講　座

乾燥地における砂漠緑化と農業開発（その1）

—乾燥地の分布と地域特性—

山本　太平*　松田　昭美*　神近　牧男*

I. 本講座の目的と全体構成

乾燥地は，地球上の全陸地面積の31%近くを占め，それぞれ気象，水資源，土壌，植生条件等が大きく異なり数多くの地域性を有する。ここで乾燥地全域を網羅し共通した内容を取扱うことは困難であるので，本講座は，主に次のような自然環境を有する乾燥地を対象にする。

(1) 内陸の比較的高緯度に分布している乾燥地で，冬期は寒冷な乾燥条件を示す。

(2) 緑化と農業開発プロジェクトを実施するにあたり，ある程度必要な水資源が地下水や河川水の形態で分布している。

(3) 対象地域の大部分は波状形の砂丘群を形成する流砂地であるが，砂丘の丘間には農業開発が可能な半固定，固定砂質地が発達している。

(4) 自然植生には耐寒性や耐干性に強い植物種が多く，年間数 100 mm の降水量を示す半乾燥地に属する。

開発途上国には，上記のような乾燥地が広大な面積で分布し，しかも近年砂漠化が急速に拡大している。自国の経済や技術力だけで砂漠緑化や農業開発プロジェクトを実施し砂漠化を防止するには困難な条件下にある。最近これらの開発途上国では，政府間の経済・技術協力を通じて，わが国の優れた基礎的研究や開発技術を導入し，これらのプロジェクトの推進を図る事例が増えている。わが国の開発技術が対象乾燥地に導入される場合には，本地域に古来から発達した伝統技術を十分考慮して新しい技術との融合を図り，現地還元を図ることが重要になってくる。

本講座は，対象乾燥地の砂漠特性を解析し理解するための基礎的研究方式について明らかにすると同時に，砂漠緑化と農業開発プロジェクトの基礎的資料になる開発技術についてやさしく解説するものである。今後海外プロジェクトの増加が考慮されるので，本講座がこれらのプロジェクトに携わる研究者または技術者の方々の一資料となれば幸いである。なお本講座は6回のシリーズであり，それぞれのテーマは次のとおりである。

(1) 乾燥地の分布と地域特性
(2) 気候特性と環境コントロール技術
(3) 水資源・水消費特性と灌漑技術
(4) 塩類特性とリーチング技術
(5) 流砂特性と砂防技術
(6) 自然植生と緑化技術

本講座の参考資料は，主に中国内蒙古自治区林業科学研究院との日中共同研究「毛烏素砂漠の総合的改善と合理的利用に関する研究」の研究成果から引用しており，本講座を担当する著者グループは，この共同研究における日本側研究グループ（内蒙古砂漠開発研究会）の中から構成されている。

II. 世界における乾燥地の分布

1. 乾燥地と砂漠

乾燥地および砂漠の表現は多分に抽象的で，見方によって基準が異なり，その定義は必ずしも明確ではない。

気候的な観点からは，乾燥地は降水量が少なく乾燥する地域，すなわち「降水量が可能蒸発散量を下回る地域」として取扱われる場合が多い。また，砂漠は，水分不足あるいは寒冷気候により生物の活動がほとんど維持

* 鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設（やまもと　たへい，まつだ　あきよし，かみちか　まきお）

キーワード　乾燥地，農業開発，乾燥気候，砂漠化，緑化

表-1 世界の乾燥地の地域別面積

（単位：km²）

地域名	全面積	半乾燥地		乾燥地		極乾燥地		全乾燥地	
		面積	%	面積	%	面積	%	面積	%
北米	21,280,000	2,340,800	11.0	1,489,600	7.0	425,600	2.0	4,256,000	20.0
中南米	18,637,000	1,602,360	9.5	1,420,400	8.0	355,100	2.0	3,377,860	19.5
アフリカ	29,797,000	5,546,490	18.5	7,325,560	24.5	4,527,240	15.0	17,309,290	58.0
アジア	42,365,000	6,354,750	15.0	8,049,350	19.0	1,270,950	3.0	15,675,050	37.0
オーストラリア	7,703,850	2,234,120	29.0	3,928,960	51.0	0	0	6,163,080	80.0
ヨーロッパ	10,032,100	752,500	7.5	200,500	2.0	0	0	953,000	9.5
計	129,814,950	18,741,020	14.5	22,414,370	17.0	6,578,890	5.0	47,734,280	36.5
その他の陸地 *	23,418,950	0	0	0	0	0	0	0	0
陸地合計	153,233,000	18,741,020	12.2	22,414,370	14.6	6,578,890	4.2	47,734,280	31.0

* グリーンランド，北極，インドネシア，ニュージーランド，南極，大洋州の島等（Hagedorn *et al* 1977）

できない不毛地とも言われるが，一般には高緯度の寒冷砂漠は，乾燥に基づく砂漠と区別される場合が多い。

植被のない砂漠は露岩が多く，機械的風化ならびに水・風の侵食・運搬の営力により，岩石砂漠，礫砂漠，砂砂漠，土漠などが形成されている。

乾燥地は地表面の水収支から見て支出が収入を上回る乾燥域であり，水分の制約のために自然の植生が抑制される地域である。このような地域では，水分の制約程度により，まず高木が，次に低木が抑制されて草原となり，さらにその程度が著しい地域が砂漠地となっている。

