

## 2.4 作物生産と環境

人類はその誕生以来、長い間狩猟採集の生活を続けてきた。やがて人口が増加し、さらに洪積世の終わりごろの気候の乾燥化などの影響を受けて、オアシス周辺で農耕を開始した。それは今から約1万年前のことである。特に、ナイル河、チグリス・ユーフラテス河・インダス河および黄河の流域の氾濫原で始まった農耕は、その生産力を高め高度な農耕文明を开花させた。その後、農耕文明は人間の移動・交流とともに変容を重ねながら長い年月をかけて世界に広がっていった。その結果、今日では極寒の地や灼熱の砂漠地などを除いて、世界のほぼ全域で作物生産が営まれ、60億人を超す人類の繁栄がもたらされた。

地球上の作物生産を支える水、温度、日射、土壌養分などの環境資源は著しく変異して分布している。すなわち、低温が作物生産を厳しく制限する冷帯から高温による生育阻害が問題となる熱帯、年雨量が200mm前後の乾燥地から4000mmを越す多雨地域、あるいは栄養分が著しく欠乏する砂質土壌から粘土や有機物を過剰に含む重粘土壌などと大きく変異している。作物生産は、それぞれの地域の所与の環境のもとで、適応する種・品種を選択し、資源管理を工夫して営まれる。しかしながら、引き続く人口増加と経済発展に伴う穀物需要の増加は、地域の環境資源容量を超えた作物生産へと人類をかりたて、森林の耕地化、過剰耕作による土壌浸食や砂漠化、不適切な灌漑による塩類集積、農耕地から流亡する肥料・農薬による水系の富栄養化や汚染など、様々な問題を生じさせた。これらは化石燃料の大量消費とともに、地球温暖化など大規模気候変化の一因となるまでになった。

それゆえ、それぞれの地域において、環境調和性が高く、高生産的かつ持続的な作物生産技術を構築していくことが人類共通の課題となってきた。本節では、これらの課題に挑戦していく上での基礎となる、作物の生産過程に及ぼす環境の影響および農耕地生態系の特徴とその管理の考え方について概説する。

### 2.4.1 何が作物収量を決めるか

食料や有用植物資源の生産のために、人類は平地林、湿地、丘陵地や山地の自然生態系を切り拓き耕地化を進めてきた。その結果、もはや地球上で新たに耕地化できる土地は極めて限られたものとなった。それゆえ、今後増加する食料需要を満たすには単位土地面積当りの作物の生産量、すなわち収量を高める以外に方法はない。それぞれの地域において、作物収量を決定する要因について、まず基本概念を説明しよう。

作物収量は種・品種（遺伝子型）のもつ遺伝的な収量ポテンシャルと環境によって決定される。遺伝的収量ポテンシャルとは、作物のある遺伝子型が、最適な環境条件下で栽培されたときの収量を意味する。作物の品種改良はこの遺伝的収量ポテンシャルを大きく高めることに貢献してきている。しかし作物が最適な条件下で生育することはまずなく、そ

れゆえ実際の収量は、図 2.4.1 に模式的に示すように、環境による様々な影響を受けるため、遺伝的ポテンシャルよりもはるかに低い。すなわち作物のある遺伝子型が本来もっている生産力は、病虫害や雑草によるダメージ、土壌からの無機栄養分と水の供給量、および気温や太陽エネルギー量によって強く制限される。図 2.4.1 において上位に示した環境要素ほど、人間による制御が困難な要素である。ある作物の遺伝的収量ポテンシャルの最も高い遺伝子型が気温と日射以外の要素が最適に制御されたときに示す収量は、その土地の潜在収量 (potential yield) と呼ばれる。この潜在収量は地域によって大きく異なる。例えば、気温が好適でかつ日射量が著しく高いオーストラリアやエジプトの砂漠で灌漑栽培される水稲収量は、わが国のその約 2 倍も高いが、これはその土地の潜在収量が高いことの表れである。

しかし、潜在収量と実際の農家収量との隔たりは大きい。日本の稲作のように、完全な灌漑条件下で多肥・多農薬を投入して、栄養分と水を十分に与え、かつ病虫害・雑草を周到に管理して行わ

