRPBである。1990年になると、これらの道県は、鹿児島県がRPの低位効率、北海道がRWPBの中位効率に変化した。鹿児島県においては、中位効率作物である麦類の比率が17%から5%に低下したのに対して、低位効率作物(果樹と露地野菜)が10%から19%に、極低位効率作物(施設作物)が0.1%から2.7%に増加した。また、北海道においては、麦類の比率が10%から30%に増加した。

1970年の中位効率地域における主な作物結合タイプは、Rの20府県とRWの9県である。1990年になると、Rのうち11府県が低位効率のRに変化し、RWのうち5県が低位効率のRに変化した。前者の収穫面積の比率は、水稲が77%から75%へ、イモ・麦・まめ類が11%から10%へ微減した。また、露地野菜と果樹は12%から14%へと微増し、施設作物が0.1%から1.2%へ増加した。それ以外のRを含む作物結合タイプは、1990年になると、中位効率作物であるWが組み合わせから外れたり(千葉、大分、沖縄)、低位効率作物であるFやVが組み合わせに付いたり(山梨)して、低位効率4県と極低位効率1県に変化した。

1970年に低位効率地域だった11都府県の作物結合タイプは多様である。これらは、中位効率作物だけの組み合わせか、中位効率作物と低位効率作物の組み合わせであり、いずれもRを含む。1990年になると、これらの都府県のうち6県は低位効率のままであるが、5都府県は極低位効率に変化した。極低位効率に変化した都府県における収穫面積の比率は、水稲が51%から42%へ減少、イモ・麦・まめ類が17%から6%へ減少、露地野菜と果樹31%から49%へ増加、施設作物が1.1%から5.9%と増加した。

以上のことから、作物結合タイプからみた都道府県別エネルギー効率の変化の傾向は、次のようにまとめることができる。(1)中位効率のR・RWから低位効率のR・RW、(2)中位効率の水稲複合タイプ(RとW、V、Fの組み合わせ)から低位効率の水稲複合タイプ、(3)低位効率の水稲複合タイプから、極低位効率の複合タイプ(R、V、Fの組み合わせ)である。とくに、(2)と(3)は、組み合わせの変化を詳しく検討すると、露地野菜・果樹の増加と、水稲・麦類の減少を指摘す



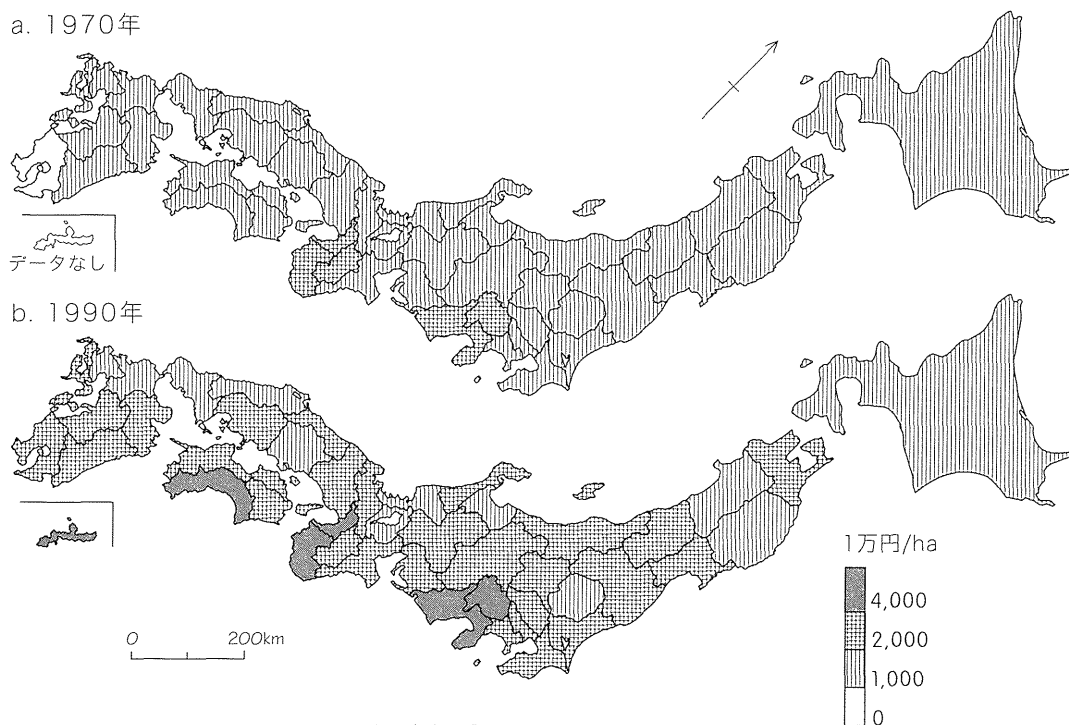
※作物結合タイプは修正ウィーバー法により算定した。
P いも類 R 水稻 W 麦類 B まめ類 F 果樹 V 露地野菜

