



砂漠工学が拓く希望

荒廃した土地を緑に変える技術

二酸化炭素による地球温暖化ー。
人口爆発と食糧問題ー。
「砂漠緑化」は、21世紀の人類を脅かす
これら2つの課題への
抜本的な解答となりうる可能性を秘めている。
砂漠緑化には、農学、土木、工学、経営などの
複合的な技術に加え、何より資金が必要とされる。
必然的に、日本に対する国際的な期待の声も高い。
今回は、さまざまな障壁をのりこえて芽を出しつつある
砂漠緑化のテクノロジーをレポートしてみる。

砂漠緑化が現代文明の危機を救う

深刻な砂漠化現象と緑化によって拓ける未来像

陸地の3分の1を占める砂漠を緑化することで、産業の放出する二酸化炭素を固定し、循環させることが可能になるという。しかし現状は、人為的な活動によって、むしろ砂漠化が急激なスピードで進んでいる。まず第一段階として、砂漠化をストップさせるための技術が、そしてさらには既存の砂漠を緑化し生産力を回復させる技術が求められている。

毎年九州と四国に相当する土地が失われている現状

砂漠は地球上の陸地のおよそ3分の1を占める。その砂漠の面積が、ここへ来て急激に広がりつつある。国連統計によれば、毎年約500万～600万haもの土地が砂漠化しているという。日本にあてはめてみると、九州と四国を合わせた広さに相当する土地が、年ごとに失われていっている計算になる。砂漠ではなかったところ、有用な土地だったところが砂漠として荒廃していっているという点、そしてそのスピードが急激である点に大きな危険がひそむ。

現在、大なり小なり砂漠化の危機に頻している土地は、世界の耕作可能な乾燥地域の約70%（約36億ha）におよぶ。それによって影響を受けている人々は約9億人。世界中で6人に1人が砂漠化の問題に直面しているわけである。

砂漠化の要因としては、干魃などの自然災害的なものに加え、過放牧や過耕作、燃料用の薪の伐り過ぎ、焼き畑など、住んでいる人々の生活と密接に関連しているケースも多い。

灌漑や地下水の上昇などによって運ばれてきた塩類（ナトリウム、マグネシウムなど）が溜まり、耕地としては使えなくなってしまう「塩類集積」も農耕地荒廃の大きな要因となっている。天然の水には必ず塩類が含まれているが、乾燥地では、どんどん水分が蒸発するため有効に廃水が行われない土地では、大地に「塩が吹く」ほどになってしまう。不用意な灌漑

