

第2章 砂漠化・土地荒廃のメカニズム解明とモデル化の可能性

2.1 マクロにみた砂漠化・土地荒廃のメカニズム

2.1.1 気候変動と砂漠化・土地荒廃

砂漠化の定義を、砂漠化防止条約に採用されているものとそれ以前の定義とを比較した場合、気候変動、すなわち、干ばつ（少雨）の砂漠化への影響が含まれたことが特徴である。世界の乾燥地域のなかでもサハラ砂漠南縁地帯のサヘル、中国北東部で最近数十年に少雨傾向が著しいが、このような気候変動が砂漠化に多かれ少なかれ影響を及ぼしている事実は無視できないであろう。この点に関して、地域的な干ばつの発生と全球規模の気候変動の関係について（2）で述べる。

地球環境問題のなかでも地球温暖化がこれだけ世界的な関心をひき、「気候変動枠組み条約」とその議定書の採択にまで至ったのは、とりもなおさずこの問題が地球表層環境のなかでも大気圏に関係しているものだからであろう。すなわち、地球上のいかなる地域で温室効果ガスが放出されようとも、それは大気の流れによって世界中にくまなく広がり、温暖化の影響を及ぼす。また、温暖化によって引き起こされる海水準変動も同様に地球規模の問題である。

一方、砂漠化は地圏に生ずる現象であり、基本的に地域に限定された問題である。砂漠化の影響を受けている土地の面積は世界の耕作可能な乾燥地域（乾燥、半乾燥、乾燥半湿润地域の合計）の70%、地球の全陸地の25%に相当する（UNEP,1991）。このような砂漠化影響地域の面積だけからすると砂漠化は地球規模の問題ともいえるが、その原因・機構・影響はその地域の自然・社会・経済条件によって多種多様であり、その影響評価・対策も地域ごとに考えられるべきものであるため、地球人類共通の問題としてとらえにくい側面がある。

しかしながら、砂漠化の影響が、大気・陸面相互作用を通して、その地域ばかりでなく、地球全体の気候にまで広がったとき、この問題はわれわれ地球人類が共有する問題になるだろう。このような視点から、（1）では、砂漠化が地域的・広域的な気候に及ぼす影響について概説する。そこで、砂漠化のなかでも気候に影響を及ぼす重要な現象として、地表面状態の改変とそれに伴う大気組成の変化を取り上げる。以下の内容は主に篠田(1997)によっている。

（1）砂漠化の気候変動に対する影響

地表面状態の改変

陸面は地球表面の約30%を占め、大気との間で水、熱、運動量の交換、すなわち、大気・陸面相互作用を行っている。地球表面の残りの70%を占める海洋と比べると、陸面での交換過程は陸面状態に大きく依存している。たとえば、陸面の乾湿によって、蒸発量が変化する。また、陸面を構成する植生・土壌の特性によって、アルベド（日射の反射率）が変化する。

典型的な亜熱帯における熱収支をみると（図 1）、太陽からの短波放射が入射し、その一部分が反射される。反射の割合（アルベド）は先に述べたように陸面状態に左右されている。入射した短波放射から反射したものを差し引いたものが地表面に吸収されるエネルギーである。吸収されたエネルギーは長波放射、顕熱（熱伝導と対流によって輸送される熱）潜熱（おもに水の蒸発・凝結にともない吸収・放出される熱）に分配されて地表面から大気に与えられる。

実際の砂漠化では、アルベドの増加ばかりでなく、土壌水分量・蒸発散量の減少と地表面粗度の減少が同時に起きる。すなわち、砂漠化により植生や土壌が失われると、降った雨が土壌水分として土壌中に保持されず、多くは流出してしまうため、そこで蒸発散（土壌面からの蒸発と植物からの蒸散をあわせたもの）で大気にかえる水蒸気が減少する。そのため、凝結して降ってくる雨も減る。熱収支をみると（図 1b）、蒸発散、すなわち潜熱が減り、その分だけ長波放射と顕熱が増える。また、砂漠化により植生地が裸地化すると、地表面粗度、すなわち地表面の摩擦が減少し、下層大気の収束量、すなわち降水が減少する（図 1c）。

