

2.1.3 土壌劣化と砂漠化・土地荒廃

(1) はじめに

最近マスメディアを通じてセンセーショナルに取り上げられている"サハラ砂漠の南進"に代表されるような"砂漠化"は、乾燥・半乾燥地域において顕著に観察される"土地生産力の減退ないし破壊(土地荒廃)"現象であるが、その原因は地球誕生以来の地質学的時間をも考慮した気候変動(具体的には乾燥化)という自然的要因と人間とくに生産活動などの人為的要因が複雑に関わっている。我々はこの問題に対処するにあたり、自然的要因と人為的要因をできるだけ分離して考えていく必要がある。とりわけ前述のような長期の気候変動のなかでの乾燥化を阻止することなどは、現在の人間の智慧と技術では到底不十分であり、そのようなことに大きな労力と資金を投入すべきではないだろう。もちろん現在の乾燥化が長期の気候変動の中でみられるものかどうかについては議論の余地が十分残されているものの、我々は現在取り組むべき"砂漠化"を"人為により引き起こされた土地荒廃現象"と捉え、前述の人為的要因の解析に基づいた適切な防止あるいは修復対策を確立することが我々に求められている。従って、砂漠化研究は現在みられる砂漠およびその周辺の乾燥・半乾燥地域のみを対象とするべきではなく、降水量の豊かな湿潤地域でも土地利用が適切でない場合には"砂漠化"が起り得るため、そのような地域をも含めて研究を進めていくことが必要である。

砂漠化の人為的要因は我々が生業として営んでいる農業の手法と深く関わっている場合が多いが、そのみに限定されることはなく、道路や水路建設、鉱山開発などの他の産業との関わりも無視することはできない。ここでは砂漠化・土地荒廃の土壌的側面、すなわち土壌劣化について、具体的現象とその要因解析、劣化過程のモデル化手法、具体的対策確立の可能性について議論する。

(2) 土壌劣化：その現象と要因

Lal and Stewart (1990, 1992) は一般的に観察される土壌劣化現象を大きく以下の3過程に分類されたとしている。

1) 物理的過程：土壌構造の劣化、土壌密度の増加、水分・温度レジームの悪化などを通してスレーキング、クラスト形成、旱魃、過湿、土壌侵食、土壌の固化、通気性の悪化が引き起こされる。

2) 化学的過程：養分の溶脱とそれに伴う酸性化による土壌肥沃度の低下や陸水の富栄養化、元素間の不均衡による土壌塩性化およびアルカリ化や作物の養分過剰・欠乏障害、土壌のラテライト化が引き起こされる。

3) 生物的過程：土壌有機物の分解促進による土壌バイオマスの減少や温室効果ガスの発生、土壌生物活動の低下による土壌攪乱作用の停止とそれに伴う土壌密度の増加、生物多様性の現象による土壌病虫害の増加が引き起こされる。

これらの劣化過程は一般には単独で現れることは少なく、複合してみられることが多い。

これらの土壌劣化に関わる因子には気候、水文、地形、母材、植生などの自然因子と、

人口圧、土地利用、土木工事、産業廃棄物の廃棄などの人為因子が挙げられる。自然因子は例えば土壌の深さ、粒径組成（土性）、土壌を構成する粘土鉱物の種類等を通して土壌劣化の潜在的危険性を規定しているのに対して、人為因子は耕起方法、輪作体系、侵食対策の有無、あるいは土地所有制度や法律、慣習等を通して直接的に土壌劣化の有無やその程度を規定していると考えられる。

（３）劣化過程のモデル化手法

土壌劣化を防止するとともに適切な修復対策を立案し実施するためには、その劣化過程の作用機構解析と要因パラメータを用いたモデル化を行うことが必要である。そうすることによってどのパラメータを制御する対策が最も効果的か、また、その対策はどのような自然・社会・経済環境に適用可能かといった側面を評価することが比較的容易になると考えられる。ここでは土壌劣化過程のうち、水食、風食、土壌塩性化の予測について、現在一般的に利用されている手法を紹介する。

水食

１）USLE/RUSLE

Zing（1940）は初めて土壌侵食量と斜面長、斜度の関係を式で表した。その後、合衆国各地での侵食試験の結果を統計的に解析し、USLE（Universal Soil Loss Equation）が開発された（Wishmeier and Smith, 1978）。これは経験式であったが、侵食過程の理論により修正が加えられ、計算機上で動作するRUSLE（Revised USLE）となった（Renard et al., 1991）。USLEとRUSLEはともに水食による土壌の流出量を次の式で算出している。

$$A = R \times K \times L S \times C \times P$$

ここで、A：単位面積あたりの年間土壌侵食量（t/ha）、B：降雨係数（MJ・mm/ha・h）、K：土壌係数（t・ha/MJ・mm）、LS：地形係数（無次元）、C：作物管理係数（無次元）、P：保全係数（無次元）である。Rは降雨エネルギー量と降雨強度の積の年間合計量である。一方、R以外の各係数は標準状態（傾斜9%、斜面長22m、裸地）からの相対的状态により得られるものであるが、長年のデータの蓄積により、侵食試験を行わずとも決定することができるようになっている。しかし、この式が開発された合衆国とは大きく異なった自然条件をもつ地域に適用する際には危険を伴うことに留意すべきである。また、圃場単位での侵食量予測を目的とした本式を集水域などに適用する場合、域内での堆積過程が考慮されていないため、侵食量を過大評価する危険性が高い。

WEPP

USLE/RUSLEが経験式であること、また堆積過程を考慮していないことなどの問題点を踏まえ、侵食/堆積過程の理論に則った予測式がWEPP（Water Erosion Prediction Project）である（Lane and Nearing, 1989）。本モデルの特徴は1日単位の侵食量や集水域での侵食量を予測することができ、必要とするパラメータは透水速度、表面流去水量、植物あるい