また，熱収支から見れば，水分不足のために温度変化が大きく，日中著しい高温乾燥が生じたり，不安定な大気状態により砂あらしが吹き荒れる地域でもある。

年平均降水量が 2000 mm に近い湿潤国日本に住むわれわれから見ると，乾燥地域は非常に稀な限られた地域として考えがちであるが，実際には年降水量が 500 mm 未満の地域は世界陸地の50％を占めている。**表-1** は，以下に述べる C.W. Thornthwaite, P. Meigs らと同様の気候区分法により Hagedorn らが求めた大陸別の乾燥地域の面積を示したものである[1]。これによれば，乾燥地の総面積は全陸地の31％を占めている。

2. 乾燥地の気候区分

世界地図や気候図にみられるように，乾燥地の多くは中緯度高圧帯を中心にして東西方向に広がっている。世界の気候を類型化し，いくつかに区分する試みは古くから行われ，これまでに数多くの気候区分図が作成され，用いられた気候指数も多数にのぼっている。

ここでは，古典的であるが現在でも利用価値の失われていないものも含めて，乾燥地に関するいくつかの気候指数を例示してみよう[2)3)]。

(1) de Martonne (1926) の乾燥指数 (I)

$$I=\frac{p}{t+10} \quad \cdots\cdots(1)$$

I の値が　5以下のとき　砂漠
　　10以上のとき　乾燥農業が可能
　　20まで　潅漑農業
　　30以上のとき　森林形成

ここで，p は年降水量 (mm)，t は年平均気温 (℃) を示す。たとえば，$t=20$℃ とすると，p の値は地表流の起こらない無河流流域で 150 mm 以下，地表流下水が見られる内部河流流域で 300 mm 以下の地方が砂漠に該当する。また，乾燥農業は 300 mm 以上の地域で可能ということになる。

(2) W. Köppen (1931) の乾燥限界 (K)

1年中ほぼ均等に雨が降る地方　：$K=2(t+7)$
主に夏に雨が降る地方　：$K=2(t+14)$
主に冬に雨が降る地方　：$K=2t$

$\cdots\cdots(2)$

ここで，t は年平均気温(℃)を示す。

年降水量が乾燥限界 (K) を下回るところが乾燥地に相当するが，さらに $K/2$ を用いて乾燥地をその程度によって二つに区分した。すなわち，年降水量を p (cm) とすると，

$K>p>K/2$　：ステップ(steppe)
$K/2>p$　：砂漠　(desert)

これらの例に見られるように，古典的な気候指数の多くは降水量と気温の二つの気候要素の組合せから成立っている。このことは見方を変えると，気温は熱エネルギのパラメータであると同時に，地表面からの蒸発散量の代りとして使用されていると見なすことができる。換言すれば，気候指数は地表面の熱収支と水収支がその基礎に置かれていることになる。

さて，地表面から失われる蒸発散量は，大気，地面および地中の三つの条件に支配されるので，仮に気象条件が同じであっても，植生の状態や土壌水分量が相異すれば蒸発散量も当然異なってくる。

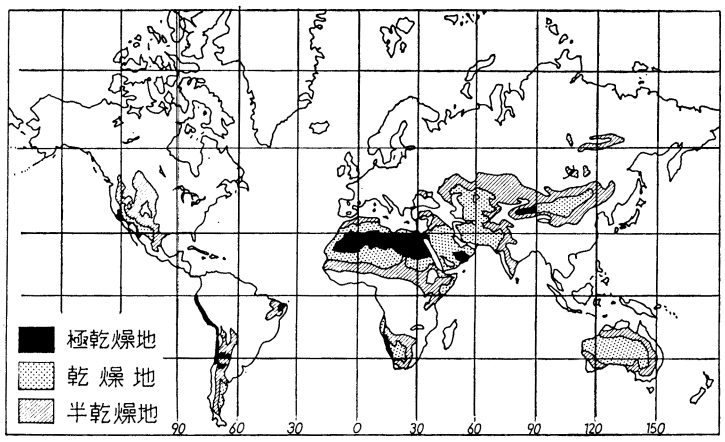

図-1　世界の乾燥地域（Meigs, 1951）

蒸発散量に対する気象条件の影響を明らかにするためにC.W. Thornthwaite (1948)[4)~6)]によって提唱された蒸発散位（potential evapotranspiration）なる概念は，気候区分の分野に対しても画期的な進展をもたらした。よく知られているように蒸発散位は“密に地面を覆った緑草地に十分な水を供給した場合に生ずる蒸発散量”と定義されている。このことは，言い換えれば与えられた気象条件下で得られる最大限の蒸発散量を意味し，前述した可能蒸発散量に相当している。

可能蒸発散量の推定には，Thornthwaiteに代表される経験的方法，Dalton式と熱収支式との組合せによるPenman (1948) 法やBudyko (1959) の方法，さらにはライシメータ（lysimeter）を用いて実験的に推定する方法などが知られている。

これらの方法はいずれも理論的あるいは実験的根拠に基づいて導かれたもので，かなり信頼できる段階に達しているが，場合によっては用いた方法によって大幅に相違することがあり，とくに乾燥地に適用する場合に顕著に現れる。現在，乾燥地の農業開発計画などによく利用されている乾燥地分布図の一つにP.Meigs (1951) によるものがあるが，気候指数の算定にはThornthwaiteが経験的に導いた湿潤指数をその基礎においており，これに温度条件を考慮して区分されたものである[7)8)]（図-1参照）。

III.　乾燥地の気候特性

1.　降雨の季節性と年による変動

地球上の降水量の平均は年間800～1000 mmと見なされている。水の循環系からみれば蒸発も等量のはずである。しかし，実際にはこれらの地域的な配分には偏りがあり甚だ不公平な分布となっている。