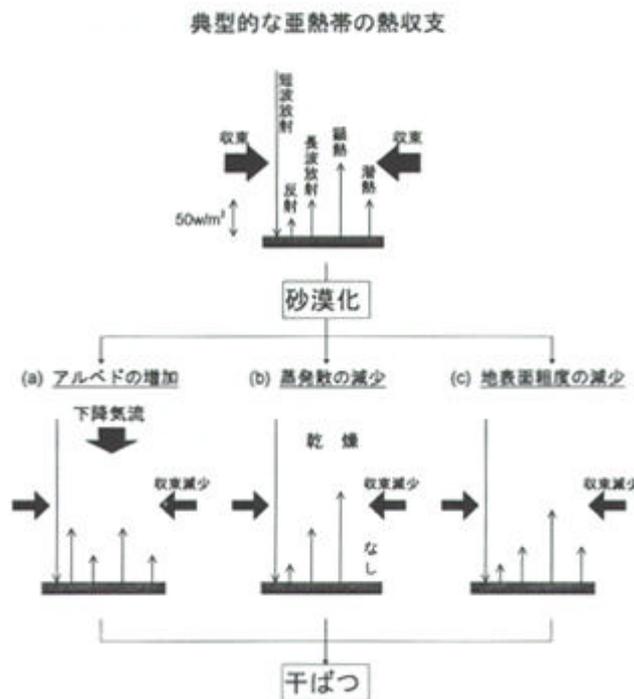


図 1 熱収支・大気循環に及ぼす砂漠化の影響（典型的な亜熱帯の例）。

- (a) アルベドの増加は、短波放射の吸収量を減少させる。
- (b) 蒸発散量の減少は、大気の水蒸気量を減少させる。
- (c) 地表面粗度（摩擦）の減少は、大気の収束量を減少させる。

1) 大気大循環モデルによる数値実験

大気大循環モデルとは、大気状態を気温や風などで表現し、これらの気象要素を物理法則にしたがって時間的に変化させ、大気状態をシミュレートする数値モデルのことである。このモデル大気に、大気下部の境界条件として砂漠化したときの地表面状態を与えたとき、大気がどう応答するかということを調べる感度実験が行われてきた。その先駆的な研究は Charney(1975)によるものである。

Charney は大気大循環モデルを用いて、西アフリカのサヘル地帯(16-20° Nの緯度帯)のアルベドを 0.14 から 0.35 に変化させた数値実験を行った。すると、サヘルではアルベドが増加したため、地表面に吸収される短波放射が減少し、長波放射・顕熱・潜熱として大気に与えられるエネルギーの総量も減少する(図 1a)。その結果、地表面とその上の気柱の全体的な温度が下がるため、上昇気流とそれにともなう下層大気の収束が抑えられ、降雨が減少する。

この数値実験により、降水帯の南下とサヘルにおける降水の減少がシミュレートされた(図 2)。さらに、砂漠化によるアルベドの増加が降水量の減少をもたらし、その結果ますます砂漠化と干ばつが加速されてゆくという機構で、近年におけるサヘル少雨傾向(図 3)を説明できる可能性が示唆された。これ以降のモデル研究によると、砂漠化にともなう土壌水分量・蒸発散量の減少と地表面粗度の減少が、それぞれ降水を減少させる効果をもつこともわかってきた。しかしながら、おもに 1980 年代中頃までに行われた数値実験では、砂漠化にともない同時に変化する地表面状態の各特性(アルベド、土壌水分量・蒸発散量、地表面粗度)がそれぞれ別々の境界条件として、別々に数値実験が行われているという問題が指摘されている(例えば、Sellers, 1992)。

