

特集

地球環境の変容と保全

地球の砂漠化傾向と緑化の課題

Global Desertification and Recovery of Ecosystem

光田 寧*

Yasushi Mitsuta

1. はじめに

地球の砂漠化傾向が現実に進行しつつあると言われている。砂漠と呼ばれる場所にも岩石がゴロゴロと転がっている状態から細かい砂に覆われている状態、草が少しはえている状態などいろいろな種類があり、砂漠化と言っても耕作地が耕作不能となる場合から、緑地に砂に覆われてしまう場合までその定義はいろいろとあり得る。しかし、その定義についての議論を進めることは現在の目的から外れていると思われるので、比較的常識的な考えから現象を物理的に調べてみたいと思う。

また地球の歴史から考えると人類の歴史は短いもので、更に環境の物理的計測がなされているのは最近の数百年に過ぎない。従って、ここでの議論も100年程度の時間スケールの範囲内で考えることしかできない。氷河期から次の氷河期という地質学的な気候変動は、その間も非常にゆっくりとしかも全く解らない原因(太陽活動の変動によると言われていたがはっきりしない)によって進行しているはずであるが、100年ぐらいの単位では大きな変動をもたらすことはない。現在、大きな問題になっているのは人間活動によって砂漠の面積が増大すること、そして人間活動によって気候が変化し砂漠化が進むのではないかということである。しかし、まだまだ我々の自然の理解は充分ではなく、その定量的議論は極めて困難であると言わねばならない。

2. 砂漠化について

先に述べたように砂漠にもいろいろな種類があり、一面の草原でも砂漠と呼ばれている場合もあるので一概に議論を進めるのは無理であるが、乾燥化の極限に近く、利用できない土地を砂漠と言うことにして砂漠

化について考えてみたい。

単純に考えると、ある広さを持つ地域が砂漠化するのには次のような関係が成立するときであると言える。(地域外からの流入量)－

$$\begin{aligned} & (\text{地域外への流出量}) + (\text{降雨量}) - \\ & (\text{蒸発散量}) < 0 \quad (1) \end{aligned}$$

流量は地表および地中水の流量である。この不等式が成立すれば、この地域から水が減少することになるからいつかは乾燥化してしまうことになる。しかし、地下水の動きは正確に知ることはできないし、降雨量には露による分も無視できない、また蒸発散量が半乾燥地でどれくらいであるか正確に測定した結果も知られていない。この式の左辺は比較的小さい量であり、従って概算はできるにしても正負を正確に論じることは、現在では特殊な場合を除いて不可能に近い。

上のように物理的に砂漠化を論ずるのが困難だとすると、そこに植物がどんどん成長する可能性があるかどうかという面から考えることもできる。すなわち現在の気象条件で植物の生産性がどれくらいあるかということから考えるのである。植物が太陽エネルギーを吸収固定した量、すなわち成長した植物の乾燥重量として定義される純生産量が、その場所での人間または動物による植物の収奪量より大きければ、少なくとも植物が無くなってしまわない。すなわち社会的な原因まで考えた砂漠化の条件は次のようになる。

$$\begin{aligned} & (\text{自然植生の純一次生産力}) - \\ & (\text{人類または動物による消費}) < 0 \quad (2) \end{aligned}$$

この人類または動物による収奪量というのが大きな問題で社会的要因によって大きく左右される。過去の人口の少ない時代には植物のある所に移動して緑地の回復を待つとすることができたのであるが、人口の増加と共に人間の生活の場が定着化し、人口増に対応して家畜数を増加させなければならない上に、生活の複雑化と共に食物を調理することが多くなり、燃料として植物が求められるようになってきたので植物の必要