とくに降水量は気候要素の中でももっとも変動が激しく，時間的にみても場所的にみても大幅に変化する。気候指数算定の中で降水量の占める比重は乾燥地を対象にする場合はとくに大きい。このことは気候区分作成の段階で当然考慮されているが，気候区分そのものが，1年という周期を基準にしているために季節的な変化のリズムを十分反映させるまでにはいたっていない。

前述したMartonneの乾燥指数に例をとってみよう。

この指数は大陸内部の流域の状態（無河流流域，内部河流流域）を考慮して作成され，農業利用に対する配慮も加えられているので都合がよいが，利用のしかたによっては必ずしも十分でない場合がある。たとえば，飯沼 (1976)[9)] は北半球において，6，7，8月の3カ月間の乾燥指数 (Martonne) が5以下の地域は，夏作物の栽培が不可能であるとして，農業利用上の限界線を示した。これに該当する地域は，Martonneによる砂漠地以外にも広く分布している。さて，乾燥地では雨期と乾期

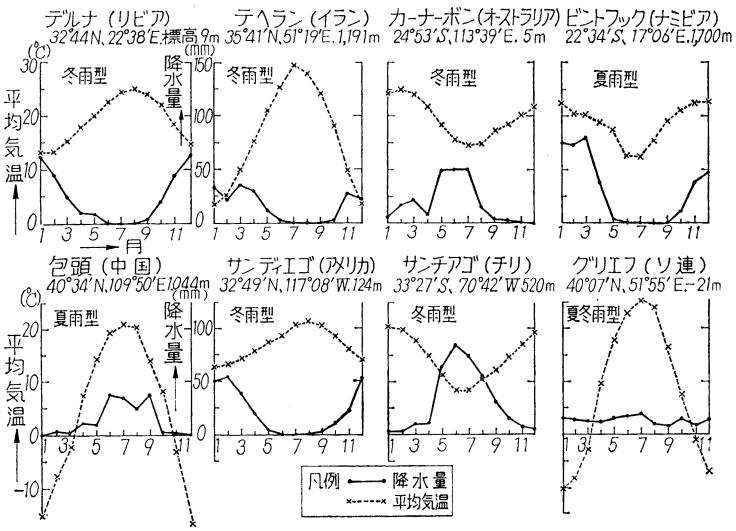

図-2　降雨の季節性[10)~12)]

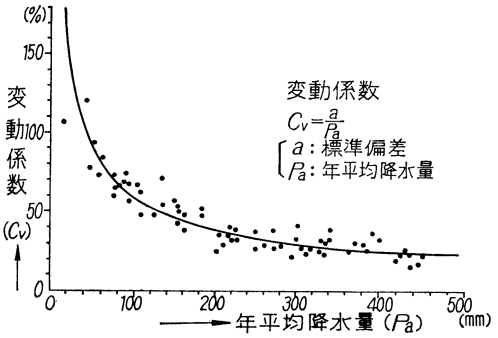

図-3 年降水量の変動係数

の区別がはっきりしているところが多い。前述したKöppenの乾燥限界(K)の算定には，このことが考慮されて，降雨の季節性を三つに区分して，それぞれ異なった重みづけがなされている。世界の乾燥地域からいくつかの地点を選んで降雨の季節性を示したのが**図-2**である。図では，低温となる季節を冬として表示している。

次に，年による降水量の変動も乾燥地ではとくに大きい。**図-3**は中近東，北アフリカの例を示したものである。たとえば，年平均降水量が300 mmのところでは変動幅が40～200%であるのに対し，100 mmのところでは30～350%になる[13]。すなわち，年平均降水量が少なくなるほど変動幅が大きくなる傾向がある。

2. 日射量と気温の変化

すでに述べたように，乾燥地の気象は激しい乾燥と温度変化が大きいことで特徴づけられている。

一般に，地表面近くの気温や地温の変化は，地表面の熱と水の収支によってきまる。よく知られているように，地表面（裸地面）の熱収支式は，

$$S=B+lE+P \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

で与えることができる。ここで，Sは地表面が正味獲得した放射量（純放射量），Bは地中への熱伝導量，lEは蒸発に伴う潜熱伝達量（E：蒸発量，l：蒸発の潜熱），Pは気層との熱交換量（顕熱伝達量）を示す。

気温の変化は直接的には(3)式の顕熱伝達量に比例している。水分量の乏しい乾燥地では，蒸発に伴う潜熱伝達量が小さく，また，地中への熱伝導量も限られているので，与えられた純放射量の大部分が顕熱伝達量によって占められることになる。このために，日中は気温の上昇割合が大きく，反対に夜間は放射冷却によって下降するので日夜の温度差が大である。

さてここで，地表面が獲得する純放射量の大きさは，収入に相当する日射量(R)の大きさと，支出に相当する反射量（aR）および長波による有効放射量(F)の大きさによってきまるので，地表面の放射バランス式は次のように与えられる。

$$S=(1-a)R-F \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

ただし，aはアルベドを示す。

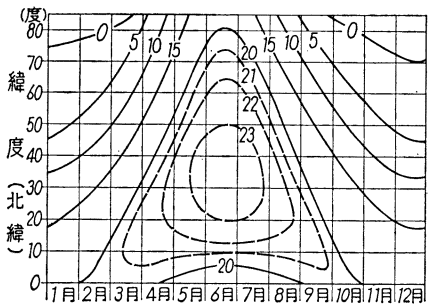

図-4 晴天時の日射量の年変化（kcal·cm^{-2}·month）

図-4は晴天時の日射量を緯度別に示したものであるが，1年間の総量では熱帯地方がもっとも大きく，また，年変化は小さい。緯度が高くなると季節的な変化が大きくなり，暖候期には30～40°N付近に最大域が現れる。乾燥地の多くは，この地域に分布しており，しかも雲量が少なく湿度も低いので，実際の日射量は乾燥地がもっとも大きく，年間を通じてみても湿潤な熱帯地方をはるかに上回る。