は長期的に見れば、命取りになるのである。この点に砂漠緑化の難しさがある。

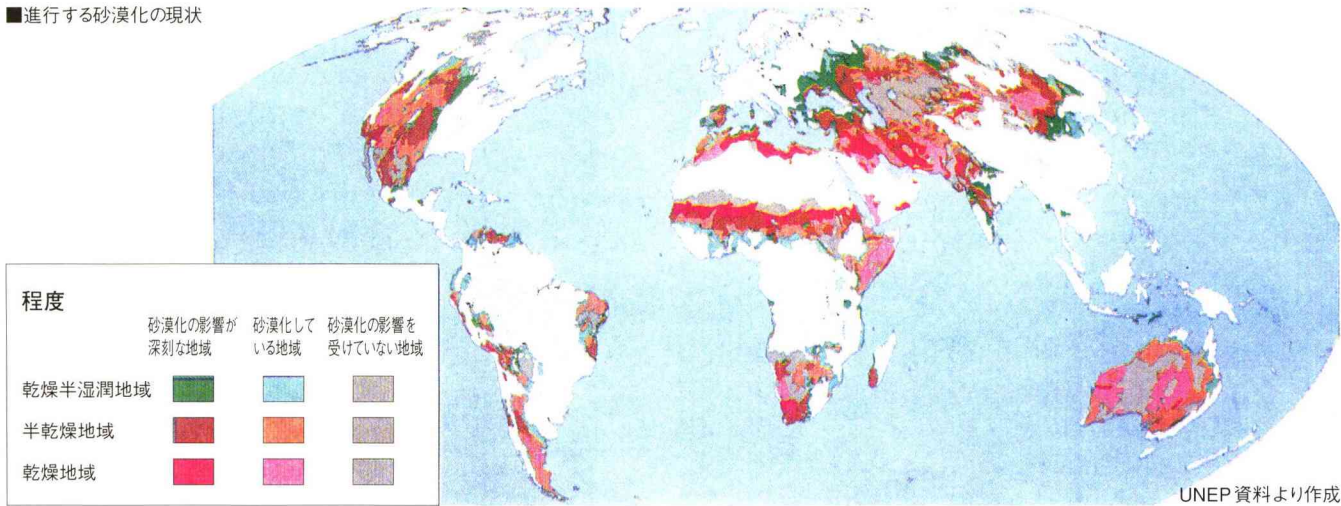
砂漠緑化が二酸化炭素固定の鍵に

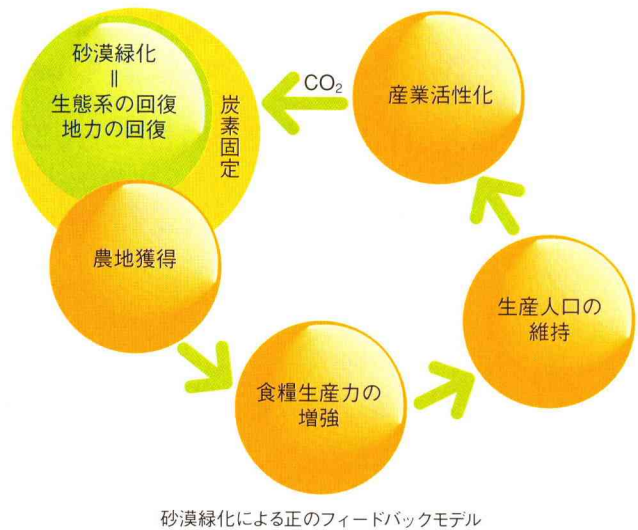
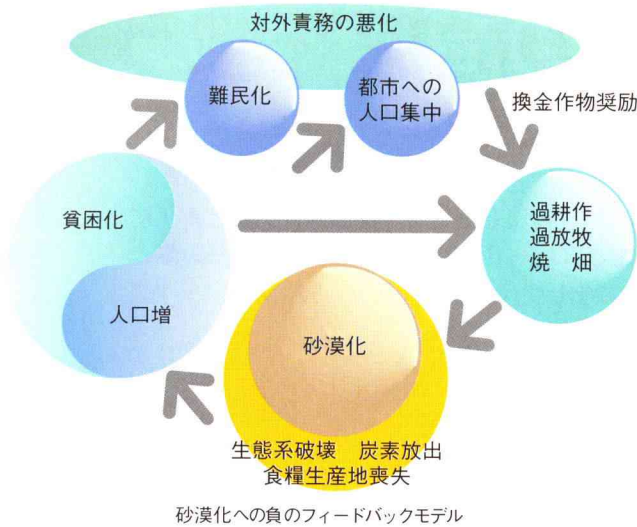
人為的な要因による急激な砂漠化は、いわば破滅的な状況をもたらす。まず何より耕地の荒廃による生産力の喪失。現在の爆発的な人口増加を考える時、この状況は深刻である。しかも人口爆発によって貧困が加速され、食糧確保のための放牧、耕作、焼畑がさらに倍加され、そこに政治・社会的要因が拍車をかける。土地は荒廃し、砂漠化し、放棄される。土地を棄てた人々は、都市へ流れたり、難民となってさまよう



塩類集積によってまっ白になった土壌

■進行する砂漠化の現状





ことになる。

一方で砂漠化は、植物の消失による生態系の破壊と、それによる炭素の放出という側面も持っている。ほとんどの植物が育つことのできない砂漠は、大気中の炭素を固定する機能もない。砂漠化は二酸化炭素を有機物として固定するシステムをも奪っているのだ。先進国の産業が排出する二酸化炭素は、地球温暖化の原因とされてきたが、途上国の開発が進めば、さらに大量の二酸化炭素が大気中に放出されることは必至である。

しかるに、砂漠化を防止し、さらに一步進んで現在の砂漠を緑に変えていくことができれば、食糧問題と二酸化炭素の問題を解決する糸口が見つかるとも考えられる。乾燥地域の土地を食糧生産だけのために、いわば悪い意味での「合理性」のみで酷使すれば、その土地は荒廃し、砂漠に変わってってしまう。しかしたとえば農地の20%で直接の生産をあきらめ、そこに植林をすれば、作物にあたえた水の残り分（本来なら蒸発によって放散する）は、森林に吸収されて、塩類集積を防ぐことができるという。

