

# 沙漠研究

JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

## 目 次

### 原著論文

吉野正敏: 新疆の沙漠地域の風と雨	1-15
松村一夫・小島紀徳: 沙漠緑化による炭素固定のエネルギー収支	17-26
大坪国順: 裸地ライシメータにおける定期的な撒水条件での水収支及び蒸発特性(英文)	27-39
大賀宣彦: 中央ペルー沿岸沙漠におけるアンコン台地の草本性ロマス群落の埋土種子の分布パターン(英文)	41-51
長島秀樹・内田修: SPOT衛星画像による沙漠地形の3次元解析—1986年タクラマカン沙漠チーラ地区砂丘地帯の沙漠地形—	53-59

### 短 報

長島秀樹・趙景峰・岡寄守良・李崇舜・夏訓誠: タクラマカン沙漠における気象要素と砂面変動の自動観測—チーラでの1990年10月～1991年3月の観測から—	61-66
---	-------

### 特 集

日本沙漠学会沙漠工学研究分科会: 沙漠工学を考える—第1回沙漠工学講演会講演要旨集—	67-91
---	-------

## 新疆の沙漠地域の風と雨

吉野 正敏\*

### 1. まえがき

1989 年度から始まった日本の科学技術庁与中国科学院とを主とした日中共同研究により、「沙漠化機構の解明」の研究が進められているが、筆者はその一部である気候の解明を担当している。本論文はその最初の予察的研究として、既存資料による分析の結果を述べるものである。

「中国の乾燥地域および半乾燥地域の気候についてはすでに耿(1985, 1986)による記述がある、その中に新疆についても詳しく一般的な状況がまとめられている。また、ウルムチの気象局の研究者を中心として新疆の気象・気候について種々の研究が行われている。その一部は李(1990 a)に発表されている。降水だけについても成書があり、詳しい統計や総観分析が公表されている(張・邓, 1987)。これまで、中国の沙漠化については、中国人以外によるいくつかの報告もある(MECKELEIN, 1987; 河野, 1988; 市川, 1988)が、風と雨についての詳しい記述はされていない。

今回は、新しく統計した値の分布図、気流図などを画き、また新疆における雨を降らす気流系の模式図を画いた。沙漠は本来雨が少ない地域ではあるが、けっして全く降らないわけではなく、降るときには短時間に長年平均の年雨量以上の雨量がある。これは沙漠の地形形成や動物・植物の生育はもちろん、沙漠化の現象にも極めて重要な役割を果たすと思われる所以、ここにとりあげた次第である。

### 2. 研究地域の概観

タクラマカン沙漠は中国で最も大きな沙漠で、タリム盆地の中央部の大部分を占める。年降水量はこれまでの気候図によると、沙漠の内部のほとんどの部分が 20 mm 以下、タリム盆地の北西縁では 50~80 mm、南東縁で 20~30 mm である。しかし、この値はいわゆる長年の平均値であって、かなり多くの問題をもつ値であることはこの論文で明らかにする通りである。雨は暖季年に年降水量の 60~70% が降る。しかし、連続して無降

水の期間が長く、30 日から長い時には 290 日にもなる。

ケッペンの気候分類法を毎年の値に適用して年候をみると、沙漠気候(BW 気候)の出現が 100% である。冬にはこの地域はジェットストリームの北に位置し、夏にはジェットストリームが北に移動するので、その南に位置する(YOSHINO and URUSHIBARA, 1981)。後述するように、この地域は夏にも冬にも雨かけ地域になる。

年の降水量-蒸発散量の分布図(欧ほか, 1989)をみると、タリム盆地やジュンガリア盆地では -1,000 mm 以上で、特にタリム盆地の東部やジュンガリア盆地の一部では -1,200 mm の大きな値を示している。同じ半乾燥地域でも中国東北部では -200~-600 mm で、これに比較して非常に大きい。年の値と暖半年とを比較すると値はほとんど同じで、大きな差のある地点でも -200 mm くらいの差である。これは、農業気候条件としては、この地域が厳しいことを物語っている。

ソーンスウェイトの 1948 年の方式によって蒸発散量を求め、これから月別に水収支を計算して、水不足量の分布を求めた結果(YOSHINO and URUSHIBARA, 1982)では、タクラマカン沙漠を中心とした中国北西部の乾燥地域の年水不足量は 750 mm である。上述の -1,000 mm(負は降水量が蒸発量より少ないと意味する)と比較するとかなり小さい。これは単に降水量と蒸発量の差をとった値と、可能蒸発散量を考慮に入れて水収支量から求めた水不足量の値との違いによるためであるが、絶対値については今後の問題である。

なお、毎年について計算した水不足量は、かなり大きい年による差を示す。6~8 月に大きい値を示すが、月値の年々による差を標準偏差で示すと、ルオチャンなどでは 3 月に非常に大きい値を示すことに注目しなければならない。

風砂の発生回数は、年に 50 回の地域が広い。風砂(中國では風沙と書く)は地上気象観測において天気現象のひとつとして記載される。砂地上 2 m の高度で風速が 4.5 または 5.0 m/sec 以上(砂地上 8 m では 6.5 m/sec 以上)になると砂の流動が始まるので、これが指標とされている。沙漠内部では風砂回数はむしろ少なくて 25 回以下である。北部は非常に多く、特に 125、あるいは 100 回という数字の所がある。125 回とは 3 日に 1 度く

\* 愛知大学文学部地理学教室

(受付: 1991 年 7 月 2 日、受理: 1991 年 9 月 21 日)

らいはこういう強い風が吹くことになる。それがまず特徴の第1である。2番目は、この地域における卓越風の方向が、中緯度で卓越する偏西風とは一致しないことである。90°–100°E, 40°–45°N の付近では北東の風向が卓越する。新疆の沙漠地区の砂丘の移動方向を示した図（中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所、1978）をみても、新疆の東部では天山山脈の東を回ってタクラマカン沙漠に入り込む北東の風が卓越しているように画かれている。

中国の新疆ウイグル自治区では、1950年から1979年の間に耕地は、砂漠化によって461万haから320万haに減少した。その大部分は流砂と土壤中の塩類の集積が原因といわれる。砂丘の移動速度は45~50m/year, 場所によっては50~60m/yearである（中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所・新疆策勒治沙研究試験站、1988）。河に沿った林は約1,000kmあったが、過伐と、灌漑水によって失われる水量が増加したため乾燥化が進み、減少してしまった。新疆のトルファンーハミ盆地、タリム盆地の特に南東部などで夏に熱乾風の頻度が大である。春と夏にはもやがかかる。

なお、本文および図中にでてくる地名のカナ・漢字・ローマ字表記の対照については末尾に付表としてあげた。

### 3. 風について

#### 1) 大風日数、最大風速

大風日数の全年平均値の分布を図1に示す。ここで、大風とは風力8以上、すなわち風速17.2m/s以上とする。大風日数の年合計の最多値の分布（図は省略）もある程度似通っている。すなわち、極大値を示している地域は、阿位山口周辺と三堰湖周辺である。全体的には43°Nより北で大きな値を示す。一方、天山山脈中央部からタリム盆地にかけて極少値となっている。全体的には43°N以南で平均値は低くなっている。

最大風速(m/s)の記録値の分布は図2に示す。値の高い地域は、ジュンガリア盆地南部、トルファン周辺、そしてルオチャン付近である。10年間に40m/sを記録していることは注目してよい。一方、天山山脈西部やアルタイ山脈南部、そしてタリム盆地全域では、弱い値しか記録していない。

年最多風向の分布は、大まかには図3~5と以てある。北西の風がこの地域にはいり、タリム盆地の東部で北東の風となる。これは天山山脈の東部を迂回してジュンガリア盆地東部から北東の風となるものである。この気流

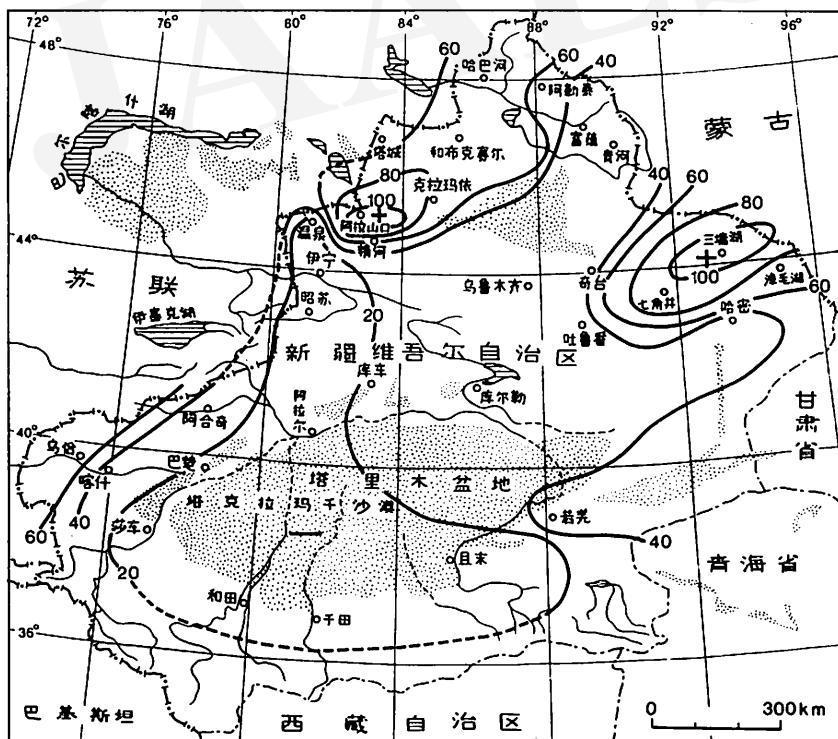


図1. 新疆ウイグル自治区（以下、新疆と呼ぶ）における年大風日数の分布。  
1961-1970年の平均。

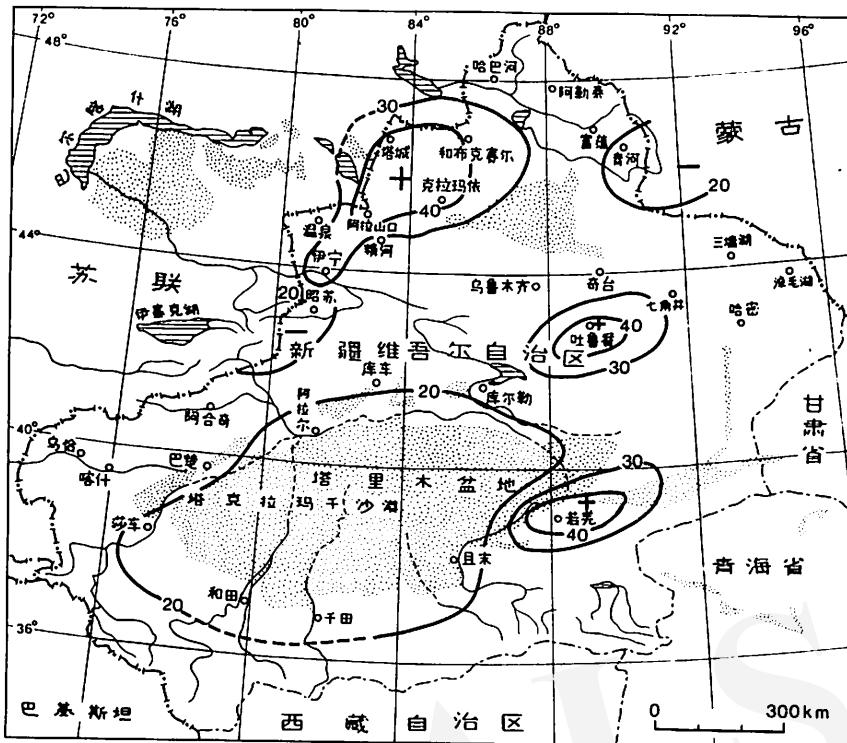


図2. 新疆における最大風速の記録値の分布。  
統計期間は 1961-1970 年。

により、各地点において北東風が卓越する。一方、タリム盆地を目指して収束するように天山山脈西部で北風または北東の風となる気流が卓越している。また、タルバガタイ山脈からジュンガリア盆地へ向かって、北西の風が卓越している。西部ではカジュガル付近で北西の風がタクラマカン沙漠の西端に侵入している。

## 2) 最大風速による流線図

ウルムチにおける降じん量と大風日数の年変化をみると、4~6月に砂じん、暴風、強風などが著しい。そこで次に4月、5月、6月についてここではとりあげる。

4月、5月、6月の最大風速を図にプロットし、それにもとづいて流線図を画いた。図3~5がその結果である。しかし、これはいわば気候学的な流線図であって、ある特定の日にこのような流線が描けるかどうかはわからない。図をみると次の事実がわかる。

新疆に西風として侵入してきたものが、北部新疆では西ないし西北西の風となって卓越し、トルファン付近で北西から北よりの風となり、さらにタ克拉マカン沙漠へ時計廻りに入り込む。興味あるのは、トルファンで年最多風向は南西~南となっているのに対し、図3ではカ

ジュガル（カシ）からホータンに至る地域では西よりの風となっている点である。

すでに耿(1986)の図に示されている通り、詳しくみると、タクラマカン沙漠の中央部で収束するような流線になっている。これが砂じんあらしの形成や局地的な積乱雲の発達などに関係していると考えられ、後述する異常降雨にも関係していると思われる。

図4は5月の最大風速とその風向の分布、およびそれによる流線である。4月と比較して5月の流線をみると、侵入してくる気流は全体的に北西よりの成分が強くなっている。

図5は6月の状態を示す。7月とはほぼ同じである。昆仑山脈山ろくの強風域が4月とはやや異なる点が注目されよう。図3~5のいずれにおいても、流線をみると、天山山脈を横断した北風が、タリム盆地やトルファン盆地へ向かって流入している。天山山脈西部から天山山脈の南側に沿った地域に西よりの気流があるが、それを打ち消して北~北西の風が卓越し、タ克拉マカン沙漠やトルファン盆地に流入している。これがこの地域を乾燥化している理由のひとつと思われる。

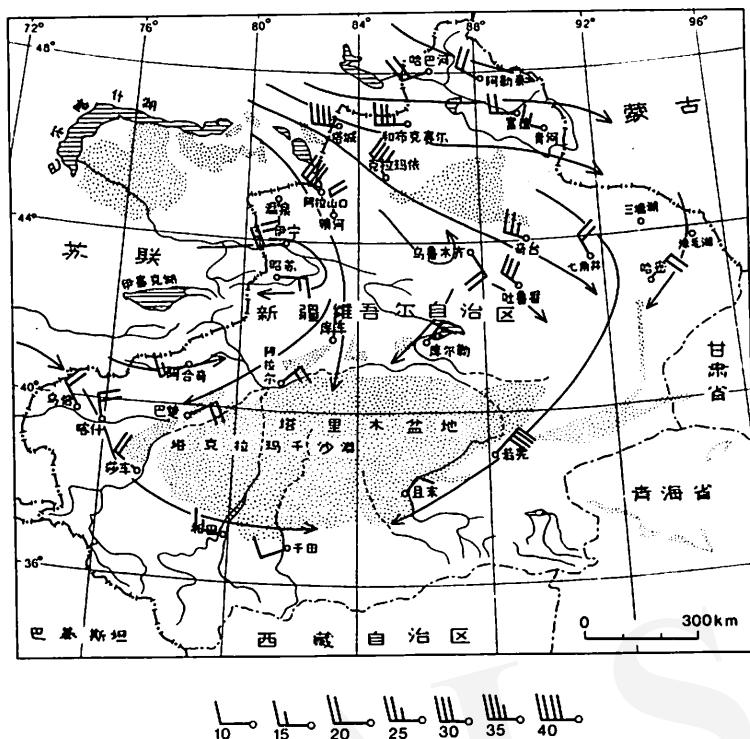


図3. 新疆における4月の最大風速とその風向の分布、およびそれを基礎とした流線。矢羽根の数字の単位はm/s。

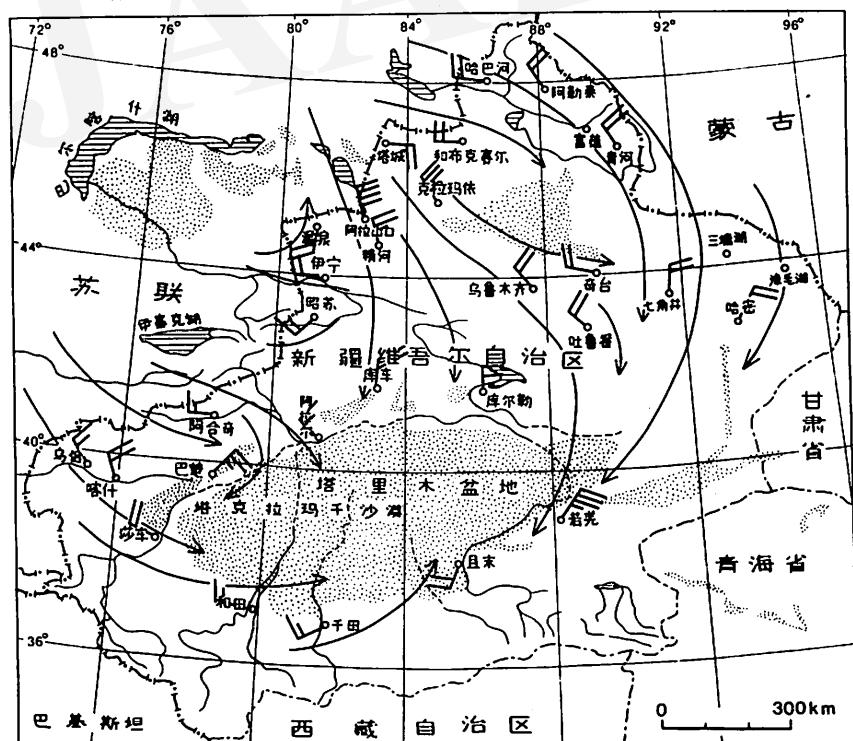


図4. 図3と同じ。ただし、5月について。

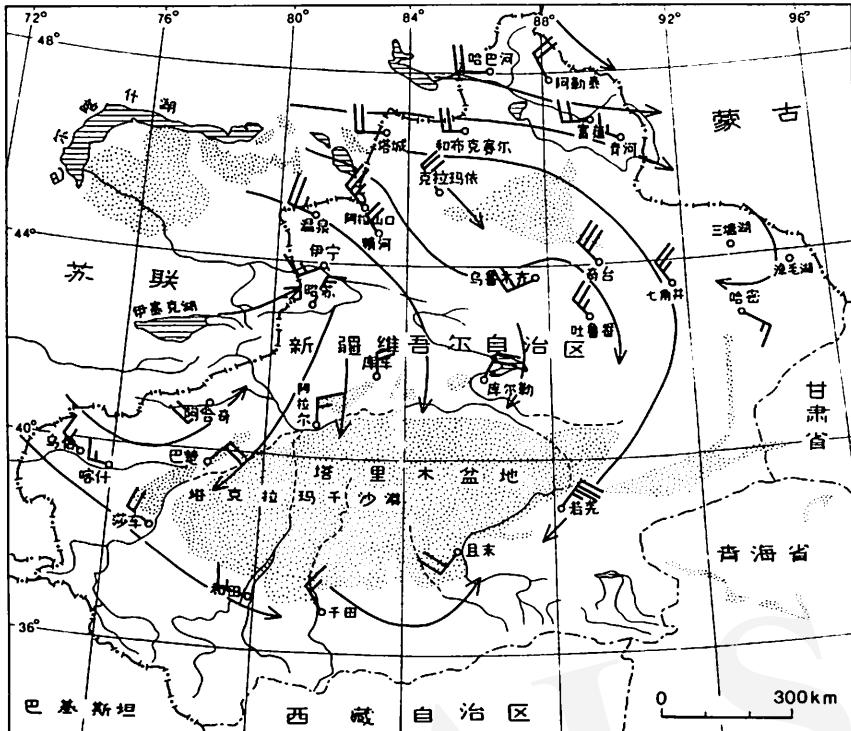


図5. 図3と同じ。ただし、6月について。

#### 4. 降水量について

##### 1) 月降水量 0 mm, 5 mm 以下, 10 mm 以下の継続日数

月降水量が 0.0 mm の値が続く月数の分布を図 6 に示す。44°N 以南の盆地部以外の地域では、3 以下で少ない。特にアルタイ山脈北部と天山山脈西部での月数が少ない。タクラマカン沙漠を中心にして 6 カ月以下となっているが、興味あるのは西端はすでに値が小さく、極端な乾燥がない。それに対して東部は乾燥傾向が強く、トルファン盆地をも含めて、雨が全く降らないことが半年もあることを意味している。

月降水量が 5.0 mm 以下の値が続く月数の分布は省略するが、月数の大きい値のところは、やはり 44°N 以南の盆地である。しかもトルファン付近では最大となっている。