一般に，純放射量は日射量にほぼ比例して増大する。しかし，(4)式右辺のアルベドaは，地表面が乾くと大きくなる傾向があり[14]，また，有効放射量Fは地表面の温度に比例して増大し，しかも空気が乾燥しているほど大きくなる傾向がある。

したがって，乾燥地は湿潤地に比べて日射量に対する純放射量の割合が若干小さくなる。しかしながら，乾燥地では日照率がとくに高いので日射量そのものが著しく大きい。これに伴って純放射量の絶対量も大きなものとなっており，その結果，暖候期の気温は著しく上昇する。**図-5**は，以上のような経緯により暖候期の気温が少雨地方ほど高温になることを示したものである。また，

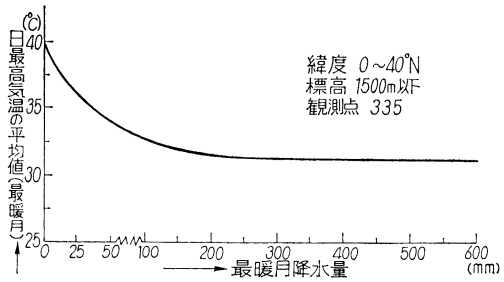

図-5 アジアの最暖月における気温と降水量の関係（松田）

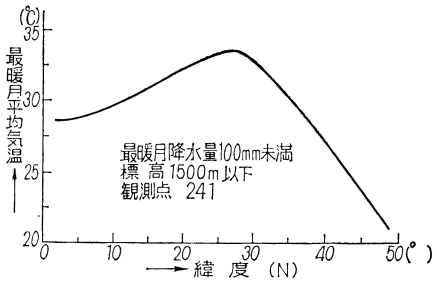

図-6　アジアの最暖月における緯度と気温の関係（松田）

図-6 は，**図-5** の中から月降水量が 100 mm 未満の地点をとり，緯度と気温の関係を表したものである。これらの図からわかるように，世界における気温の高極は中緯度地帯の乾燥地に現れる。

IV.　アジアにおける乾燥地と農業[15]

1.　雨期と乾期

一般的な概念として，年降水量 500 mm 以下のところで農業を営むには，何らかの方法で水を供給するか，あるいは乾燥に耐えうる独特の栽培技術が必要である。**図-7** に見られるように，東アジアにおける年降水量 500 mm 線は，北はカムチャッカから中国南東部を経てインド北西部を通る線で結ばれる。これにより南東側が多雨域でマライ半島，スマトラ，ボルネオ，フィリピンあたりでは3000～5000 mm に達するところもある。この地域が，いわゆるアジアモンスーン地域に相当し，稲作を中心にした農業が営まれている。他方，500 mm線から北西部一帯が乾燥地域である。西アジア，中央アジア，モンゴルがこの地域に含まれている。シベリヤも本地域に含まれるが，気温が非常に低いので，気候的にみてもまた農業的にみても上述した乾燥地とは区別して取扱うほうが都合がよい。

アジアモンスーン域内では，ごく低緯度地帯を除いて降雨が夏期に集中し，雨期と乾期の区別が生じているが，乾燥地においてはこの傾向が一層顕著である。

図-8 は，単純に1年を雨期と乾期に半年づつ2等分できるものと仮定して，各地の雨の降りかたを示したものである。すなわち，熱帯サバンナを含む東アジア一帯は暖候期に相当する5～10月が雨期であり，11～4月の寒候期が乾期に相当している。これに対して中央アジアを南北に縦断する東経70°線付近を境にして，西アジア一帯は，地中海気候の影響を受けて寒候期（11～4月）が雨期に相当し，暖候期（5～10月）が乾期である。