*京都大学防災研究所 教授
〒611 宇治市五ヶ庄

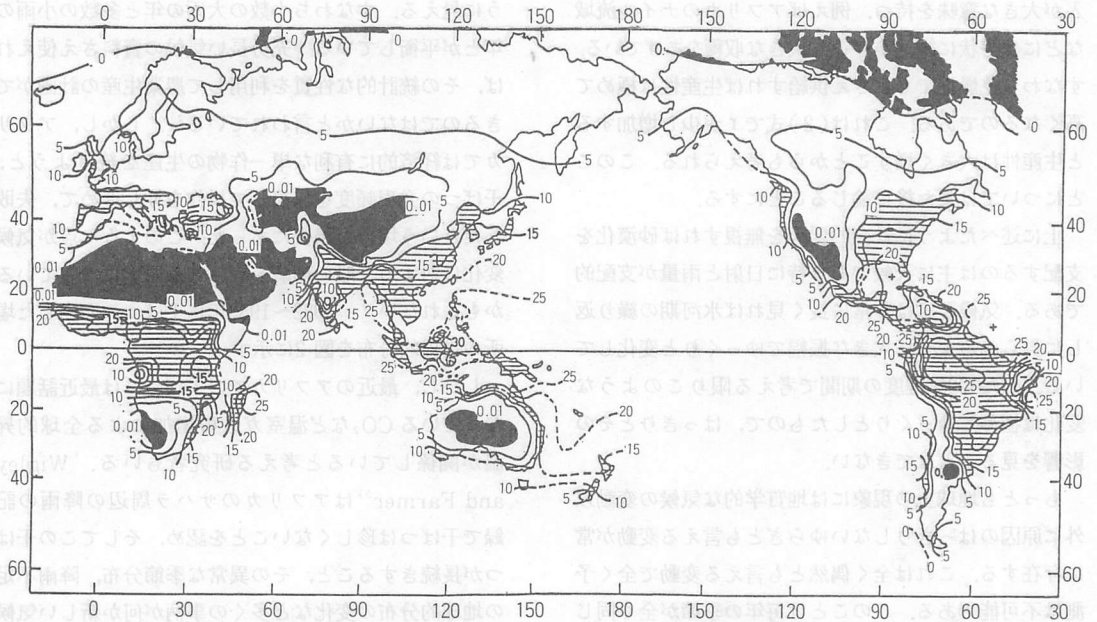


図-1 自然植生の純一次生産性の世界分布 (筑後モデルによる)¹⁾ 単位は乾燥重量トン/ヘクタール・年

量はますます増大している。この様な社会的要因から砂漠化が進むと言うことが近年では多くなっている。林は一度切ってしまうとその回復に非常に時間がかかるので、戦争とか政治的原因による難民の移動などがあると、植物生産性の小さい所では砂漠化が一時に進んでしまうということが大きな問題となっている。国家がある限り適正な人口配分を地球上に求めることは現在のところ無理であり、この様な社会的な原因による砂漠化は簡単には止められない。アフリカにおける現在の砂漠化はこの様な社会的な原因によるものが多い。

一方、自然植生の純一次生産力というのはどれくらいあるのだろうか。IBPなどの国際的な研究計画の結果いろいろなデータが収集され、気候データと共に解析して自然植生の純一次生産力を評価する気候学的方法がいろいろと開発されている。わが国においても農業環境技術研究所の内嶋ら¹⁾によってバイオマス資源の評価が行われている。内嶋らの用いたのは筑後モデルと呼ばれるもので次のように示される。(純一次生産力)=