また100km四方、つまり10,000km²の森林には約1億トンの炭素固定作用がある。この数字からすると、現在世界各国の産業が二酸化炭素の形で毎年排出している約55億トンの炭素を固定するには、100km四方の森林を55つくればよい計算になる。候補地は全陸地の約3分の1もあるのだ。その一部を食料生産に当てることで、深刻な飢餓を回避する手段を得る

ことは可能になるかもしれないのである。

貧困／人口増／砂漠化という現状の負のフィードバックを、砂漠緑化／食料生産／産業の持続力という正のフィードバックへと変換していくこと。それができたとき、技術と人間は、ひとつの勝利を得た、といえなくはないだろう。

歯止めのきかない砂漠化と国際的取組み

国際的な砂漠化防止への取組みとしては、1960年代のアフリカ・サヘル地域での大干魃をきっかけに、UNEP（国連環境計画）による取組みがなされてきたが、砂漠化防止にはなかなか歯止めが効かず、事態はさらに深刻化してきた。砂漠化防止に関する認識が国際的にも低かったことや、当事国の開発計画や地域住民を巻き込んだ取組みがなされてこなかったこと、資金援助が得られなかったこと、そして何よりも砂漠化に関する基礎的な知識とデータが不足していたことなどが背景となっていた。

新たな局面が見えてきたのは1992年の地球サミットでアフリカ諸国を中心とする開発国からの主張によって、砂漠化防止条約策定への要請が出されてからだった。砂漠化防止条約は1994年6月に採択され、これによって法的拘束力をもつ国際的枠組みができあがった。

それを受けて日本でもODAや研究機関、NGOなどによる砂漠化防止への取組みが活発化し、さまざまな企業からも砂漠緑化のための技術的な要素が提案されてきた。しかし、砂漠の広大さ、自然のメカニズムの難しさ、人的・社会的な問題などが障壁となって、当初のような未来志向の楽観的なムードではなくなってきているようだ。とはいえ、困難や挫折の向こうに、新しい希望の芽も見えてきている。日本の技術、経営ノウハウ、緑と共生する思想といったものが、もし世界的な砂漠緑化に貢献しえたとすれば、それは歴史的にも記念されるべき大転換点となるはずである。

砂漠化をめぐる国際的な動き	
1968年～73年	アフリカ・サヘル地域で大干魃
1977年	国連砂漠化防止会議開催
1980年代	砂漠化止まらずアフリカで再び干魃 国連環境計画（UNEP）による砂漠化の実態調査・研究
1992年	地球サミット開催
1994年	砂漠化防止条約採択

砂漠化を抑止するテクノロジー

—この要素技術が、砂漠を緑に変える—

砂漠緑化という局面で、さまざまなジャンルで培われてきた日本のノウハウに期待が寄せられている。今すぐに目覚ましい成果をあげられるという状況ではないが、時間をかけた取組みと、積み重ねによって、将来の希望へとつながる可能性がすでに芽を出しているといえそうだ。要素技術の中から、いくつかをハイライト的に概観してみる。

エネルギー源開発が鍵になる塩水の淡水化技術

砂漠緑化に水資源は不可欠だが、水自体は砂漠でも手に入らないことはない。多くの場所で地下水が手に入るし、地下水が深すぎる場合、地下ダムによって水位を上げるという技術もある。大手ゼネコン等日本の企業5社が共同してアフリカ・ニジェールで行っているサヘル・グリーンベルト計画では、この地下ダム建設の可能性が模索された。

ただし水を得ても、先叙のような塩類集積が問題として残る。コストとエネルギーをかければ、塩水を淡水化する技術自体は難しいものではない。海水や塩水湖から近い場合などでは、淡水化ができれば、その水を使うことも考えられるだろう。しかし食糧さえ十分にゆきわたらない国で、大量の化石エネルギーを用いて真水を得るという発想にはいささか無理があるし、炭素固定の森づくりのために、大量の二酸化炭素を放出するのも得策とはいえない。

