

第5章

有機的な農業経営へ転換するためのアグロエコロジー的基礎

農薬や化学肥料などの外部資材を大量に使う慣行農業から、外部資材の投入が少なく持続可能な農業システムへの移行は、以下の3つの段階を経て進行すると、多くの人が考えている。

- 1) 農薬や化学肥料などの投入資材の合理化を図る段階：伝統的な総合的病害虫管理では、ここに重点を置いている。総合的害虫管理（Integrated Pest Management、略称 IPM）では、害虫の個体数の変化を常時モニタリングし、損害、障害、病原性が許容レベルを超えたときのみ、農薬や害虫忌避剤の使用を許容している。農薬の低減と、選択的利用の促進など、一定の効果はあるが、この段階では、アグロエコロジーのゴールはまだ達成できていない。
- 2) 投入資材を代替する段階：農薬や合成化学肥料の使用を中止し、有機農業で一般的に使用されている環境に優しい製品（市販の堆肥や植物由来の除草剤など）に切り替える。しかし、もしこの段階でモノカルチャーが継続している場合は、農業システムの生態系基盤にまだ変化はない。また、化学合成農薬は不使用でも、環境に優しいはずの代替品が意図しない結果を招く場合もある（例えば、植物の病原菌を殺すための硫黄が、同時に益虫も殺す）。投入資材の代替が、アグロエコロジーではない。資材代替の段階では、依然として症状に注目し、限定要因の除去に終始している。農薬や化学肥料の使用もやめておらず、収量の最大化が目標である。また、単一の作物を対象にしたモノカルチャーが継続している。アグロエコロジーは、これとは対照的に根本的原因の解決を目指している。プロセス・相互作用・相乗作用を最適化させることで、収量の安定化と、機能や農産物の多様化を目指している。近年、本格的にアグロエコロジーを取り入れようとする有機農家も増えてきたが、農薬や化学肥料をはじめとした外部資材の投入は継続しており、外部からの資材そのものを低減する努力が十分とは言えない。
- 3) システムを再設計する段階：作物と動物の最適な組み合わせで相乗効果を引き出し、農業生態系が自律的に地力を向上し、害虫を抑制し、生産力を維持することを目指す。システムの再設計にあたり、モノカルチャーを脱する方法は2つある。時間的多様性と空間的多様性の利用である。多様性を時間軸で実現する手法には輪作がある。輪作では、マメ科植物を利用して有機質を増やす「充填期間」と、作物（穀物）が養分を吸収する「抽出期間」が交互に来る。この2つの段階の均衡を取ることが、輪作成功のカギとなる。

IPM や有機農業で推奨されている手法の多くは、段階1または段階2に該当する。農薬を削減できる分、環境にも優しく、慣行農業と比べて経済的なメリットもある。全面的転換は管理やリスクの点でハードルが高いと考える農家にも、このような段階的移行は受け入れやすいかもしれない。しかし、もしモノカルチャーを継続した場合、農薬の量を減らし、その種類を化学から生物由来のものに変更することが、本当の意味で生産的な農業システムに再設計したことになるだろうか？

IPM で農薬や化学肥料の使用量を多少合理化できたとしても、殆どの場合、それが集約農業を離脱する強い動機にはなっていない。IPM は、むしろ、高度な農薬管理と言うべきかもしれない。一定の基準を設け、それに準じて、農薬の選択的使用が許容されるからである。しかも、モノカルチャーでは、害虫は通常この上限を超えて繁殖している。段階2の、投入資材（農薬や肥料）を代替する方法も、限定要因の克服に重点を置いている限り、慣行農業からのパラダイム・シフトにはなら

ない。確かに、投入資材は有機的かつ生物由来かもしれないが、その多くが商品であり、農家にとって、資材業者に対する依存からの脱却にはつながらない。現状を見る限り、資材の代替は、既にその生態学的意義を失っている。

以上とは対照的に、システムの再設計とは、農業生態系の機能と構造を転換することである。そのため、生態系プロセスの安定化のための様々な管理手法が取り入れられている。システムの再設計で最も重要なのが、農業システムの生物多様性向上である。栽培方法の多様性（遺伝的、分類学的、構造的、資源的多様性）が、生物相の多様性につながり、害虫防除や栄養循環が促進されることは、多くの研究でも明らかにされている。各々の農業システムにおける、生物多様性と生態系プロセス、生産力の関係性が、更に解明されれば、それを基に設計ガイドラインを策定し、農業生態系の持続性向上と資源保全のために役立てることができるだろう。

