

4.5 耕地生態系の特性

作物を栽培するための土地を耕地と言う。FAOによれば、草地を除いて約15億ヘクタールの耕地が存在する。耕地は気象要素や水などの無機的要素と作物、土壤微生物、雑草などの生物的要素との複雑な組合せからなるまとまりのあるシステムであり、これを耕地生態系 (agro-ecosystem) と言う。森林生態系、草地生態系、海洋生態系、都市生態系など生態系の一つである。森林生態系のようにあまり人手が加わっていない自然度の高い生態系を自然生態系と呼ぶ。生態系は生産者 (緑色植物) と分解者 (動物や微生物) からなっており、それらは食物連鎖によって結ばれている。

耕地生態系は自然生態系と比較して次のような特性をもつ。まず第一に、それを構成する生物種が少ない。すなわち、生物多様性に乏しいことがあげられる。耕地生態系では系の優占種は作物であり、それ以外の雑草、耕地に生息する昆虫などの動物は人為的に排除されるためである。生物多様性の低下は耕地生態系の避けられない特性であるが病害虫の発生など生態系の安定性を低くする要因となっている。物質の流れから見ると、生産された有機物の大部分が系外に持ち出されるため、還元される有機物量が少ない。すなわち、耕地生態系では物質循環の経路が自然生態系に比べて開かれた系になっていることである。そのため、土壤有機物、無機成分の含有量が次第に減少し、生産力は低下して行く。一群の植物群落が一つの方向に向かって不可逆的に変化していくことを遷移 (succession) と言う。何らかの原因で裸地ができると日本の気象条件ではそこに雑草や低木が生い茂り最終的には森林が発達する。遷移にともなって生物相は単純から次第に複雑になる。有機物、無機物の量は次第に低下する。純生産量は遷移の初期段階で高く次第に低下する。耕地生態系ではこの高い純生産を求めて毎年耕起し、遷移を初期段階に戻しているが、同時に生態系の安定性を低くし、地力を消耗させているわけである。作物生産を持続的にしかも安定して向上させて行くには、まず耕地生態系の特性、欠点を理解し、その上で生態系への関わり方を考えなければならない。

4.6 農業システム

農場で作物を栽培し食料を生産する体系を作物生産システムあるいは栽培システム (crop production system) と呼んでいる。個々の農場における栽培システムを営農システム (farming system) , 営農システムの地域的なまとまりを農業システム (agricultural system) と呼ぶこともある。

地球上に多様な農業システムが展開している。世界の農業システムを単純な基準で類型化することは困難であるが、作物と家畜の組合せ、土地利用の集約度を主要な基準にした場合、二つの異なった地域が存在する (Whittlesey, D.S. 1936) 。ひとつは、ヨーロッパのほぼ全域およびアメリカ東部などを含む地域である。そこでは食用作物としての穀物と家畜飼養とが同一農場で有機的に結びついており、農牧複合農業と呼ばれている。今一つは、インド東部、中国および東南アジアの稲作地帯である。これらの地域では家畜は役畜として利用されるにしても通常、家畜と作物生産は結合されておらず、土地は高度に集約的に利用されている。稲作を主とする集約的自給農業と呼ばれている。これらは異なった農耕文化基本複合 (中尾 1966) をもち、地域の自然的、社会的背景のもとで生態系に対して独自の関わり方を作り上げている。農牧複合農業における輪作の技術、稲作を主とする集約的自給農業における灌漑

の技術について見てみよう。

4.7 連作と輪作

耕地の時系列的な利用には同じ圃場に同じ作物を連続して栽培する方法と異なる作物を一定の順序で休閑を含めて循環して栽培する方法とがある。前者を連作 (continuous cropping)、後者を輪作 (rotation) と呼ぶ。

畑作において連作を続けると一般に作物収量は次第に低下する。この問題の解決は古来より農業に関わる人達の根本的課題の一つであった。焼畑農業 (移動農業) の段階でこのことがすでに認識されていたことがわかる。焼畑農耕では山林などを焼き払い、その跡地に作物を栽培するのであるが、一定期間栽培して地力が消耗し、雑草が優勢になって作物の生育が抑制されるようになると放置する。耕作跡地に林木が繁茂し、地力が回復すると再びその土地を焼き払い畑地として利用する方法である。

