

# 農業生態系における物質循環と生物間相互作用

茨城大学理学部 塩見正衛

## はじめに

現在、わが国のように優れた工業力をもつ先進国では、農産物の過剰生産に悩み、その一方で人々は人類誕生以来初めての飽食を楽しんでいる（内嶋）。しかし、すぐ後にみるように、地球上の多くの地域では、過去にもまして飢えに苦しむ人々の群れが増加している。さらに、地球環境の変化や農業の過密化、農業の商業化によって食糧生産を行うことができる土地面積は年々減少し、劣悪化しているという報告が各国から相次いでいる。いま、2050年には地球上の人口が現在の2倍、100億に達する可能性があることを考慮に入れつつ、食糧の生産と地球・地域環境の生態系をいかに調和させた農業を行うべきか、行えるかを探っていくという切実な問題に直面している。

「低投入・持続型農業」という言葉が1980年代の後半になって合衆国や、ヨーロッパで使われるようになってきた。わが国にもこの概念はすぐ取り入れられ、今ではこの単語が農業を動かすかのごとき感を与えるまでになっている。ここでは、低投入・持続型農業とは何か、そのような農業は必要かどうか、可能かどうか、というような問題に初歩的なアプローチを試み、特に、化石エネルギーに偏依存した農業から生態系のうまい利用による食糧生産への脱皮の方向を探りたい。

**キーワード：**低投入農業，持続型農業，化石エネルギー，生物間相互作用，物質循環，システム分析，人口増加，種の絶滅，直接効果，間接効果，微分方程式系，品種の改良，土壤微生物，病害虫管理，雑草管理，植生の制御，糞尿，草地，家畜，畑，水田

## 1. 食糧生産で直面している問題

過去約30年間における世界の穀物生産高と人口の関係をみると、1970年から1990年に人口は37億から53億へ1.4倍に増加しているのに対し、穀物生産は約12億トから19.5億トへ、1.6倍に増加した。単位面積当たりの穀物収量は、依然増加しつづけ、地球全体としても人口増加を上回る勢いで食糧は増産されている。しかし、人口増加の歯止めはかからず、地球上における富の偏在のために、実際は食糧不足に悩む人々の数は増加傾向にあるのが現状である。特に、発展途上国の近未来における食糧不足は重大な問題になると予想されている。

19世紀のヨーロッパやアメリカ等における先進的工業技術に刺激されて、先進諸国においては農業技術革命が推進されてきた。図1はアメリカにおけるトウモロコシ（飼料作物）と日本における水稲の生産量の増加の推移を表している。このような増加を可能にした技術は、工業的に生産された化学肥料、農薬、動力をもつ機械、鋼鉄やヴィニールで加工した資材、それにこれらの工業製品にマッチするように改良されてきた作物品種の相互作用に依存している。品種を除いて、いずれもその原料が石油や石炭などのいわゆる化石エネルギーに由来しているのが近代農業の特徴である。

このような農業が、現在見直されようとしている。それには、3つの理由がある。一つは、石油等化石エネルギーの埋蔵量は無尽蔵ではないということである。1994年12月25日の朝日新聞の記事には、次のように書かれている。「電力中央研究所によると、世界のエネルギー需要は石油換算で2050年に130億ト～240億ト（90年実績の1.6倍～3倍）となる。いまのペースで石油が消費されると、採掘可能な石油埋蔵量は2040年までにすべて採掘され、80年までには今後発見される石油も掘り尽くされる。」また、コーネル大学のピメンテル教授はその著書で、「化石エネルギーはいまや枯渇し始めている。世界的にみると、現在知られている石油と天然ガスの埋蔵量はこれから35年以内になくなると予想されている。また、合衆国エネルギー省の最近の査定によると、合衆国では現在分かっている埋蔵量と今後発見されると考えられる埋蔵量はたった13年でなくなってしまう。」としている。