$$0.29 \times [\exp(-0.216(\text{放射乾燥度})^2)] \times R_n \quad (3)$$

ここで純一次生産力は(乾燥重量トン)/(ヘクタール・年)という単位で示され、放射乾燥度(RDI)は次のように定義される。

$$RDI = R_n / Lr \quad (4)$$

ここで R_n は純放射量(Kcal/cm²)の年合計、 L は蒸発の潜熱(Kcal/cm²)、 r は年間降水量(cm)である。この様に自然生産力は純放射量(地面での入射日射量と赤外線放射量の差)の合計と年間降水量で決定される。この関係式を用いて計算された総生産力の分布を図-1に示す。自然生産力が10t以上あるようなところは高生産力地域であり、図には横線で影が付けられている。現在農業生産が活発に行われているのはすべてこの高生産力地域に含まれている。未開発で生産性の大きいのは熱帯アフリカとアマゾン地域だけである。一方、生産力が0.01tDW/ha.yrというような場所は1ヘクタールで1年に10kgの乾燥植物生産量しかないということであり、およそ放牧地としても用いられないような場所であるから、まず砂漠と考えても良いであろう。図ではこの様な所は黒塗りにしてある。この様な所は緯度20°を中心とした亜熱帯高圧帯と高緯度帯にある。前者は地理学的に砂漠と言われる部分と良く一致している。この値も年々の天候の変化で変動するものであり一定ではなく、ここに示したものは平均値にすぎない。

しかし、この式は乾燥地域を主に考えているものではないので先に述べた(1)式に入っている他地域への水の流出入量は考えず、降った雨はそこで利用される

との考えにたっている。降雨の少ない所ではこの流出入が大きな意味を持つ。例えばアフリカのナイル流域などには帯状に緑地が存在し大きな収穫をあげている。すなわち乾燥地でも水さえ供給すれば生産性は極めて高くなるのである。これは(2)式で r が少し増加すると生産性は大きく増すことから考えられる。このことについてはまた後に論じることにする。

上に述べたように社会的要因を無視すれば砂漠化を支配するのは主に天候であり特に日射と雨量が支配的である。気候要素は非常に長く見れば氷河期の繰り返しの見られるように大きな振幅でゆっくりと変化している。ただ100年程度の期間で考える限りこのような変化は極めてゆっくりとしたもので、はっきりとその影響を見ることはできない。

もっとも地球上の現象には地質学的な気候の変動以外に原因のはっきりしないゆらぎとも言える変動が常に存在する。これは全く偶然とも言える変動で全く予測は不可能である。このことは毎年の季節が全く同じ形で変化していないことから明らかである。このゆらぎの振幅はけっこう大きく、従って何らかの変化が生じて、それがこのような自然のゆらぎによるものかどうかを分離することは短期間の資料だけでは困難である。アフリカのサハラの周辺の各地で近年続発している干ばつもやはり気候のゆらぎの範囲内にあると考える研究者が多い。しかし、現在の乾燥地あるいは

半乾燥地の気候のゆらぎは少し乾燥側に歪んでいるように見える。すなわち小数の大雨の年と多数の小雨の年とが平衡している。充分長い気候の資料さえ使えば、その統計的な性質を利用して農業生産の計画ができるのではないかとされている²⁾。しかし、アフリカでは経済的に有利な単一作物の生産を続けようと、干ばつの発現頻度を無視して耕作を押し進めて、失敗したという場合が過去にあった。このような点が気候変化に対する一般の理解を誤らせる原因になっているかもしれない²⁾。1982~1983年に干ばつの発生した場所の世界的分布を図-2に示す。

しかし、最近のアフリカでの干ばつには最近話題になっているCO₂など温室ガスの増加による全球的昇温が関係していると考えられる研究者もいる。Wigley and Farmer³⁾はアフリカのサハラ周辺の降雨の記録で干ばつは珍しくないことを認め、そしてこの干ばつが長続きすること、その異常な季節分布、降雨不足の地球的分布の変化など多くの事柄が何か新しい気候のメカニズムが働いていることを示しているようにも見えるが、しかし降雨には自然な長周期のゆらぎがありCO₂の働きを統計的に立証することは現在のところ不可能で、CO₂の影響の地域的な特徴を示すことはできないと述べている。