淡水化装置として、現在もっとも多く用いられているのは「多段フラッシュ缶」という一種の蒸留装置だが、この装置を



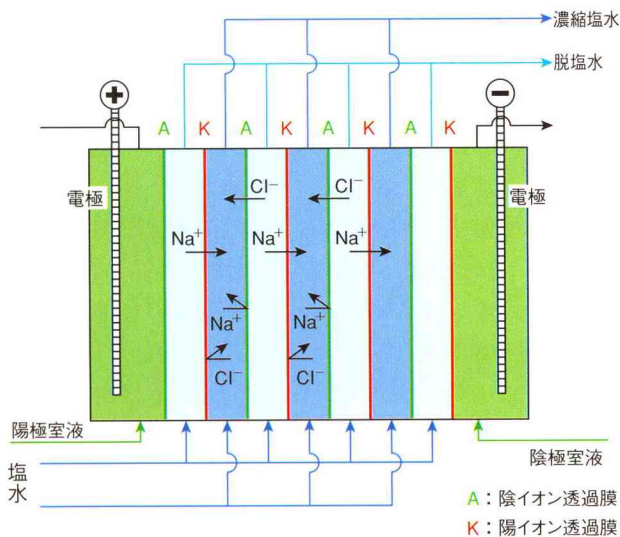
イメージ：タール砂漠

運転するには大量の石油エネルギーが必要となる。そこで石油の代わりに太陽熱集熱装置を用いたものが砂漠緑化用には有望視されている。この種の装置では、すでに1984年には80m³/日の処理能力をもつプラントが作られ、稼働している。

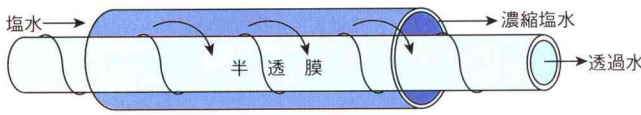
陽イオン透過膜と陰イオン透過膜を交互にめぐらした「電気透析法」による脱塩技術というものもある。これは電圧をかけて濃縮塩水と脱塩水に分離するもので、完全な脱塩はできず、32,000mg/1の濃度の塩水を500mg/1とする程度だが、植物栽培は十分可能となる。

半透膜を用いる「逆浸透法」というものもある。ポンプで塩水を加圧し、半透膜を介して水分子だけを取り出す方法である。これらは電気エネルギーで運転するもので、蒸留装置ほどのエネルギーコストはかからないものの、ともに電力が不可欠である。

そこでこれらの装置でも太陽電池で運転する方法が研究されており、実用化が待たれている。砂漠の強い太陽光をエネルギー源にできれば、ランニングコストはかなりの程度まで抑制できる可能性があるだろう。電気透析法では高温になるほど電気透析室の電気抵抗が低下するため、太陽熱集熱器で熱した温塩水を透析分離するといったノウハウも考案されている。



電気透析法の原理



逆浸透法の原理

電気透析法による装置は現在10m³/日のテストプラントが、また逆浸透膜法については、太陽電池でコンプレッサーやポンプをまかなう研究をするためのものと、膜モジュールに太陽エネルギーを用いるためのテストプラントが、いずれも日本国内で稼働している。

こうした装置の研究とは別に、砂漠で太陽電池を使う場合の実用上の課題として太陽電池面のメンテナンスの問題が予想される。砂漠では昼夜の温度差が激しいため、しばしば夜間に太陽電池面に結露が生じ、そこに砂が付着して発電効率が低下してしまうという現象が現場の研究者からも指摘されている。大面積で使うとなれば、自動運転が可能なメンテナンスロボットなどの周辺技術も同時開発される必要があるかもしれない。

あくまでも空想の域を出ないが、こうしたシステムユニットのようなものが事業ベースで製作されるようになれば、それを用いて砂漠緑化会社が、国際機関などからの委託で砂漠保有国から砂漠地を借り、大きなスケールで緑化事業を行うことも可能になるのではないだろうか。事業の採算は炭素税*と、緑化によって得られる農業経営、観光などによってまかなうことも考えられる。

