

2章 環境の中の土壌

「環境」という用語は大変曖昧であるが、極めて一般的に定義するとすれば「自分以外のすべてのもの」である。現在、「環境問題」として用いられる「環境」は人間を取り巻き、相互作用を及ぼしあっている「人間環境」のことであり、ここでの「自分（主体）」とは「人間」を指している。前節では土壌が人間の生存の基盤、特に生物生産の場として重要な意味をもっていることを述べたが、土壌は生物生産とだけ関わって存在しているのではなく、環境を構成する一要素として、他の要素と、特に人間の活動と、相互に関わりつつ、土壌自身がなすべき機能を全うしようとしている。ここでは人間の活動が環境の要素としての土壌の機能発現にどのような影響を及ぼしているのかを、生物生産や環境問題の側面からみてみたい。

2.1 土壌生態系

生態系（エコシステム）は生態学の創始者である Tansley によれば「生物がその環境とともにつくっている物理的システム」で、「地球表面の自然の基本的な単位」である。陸上生態系では生物は生産者（緑色植物）、消費者（動物）、分解者（微生物）に区別され、それらは大気、水、土壌などの非生物環境との間で物質やエネルギーの交換をすることにより、極相ではシステム全体の平衡が保たれている。このシステムの中では、土壌は非生物環境の一部として、生産者である植物に水や養分を供給し、分解者である微生物の活動の場となっている。

このような見方に対して、松井（1993）は土壌とそれを取り巻く環境（大気、水、動植物）との間に存在する自然のシステムは、生態系と同格の別個の系であり、それを土壌系（ペドシステム）と呼ぶことを提唱している。すなわち、土壌系では土壌を主体と考え、生物はそれを取り巻く環境要因のひとつである。土壌は生産者（緑色植物や土壌動物、土壌微生物などの生物に水分、酸素、養分を供給）、緑色植物は1次消費者、動物は2～n次消費者、人間は最高次消費者となる。土壌系では太陽エネルギーに起因した種々の物理的、化学的、生物学的諸過程が進行しており、その表現形が土壌の理化学性を含めた「土壌の顔」ともいうべき「土壌断面」である。人間による攪乱が少ない場合は、この顔は準平衡状態にあり、極めてゆっくりとしか変化しないが、攪乱の大きい場合は急速にその容貌を変化させていくことになり、その状態が現在直面している「地球・地域環境問題」であろう。

土壌系内で進行している物理的過程としては植物根による岩石の物理的風化や水の移動など、化学的過程としては、植物や微生物の呼吸や代謝により放出された炭酸ガスや酸素による鉱物の溶解、分解、酸化と還元など、生物学的過程としては植物による養分の土壌表層への還元、微生物による動植物遺体の分解による養分の土壌への移行、土壌有機物の蓄積と変成などが挙げられる。このような過程を理解することにより、農地のみならず住宅地、公園、道路の法面などをも適切に管理し、問題が起こった場合には修復と保全対策を立てることができるのである。以下にいくつかの環境問題の例を挙げて土壌系内の諸過程との関わりを述べてみよう。

2.2 重金属による土壌汚染

陽（1993）によると人間と金属の付き合いの歴史は古く、銅（Cu）は紀元前 6000 年、鉛（Pb）

表 2.1 土壌中における重金属元素の天然賦存量 (mg kg⁻¹)

元素	中央値	範囲
クロム	70	5~1500
ニッケル	50	2~750
銅	30	2~250
亜鉛	90	1~900
砒素	6	0.1~40
銀	0.05	0.01~8
カドミウム	0.35	0.01~2
スズ	4	1~200
水銀	0.06	0.01~0.5
鉛	35	2~300

は同 5000 年にも遡るとされている。特に 19 世紀の産業革命以後、重金属は近代社会の発展になくはないものとなった。近年の重金属の採掘、利用の増大は様々な環境問題を引き起こしている。重金属のいくつかは前章でも述べたように微量必須元素であるので、植物は必ず必要とし、不足した場合は欠乏症が現れる。しかし、その要求量は微量であり、土壌溶液に多量に存在した場合は反対に植物に過剰障害が現れる。障害は植物に留まらず、食物連鎖によって高次消費者の動物や人間に蓄積し生命が危険にさらされることもある。従って、各元素

につき汚染のレベルを知ることが大切であり、それを評価するためには表 5.2.1 に示すような汚染されていない（と思われる）自然状態の存在量（天然賦存量）が用いられる。