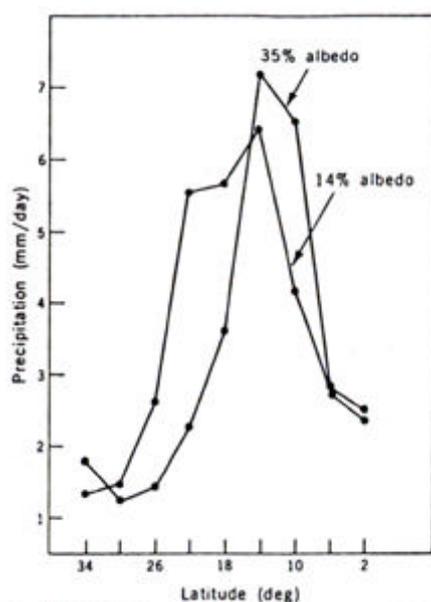


図2 大気大循環モデルによってシミュレートされた降水量の南北断面(サヘル(16-20° N)のアルベドを14%から35%にした場合)(Charney et al.,1975)。

最近ではコンピュータの性能が向上し、数値モデルで大気・陸面過程を現実的に再現できるようになってきた。Xue and Shukla(1993)は、実際の砂漠化現象のように植生・土壌タイプごとに決められた各特性値を同時に変化させた数値実験が行い、Charney の数値実験でも認められたような降水帯の南下をシミュレートした。しかしながら、この数値実験においても、地表面状態の各特性値の変化量・変化地域が、現実のものとは比べて過大評価となっている。したがって、モデル研究では、特定の乾燥地域の砂漠化が実際にどの程度干ばつの発生に影響を及ぼしているのかといった定量的な議論をするにはいたっていないのが現状である。

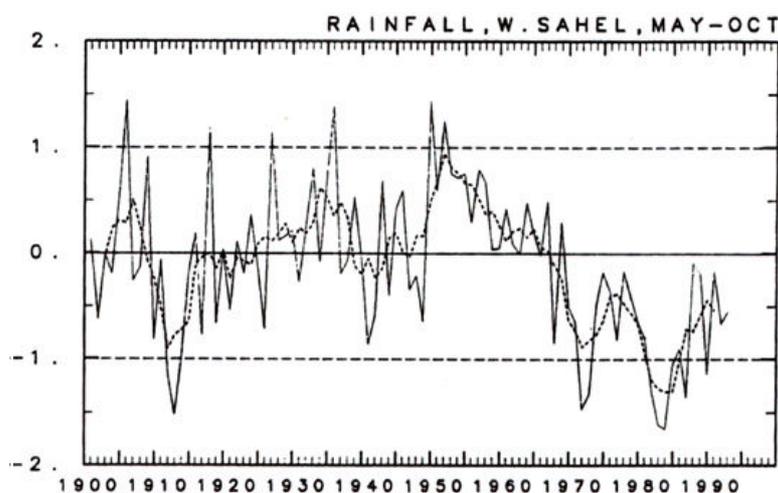


図3 西部サヘルにおける5-10月の降水量偏差(篠田, 1995)。破線は5年の移動平均。1950年代から1980年代中頃まで少雨傾向が認められる。

2) 観測事実

局地スケール(10²km以下)における観測的研究は、現地観測、航空機観測、衛星観測に基づいて行われてきた。航空機・衛星観測により、過放牧により形成された中東、シナイの高アルベド域で低温、一方シナイに隣接するが過放牧の影響が少ないネゲブの低アルベド域では高温になることが示され(Otterman, 1974 など)、図 1a のように高アルベドでは大気への顕熱・潜熱輸送の総量が減少することがわかった(Otterman, 1989)。

一方、合衆国とメキシコの国境に沿って、過放牧の程度が大きいメキシコ側では、合衆国側よりおよそ 0.01 大きいアルベドが観測されているが、降水の数日後にはアルベドの大きいメキシコ側で地表面温度・気温が高くなる(Bryant et al., 1990 など)。同様なアルベドと地表面温度の関係は、アリゾナ(Jackson and Idso, 1975)、チュニジア南部(Wendler and Eaton, 1983)でも観測されている。