二つ目の理由は、過去の単位面積当たりの収量が低かった時代と比較して、投入した補助化石エネルギー（植物が光合成に利用する太陽からの「直接」のエネルギーに対して、化石由来のエネルギーを「補助」エネルギーと呼ぶ）の効率が低くなってきていることである。ピメンテルや宇田川は、農業生産におけるエネルギーの産出／投入比を計算した。その結果、18世紀以前に主流であった農業においては、この比は大変高い値を示している。例えば、焼き畑農業では、65倍、粗放なトウモロコシ栽培では30倍、小麦＋ビートの二毛作では2.5～5倍であったのが、近代的な水稲栽培では1～2倍にまで下がってきている。大久保によると、高い収量の水稲では2キロワット-の石油を使って1キロワット-の収量しかあげることができないと述べている。宇田川は、1950年の日本における水稲生産では、エネルギーの産出／投入比は1.27であったのが、1974年には0.38まで下がってしまったと述べている。

三つ目の理由は、農業の環境に対する影響である。ピメンテルは次のように述べている。「特に先進国におけるおびただしい量の殺虫剤の使用が、水域及び陸上の生態系に深刻なインパクトを与えている。毎年250万トの殺虫剤が農業に使われているが、この殺虫剤が標的とする昆虫にまともに届いているのは、たった0.1%にも満たない。残りは、人類、家畜、自然の生物界に負の影響をもたらしている。合衆国においては、毎年殺虫剤は80億

ドルにもものぼる損害を環境と市民に与えている。」 ちなみに、西暦2000年までに絶滅が予想される動・植物の種数は、合衆国政府の調査書によると、ラテンアメリカで10～33万種（現存種の1/3）、アフリカで2～6.5万種（同13%）、南・東南アジアで13～43万種（同43%）、地球全体では44～145万種（同15%）のようになっている（内嶋）。もち論、これには農薬等の農業の影響も含まれるが、それよりも人類の開発による全般的自然破壊にもとづくものが大きい。特に、ラテンアメリカ、アジアの熱帯に生息している生物は危機にさらされている。

このような近代農業＝高投入・高生産の農業がかかえている3つの問題点をしのぎながら、今後さらに増加の道をたどると考えられる世界の人口にどのようにして食糧を供給していくことが「できるのか?」、あるいは、「できるのかどうか?」が今問われている。そのための食糧生産、「低投入・持続型農業」の方向を探るのが本稿の目的である。

## 2. これからの食糧生産の方向、50年先を見すえて

ここには二つの問題がある。ひとつは、化石エネルギーの使用を抑制しなくてはならなくなつたとき、世界の人類に必要な食糧を供給できるかどうかという問題である。他のひとつは、自然生態系に優しい食糧生産システム＝農業が成り立つかどうかである。これに応えることができるのは、これから述べる二つのことがらを今後いかに効率よく、短期間（50年以内）に開発できるかということにかかっているように思える。もち論、その前提として人口が爆発的には増加しない、そのような社会的、政治的、経済的、文化的なあらゆる手段が講じられ、一定の効を奏していることが重要条件である。

### 1) 物質循環の制御と利用

ここでは、「農地」と述べたけれども、一筆一筆の農地、そのいくつかの集合した農地、町村等の行政的な地域や河川の流域に成立する地域全体の農地、県や地方レベルの広大な地域の農地、さらに国内や国と国の間のように地球レベルまで、食糧生産にかかわる物質循環の生態系レベルを拡大して考えることができる。現在では、これらのどのレベルにおける物質循環をも考慮にいれた農業、食糧生産とその分配を行わなければならなくなっている。

#### 1-1 国家間、地域間の物質の収支

最も大きい生態系から議論を始めよう。三輪は、国家間で食糧や飼料の輸出入によって、どのように窒素の移動が生じているかを明らかにする研究を行った。ノルウェーやデンマーク等の北ヨーロッパ諸国は有名な農業生産物の輸出国である。ノルウェーは1年間に自

国の全農地から平均してヘクタール当たり45kg以上の、またデンマークは25kgもの窒素を外国に輸出農産物として移動させている。タイや合衆国からは日本にも大量の食糧が輸入されているが、その窒素量は、これらの国の農地1ヘクタール当たりにして、年10kg内外であろう。一方、日本や南朝鮮、オランダやベルギー等は大量の食糧を輸入している。これを窒素に換算して、それぞれの国の農地に均等にまいたとすれば、日本の場合には、1年間にヘクタール当たり約125kgにもなるし、南朝鮮では100kgとなる。オランダやベルギーでも100kgを越えている。食糧の輸出は、それに含まれる窒素を輸出していることでもあり、輸入は逆にその持ち込みを意味している。窒素は地力であり、肥料であるから、その輸出は輸出国における地力の低下を、持ち込みは輸入がわの地力の向上や富栄養化をもたらす。