第5図 作物生産のエネルギー効率と作物結合タイプの変化
(第3図, 世界農林業センサスより作成)。

ることができる。また、修正ウィーバー法による分析には現れないが、施設作物のわずかな増加は地域全体のエネルギー効率の低下に大きく影響する。同じ作物結合タイプでも、効率が低下した(1)は、施設作物の増加が大きな要因であると考えられる。

IV-3 作物生産のエネルギー効率と経済性

ここで、都道府県別の作物生産について、単位面積あたりの経済的な生産性を検討する。1970年の第6図aは、米価基準のデフレーターで調整することにより、1990年の価格に修正した経済的な土地生産性(収穫面積1haあたりの売り上げ)を示したものである。1970年では、東海・近畿の5県を除いたすべての県で、200万円/haを下回っている。ところが1990年になると、200万円/ha



第6図 作物の単位面積あたり売り上げの変化
(作物統計, 生産農業所得統計, 農村物価賃金統計より作成)。

を超える県は35へ増加し, なかでも特に太平洋沿岸に沿って400万円/haを越える県が6つ出現した(第6図b)。これらの地図と第3図とを比較すると, 作物生産の経済的な土地生産性が高くなるほど, エネルギー効率が低くなる傾向があるといえそうである。

水やビタミンを多く含み, 食料エネルギーをさほど含まない作物を生産することは, 現代日本の社会・経済的な環境下の農家にとって有利な選択の一つである。近年でも面積が増加している施設園芸は, そのような作物を生産するための最先端の技術である。施設で生産される主な作物は, 鮮度が重要な市場価値となり, わずかな食料エネルギーしか含まない野菜類である。ビニルハウスやガラスハウスの中で重油を燃やしながら冬に出荷される野菜類は, 生態学的な視点からみて最も高価な作物である⁷⁾。なお, 施設による野菜生産では, 水と化石燃料エネルギーの莫大な投入により, 収穫物の重量は水稻の20倍以上となり, 単位面積あたりの産出食料エネルギーは水稻のそれと同等になる(Nihei, 2000)。

V 結 論

現代農業には, 農薬, 化学肥料, 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る。このような人為的に投入されるエネルギーが, 現代農業のエコロジカルな効率を著しく低下させるといわれる。本研究は, 地域的な作物生産のエネルギー効率を区分するための基準を設定し, 日本

における作物生産のエネルギー効率がいかに変化しているかを明らかにした。

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。1990年のデータについて算定した結果、地域の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に分けることができる。生産される主な作物は、高位効率地域では中・高位効率作物（水稻、麦類、いも類など）、中位効率地域では中位効率作物（水稻、麦類など）、低位効率地域では中・低位効率作物（水稻、露地野菜、果樹など）、極低位効率地域では中・低・極低位効率作物（水稻、露地野菜、施設作物など）になると予想される。

次に、同じ手順で、1970年から1985年まで5年ごとのエネルギー効率を算定し、その結果を、日本全体と都道府県のスケールに適用した。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）から減少を続け、1990年には低位効率（1.2）となった。収穫面積の変化に注目すると、このように地域のエネルギー効率が低下した要因は、施設作物の増加と水稻の減少にあるといえる。また、都道府県別のエネルギー効率を示した地図を1970年と1990年とで比較すると、高位効率地域の消滅、中位効率地域の減少と低位効率地域の増加、極低位効率地域の出現に特徴づけられる。低・極低位などのエネルギー効率が低い都府県は、関東地方よりも南西部の太平洋岸に多く分布する。これらは、園芸農業が盛んで、経済的な土地生産性が高い都府県と一致する傾向がある。以上のように、本研究で設定したエネルギー効率区分は、日本における作物生産のエコロジカルな変化を説明するのに適すると思われる。