しかし全球的に見た時にはCO₂など温室ガスの増のための気候の変化があると言う人は多い。Hansen

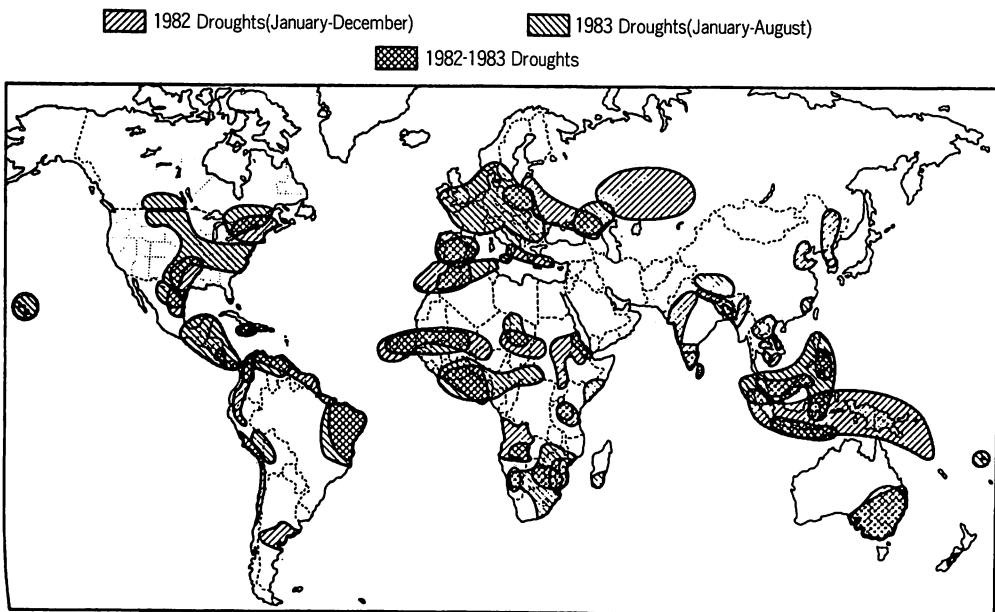


図-2 1982 - 1983年の干ばつの世界分布²⁾

等⁴⁾は全球平均気温の変化と自然な変化のゆらぎの幅との関係および人類活動を原因とした気候変動の予測を図-3のように示している。これによると人類活動が原因であるとして計算した結果と実際の変化が比較