5.1 輪作

転換プロセスをスタートさせるためのカギとなる戦略が輪作である。まず農場を4つから6つの大きなロットに分け、一定の順番で、作物が一巡するよう作付けていく。輪作を成功させるためには、守るべきルールがいくつかある：①一つの農地に同じ科に属する作物を植えない、②被覆作物と換金性作物を交互に植える、③深く根を張る作物と浅く細い根の作物を交互に植える、④トウモロコシや米などの濃厚飼料作物（heavy feeders）を植える前には、窒素を固定する作物を植える、⑤根菜の後にまた根菜を植えない、などである。その他、同じ科に属する作物を同じ場所に植える際、どの程度の時間間隔をあければ土壌病原菌の増加を防ぐことができるか、などもルールで決めている。これらのルールは、同じ科による寡占を回避し、最適多様性を実現するために必要である（図7）。

輪作には、病原菌の生命サイクルを断ち、また特定の作物の組み合わせが病害を抑制する効果がある。例えば、病原菌に有毒な植物を輪作に組み込む（生物的燻蒸、biofumigation）と病害虫を減らすことができる。カラシナを含むアブラナ科（Cruciferae または Brassica）の植物は、組織中にある化学物質を持っていて、それを土壌に鋤き込むと、分解の過程で二次的な化合物（グルコシノレートまたは他感作用物質）を放出する。その物質が燻蒸材として働き、土壌中の病原菌を死滅させる。同様の機能を果たす植物（燻蒸植物）には、他にもマリーゴールドやタヌキマメ属（Crotalaria）がある。

輪作は、害虫の生命サイクルを絶つ。特に、異なる科に属する作物の組み合わせが、害虫防除に効果目がある。病気の原因となる菌の中には、土壌中で、菌核、孢子、菌糸と姿を変えながら、何年も生きながらえるものがある。同一作物の連作は、その作物に特有な土壌病原菌を増やし、結果的に、作物の収量低下を招いてしまう。輪作で、当該の病原菌の寄宿主植物以外の作物を加えることで、病原菌を餓死に追い込むことができる。

輪作は、雑草の生命サイクルも断つ。特に緑肥と組み合わせると、雑草の総量は減り、反対に作物の収量は増える。緑肥と化学肥料の大きな違いは、前者が作物の生育を維持しつつ雑草を抑えるのに対し、後者は大きな種子を持つ雑草（large seeded weeds）の生育を促進してしまう。

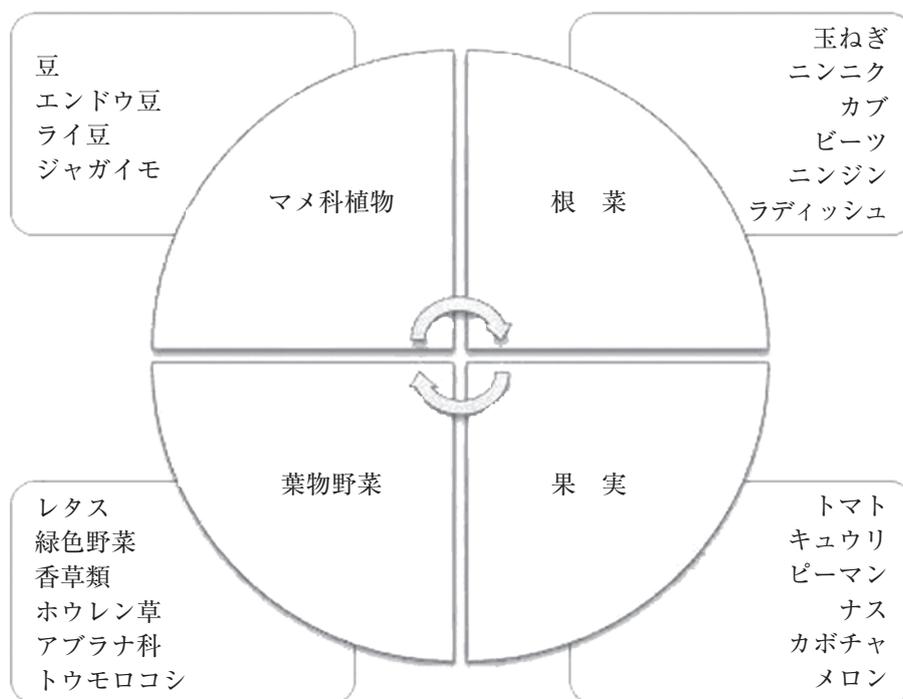
では、輪作による土壌中の窒素の減少は、どう防げば良いか？ 一つの方法は、まずマメ科植物を植え、花が咲いたら、野生カラシナを追い蒔きすることである。通常、マメ科植物を収穫した後、次の作物を植えるまで一定の時間が空くが、この間に、本来ならば放出される窒素をカラシナに固定してもらおう。カラシナは、次の作物を植えるまでの間、窒素を固定する繋ぎの役目を果たすのである。