重金属の発生源としては、1) 金属鉱山排水 (Cu、Pb、Cd、As)、2) メッキ工場排水 (Ni、Cu、Zn、Cr、Ag、Pt、Sn、Cd)、4) 皮革加工工場排水 (Cr)、5) 塗料、塗装、染色 (Cd、Cr、Pb、Cu)、6) 都市排水 (Zn、Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Hg、As) などが挙げられる。これらの重金属は土壌中で不溶性あるいは難溶性であれば土壌溶液濃度は低いので、植物により吸収される量は少ない。しかしながら、土壌環境はその溶解性に強く影響を及ぼす。例えば、土壌 pH が低下した場合、Cu、Zn、Cd などの溶解度は増大する。また、酸化的条件になれば溶解度が増大する元素 (Cd、Cu、Zn、Cr) と還元的条件でそうなる元素 (Fe、Mn)、さらには土壌中の他の成分と結合して難溶性の化合物を形成する元素 (PO₄³⁻と Cd・Zn・Pb、SO₄²⁻と Pb、H₂S と Cd・Zn・Pb・Ni など) などを考慮して汚染の防止や低減対策の立案を行うことが必要である。

2.3 地球温暖化

陽 (1993) によると、太陽エネルギーと地球・大気系が放射する赤外放射が釣り合った状態では地球の平均温度は -18℃となる。しかし、地球の地表付近の平均温度は約 15℃である。これは、大気中に含まれる炭酸ガス (CO₂)、オゾン (O₃)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O) などの温室効果ガスが赤外放射を吸収して温度を上昇させているからである。従って、これらのガスが存在しなければ、地球上の生物は現在のように生存できない。その意味では温室効果ガスは人間を含む生物にとって必要不可欠なものである。しかし、近年、対流圏におけるこれらの濃度が上昇しつつある。例えば、炭酸ガス濃度は産業革命以前 280ppm 程度であったが 1999 年には 368ppm となり、毎年 1.6ppm づつ上昇している。また、メタンや亜酸化窒素はそれぞれ 0.8~1.0%、0.2~0.3% の割合で増加していることが明らかとなった。

温室効果ガスの中では炭酸ガスの濃度が圧倒的に高いが、それぞれの赤外線吸収ポテンシャルは異なり、それに基づいて温暖化への寄与を算出するとメタンや亜酸化窒素も無視することはできない (表 5.2.2)。これらのガスは自然、農地いずれの土地利用の下でも放出されているが、近年の人口圧の増大に伴う森林伐採、農地の拡大と集約化、さらには肥料の投入、機械化や土地改変による土壌系の更なる攪乱など、生物生産活動との関わりにおいて多に注意を払わねばならない。

表 2.2 主な温室効果ガスの特徴 (Bouman, 1990 を改変)

温暖化 寄与率
50
19
4
8
15

土壌有機物は炭酸ガスのソースであると同時にシンクでもある。世界の土壌系に蓄積した炭素量は、表層 2m で有機炭素が約 2200Gt、無機炭素が約 700Gt と見積もられており、植物の約 600Gt や大気中の 750Gt を凌駕する。大量の土壌有機物が温暖化の進行の下、果たして炭酸ガスの施肥効果により生物生産が増大し炭酸ガスのシンクとして機能するのか（正のフィードバック）、あるいは温度上昇により土壌有機物の分解が促進されソースとなるのか（負のフィードバック）、定量的に検討することは温暖化ならびに食糧生産の予測をする上で重要である。また、メタンや亜酸化窒素は還元状態で発生が増大することから、湿地の開発や水田耕作による攪乱、高い収量を維持するために行われる多量窒素施肥や安全性を期待してなされる有機農業との関係解析などのさらなる研究が必要である。

2.4 酸性雨

通常、雨は大気中の炭酸ガスの溶解による炭酸を含んでおり、それが炭酸ガスと平衡状態にあるので、その時の平衡 pH は 5.6 である。従って、これより低い値を示した雨が酸性雨と定義される。主要な発生源は化石燃料の燃焼によって生成した硫黄・窒素酸化物に起因する硫酸および硝酸である。1950 年代には pH5 以下の雨は、欧州ではドーバー海峡を挟む地域、また、米国では東部工業地帯に限られていたが、1980 年代半ばにはスペインを除く欧州全域、米国ではロッキー山脈東麓に至るまで、急速にその範囲を拡大していった。このような酸性雨（雨のみならず塵や霧を含めて酸性降下物と総称する場合もある）は生物生産へ、また土壌系を含む生産環境へどのような影響をもたらすのであろうか。