このように東アジアと西アジアでは乾，雨期の季節がちょうど逆になっており，気温と降水量の組合せが基本になる農業では留意すべき特徴の一つである。

乾燥地では雨期が作物期間である。たとえば，1年生の種子作物を対象にする場合，生育期間が3～6カ月であることを考慮すれば，1年を単位にした一般の気候図

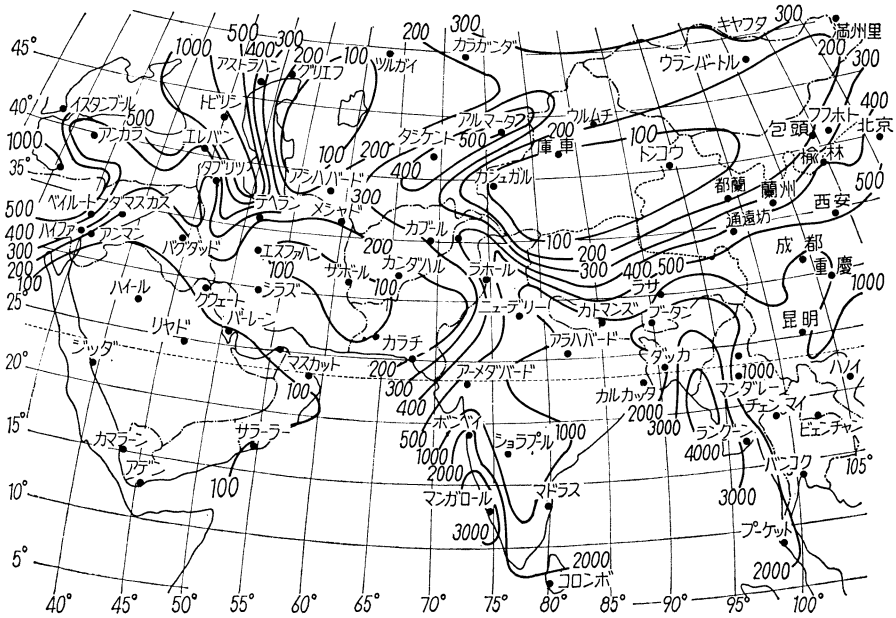

図-7　年降水量の分布[11]（単位：mm）

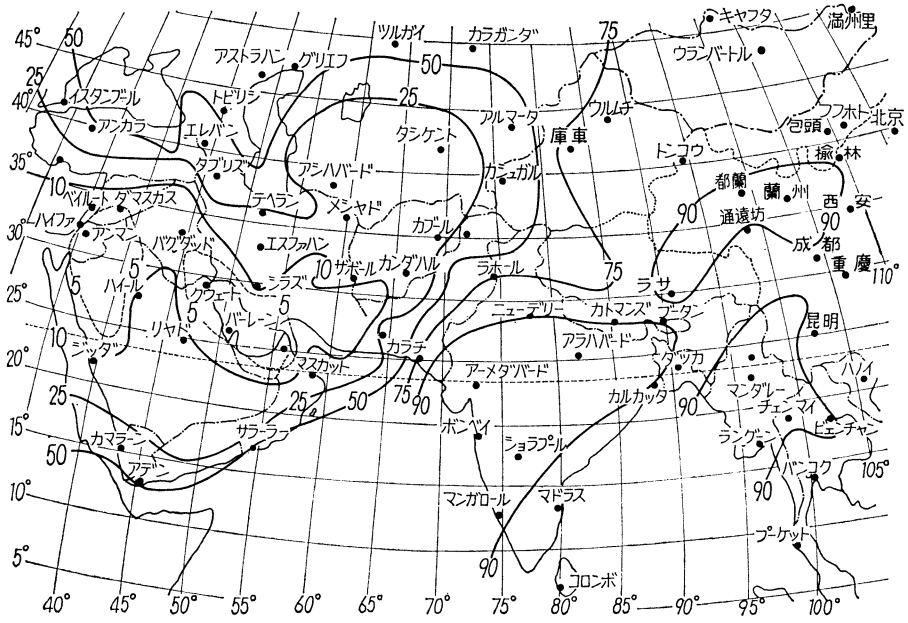

図-8 夏雨率の分布（単位：%）〔年降水量に対する暖候期（5～10月）降水量の割合〕（松田）

だけでは不十分なことが多い。

2. 乾燥地農業の気候的類型

乾燥地に供給される水源は大別すると，直接的に与えられる降水量と地域外から輸送される水である。前者は乾期と雨期の繰返しで間欠的であり，絶対量が少なく，しかも不安定である。後者はナイル河や黄河のように天与の恩恵をもたらしているが，その範囲は限定されており，局地的である。

乾燥地で古くから行われている農業の基本的な形態は，自然の草地を対象にした牧畜（遊牧，放牧），降雨のみに依存したドライファーミング（降雨依存型農業）およびオアシス農業（潅漑農業）に大別される[16]。

自然草地を利用した牧畜は，主として半乾燥地帯のサバンナやステップの草原地帯で営まれている。ここでの永続的な牧畜は，植生の許容量と家畜の飼養頭数のバランスを守ることによって維持されてきたものである。

ドライファーミングは年降水量 200～500 mm 程度のところで多くみられるが，津野のイランにおける現地調査によれば，年降水量 250 mm 以下のところでは成立し難いという[17]。本農業形態は，土壌水分保持のために休耕期間を必要とするが，雨の降りかたが気まぐれであるため，とくに降水量が少ない年には収穫皆無のこともあり，非常に不安定である。

次に潅漑農業は，水の供給が可能なところではもっとも生産力の高い有用な農法である。しかし，多量の水を必要とするために，その地域は限定される。しかも乾燥地における潅漑農業の避け難い宿命は，塩類の集積による耕地の破壊である。潅漑のみでなく排水を考慮した合理的な水利用技術の確立が望まれるゆえんである。

さてここで，便宜上作物期間を半年と見なし，雨の降りかたを基準にしてアジアにおける乾燥地農業地帯の地域的類型化を試みたのが **図-9,10** である。ここで，**図-9** の等値線は，類型名の下に付した括弧内の暖候期（5～10月），寒候期（11～4月）の半年降水量に基づいている。それぞれの類型の特徴は次のとおりである。

(1) **類型［I］：西アジア型** 寒候期が雨期で作物期間である。高緯度地帯および高地を除けば，寒候期といえども温度条件にはさほど支障がない。しかし，全般的に降水量が少なく，しかも夏季は著しく高温乾燥で，アジアにおける典型的な乾燥地農業地帯である。（代表地点：ケルマンシャー，イラン）

(2) **類型［II］：東アジア内陸型** 高緯度内陸地帯で海抜高度が高く温度条件に恵まれていないため，栽培可能期間は短い。しかし，雨期が暖候期になっているのが幸いしている。また，盛夏に降雨が集中しているのも特徴的である。（代表地点：楡林，中国）

(3) **類型［III］：東南アジア型** インド，ビルマ，タイを中心にした地域で，年降水量は比較的多く，インドの一部を除いては乾燥地と見なされていないが，乾期，雨期の区別が顕著な地域である。作物期間は雨期（暖候