トウモロコシの種を植える前に、カラシナを土壌に鋤き込む方法もある。カラシナにもアレロパシー物質が含まれている。ブラジル南部では、通常緑肥として3種類の被覆作物を利用している：カラスノエンドウ、フォラージ・ラディッシュ（大根の一種）、ライ麦である。被覆作物は掘り起こさ

れ、平らにされる。分解が進むと、アレロパシー物質が放出され、地表から2センチの深さに有毒な土壌の層を形成する。有毒な土壌では、雑草は発芽することができない。また雑草の種は、地下2～3センチの表土に集中しているため、これでほとんどの雑草は死滅する。一方、トウモロコシや豆は通常地表から3～4センチの深さに播種するので、毒に侵されることなく自由に発芽できる。これらは、長年の観察と経験から得た農民の知恵である。

輪作の効果は、長い時間を経過しないと現れない場合もある。一般的に、輪作を開始してから数年は、慣行農業と有機農業に収量の差はみられない。しかし、ひとたび干ばつになると、有機農業がその本領を発揮する。土壌の有機質がスポンジの役目を果たし、保水力を高めるのである。これ以外にも、輪作には多くの優れた点がある。輪作は、土壌の状態を健康に保ち、更に栽培する作物の種類を増やすことは農家の経済的安定につながる。また、作業が多様化し、一年を通して労働が平準化するので、農家の満足度は向上し、生産性も上がる。太陽エネルギーをできる限り有効に利用し、農薬や化学肥料も減らすことができる。

図7 最適な輪作：栄養要件や害虫関係を共有しない、機能群や植物の科の組み合わせ。



5.2 地力の向上

転換をする一番の理由は、土壌を健康にすることである。理想とするのは、土壌構造が良好で、有機質に富み、生物活動が盛んな土壌である。有機質が生成する物質は、土壌粒子の団粒化を促進する。団粒構造は孔隙（こうげき）に富むため、土壌は、水はけが良く、新鮮な空気が通りやすくなる。有機質は、また、微生物や中大型動物相のエネルギー源でもある。有機質を分解して無機質にし、植物に利用させているのは、土壌微生物である。たった10グラムの土の中には、何百万もの土壌微生物がいて、複雑な栄養網の相互作用を担っている。

微生物は表土層に集中している。そのため、表土を守るということがとても大切である。落葉後に乾燥した葉、湿った葉（セルロース）、枝（木質素、リグニン）、堆肥などの有機質を、定期的にとっぷり土