酸性雨は直接的に植物生産を抑制したり、湖沼に棲む生物に打撃を与える他に、土壌系の変化を通して大きな影響を与える。すなわち、付加された水素イオンにより土壌が酸性化すると、カルシウムやマグネシウムなどの必須元素陽イオンが水素イオンと置換され、それらは雨とともに土壌系外へ流亡する一方、土壌中に鉍物として多量に存在するアルミニウムが溶解する。アルミニウムは植物根に強い毒性を与え、養分吸収の活性を低下させるため、間接的に植物生産を制限することも危惧されている。

わが国に酸性雨により付加される水素イオンや硫・硝酸の量は、欧州や米国と大差はないが、それによる被害はそれほど大きくはない。その理由として、岡崎（1993）は土壌種の違いを挙げている。欧州や米国において酸性雨の被害が甚大であった地域の土壌種（ポドソル）は、土層が薄く、酸や塩基に対する緩衝力が弱いこと、一方、わが国の土壌種（特に火山灰起源の土壌）は非晶質の鉍物を多く含むので、水素イオンを吸着しやすいこと（すなわち酸中和能力が高い）によるものと考えている。また、火山灰起源の土壌はアルミニウムを多く含んでいるので、緩衝能以上の水素イオンが付加されると、一挙にアルミニウムの溶解が始まり、植物生産

を大きく妨げる危険性のあることも指摘している。

2.5 砂漠化

1977年国連環境計画（UNEP）の主催によりナイロビで開催された国連砂漠化会議の場で、砂漠化とは「土地の持つ生物生産力の減退ないしは破壊であり、最終的には砂漠のような状態になる現象」と定義づけられたが、その後、さらに具体的に「主として不適切な人間活動に起因する乾燥、半乾燥ならびに乾性半湿潤地帯における土地の荒廃現象」として再定義された。ここでいう荒廃現象は土壌侵食や土壌塩性を指している。UNEPは世界の陸地の約1/4にあたる36億haが砂漠化の危険にさらされ、世界人口の約1/6が直接影響を受けていると推定している。

土壌侵食はある意味で生物生産には必要と考えられる。というのは、侵食とそれに伴う堆積作用により、土壌は若返り、新たな養分が補給されるからであり、地質学的施肥と評価できる。「エジプトはナイルの賜物」とヘロドトスをして言わしめた沖積低地（デルタ）と同様の恩恵を与えるものである。しかし、過耕作や過放牧により土壌表面が露出し、米国の綿やトウモロコシ畑でみられるように年間3000～5000あるいは休耕地では10000～30000 m³/km²の肥沃な表土が失われると、養分や水の保持・循環機能を維持できなくなる。適切な輪作や土壌被覆が叫ばれる所以である。

一方、前章で述べたように乾燥地は養分が豊かで土壌肥沃度は高い。従って、灌漑を行うことにより大幅に生物生産量を向上させることが可能である。しかし、その量と場所により地下水位の上昇と停滞を引き起こし、その結果、蒸発に伴う毛管現象による上向きの水の流れが発生し、土壌中の塩が地表面に集積する土壌塩性化が発生する。土壌中の塩濃度が上昇すれば植物は体内の浸透圧を調節できなくなり枯死する。中でもナトリウム塩が優占するような土壌ではpHが9以上にも上昇し、微量元素の溶解度を著しく低下させることにより養分欠乏をも引き起こす。かくして肥沃な農地が一転して荒涼たる砂漠へと変貌し、そこに栄えた文明は蜃気楼のごとく潰え去っていくことは、古くはメソポタミア、近くはアラブ海地域に目を向ければ明らかである。

このように環境問題は人間の歴史の中で、人間が創り出してきた、極めて身近ながら未だに克服できていない古くかつ新しい課題である。60世紀にも亘って蓄積してきた土壌系で起こっている諸過程に関する知識と経験を、現在および将来に生かすことができるか否かは、ひとえに「人間が環境の主体であると同時に一つの構成要素にしか過ぎない」ということを理解し、それに従った生き方を実践するかどうかにかかっているのではないだろうか。

（小崎 隆）

引用文献

松井 健・岡崎正規・陽 捷行他：環境土壌学、朝倉書店、東京、1993