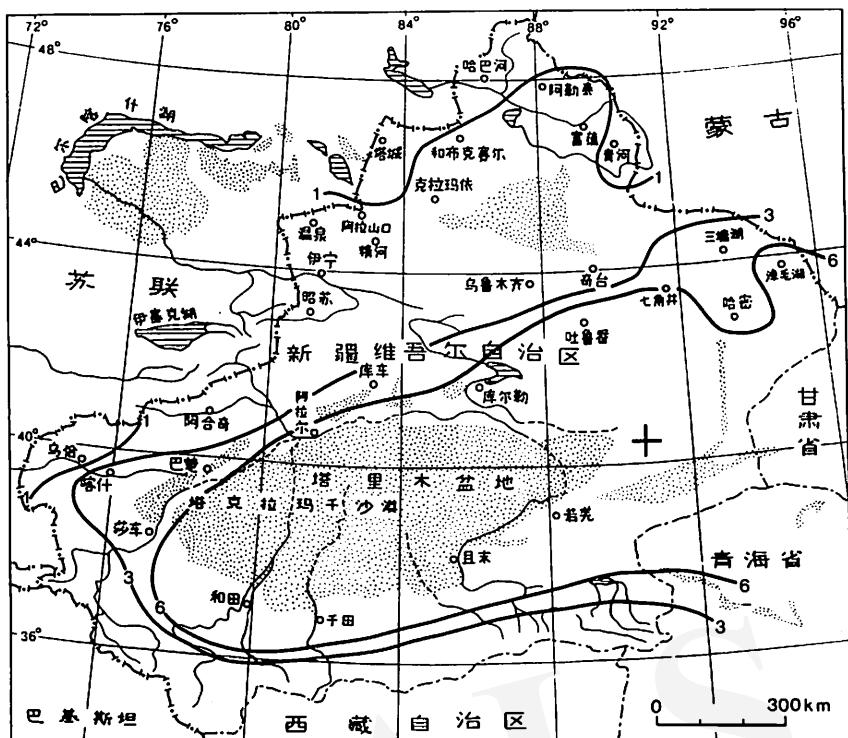
図 7 は 10.0 mm 以下の場合で、傾向としては、5.0 mm 以下の値が続く分布と同じである。どうしてトルファン付近は 5 mm, 10 mm の強い雨が降りにくいのか、いいかえれば、積乱雲などの対流性の降雨活動が弱いのか、その理由は目下のところ不明だが、考えられる

のは、次の 2 つの原因である。すなわち、(i) この付近は天山山脈を越した山越えの下降気流が他の風下山ろくに比較して強いために上昇気流が発生しにくい。(ii) 上空に冷気が侵入しにくく強い対流による上昇気流が発生しにくい。これについては今後の研究が必要である。

図 8 は 20.0 mm 以上の月降水量が再びできるまでの月数である。ハミなどの盆地部は 120 カ月、すなわち 1961~1970 年の 10 年間にはでなかった。しかし、その他、盆地の周辺ではほぼ 3~5 年に 1 回は出現したことを意味する。これはかなり注目に値しよう。地形形成、砂の移動、植生分布などに強い影響があるはずである。図 9 は 30 mm であるが、このデータが 10 年間であるから、30 mm 以上の場合のタリム盆地・トルファン盆地などの局地性は明らかでない。

##### 2) 短時間降水量

1 日最大降水量と、長年平均の年降水量の比 (100 分比) を降水相対強度と呼ぶが、この値は著しく大きい (張・邓, 1987)。若羌では 422%, 且末で 231%, トルファンで 220%, などである。若羌では 1981 年 7 月 5 日に 14 時間に 73.5 mm 降った記録がある。一般的には北部では約 20%, 乾燥地域では 40% だが、タクラマカン



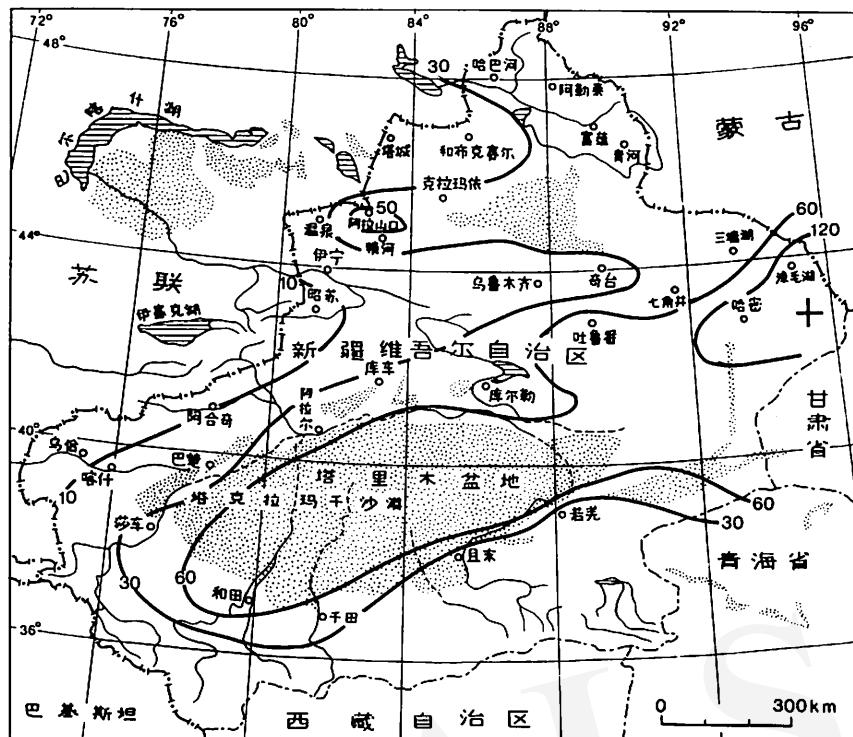


図8. 図6と同じ。ただし、月降水量 20.0 mm 以下の場合。

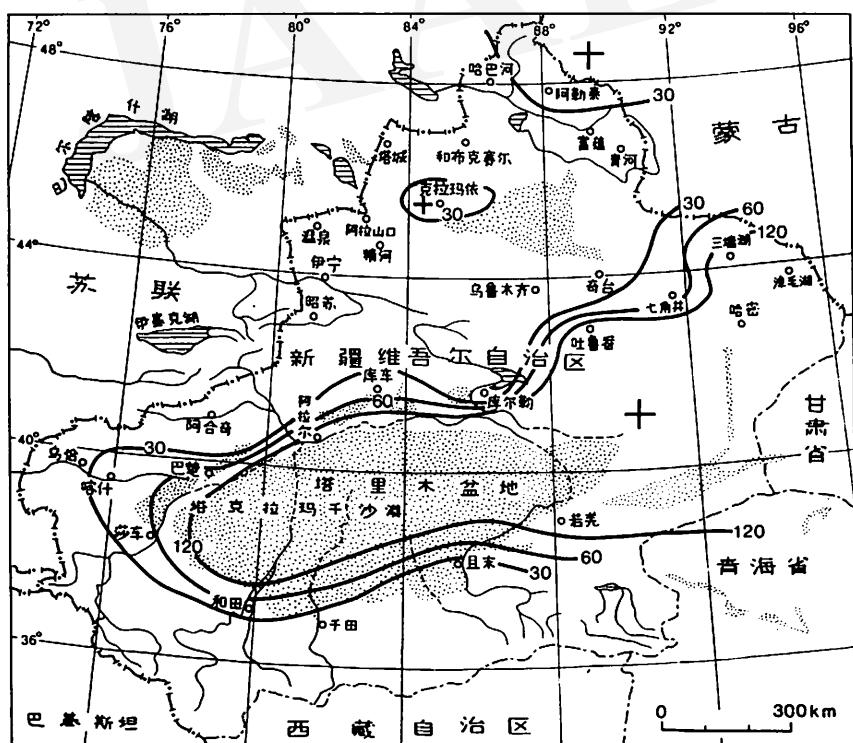


図9. 新疆において月降水量 30.0 mm 以上が再びできるまでの月数の分布。

表1. ハミ (哈密 Hami) 地区における大降水の日数 (張ほか, 1987)

年 次	哈 密	伊 吾	巴里坤
1959	1	1	3
1960	1	0	5
1961	0	3	5
1962	0	2	1
1963	0	0	3
1964	1	4	3
1965	1	1	4
1966	0	4	4
1967	0	1	7
1968	0	4	1
1969	0	2	5
1970	1	1	7
1971	1	0	3
1972	1	2	4
1973	1	3	4
1974	0	0	3
1975	0	1	2
1976	1	1	9
1977	0	2	2
1978	0	1	5
1979	2	3	2
1980	1	3	8
1981	1	1	5
1982	0	0	4
1983	0	2	7
1984	1	4	7
合 計	14	46	112
平 均	0.5	1.8	4.3

ン沙漠南部では 100~200% の大きい値をもっている。アフリカの乾燥地域において降水量相対強度は最も大きい地点で 300% に達する (吉野, 1990) が、それに匹敵するか、或いはさらに大きい値がタクラマカン沙漠の南東部に現われることは特筆に値しよう。これについては詳しく述べる。

1 日 20 mm 以上を大降水と定義して、ハミ地区の大降水の日数を 1959~1984 年について調べると表1 の通りである。ハミの北方の巴里坤 (バーリクン, Bari-kun) では 20 mm の強い雨が降る回数は 1959~1984 年の 26 年間の統計では合計 112 回であった。平均して年に 4.3 回であった。ハミでは同じ期間に合計 14 回、平均して 0.5 回/年 である。これを月別にみるとハミでは 4 月~7 月に多く、北方の山地のバーリクンでは 6 月~8 月に多い。盆地部では収束帶に関連した熱界雷電の強雨が多いのに対し、山地では地形性熱雷による強雨が

多いためであろう。新疆の 7 地区における時間降水量が 15 mm 以上のときの 24 時間、1 時間、10 分間降水量の値をみると、イリでは 24 時間降水量が 40.8 mm という記録がある。1 時間降水量では庫車 (クチャ) で 1960 年 6 月 14 日 15~16 時に 30.3 mm 降った。10 分間降水量の記録値は 17~20 mm である。

## 5. 新疆の大気循環系の模式図

以上に述べた風と雨に関する観測結果をまとめて、タリム盆地とジュンガリア盆地を中心とする新疆の大気循環系の模式図を書いてみる。なお、全年の卓越気流の分布図は耿 寛宏 (1985) が書いており、冬季の主要風向の概観図は趙 松喬 (1985) が書いている。ここでは、この地方が黄砂の発源地として重要な役割をもつ春の 3~4 月と、局地的な降雨現象に関連して重要な最暖月である 7 月をとりあげた。

### 1) 3~4 月の大気循環系

上空には冬の状態が残り、特に新疆の北部以北には、比較的強い偏西風が吹いている。地上付近では支流はジュンガリア盆地に入るが、タクラマカン沙漠に入る主要な気流は天山山脈の東を廻って北東の気流となって一部はコルラ付近へ、他の一部は大きく迂回して、ルオチャンを経てチエモー付近に至る。特に強く侵入するときはカラブラン (黒風) をもたらす。この 2 つの支流は一般に風速が大で、乾燥しており、地上の積雪はすでに消えており、地表面温度は上昇しているのでガスト (風の乱れ) が強く、これが強い砂じんあらしを発生させやすい。

一方、タリム盆地の北では、天山山脈を吹き越して来たために乾燥して比較的高温な北よりの風系がタリム盆地に向かって吹き降りる。また、西方の 40°N 付近には西方から西よりの風系が峰を越して侵入している。さらにタリム盆地の南西部にはパキスタンからカラコルム山地を越して吹き降りてくる乾いた高温の南西の強い気流がある。これらの 3 気流はいずれも周辺の山地を吹き越している下降気流のためフェーン現象により乾燥し、高温である。しかし、タ克拉マカン沙漠の中心部までは普通は到達しない。したがって夏のような収束線は形成されず局地的またはシノブティックスケールの上昇気流は極めて弱いか、全く生じない。

また上記の 3 気流はいずれも乾燥しているが、相対的にみると、高緯度からくる北よりの気流の方が比較的湿度が低く、低緯度からくる南西よりの気流が最も高温である。これがタ克拉マカン沙漠の南縁の方が北縁よりも

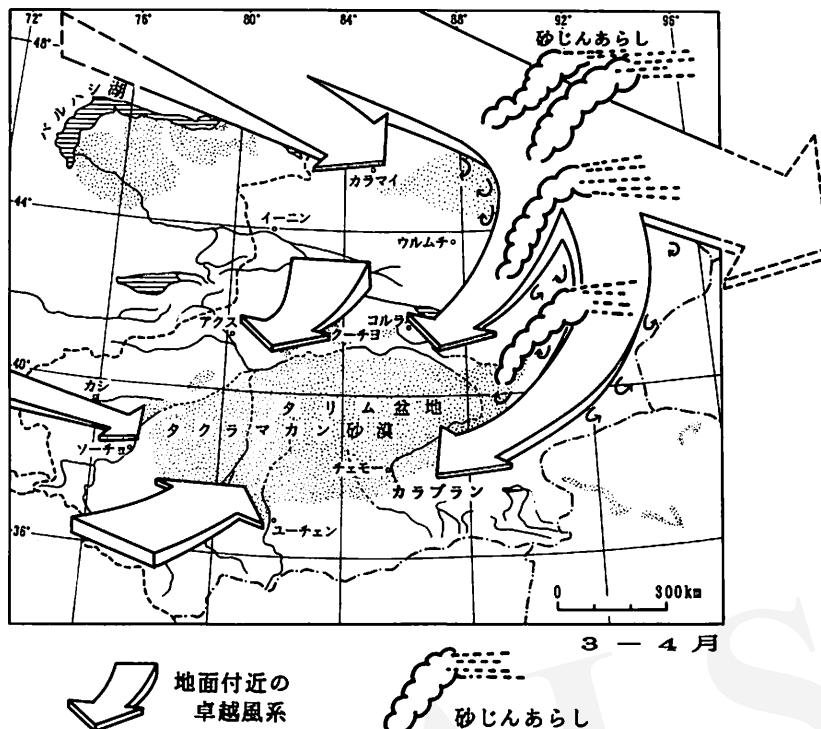


図10. 新疆における対流圏下部（地面付近）の卓越風系、砂じんあらし、カラブランなどの模式図。3-4月の場合。

砂漠化に対し厳しさを強める結果をもたらす。

## 2) 7月の大気循環系

夏になると上空の偏西風は弱くなり、地面付近の局地的気流の影響が強くなる。タリム盆地の南側には東の方（上記の天山山脈の東を迂回してタクラマカン沙漠に侵入してくるもの。図10に画いてある。）からと西の方（上空の偏西風に支配された地上の風系。）からの気流が侵入し、83-84°E付近で収束し、上昇気流となる。特に沙漠中央部では強い。タリム盆地のやや北よりを WSW から ENE の方向に収束線が走り、この北側には天山山脈を吹き越して来た山越え気流の下降気流が収束していく。そして上昇気流となり、積雲を生じる。これらの収束線に沿って強い上昇気流が発生しやすい。そして積乱雲にまで発達することも多く、そのときには強い雨が降りやすい。

このようにみると、回数は少ないが時々ある夏の強い雨は、タクラマカン沙漠の中央やや西よりの部分に降る可能性が高いといえよう。これはもちろん、周縁の山地を除き、また、沙漠中央部と周辺部とを比較してのことである。

タ克拉マカン沙漠の中は年降水量が 20 mm 以下と推

定されていたが、従来中心部についてはもちろん実測値はなかった。最近、40°06'N, 83°06'E, 987 m の地点（沙漠の北縁にやや近いところ）で 1988 年に観測した結果（李, 1990b）では、年降水量は 50 mm を超している。ちょうど図11に示した模式図で、東西に走る収束線と中央部付近で南北に走る収束線のぶつかるところなので、比較的雨が多いのではなかろうか。

タクラマカン沙漠の砂丘の形態分布図（中国科学院蘭州冰川凍土沙漠研究所沙漠研究室, 1974）をみると、砂丘や砂ゴビ、砂堆などの形態分類による大まかな分布域は、ほぼこの東西に走る収束線の南側と北側の違いを示している。また、その南側では南北に走る収束線の西側と東側の違い（すなわちほぼホータン川の西と東の差）に対応しているように解釈できる。表面形態の形成には風と雨の影響が大きいから、大まかにはこの 3 地域区分は可能であろう。

また沙漠南縁において昆侖山地の北側山ろくに沿うオアシスと、沙漠の北縁に位置する天山山脈の南側山ろくに沿うオアシスとを比較すると、利用可能な水の量や緯度の差による気温の違いもあるが、フェーン現象による高温乾燥した山越え気流の影響が前者の方が大きい。この高温で乾燥した強い風は、沙漠化に対しては加速する



図 11. 新疆における卓越気流系、収束線、積雲・積乱雲、等圧線などの模式図。  
7月の場合。

作用をもっている。ホータン(和田)、ユーチェン(于田)以東が最も沙漠化の条件が、風と雨の面からみるととてのっているといえよう。

## 6. 風と雨に関連した若干の議論

### 1) 砂丘の移動と風

中国の沙漠化に関する最近のまとめ(朱ほか, 1989)によると、中国全体では約 334,000 km<sup>2</sup> の面積が沙漠化の対象となっており、そのうちの 52.7% に及ぶ 176,440 km<sup>2</sup> がすでに沙漠化をうけ、約 158,000 km<sup>2</sup> が潜在沙漠化の土地であるという。上記の 176,440 km<sup>2</sup> のうち、タクラマカン沙漠の辺縁が中国内では最も面積が広く、24,223 km<sup>2</sup> に及ぶ。しかも、そのうちの 14,200 km<sup>2</sup> が強烈に沙漠化が進行している土地であるという。

タ克拉マカン沙漠の中でも、気候条件からみて最も厳しいのが南部～南東部であることは上に指摘した通りである。タ克拉マカン沙漠における砂丘の移動方向の簡単な概念図は、かつて中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所(1978)が示した。その後、それを中国科学院新疆地理研究所(1987)が引用して沙漠化問題を討論した。

吉野(1990)もそれを引用して世界の沙漠化を紹介した。その後、朱ほか(1989)は彼らの図 6～12において、気流の流線のような表現方向で砂丘の移動方向を画いている。また、中国科学院蘭州冰川凍土沙漠研究所沙漠研究室(1974)は、タクラマカン沙漠の砂丘を 10 の表面形態に分類して、その分布図を示した。同研究所は多色刷で 150 万分の 1 のスケールの「タ克拉マカン沙漠風沙地貌図」(1980)を刊行し、1990 年にはその第 2 版を刊行した。

この砂丘の移動方向の図と、風沙地貌図にみられる表面形態の分布図をみると、今回の論文の図 10 の春の場合と、図 11 の夏の場合の代表的な気流分布とよく反映している。すなわち、タ克拉マカン沙漠の南東半は、天山山脈の東を廻って北東の気流が侵入してくる部分だが、ここは複合型の砂丘が極めてよく発達する地域が広く、かなりの面積(約 3 分の 2)が 50 m 以上の砂丘が連続する地域となっている。南西の半分はこれに比較すると複合形の発達はわるいが、西からの卓越風が強い部分では複合型の砂丘がみられる。

一般的に卓越風向と砂丘の移動方向とは、よく合う地域で 3～6° の差があり、複雑な地域で 9～15° といわれる。南緯のミンフェン(民豐)は表 2 に示すように約 9°

表2. タクラマカン沙漠の南縁における卓越風向と砂丘の全体としての移動方向\*

風の特徴	南西～南縁			南東縁
	莎車 (Shache)	皮山 (Pishan)	策勒 (Qira)	民豊 (Minfeng)
卓越風向 (砂丘を越す風向の合成)	316°	288°	271°	281°
砂丘の全体としての 移動方向	312°	291°	277°	272°

\* 朱ほか(1989)の資料による。

表3. 新疆の熱乾風の日数・熱乾風の天気・回数と級別の頻度

地名	回数	天気回数	級別*	
			重	軽
哈密 Hami	8.0日	1.5回	35%	65%
若羌 Ruoqiang	19.8	6.9	37	63
且末 Qiemo	9.3	2.2	18	82
民豊 Minfeng	8.0	1.9	37	63
庫車 Kuqa	6.4	1.1	27	73
于田 Yutian	4.9	1.0	30	70
和田 Hotan	3.5	1.1	5	95
莎車 Shache	3.8	0.8	7	93
喀什 Kashi	4.5	0.9	12	88

[資料は、徐徳源(1989):新疆農業気候資源及区画による]

\* は次の基準による。

類型	級	最高気温	相対湿度	風速	小麦の千粒重減
高温低湿	軽	≥35°C	≤30%	≥3 m/s	5.66%
	重	≥38	≤25	≥3	10.01
大風低湿	軽	≥28	≤30	≥8	4.76
	重	≥32	≤30	≥10	9.84

の差がある。クリヤ川とホータン川の間は気流の収束帯と一致すると考えられるが、砂丘の相対高度が低く、明らかに、上述の南東半あるいは南西半と砂丘の表面形態が異なる。

タ克拉マカン沙漠の北半分、すなわち、ヤルカンド川・タリム川に沿う地域は、天山脈を吹き越してくる北よりの風が卓越する部分である。すでに述べたように風速も温度も極端に高くはないので、沙漠化へのインパクトも相対的にみれば小さいと考えられる。