砂漠の土壌を変える高吸水性樹脂

砂漠は自然に放置された状態では、豊かな生命サイクルを維持できない土地である。したがって、その緑化には、なんらかの形で「技術」の導入が必要となる。しかし難しいのは、不用意な技術が、さらに荒廃を進展させてしまうケースがままありうることだ。例えば水がないところに植物は育たない。そこで灌漑によって水を引く。ごくシンプルな技術的発想である。ところが不用意に水だけを与え続けると、前段でも述べたとおり、水分の蒸発が速い乾燥地域では塩類（ナトリウム・マグネシウムなど）が集積し、とても植物が育てるような土地ではなくなってしまう。どんなに良質の灌漑用水でも数100ppmの塩分を含んでいる。その水が滲水されずに、気化によってのみ外部に排出されるとすれば、表面の土は、蒸発皿で熱せられた食塩水と同じことになるわけだ。実際、この図式によって塩類集積が進み、放棄されてしまった土地は少なくない。そこで与える水を植物の成育に必要な最低限に抑える技術が不可欠になってくる。

水をムダにしないためには、土に保水性を持たせる必要がある。荒廃した土地に保水性を持たせるための素材として注目されているハイテク素材が、高吸水性樹脂である。いわゆる紙



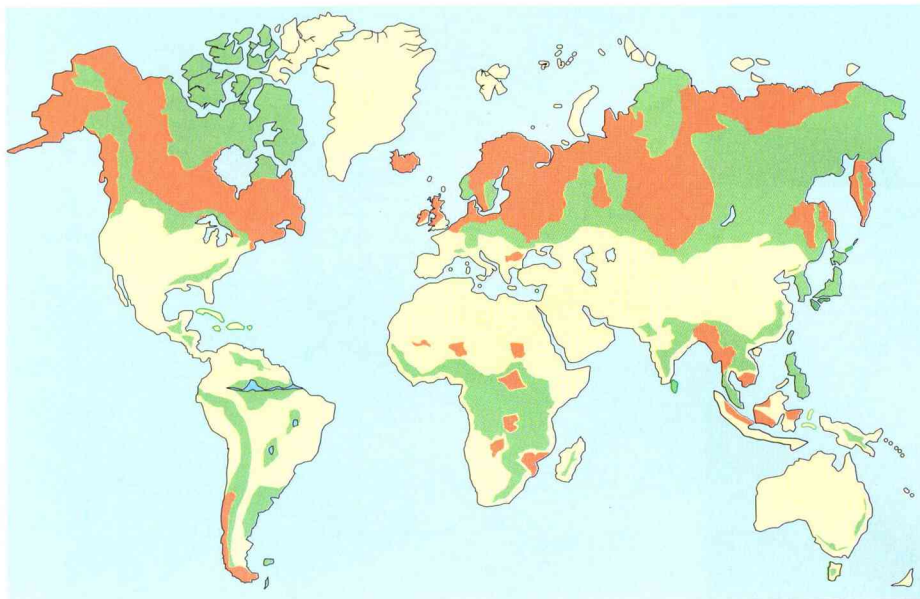
PNVAを用いた栽培実験。従来のアニオン系吸水性樹脂と異り、発芽発根の阻害が無い。左端が対象区。順に120%吸水区、100%吸水区、80%吸水区、60%吸水区、40%吸水区

おむつの素材に使われている高分子素材だ。高吸水性樹脂は自重の数100倍から1000倍もの水を吸収することができるため、これを土や砂に混ぜ込み、スプリンクラーや点滴灌漑によって必要なぎりぎりの水を与えてやることで、かなりの節水効果が得られる。(社)日本沙漠開発協会では、1980年代の終りから1990年代の前半にかけて、エジプトの農業・土地開発省と共同で高吸水性樹脂の保水剤開発のための研究を実施した。「グリーンアース計画」と命名されたこのプロジェクトでは、さまざまなグレードの高吸水性樹脂がテストされ、パイロットプラントも建設された。このプロジェクトによって吸水性樹脂の問題点が見えてきた。たとえば自重の1000倍の吸水性を持つ樹脂も、淡水ではその性能を発揮するものの、砂漠に多い塩分を含んだ水では、吸水性能が極度に低下してしまうことが判明した。また砂漠の強烈な紫外線によって分子が分解されてしまい、長期間の使用には耐えられないことも分かり、新たな素材の開発が課題として残された。