これらの結果は Otterman のものと矛盾するようにみえるが、これは合衆国 - メキシコ国境ではシナイ - ネゲブ地域ほど植生の違いによるアルベド差がなく、むしろ、植生の違いによる土壤水分の多少が地表面からの顕熱・潜熱輸送の配分、ひいては、地表面温度・

気温の低高を決めているためであると考えられる。したがって、局地スケールでみると、砂漠化による地表面状態の変化は地域によって多様であり、その気候に対する影響も地域特性を十分に考慮する必要がある。

次に、広域スケール（ 10^3km 以上）における観測的研究は、おもに衛星観測により進められてきた。サヘルにおける広域的な地表面状態の観測は、衛星データが利用可能になった 1970 年前後に始まった。このような解析によると、アルベド (Norton et al., 1979; Courel et al., 1984) と正規化植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index) (Dregne and Tucker, 1988; Tucker et al., 1991 など) は降水量と同調して経年変動していることがわかっている。したがって、地表面状態の年々変動は、長期的に進行する砂漠化によるというよりは、降水量の多寡で決まっているものと考えられる。以上の広域スケールの研究からは、砂漠化が干ばつを発生させるという Charney の仮説を支持するような観測事実は出てきていない。

一方、降水量の緯度分布の詳細な解析によると、今世紀最悪の干ばつに相当する 1980 ~ 1984 年の降水帯には、その重心の緯度が 1951 ~ 1980 年の平均とあまり変わらないのに対し、降水量が全体的に減少している (Shinoda, 1995; Shinoda and Kawamura, 1994; 図 4)。このような実際の降水の南北分布パターンは、降水帯の南偏をシミュレートした Charney やその他の数値実験の結果 (図 2) とは明らかに異なる。この原因として、数値実験で仮定した地表面状態の変化がサヘルだけでなく、それ以南を含めた全域で起こっていること (Gornitz, 1985) あるいは、現実の降水帯の全体的な弱まりが別の要因、たとえば、全球的な大気・海洋変動に起因していること (2.1.1.2 参照) が考えられる。

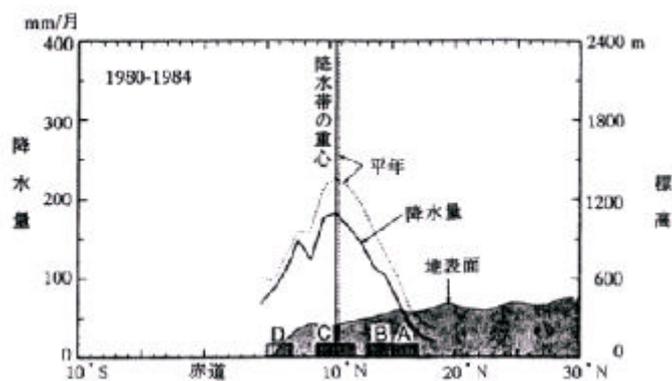


図 4 5° W-5° E における 1980-84 年、7-9 月の降水量の南北断面 (Shinoda, 1995)。点線は 1951-80 年の平均、A, B ゾーンがサヘル。

サヘルにおける植生指標の解析によると (Shinoda and Gamo, 1998)、短い雨季に降水量の多寡によって形成された植生の偏差は乾季になると急激に減衰し翌年 2 月には最小となる (図 5)。さらに、この植生偏差が翌雨季まで引き継がれ、その降水に影響する現象は認められない。したがって、Charney が示唆した砂漠化がサヘル少雨傾向に強く関与している可能性は低いものと考えられる。