## 2) 黄砂と砂あらし・砂じんあらし

日本で観測される黄砂現象の発源地は、中国のタクラ

マカン沙漠周辺、黄土高原、内蒙ゴビ沙漠、河西走廊と考えられるが、その中、黄土高原以東の場合が多いようである(村山, 1991; 石, 1991)。しかし、中国における年平均浮遊じん・砂あらしの日数が30日以上の地域は、タ克拉マカン沙漠とその周縁地域が中国では最も広いことが指摘されている(張, 1984)。例えば、タ克拉マカン沙漠の南東部は砂じんあらし(12~14 m/sec以上)の日数が新疆の中では最多である。ミンフェンの長年の平均で33.9日、最多の年は55日である。ホータンでは長年の平均で32.1日、最多年は42日である。1982~1988年に観測された7つの大部分の降下砂じん量、および空中の汚染質の量では、ハミが、他をぬきん

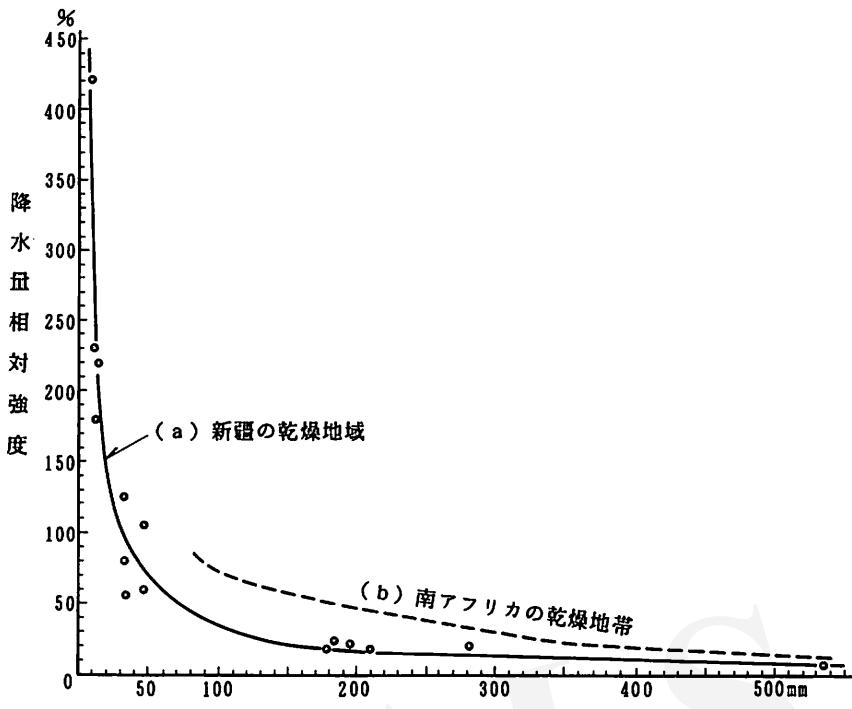


図 12. 降水量相対強度と年降水量との関係

で多い (Hao, 1991)。

また、数値シミュレーションによる研究 (KAI *et al.*, 1988; 甲斐, 1991) によると、黄砂はタクラマカン沙漠から 5~6 日、黄土高原からは 2~3 日で日本上空に達するとされ、タ克拉マカン沙漠からくる可能性は否定できないという。

### 3) 熱乾風

中国語では“干熱風”と呼ぶ、“干熱風”的厳密な気象学的定義はないが、この風が吹いている期間、気温は 10°以上昇温し、相対湿度は 20% 下降する。また、この風が吹いている期間、昼夜の気象要素の変化は小さい。東部と南部では 5 月中旬から 7 月中旬の間に発生する。小麦の開花から成熟期に当たるので、被害が多くなる (新疆維吾爾自治区気象学会農業專業組, 1988; 徐, 1989)。

表 3 は新疆における熱乾風の日数・回数と級別の頻度(%)を重と軽にわけて示す。すでに述べた通り、タクラマカン沙漠の南東部は風が強い部分なので、ルオチャン(若羌)における熱乾風の日数は年に約 20 日に及ぶ。新疆では、年間の熱乾風の日数が 10 日以上で、この風をもたらす天気過程の回数が 2 回以上の地域を“重干熱風区”と名づける。タ克拉マカン沙漠の中央から東に

偏った広大な地区、トルファン盆地地区、ジュンガリア盆地の中央から南に偏った地区がこれに相当する。ここでは小麦は 10% 以上の減収となる。

前項にふれた黄砂現象に関連した砂あらし・砂じんあらしと熱乾風は気象学的には別のものであるが、単に“大風”と呼ぶ現象は、その両方に関連しているように思われる。したがって、これらの総観気象学的・総観気候学的な解析が必要である。

### 4) 降水相対強度

先に第 4 章 2) に 1 日 (24 時間) 最大降水量にふれ、これまで極めて大きい値を観測していることを述べた。いま、x 軸に長年の平均の年降水量をとり、y 軸に降水相対強度をとり、新疆の観測値をプロットすると図 12 をえる。ここで、

$$\text{降水(量)相対強度} = \frac{\text{24時間最大降水量}}{\text{年降水量}}$$

とする。図 12 の (a) が新疆の傾向線である。いま比較のために南アフリカの乾燥地域の例 (Goudie and Wilkinson, 1977) を (b) の線で示した。年降水量が 80 mm 以下の小さい値の部分が (b) の場合にはないが、約 100~400 mm の間では明らかに (b) の方が (a) より上側にくる。同じ乾燥地域でも、乾燥の程度、短時間降水量の

大きな値をもたらす天気過程の差によって、このような結果を生じるものと考えられる。世界の乾燥地域の例を集めてさらに検討することが必要である。

ユーラシア大陸内部の沙漠は、海洋からの距離が大きいので、水蒸気を輸送する気流が大陸内部に到達する以前に水分をおとし、このために乾燥する。さらに、タクラマカン沙漠は流入してくる気流はフェーン現象によって、すなわち、山地の雨陰になるため乾燥する (LOGAN, 1968)。ごく一般的にグローバルスケールでは、対流圏上部で夏にはチベット高原上にいわゆるチベット高気圧が形成される。そのため乾燥域となる。しかし、タクラマカン沙漠の対流圏下部ではそれがくずれる時があり、その天気過程の研究は今後重要である。年降水量が 10 ~ 20 mm のところの降水量相対強度は、図 12 から読み取れるように、100~150% であるから、10~30 mm の 24 時間降水量が期待される。

「沙漠での死者の数は、意外にも、渴きよりも洪水による溺死の方が多いといわれるが、その原因はこの狭い範囲に降る豪雨のためである」(赤木, 1990)。つまり、軟らかいワジの河床でキャンプをしているとき、上流で降った豪雨による洪水に襲われて溺死するのだと指摘されている。沙漠の生活者にとっても短時間の降水は重要な現象である。

## 7. 結 果

新疆における風と雨について予察的研究を行った。その結果、次のことがわかった。

大風日数、最大風速とその風向の分布、それによる流線図を画くと、次の 5 気流がある。すなわち、(1) 西ないし北西の気流が全般に北部では卓越しており、(2) 天山山脈の東を迂回してタリム盆地へ北東の気流として吹き込む気流があり、(3) タリム盆地西部の峠から西の気流として吹き込む気流があり、(4) 天山山脈を直角に吹き降りる北風があり、さらに(5) パキスタンからカラコルム山地を吹き越して吹き降りる南~南西の気流がある。これらの気流は寒季に発達し、夏には弱い。したがって夏には収束線に沿って熱的な影響が強くなり、上昇気流が発達しやすくなる。

降水量については、月降水量 0 mm, 5 mm 以下、10 mm 以下、20 mm 以下などが継続する日数の分布図を画いた。また 24 時間降水量の分布を明らかにし、山越えの下降気流のあるところでは、大きい値が出現しにくい。沙漠の中では夏に予想以上に局地的な豪雨の回数が多いことが推定される。

風と雨の降り方について以上に判明したことを見ると

して、(1) 3, 4 月の砂あらし・砂じんあらしなど、黄砂の発源と関連する 3, 4 月の気流系、(2) 強い短時間の局地的降雨がある 7 月の気流系の模式図を画いた。

最後に、砂丘の移動と風の関係、砂あらし・砂じんあらしの発生回数、熱乾風、降水相対強度 [ $= (24 \text{ 時間最大降水量}) / (\text{年降水量})$ ] の関係を示す図を画き、南アフリカの乾燥地域と比較して新疆の雨の短時間降水量の統計的特性を明らかにした。

## 謝 辞

この研究は日本科学技術庁と中国科学院による「沙漠化機構の解明に関する日中共同研究」の 1 部として行ったものである。中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所の夏 誠訓所長および多数

[付表] 本論文で使用した主な地名のカナ、漢字、ローマ字表記の対照表  
本文でてくる順に記し、その下にアンダーラインをひいた

カナ	漢字	英字
シンチャン	新疆	Xinjiang
ウルムチ	烏魯木齊	Ürümqi
タクラマカン	塔克拉瑪干	Taklimakan
タリム(盆地)	塔里木(盆地)	Tarim Pendi
ジュンガリア(盆地)	准噶爾(盆地)	Junggar Pendi
テンシャン(山脈)	天山(山脈)	Tian Shan
チーラ	策勒	Qira
トルファン	吐魯番	Turpan
ハミ	哈密	Hami
アラタウサンコウ	阿拉山口	Alataw Shankou
サンタンフー	三塘湖	Santanghu
ルオチャン	若羌	Ruoqiang
アルタイ(山脈)	阿尔泰(山脈)	Altay
タルバガタイ(山脈)	塔尔巴哈台(山脈)	Tarbagatay
カジガル	喀什噶尔	Kaxgar
カシ	喀什	Kashi
ホータン	和田	Hotan
コンロン(山脈)	昆仑(山脈)	Kunlun
チエモー	且末	Qiemo
バーリクン	巴里坤	Balikun
イリ	伊犁	Ili
コルラ	庫爾勒	Korla
カラコルム	喀喇昆仑	Karakorum
ユーチェン	于田	Yutian
ミンフェン	民豐	Minfeng
クリヤ(川)	克里雅(河)	Keriya (He)
ホータン(川)	和田(河)	Hotan (He)
ヤルカンド(川)	叶尔羌(河)	Yarkan (He)
カラマイ	克孜瑪依	Karamay
イーニン	伊宁	Yining
クーチョ	庫車	Kuqa
アクス	阿克苏	Aksu
ソーチョ	莎車	Shache
ターチョン	塔城	Tacheng

の所員各位、同じく地理研究所新疆気象局気象研究所の各位、および烏魯木齊・和田において協力していただいた多数の方々に深く感謝したい。

### 引用文献

- 赤木祥彦 (1990): 「沙漠の自然と生活」 地人書房、京都、245 p.
- 市川正巳 (1988): 世界における砂漠化とその研究の現状。『地理学評論』 61A: 89-103.
- 甲斐憲次 (1991): 黄砂のライダー観測と数値シミュレーションの比較。名古屋大学水圈科学研究所編: 「黄砂」 55-70.
- 河野通博 (1988): 中国における砂漠化の現状と防治策。『国際農林業協力』 9-3: 53-67.
- 村山信彦 (1991): 黄砂発生の仕組み。名古屋大学水圏科学研究所編: 「黄砂」 20-36.
- 石 廣玉 (1991): 黄砂の大陸—中国。名古屋大学水圏科学研究所編: 「黄砂」 9-19.
- 吉野正敏 (1990): 世界の砂漠化—とくにその気候的側面。澤田清編: 「地理学と社会」 東京書籍、326-334.
- 中国科学院蘭州冰川凍土沙漠研究所沙漠研究室 (1974): 「中国沙漠概論」 科学出版社、北京、94 p.
- 中国科学院蘭州冰川凍土沙漠研究所 (1980, 1990): タクラマカン沙漠風沙地貌図。
- 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所 (1978): 「新疆沙漠和改造利用」 新疆人民出版社、烏魯木齊、124 p.
- 中国科学院新疆生物土壤沙漠所・新疆策勒活沙研究試験站 (1988): 新疆策勒県流沙治理試験研究「干旱区研究」 1988 (3), 1-8.
- 中国科学院新疆地理研究所 (1987): 「新疆総合自然区劃概要」 科学出版社、北京、91 p.
- 耿 寛宏 (1985): 中国干旱地区風沙气候特征。趙 松橋編: 「中国干旱地区自然地理」 科学出版社、北京、36-49.
- 耿 寛宏 (1986): 「中国沙区の气候」 科学出版社、北京、230 p.
- 李 江風 (1990a): 「中国干旱・半干旱地区气候環境与区域開発研究」 気象出版社、北京、238 p.
- 李 江風 (1990b): 塔克拉瑪干沙漠水熱資源。「中国干旱・半干旱地区气候環境与区域開発研究」 122-125.
- 歐 陽海ほか (1989): 我国干旱、半干旱地区蒸発力的研究。蘭州干旱気象研究所編: 「干旱気象文集」 気象出版社、北京、42-52.
- 徐 德源 (1989): 「新疆農業氣候資源及区画」 気象出版社、北京、326 p.
- 新疆維吾爾自治区気象学会農業専業組 (1988): 「新疆農業氣象論文集」 気象出版社、北京、148 p.
- 張 家誠 (1989): 気候干旱化問題。蘭州干旱気象研究所編: 「干旱気象文集」 気象出版社、北京、4-22.
- 張 家宝・鄧 子風 (1987): 「新疆降水概論」 気象出版社、北京、400 p.
- 張 德二 (1984): 我国歴史時期以来降塵の天氣気候学初步分析。「中国科学」 27B: 278-288.
- 趙 松喬 (1985): 中国沙漠、戈壁的形成和演变。趙 松喬: 「中国干旱地区自然地理」 科学出版社、北京、1-17.
- 朱 震達・劉 惇・邱 醒民 (1989): 「中国的沙漠化及其治理」 科学出版社、北京、126 p.
- GODDIE, A. and WILKINSON, J. (1977): *The warm desert environment*. Cambridge University Press. 日比野雅俊訳(1987): 「沙漠の環境科学」 古今書院、110 p.
- HAO, YU-LING (1991): Change of quality of atmospheric environment in main cities of Xinjiang in China. In *Environmental change and GIS, INSEG '91*, August 25-28, 1991, Asahikawa, Vol. 2: 5-12.
- KAI, K., OKADA, Y., UCHINO, O., TABATA, I., NAKAMURA, H., TAKASUGI, T. and NIKAIDOU, Y. (1988): Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian Dust) over Tsukuba, Japan during the spring of 1986. *Jour. Met. Soc. Japan*, 61: 812-828.
- LOGAN, R. F. (1968): Causes, climates, and distribution of deserts. In Brown, G. W. ed., *Desert biology*, Acad. Press, New York, 21-50.
- MECKELEIN, W. (1987): Land-use problems in the Chinese deserts. *Applied Geography and Development*, 30: 8-29.
- YOSHINO, M. and URUSHIBARA, K. (1981): Regionality of climatic change in East Asia. *GeoJournal*, 5: 123-132.
- YOSHINO, M. and URUSHIBARA, K. (1982): Interannual variation of water deficiency over East Asia. *Sci. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, Sec. A*, 3: 39-66.

### Wind and Rain in the Desert Region of Xinjiang, China

Masatoshi YOSHINO\*

One of the broadest desert region locates in Xinjiang, northwestern part of China. To clarify the climatological condition of wind and rain in this region, the author analyzed the data recorded at the meteorological stations in Xinjiang. There are four main air streams in the colder half-year: (1) Westerly wind over the northern part of Xinjiang, (2) Northeasterly wind in the southeastern part of Taklimakan desert, taking a way around the eastern part of Tianshan Mountains, (3) Westerly wind coming from the passes of the western mountains into the Tarim Basin, and (4) Wind flowing from Pakistan and the Karakorum Mountains through the pass, as southwesterly or southerly to the Tarim Basin. These air flows are weaker in summer than in winter.

Concerning rainfall, the followings were studied: Distributions of the number of days with continuous monthly rainfall of 0 mm, 5 mm, 10 mm and 20 mm or less were illustrated respectively. Also 24 hours-rainfall

is discussed. It was found, against expectation, that the large values of rainfall, 20–30 mm, were recorded frequently.

On the basis of these results obtained here, a schematic view of atmospheric circulation systems in March and April and in July were illustrated. Finally, occurrence frequency of sand storms, shifting of sand dunes, "warm, dry wind", and relative intensity of rainfall are discussed. The values of relative rainfall intensity = (Record rainfall during 24 hours)÷(Annual rainfall) show 100–300% in the range of 20–30 mm of annual rainfall.

**Key Words:** Taklimakan Desert, Wind storm, Circulation system schema, Desertification, Rain in desert

JAALS

# 沙漠緑化による炭素固定のエネルギー収支

松村一夫\*・小島紀徳\*\*

## 1. 緒 言

大気中への炭酸ガスの蓄積とその結果としての炭酸ガスの温室効果による温暖化が、地球規模での環境問題となっている。原因は主として化石燃料の使用による炭酸ガス放出であると考えられてきたが、大気圏への炭酸ガス蓄積要因と、地球規模での炭酸ガス吸収メカニズムの検討が進むにつれ、化石燃料の燃焼と並んで、陸上植物の減少が炭酸ガス增加の大きな要因となっていると指摘されるようになってきた。すなわち、炭酸ガスの吸収源と考えられてきた植物生態系が、熱帯雨林を始めとして地球上の各地で減少し、その規模が地球全体の炭酸ガス収支に影響を及ぼすレベルにあるためである (Woodwell *et al.*, 1978, 1983; Broecker *et al.*, 1979; Houghton *et al.*, 1985)。

一方、大気中の炭酸ガスを固定する方法としても、植物の役割が再検討されるようになってきた (新田, 1989; 小島, 1990)。熱帯林での植林や沙漠等の乾燥地の緑化により、植物生態系が固定している炭素の現存量増加を図ろうとするものである。

乾燥地における緑化は、これまで灌漑農業の技術として発達しており、その中で植林は飛砂防止等の観点から、乾燥地農業の補助技術である沙漠化防止技術の一つとして検討されている。経済的生産性の高い灌漑農業については、多くの研究が行なわれているが、林業での灌漑は産業として確立しておらず、研究も進んでいない。例えば、樹木の水消費量については、作物用のライシメーターでは規模が小さすぎるが、これに代わる測定方法は確立されていない。現段階では、樹液流速を測定する試み等が行なわれている程度である。

沙漠の緑化においては、灌漑用水の確保・有効利用を始めとして、工学的貢献の余地が大きいと考えられている (小島, 1990)。しかし、緑化技術の開発は、主として農業や林業の観点から進められており、温暖化対策としての評価は、一部で検討されていても植林のコストや経済性の検討が主であって、使用するエネルギー (化石燃料の消費) と、緑化による炭素固定の間の炭素収支についてはほとんど検討が進められていない。例えば、サウ

ジアラビアの街路樹のように、石油燃料を使う海水淡化設備による水を用いた緑化は、地域的環境改善の面からはプラスであるが、地球温暖化対策としては、灌漑用水確保のエネルギーを考慮したトータルシステムとしての炭素収支、ないしは固定される炭素量に相当するエネルギーとそのために必要となるプロセスで使用するエネルギーのバランス、すなわちエネルギー収支で判定する必要がある。

本論文では、地球温暖化対策としての沙漠緑化の可能性の検討を行なう足掛りとして、沙漠の緑化をエネルギー系としてモデル化し、そのエネルギー収支の面から温暖化対策としての有意性を検討する。なお、ここでは緑化として、炭素固定を目的とするので、長期的に現存量の増加する植生である植林による緑化を考える。

## 2. 沙漠緑化のモデル化

### 1) 灌漑植林モデル

陸上植物の分布は、一般的に気候区分によって分類されており、その現存量の増加は、温度条件と放射乾燥度のいずれかが制限条件となる場合が多い。すなわち年平均気温が高く (植物の生育に適当な季節が長く)、降雨量が多いほど、植物の一次生産速度が大きい。また、植物生産力の推定に用いられる数学的モデルも、気温や日射量と降水量をパラメーターとした Miami モデルや筑後モデル等が陸上植物の生産力の推定方法として提案されている (Whittaker *et al.*, 1973; 内嶋・清野, 1988)。

ここでは沙漠緑化のモデルとして、低緯度地域での乾燥地の緑化において、環境温度が制限条件とならない場合を想定し、乾燥地での植林に灌漑を行なうことにより緑化が進む場合を考える。

高等植物の光合成系は表 1 に示すように C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, CAM 回路の特性の異なった三種類に分かれしており、要水量、最大純生産等が各々異なる。生態分布から見ると、C<sub>4</sub> 植物は熱帯・亜熱帯の乾燥地や塩害地に多く分布し、C<sub>3</sub> 植物は主として温帯に分布するといわれるが、これまでに見いだされている C<sub>4</sub> 植物は、トウダイグサ科の 10 種が中・低木や灌木であることを除けば、すべて草本である (村田, 1980, p. 442)。ここでは、灌漑植林モデルの

\* 東洋エンジニアリング(株)ライフエンジニアリング事業推進センター、(兼)(財)石油産業活性化センター茂原研究室研究員

\*\* 成蹊大学工学部工業化学科化学工学研究室

(受付: 1991 年 7 月 11 日、受理: 1991 年 9 月 26 日)

表 1. CO<sub>2</sub> 固定系を異にする 3 種の高等植物の特徴.