注

- 1) 農業の投入産出エネルギー比（産出／投入）が1.0を越える場合がある理由は、太陽エネルギーや人間の労働力など、算定の段階で省かれるエネルギーがあるためである。
- 2) この式を地域の作物生産に当てはめるためには、Nihei (2000) が指摘するように、次のような仮定が必要である。(1) 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である。例えば、肥料部門はアンモニア、硫酸、尿素、リン酸、窒素肥料などに分けられるが、本研究の分析では、部門内の農業資材のエネルギー集中度は等しいものとみなす。より精度を高めるためには、小分類の産業連関表を使用する必要がある。(2) 投入エネルギーと産出エネルギーの値は、どの地域の作物生産でも均一である。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。精度を高めるためには、地域ごとに集計された作物生産費を使用する必要がある。
- 3) なお、修正ウィーバー法によって1970年と1990年の関東地方の市町村における作物結合タイプを算定したところ、水稻の面積が概ね75%を越えれば、他の作物がどのような比率で生産されても、水稻だけが代表的な作物となった。
- 4) 第1図aの曲線1（いも類）と曲線4（施設作物）に挟まれた領域が、水稻が生産される地域の投入産出エネルギー比がとる値の限界である。例えば、地域の投入産出エネルギー比が0.6であった場合、水稻の収穫面積の比率がとる理論的な範囲は0～97%である。このことは、投入産出エネルギー比が0.6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ことを示す。また、高位効率地域の実例として、米・麦・甘藷の生産が卓越する地域をとりあげた場合、地域の投入産出エネルギー比が4.0を越えることはなく、3.0を越えることも稀である。その理由は、穀類といも類の他に、露地野菜などの効率の低い作物が生産されるためである。また、露地野菜のみが生産される地域でも、例えばレタスなど、投入産出エネルギー比が露地野菜の平均よりも低い作物が生産される場合、投入産出エネルギー比は0.6を下回り、極低位効率

地域に区分されることになる。

- 5) 本研究では施設による化石燃料エネルギー使用の過大評価を避けるため、施設野菜の収穫面積でなく、施設面積を代入した。例えば、施設内で冬季にキュウリ、夏季にトマトが生産される場合、両方の作物の化石燃料エネルギーの投入量は異なる。この場合、夏トマトの生産は、エネルギー使用の計算に含まないことにする。
- 6) なお、麦類といも類の収穫面積上位5県は、北海道を除いてすべて低位効率地域となった（麦

類：北海道14.3ha、栃木2.8、佐賀2.5、福岡2.3、茨城2.1、イモ類：北海道6.3、鹿児島1.7、茨城0.7、千葉0.5、長崎0.5）。

- 7) 産業のエネルギー収支に関する極端な例として、1 kJのダイエット・ドリンクを製造するのに2,200kJのエネルギーが必要だといわれた (Soussan, 1992)。温度を調節しながら生産される冬野菜は、自動販売機で販売されるダイエット・ドリンクに例えられるような作物であろう。

参考文献

- Bayliss-Smith, T. P. (1982): *The ecology of agricultural systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 112p.
- 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., 392-749p.
- 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.
- 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.
- 科学技術庁資源調査会 (1979): 『衣・食・住のライフサイクルエネルギー』大蔵省印刷局, 418p.

Classification of Agricultural Regions by Means of Input-output Energy Ratio

Takaaki NIHEI

In the form of insecticides, herbicides, chemical fertilizers and agricultural machinery, a large amount of fossil fuel energy is used in modern agriculture. It is said that the artificial input energy used in modern agriculture decreases ecological efficiency especially in developed countries. To indicate fluctuations in the energy efficiency of regional agriculture in Japan, this study attempts to set a standard to classify the input-output energy ratio of crop production, and examines the changes in the energy efficiency of crop production at national and prefectural scales.

Assuming typical crop combinations, the regional energy efficiency of crop production in 1990 is defined as below. *High efficiency* region, which will be distinguished by the production of high efficiency crops (potatoes) and middle efficiency crops (paddy rice, wheat, barley and beans), exceeds 2.7 in the values of regional input-output energy ratio (output/input). *Middle efficiency* region in which the production of middle efficiency crops will be dominant is defined by the values between 1.7 and 2.6. *Low efficiency* region takes the values from 0.7 to 1.6, and its regional crop production will be distinguished by the production of middle efficiency crops and low efficiency crops (vegetables and fruits). *Very low efficiency* region takes the values less than 0.6, and will be characterized by middle and low efficiency crops, and very low efficiency crops (greenhouse horticulture).

According to the same procedure for 1990, the energy efficiency of regional crop production is calculated every five years from 1970 to 1985. The results are applied to two scales. At national scale, the energy efficiency of crop production was declining from middle efficiency in 1970 (regional input-output energy ratio: 2.0) to low efficiency in 1990 (1.2). The decline can be attributed primary to the increase in greenhouse crops and secondary to the decrease in paddy rice. At prefectural scale, changes in the regional energy efficiency from 1970 to 1990 are characterized as: (1) disappearance of high efficiency regions, (2) decrease of middle efficiency regions, (3) increase of low efficiency regions, and (4) appearance of very low efficiency regions. Most of the low and very low efficiency regions are located in the Pacific Ocean Belt and the southwestern part of Japan. These regions are active in intensive horticulture and consistent with the prefectures of economic high productivity per crop land. The energy efficiency consequently can be used as an index that shows the regional characteristics of crop production from the point of view ecology.

Key words: crop production, input-output energy ratio, fossil fuel energy, food energy, agricultural region