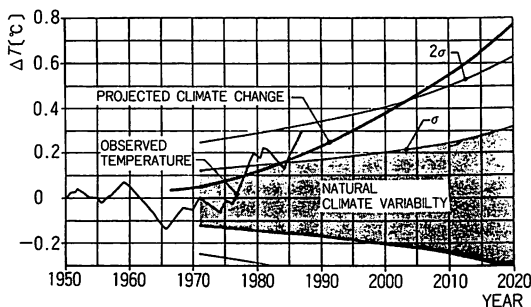


図-3 全球平均気温の自然のゆらぎの幅と人間活動による昇温との関係⁴⁾

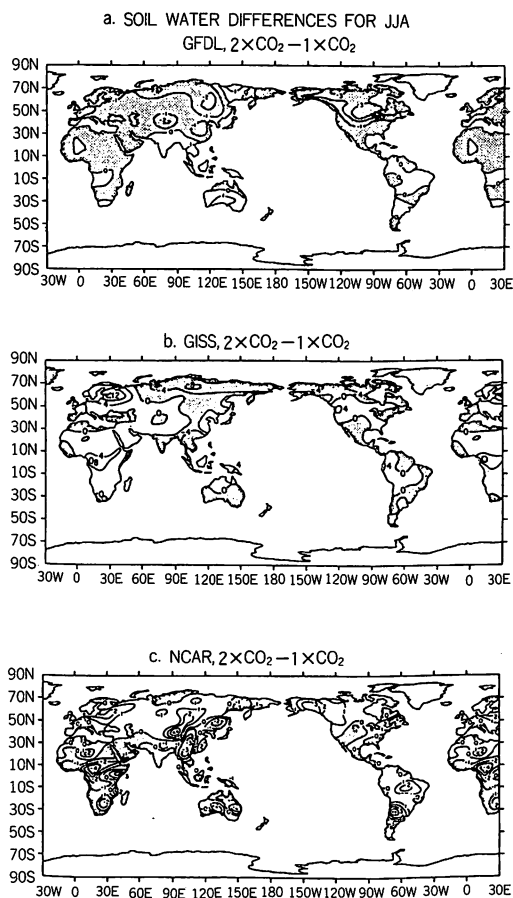


図-4 3つの異なったモデルによる炭酸ガスが現在の2倍になった場合と現在の地表面水分量の差。影の部分は増加を示す⁵⁾

的一致しているように見える。

人類が大気中に放出する温室ガスの影響を知るには天気予報に用いられる全球的な気候モデル(GCM)において炭酸ガスの量を現在の2倍に見たらどのような気候となるかというような実験により行われている。同じようなモデルで行った長期天気予報の精度があまり良くないのは広く知られておりであるから、気候変動の予測の精度もそれ以下であると考えねばならないのは当然である。事実色々な研究者によって試みられた予測では平均的に気温が上昇し特に高緯度で昇温が著しいという点では共通しているが、地表面水分(降雨量-蒸発量)の変化については実験によって異なる結果が出ている。GFDL, GISSおよびNCARのモデルによるCO₂が現在の2倍になった時と現在の地表面水分の差の分布を示したものが図-4(a, b, c)である⁵⁾。これらの結果は差が大きく、特に共通した様相は得られそうにもない。これは降雨および雲の影響に対する考え方に差があるために生じる蒸発予想量の違いによるものであると思われる。このように温室ガスの増加による昇温が砂漠化にどのように働くかははっきりしないというべきであろう。このように現在のところ自然な原因として年々の気候の自然なゆらぎ以上に砂漠化を進めるものは、その疑いは指摘されているにしてもはっきりとしていない。

3. 砂漠の実状

先に乾燥地からの蒸発散がどれくらいであるかは正確にわかっていないということ述べたが、このような問題をはっきりとさせるために現在日本と中国が協力して中国北西部の黒河流域で半乾燥地における地面と大気の相互作用に関する研究を進めている⁶⁾。砂漠を持たない日本にとって乾燥の極にある砂漠においてどのような現象が進行しているかを知る機会は今まで全く無かったが、今回は砂漠の上に観測点を置いて数年にわたって連続して観測を行うことができる最初の機会である。その場所はシルクロードの出発点に近い河西回廊と呼ばれる部分で、南西に5000mほどの高さの祁連山脈が北西から南東に走り、この山にある氷河から融出した水が平地に流出して黒河となり北西流して最後には砂漠の中に消えて行く。流域は砂ばかりの砂漠、岩石ばかりのゴビ、オアシスそして黒河の水を利用して作られたかんがい農地などからなっている。これらの各種の地表面毎に観測点を設け日中共同で観測を行っているのである。このあたりは太古には森林

地帯であったがシルクロードの発展と共に人口の増加や戦争のため木が切られ砂漠化してしまっていた。しかし、近代になって中国が緑地化に努力し、ここのかんがい農地は中国ではもっとも生産性の高い小麦畠となっている。それでもまだ砂漠が残っており黒河の水の有効利用が問題となっている。

ここでの観測は今年から始まったところであるが、本観測に先立って予備観測が行われた。その結果は最近レポートとしてまとめたが、それから主な結果をまとめると砂漠とはどのようなものか解っていただけるであろう。

この河西回廊地域で1年間に山の氷河から流入する水の量は地域の面積で配分すると320mmになり、河川を流出するのは120mmである。そして雨量は年に100mm位あるから先の(1)式では300mm以上蒸発散があればこの地域では水不足となり乾燥化することになる。この地方の気象台で水をはった蒸発皿からの蒸発は年間2000mmであり、その値をそのまま用いれば乾燥化間違いなしとなるように見える。しかし現実の砂の表面からの蒸発散は水面からのものとは全く異なっており、簡単に結論は出せない。