わが国は大量の食料・飼料の輸入国であるが故に、輸入飼料を用いて生産されている家畜から排泄される糞尿だけでも、全国の農地の受け入れ可能量のほぼ限界に達している（農林水産省）。特に、宮崎県や鹿児島県のように豚や鶏の大量飼育が盛んな県においては、もしこれらの家畜糞尿を全部県内だけの農地に施用すると仮定した場合、農地1ヘクタール当たり年300kgから450kgもの窒素を含む畜産由来の過剰な有機物を施用しなくてはならない（西尾、築城・原田）から、すでに県を単位にした窒素収支は成立しない状態になっている（ちなみに、水田では、1年間に必要な窒素肥料は多く見積もってもわずか100kg程度である）。このような事態は、国家間で物質収支の平衡状態を保つことが重要であると同時に、国内においても、地域間の物質収支が農業と食糧生産にとってキーになってきていることを物語っている。

畜産から出る糞尿由来の窒素を、それぞれの県内の農地に均等に施用したと仮定したときの窒素負荷量の分布は県間で非常に不均一である。南九州2県の他にも、香川県、愛知県、神奈川県、群馬県、岩手県等ではヘクタール当たり150kgを越える量になっていると推定されている（西尾）。県内における分布も不均一性が高い。例えば、栃木県内における市町村別の同様の負荷量の分布を見ると、北部の塩原町、黒磯市、那須町、南那須町、西那須野町等の畜産の盛んな地域では1年間にヘクタール当たり150kgから400kgにもなっているが、県内の半分以上の地域は100kg以下である（西尾）。このような過剰な窒素負荷量の分布の輸送による均平化は、現時点では経済的効率からみて不可能であるから、その地域における河川や地下水等への環境汚染に直接結びつく危険性がある。

農業地帯である川越市福原地区と牛久沼集水域における有機物（乾燥重）の流れが松本等によって調べられている。川越市福原地区では、畜産に農産主産物としてヘクタール当たり234kg、農産物副産物として35kg、購入飼料量として1,677kgが投入された。一方、畜産物として系外へ出荷された量が263kg、地区内で消費された量が1kg、糞尿の堆肥等として耕地に搬入された量が1,007kg、その他の環境へ排出された量（主に糞尿+敷き料?）が671kgであった。牛久沼集水域では、川越に比べて農産物の生産量と出荷量が1.5倍くらい多

い。また、農産物から畜産への投入量も1.5倍程度多くなっている。これらは、食糧や飼料によっていかに大量の有機物（したがって、窒素もこれに含まれている）が地域内で動いているか、さらに環境に掃き出されているかを理解するのにいい資料である。食生活等からの残渣・廃棄物は公共的に処理され、環境負荷にはあまり加わらないようになっているが、畜産に関してはそのような施設は高価すぎると考えられている。集約的な畜産に関しては、ヨーロッパ諸国や合衆国でも同様な問題をかかえているのが現状である。少なくとも国家間・地域間の単位で物質収支の平衡状態を確保する一層の努力が食糧生産にとっても重要ではないだろうか。

## 1-2 草地、畑、水田の生態系

一筆ごとの農地における物質循環の問題に進もう。畜産の問題が出たので、わが国ではややマイナーな草地農業からみていくことにする。私たちは、関東地方の放牧草地における生態系レベルの炭素及び窒素循環のシミュレーションを行っている。わが国でごく一般的に行われている粗放な放牧と、最近、草地試験場で開発された集約的な放牧の比較を行ったものである。粗放な放牧においては、放牧牛の数が少なく、補助的な餌はやらず、草地にまく窒素肥料の量も少ない。炭素の量は、主に土壌中の有機物の量と見なすことができる。窒素は河川や地下水へ流亡したり、揮発したりをするが、実験的にこの両者を分けることは容易ではなかったので、シミュレーションにおいても両者の区別を行わなかった。