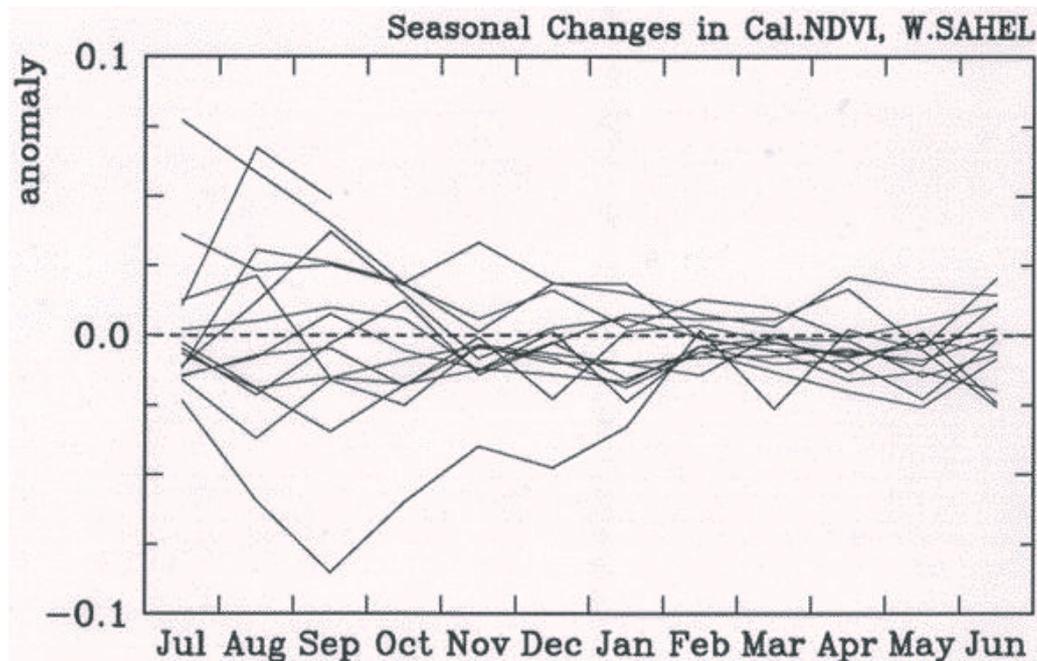


図 5 1981-94 年における西部サヘルの植生指標偏差の季節推移 (Shinoda and Gamo, 1998)。植生指標偏差は雨季 (6-9 月) の後翌年 2 月に最小になる。

大気組成の改変

砂漠化にともなう大気組成の変化とは、バイオマスの燃焼によるエアロゾル(微粒子)・トレースガスの増加とダストの増加があげられる。ダストの主要な生産地域は、乾燥した土壌が季節的に強風にさらされる亜熱帯砂漠と半乾燥・半湿潤地域である。特に干ばつ時には大気に多量のダストが供給される。アフリカから大西洋には毎年 1 億トンのダストが風で運ばれ、全球的な生産量はその 4 倍になるであろう (Williams and Balling, 1994)。砂漠化によって増加すると考えられるダストが地表面と大気のエネルギ-収支に及ぼす影響は複雑であるが、一般的には、ダストの層で温暖化、その下の地表面付近で寒冷化が起こる (Williams and Balling, 1994)。地表面のエネルギ-収支の大きな変化は、ダストの日射吸収によって地表面に入射する短波放射が減少することである。

乾燥地域におけるバイオマスの燃焼は、エアロゾル・トレースガスの主要な放出源である。サバンナの火入れは全球規模でみたとき窒素・炭素・オゾンと同様にススの重要な放出源となっているが、それらの全球的な放出量に対する割合を見積もるのは難しい (Williams and Balling, 1994)。バイオマスの燃焼による気候への影響は、ダストの場合と同様にススの層で温暖化、その下で寒冷化することである。全世界の二酸化炭素の増加量のうち乾燥地域からもたらされるものはその 5 ~ 10 % を占め、そのうち土地荒廃によるものは 5% に近づきつつあると見積もられている (Williams and Balling, 1994)。この割合は多くはないが無視できる量でもない。