従って、この地域での地表面からの蒸発散量はどれくらいあるのかということが、今回の研究の最大の目標となっているのである。予備的な研究によると、こ

の辺りの砂漠からの蒸発散量は極めて小さいのが実状ではないかと思われる。黒河の流れに沿ったかんがい農地やオアシスでは林があり耕作が行われているので、その中にある気象台では湿度が8月に平均55%位あるがそこから10kmも離れていない近くの砂漠では8月に湿度が平均44%という値を示している。この地域では冬が長く11月から2月まで平均気温が氷点下であるが真冬にかえて1日の中での気温の較差(最高-最低気温)が大きくなる。従って風による侵食以外に水が凍ったり融けたりすることによる岩石の破壊が砂の生成に作用しているように思われる。

また中国側が試験的に行った地表面付近での乱流輸送量の観測によると9月頃の昼間に水蒸気の接地気層中の輸送量が、その量は小さいが下向きになっているという不思議な結果が得られている⁷⁾(図-5参照)。

普通の場合ならばこの時期昼間には熱と同様に水蒸気も地面から大気中に輸送されているのであるが、ここではそうっていない。

一方この砂漠での地下水位も予想外に浅く、山麓の斜面では50m以上の深い所もあるが、河沿いの平地では砂漠の上を流れる川の近くだけあって砂漠でも地下1mぐらいには地下水面があるという所もある。このような所で気温、湿度の分布とそれに連なる地中の地温と水分を試験的に測定して見た結果⁵⁾は図-6のよ

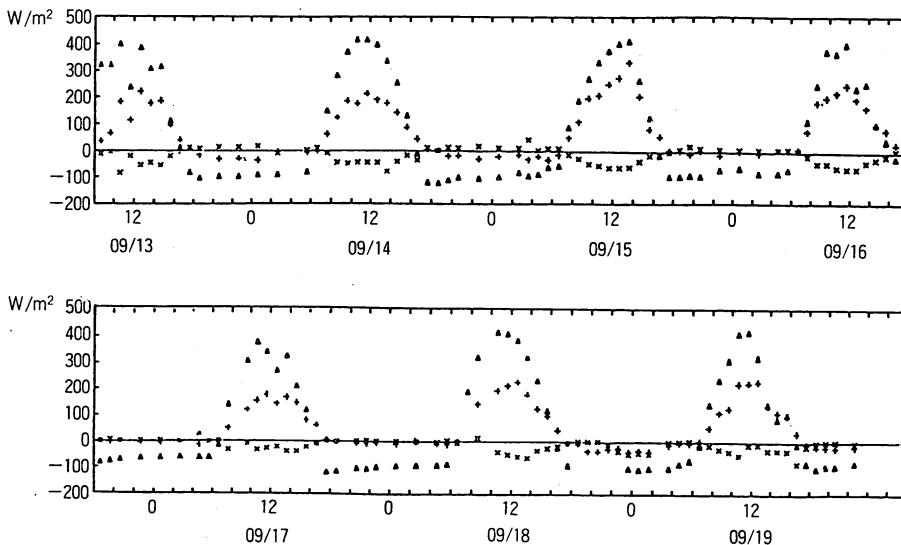


図-5 中国河西回廊ゴビ地帯における1989年9月13日から9月14日の間の地空相互作用の日変化の一例⁷⁾。△は純放射量，+は顕熱の乱流輸送量，×は水蒸気(潜熱)の乱流輸送量。乱流輸送量はいずれも超音波風速計を用いた直接測定の結果で大気中に放出される場合が正。放射量は地面受熱が正。