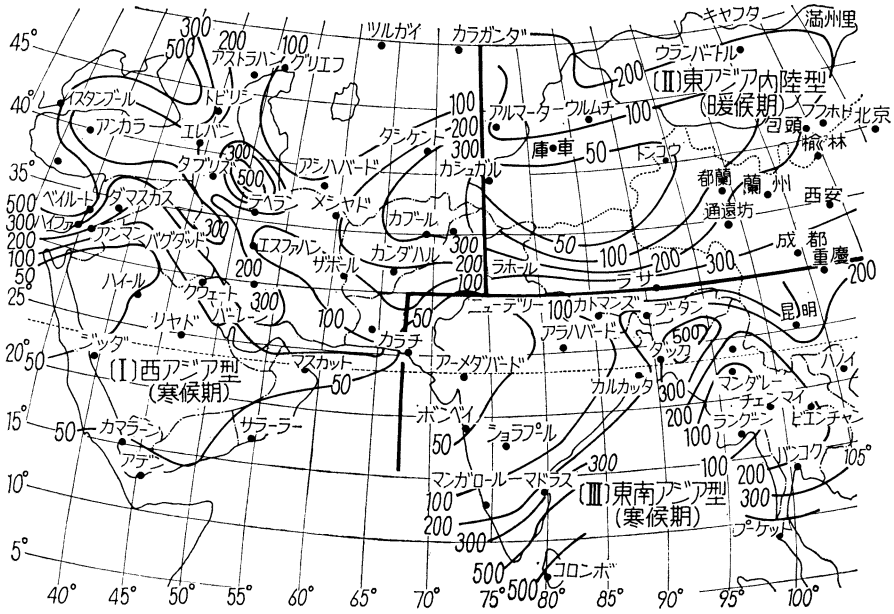

図-9　乾燥地農業の気候的類型[11]（等値線の数字は寒候期または暖候期の半年間降水量：mm）

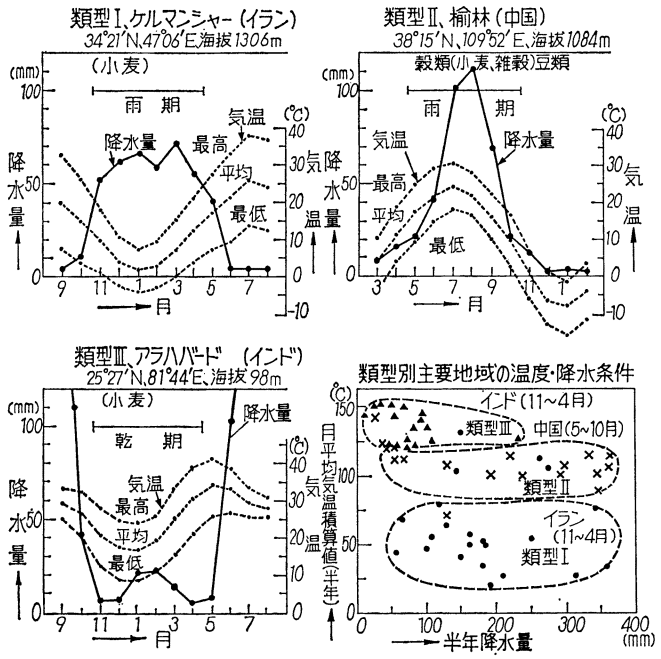

図-10　類型別代表地点の降水パターンと気温

期）が中心であるが，低緯度のため寒候期（乾期）においても温度条件には恵まれている。しかし，乾燥が激しく技術的には乾燥地に準じた栽培法が必要であるため，一つの類型として加えたものである。この地域では暖候期に多量の水が蓄積されるので，水の合理的利用技術が確立されれば他の二つの類型に比べて有利である。（代表地点：アラハバード，インド）

アジアにおける乾燥地の農業開発を行うためには，対象地について上述のような気候的な類型を認識すると同時に，制限因子になっている水の限界を明らかにすること，およびその許容の範囲内での合理的な利用法を確立することが必要である。

V.　乾燥地の砂漠化と緑化・農業開発

1.　砂漠化の機構

現在乾燥地においては砂漠化が大きな問題になっている。本講座は，砂漠化を対象として取上げるものではないが，緑化・農業開発を実施するうえにおいて砂漠化の問題を若干整理しておく必要があると考える。

砂漠化（desertification）という言葉は，1977年の第１回国連砂漠化会議から用いられ始めた用語であり[18]，E. Eckholm らによれば，土地が農業あるいは人間の居住に不適当になる，いろいろな生態的変化を含んだ言葉であり広範囲な融通性をもたせて定義された言葉である[19]，とされている。世界の乾燥地の耕地面積は，砂漠緑化や農業開発によって

表-2　乾燥地の地域別，土地利用別砂漠化面積比率[16]

（単位：百万 ha）

地域	放牧草地		降雨依存農地		潅漑農地	
	全面積	砂漠化比率	全面積	砂漠化比率	全面積	砂漠化比率
アフリカ	710	—	162	—	6.0	—
スーダン・サヘル	380	90	90	70	2.8	20
南アフリカ	250	80	52	65	2.0	20
地中海アフリカ	80	80	20	15	1.2	30
アジア	816	—	213	—	84.5	—
西アジア	116	85	18	75	7.5	15
南アジア	150	80	150	65	59.0	25
ソ連アジア	250	60	40	30	8.0	15
中国・蒙古	300	70	5	50	10.0	10
オーストラリア	450	30	39	20	1.6	15
地中海ヨーロッパ	30	55	40	25	6.4	20
南米・メキシコ	250	75	31	65	12.0	10
北米	300	50	85	25	20.0	20
計	2556	—	570	—	130.5	—