(2) 広域的気候変動の干ばつ・砂漠化に対する影響

温室効果気体の増加と干ばつ

気候モデルによると、温室効果気体の増加によって、乾燥地域（特に、中高緯度）で全季節にわたって気温が上昇することが予測されている（IPCC,1990）。温室効果気体の効果に加えて、近年増加している対流圏エーロゾル（化石燃料の燃焼、バイオマスの燃焼などで生じる）の効果を考慮した最近の大気・海洋結合気候モデルでは、温室効果気体の効果のみを扱ったモデル（IPCC, 1990）と比べて観測値との対応がよく、特に北半球中緯度で気温上昇と降水量増加の程度が小さくなる傾向がある（IPCC,1995）。しかしながら、このモデルの結果は半球スケールから大陸スケールでは信頼性が高いが、地域スケールでは不確実性が残っている。それは、様々な気候形成過程（特に、雲、海洋、海氷及び植生）に関わるフィードバックが十分に理解されモデルに組み入れられていないこと、エーロゾルの空間的・時間的分布が十分に把握されていないこと、地域スケールの議論に耐えうるほどモデルの空間解像度が細かくないこと、による。

気候モデルによる気候変化の将来予測は、気温より降水量のほうが信頼度が低い。したがって、降水量の変化の地域的な予測は難しいが、気温上昇で蒸発量も上昇することを考えると、大幅な降水量の増加がない限りは乾燥地域はさらに乾燥することが予想される（Williams and Balling, 1994）。対流圏エーロゾルを考慮した最近のモデルでは、夏季アジアモンスーン地域で降水が減少するかもしれないことが示唆されている（IPCC, 1995）。乾燥地域がさらに乾燥化した場合、風食や塩類化による砂漠化が進行する可能性がある（IPCC WG II, 1995）。また、世界のなかでも乾燥地域の陸上生態系は脆弱であるため、温暖化に対してまず影響を被ることになるであろう。

過去 100 年間の全球的な気温上昇は 0.3 ~ 0.6 °C である（IPCC,1990,1992,1995）。Jones (1994)によると、1901 ~ 1993 年に陸域全体で気温の上昇は 0.44 °C であるのに対して、乾燥地域ではそれより大きい 0.62 °C の気温上昇が認められる。乾燥地域の気温上昇は、中・北部アメリカで最も大きく（約 0.8 °C）、南米で最も小さい（0.3 °C 強）。乾燥地域で大きいこの気温上昇が、温室効果気体によるものか、乾燥地域の砂漠化によるものか（Balling, 1991）あるいは両方であるのか、確固たる証拠はない。

大気-海洋変動(エルニーニョ/南方振動現象など)と干ばつ

大気（たとえば、降水や気温）の変動の原因として、大気自身が自動的に変動している場合もあるが、時間スケールの長い変動になると、大気圏以外からの影響が重要となる。とくに、海洋は地球表面の 70% を占め、大気と比べて熱容量が大きく、運動にかかる時間スケールが長いいため、季節を越えるような時間スケール（数カ月以上）で大気に及ぼす影響は重要である。

たとえば、全球規模の大気と海洋の相互作用のうちで最も重要な現象は、数年の周期をもつエルニーニョ / 南方振動（ENSO）現象である。これは、太平洋地域を中心とする大気・海洋相互作用である。アフリカ東・南部、南アジア、オーストラリア、南米にある熱

帯の半乾燥地域では、数年周期をもつ ENSO 現象がその降水量変動を支配している (Ropelewski and Halpert, 1987)。1976/77 年以降、特に 1989 年以降、エルニ - ニョが頻発・持続するようになり、インドネシア・北東オーストラリアなどで干ばつとなっている (IPCC, 1995)。

一方、サヘルでは ENSO 現象の影響は比較的小さい。IPCC(1995)では、最近の地球温暖化に関連して、サヘルを含む北半球亜熱帯でここ数十年に乾燥化が進んでいると結論づけている。しかし、サヘルに限定すれば、このような 10 年スケールの気候変動を生み出すものとして、最近では海洋の役割が注目されている。すなわち、サヘルの少雨傾向の原因として、地表面状態の変化よりも、全球規模の海面水温の変動が重要であるとする研究が近年増えてきている (IPCC, 1990)。近年の全球的な海面水温の傾向として、赤道南大西洋とインド洋の昇温傾向が認められるが (Parker et al., 1995)、これがサヘルの少雨傾向と関係しているらしい。

篠田 雅人