シミュレーションの結果は、炭素に関しては若干ではあるが年々土壌中への蓄積があることを示している。窒素に関しては、ヘクタール当たり160kgも肥料として施用すると、土壌中への蓄積が起きるが、54kg程度だと窒素欠乏を示した。トータルでみると、草地の炭素収支は健全で、平衡状態に近いが、若干土壌への蓄積の傾向がみられる。（ちなみに、草地土壌への炭素の蓄積は、森林ほどではなくとも、大気中における二酸化炭素増加の抑制とみなすことができる） また、窒素に関しては、牧草の高い生産を保つためには、何等らかの形で1年間にヘクタール当たり80kg程度の肥料をまく必要があるだろう。

小泉らは、筑波の畑で炭素収支を明らかにするための実験を行っている。彼の作った表で、土壌中の炭素収支の項を見ると、陸稲でもトウモロコシでも負の値を示している。これは、陸稲なら毎年1平方メートル当たり315.6gの炭素（したがってこの炭素量を含む有機物）を、トウモロコシでは266.9gの炭素を投入しない限り地力は維持できないことを意味している。同様の実験結果は、合衆国でもヨーロッパでもえられており、畑作における化学肥料偏重型の近代農業は地力の急速な衰弱の一因になっているようである。

次に、日本を含む東南アジアの主食であり、文化でもある水田稲作を見てみよう。鳥越等は、ジェンキンソンと内田の構想をもとにして、日本の水田における窒素の流れを表す微分方程式モデルを作り、20年間つづけて耕作した場合のシミュレーションを行った。シ

ミュレーションの結果は、水田の耕作を開始してから約10年後には、収量も窒素動態も定状化することを示している。

小泉らは実験によって、水稻一毛作における炭素収支のデータをえ、水田では畑と違って、藻類によって固定される炭水化物（炭素）が大きな寄与をしていることを示した。水田には、上流の河川からの有機物や栄養素の流入もある。また、水田は水の蒸散によって比較的低温に保たれているから、土壌呼吸（土壌中の微生物による有機物の分解で発生する二酸化炭素）も少ない。その結果、1年間の炭素収支は平方メートル当たり-22.3gとなって、水田における炭素の損失は畑の1/10以下となった。これらの事実は、畑地の持続性（永続性、安定性）は低いが、草地や水田の持続性は高いことを示している。

### 1-3 物質循環の最適化

以上のところでは、地球レベル、国レベル、地域レベル、農地レベルのそれぞれにおける物質収支・循環の実状と問題点を事例にもとづいて示した。物質循環を一筆ごとの農地で完結させることは困難であるから、地域、国レベル等もっと広い単位で考えることが重要であると同時に、一方、地域ごとに完結させるための最大限の努力を払うことが重要なことは明かである。地域ごとに完結させるためには、地域で複合した多様性の高い農業、稲作、畜産、畑作等の地域内における複合を行うことにつながり、これによって物質収支の凸凹をかなりの程度ならしてしまいうことが出来るだろう。具体的な行政と住民・生産者の調整のもとで最適化することが出来るだろう。また、消費者の食糧生産と環境問題に対する地球的規模での、南北問題等をも含む大局的な立場にたった思想形成が最も重要な問題として提起されなければならない。

## 2) 生物間相互作用の利用

### 2-1 生物間相互作用の概念

図2はプライスという合衆国の昆虫学者が、植物とそれを食う昆虫、その昆虫を捕食する天敵のダニ類、植物の根に相利共生している菌根菌、根を食害している寄生性の線虫類等々の生物間には相互作用が複雑に働いていることを視覚的に示したものである。このような生物間相互作用は、環境条件、例えばその時々水分条件や気温、土壌の種類等によって異なる反応を示す。生物間相互作用には、食糧生産の対象となる植物や動物にとって不利な働きをする害虫や病気、雑草のようなものがある一方、害虫に寄生する天敵や植物に栄養を提供する根瘤菌や菌根菌のように有利な働きをもつものまでいろいろである。