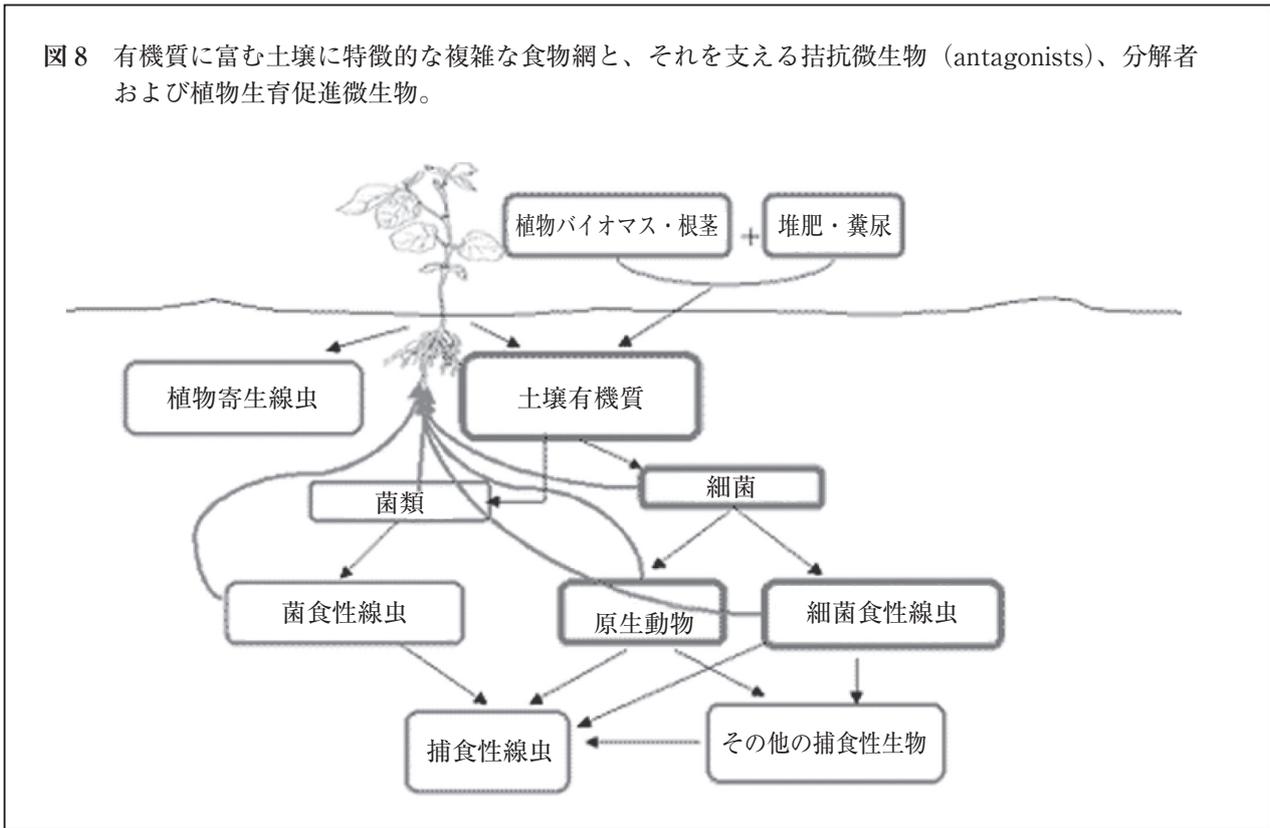
に与えるのが好ましい。被覆作物やマルチで覆土を維持することも重要である。土壌の浸食は、養分だけでなく、微生物の損失にもつながるので、適切な土壌管理をして、流失の発生を最小限に抑えなければならない。土壌1ミリの流失は、1ヘクタールに換算すると14トンの損失になり、これを回復するには、最善の努力をしても50~100年を要する。

土壌の生物学的管理の基本となる生態系の原則を以下に示す：

- 有機質による養分の供給：有機質には、化学変化を起こしやすい不安定なもの、安定したものの2種類がある。葉や藁などの不安定な有機質は、短時間で分解し、土の養分となる。一方、木の枝や木質素などの安定した有機質は、分解速度は遅いが、土壌構造を整える効果がある。理想的な有機質とは、この両者をミックスしたものである。その他、土壌の温度、養分、空気を適正に管理して、土壌微生物を刺激することも大切である。
- 植物多様性の向上：多くの植物は、根から様々な物質（根分泌物）を分泌している。各分泌物には、それぞれ異なる細菌個体群を活性化させる働きがあり、分泌される物質が多いほど、根圏の土壌微生物環境は複雑になる。
- 健全な土壌構造は、微生物を活性化し、水分や空気、温度、栄養状態を改善する。
- 多様な有機質の利用：有機物はその種類ごとに、土壌に与える生物学的、化学的、物理的効果が異なる。
- 生育中の植物あるいは作物残渣（または両方）による覆土を徹底する。被覆作物を使ったり、作物をバラ播きして輪作したり、減耕起などの手段を用いる。覆土は、水の地中への浸透を促し、水と共に貴重な堆積物（有機質）が流失するのを防いでくれる。
- 土壌が濡れている場合は立ち入りを制限し、また荷重を分散し、通路を決めて、土壌の圧密を最小限にする。
- あらゆる手段を講じて土壌の浸食を食い止める。植物マルチ（living mulch）や作物残渣による覆土（被覆作物や、輪作ソッド作物、減耕起）、段々畑、草で覆った水路、等高線に沿った間作栽培（すじ状に播いた作物（row crop）とバラ播きした作物（sod crop）が交互にあって縞状の景観をなす栽培）、農地と川の間に設けた天然の（または植物を植えた）緩衝地などが、全て土壌の浸食防止になる。
- 土壌中の養分供給と作物の養分需要が均衡するよう、必要に応じて土壌に栄養を補給する。作物の養分の需要には変動があるので注意を要する。土壌内の養分のバランスが取れていると、雑草や害虫の被害が抑制される。