(村田, 1980: pp. 439-444, 480 を改編)

葉組織	CO <sub>2</sub> 固定経路		
	C <sub>3</sub> 回路	C <sub>4</sub> 回路	CAM
葉肉細胞・柵状組織細胞内の葉緑体は分散型。	多数の葉緑体を含む維管束鞘細胞が維管束の周りに発達し、葉肉細胞が更にその周りに配列。	葉肉は海綿状組織で葉緑体は細胞質中に均一に分布。	
光呼吸	あり	検出困難	検出困難
みかけの光合成最大値 (mgCO <sub>2</sub> /dm <sup>2</sup> /h)	低い (1~50)	高い (40~80)	低い (普通 1~4, 最大 11~13)
光合成の光飽和点	低い (最大日射の 1/4~1/2)	高い (飽和しないか最大日射で飽和)	不定
光合成の CO <sub>2</sub> 濃度依存性	高い	大気中の濃度で既に飽和	—
CO <sub>2</sub> 捕獲点 (ppmCO <sub>2</sub> )	高い (40~70)	低い (0~10)	暗中 (0~5) 24 時間 (0~200)
要水量 (gH <sub>2</sub> O/gDW)	大きい (450~900, 平均 600)	小さい (250~350, 平均 300)	著しく小さい (40~150, 平均 84)
最大生長率			
NAR <sup>1)</sup> (g/dm <sup>2</sup> /d)	低い (0.5~2)	高い (4~5)	著しく低い (0.015~0.018)
CGR <sup>2)</sup> (g/m <sup>2</sup> /d)	低い (19.5±1.9)	高い (30.3±13.8)	—
最大純生産 (t/ha/y)	低い (22.0±3.3)	高い (38.6±16.9)	著しく変動
代表的な植物	クロレラ, イネ, コムギ, ホウレンソウ, ポプラ, ケヤキ, サクラ等	トウモロコシ, サトウキビ, アワ, ヒエ等の他, 雜草類に多い。	サボテン, バイナップル, リュウゼツラン, アロエ等

1) NAR: 純同化率

2) CGR: 単位土地面積当たりの純生産量 (CGR=LAI·NAR, 但し LAI は単位土地面積当たりの葉面積)

対象植物を木本植物として考えるので、要水量等の特徴を C<sub>3</sub> 植物としてモデル化する。なお、CAM 植物は著しい乾燥環境に適応して要水量も極めて小さいが、表 1 にも見られるように C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> 植物に比べて生長率(NAR)が著しく劣るので、炭素固定を目的とした緑化の対象とはしなかった。

ここで、要水量とは植物の乾物生産量当たりの蒸散量であり、実験的には植物の発芽から収穫までに与えた水の量を、最後の全乾燥重量で除したものをいう（山田ほか, 1983）。また、植物の純生産とは、光合成による植物の総生産（一次生産）から自身の呼吸による消費を差し引いた、正味の植物体増加量をいう。この純生産から消耗性器官の生育に使われる分を除いたものが現存量の増加となる。

ここでは問題を単純化して整理するため、緑化プロセスについて、C<sub>3</sub> 植物の要水量を満たす灌漑の効率を 100% と仮定し、最も主要な灌漑用水製造プロセスの用

役のエネルギー原単位と植物の純生産を指標として、灌漑植林モデルのエネルギー収支を検討した。すなわち、植物に現想的な条件下で必要となる量の灌漑用水を供給する場合について、図 1 のような灌漑植林モデルを想定し、淡水製造プロセス等により灌漑用水を確保する場合のエネルギー収支の検討を行なった。次いで、より現実的なモデルとして、灌漑農業についてエネルギー収支解析を行なった。

灌漑植林モデルでは、

- (a) 森林の要水量は、種の違いや外的条件によって著しい差異がある（山田ほか, 1983）が、ここでは、植物乾燥重量の 600 倍 (C<sub>3</sub> 植物の平均値) とし、主要な植物が C<sub>3</sub> 植物である森林が、1.0 kg/乾物/m<sup>2</sup>/y で純生産を行なうためには、600 kg/m<sup>2</sup>/y の灌漑水を必要とするものとした。これは、降雨量としては年間 600 mm の雨水が、すべて植物に吸収されることに相当する。

表 1. CO<sub>2</sub> 固定系を異にする 3 種の高等植物の特徴.

(村田, 1980: pp. 439-444, 480 を改編)

葉組織	CO <sub>2</sub> 固定経路		
	C <sub>3</sub> 回路	C <sub>4</sub> 回路	CAM
葉肉細胞・柵状組織細胞内の葉緑体は分散型。	多数の葉緑体を含む維管束鞘細胞が維管束の周りに発達し、葉肉細胞が更にその周りに配列。	葉肉は海綿状組織で葉緑体は細胞質中に均一に分布。	
光呼吸	あり	検出困難	検出困難
みかけの光合成最大値 (mgCO <sub>2</sub> /dm <sup>2</sup> /h)	低い (1~50)	高い (40~80)	低い (普通 1~4, 最大 11~13)
光合成の光飽和点	低い (最大日射の 1/4~1/2)	高い (飽和しないか最大日射で飽和)	不定
光合成の CO <sub>2</sub> 濃度依存性	高い	大気中の濃度で既に飽和	—
CO <sub>2</sub> 捕獲点 (ppmCO <sub>2</sub> )	高い (40~70)	低い (0~10)	暗中 (0~5) 24 時間 (0~200)
要水量 (gH <sub>2</sub> O/gDW)	大きい (450~900, 平均 600)	小さい (250~350, 平均 300)	著しく小さい (40~150, 平均 84)
最大生長率			
NAR <sup>1)</sup> (g/dm <sup>2</sup> /d)	低い (0.5~2)	高い (4~5)	著しく低い (0.015~0.018)
CGR <sup>2)</sup> (g/m <sup>2</sup> /d)	低い (19.5±1.9)	高い (30.3±13.8)	—
最大純生産 (t/ha/y)	低い (22.0±3.3)	高い (38.6±16.9)	著しく変動
代表的な植物	クロレラ, イネ, コムギ, ホウレンソウ, ポプラ, ケヤキ, サクラ等	トウモロコシ, サトウキビ, アワ, ヒエ等の他, 雜草類に多い。	サボテン, パイナップル, リュウゼツラン, アロエ等

1) NAR: 純同化率

2) CGR: 単位土地面積当たりの純生産量 (CGR=LAI·NAR, 但し LAI は単位土地面積当たりの葉面積)

対象植物を木本植物として考えるので、要水量等の特徴を C<sub>3</sub> 植物としてモデル化する。なお、CAM 植物は著しい乾燥環境に適応して要水量も極めて小さいが、表 1 にも見られるように C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> 植物に比べて生長率(NAR)が著しく劣るので、炭素固定を目的とした緑化の対象とはしなかった。

ここで、要水量とは植物の乾物生産量当たりの蒸散量であり、実験的には植物の発芽から収穫までに与えた水の量を、最後の全乾燥重量で除したものをいう(山田ほか, 1983)。また、植物の純生産とは、光合成による植物の総生産(一次生産)から自身の呼吸による消費を差し引いた、正味の植物体増加量をいう。この純生産から消耗性器官の生育に使われる分を除いたものが現存量の増加となる。

ここでは問題を単純化して整理するため、緑化プロセスについて、C<sub>3</sub> 植物の要水量を満たす灌漑の効率を 100% と仮定し、最も主要な灌漑用水製造プロセスの用

役のエネルギー原単位と植物の純生産を指標として、灌漑植林モデルのエネルギー収支を検討した。すなわち、植物に現想的な条件下で必要となる量の灌漑用水を供給する場合について、図 1 のような灌漑植林モデルを想定し、淡水製造プロセス等により灌漑用水を確保する場合のエネルギー収支の検討を行なった。次いで、より現実的なモデルとして、灌漑農業についてエネルギー収支解析を行なった。

灌漑植林モデルでは、

(a) 森林の要水量は、種の違いや外的条件によって著しい差異がある(山田ほか, 1983)が、ここでは、植物乾燥重量の 600 倍(C<sub>3</sub> 植物の平均値)とし、主要な植物が C<sub>3</sub> 植物である森林が、1.0 kg-乾物/m<sup>2</sup>/y で純生産を行なうためには、600 kg/m<sup>2</sup>/y の灌漑水を必要とするものとした。これは、降雨量としては年間 600 mm の雨水が、すべて植物に吸収されることに相当する。

- (b) 必要となる水はすべて外部から供給する。ここでは、灌漑用水の利用率は 100% とする。
- (c) 水以外の有機・無機肥料は必要としないものとする。
- (d) 電力を消費する場合は、発電効率を 33% とする。
- (e) 木材乾燥重量当たりの炭素量は 50% とし、炭素固定量を発熱量換算する時は、単体炭素の発熱量 (390 kJ/mol) で評価する。すなわち、両者の比（純生産のエネルギー量/緑化プロセスのエネルギー原単位）を炭素固定効率として、灌漑植林モデルの温暖化対策としての有効性の指標とする。

従って、ここで考える灌漑植林モデルは、樹木の生育に適した土壤で、灌漑用水の搬送効率および適用効率等を 100% とした時の最少灌漑水量に対応するものである。実際には、乾燥地域での灌漑の場合では、植林区域外からの乾燥空気の流入等の周囲条件により、ここで検討するモデルより灌漑水の消費量は増加する。例えば、これは乾燥地域の例ではないが、只木 (1988) は、中野のまとめた結果として、利根川流域の低地森林で、年降水量 1,600 mm に対して 1,000 mm の蒸発散、ところが水源山地森林では 2,500 mm 以上の降水量に対して 400 mm 程度の蒸発散であったことを紹介し、周囲温湿度や風等により要水量が異なることを示唆している。

## 2) 灌漑植林モデルの水源

乾燥地における用水の確保は、大きく分けて河川湖沼水の利用の他、雨水の人為的な集水貯留による利用、化石水を含む地下水の利用、塩水・海水の淡水化による脱塩水の利用、塩水・海水の直接利用等が考えられる。最も一般的なものは、乾燥地外の湿润な地域に水源を有する河川水の利用である。乾燥地域では、降雨の季節変動が大きく、作物の育ちにくい冬季に降雨が多く、夏季に降雨が少ない場合には、長期の貯留が必要となる。最近では、用水路技術の発達により、5,000 km 以上の長い

運河が設置される例も出てきているが、これには経済性や政治的な問題をはらむ可能性が指摘されている (MYERS, 1971)。地下水のポンプによる汲み上げ利用も同様に重要な水源であるが、乾燥地域では水源のキャパシティーに注意を払う必要がある。

経済的には、低コストの脱塩水が工業的に製造できると、農業・緑化等の灌漑用水としても利用が期待されるが、現状では工業的な脱塩水を使用して緑化が実施される例は極めて少ない。例外的なものとしては、中東での産油地域等で、鉱物資源開発のために農業開発・緑化が経済性を度外視して行なわれていることがある。MYERS (1971) は、農業で灌漑に使えるほどに安い海水脱塩は当面期待できそうにないとしているが、佐藤 (1985, pp. 192-193) は、イスラエルでは脱塩水生産コストの低下を図る研究が進められており、また地下含塩水や海水の脱塩利用の研究が早くから進められ、既に入植農家の生活用水や工業用水を得るために脱塩装置が各地に設置されており、灌漑用水の節減の研究と相まって、脱塩水が農業用水として利用できるようになる日も近い、と述べている。なお、現在海水からの工業的な脱塩水製造方法として実用化されているのは、蒸気のエネルギーを利用して蒸留により水と塩類を分離する多段フラッシュ法と、水を選択的に透過する機能性膜により脱塩水を製造する逆浸透法である。

地球環境問題の一環としての沙漠の灌漑緑化の場合に天然水を利用するには、その規模から考えて、地表近傍の天然水の利用だけでは充分な森林面積は得られず、また一方では食糧生産と競合する恐れがある。このため、次章 (3.) では、まず工業的な脱塩水の利用を中心とした水源の確保を考え、灌漑植林モデルの水源として、多段フラッシュ法、逆浸透法を考え、更に化石燃料を主たる用役として使用しない淡水製造法として太陽熱脱塩による海水淡水化、および深井戸の利用について検討する。

天然水が利用できる場合は、計算するまでもなく造水

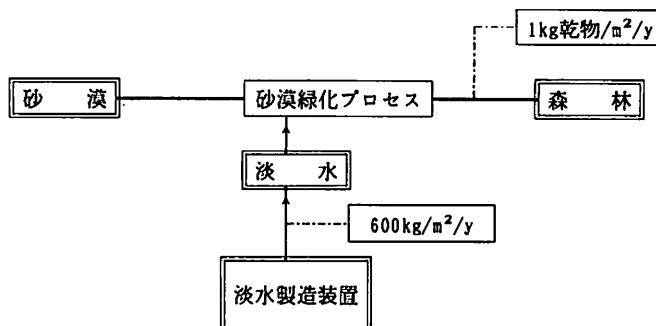


図 1. 砂漠緑化の灌漑植林モデル。

エネルギーはゼロであるが、灌漑設備の消費エネルギーを工業的な脱塩水製造エネルギーと比較するため、灌漑に必要なエネルギーコストを計算し、これを第4章で述べる。

### 3. 灌漑植林モデルにおける脱塩水製造のエネルギー収支

#### 1) 海水淡水化による灌漑 [1]

##### ——多段フラッシュ法——

###### (1) 多段フラッシュ法の概要

海水から淡水を得るために多数使用されている多段フラッシュ法は、蒸留による水の不純物（塩類）分離プロセスである。多段のフラッシュ蒸発缶の、前の段の凝縮潜熱を次の段の蒸発潜熱として利用することにより、熱を多重効用的に利用してエネルギーの有効活用を図り、プロセスの蒸気原単位の削減を図るものである。プロセスの所要段数は、通常は設備償却コストと用役コストの合計を最少にする8段程度である。段数が多いほど熱の多重利用の効果により用役として使用する蒸気の原単位、すなわちプロセスに投入される造水エネルギーは減少するが、装置が複雑になるので設備投資額は増加する。また、段数が増加すると伝熱を行なうために必要な温度差が段数に依存して増加するため、実用的な段数には限界がある。

###### (2) 多段フラッシュ法による植林灌漑のエネルギー収支

最も一般的な工業的脱塩法である多段フラッシュ法による海水の淡水化製造法とした場合のエネルギー収支を図2に示す。省エネルギー型の場合の段数を10段とす

れば、1,000 kg の蒸気から約10倍の淡水が得られるから、海水淡水化装置の蒸気原単位はほぼ  $0.1 \text{ kg-蒸気/kg-淡水}$  ( $250 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3\text{-水}$ ) となる。従って、灌漑用水 ( $600 \text{ kg/m}^2/\text{y}$ ) のエネルギーコストは、 $150 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2/\text{y}$  となる。

この場合、設備償却のエネルギーコストおよび蒸気以外のポンプ動力等の所要原単位を考慮しないでも、図2に示すように、蒸気製造に使用されるエネルギーは、光合成により固定される炭素の燃焼エネルギー ( $16 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2/\text{y}$ ) より一桁大きい。すなわち、ボイラーでの蒸気製造に使用される化石燃料（ないしはバイオマス燃料）からの排出炭酸ガス中の炭素量は、ボイラー効率を100%としても、固定される炭素量の約9倍となる。従ってこのルートによる緑化では炭素固定効率は約0.1となり、炭酸ガス固定プロセスとしては効かない。

なお、単純な多段フラッシュ法以外に、複雑な蒸留システムによる脱塩の省エネルギー化が検討されている（加藤ほか、1978）。これらは蒸気圧縮法では電力原単位がテストプラント実績で  $16.6 \text{ kWh/m}^3\text{-水}$  ( $170 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3\text{-水}$ )、蒸気圧縮と4重効用および36段フラッシュを組み合わせた例では燃料原単位が概念設計の試算値で  $113 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3\text{-水}$  等と、かなりの省エネルギー効果があるが、工業化されている多段フラッシュ法に比較して、桁違いに原単位が改善されるとはいえない。

#### 2) 海水淡水化による灌漑 [2]

##### ——逆浸透法——

###### (1) 逆浸透法の概要

多段フラッシュ法に代わり、近年採用が増えている、

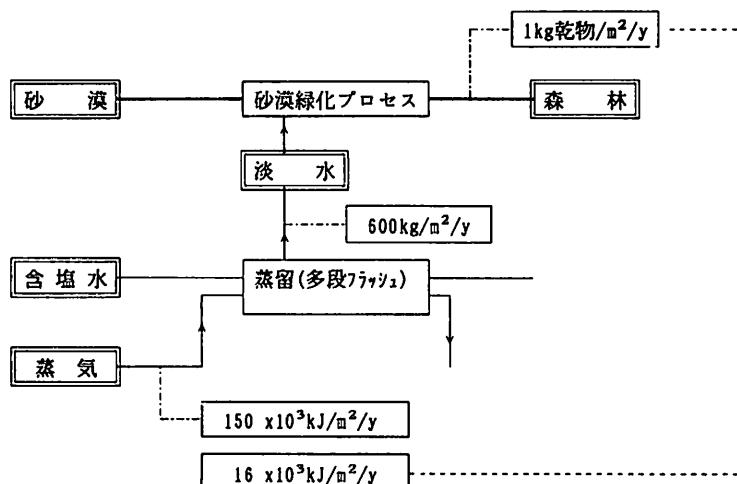


図2. 海水淡水化による灌漑 [1]: 多段フラッシュ法。

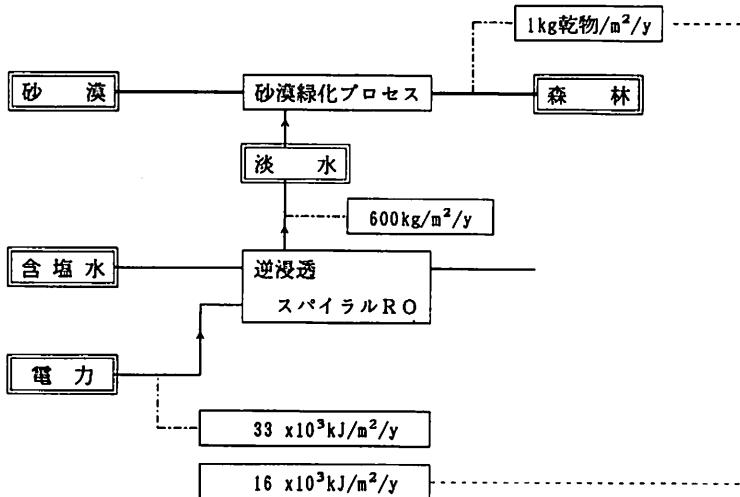


図3. 海水淡水化による灌漑 [2]: 逆浸透法.

省エネルギー的な工業的脱塩法である逆浸透法を用いて淡水を製造し灌漑水源とする場合を考える。

逆浸透法は、水分子を透過し塩イオン等の不純物の透過を阻止する機能性膜の一方で高圧の含塩水を流し、膜を透過してくる水を脱塩水として回収するものである。分離に際しては、蒸留のような大きなエネルギーを必要とする相変化は伴わないが、膜を介して浸透圧分の化学ボテンシャルが生じるので、これを超える圧力を加えなければ分離は起こらない。

通常の逆浸透法による海水脱塩のエネルギー消費の主要部分は、逆浸透モジュールに供給する供給原水昇圧ポンプの消費動力であり、その原単位は  $4 \sim 5 \text{ kWh/m}^3$  ( $14 \sim 18 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$  - 水) (鶴川・岩橋, 1990) である。

## (2) 逆浸透法による植林灌漑のエネルギー収支

検討結果を図3に示す。所要動力原単位を  $5 \text{ kWh/m}^3$  ( $18 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$  - 水)とした場合、単位灌漑面積当たりのエネルギーコストは  $11 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2/\text{y}$  となり、緑化により固定されるエネルギーの 65% 程度となる。しかし、消費動力が電力の場合は、発電効率が 33% 程度として  $33 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2/\text{y}$  の燃料消費となり、固定される炭素量より放出される炭素量が多くなり、炭素固定効率は 1 以下となる。

なお、逆浸透法による原水の塩濃度とポンプ動力の間にはほぼ直線関係が成立つので、海水 (塩濃度 35,000 ppm) より低い含塩水の場合は、相当の原単位削減の可能性がある。原水中の塩濃度が 4,000 ppm で脱塩率が 97~98% の場合、脱塩の動力原単位が  $2.4 \text{ kWh/m}^3$  ( $8.6 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$  - 水) であり、塩濃度により原単位が

$1.5 \sim 3 \text{ kWh/m}^3$  ( $5.4 \sim 11 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$  - 水) となる例が加美野 (1987) により示されている。

## 3) 海水淡水化による灌漑 [3]

### —太陽熱脱塩—

ケース [1] [2] で見たように、多段フラッシュあるいは逆浸透により、海水から淡水を製造して灌漑用水に供給する灌漑植林モデルでは、主要原単位だけで考えても炭素固定効率が 1 以下となり、炭素固定プロセスとしては機能しないことが明らかとなった。このため、更に灌漑水源として Basin 型の太陽熱脱塩装置を利用する場合について検討を行なった。太陽熱脱塩では、水と塩類の分離に要するエネルギーは太陽により供給されるので、所要エネルギーは原水と灌漑水の輸送動力のみとなり、化石燃料の使用量は少ない。

### (1) 太陽熱脱塩の概要

乾燥地では、太陽熱利用の脱塩法がある程度の規模で実用化されている。太陽熱脱塩装置には集熱器と蒸発器を一体とした直接型 (主として Basin 型) と两者を分け

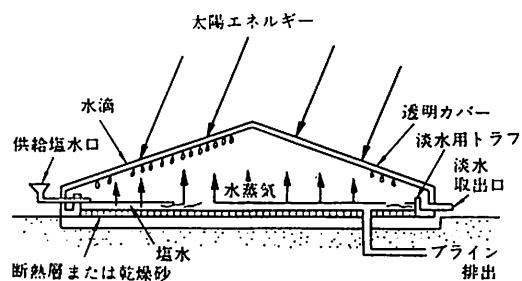


図4. Basin 型太陽熱脱塩装置 (後藤, 1983).