端的にいうなら、化石エネルギーに偏依存した近代農業では、不利な生物間相互作用に対しては農薬等で克服し、生物間相互作用を超越した技術を開発することを目指してきた。一方、有利に働く生物間相互作用を積極的に利用するためには、そこに直接・間接的に働

いている相互作用の複雑なネットワークに関する知識とその制御技術が必要となる。このような知識と技術の獲得には大変な研究時間と労力を必要とする。この複雑系の利用よりもっと手っとり早い方法として、近代農業では、効果の高い肥料や生長制御剤等の農業資材を大量に投入して、その直接効果をねらう方法がとられてきた。これらはいずれも生物間相互作用を無視ないし克服しようとする方向である。少なくとも、1930年頃までは、世界の食糧生産は生物間相互作用をいかにうまく利用するかということに腐心していた。しかし、化石エネルギーの高度な利用が可能になった1945年以降は、その努力は忘れ去られてしまったのである。これからの食糧生産・農業生産には化石エネルギーに代って、生物間相互作用と物質循環のうまい利用に焦点を絞った超高度な、新しい技術の展開と、そのために必要な基礎研究が重要となるだろう。

図3は三つないし四つの生物間の相互作用を表している。一番上の図は、牧草はバッタに食われ、バッタはカマキリに食われる関係である。牧草が増えるとバッタが増え、バッタが増えるとカマキリが増える。牧草はカマキリに対して間接作用をもっている。牧草が増えるとバッタが増えるが、バッタが増えるとカマキリも増えるから、バッタは減る。バッタが減ると牧草は増え、カマキリは減る。このように一見単純に見えるたった三つの要素から成り立っているシステムにおいてさえ、相互作用はこのように何重にも働いているから、われわれの頭脳ではもはやシステムの完全な理解は困難である。そこにカマキリもバッタも食う鳥（または農薬を使う人間）が存在するケースを考えると、事態はいっそう複雑になってしまう。バッタが多いと鳥が増え、鳥はバッタもカマキリも食うから、結局バッタや牧草の量はどうなるのだろうか。このような生物間の相互作用のネットワークの解明は、われわれにとって未開発の分野であり、緻密な実験的研究とシステム解析を除外しては達成することはできないであろう。

もうひとつ例をあげよう。図4の上図は、2種類のバッタとカマキリのシステムである。レヴィンスとファンデルミアは(1)式でこのシステムを表現している ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $C$ はそれぞれ、バッタ1, バッタ2及びカマキリの量,  $t$ は時間)。

$$\begin{aligned} dH_1/dt &= H_1 (r_1 - a_{11}H_1 - a_{12}H_2 - a_{13}C) \\ dH_2/dt &= H_2 (r_2 - a_{22}H_2 - a_{21}H_1 - a_{23}C) \\ dC/dt &= C(r_3 + a_{32}H_2 + a_{31}H_1) \end{aligned} \quad (1)$$

第1の式は、バッタ1は( )内の量に比例して増加あるいは減少することを表している。ここで、( )内の値が正のときバッタ1は増え、負のとき減少する。( )内をみると、バッタ1自身及びバッタ2の量が多くなるほど増加率は減少し、カマキリが増えるほど増加率は減少する。2番目の式も同様にみることができるが、3番目の式は、2種類のバッタが増えるほどカマキリが増えることを示している。ここに、 $r_1$ ,  $r_2$ は種内・種間競争と捕食がない場合のバッタ1とバッタ2の増加率を、 $r_3$ はバッタ1と2が存在しない場合の共

食いによるカマキリの減少率を表している。これらの式において、 $r_1=r_2=1.0$ 、 $r_3=-1.25$ 、 $a_{11}=a_{12}=a_{22}=0.001$ 、 $a_{21}=0.0015$ 、 $a_{13}=0.01$ 、 $a_{23}=0.001$ 、 $a_{31}=0.005$ 、 $a_{32}=0.0005$ として計算した結果が図4Aである。ここに、 $r_3<0$ であるから、カマキリが増えるとカマキリの増加は抑制されること、すなわち餌不足や共食いが多くなることを意味している。さてそこで、 $r_3$ の値を少し大きくして、カマキリの増加の抑制（共食い）を緩和してやろう。 $r_3=-1.0$ として計算した結果が図4Bである。カマキリの増加の抑制を緩和したにもかかわらず、バッタ2は図4Aの場合より多くなって、カマキリの発生頻度は減ってしまう。このように、カマキリ同士の共食いが減ったにもかかわらず、カマキリが減少し、バッタが増えるというような現象は間接効果を考慮しないと直接効果だけでは説明がつかない。