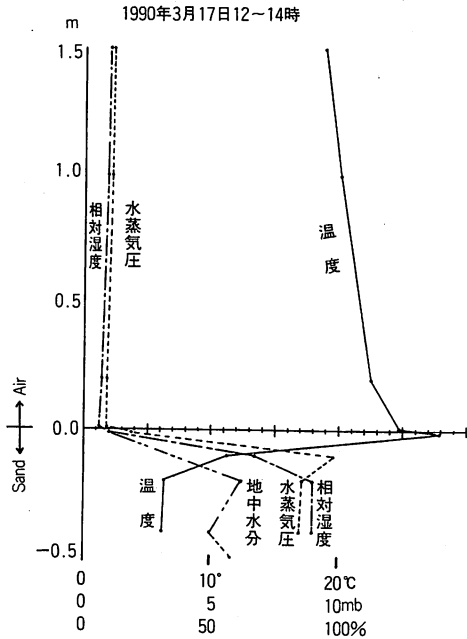


図-6 砂漠における温度、水蒸気圧、相対湿度および地中水分の鉛直分布⁹⁾。地中の水上気圧、相対湿度は砂中の空間での値。地中水分は砂中の水分含有量（乾燥法によって測定）。

うになっていた。この際は砂の中の空間の空気の相対湿度を測定するというを試みた。これによると地下20cmぐらいの相対湿度は100%に近くなり、地中水分もそれに近い分布を示している。このことは地中の水の蒸発が地表ではなく地下20cmぐらいの所で生じていることを示している。そこから上の砂の間には水分は無く水蒸気のみが存在し、砂の粒子の間を拡散し地表に出てくることになる。表面の砂の間では相対湿度は10%ぐらいの少ない値になっている。

空気中での比湿の分布は高さ方向に逆転しており、その勾配から考えればわずかながら下向きの輸送を暗示している。この方の観測は3月の昼間に行われたものであるが、先の9月の観測の結果と一致していることになる。

この様な一見不思議な現象が砂漠で生じているのはどうしてであろうか。現在のところまだ結論は得られていないが、著者の考えているシナリオは次のようなものである。砂漠では昼間地表が非常に高温になり砂は乾燥し蒸発面は地中に移って行くが、地中の温度は低く蒸発は減少する。そして、砂の中の水蒸気は拡散して地表に出て来る。しかし、その速度は遅い。一方、

地表付近の相対湿度は地表が高温になるために非常に小さくなる。そうすると地表近くの大気の未飽和度は大きくなるから、地中および大気中の両方からこれを解消する向きに水蒸気が輸送される。日が沈むと共に地表温度は低下し、境界層は飽和に近づき、水蒸気は大気中で拡散し、また、露が生じ砂の中に戻っていく。このようなサイクルが毎日繰り返されている。

この様に砂漠地帯で生じている自然現象についてはまだ知られていない興味のあるものがあるようである。寒冷の極にある南極に対して、乾燥の極にある砂漠についての科学的な研究が今まであまりにも少なかった。同じ様な研究はフランスの主催でサハラ砂漠でも開始されようとしているとの話も聞くが、研究は始まったばかりである。

4. 緑化の課題

砂漠化してしまった土地を再び緑化しようという試みがいろいろと成されている。増加しつつある地球上の人口を養うためにも何とか砂漠の生産性を向上させることが必要であろう。しかし、その方策は簡単なものではない。まず砂漠化の原因が社会的な原因にある時はその原因を排除すれば少しずつ緑化が進み元に戻る事が考えられるが、多くの場合、人口の社会増が砂漠化の原因となっている場合が多いから簡単にそれを排除することはできそうにない。すなわち燃料として木を切り取る量を少しでも減らすことができれば少しでも状態は良くなるであろうが、それには燃料を太陽熱や電力あるいは石油に切り換える必要がある。またの農作がわずかでも行われている所では無理な換金作物の単一耕作をなるべく止めて、その地方の状態に適した失敗の少ない耕作法を考えねばならない。また家畜の量を牧場の植物生産性に見合うように調整することも必要である。しかし、これらのことは砂漠化が問題となっている発展途上国では無理な注文であると言わざるを得ない。しかし、それでもこの点をもっとも努力されなければならないものである。

もし社会的な原因が改善されて砂漠化の原因が自然的な要因のみに帰されるような場合には、とにかく水を得ることができれば緑化は進む。降雨量を増加させることは、多くの砂漠地帯が大気の大循環から見て高気圧帯にあり、対流の発達が少ない所であるだけに表面を湿らせたとしてもなかなか雨量の増加は期待できない。このことは水蒸気の供給が充分ありそうな海の上でも雨のほとんど降らない部分が高気圧帯には存在