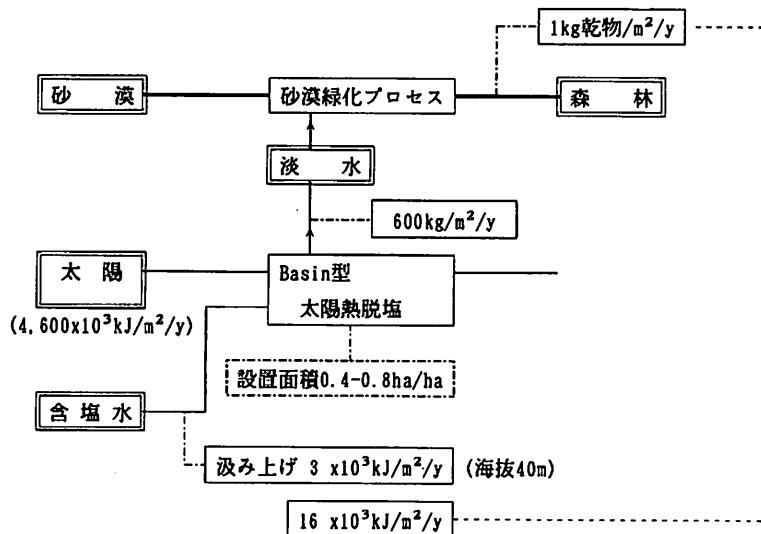


図5. 海水淡水化による灌漑 [3]: 太陽熱脱塩.

た間接型がある。直接型の代表である Basin 型は図 4 に示すようにガラス温室のような形状で、海水等の含塩水を満たした水槽と、それを覆う透明なカバーから成る。水槽は水漏れがなく、太陽熱の吸収がよいブチルゴム等でカバーされており、場合によっては更に断熱材等で保温を図る。カバーの材質はガラスや無色のプラスチック等で、耐候性が要求される。カバーには若干の傾斜がつけられており、低い方の端部にそって凝縮水を受ける取水溝が設置されている。原理的には、カバーを通して入射する太陽熱を吸収して熱せられた原水からの蒸気を、自然空冷されるガラスカバーの内面に凝縮させるもので、太陽熱の 50% 以上は装置の吸放熱、排出水への熱損失、地中への伝熱等で失われるが、太陽熱の利用効率としては 30~40% に達し、単純な設備としては熱効率は高い。1960 年代にオーストラリア、ギリシア、米国等で、合計 20 以上の Basin 型脱塩装置が建設されている。設備の規模は 1,000~10,000 m<sup>2</sup> の蒸発面積を持ち、造水量は 4~27 m<sup>3</sup>/日である（後藤・中嶋、1982）。沙漠地帯では、夏期に頻発する砂嵐による集熱量の低下に注意する必要がある。

#### (2) 太陽熱脱塩による灌漑植林のエネルギー収支

Basin 型太陽熱脱塩による灌漑緑化の結果を図 5 に示す。この場合は海水から塩分を除去するための分離エネルギーは太陽熱であるから、化石燃料は消費せず、用役としては原水の汲み上げや灌漑のためのポンプ動力だけである。Basin 型太陽熱脱塩の場合に問題となる点は、日射エネルギーの希薄さである。サウジアラビアあたりでの 12 × 10<sup>3</sup> kJ/m<sup>2</sup>・日（日本の真夏の晴天日の日射強

度は 20 × 10<sup>3</sup> kJ/m<sup>2</sup>・日）の平均日射強度でも、造水能力は 2~4 l/m<sup>2</sup>・日である。従って、年間造水量は 760~1,500 l/m<sup>2</sup>/y であるから、緑化面積 1 m<sup>2</sup> 当たり 0.4~0.8 m<sup>2</sup> の脱塩装置が必要ということになる。すなわち、緑化面積の約半分、例えば 100 万 ha の灌漑植林には、50 万 ha の脱塩装置を設置することになる。

なお、原水の汲み上げ動力は、例えば灌漑地域が海面から 40 m であれば、50% 濃縮で濃縮廃液を返送するとして、ケース [4] に後述する深井戸 (400 m) からの汲み上げ動力の 1/5 である。

#### 4) 深井戸利用による灌漑

##### (1) 深井戸利用の現状

上に述べた造水法の他に、乾燥地での未利用水資源として、深層地下水を灌漑用水として利用する例が報告されている（佐藤、1985, p. 20）。400~500 m の深井戸、時には 1,000 m にも達する井戸を堀り、被圧地下水の場合には、自噴することもある。なお、米国でも、ニューメキシコ中東部の半乾燥地帯の灌漑農業では 152~183 m の深さに達している井戸から灌漑水を汲み上げている例が紹介されている（パトリック、1980）。

##### (2) 深井戸利用による灌漑植林のエネルギー収支

ここでのモデルとしては、サウジアラビアの Faisal Settlement Project at Harad での計画を例にとり、平均地下水位 -400 m から汲み上げにより取水するものとして、灌漑用水を深井戸からの地下水とする場合についてエネルギー収支を検討した。結果を図 6 に示す。

深井戸用汲み上げポンプの所要動力は、カタログデー

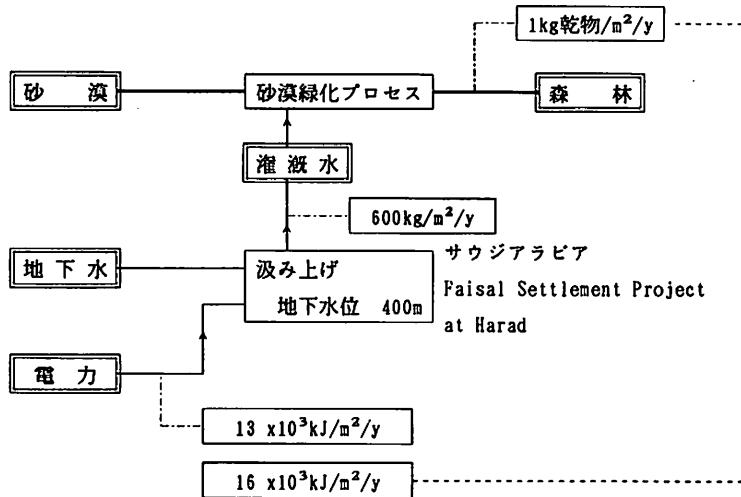


図6. 深井戸利用による灌漑.

タ(ツルミハンドブック, 1987)で400 mのヘッドを有する汎用ポンプは見当たらなかったので、250 mのヘッドで60 l/minを汲み上げる水中ポンプ(モーター出力: 5.5 kW)を想定し、所要動力を比例配分法により400 mに引き直した。消費動力は、ポンプモーターの定格の85%として発電効率を考慮して算出すると、 $13 \times 10^3$  kJ/m<sup>2</sup>/yとなる。汲み上げポンプの動力源を電力とする場合は、これのみで固定される炭素量の80%を放出することになる。

#### 4. 灌溉農業でのエネルギーコストの実際例

##### 1) 灌溉農業のエネルギー収支

ここでは、これまでの単純化した灌漑植林モデルに対

し、灌漑の用水の散布効率、灌漑設備のエネルギーコスト等を考慮した場合の、実用的な植林灌漑のエネルギー収支を、最も省資源型の灌漑と考えられる点滴灌漑の例で検討する。但し、緑化のための植林での点滴灌漑による灌漑水量の節約程度に関するデータは得られなかつたので、これに近いものとしてシェルキア灌漑プロジェクトにおける、灌漑農業での果樹のデータ(SHERKEYA GOVERNORATE, THE ARAB REPUBLIC OF EGYPT, 1983)を使用した。

ここでの果樹としては Citrus および Grape が考えられており、作物消費水量は、乾燥地帯、半乾燥地帯で用いられている、日照時間、気温、作物係数をベースとして "Blaney-Criddle Method" により算出されている。

プロジェクト立地条件は、年平均気温 22.9°C の熱帶

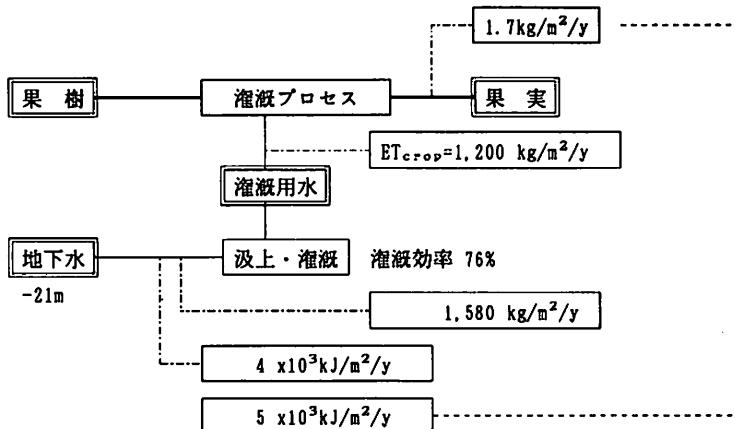


図7. 果樹の点滴灌漑: シェルキア灌漑プロジェクト.

気候で、12~1月は比較的寒く平均気温 20°C 以下、6~8月は暑く平均気温 29.1°C で、冬期平均湿度は約 60%、夏期は 40% で乾燥地帯に属する。降雨は、年平均 28.4 mm (5 カ年平均) で、そのほとんどが 12~1 月であり、作物に対する有効雨量はゼロと判断されている。なお、最近 5 カ年の平均蒸発散量は 8.3 mm/day である。

これらの果樹の点滴灌漑に要する灌漑水量は、灌漑効率を 76% として 1,580 kg/m<sup>2</sup>/y と算出されており、地下水面 21 m、散布圧、配管の圧力損失等を加味したポンプの全揚程 (H) は 57.6 m と計画されている。

果樹と一般樹木の灌漑効率を比較するデータは得られなかったので、ここでは、果実収穫量を純生産量としてエネルギー収支の試算を行なった。果実中の乾物重量は、夏ミカン (果肉と果皮の平均で 16.1%) (野村, 1968) で近似した。結果を図 7 に示す。本ケースは比較的地下水位が浅いため、果実のみで純生産を代表させているにもかかわらず、エネルギー収支は良好な結果が得られている。なお、塩積対策としてのリーチングの用水量は灌漑水量の 8% と見積られているが、ここでのエネルギー収支上は考慮していない。

## 2) 灌溉設備のエネルギーコスト

ここで、灌溉設備のエネルギーコストについて考えておく。点滴灌漑システムの敷設コストは、灌漑農業用途で、米国 (1985 年時点) で \$1,500~\$3,500/ha、補修コストは \$50~\$200/ha/y (Bucks and Davis, 1986) であるから、エネルギー単価を農業機械で 54 kJ/円、機械修理で 53 kJ/円 (1978 年におけるエネルギー単位) (昆, 1990) とし、為替レートを 1985 年の 250 円/\$ とする。点滴灌漑システムのエネルギーコストは、敷設で  $2.0 \sim 4.8 \times 10^3$  kJ/m<sup>2</sup>、補修で  $0.1 \sim 0.3 \times 10^3$  kJ/m<sup>2</sup>/y となる。設備の耐用年数が不明があるので、敷設に要するエネルギーコストを年ごとの炭素収支に分配することはできないが、例えば耐用年数を 5 年としても、敷設および補修に要する設備のエネルギーコストは  $0.5 \sim 1.3 \times 10^3$  kJ/m<sup>2</sup>/y と推定され、炭素収支を検討する上で支配

的な要因とはならないが、無視できないオーダーとなると考えられる。

また、灌漑水量も灌漑植林モデルの 600 kg/m<sup>2</sup>/y に対し、実際の灌漑農業システムの例である果樹の灌漑では、水経済の面で優れている点滴灌漑でも灌漑効率は 76% であり、灌漑水量自体も 1,580 kg/m<sup>2</sup>/y と、二倍以上になっている。これはさきに例を示した利根川水城の森林のように、環境条件によって、植物の蒸発散量が異なるためであろう。従って、乾燥地帯での現実的な灌漑植林の炭素収支は、ここでの灌漑植林モデルのような理想的なケースより悪化すると考えられる。

## 5. 地球規模の炭素収支における緑化の役割

地球規模での炭素ガス収支に及ぼす緑化の効果については、たとえば新田 (1989) の表 2 の試算結果が発表されている。

表 2 の試算結果では、現在森林となっていない未利用地であるサバンナ、草原、沙漠を 10~20% 緑化することにより、大気中に毎年増加している炭酸ガス量の約 30 億トンに近い量が固定できるとされている。しかし、これらの地域の植林による緑化は、降雨量が植生の制限条件となっており、植生を森林に変えるためには、単に樹木を植えるだけではなく、灌漑水の確保等、緑化のために別のエネルギー消費が発生することになる。灌漑により緑化を図るモデルでは、太陽熱脱塩以外はいずれの場合も、固定される炭素量を使用エネルギーの放出する炭素量で割った炭素固定率は、1 前後、または 1 以下である。これらのモデルが灌漑効率を 100% とした理想系であること、および設備建設等のエネルギーコスト並びに揚水や送水のエネルギーが以上の検討では考慮されていないこと等を考えると、現在の工業的脱塩による灌漑や深井戸に水源を頼る灌漑では、表 2 のような沙漠の緑化が炭素固定プロセスとして成立するとは考えにくい。

一方、太陽熱を利用した脱塩を灌漑植林に利用するこ

表 2. 森林による CO<sub>2</sub> の吸収固定。(新田, 1989)

生態系	面積 (1975 年) (百万 ha)	緑化による 炭素固定原単位 (t-C/ha/y)	緑化率 (%)	期待される 炭素固定量 (億 t-C/y)
サバンナ	1,500	4.0	10	6
温帯草原	900	5.0	20	9
砂漠・半砂漠	1,800	4.0	10	7
真的砂漠	2,400	3.0	10	7
合計	6,600	3.9(平均)		29

とは、極めて省エネ的な淡水製造技術である Basin 型のような単純な脱塩プロセスでは、太陽光のエネルギー密度が低いために受光面積が莫大となり、緑化面積の半分程度の装置設置面積が必要であるから、このままでは現実的とはいえない。

なお、表 2 では、沙漠・荒原・不毛地（1,000 百万 ha）と氷帶氷河・極地（1,400 百万 ha）に分かれている沙漠（依田、1982）を、眞の沙漠として一括して扱っている点にも問題があるが、降水量より環境の温度条件が植林の制限条件となる極寒沙漠地域での緑化には、本アプローチとは異なる検討が必要であると考えられる。

## 6. 地球温暖化対策としての沙漠の緑化

地球温暖化対策として、人類の永年の夢の一つである沙漠の緑化が炭素固定法として注目されている。しかし今回の検討で、沙漠緑化による炭素固定は乾燥地域で最も貴重な資源となる用水の確保がエネルギー収支上問題となることが明らかとなった。炭酸ガス削減対策として、現在の工業的造水プロセスを沙漠緑化プロセスに組み込むことは妥当ではない。また、太陽熱脱塩による水製造については、熱の多重利用などによりエネルギー収支を改善し、熱効率の向上をはかって受光面積を削減していく工夫が必要と考えられる。

高度な太陽エネルギーの利用方法としては、太陽電池を淡水製造（逆浸透または電気透析）に組み込むことにより、太陽熱の有効利用率の向上を行なうことが提案されている（加美野、1987; NEDO News, pp. 22-23, 1990, 7）。この場合も、トータルシステムとしては、現在の太陽電池製造技術では蓄電系のエネルギーコストが高く（馬場、1991）、プロセスのライフサイクルでのエネルギー収支上問題がある。今後、関連技術の進歩が望まれる。

淡水化以外の用水確保の方法として、地下水の利用についてもエネルギー収支を検討したが、深井戸の場合は、ポンプ動力が灌漑植林で固定される炭素の発熱量と同じ位必要となる可能性があるので、各々の具体例についてエネルギーコストを詳細に検討しなければ、炭酸ガス固定法として、温暖化対策上、有効となるか否かは、判定できない。

一方、沙漠地帯では独特の雨水の集約利用技術である Rainwater Harvesting が発達（HILLEL, 1971）している。これは、年間降雨量の少ない地域でも、広い面積に降った雨水を集めて利用すれば、充分な用水量が得られることを利用したもので、通常は沙漠と考えられる年間平均降雨量が 50~80 mm 以下のところでも Rainwa-

ter Harvesting による農業が行なわれている。もともとは青銅器時代から天然の地形を利用して行なわれていた集水技術であるが、1950 年代以降に人工的な地表被覆技術を利用した Rainwater Harvesting がオーストラリア西部やイスラエル等で実用化（NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE, 1974a）され、スーザンやポツワナにも導入されている。更に、この技術を応用して、一本の果樹の周囲に 16 m<sup>2</sup>~1,000 m<sup>2</sup> の集水エリアを確保するマイクロキャッチメントがイスラエルの Negev 沙漠で行なわれて（NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE, 1974b）いる。また、集水技術ではないが、中近東諸国ではクーゼと呼ばれる素焼のつぼを土中に埋設し、周囲に作物を栽培する極めて水経済の優れた小規模な灌漑方法（松本、1988）が行なわれている。

沙漠緑化を炭酸ガス固定システムとして機能させるためには、化石燃料に依存性の高い工業的プロセスの適用ばかりでなく、地域的には限定されるであろうが、このような省エネルギー灌漑技術を緑化システムに取り込むことが必要であろう。

## 謝 辞

本研究は、通商産業省補助金による（財）石油産業活性化センターの炭酸ガス有用化技術調査の一環として実施した。発表の許可をいただいたことに感謝する。

## 引用文 献

- 鶴川直彦・岩橋英夫(1990): 分離膜を用いたプロセスの問題点『膜分離技術マニュアル』205-216.
- 内島善兵衛・清野 諭(1988): 植物生産力と気候条件。『科学』58: 705-713.
- 加藤ほか編(1978): 「海水淡水化技術」: 77-90, 日本産業技術振興協会。
- 加美野(1987): 『中国の乾燥地における砂漠化の機構解明と動態解析(予備調査)』トヨタ財團助成研究報告書, 54 p.
- 小島紀徳(1990): 陸上植物による CO<sub>2</sub> 固定技術。『MOL』No. 5: 56-61.
- 後藤藤太郎(1983): 造水技術編集企画委員会編『造水技術—水処理のすべて—』アグネ, 132 p.
- 後藤藤太郎・中嶋義弘(1982): 太陽熱利用淡水化技術の現状と展望『太陽エネルギーの産業用への利用技術』382-386, フジテクノシステム。
- 昆 忠男(1990): 畑作におけるエネルギー使用と問題点「農業および園芸」65: 683-688.
- 佐藤一郎(1985): 『地球沙漠化の現状』消文社。
- 只木良也(1988): 『森と人間の文化史』日本放送出版協会 109 p.
- ツルミハンドブック(1987): ツルミグランドフォス深井戸水中ポンプ性能曲線『ツルミハンドブック』鶴見製作所, 248 p.
- 新田義孝(1989): 省エネルギーによるグローバルな CO<sub>2</sub> 排出削減と、緑化による CO<sub>2</sub> 吸収の推定。『燃料協会誌』68-10: 867-875.
- 野村男次(1968): 『果実・そう菜の加工・貯蔵ハンドブック』養賢堂, 302 p.