## 2-2 生物間相互作用の具体的な例

農業生態系における複雑な生物間相互作用を解明したり、利用することを直接の目的にした研究は、現時点ではまだ多くない。私は、そのような例を集めているが、いくつか紹介しておこう。それらの例も、意図的に生物間相互作用の利用を考えたものではなかったかも知れない。以下に私の専門である草地学における例を二つあげよう。

### 〈シロクローバとイネ科牧草の草地〉

東北大学の福田は、シロクローバとイネ科牧草の混播した放牧草地における両植物のパッチ形式と植生遷移の過程を個体群生態学の立場から明らかにしたが、彼の研究にイギリスの生態学者ハーパーの考えをドッキングすると以下のような話ができあがる。

シロクローバとイネ科牧草を混播すると、根瘤菌によって固定された窒素はイネ科牧草に供給され、イネ科牧草は繁茂する。イネ科牧草の繁茂によって、背の低いシロクローバは光をめぐる競争に負け、そのバイオマスが逐次減少していく。根瘤菌をつけるシロクローバの減少とイネ科牧草の繁茂は土壤中の窒素の減少をきたし、イネ科牧草への窒素供給量の減少をもたらすから、イネ科牧草の量は逐次減少していく。そのような条件下で、相対的に窒素資源をめぐる競争に勝ったシロクローバはイネ科牧草よりもバイオマスで優位にたつ。しかしながら、このような状態は長続きせず、シロクローバの共生根瘤菌から供給された窒素によって、再びイネ科牧草の量が多くなっていく。草地はこのようなプロセスの繰り返しである。

放牧草地では、家畜の採食や排泄が強く関与しているから、状況はもっと複雑になる。光をめぐる競争でイネ科牧草がシロクローバとの競争にせり勝っているさなかに、イネ科牧草が牛に採食されたところではイネ科牧草とシロクローバの地位が逆転して、シロクローバの生育がよくなっていく。放牧牛による糞や尿の散布が地力にパッチ状の分布をもたらす。糞尿によって供給された窒素の影響で、その地点のイネ科牧草が繁茂し、シロクローバの



生育は抑制されるだろう。牛の採食も牧場内で均一ではないから、イネ科牧草の採食が少ないところではシロクローバが抑制されるが、イネ科牧草が激しく採食されたところではシロクローバの再生が盛んになるだろう。さらに、家畜が採食した植物についている種子は消化されずに、糞に混ざって放牧草地に供給されるから、これらの牧草の種子はパッチ状に散布され、土壌中の埋土種子の種類も量もパッチ状に分布する。シロクローバの繁茂とイネ科牧草の繁茂は交互に繰り返され、草地全体ではこのように家畜が植物群集のパッチ形成に大きな役割をはたし、そのパッチはこのような生物間相互作用によって月日とともに空間的に移動していく。このような土壌環境や植生の不均一性は、放牧草地における生産力に大きな影響を与えているだろう。

#### 〈草地生態系におけるエネルギー利用の効率化と植生遷移〉

栃木県西那須野町に所在する農林水産省の草地試験場では、1974年以来放牧草地における太陽の光エネルギーの利用効率を測定してきた。放牧草地は、畑や水田以上に豊富な生物相、すなわち多数の草本植物や若干の木本植物、家畜や昆虫類をはじめとする何種類もの動物、土壌動物や土壌微生物等の豊富な土壌生物相によって維持されている。おそらく、このように豊富な生物相によって草地生態系は物質の生産と分解の間に平衡状態が維持でき、持続型農業の模範となっているのであろう。これらの生物間相互作用の研究には膨大なテーマ数があげられているが、その研究の進行は経済的にもスタッフ数からも大きな制約条件下にあることは否めない。