土に有機質を補給すると、土壌中の炭素が増え、生物相のバランスが整い、細菌・菌類・線虫・原生動物などの働きで、土壌の栄養網が複雑になる。一部の土壌生物は、相手を捕食して、その個体数抑制に貢献している。線虫とカビなどは、互いに食い食われる関係にある。様々な微生物が、養分の無機化（分解）や、病害抑制、植物成長ホルモン分泌など、異なる役目を果たしている（図8）。根圏（rhizosphere）には、何千もの有用な細菌や菌類（菌根菌）が生息していて、中でも菌根菌は、リンなど特定の養分の吸収を助けたり、水の利用率改善に貢献している。干ばつになると、菌根菌と共生する植物は、共生しない植物より、生き残る確率が高い。菌根菌は、根を覆うことで、植物を病原菌から守っている。農耕地に菌根菌を導入することは難しい。そのため、近くの天然林から、菌根菌を豊富に含む落ち葉等を拾ってきて、堆肥に混ぜ、それを土壌に鋤き込むことをお勧めする。

図8 有機質に富む土壤に特徴的な複雑な食物網と、それを支える拮抗微生物 (antagonists)、分解者および植物生育促進微生物。



5.3 作物多様性

植物の多様性が向上すると、抑制と均衡、養分供給、病害予防など、様々な生態系サービスが機能し始める。間作は、多様性を増加させ、作物同士の相互補完性を引き出す重要な戦略である。例えば、間作は病害の発生を抑える。そもそも植物が病気にかかるには、次の3つの条件が必要である：抵抗力の弱い植物、(病原菌にとって) 良好な環境 (温度、湿度、土壌条件)、様々な変異を持つ強力な病原菌 (pathogen with many races) である (これを病害のトライアングルという)。間作は、土壌の温度や湿度に変化を与え、病原菌が住みにくい環境を作る。また高さの違う植物を混植するため、丈の高い植物が病原菌の胞子の拡散をブロックしてくれる。中国での実験では、丈の高い稲の品種と低い品種を一つずつ交互に植えた結果、病害や防カビ剤の使用が大幅に減り、収量が上がった。丈の高い稲が、菌の胞子の移動拡散を防いだためである。

間作では、水平抵抗性を持つ品種も利用可能である。通常、在来種はすべての種類の病原菌種に対し中程度の抵抗性 (水平抵抗性) を持っている。一方、緑の革命以降の改良種は、垂直抵抗性 (一つの菌種の病原菌にのみ高い抵抗性を持つ) しか持ち合わせていないため、より脆弱である。

間作をより大きな規模で行った場合でも、同じ効果を期待できるだろうか？ 大規模な農場で間作を行う場合、まずは2種類か3種類の作物から始めるのが良い。最新の道具を揃えることも必要であろう。例えば、帯状栽培も一つの手段である。複数の作物を帯状に栽培する際には、相互作用が働きやすいよう、また互いに成長を阻害しないよう、帯 (strip) の幅は、広すぎず狭すぎずに適当でなければならない。帯状栽培でよく利用されているのが、強い光を好むトウモロコシまたはモロコシ (sorghum) である。トウモロコシと大豆の帯状栽培の研究では、帯の幅を4~12列まで変えて実験したところ、幅が狭まるにつれ (図9)、トウモロコシの収量が増加し (5~26%増)、逆に大豆が減少した (8.5~33%減)。トウモロコシとアルファルファ (マメ科の多年草) の帯を交互に栽培した場合、モノカルチャーに比べ、総収益が増加した。帯幅6メートルが最も効率が高く、モノカルチャーと比