- 馬場 泰(1991): 地球環境から見た太陽光発電の可能性。「燃料協会誌」70: 17-25。
- パトリック(1980): ニューメキシコ州における農業生産のエネルギー使用類型。『食糧生産とエネルギー』: 317-329, 農林統計協会。
- 松本 聰(1988): 砂漠化の実態—ドライファーミングの教訓—。「科学」58: 618-623。
- 村田吉男(1980): 宮地ほか:『光合成と物質生産』理工学社, 437-475。
- 山田常雄ほか編:『生物学辞典 第三版』(1983): 岩波書店, 1320p.
- 依田恭二(1982): 大気中の二酸化炭素濃度に対する陸上生態系の影響。「地球化学」16: 78-85。
- BROECKER, W. S., TAKAHASHI, T., SIMPSON, H. J. and PENG, T.-H. (1979): Fate of Fossil Fuel Carbon Dioxide and the Global Carbon Budget. *Science*, 206: 409-418
- BUCKS, D. A. and DAVIS, S. (1986): *Trickle Irrigation for Crop Production*: 21-22, Elsevier.
- HILLEL, D. (1971): Artificial Inducement of Runoff as a Potential Source of Water in Arid Lands. *Food, Fiber and the Arid Lands*: 324-336, The University of Arizona Press.
- HOUGHTON, R. A., BOONE, R. D., MELILLO, J. M., PALM, C. A., WOODWELL, G. M., MYERS, N., MOORE, B. and SKOLE, D. L. (1985): Net Flux of carbon dioxide from tropical forests in 1980. *Nature*, 316: 617-620.
- MYERS, L. E. (1971): Water Conservation for Food and Fiber Production in Arid Lands. *Food, Fiber and the Arid Lands*: 302-309, The University of Arizona Press.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE (1974a): Rain water Harvesting. *More Water for Arid Lands*: 9-29, National Academy of Science, Washington, D. C.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE (1974b): Rain water Harvesting. *More Water for Arid Lands*: 29-31, National Academy of Science, Washington, D. C.
- SHERKEYA GOVERNORATE, THE ARAB REPUBLIC OF EGYPT (1983): *Feasibility Study Report on the Khattara Project for the Development of Desert Land—Main Report*: 4-5~4-10.
- WHITTAKER, R. H. and LIKENS, G. E. (1973): Carbon in the Biota. *Carbon and Biosphere*: 281-302, U.S. Atomic Energy Commission.
- WOODWELL, G. M., WHITTAKER, R. H., REINERS, W. A., LIKENS, G. E., DELWICHE, C. C. and BOTKIN, D. B. (1978): The Biota and the World Carbon Budget—The terrestrial biomass appears to be a new source of carbon dioxide for the atmosphere. *Science*, 199: 141-146.
- WOODWELL, G. M., HOBBIE, J. E., HOUGHTON, R. A., MELILLO, J. M., MOORE, PETERSON, B. J. and SHAVER, G. R. (1983): Global Deforestation: Contribution to Atmospheric Carbon Dioxide. *Science*, 222: 1081-1086.

## Energy Balance of Irrigated Afforestation of Desert for Carbon Fixation

Kazuo MATSUMURA\* and Toshinori KOJIMA\*\*

Energy Balance of irrigated afforestation in arid lands was studied to evaluate its contribution to the world carbon balance, since the desert afforestation has started to be claimed as one of the promising solution to reduce carbon dioxide, a green-house effect gas, accumulation to the atmosphere from fossile fuel combustion.

An irrigated plantation model of forest of C3-photosynthetic plant was developed for the energy balance calculation. The model demands 600 kg/sq. m/year of desalinated water, taking the irrigation efficiency being one hundred percent. Three industrial desalination processes: multi-stage evaporation, reverse osmosis and basin type solar still, and a deep well of 400 m depth were assumed as the water sources for irrigation, as the surface water and the shallow groundwater of low salt concentration are to be used for agriculture for food demand growing in the area.

The energy balance calculation, based on the major utility consumption for the desalination plants and the deep well, showed that none of these irrigated afforestation models contributes to substantial carbon fixation except for solar still. The basin type solar still will require, however, about one half hecter for sunlight receiving area to provide irrigation water to one hecter of forest even in the idealized irrigation water requirement.

It is necessary to develop highly energy efficient desalination processes for irrigated afforestation to become a solution to carbon dioxide accumulation to the atmosphere.

The study was conducted as a part of a research program of Petroleum Energy Center, Japan.

**Key Words:** Desert Afforestation, Carbon Balance, Irrigation, Green-house effect, Arid Lands

\* Life Engineering Business Development Center, Toyo Engineering Corp., Akanehama 2-8-1, Narashino 275 Japan.  
Mbara Laboratory, Petroleum Energy Center, Japan.

\*\* Department of Industrial Chemistry, Seikei University, Kichijoji Kitamachi, Musashino-shi 180 Japan.

# Water Balance and Evaporation Property on Bare Soils in Lysimeters under Constant Weekly Water Supply

Kuninori OTSUBO\*

## Abstract

Water balance on bare soils in lysimeters was studied with artificially controlled micro-meteorological parameters, such as room temperature and humidity, and soil temperature. The room temperature was set to 25°C in the daytime and 20°C at night, and the soil temperature was set at 20°C all the time. The humidity was 70% at night and 50 to 60% in the daytime. The influence of water supply (rainfall) volume and ground water level on the water balance was studied. Two cylindrical lysimeters, measuring 1.7 m in diameter and 2.3 m in height (we call them Lysi. #2 and Lysi. #4 here), packed with Light Colored Andosol, were used for the experiment in the non-vegetation condition. Lysi. #4 was frequently shaded by a structure over it. The surface at Lysi. #2 was aggregated more and was softer than that at Lysi. #4. The water balance was determined by evaporation for all experimental conditions. Only soil moisture on the surface and solar radiation seemed to affect the evaporation process in this series of experiments. To confirm these, the evaporation property was investigated precisely by the use of an "evaporation" pot and from the viewpoint of heat balance. The weekly evaporation estimated by heat budget method showed good agreement with that obtained by water budget. The evaporation process in the water pot qualitatively coincided well with that of the lysimeter; however, the evaporation rate of the water pot was always higher than that of the lysimeter. The evaporation process taking place in the lysimeters was categorized as the constant-rate stage of the drying process for all experimental conditions. The evaporation at night did not differ at Lysi. #2 and Lysi. #4 and was stable throughout a week. As the solar radiation in the daytime was much stronger at Lysi. #2 than Lysi. #4, the evaporation became larger at the former. The sensible heat flux was always from air to ground and accelerated the evaporation rate. This condition corresponds with the field where warm and dry air is blowing over the ground all the time.

**Key Words:** Water balance, Evaporation, Lysimeter, Bare soil

## 1. Introduction

Only about one-third of the earth's land is covered with forest and about one-fourth has undergone land degradation, especially severe in semi-arid areas. It is believed that humans have turned a huge area of the world into desert, especially over the past several decades. The desertification due to humans must not be allowed to continue. The fight against desertification is one of the most important programs to conserve the global environment.

It is believed that each area on earth possesses its own ecological system corresponding to

its carrying capacity. However, the ecological systems in the areas having a high potential of land degradation are so fragile that they are easily destroyed by over-cultivation or grazing, or improper waterlogging for example, and are gradually reduced to a barren desert. Human activities and plans for development must be based on the carrying capacity (maximum yield capacity) of an area. Otherwise, they will destroy the ecosystem there, which makes people give up on improving their living level and exposes them to danger as well.

It is a very important step for us to know the carrying capacity of the areas which are

\* National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, Japan (Received July 2, 1991; Accepted Sept. 21, 1991)

threatened by desertification. The carrying capacity as to water resources is one of the most important concepts in the areas having a high potential of land degradation. If one can know the volume and quality of water resources of the area and its available volume, one will be able to provide guidelines for economic activity for sustainable development. Furthermore, if one can predict the long-term trend in water balance and quality due to human activity or climate change, a system can be developed to warn of desertification at an early stage. However, doing so requires knowledge of the mechanism of water balance change and salinization in the area.

The best way to know the water balance in a particular area is to conduct a field observation. However, the study might be limited to a mere superficial adjustment of observed data to satisfy the water budget arithmetically and would be useless to predict how the water balance and water quality might change due to climate change or environment change such as introduction of irrigation, unless the mechanism controlling the water balance there is understood. It is believed that there are several micrometeorological parameters affecting water balance in air-soil sphere and the values of these parameters are always fluctuating. The effects of the fluctuations of these parameters on the water balance are overlapping and have time lags, therefore, it is very difficult for us to estimate how much a particular parameter affects the water balance from field observation data. When correlated to the study of actual water movement in soil, the experimental study of water balance under controlled environment is the best procedure for the above purpose. By controlling some micrometeorological parameters, we can study what kind of parameter controls the water balance and water percolation at a particular meteorological condition.

To begin with this kind of study, it is necessary to understand the water balance and the actual movement of water at a simple micrometeorological condition as the first step. The experiments with simple conditions lead us to understand the principles of the phenomena easily, and the obtained results are useful as

the controls to be compared with the experimental results obtained at different micrometeorological conditions. We conducted our experiments at a simplified Temperate Zone condition, because we have planned the experiments of desiccating and salt accumulating processes in the future. See Orsubo (1989) for the actual movement property of water in the lysimeter.

Although we assumed that the soils of the areas which are threatened by desertification were not sandy, we did not focus on a particular area in our study. The soil properties of Light Colored Andosol used in this experiment might be different from those of soils at the above areas; however, we do not think the knowledge obtained here is useless to discuss the mechanism of water balance of those area. Because the unsaturated hydraulic and thermal conductivities are different among soils, the percentages of percolation, evaporation and moisture retention of soil in water budget are different. Nevertheless, the basic principles which control percolation and evaporation process are the same among soils. The knowledge of the water balance and its controlling factors for one soil is surely useful for other soils.

## 2. Water Balance in Lysimeters

### 1) Experimental Procedure and Setup

The controlled parameters were temperature and humidity in the greenhouse where the lysimeters were located, and soil temperature. The room temperature was set to 25°C in the daytime and 20°C at night, and the soil temperature was set at 20°C all the time. Although the relative humidity was put at 60%, it was actually 70% at night and 50 to 60% in the daytime. Both room temperature and humidity varied in the daytime more than at night. The influences of water supply (rainfall) volume and ground water level on the water balance were studied. Two cylindrical lysimeters, measuring 1.7 m in diameter and 2.3 m in height were used for the experiment in the non-vegetation condition. Light Colored Andosol with 0.45 mm in median diameter and 0.48 mm in standard deviation of particle-size

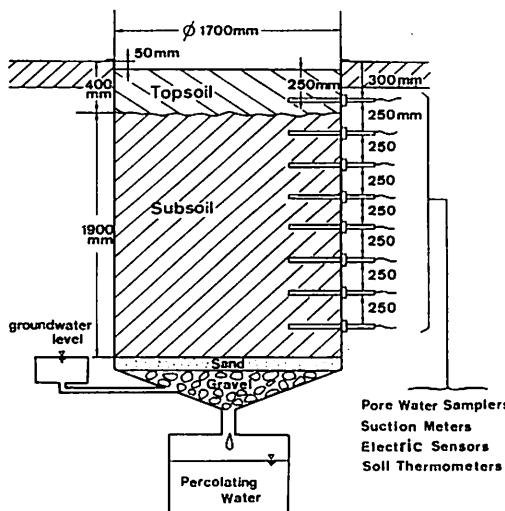


Fig. 1. Lysimeter schematic diagram.

distribution was packed in the lysimeters as shown in Fig. 1. We call them Lysi. #2 and Lysi. #4 here, and the subscript numerals 2 and 4 of parameters mean the values at Lysi. #2 and #4, respectively.

Pure water was supplied at a particular time on Monday morning by bucket. We confirmed beforehand that the supply procedure does not affect the weekly water balance. The influence of the ground water level on the water balance was studied in Lysi. #2 by changing the level from 2.3 m to 1.05 m from the surface, and that of the volume of water supply was studied in Lysi. #4 under the conditions of 65 l/week, 130 l/week and 32.5 l/week (2.86, 5.76 and 1.43

mm in height, respectively). Lysi. #4 was frequently shaded by a structure over it. The void ratio of soil surface was about 75% at Lysi. #2 and 72% at Lysi. #4, and their averaged saturation index was about 77% and 86%, respectively. The surface at Lysi. #2 was aggregated more and was softer than that at Lysi. #4.

The amount of weekly evaporation was calculated by subtracting the weekly percolated volume from the supplied water. Precisely speaking, the change of total water volume in the lysimeter must be considered in the above calculation; however, it changed very little because the pattern of weekly percolation was stable under the same experimental condition for a month. As to solar radiation, only the field data about 5 km away from the greenhouse were available in discussing the long-term trend in water balance.

## 2) Results and Discussion

Figures 2 and 3 show the long-term trend in weekly maximum suction values at different levels, deeper than 10 cm from the surface, at Lysi. #2 and #4, respectively. The suctions of Lysi. #2 decreased due to the increase of the ground water level, which means the soil moisture increased. The results of Fig. 3 show that the increase of water supply also makes the soil more humid.

Figures 4 and 5 show the long-term trends in weekly percolation and evaporation of Lysi. #2

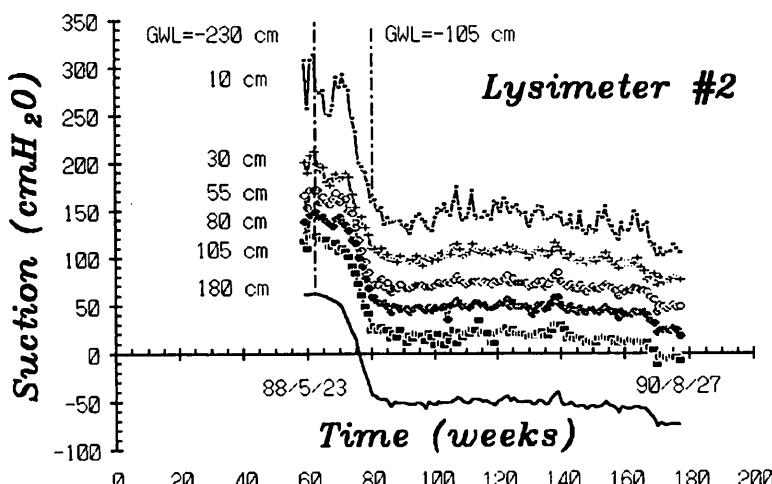


Fig. 2. Long-term trends in suction just before water supply at different depths of Lysi. #2.

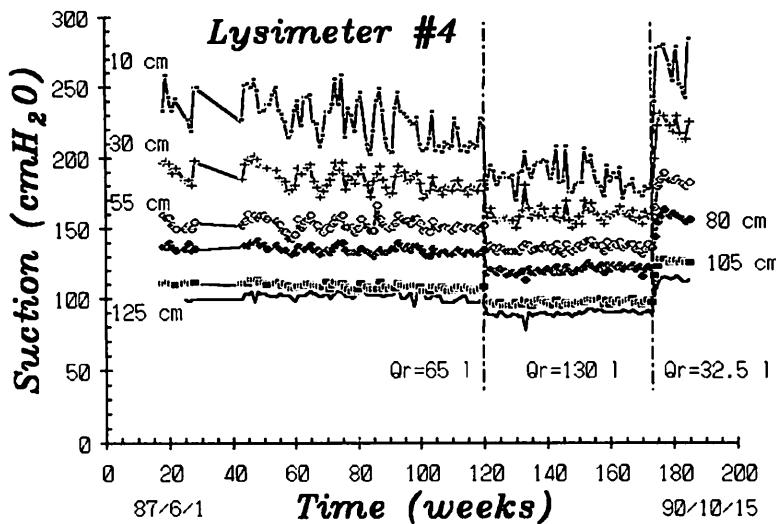


Fig. 3. Long-term trends in suction just before water supply at different depths of Lysi. #4.

and #4, respectively. The field data of solar radiation are also shown in each figure. The actual solar radiations on both lysimeters were much lower than in the field data. The seasonal pattern of percolation at Lysi. #2 has a phase the reverse of the solar one, while the percolation at Lysi. #4 had no remarkable seasonal pattern but depended on the water supply level. The patterns of evaporation were very interesting. The evaporation at Lysi. #2 did not seem to be influenced by the ground water level, although it was affected by the solar radiation. The evaporation at Lysi. #4 did not depend on the water supply volume either.

Figure 6 shows the correlation between the evaporation and the solar radiation in the field. The solid lines in the figure are the regression lines between them for different conditions. The evaporation was greater at Lysi. #2 than at Lysi. #4 and the regression lines of the former were steeper than those of the latter. These facts may probably be attributed to the differences in the soil structures at the surfaces in the two lysimeters and actual solar radiation on them. The figure also suggests that one regression line can be drawn practically for each lysimeter, irrespective of the amount of water supply or the ground water level.

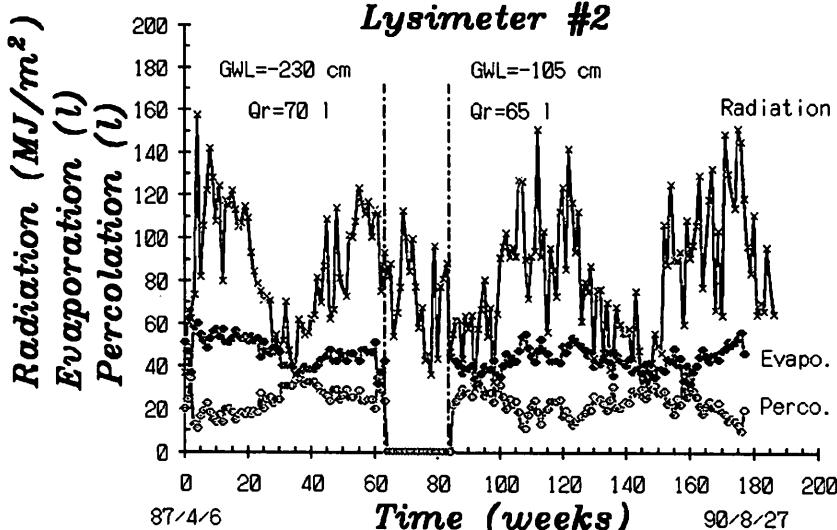


Fig. 4. Long-term trends in weekly percolation, evaporation and solar radiation at Lysi. #2.

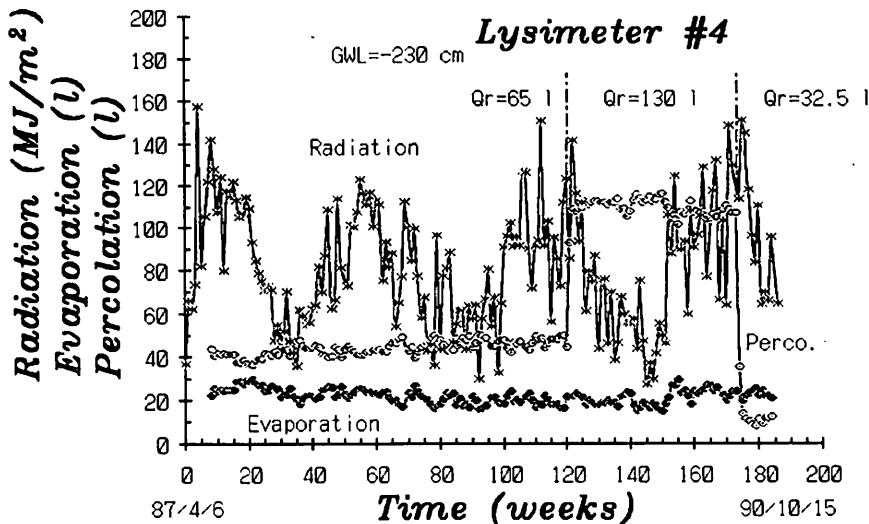


Fig. 5. Long-term trends in weekly percolation, evaporation and solar radiation at Lysi. #4.

Figure 7 shows the long-term trend in the weekly statistics of temperature fluctuation of the ground surface at Lysi. #4, *i.e.* maximum, minimum and mean values, and standard deviation. The seasonal patterns of the maximum and mean values have the same phase as that of the solar radiation; however, their amplitudes are very small. The long-term trend in soil surface temperature data did not have any clear dependence on either the ground water level or the amount of water supply (OTSUBO, 1990a, c). Almost the same results were obtained at Lysi. #2; however, the temperature at Lysi. #2 was a bit higher than at Lysi. #4.

Table 1 shows the volumetric soil moisture  $\theta$  at 3 cm layer of Lysi. #2 and Lysi. #4 measured every 9:30 a.m. The values tend to decrease for each condition; however, the decreasing rates drop to zero very rapidly. The soil moisture at Lysi. #4 is greater than at Lysi. #2. Although the amount of water supply in the third condition was four times that in the fourth, the moisture content in the former was not remarkably greater than in the latter. This result contrasts with that for suction  $\phi$  shown in Fig. 3, partly because the value of  $b$  in the power law expression of  $\theta=\phi^{-b}$  is so large 6 to 7 at Lysi. #2 and more than 10 at Lysi. #4 that

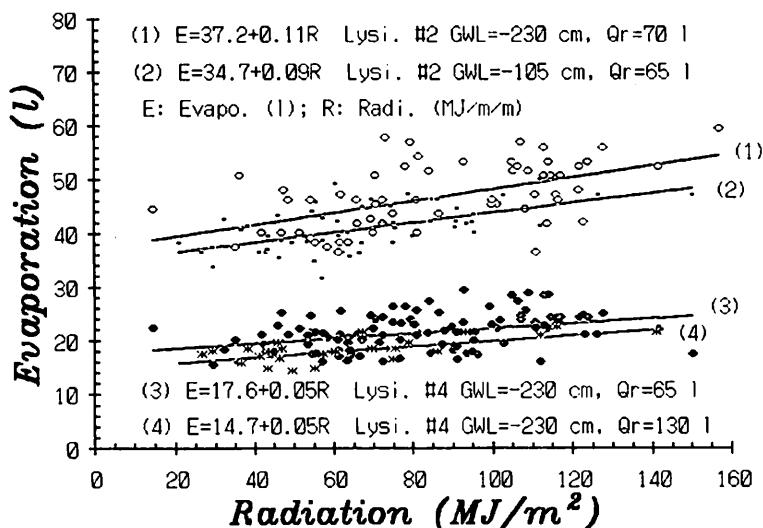


Fig. 6. Dependence of evaporation on solar radiation measured in the field.