（UNEP 1984）

増加する反面，砂漠化によって減少している。UNEP（国連環境計画）においては，世界の乾燥地における，砂漠化面積の比率を **表-2** のように表している[16]。砂漠化現象は，主として乾燥地に生じやすく，年間580万haにも達するといわれる。この砂漠化は土地利用別によって発生面積が異なっており，580万haのうち，牧草地が320万ha，降雨依存農地が250万ha，潅漑農地が13万ha程度となっている[16]。

牧草地の砂漠化は，主として人口増加に伴う過放牧，農地転換による植生域の減少，等によるものである。降雨依存農地の場合には，休閑期における耕地の風食や水食作用，過耕作による耕地の肥沃度低下と作付放棄，放牧家畜の踏み固めに伴う土壌の構造悪化と保水性低下，焼畑耕作による植生域の減少と耕地の肥沃度低下および作付放棄，等があげられる。潅漑農地の場合には，過剰潅漑の地下水位上昇に伴う湿害と塩類集積害，浅層地下水の潅漑利用に伴う土壌塩類化と地下水の二次的塩類化，等があげられる。

塩類集積に伴う砂漠化は，雨の多いわが国においてあまり類のみられない現象である。塩類集積圃場においては一般に塩類の除去（リーチング）が行われる。しかし，不透水性土壌のリーチング技術がまだ十分確立されていないので，塩類化圃場は放棄せざるを得ない重大な事態に至る。このような塩類砂漠地域は，大河川の河口域を中心にした沖積大平原で進行している砂漠化現象であり[16][18][20]，今後の重要な検討課題として考えられる。

2.　砂漠化の一事例

ここでは，1950年代になって砂漠化が急速に進行した中国毛烏素砂漠の砂漠化機構の事例について取上げてみた（**図-11** 参照）[21]。中国の砂漠地帯は，北緯37～47°の間に分布し，総面積127万 km²，中国陸地総面積の約13％を占めている。このうち，毛烏素砂漠は約400万haを示し，内蒙古自治区，陝西省，寧夏回族自治区にわたって分布している。本砂漠は，他の砂漠に比べて，砂丘高が10～30 m とあまり急峻でなくしかも地下水源に恵まれているので，中国における砂漠緑化と農業開発の可能性を有する地域として高く評価されている。

毛烏素砂漠の面積は，解放初期にわずか105万haであったが，1974年には350万 ha まで拡大し砂漠化が急速に進行したといわれる。

本地域が砂漠化した経過は概略以下のとおりである。まず，伏線として，気象，水資源，土壌などを主要因とする自然環境要因がある。

気象要因は，年降水量がわずか340 mm 程度であるうえ年変動が大きく，干ばつ年の降水量はさらに減少すること，北～北西の風速および降雨強度が大きく土壌の風食，水食が著しいことがあげられる。

水資源要因は，地下水源の全体的な開発，利用組織が十分でないので地下水の一部は利用されないまま南東部の河川に流去していること，およびこの地下水が塩類化している場合には塩類砂漠もみられることである。

土壌要因としては，地盤がぜい弱な砂岩層で構成されている場合が多いので，風食，水食作用で砂状化しやすいことがあげられる。

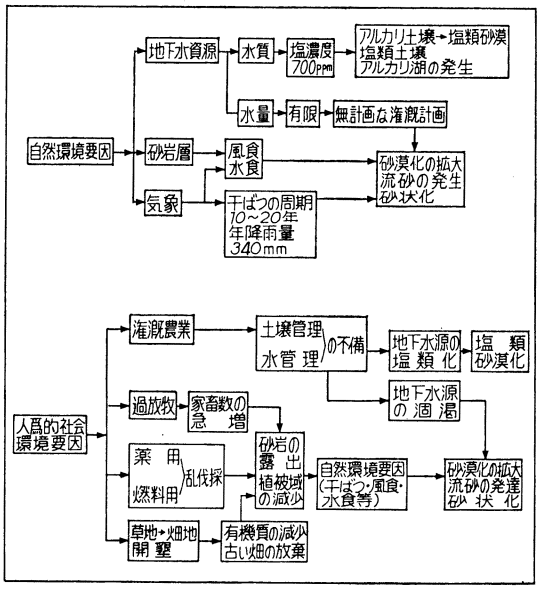

図-11　毛烏素砂漠における砂漠化現象の概要とその機構[22]

一方，自然環境要因に対する要因として人為的な社会環境要因があり，住民の土地利用上の問題として植被の乱伐，過放牧，無計画な開墾，潅漑に伴う水管理や土壌管理の不備が挙げられる。すなわち，自然植生が燃料用や薬（甘草，枸杞等）用に乱伐されたこと，本地域への人口流入増に伴って家畜の種類と頭数が急増した結果，蚕食された草地が増大したこと，草地を畑地に開墾し土壌の肥沃度が低下すると，この土地を放棄するパターンを繰返したこと，等である。

解放後の砂漠化の直接的な引金になったのは，本地域への人口の流入増加に伴う人為的なものと考えられる。上述のような人為的社会環境要因による加圧の結果，植被域の減少，砂岩層の露出が生じ，これに水食，風食等の自然環境要因が相乗的に作用して砂漠化の度合が一層進行することになる。さらに，無計画な水管理と土壌管理の結果，地下水源の涸渇と土壌の塩類化，ひいては地下水の二次的塩類化が生じ塩類砂漠化へ進行することが推測される。