することからも明らかである。それでも中国奥地などでは高い山には雪が降り水河が存在する。その雪解け水は山から流れ出ているからその水を利用することが考えられる。しかし、その様な水の量は有限であり、うまく利用する方法を考えないと、上流で消費してしまっただけで下流の既存の緑地までもなくしてしまう可能性がある。そのためには流域全体としての水利用計画をうまく作って最適の水利用を考えねばならない。

同じことは地下水の利用についても言えることで、地下水の性質を調べた上で有効利用を考えねばならない。米国の砂漠地で行われているような大規模な地下水の利用は地下水が他から供給されている場所ではうまく行くが、化石的な水を利用した場合にはそれを使い果たすと設備は全く無駄になってしまう。

また無理に水を海水から作って利用する方法もあり一部では実行されているが、不注意にかんがいを実行すると、地下水位が上昇しそれと共に地下の塩分が溶け出してかえって耕作不可能になってしまうという場合もある。いずれにしてもいろいろな面から調査して最適の方法を探して行かないとどこでも同じ方法で緑化しようと言うのでは無理が生じることが多い。

5. 結語

たとえばサハラ砂漠に地中海の海水を引き込み蒸発を増やせばサハラ砂漠の気候が変化して緑地化するのではないかというような考えもあるようであるが、先にも述べたとおり大気循環に変化を生じさせるような改革を行わない限り広域でのその成果は期待し難い。

むしろ現在ある地表水あるいは地下水などの水資源の有効利用を考える方が現実的なのではないだろうか。それも国境を越えた理解と協力がなければ進まない。

また最近では赤道雨林帯の木材を切り出した跡地が砂漠化するのではないかとの意見もあるが、植物生産性

の高い地域であれば緑を回復するだけならば簡単であり、自然に回復する力を持っていると言える。しかし、これを経済的あるいは環境保全に有効な形で回復しようとするには自然環境、植物の特性などよく考えて緑地の回復を計らねばならない。

いずれにしても現在は学際的、国際的な基礎的研究が重要であり一時の衝動で行動することはかえって後に問題を残すことになるのではないだろうか。自然を回復、改良するには長い時間が必要であり、その間一定の思想に従って作業が進められなくてはならない。

参考文献

- 1) 内嶋善兵衛・清野 毅; 世界における自然植生の純一次生産力の分布, 農業環境技術研究所, 昭62, p.102
- 2) Glantz, M.H.; Climate Variability, Climate Change and the Development Process in Sub-Saharan Africa, Climate and Development, (Ed. Karpe, Ottew and Trinidad), Springer-Verlag, 1990, pp.173-192
- 3) Wigley, F.M.L. and G. Farmer; Climatic Trends for Tropical Africa, Research Report, Univ. East Anglia, 1985
- 4) Hansen, J.L. and D. Rind; Climate Sensitivity: Analysis of Feed-back Mechanisms, Climate Processes and Climate Sensitivity (Ed. Hanssen and Takahashi), Geophys. Monogr., Ser.29, 1984, pp.130-163
- 5) Schlesinger, M.E. and J.F.B. Mitchell; Climate Model Simulations of the Equilibrium Climate Response to Increased Carbon Dioxide, Rev. Geophys., 25, 1987, pp.760-798
- 6) 光田 寧; 大気-地表相互作用に関する日中共同研究 (HEIFE), 天気, 35巻, 1988, pp.43-47
- 7) Wang, J. and Y. Mitsuta; Peculiar Downward Water Vapor Flux over Gobi Desert, J. Meteor. Soc. Japan, Vol.68, 1990, pp.155-157
- 8) Sahashi, K., O.Tsukamoto and J.Wang; Vertical Distribution of Humidity in Sand, HEIFE Report No.5, 1990, pp.173-192