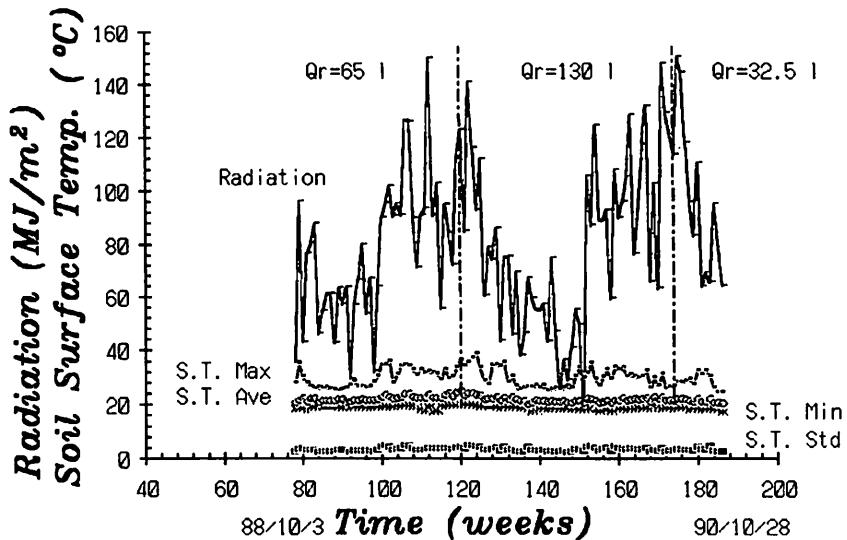


Fig. 7. Long-term trends in weekly statistics of soil surface temperature at Lysi. #4.

Table 1. Daily trends in volumetric soil moisture at 30 mm deep.

Lysi. No.	G.W.L. (m)	$Q_r$ (l)	Volumetric Moisture Content $\theta$							
			MON.*	TUE.	WED.	THU.	FRI.	SAT.	SUN.	MON.**
#2	1.05	65	0.64	0.60	0.59	0.58	0.57	0.57	0.58	0.58
		32.5	0.62	0.58	0.58	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
#4	2.30	130	0.72	0.66	0.66	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64
		32.5	0.70	0.66	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63

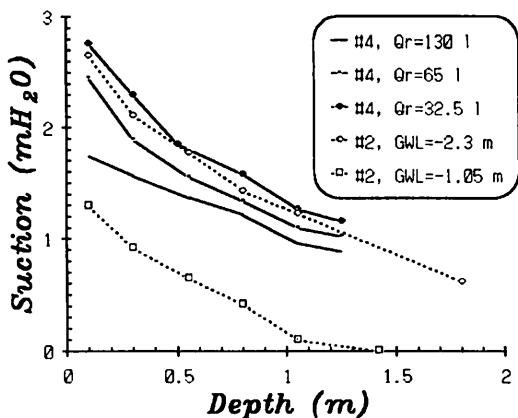
MON\* : Just after water application of  $Q_r$ .MON\*\*: Just before water application of  $Q_r$ .

Fig. 8. Vertical profiles of suction just before water supply.

$\theta$  changes little even if  $\phi$  changes rather markedly.

The weekly amount of evaporation seemed

to have a particular range for each lysimeter. Let us discuss why the evaporation was stable for each lysimeter under different conditions. The upward flux of water in soil (*i.e.*, evaporation) is determined by the product of the suction gradient and unsaturated hydraulic conductivity at the soil surface. Figure 8 shows the gradients of suction just before water supply under different conditions. The gradients tend to be high when groundwater level is low and water supply is small. In general, the unsaturated hydraulic conductivity becomes lower in these conditions. These two parameters cancel out their individual influences. Therefore, the evaporation does not change very much in drying conditions, such as when water supply decreases and the groundwater level drops. For the wetting conditions, the stable evaporation rate can be explained by the

cancelling out of the two parameter influences.

The water balance of the lysimeters in controlled room temperature and humidity and soil temperature may be summarized as follows:

- 1) Water balance was determined by evaporation for all cases.

- 2) Evaporation was greater at Lysi. #2 than at Lysi. #4, but was affected by neither the groundwater level nor the amount of water supply.

- 3) Moisture at the surface and the solar radiation seemed to affect evaporation.

- 4) This moisture depended on the soil structure, not the groundwater condition or water supply volume, except for just after water supply.

- 5) The ground surface temperature did not differ statistically very much at the two lysimeters despite variation in solar radiation, evaporation and soil moisture.

### 3. Evaporation Property of Lysimeters

The above discussion requires investigation of the mechanism of evaporation from the soil surface in order to understand the water balance in the lysimeters. The evaporation flux of the lysimeter and its time variation cannot be determined directly unless the lysimeter is a weighing one. Therefore, we adopted the following two procedures to evaluate the flux and understand its variation over time.

#### 1) Experimental Procedures

##### (a) Evaporation pot

Cylindrical pots with  $100 \text{ cm}^2$  and 7 cm in height were used as "evaporation" pots (OTSUBO, 1990b). Two pots filled with water or wet Andosol were set on electric balances which were located on Lysi. #2 and #4, and their weight was recorded automatically. The evaporation rate (flux) was evaluated from the time variation of the weight.

##### (b) Heat budget method

We attempted to evaluate the evaporation flux of the lysimeters in the daytime or at night, adopting the heat budget method (OTSUBO, 1991). For this purpose, we monitored the time variation of parameters concerned

with the heat balance. Solar radiation was measured at Lysi. #2. As mentioned before, the solar radiation was much weaker on Lysi. #4 than Lysi. #2. The time variation of soil temperature was measured at twelve levels in the lysimeters (OTSUBO and KUBOI, 1990). The room temperature and humidity were measured at 5 mm, 0.2 m and 1.5 m above the soil surface of each lysimeter. These data were restored on a memory card automatically at an appointed time interval by an electric recorder (Yokogawa HR2300).

#### 2) Results of Evaporation Experiments

##### (a) Results obtained by evaporation pot

Figure 9 shows the correlations between the daily evaporation  $E_{pd}$  (mm) of two pots, one filled with water and another with wet Andosol, and the solar radiation  $R$  ( $\text{MJ/m}^2/\text{d}$ ). The evaporation of the two pots obviously had the same dependence on the solar radiation. We found that the two pots had the same evaporation strength at night judging from the time variations of their weights. These facts suggest that the evaporation process of wet soil can be studied by substituting water for the wet soil. On the other hand, we found that the evaporation flux of the soil pot decreased very rapidly to zero when its surface had dried up. (It usually began 5 or 6 days after the initial wet condition under no additional water supply.) By conducting the experiments of water and soil pots, we could study the two different types of evaporation stages.

Figure 10 shows the time variation in the evap-

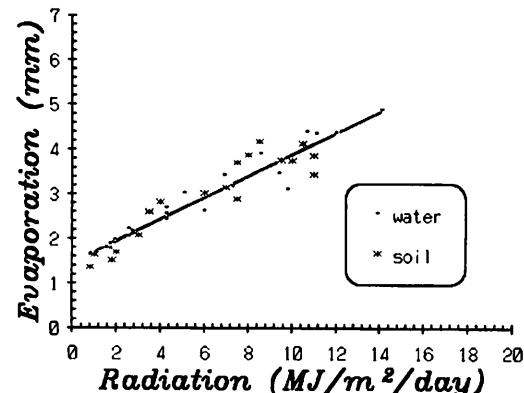


Fig. 9. Dependence of daily evaporation in the two pots on solar radiation.

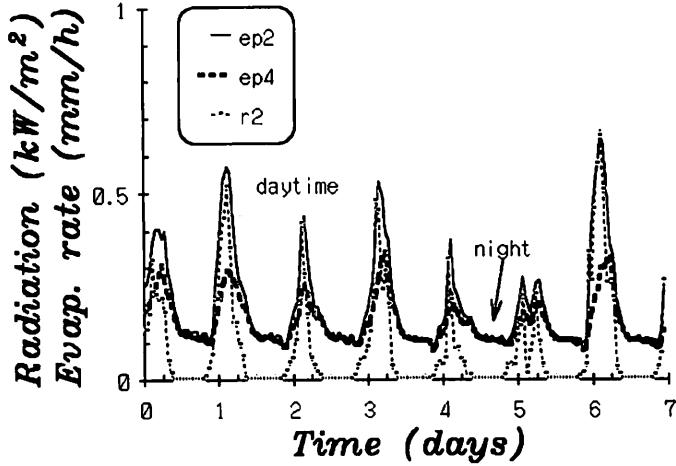


Fig. 10. Time variations of evaporation rate of water pot and solar radiation.

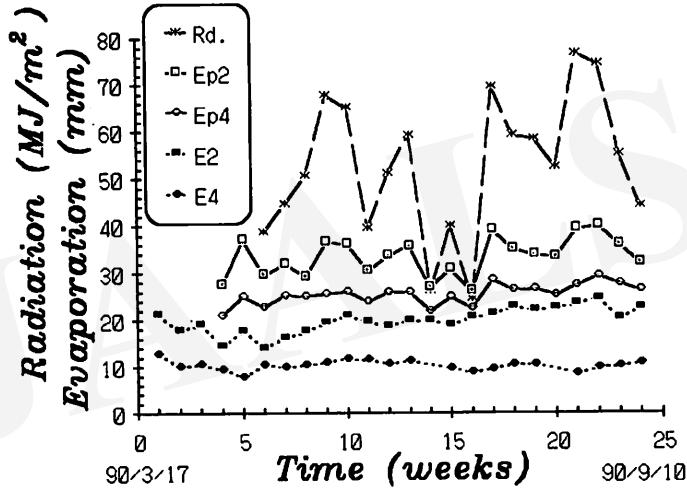


Fig. 11. Comparison of estimated weekly evaporation by location and method.

oration rates of the water pots,  $e_{p2}$  (at Lysi. #2) and  $e_{p4}$  (at Lysi. #4) in mm/h, and the strength of the solar radiation  $r$  in  $\text{kW}/\text{m}^2$ . Throughout a week,  $e_{p2}$  was equivalent to  $e_{p4}$  every night at about 0.12 mm/h, slightly decreasing toward dawn, while in the daytime  $e_{p2}$  was always larger than  $e_{p4}$ , though they each showed a good response to  $r$ . This is probably because the actual solar radiation was weaker at Lysi. #4 than Lysi. #2.

Figure 11 shows the weekly evaporation of the water pot at Lysi. #2 and Lysi. #4,  $E_{p2}$  and  $E_{p4}$ , and those of Lysi. #2 and Lysi. #4 themselves,  $E_2$  and  $E_4$ . The values of  $E_2$  and  $E_4$  were obtained by estimating the data of Figs. 4 and 5 in mm. The value of  $E_{p2}$  did not depend on its

location in Lysi. #2, but  $E_{p4}$  varied with the location with a range of about 30% between maximum and minimum values. The maximum value is used as  $E_{p4}$  here. We note that the order of evaporation were  $E_{p2} > E_{p4} > E_{pn} > E_4$ , and  $E_2 > E_4$ , in which  $E_{pn}$  is the weekly evaporation of the water pot estimated from the night data of 0.12 mm/h, at about 20 mm. From the above relation, we find that the evaporation is higher at Lysi. #2 than at Lysi. #4 for both cases of the pot and the lysimeter; also, the weekly evaporation obtained by the pot was too high compared with the weekly evaporation of the lysimeters. The correlation between  $E_{p2}$  or  $E_{p4}$  and the weekly solar radiation  $R$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) was clearly high, while the correla-

tion between  $E_2$  or  $E_4$  and  $R$  was weak.

Figure 11 does not give us any concrete information about the evaporation process of the lysimeters themselves. For instance, we cannot say whether their evaporation properties were the same as those of the water pots. Such information will be given from the following results of the heat balance around the lysimeters.

#### (b) Evaporation of lysimeters

Heat (energy) balance on bare ground in a lysimeter is expressed as

$$J_0 = L_E + A + S \quad (1)$$

in which,  $J_0$  is net radiation,  $L_E$  is latent heat flux,  $A$  is sensible heat flux, and  $S$  is heat flux

from air to the ground. If the Bowen ratio  $\beta$  is given, the latent and sensible heat flux are expressed as follows:

$$L_E = (J_0 - S)/(1 + \beta) \quad (2)$$

$$A = \beta(J_0 - S)/(1 + \beta) \quad (3)$$

For a given  $L_E$ , the evaporation flux  $E$  (mm/h) is expressed as

$$E = L_E / (\rho \cdot l_w) \quad (4)$$

in which,  $\rho$  is water density and  $l_w$  is the latent heat of water.

The value of  $\beta$  was estimated from the gradients of room temperature  $\Delta T$  and vapor pressure  $\Delta e$  by  $\xi_0(\Delta T/\Delta e)$  in which  $\xi_0 = 0.66$  mbar/°C (see DANIEL, 1980). The vapor pressure was calculated from the relative humidity

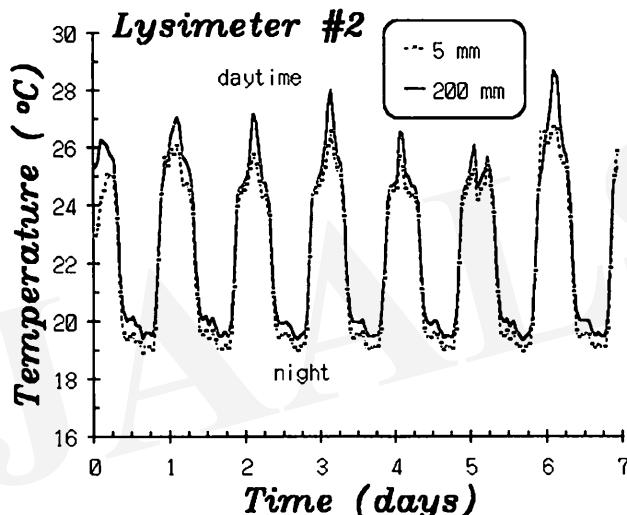


Fig. 12. Time variation of room temperature at 5 mm and 200 mm above the surface of Lysi. #2.

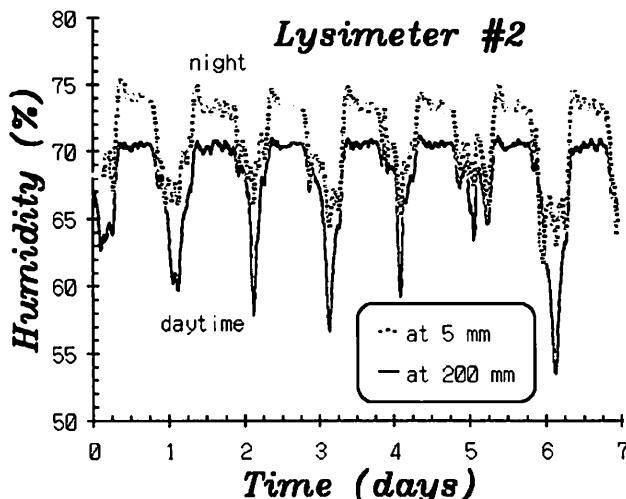


Fig. 13. Time variation of room humidity at 5 mm and 200 mm above the surface of Lysi. #2.

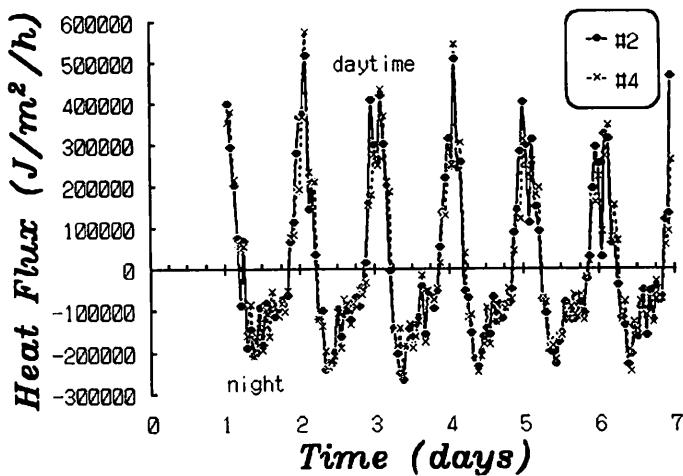


Fig. 14. Time variations of heat flux from air to ground at Lysi. #2 and #4.

data. The value of  $S$  is estimated from the vertical profile data of soil temperature. The value of  $J_0$  basically is estimated from the data on solar radiation.

Figure 12 shows the time variations of room temperature at 5 mm and 0.2 m above Lysi. #2. The time variation of the temperature at 1.5 m was almost the same as at 0.2 m above the surface. The temperature was always lower near the surface than at 1.5 m during night. This was mostly true in the daytime. The temperature near the surface decreased toward dawn, so the evaporation rate decreased then as shown in Fig. 9.

Figure 13 shows examples of the time variations of room humidity taken at Lysi. #2. The humidity was higher near the surface than at 0.2 m each night. In the daytime, this was also true, although the values fluctuated greatly due to the solar radiation. When the solar radiation was stronger, the humidity tended to decrease and fluctuate more at each elevation. The time variation of humidity at 1.5 m was similar to that at 0.2 m. Figure 13 suggests that the latent heat flux was always plus, which means that water evaporated from soil all the time.

Figure 14 shows examples of the time variation of heat flux from air to the ground at Lysi. #2 and Lysi. #4. The time variations were almost the same for both lysimeters. Although the soil temperature fluctuated more at Lysi. #2 than Lysi. #4 for each level, the specific heat

was less at the former because of its lower soil moisture. Consequently, the heat flux from air to ground was no different for either lysimeter.

The room temperature and humidity and the heat flux from air to the ground repeated almost the same pattern every night as shown in Figs. 12, 13 and 14. This suggests that the sensible heat flux, the latent heat flux and the heat flux from air to ground during night remained stable throughout a week.

Table 2 gives examples of weekly heat flux from air to ground in the daytime and at night for two sunny weeks and cloudy weeks. There was no big difference between Lysi. #2 and Lysi. #4 each week. The direction of heat flux was opposite for day- and nighttime, and the level was a bit higher at night. The heat flux from air to ground in the daytime was about 10 to 20% of the solar radiation.

Table 3 shows the estimated weekly averaged values of the Bowen ratio in the daytime and at night for the same weeks in Table 2. For weeks when cloudy days were prevalent, we estimated the daytime Bowen ratio for sunny days and cloudy days separately. The Bowen ratios have minus values in most cases, ranging around  $-0.45$  at night and in the cloudy daytime for the most part. These results indicate that the sensible heat flux was transmitted from air to soil all the time, and this flux subsequently enhanced the evaporation from the lysimeters.

Table 4 shows the weekly evaporation from

Table 2. Estimated values of weekly heat flux from air to ground.

Date	Radiation (MJ/m <sup>2</sup> /w)	Heat Flux in Soil (MJ/m <sup>2</sup> /w)				
		Daytime		Night		
		Lysi. #2	Lys. #2	Lys. #4	Lys. #2	Lys. #4
90/ 5/28	65.06		6.45	5.37	-7.72	-5.87
90/ 8/20	74.47		8.12	8.27	-8.57	-8.66
90/ 9/24	22.70		4.25	4.97	-5.66	-5.82
90/10/29	37.00		5.83	5.65	-5.58	-6.87

Table 3. Calculated Bowen ratios.

Date	Averaged Bowen ratios					
	Lysimeter #2			Lysimeter #4		
	Daytime		Night	Daytime		Night
	fine	cloudy		fine	cloudy	
90/ 5/28	-0.175		-0.172	-0.149		-0.145
90/ 8/20	-0.129		-0.295	-0.448		-0.251
90/ 9/24	-0.016	-0.447	-0.414	-0.019	-0.430	-0.483
90/10/29	0.196	-0.372	-0.468	0.412	-0.524	-0.468

Table 4. Estimated weekly evaporation by heat budget method.

Date	Weekly Evaporation					
	Lysimeter #2			Lysimeter #4		
	$Q_r - Q_p$ (mm)	$E_t$ (mm)	$E_d$ (mm)	$E_n$ (mm)	$Q_r - Q_p$ (mm)	$E_n$ (mm)
90/ 5/28	20.87	23.18	19.38	3.79	11.68	3.23
90/ 8/20	24.43	26.44	21.50	4.94	9.62	4.72
90/ 9/24	14.05	10.73	7.10	3.63	10.53	4.58
90/10/29	14.22	12.98	8.72	4.26	9.91	4.49

$Q_r$ : Applied water,  $Q_p$ : Percolated water,  $E_t$ : Estimated evaporation in mm given by  $E_d + E_n$ ,  $E_d$ : Estimated evaporation in daytime, in which an effective net radiation was assumed to be 0.7 of the solar one,  $E_n$ : Estimated evaporation at night

the lysimeters estimated by the heat budget method. The evaporation was estimated separately for the daytime (5 : 30 a.m. to 6 : 30 p.m.) and night. Because the solar radiation was not measured at Lysi. #4, only night evaporation was estimated for Lysi. #4. The data of six days, Tuesday through Sunday, were used for the calculation and revised on a weekly basis. This is because water was supplied on Monday, so the micrometeorological parameters showed different patterns from those of other days.