図5は太陽エネルギーが牧草にキャッチされ、その一部が家畜に採食され、家畜の排泄物や牧草の植物枯死体等の有機物が土壌有機物になって、微生物等の作用により分解されていくプロセスを表している。この研究には、多数の植物生態学や家畜生態学の研究者、土壌微生物の研究者やシステムモデルの研究者がかかわってきた。しかしながら、まだ全体のプロセスが解明されているわけではない。小山らは、品種改良された牧草類の生育している草地に、放牧してある牛の糞を通じてこの牧場の外部から侵入したと考えられる野生のシバの種子が発芽・生育し、牧草類の中でだんだんと優位を占めていくプロセスを研究した。そして、肥沃度の高い草地や放牧による採食の少ない草地では、牧草のバイオマスが多くなって、背の低いシバを覆ってしまうからシバが侵入しにくいこと、しかし逆の条件下では、牧草の草丈は低く、シバは十分な太陽光を享受できるからどんどん侵入して、シバ草地になっていくことを明らかにした。また、そのような変化が生じているときに、植物や家畜へのエネルギーの流れや蓄積を推定できるシステムモデルを連立微分方程式を使って作っている。

放牧草地における土壌微生物の働きにも目を見張るものがある。VA菌根菌は、火山灰土壌（わが国の草地の多くは火山灰土壌に開発された）中で植物が直接には利用できなく

なった膨大な量のリンを利用することができ、VA菌根菌経由で植物はリンを利用している。土壌中にはまた、植物の利用できない形態の窒素が大量に蓄積されているが、現在、窒素を溶解・利用しているバクテリアや菌類の研究も進められている。このような研究がさらに進むなら、化石エネルギーの投入をミニマムに抑えても、高い生産がえられる技術が達成されることになるであろう。

### 3. まとめ

自然、農業を問わず生態系における物質循環にも生物間相互作用が大きな役割をはたしていることは、以上の説明から容易に想像することができる。われわれには、これらの利用によって、低投入・持続型の食糧生産を目指す義務がある。ハーウッドによると、このような農業を次のような文章でまとめている。「人類による資源利用の拡大、資源利用の効率化及び人類とその他の生物のほとんどの種にとって好適な環境バランスに向かって無限に発達していく農業」。

この章では、生態系における物質循環と生物間相互作用をうまく使うことによって、化石エネルギーを使わなくても、生産の高い食糧生産をあげられる可能性があることを明らかにした。それでは、物質循環や生物間相互作用のうまい利用方法を開発するには、どのような研究が必要だろうか。思いつくままに列挙してみる。私たちが編集したEcological Processes in Agro-ecosystemsという本には、詳しく述べられている。

まず、窒素やリンなどの物質を土壌中の微生物などにうまく循環させる方法の研究である。これには二つが考えられるが、人工的に農業に投入できる物質の量が少なくても、生物間相互作用などの働きによって回転率を高めることができれば、多量の物質を投入したことと同じ効果がえられるはずである。放牧草地では、施肥量の2倍もの窒素が糞尿として排泄されており、放牧が窒素循環の回転率を高めていることを示している。

先にあげたように土壌中には窒素やリンが、また空気中には窒素が大量に蓄積されているが、これらの物質のほとんどは農業には利用できない不活性な形態になっている。これを生物間相互作用によって作物に利用できる形態に変えていく技術も全くの夢ではない。土壌中の生物だけではなく、最近では葉面内生菌（エンドファイト）を利用する展望も開けつつある。

農薬による病虫害や雑草の防除に代わって、昆虫や鳥たちの食物連鎖をうまく利用する方法を考えなければならない。害虫と天敵の関係、宿主と寄生者やさらに3層以上のピラミッドになっている食物連鎖は今後の大きな研究対象である。また、種間競争を雑草制御にうまく利用したり、作物同士の助け合い（助長作用）を利用して生産を増やす方法も考えられている。

輪作による嫌地の回避や、作物間の助長作用のうまい利用、忌避植物の混作による病害虫の回避などの研究は有望である。さらに、生物の季節性を利用して、作付け時期を調節、害虫や雑草を回避する方法の原理は以前から利用されてきた。今日、食物連鎖や種間競争・助長作用の効果の研究は数多く進められているが、そのほとんどは、たかだか単純な2種類の生物間に限られたものである。しかも、2種間の関係においてさえ、現段階の理論によっては、自然あるいは農業現場に起きている生物現象を十分には説明し切れない状況にある。このような生物間相互作用の解明と利用が次世代の農業技術として活用されることを期待したい。