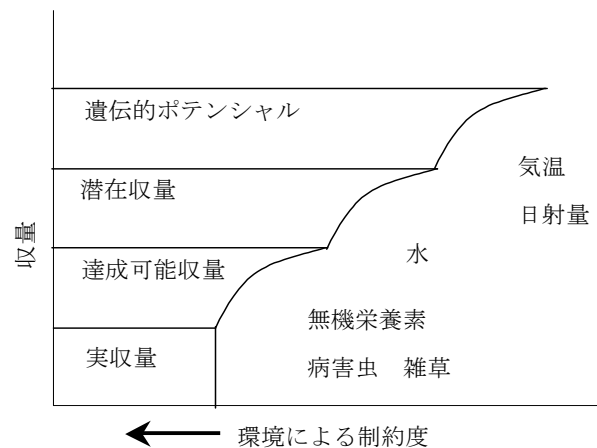


図 2.4.1 作物収量に及ぼす環境の制約度の影響の模式図

れる栽培でも、実収量は潜在収量の 60% 程度である。ところが世界の全稲

作面積のうち、日本のような灌漑稲作は約 50% で、多くの発展途上国では自然の降雨に依存する天水栽培が大部分である。さらに養分供給力の著しく低い土壌や、逆に鉄やカルシウムなどを過剰に含む土壌などが広範に分布する。これに病虫害・雑草害などが加わるため、多くの発展途上国の作物の実収量は潜在収量の 30% ないしはそれ以下となっている。加えて、年々の環境変動の影響を受けて、収量も大きく上下し、極めて不安定である。

作物収量を高める方法として遺伝的収量ポテンシャルの改良が強調されることが多いが、上でみたように現実の収量は環境に大きく制限されていることに注視する必要がある。それゆえ、地域の作物生産性を持続的に高めるには、第 1 にその地域への環境適応度が高く、かつ乏しい資源を効率的に利用できる品種の開発と利用、第 2 に水、無機養分などの資源を作物生産に効率的かつ持続的に活用・管理する技術の開発が必要である。

## 2.4.2 作物の環境適応性

作物生産において第 1 に重視すべきことは、その地域への適応度の高い作物・品種の選定である。作物の地域 (環境) 適応性を理解する上で重要なことは、すべての作物・品種ともその発芽から花芽形成を経て成熟にいたる生活環 (life cycle) を全うするには、その種・品種に固有の環境要求性が満たされなければならないということである。すなわち、作物が発芽して生長するには、冬作物であるコムギ、ナタネなどで約 5°C 以上、夏作物のイネ・

トウモロコシで約 10℃以上の温度の継続が必要である。この場合、温度が高いほど生育のスピードが早く、作物は次々と葉、分枝、根数を分化・発達させながら栄養生長を続ける。やがて種・品種のもつ固有の環境要求性を満たす環境条件が到来すると、作物はそれまでの栄養器官の形成から、花芽の分化・発達へと切り換え、生殖生長に移行する。

栄養生長から生殖生長への相転換には日長条件が関与し、作物は日長要求性に関し、短日作物、長日作物および中性作物に大別される。多くの熱帯起源の作物（イネ・トモウロコシ・タバコなど）は短日型ないしは中性型であり、温帯起源の作物の多く（コムギ・ナタネ・テンサイなど）は長日型ないしは中性型である。さらに温帯起源の作物の中には、日長に反応する前提条件として、10℃以下の低温に一定期間遭遇することを必要とするもの（コムギ・オオムギ・ナタネなど）もある。低温によって花芽分化の前提条件の一つ（長日作物）、もしくは全部（中性作物）が満たされることを春化（vernalization）という。同一種でも、どの程度の短日あるいは長日が必要かは品種（遺伝子型）により大きく異なる。例えば、同じイネでも熱帯の在来品種は温帯のそれよりもより短い日長を花芽分化に必要とする。日長あるいは低温要求性の強い作物・品種は、その要求する条件が満たされなければ永遠に花芽を分化せず栄養生長を続ける（花も実もない一生となる！）。

作物の収量は、栄養生長がどの程度進んだ段階で生殖生長への相転換が起こるかに大きく左右される。早すぎる開花は、植物体の生長が不十分で花芽の数や大きさも当然小さく、収量は低い。逆に、遅すぎる開花は、作物の生育期間が温帯では気温、熱帯では水条件（雨期と乾期がある）によって厳しく制限されているので、生育後期に低温や水不足に遭遇して生活環が全うできなくなる。それゆえ、それぞれの所与の環境のもとで、最適な時期に花芽分化するような種・品種が適応度が高く、高い生産性につながる。

地域の環境は日々変動し、作物は常に、高・低温や乾燥などの環境ストレスにさらされる。これらのストレスに対する作物の抵抗性の程度も、適応性を支配する重要な要因である。これら環境ストレスに対して、幼穂・蒴・花粉などの生殖器官は葉・茎・根などの栄養器官よりも鋭敏に反応する。例えばイネの栄養器官は 10℃位の低温に耐えられるが、形成期の花粉は 18℃以下でその機能を失う。北海道や東北地方では、そのような冷害はしばしば発生し、水稻の著しい減収すなわち冷害をもたらす。同様にコムギの栄養器官は -10℃程度の低温に十分耐えられるが、形成期の花粉は 2℃程度の低温によって機能を失う。土壤水分の欠乏による早ばつは畑作物でしばしば発生するが、それが生殖器官の形成・発達期に起こると収量の著しい低下をもたらす。これら環境ストレスに対する抵抗性には、同一作物でも遺伝子型により異なる。それぞれの地域で発生する環境ストレスの強さと頻度に応じて、花芽形成・発達期がストレスを回避できる生活環と適切なストレス抵抗性をもつ遺伝子型が高い適応性をもつ。