べ、大幅に収益性が上がった。この差は、資産負債率が40%（例えば、100ドルの資産に対する負債が40ドル）を超える農家にとっては、無視できない数字である。実際、米国中西部では、農家の11～16%が、重い債務に苦しんでおり、多様化を進めてコスト低減を図ることが急務となっている。

設計の最終段階で行うのが、生態系基盤の整備である。この段階では、生物多様性を最適な時空間に配置していく。アグロエコロジーを実践する農場は、多様な食物と栄養素を供給してくれるため、農民とその家族は、必要な食料と栄養の全てを農場の生産で賄い、なおかつ余剰を生むことができる。しかも、システムは一度立ち上がれば、自立的に機能するため、過度な農薬・化学肥料への依存や、労働からも解放される。

共同農場（cooperative farm）で、アグロエコロジーに即した大規模な転換が試みられた際には、様々な手法が導入された。傾斜地での等高線栽培、生物多様性のある回廊、地力回復のための緑肥、植林、帯状栽培や輪作、リレー緑肥（複数の作物を時期を少しずつずらしながら同一場所で栽培）などの手段を講じた結果、様々な高さや種類の樹木や灌木、植物、動物が生息する、多様で多層的な空間が出来上がった。多様性のある空間では、木々や植物が、花や実を提供し、防風林となり、燃料を供給し、また家畜が、害虫防除や物質循環の一端を担っている。農業と畜産を統合すると、作物残渣は家畜のエサとなり、その排せつ物は作物の肥料となるなど、相乗効果も大きい。家畜は、エネルギーやエサをあまり必要としない在来種が好ましい。ブラジルでは、作物が一定の高さまで成長すると、畑に鶏を放し、害虫や雑草を食べさせ、フンで土を肥沃にしている。コロンビアでも、農家がモルモットに雑草を食べさせている。動物の糞尿は理想的な肥料であるばかりか、魚のエサやミミズ堆肥（vermicompost）の材料となる。

5.4 持続可能性の指標

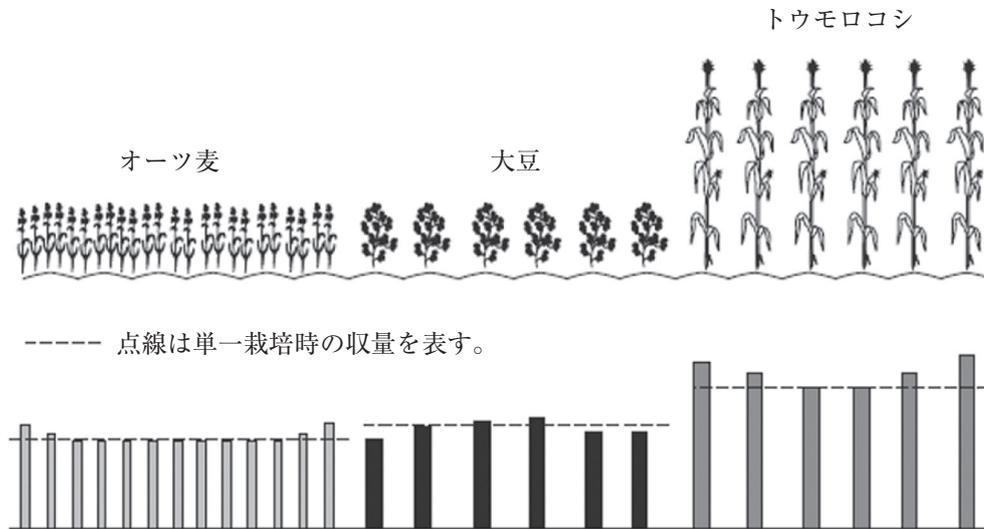
慣行農業は持続可能ではない。では、私たちは農業システムの持続可能性をどのように評価すればよいのだろうか？