はその残渣による被覆、地表面の凹凸、リルの形状と密度などである。

広域評価への適用

上述の2モデルは入力するパラメータが多く、またガリーのような深くかつ大きな溝による土壌侵食を予測することは困難であるので、広域評価のためには必ずしも実際的ではない。一つの流域、地域、国、世界といった小縮尺予測を行う場合、既存の情報を基に調査者が係数を決定することが必要である。その代表的な試みがFAO/UNEP/UNESCO(1979)による北アフリカ・中近東の土壌劣化予察図の作成である。この地図は水食・風食だけではなく、塩類集積、化学的・物理的・生物的劣化の危険性についても評価している。なお、水食危険度の評価には、USLEを用いており、各係数の決定は、月別降水量、FAOの土壌分類、斜度、土地利用、植被に依っている。しかし、Lal(1988)が示しているように、同一地域の地域でも侵食量ばかりでなく、その分布パターンまでもが調査者により大きく異なる場合がある。その原因としては、データの信頼性の低さ、データの不適切な外挿、侵食/堆積過程に関する知識の欠如、主観の介入が挙げられており、今後の改良が待たれている。

風食

古くはChepil and Woodruff(1963)が風洞実験や圃場試験に基づき経験的な予測モデル(WEE: Wind Erosion Equation)を導き、その後Skidmore and Woodruff(1968)が若干の改良を行い、パラメータとして0.84mmより大きな乾燥団粒の割合、蒸発散位、月別平均風速、降水量、地表面の凹凸、植被を用いた。本モデルは簡略化されてFAO/UNEP/UNESCO(1979)の風食危険性評価に利用されている。

その後、水食と同様に風食に関しても理論に基づいたモデルWEPS(Wind Erosion Production System)が合衆国農務省(USDA)により開発された(Hagan, 1991)。本モデルは気候、作物成長、水文、土壌、侵食、耕起のサブモデルからなり、計算機上で作動するが、合衆国以外の地域での利用には慎重な検討を要し、堆積が考慮されていない点も水食モデルと同様の問題を抱えている。

土壌塩性化

土壌が塩性化するための条件として、土壌および植物体からの蒸発散量が土壌に加えられる水量よりも多いこと、土壌中に水溶性の塩類が存在し、それらが移動集積することが挙げられる。従って、土壌の塩性化は土壌中の水の移動方向と水収支ならびに土壌に存在または加えられる塩類の質と量によって大きく規制されている。これらのことは乾燥・半乾燥地域で顕著にみられ、特に大量の水を用いる灌漑農業では、その土壌劣化の程度と持続性を評価する場合に最も重要である(Szabolcs, 1986)。

1) 塩類集積過程のモデル化

灌漑が行われている土壌の水収支は次式で表される。

$$I + R = ET + D$$

ここで、I：灌漑水量、R：降水量、ET：蒸発散量、D：排水量である。また、土壌系に存在する水の水質を電気伝導度（EC）で表し、灌漑水（EC_I）、降水（EC_R）、排水（EC_D）を用いると、土壌中のイオン増加量（EC）は以下の式で表現される。

$$EC = (EC_I \times I + EC_R \times R - EC_D \times D) \times (d \cdot n \cdot d)$$

ここで、d：土層の厚さ、n：平均含水比、d：乾燥密度である。分子が正のときには塩類集積が、負のときには溶脱が起る。このモデルを用いることにより、塩類集積が起らないような灌漑計画を立てることが可能である。

2) 広域評価への適用

Colwinら（1989）はアリゾナの400km²の試験地において、透水係数、地下水位、地下水EC、排水量を測定し重回帰分析とGISの手法を用いて土壌ECの面的予測を行った。今後、このような手法で土壌塩性化の予測が行われるであろうが、パラメータ情報を点から面へと広げていく過程のモデル化には未だ多くの課題が残されており、ジオスタティスティクス手法の導入も検討する必要がある（Webster, 1985）。

(4) 防止・緩和・修復対策

土壌劣化を防止・緩和し、さらには原状への修復を促進する土壌管理法については従来多くの研究がなされている。有機物の減少、養分の枯渇、酸性化などのような化学的劣化に対処する方法としてはpH矯正、適切な酸化還元状態の確保に加えて、有機物の施用やマルチの実施、マメ科作物を含めた輪作体系の確立、アカシアやユーカリの植林とその間を利用するパイナップルやキャッサバの栽培、いわゆるアグロフォレストリーの導入等が効果的と報告されている（Yoda and Sahunalu;1991, Sakurai et al.;1989,1991）。一方、物理的劣化には灌漑・排水環境の整備、耕盤層の破砕、適度の表土攪乱などの工学的処理が有効であるとされているが、近年ユーカリ植林による蒸発散量の増大が、灌漑により引き上げられた地下水位を原状近くまで引き下げ、その結果化学的劣化の一つである土壌塩性化の抑制に効果的であることが実証された（Miura et al., 1990）。生物的劣化の修復には上記の手法の適切な組み合わせに加えて、土壌改良資材や除草剤などの適切な利用も考慮する必要がある。将来、土壌劣化を抑え、持続的に土地資源を利用するためには、土壌のみならず植生や水資源などを含めた農耕地および自然生態系における物質循環を保証するような土地利用システムの確立が必要であるが、そのシステムに含まれるべき個々の技術はそれぞれの自然および社会経済的環境に応じて選抜されねばならない。さらに、そのようなシステムを構築するためには、良質の気象情報の収集や現行システムのモデル化などを着実に進めくことが肝要である。

小崎 隆