### 2.4.3 太陽エネルギー変換系としての作物群落

圃場において作物は群落（個体群）として集団で栽培される。それゆえ、収量をも高める

ことは群落全体の生産量を高めることであって、個々の個体のそれを高めることとは異なる。例えばコムギやトウモロコシの収量の改善は、高い個体密度のもとで多収となる品種と資源多投技術の組合せによって達成されてきており、個体としてみた収量はほとんど変化がないか、逆に減少している。それゆえ、群落としての作物収量がいかなる要因に支配されているかを理解することが重要である。

作物群落では生長とともに個体間での水、光、いろいろな栄養素をめぐる競合が激化し、ついにこれら資源の供給量のいずれかが生産性を決定するようになる。作物収量が単位土地面積当りの生産量で表されるのは、これら資源の供給量が土地面積に比例することに基づいている。作物収量を制限する資源のうち、水や無機養分は人間が与えることによってその制限を緩和することができるが、光についてはそれができない。それゆえ、ある土地の作物収量 (Y) は究極的には、群落が一生の間に吸収 (あるいは受光) した太陽エネルギーの量 (S<sub>a</sub>) に比例するという、次の式で与えられる。

$$Y = H_I W_t = H_I C_V \sum_{i=0}^{i=n} S a_i = H_I C_V \sum_{i=0}^{i=n} \alpha_i S_i \quad (1)$$

ここで W<sub>t</sub> は群落の全バイオマス生産 (kg/ha)、H<sub>I</sub> は W<sub>t</sub> に占める収量の比率を表す収穫指数 (harvest index)、C<sub>V</sub> は吸収した太陽エネルギーのバイオマスへの変換効率 (kg/MJ)、S<sub>i</sub> と α<sub>i</sub> は日々の日射量 (MJ/ha) とその群落による吸収率、そして n は作物の生育日数である。α<sub>i</sub> は理論および実測に基づいた次の式で表すことができる。

$$\alpha_i = 1 - \exp(-k \text{ LAI}_i) \quad (2)$$

ただし、k は群落の吸光係数、LAI<sub>i</sub> は日々の葉面積指数 (Leaf Area Index) で、単位土地面積上の葉面積の総和を表す。

群落としての作物収量 (Y) もしくはバイオマス生産が、作物が一生に吸収した太陽エネルギー量に比例することはイネをはじめ多くの作物で確かめられている。(1) 式より、作物収量を高めるには、大きくみて①収穫指数 H<sub>I</sub> を大きくする、②吸収日射からバイオマスへの変換効率 C<sub>V</sub> を高める、③日射の吸収率 α を高める、④生育期間 n を長くするの 4 つの道があることがわかる。これら 4 つとも遺伝子型と水や無機養分の供給に強く依存し、それらを最適化することによって、作物収量を高めることができる。我々は地域に到達する太陽エネルギー量を変えることはできないが、品種や環境管理技術の改良を通じて太陽エネルギーの利用効率を高め、生産性を改善することができる。それが農業技術である。

#### 2.4.4 資源の利用効率

上に述べたように、それぞれの地域で作物収量を高めるには、その環境に応じた水や無機養分などの投入が必要である。これらの資源量が不足する地域では、収量は最初は資源投入量に比例して増加するが、やがてその増加はゆるやかになり、ついには増加が頭打ちになる。これを収穫漸減の法則 (law of diminishing return) という。ある資源の投入量に対して収量がこのように反応するのは、収量は最初はその資源量に制限されていたが、そ

の投入量が増えるにつれて、次第に別の資源の量に制限され、さらに究極的には太陽エネルギーの量に制限されるようになるためである。

作物生産にあたっては、投入資源に対して収穫漸減の法則が働くことを理解し、資源投入量の適正化と投入方法の最適化を図ることが必要である。このことは効率的な作物生産に必要であるばかりでなく、過剰に施肥した肥料の流出による環境負荷を抑える上でも重要である。さらに、無施肥でもある程度の収量が得られるが、これは栄養素の天然供給によるものである。栄養素の天然供給は、灌漑水および土壌中での有機物の無機化に由来する。従って、土壌中の有機物含量を高め土を肥沃にすることは、環境中に流出し易い化学肥料の投入を抑える上で有効である。

以上に述べたように、作物生産と環境についての深い知識と理解が、現在求められている高生産的でしかも持続性（sustainability）と環境調和性の高い作物生産技術の開発に不可欠である。

（堀江 武）

**【参考図書】**

堀江武 他著：作物学総論，朝倉書店，東京，1999.