塩水でも吸水可能な高分子素材ができたのは、ごく最近になってからである。昭和電工が開発したPNVAという機能性ポリマーは、従来の高吸水性ポリマーのようなイオン性の吸水メカニズムとは異なる構造で水を取り込むため、塩水でもまったく変わらない吸水性能を発揮する保水剤として使用できるようになった。紫外線にも変化しにくい。吸水性能は自重の30～50倍とそう目覚ましいものではないが、植物の根に対する給水性がある。これまでの高吸水性樹脂では植物の根のほうが浸透圧が高くなってしまうため、保水はしても直接の給水はしにくかった。PNVAは、植物の根に対し、適度の給水性をもつ。植物を使って実験したところ、従来型の高吸水性樹脂を混ぜ込んだ土では、根が樹脂層を避けて伸びていたのに対し、PNVAでは樹脂の層をめざすように根が繁茂した。

こうした結果からも、PNVAは新たな砂漠緑化用の保水剤候補として、「希望の星」と考えられるが、問題はやはり価格

*炭素税
産業活動にはエネルギーの消費と二酸化炭素の放出がともなう。この二酸化炭素が地球温暖化の原因となるが、二酸化炭素を大気中から有機物として地中に固定するには広大な森林面積を必要とする。そこで、二酸化炭素の放出量に応じ、税をかけ、その資金を緑化にあてようという意見が提案されている。



◀ピートの世界的分布図。砂漠の比較的近傍にも供給地があることが分かる

ピートのサンプル



ピート改良地での点滴灌漑によるトウモロコシの栽培実験（エジプト）。作物の根元に必要最低量の水を点滴してやることで塩類集積を最小限にしている

にある。PNVAは来春から販売が開始されるが、価格はキロあたり2,000～4,000円と、紙おむつに使われているものの約10倍のコストがかかる。サヘル地域のような経済力の極度に低下しているところで使うには、従来の樹脂の価格でも十分にコスト高である。紙おむつの需要は従来型高吸水性樹脂のコストダウンにつながったが、PNVAも今後大量需要によって価格が下がっていくことに期待をするしかなさそうだ。たとえばアブダビでは、緑化用の水資源に約700億円/年をあてている。保水剤を用いて使用する水を半分にできたら、350億円が節約できる計算になる。こうしたところからマーケットが開けていけば、あるいは大量需要からコストダウンへという図式も成り立ちうるかもしれない。

PNVAの実用性には今後の検証を待たねばならない部分も残されているが、その成功とコストダウンにぜひ期待したいところである。

天然の有機資源を用いた土壌改良技術

砂漠保有国にはLDC（Least Developed country＝最貧



太陽電池を用いたドイツ製の地下水汲み上げ用ポンプ（エジプト）

国。開発途上国の中でもとくに経済的に貧しい国々）も多く、特にこれらの国々で砂漠化への負のフィードバック（前段参照）が強く働いている傾向は否めない。その意味ではコスト高になりやすい新素材の保水剤を用いるよりも、もっと安価に手に入る天然の素材を用いようという発想もある。

千葉工大の山口達明教授らは、草炭（ピート）を砂漠地の砂や土に混合して土壌を改良する方法を研究している。草炭とは水辺の植物やミズゴケなどが水中に堆積し、嫌気的条件下で化学変化したもので、より一般的には泥炭の名で知られ、園芸用、燃料用などに用いられている。草炭には保水性・保肥性があり、砂漠地に多いアルカリ土壌を中和する働きをもつ。また元来植物が変化したものだけに砂漠地に不足している有機質を補給することができ、植物の育成に効果的な通気性・通水性を確保する働きをする。山口教授らは、この草炭を用いた砂漠緑化の実証研究をエジプトや中国内蒙古で行い、データ収集と利用技術の開発に努めている。

また山口教授はとくに草炭に含まれるフミン酸の脱塩効果に着目している。草炭に含まれるフミン酸は、土壌コロイドに吸着されているナトリウムイオンをとらえ、不溶性フミン酸