なかでも、作物の品種改良は最も基本的である。生物間相互作用をうまく利用できる、高い生産性をもつ品種の育成や、病害虫抵抗性の品種の育成である。これには、従来からの交配育種の方法もさることながら、遺伝子組換え技術の利用と新しい遺伝資源の開拓が欠かせない。

化石エネルギー依存の近代農業の技術的な発展は、わずか過去40年間に急激なスピードで成し遂げられた（古くて1930年代、もっと現実的には1950年以降ということができる）。化石エネルギーが消える日まで、すなわち低投入の新しい技術の完成が迫られる日までは、現在ほぼこれに匹敵する年数が許されていると考えることができる。その間、①人口の増加を抑制し、②化石エネルギーを節約して使い、③自然エネルギーをより有効に使う技術の開発につとめ、さらに、④化石エネルギーに依存しない農業技術の開発に集中しなければならない。

低投入の農業といえども、安定した高収量をめざすためには、農業機械や肥料、農薬製造、農業機械の運転、肥料や農薬の運搬、散布作業等に多大のエネルギーを必要とする。袴田によると、1980年代の新潟県大潟村では、ヘクタール当たり年間502億ジュールの化石エネルギーが投入されている。そのうち、①軽油やガソリンとして農家自身が用いた量は約20%（直接投入）、②肥料、機械、農薬等に形を変えた化石エネルギーが80%（間接投入）を占めている。将来、502億ジュールのかなりの部分を生物間相互作用や物質循環のうまい利用によって置き換えることができたとしても、少なくとも直接投入の部分は何らかの形のエネルギーによって支払われなくてはならない。しかし、その解決の見通しは農業の分野だけではたちそうにもない。他のエネルギーの分野を含む全体的な観点から解決の道を探らなければならないだろう。

## 参考文献

Levins, R. and Vandermeer, J.H.: The agroecosystem embedded in a complex ecological community, In: eds. Carrol, C.R., Vandermeer, J.H. and Rossett, R.M.,

Agroecology. McGraw-Hill Publishing Company, New York, 341-362, 1990.

Price, P.W.: Insect Ecology (2nd ed.), Wiley, New York, 10, 1984.

塩見正衛：低投入・持続型農業、なぜ必要か？可能か？、システム農学会編「新たな時代の食料生産システムー低投入・持続可能な農業に向けてー」、農林統計協会、東京、3-20、1996.

Shiyomi, M., Yano, E., Koizumi, H., Andow, D.A. and Hokyo, N. (eds.): Ecological Processes in Agro-ecosystems. NIAES+Yokendo Publishers, Tokyo, 1992.

内嶋善兵衛：ゆらぐ地球環境、合同出版、東京、1990.

連絡先：310水戸市文京2-1-1 茨城大学理学部

TEL/FAX: 029-228-8384 email: shiyomi@mito.ipc.ibaraki.ac.jp

図1 合衆国のトウモロコシと日本の水稻収量の推移（内嶋）

図2 生物間相互作用の例（Price）

図3 3～4種類の生物間相互作用（Levins and Vandermeer）

牧草PーバッタHーカマキリC及び鳥か殺虫剤を使う人Iの相互作用のシステム  
矢印は正のフィードバックを、丸印は負のフィードバックを表している。

図4 バッタ1, バッタ2, カマキリのシミュレーション（Levins and Vandermeer）

左： $r_3=-1.25$ の時，右： $r_3=-1.00$ の時

2種類のバッタ（ $H_1$ と $H_2$ ）とカマキリ（ $C$ ）の相互作用

図5 放牧草地のエネルギーの流れのコンパートメント・モデル（塩見）

太陽の光エネルギーは牧草に固定され、それを牛が食べる。糞や食べられなかった牧草は土壌有機物に、土壌有機物は土壌中の生物によって利用され、分解して水と二酸化炭素になってしまう。