3. 緑化と農業開発の課題

砂漠化は，生物生態系における生産者，消費者，分解者の間の物質循環サイクルのバランスが壊れることから始まる現象といわれる[22]。このバランスを壊す要因としては，種々の自然環境要因と社会環境要因があるが，どちらかといえば社会環境要因の方が大きいようである。

生物生態系の物質循環サイクルがバランスしている対象地に対して，砂漠緑化，農業開発プロジェクトを実施した結果，このバランスが壊れ砂漠化へ逆行してしまい，開発前よりも砂漠面積が増大したり，水資源の涸渇や深刻な塩類問題まで招いてしまったという事例がみられる。

砂漠開発に携わる研究者や技術者が十分考慮せねばならないことは，砂漠化へ逆行しないようにして，砂漠緑化・農業開発プロジェクトを調査，計画，実施することである。このためには，対象地域に対して，現在砂漠化した状態から開発後の人間社会建設までの長期的構想を展望した開発計画が不可欠になると思われる。

次に砂漠化へ逆行しないようにこれらのプロジェクトを推進するに必要と思われる留意事項を列挙してみる。

(1) 対象地域における従来の生物生態系の物質循環サイクルを明らかにすると同時に，開発後予測される新しい物質循環について検討する。

(2) 砂漠化の進展について常時モニタリングできるシステムを設置し，動態解析できる体制を確立する。

(3) 乾燥地開発に不可欠なものは水資源である。対象地域の水資源量（河川，地下水，降雨等）と水消費量（緑化植物，作物等）とについて検討し，それらの間の需給バランスから対象地域の面積や植物の種類等を決定することが重要になる。

(4) 乾燥地開発においては，水資源に関連して塩類問題が重要になる。潅漑水路と排水路の系統を明確に分離し水資源の二次的塩類化を防止すると同時に，圃場におけるリーチング方式を確立する。

(5) 対象地域において，開発後のモデル的な集落や総合社会を想定し，対象地域の将来像と砂漠化との関連性を考慮した長期的予測を行うと同時に，二，三のモデル的実証試験が必要と思われる。

(6) 開発後の人間社会においては，砂漠化に逆行しないように，一集落当りの土地利用形態（堆砂地，防風林地，草地，樹園地，集落地）と土地利用構造（各地目の面積と配置等）を検討することが必要である。

(7) エネルギの過剰消費は砂漠化につながることが明らかである。対象地域の永続的な自然エネルギ（風，太陽放射，水等）の賦存量を明らかにすると同時に，それらの利用方式を検討することが必要である。

(8) 新しい開発技術は，一般に対象地域（対象国）で賄えないエネルギ利用形態，機器構成材料，適用知識などを有する。開発技術と同時にこれらを総て導入しようとすれば，対象地域に発達した従来の産業構造が急速に崩壊し砂漠化への要因になり得ると考えられる。対象地域に古来発達した伝統的開発技術と新しい技術との融合を図ることが重要になる。

引用文献

1) Hagedorn, H. *et al*: A Survey of Literature on Dune Formation and Dune Stabilization (1977)
2) 福井英一郎：気候学，古今書院，pp. 274～327 (1953)
3) 松田昭美：熱帯農業の現状と課題―乾燥熱帯の農業(気象)，日本熱帯農業学会，pp. 100～106 (1982)
4) 八鍬利助：農業物理学，養賢堂，pp. 139～148 (1966)
5) 岩崎　尚：新編農業気象ハンドブック，養賢堂，pp. 808～812(1974)
6) 樋根　勇：水の循環，共立出版，pp. 74～116 (1973)
7) 小堀　巌：砂漠・遺された乾燥の世界，日本放送協会 (1973)
8) Robert A. *et al*: Dry Lands, Man and Plants, the Architectural Press (London), pp. 13～39 (1978)
9) 飯沼次郎：現代農業と食糧問題を考える，産業経済研究協会環境科学総合研究所，pp. 146～153 (1976)
10) 東京天文台：理科年表，気象部，pp. 86(274)～175(363) (1985)
11) 畠山尚久：アジアの気候（世界気候誌第1巻），古今書院 (1964)
12) 土屋　巌：アフリカの気候(世界気象誌第2巻)，古今書院 (1972)
13) Mageed Y. A.: Anti-Desertification Technology and Management, UNEP, pp. 6～12 (1986)
14) 松田昭美・矢野友久・長　智男：砂丘地の微気象 (1) 放射状態について，農業気象，**28**(1)，pp. 11～17 (1972)
15) 松田昭美：砂漠化と気象―主としてアジアの乾燥地について，芝草研究，**16**(1)，pp. 31～44 (1987)
16) 佐藤一郎：地球砂漠化の現状，清文社 (1985)
17) 津野幸人：イランにおける農業開発のための基礎調査，鳥取大砂丘研 (1977)
18) 清水正元：地球の砂漠化とその防止対策(1)，化学と生物，**25**(7)，pp. 473～479 (1987)
19) アメリカ合衆国政府：西暦2000年の地球 (2) 環境編，家の光協会，速水謙三・立花一雄監訳，pp. 121～127 (1981)
20) 田中　明・山本太平：地下水位一定の土壌カラムからの蒸発に伴う水と塩の動態，農土論集，**129**，pp. 25～31 (1987)
21) 山本太平・神近牧男：中国毛烏素砂漠における砂漠化の概況と農業開発，農土誌，**55**(10)，pp. 965～970 (1987)
22) 清水正元：地球の砂漠化とその防止対策(2)，化学と生物，**25**(8)，pp. 546～552 (1987)

〔1988. 7. 21. 受稿〕