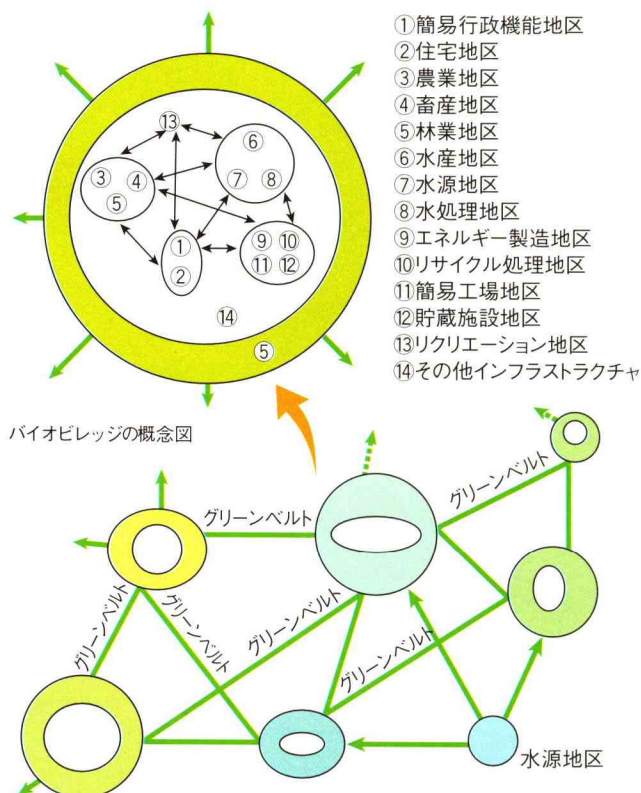
道路の両側の土壌をビートで改良し、植林した例（エジプト）植林直後の例（上）と、青々と育った成熟後の例（下）

ナトリウムとなる。この状態になるとナトリウムは通水によって地下に洗脱されやすくなり、徐々に土中から除かれていく。すなわち、フミン酸は塩類が集積してしまった土壌の脱塩にきわめて効果的だと考えられる。またフミン酸の一部は土中のカルシウムイオンやマグネシウムイオンと結びついて不溶化し、土壌有機物として通気性・通水性に富んだ団粒構造（粒状の土が混在する状態）の形成を助けることが期待される。

草炭は世界中に広く分布しており、埋蔵量は約5,000億トンと推定されている。地表近くにあるため採取しやすい資源だが、現状は世界で見ても2億トンほどが利用されているのみで、むしろ用途開発が求められている資源だ。砂漠地の比較的近くにも産地が分布しており、人工的な素材のような加工工程が不要であるためコスト的に有利であると考えられるのだが、問題は輸送にある。草炭市場は現状、規模が小さく、輸送コストがその価格のほとんどを占めてしまう。本格的な実用のためには、効率的な輸送システムを確保し、輸送コストを下げるが必要になってくると考えられている。

住民の自律性を活かすことで増殖する緑の共同体

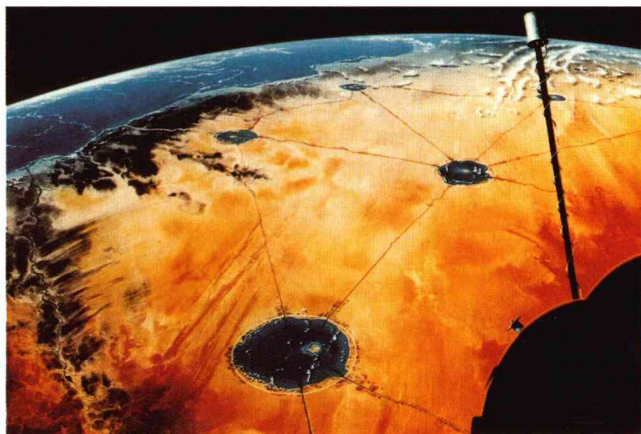
砂漠化を防ぐには、持続可能な生産活動を維持できる「人と社会のシステム」そのものをつくりあげていくべきだという発想もある。一時的に技術を導入してプロジェクトを展開するだけでなく、現地の人々が自らの手で環境調和型の開発ノウ



バイオビレッジプロジェクトに参加した現地の人々（内蒙古）。両サイドに並んでいる木々が溝を掘って植林したプロジェクトの防風・防砂林帯。防砂林帯に囲まれた土地を緑化し利用する

ハウを獲得するのを助け、その方法によって現実に豊かになることができるように技術を供与していくという考え方である。モデルをひとつ作って、豊かになれることが分かってくれば、自然にその方法が定着していくはずである。