まず第一に、システムがアグロエコロジーの原則に基づいて管理されているかどうかを確認する。農場と景観の両方のレベルで、時間的にも空間的にも、種と遺伝子の多様性を向上させているか？作物と家畜の複合を図り、栄養循環を改善しているか？ 土壌の生物活性を高めているか？ バイオマスの再循環は促進されてるか？ また、最適な空間設計（アグロエコロジー的設計）がされているか？ 持続可能性を評価するツールも、数多く開発されている。あるツールは、観察や測定のための一連の指標（コラム5）を提供していて、その指標を使って、農場や景観のアグロエコロジー的特徴や農業システムのパフォーマンスを評価し、種多様性、土壌地力、植物健全性、穀物生産力が実際に改善されているか、を確認することができる。また、土壌や作物、システムに不具合が認められた場合には、アグロエコロジーの原則に沿ってどの是正措置を優先させるかを、提示している。

土壌の質を測る指標には、土壌構造、浸食の兆候、圧密、覆土率、根の発育、土壌微生物、有機質の色やにおい、無脊椎動物の存在、微生物活性、などがある。また、作物の健康に関しては、病害虫発生率や機能的多様性（天敵の数や種類の多さ）が指標となる。同じ物差しを使って測定するので、結果の比較が可能になる。農業生態系のレジリエンスの進展を時系列で追ったり、異なる転換段階にある農場同士を比較することもできる。

各指標を用いて土壌や作物を個別に評価し、観察結果には、1から10までの値が付与される（1が最低、5が普通または閾値、10が最適）。指標を使うことで、農家は、自身の農地の状態を視覚化（数値化）でき、景観・土壌・植物の何が基準に達していて、何を改善しなければならないのかを、把握することが出来る。

図9 作物3種の带状栽培による辺縁効果（エッジ効果 edge effect）と、モノカルチャー（単一栽培）との収量の比較（点線は単一栽培時の各作物の収量）。
トウモロコシにプラスの辺縁効果が見られるのは、主に大豆との境界である。その効果は境界から2列目まで及ぶ場合がある。しかし、4列を超える幅広い帯の場合、中心部の収量は、単一栽培とは、単一栽培と同等である。



コラム5 アグロエコロジーの原則が農場の設計と管理にどの程度反映されているかを評価するための指標

- 景観の多様性（農場周辺の植生の量と種類）
- 農場内の作物と動物の多様性（種の数）
- 遺伝的多様性（在来作物の品種数および動物の種類数）
- 土壌の質（有機質の含有率、構造、覆土、透水性など）
- 劣化や資源損失の兆候（土壌浸食、森林破壊、生息地分断、水の状態、水や養分の利用効率など）
- 植物の健康（病害虫、雑草、作物被害）
- 農薬と化学肥料への依存（農場外からの投入率）
- 食料自給率（農場からの供給率）
- 農場内の相互作用や生物資源の再循環（作物残渣や糞尿の再利用、バイオマスの有効利用、植物の相互補完性、自然の力を借りた防虫効果など）
- 外的攪乱に対するレジリエンス（害虫や干ばつ、暴風雨などに耐え、回復する力）

蜘蛛の巣グラフ（amoeba graph）に評価結果を表示すると、土壌の質や作物の健康状態が視覚化され、理解しやすい。蜘蛛の巣の先端が円周に近づくほど（10段階評価）、持続可能性が高いことを示す。土壌の質や作物の健康（あるいはその両方）の総合評価で、10段階のうち5以下の場合、持続可能性の閾値を下回っており、是正処置が必要となる（図10）。

蜘蛛の巣グラフを見れば、どの指標が弱い（5以下）を特定できるため、土壌、作物、システムの各不具合に対し、アグロエコロジー的な是正処置を講じる際の優先順位付けの目安となる。一つの属性を改善することが、複数の欠陥の解消につながる場合もある。例えば、種の多様性又は土壌の有

機質を高めると、他の属性にも変化が現れる。有機質を補充すると、土の保水力、生物活性、構造も同時に改善できる。

図 10 カリフォルニア州北部の2つのブドウ園（有機農法へ転換中のブドウ園とバイオダイナミック農法を実践しているブドウ園）の土壌の質を示した蜘蛛の巣グラフ。

バイオダイナミック農法では、土壌の構造、圧密、植物残渣、土壌深度などの値が高く、一方有機農法への転換中には、生物活性、土壌覆土、保水力、有機質を示す値が高い。これは、乾燥マルチによる覆土が功を奏しているのだろう。