焼畑農耕の焼き払いは生態系の遷移を初期段階に戻す人間の働きかけである。播種後は生態系への働きかけはほとんどないので生態系の安定性は低く、急激な地力の消耗は避けられないが、放置されて原野となっている期間が十分とれば、耕地生態系の弱点を補う合理的な方法である。人口が少なく、開拓可能な土地が十分に存在していた時代にはこのような対応が可能であった。しかし、人口が増加し、一定の土地を永続的に利用して作物生産を高めなければならなくなると、高い生産性を持続させるために工夫が必要となる。往時、ヨーロッパにおける穀物生産は、土地の大部分を占める家畜放牧用草地の一部を耕してライムギ、大麦などが栽培されていた。家畜排泄物の投入が多少あるとしても穀作の連続では地力の消耗がはげしく、土地を永続的に利用することは困難であった。これを防ぐため定期的に休閑期間を組み込む方法が考案された。いわゆる三圃式輪作である。耕地を3分割しその内の1区を休閑地とし、他の区に春まき麦、および秋まき麦を栽培して3年に1度の休閑によって地力の回復を図ったのである。その後、輪作技術は地力回復を自然に任せるだけでなく積極的に回復させる方向へと発展した。休閑を廃止しマメ科作物の窒素固定を利用して地力の維持回復を図ったのが改良三圃式である。4年4作のノーフォーク式と呼ばれる輪作技術は休閑地を完全に廃し、飼料用カブあるいは甜菜が輪作に組み込まれた。イネ科作物、マメ科作物、根菜類の結合によって、食料としての穀物生産、マメ科作物による地力維持、根菜類の導入によって飼料生産量が増大し、家畜の舎飼による厩肥の大量施用が可能となって畑地の生産力を著しく向上させた。耕地生態系への働きかけから見て合理的であり、現在のヨーロッパ各地のさまざまな輪作技術もこれを基本としている。堆厩肥の施用効果、マメ科作物の地力維持効果は農牧複合農業における再生産の基本的メカニズムとなっている。

4.8 水田稲作

植物の乾物1gを生産するのに要する水分量を要水量 (water requirement) と言う。イネの要水量は多くの畑作物と大差なく、イネの生育にとって湛水は不可欠な条件でない。にもかかわらず、陸稲は別としてイネは一般に湛水状態で栽培される。湛水状態ではイネを毎年無肥料で数十年間連作しても10a当たり300kg~400kgの玄米収量を維持することができる。これを理解するためには湛水状態の水田生態系の特性を知る必要がある。

イネの生育に必要な無機成分はかなりの量が灌漑水に溶存している。マグネシウムやカ

ルシウムはもとより3要素の一つであるカリウムも灌漑水からの供給でほぼ満たされる。窒素の場合は土壤中の有機物が主要な給源となる。土壤中の有機態窒素が微生物の働きによりアンモニア態、硝酸態などの無機態窒素に変化することを窒素の無機化（mineralization）と言う。水田土壤は湛水によって大気と遮断されるため還元状態となっている。アンモニアは還元条件下で安定である上に陽イオン（ NH_4^+ ）であるためマイナスの電荷をもった粘土や有機物に保持され流亡しにくい。湛水条件下の水田土壤は畑土壤に比べて無機化量が多い。窒素の今ひとつの給源は生物的窒素固定である。代表的なものにラン藻があるが、光合成細菌やその他多くの従属栄養細菌なども窒素固定していることが知られている。これらの窒素固定生物による窒素固定量は10a当たり1~8kgにもなる。水田における生物的窒素固定量はマメ科作物の畑には及ばないが小麦畑に比べて明らかに多い。これらをあわせると窒素の天然供給量は10a当たり5~10kgにもなる。リン酸は窒素やカリウムのように外部から供給量が増えるのではなく、土壤に含まれるものが還元状態で有効化されることで供給量を高めている。水稻という作物の選択と湛水という生態系への働きかけはモンスーン気候によく適合し、高い生産力と持続性を生み出している。

耕耘は耕地生態系の遷移を初期段階に戻す重要な働きかけであるが、反面、土壤侵食（soil erosion）を促す要因となる。傾斜地にあつては土壤侵食は深刻な問題となるが、稲作では湛水のために土地が均平化されるため土壤侵食は問題にならない。稲作における灌漑湛水の技術は無機成分の天然供給量の増大をもたらすだけでなく、土壤侵食の防止に大きな役割を果たしていることを見逃してはならない。