日本沙漠学会事務局長の長濱直氏が提案する「バイオビレッジ構想」は、こうした発想にもとづいて環境共生型でしかも技術的なノウハウを調和させた人口数100～数1,000の中規模村落を砂漠化しつつある地に根付かせようというものだ。バイオビレッジの構造としては、まず植林によって村落全体を森林で囲み、中にさまざまな機能ごとの地区を分散させる。これを1単位とし、数10km離して次々とバイオビレッジを設け、ネ



デザートアクアネット構想／イメージ（清水建設）

ットワークしていく。バイオペレッジどうしをつなぐ道の両側には幅数十メートルの単位で植林を行い、グリーンベルトとする。このグリーンベルトに沿って水道、電気、通信回線などのインフラを整備していこうというのである。この構想の利点は、ひとつのビレッジが成功し、人々の生活が豊かになれば、先例に習って次々と細胞分裂的にグリーンベルトが拡大していく可能性が期待できる点にある。ポイントはこのバイオペレッジのソフトウエアを現地の人々に理解させ、自らの手で環境共生型の開発ができるように援助していくということだ。

バイオペレッジのモデルづくりは、1996年から中国内蒙古で始まっており、現実的な運営ノウハウや技術の模索がなされている。モデルプランであるこの「バイオペレッジプロジェクト」では、約500haの土地で放牧家畜よけの防護柵を設け、内側にポプラ、松、柳などの防風・防砂林帯を格子状に植え、格子のはぎまに水田や果樹園、養殖場、経済林などを植え、地場産業を起こしていく。長濱氏はだいたい5年を目安にこのミニモデルの基礎を創りたいとしており、その先は現地の人々がノウハウを引き継いで発展させてくれればという。

巨大な土木建築技術を用いた砂漠緑化技術

砂漠緑化の技術に関しては、巨大な構造物や土木建築を用いるマクロエンジニアリングの視点からも、いくつかの方法論が提案されている。

清水建設の「デザート・アクアネット構想」は内陸部の砂漠地帯に複数の巨大な人造湖を造成し、水路のネットワークでつないだうえで、海水を循環させようというケタはずれのスケールを持つプロジェクトである。内陸部であるがゆえの乾燥と熱風が、巨大な湖面の出現によって緩和され、砂漠の気象が生物にとって棲みやすいものになるといえる。

東急建設が提案する「沙漠ドーム」は、巨大なドームによって砂漠の一部を覆い、外界から遮断した状態で植物を育成するもので、緑化が定着した時点でドームを取り払い、徐々に



沙漠ドーム／イメージ（東急建設）

移動しながら緑地を拡大していくというもの。

こうしたスケールの大きな構想は、砂漠緑化へのはてしないロマンをかきたててくれるものの、いかにせよその建設にかかる莫大な費用をどこからどうして捻出するのかという問題が残る。また現実的な運用ノウハウや、環境への影響調査など、建設以上にクリヤーせねばならない課題は多く、さらにコストがかさむことも予想される。とはいえ、月世界の訪問などというとてもないプロジェクトも、もともとは夢物語のようなところから始まっていることを考えれば、こうした構想は技術者のイメージを刺激するうえでも必要といえるのかもしれない。

文明の後に砂漠を残さないために……

「文明の後には砂漠が残る」という言葉がある。そう思って世界地図を見渡してみると確かに、古代文明の遺跡はどういうわけか砂漠の地に散在している。けっして言葉の上の皮肉などではなく、人間の文明活動は、大地の生命力を消耗させ、砂漠に変えてしまう危険を常に秘めているといえるのかもしれない。インダス文明の衰退は、一説によると都市のレンガを焼くために森林を切り過ぎたことと、人口が増え、環境への過負荷がかかったことが原因ではないかとの説もある。

今、アジアの目覚めは、膨大な数の人々に消費文明をもたらそうとしている。先進諸国の限られた人口が消費生活を楽しむだけでも、地球環境のバランスが大きく崩れようとしている現状を考えるに、60億の人間が現代文明を享受しようという時代、人類は本当に破局を経験せずに、前へ進んでいけるのだろうか。

これまでと同じ文明の思想では、破綻が来ることは間違いなさだろう。砂漠緑化技術は、ある意味でこうした文明の方向性を変えていくためのターニングポイントに位置するものといえるのではないだろうか。

〔取材協力・写真提供：（社）沙漠開発協会、日本沙漠学会、千葉工大・山口研究室、昭和電工(株)、清水建設(株)、東急建設(株)〕