4.9 作物生産におけるエネルギーの投入

作物生産を飛躍的に高めようとするれば耕地生態系の構成要素に対してさまざまな働きかけが必要である。病虫害を防ぐための農薬、乾物生産速度を大きくするための施肥、その他灌漑、排水、耕耘、雑草防除、播種、農業機械による収穫作業などである。これらの働きかけにはすべてエネルギーを必要とする。このようなエネルギーを作物の生育に基本的に必要な太陽エネルギーに対して補助エネルギー（energy subsidy）と呼ぶ。補助エネルギー投入の実態を集約性が異なる3地域の稲作で見てみよう（表2.4.1）。

表4.1 稲作におけるエネルギーの投入と産出（Joy Tivy 1994, 一部変更）

項目	カリマンタン	日本	カリフォルニア
	----- 1000kcal ha ⁻¹ -----		
投入			
労働	0.626	0.840	0.008
鋤および鍬	0.016	-	-
農機具	-	0.189	0.360
ディーゼル油, 石油, ガス等	-	0.910	4.275
窒素肥料	-	2.088	4.116
リン酸肥料	-	0.225	0.201
種子	0.392	0.813	1.140
灌漑	-	0.910	1.299
農薬	-	1.047	1.310
乾燥, 電気, 輸送	-	0.058	1.718
計	1.034	7.044	14.427
産出 収量	7.318	17.598	22.370
産出/投入比	7.08	2.50	1.55

カリマンタンの稲作では最も重要な補助エネルギーは人間の労働である。収量は低く、このような栽培システムでは収量は土壤の維持と無機成分の天然供給量に依存する。日本では

カリマンタンよりもさらに労働集約的であるが、エネルギー投入のより大きな部分は化石燃料に由来するものである。補助エネルギーの投入量はカリフォルニアで最も高く、機械が人間の労働にかわり、その他の投入はリン酸を除いて日本よりも多い。収穫物のエネルギー産出はカリマンタンよりも3倍高いが、生産性のエネルギー効率はカリマンタンがカリフォルニアの約5倍にもなる。先進国の高収量と高い作業効率は耕地生態系への化石燃料に由来する補助エネルギーの大量投入によって成し遂げられているわけである。

しかし、投入された補助エネルギーのすべてが作物生産の向上に使われているわけではない。かなりの部分が生態系の系外へ排出される。エネルギー多投入型農業において農薬による環境汚染、健康被害や肥料による水界の栄養富化がおこるのはこのためである。また、何らかの原因でエネルギー供給が損なわれた場合営農システムが破綻することもある。

4.10 低投入持続型農業に向けて

環境への影響を最小限にとどめしかも食料の増産を可能にするために、個々の圃場レベルから営農システム、農業システムのレベルに至るまで耕地生態系のさまざまなレベルで生態系への関わり方を見直さなければならない。その一つは、物質循環を定量的に把握することである。例えば、日本の耕地生態系の窒素についてみると、国産食料に含まれる窒素は約70万トンである。これを生産するのに約50万トンの窒素肥料が化学肥料として使われている。施肥窒素利用率を40%とすると、30万トンの窒素が耕地を含む国内環境に排出されている。その他、家畜糞尿、人糞、生ゴミ等の有機性廃棄物を合わせると、生産量の2倍以上の百数十万トンもの窒素が毎年国内環境に排出されている（間藤 2001）。食料生産、食生活に関わる大量の排泄物を系内に循環させる技術の開発が重要課題となることがわかるであろう。食料の国内生産に生物的窒素固定がどの程度貢献しているか明確ではないが、その割合を高めることができれば、また、上述の施肥窒素利用率をさらに向上させることができれば、化学肥料による窒素の投入を減少させることが可能であり、物質循環の問題解決に寄与することができる。

今ひとつは、太陽エネルギーの利用効率を高める視点から土地利用技術の再検討である。作物の多くは1年生の草本であり、種子から生育をスタートするため、生育の前期には葉面積指数が小さく日射エネルギーの大部分は作物に補足されないまま地面に透過する。また、最近の日本の水田に見られるように1年の半分以上が無作付期間の場合も少なくない。この点が常に植物で覆われている自然生態系とは異なる。耕地の反復利用について、1年に2回作付けされる耕地利用を2毛作（double cropping）、それ以上を多毛作（multiple cropping）と呼ぶ。イネ1毛作の純生産量はスギ林や常緑広葉樹林の約半分強に過ぎないが、2毛作体系（例えばイネー大麦）では年間の純生産量は約20t ha⁻¹となり、スギ林や常緑広葉樹林の生態系に匹敵する大きさになる。稲作を主とする集約的自給農業システムにおいて多毛作の技術を再検討する必要がある。（天野高久）

【参考図書】

渡部忠世著：農業を考える時代，農山漁村文化協会，東京，1995.