The estimated evaporation at Lysi. #2 displayed good agreement with the amount determined by the weekly water budget,  $Q_r - Q_p$ . The table indicates that the evaporation at night was almost the same for the two lysimeters.

### 3) Discussion on Evaporation Properties

It is believed that soil evaporation is in the damping-rate stage when the volumetric moisture of the soil is under 75% (THE JAPAN RE-

SEARCH ASSOCIATION OF SOIL PHYSICS). In this experiment, the volumetric moisture at surface was 60% at Lysi. #2, 67% at Lysi. #4. However, the results of Figs. 12, 13, 14 and Table 4 indicate that the evaporation at the lysimeters was in the constant-rate stage as well as that of the water pot, being controlled only by external conditions, such as evaporative demand determined by atmospheric evaporativity and soil surface condition.

The evaporation at the lysimeters and the water pots did not depend on location at night, so the results of  $E_{p2} > E_{p4}$  or  $E_2 > E_4$  should be attributed to the difference of evaporation in the daytime, which was caused by different solar radiation at the two locations. The solar radiation was much stronger at Lysi. #2 than at Lysi. #4. (Precise statistics will be reported in future.) Nevertheless, the amount of heat flux to soil was not so different, because the difference in solar radiation was converted to latent heat flux from the soil surface.

The reason why  $E_p$  was much larger than  $E$  for both locations is as follows: Both  $E_p$  and  $E$  showed evaporation at the constant-rate stage, so the respective amounts should be determined only by their evaporative demands and the ground surface conditions. We considered that the large difference in their evaporative demands caused the relation that  $E_p$  is remarkably higher than  $E$ . The pot was small and easily warmed by solar radiation and warm air, thus keeping the saturation vapor pressure higher at all times. The stronger dependence of the water pot evaporation on the solar radiation supports the above explanation. The influence of water pot height on evaporation was studied and the variation due to the elevation was found to be only around 10% of the weekly evaporation in the pot. Thus, the pot elevation was not responsible for  $E_p$  being remarkably higher than  $E$ .

The following are considered reasons why the weekly evaporation of the lysimeters did not react to the weekly solar radiation. In low solar radiation due to clouds, the downward sensible heat flux increased and enhanced evaporation at the lysimeters. Thus, the evaporation on a cloudy day did not differ much from that on a fine day.

The evaporation process taking place at the lysimeters was categorized as a drying one in which the groundwater level was very deep or variable, because our lysimeters can keep the groundwater at a predesignated level when the level is rising, but cannot do so when it is falling. The drying process is believed to have two evaporation rate stages, a constant-rate one and damping-rate one (DANIEL, 1982). Only the constant-rate stage, in which the evaporation strength was determined by external conditions such as evaporative demand and soil surface, occurred in our experiments. This is probable because the capillary water always reached the soil surface under our experimental conditions.

The water and heat balances of the lysimeters should be studied under the condition that the capillary water does not reach the soil surface (the damping-rate stage) in the future. Although the supplied water was redistributed in soil, partially evaporating into air, the redistribution did not seem to affect the water balance in the constant-rate stage, where the water balance was determined only by the evaporation, i.e., the external conditions. However, the evaporation and redistribution processes may closely affect each other at the damping-rate stage, because the evaporation strength depends on internal as well as external lysimeter conditions.

#### 4. Conclusions

The water balance and evaporating properties of the lysimeters were studied under controlled condition in which the room temperature was 25°C in the daytime and 20°C at night, and the soil temperature was 20°C all the time, and relative humidity was 70% at night and around 55% in the daytime. The results obtained under the above controlled condition were as follows:

- 1) Neither ground water level nor amount of rainfall (water supply) affected the water balance.
- 2) Higher moisture on the soil surface and strong solar radiation increased the weekly amount of evaporation.
- 3) The sensible heat flux was always from

air to ground and accelerated the evaporation rate.

4) As the solar radiation in the daytime was much stronger at Lysi. #2 than Lysi. #4 (frequently shaded), the evaporation became larger at the former.

5) The evaporation at night did not differ at Lysi. #2 and Lysi. #4 and was stable throughout a week.

6) The evaporation of the two lysimeters was found controlled only by the evaporative demand determined by micrometeorological conditions.

### Acknowledgements

The field data of the solar radiation were kindly provided by Dr. FUJINUMA of our institute. The author very much appreciates his generous cooperation.

### References

- DANIEL, H. (1980): Applications of Soil Physics. Academic Press, 197-215.  
 DANIEL, H. (1982): *Soil and Water—Physical Principles*

*and Processes*. (Japanese version: supervised by IWATA, S. and translated by TAKAMI, S. and UCHIJIMA, Z.), Yokendo, 180-198. (in Japanese)

THE JAPAN RESEARCH ASSOCIATION OF SOIL PHYSICS ed.: *Encyclopedia of Terms on Soil Physics*. Yoken-dō, 177 p. (in Japanese)

OTSUBO, K. (1989): Considerable difference between the velocity of water percolation and that of soil moisture profile in a lysimeter. *J. Hydroscience and Hydraulic Eng.*, 7-1: 13-22.

OTSUBO, K. (1990a): Movement properties of water in lysimeters (IV). *Proc. 45th Annual Conference of J.S.C.E.*: 8-9. (in Japanese)

OTSUBO, K. (1990b): Experimental study on the evaporation from bare soil surfaces. *Proc. Annual Conference in 1990 of Society of Environmental Science, Japan*: p. 9. (in Japanese)

OTSUBO, K. (1990c): Experiment on the water balance of bare soils in lysimeters. *Proc. First Annual Conference of Japan Association of Arid Land Studies*: 25-26. (in Japanese)

OTSUBO, K. (1991): Experimental study on water and heat balance on bare soils in lysimeters. *Proc. Hydraulic Eng., J.S.C.E.*, 35: 1-8. (in Japanese)

OTSUBO, K., and KUBOI, T. (1990): Experiment on water percolation in a lysimeter—Computer-aided automatic measurement and data analysis—. *Proc. Hydraulic Eng., J.S.C.E.*, 34: 695-700. (in Japanese)

## 裸地ライシメータにおける定期的な撒水条件での水収支及び蒸発特性

大坪国順\*

半乾燥域を中心に地球上の陸地の約4分の1の地域で進行している砂漠化（土壤荒廃）問題に対処するにあたっては、水質を含めた水資源の観点から見た環境容量の把握は重要なものである。人為的原因もしくは気候変動に伴う水循環の長期変動の予測には、水循環に及ぼす環境諸因子の影響評価が大前提である。しかし、現状では水循環系の複雑さのため現地観測による評価はほとんど進んでいない。著者らは、温室内に設置された大型ライシメータを用いた実験により、土壤-大気系での水循環メカニズムを降雨の土壤中での実際の移動特性と関連づけて理解する研究を進めている。本報告は、温室内の温度、湿度及び土壤温度を温帯に近い単純な状態に制御して、地下水位、降雨（撒水）条件を変化させて水・熱収支を求め、これら因子の水・熱収支への影響の有無を調べ、水収支に関する支配的因子の同定を試みたものである。単純な微気象条件にすることによって、水収支や不飽和浸透現象の基本的なメカニズムが理解しやすくなり、また、今後土壤の乾燥化や塩類集積化過程を検討する上で必要な貴重な比較データが得られる。水収支に関する実験結果から週間蒸発量が週間水収支の内訳を決めていることが明らかとなった。また、今回の微気象条件では、土壤からの蒸発強度は温度、湿度、日射量などの外部条件によってのみに支配され、地下水位、降水量によらず、昼間は日射量により変動するが、夜間は1週間を通じて一定となっていることが明らかとなった。

\* 環境庁国立環境研究所水土壌圈環境部

(受付: 1991年7月2日, 受理: 1991年9月21日)

# Distribution Patterns of Buried Seeds in the Herbaceous Lomas Community over the Entire Plateau on Loma Ancon in the Coastal Desert of Central Peru

Nobuhiko OHGA\*

## Abstract

Herbaceous lomas vegetation in the Peruvian coastal desert establishes only in spring, and its habitat is limited to the southern slopes along the coast which are heavily wetted by the thick fog. The duration and the thickness of the fog vary greatly from year to year, and herbaceous lomas community can not always germinate every year. Judging from the distribution of buried seeds in the soil, whole areas of the plateau had once been covered by the herbaceous lomas. The percentage of viable seeds is only 2.8% of all seeds. If the dry conditions continue for much longer, the establishment of lomas over much of this plateau will not occur and may take place only on the plateau edge frequently affected by fog.

**Key Words:** Dead seeds, Distribution pattern, Fog, Herbaceous lomas, Viable seeds

## 1. Introduction

One of vegetation types in the lowlands of the Peruvian coastal desert is a patchy belt vegetation, known as 'lomas', established on the seaward slope of the coastal range running parallel to the coast (VARGAS, 1940), and occurs along the Pacific coast of South America from about 5°S to 30°S (WEBERBAUER, 1939; FERREYRA, 1960; ENGLE, 1973; SARMIENTO, 1975). There are five types of lomas vegetation: 1) Herbaceous lomas [HL], 2) Shrubby lomas, 3) Bromelian lomas, 4) *Tillandsia* lomas and 5) Cacti lomas (FERREYRA, 1953). All of these are maintained mainly by the moisture supplied from a thick sea-fog, called 'garua' (WEBERBAUER, 1911; TROLL, 1948, 1956; ELLENBERG, 1959, 1981; FERREYRA, 1960). The establishment and development of HL community is influenced most seriously by the soil moisture contents. The constituent species of HL vegetation consists of only annuals and perennials, and annuals reaches about 70% (TORRES and LOPEZ, 1981). Most of perennials are functionally annuals because their life cycle are curtailed under the extremely dry conditions.

The fog appears in winter and spring when an inversion layer develops, but the time, duration, location of appearance and its thickness vary greatly from year to year. The annual precipitation, supplied only in the form of fog or drizzle, scarcely reaches less than 100 mm (Table 1). Therefore, HL community does not always become established periodically, and can grow only in the specific habitats capable of sustaining the growth of the germinating seeds with enough water for completion of the plant life cycle even in a proper habitat bearing many viable seeds in the soil. Occasionally, it fails to establish for many years.

In order to clarify the maintenance mechanisms of a sporadic establishment of a HL community, dynamics of the buried seed in the soil throughout the year of the lomas established and of the non-established variety and distribution patterns of buried seed in the circumferential area were studied.

Since decomposition of dead seeds and seed coats was difficult because of the extremely dry soil conditions, many grains of identifiable dead seeds and seed coats were found in the soil. The number of dead seeds accounted for over 87% of the grand total of both viable and

\* Department of Biology, Faculty of Science, Chiba University, Yayoi-cho, Chiba, 260, Japan

(Received Aug. 9, 1991; Accepted Oct. 4, 1991)

Table 1. The monthly mean value of the meteorological data at Lima ( $12^{\circ}00' S$ ,  $77^{\circ}07' W$ ) near Loma Ancon ( $11^{\circ}47' S$ ,  $77^{\circ}11' W$ ).

	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	Year
Daily temperature (°C)	20.1	17.8	16.0	15.3	15.1	15.4	16.3	17.7	19.4	21.5	22.3	21.9	18.2
Relative humidity (%)	85	86	85	85	87	87	85	83	83	83	83	84	85
Precipitation (mm)	<1	<1	<1	2	2	1	<1	<1	<1	1	<1	<1	10
Maximum precipitation (mm)	<1	2	3	8	10	4	1	<1	2	1	2	3	20
Number of days with precipitation (>0.1 mm)	<1	<1	1	1	2	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	7
Duration of sunshine (h)	201	124	42	34	31	33	78	123	155	195	192	214	1422
Potential evaporation (mm)	86	66	49	48	46	50	60	70	90	107	103	109	884
Windspeed (m/s)	3.1	2.6	2.1	2.6	3.1	3.1	3.1	3.6	3.6	3.6	3.1	3.1	3.1
Predominant direction of the wind	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

dead seeds buried even in the well-established HL areas, and the mean number of dead seed species was about ten times that of viable seed. This fact offers invaluable information to investigate the distribution patterns of the HL community established formerly and its species composition.

## 2. Materials and Methods

The plateau of Loma Ancon ( $11^{\circ}47'S$ ,  $77^{\circ}11'W$ ) was chosen as the sampling area, because the plant community there was seldom exposed to disturbances, such as the grazing of livestock and the gathering or mowing of plants by the local inhabitants. It lies about 56 km north of Lima, the capital of Peru. A rocky peak of about 850 m towers over the areas northeastern corner of the sandy plateau, and there is a steep slope facing the sea along the foot of a gentle slope on the west side. The plateau measures about 3 km to 2.5 km, and the three main ridges extend between 300 m and 600 m above sea level (Fig. 1).

On early-September in 1980, a dense HL stand in which *Nolana* spp. (Nolanaceae) and *Solanum* spp. (Solanaceae) were pre-dominant, covered only the fringe of the plateau facing the sea (Fig. 2); the HL community grew sparse *Solanum pinnatifidum* or *Palava rhombifolia* (Malvaceae) in the neighboring area, and other areas were not covered by the lomas vegetation. However, in 1984, HL community was

nowhere to be seen on the entire plateau.

In order to examine the distribution patterns of the former HL community in the whole area of the plateau and to survey the possibility for future continuation of the HL vegetation on Loma Ancon, soil samples were collected on 5 September to 20 October 1984 at eighteen sampling points (Fig. 1), and the number of buried seeds of each species was investigated in the soil. Each soil sample in a sampling point consisted of ten batches of 1,000 ml (20 cm  $\times$  25 cm in area and 2 cm deep) with a metal sheet. It is said that seeds in the upper 2 cm of soil account for 89% of all seeds (CHILDS and GOODALL, 1973), so about 90% seeds of all seeds would be included in each sample. Eighteen sampling points were chosen at every 50 m altitude along the gentle ridges and every 500 m along the plateau contour, because topographically higher ground would presumably have more favorable conditions than a concave area for the dew fall through easier contact with fog, and consequently be more favorable for the establishment of HL community.

Each soil sample was suspended in a saturated solution of  $K_2CO_3$  (specific gravity = 1.54). The components of lower specific gravity than of  $K_2CO_3$  solution, such as seeds, pieces of dead plants, dead insects and shells of snails were separated from the sample soil. Floating components were gently transferred to a funnel with a cloth filter, washed thoroughly with fresh water, and finally dried in the sun.

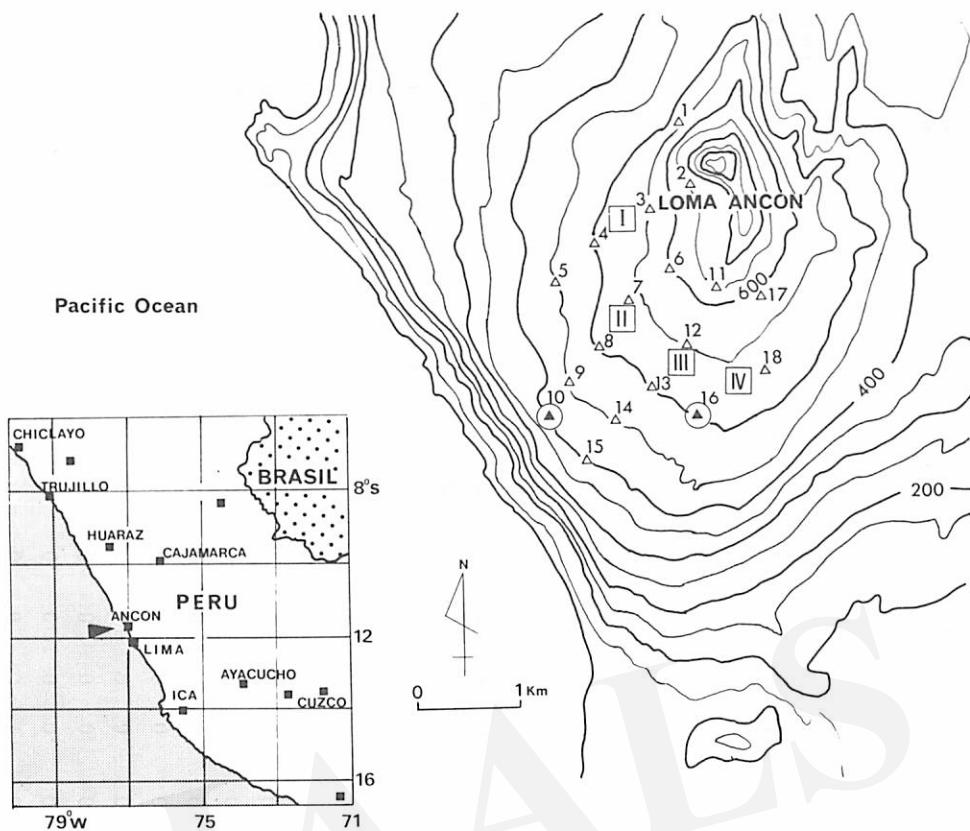


Fig. 1. Sampling area on the plateau of Loma Ancon. Points 1, 2, ..., and 18 are the sampling points for the buried seed population.

Pt. 2, ..., and 5 were located on the ridge I, Pt. 6, ..., and 10 on the ridge II, Pt. 11, ..., and 15 on the ridge III. Pt. 16, 17 and 18 were located at the end of HL habitat on the plateau.



Fig. 2. A herbaceous lomas community is veiled in mist constantly.

The HL community on Loma Ancon consists of *Solanum pinnatifidum*, *S. tuberiferum*, *Nolana humifusa* and *N. gayana*, etc.

Table 2. Seed densities (seeds/0.5 m<sup>2</sup>/2 cm) of each sampling point, mean values with the confidence limits ( $p=95\%$ ) and frequencies in the viable seeds by species on the Ancon plateau in spring of 1984.

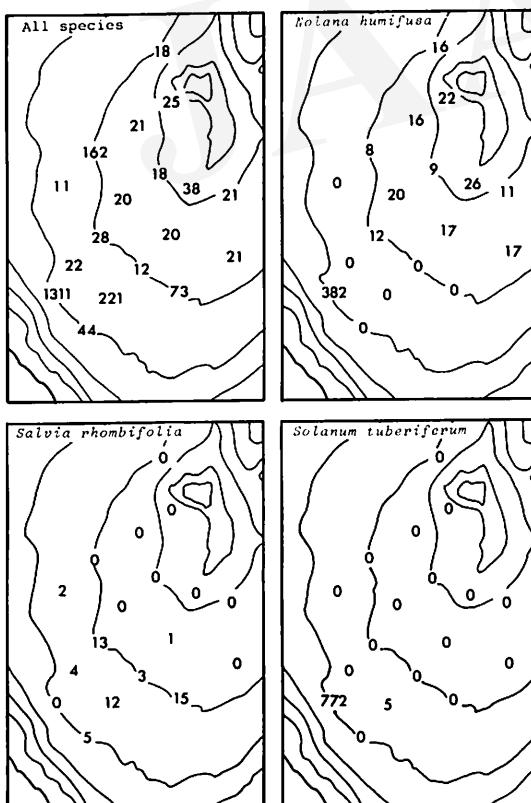
Sampling point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Mean number of seeds (/0.5 m <sup>2</sup> )	Freq. (%)
Species name																				
<i>Solanum tuberosum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	772	0	0	5	0	0	0	0	43.2±84.0	11.1
<i>Nolana humifusa</i>	16	22	16	8	0	9	20	12	0	382	26	17	0	0	0	0	11	17	30.9±40.7	66.7
<i>S. pinnatifidum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	14	71	0	0	2	146	18	34	0	0	15.8±17.2	33.3
<i>Drymaria weberbaueri</i>	0	0	0	151	5	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	14	0	0	9.6±16.4	27.8
Unknown species Sp. 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	20	0	0	0	3.9±5.7	11.1
<i>N. gayana</i>	0	3	1	0	0	0	0	1	0	48	3	0	0	0	0	0	0	1	3.2±5.2	33.3
<i>Salvia rhombifolia</i>	0	0	0	2	0	0	13	4	0	0	1	3	12	5	15	0	0	3.1±2.3	44.4	
<i>Cuscuta</i> sp.	2	0	4	2	0	4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	8	2	1.4±1.0	38.9
<i>Parietaria debilis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	3	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9±1.4	11.1
<i>Loasa urens</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	1	0	0	9	0	0	0.8±1.1	16.7
<i>Palava rhombifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	5	2	1	0	0	0	0.8±0.7	27.8
<i>Urocarpidium peruvianum</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	1	4	0	0	0	2	0	0	0	0	4.4±0.5	22.2
<i>Crassula connata</i>	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2±0.4	5.6
<i>Hypericum</i> sp.	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1±0.2	11.1
<i>Oxalis bulbigera</i>	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1±0.2	5.6
<i>Cassia</i> sp.	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1±0.2	5.6
<i>Hoffmannseggia prostrata</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.1±0.2	11.1
<i>Melilotus</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1±0.1	5.6
<i>Malesherbia arequipensis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.1±0.1	5.6
<i>Calceolaria pinnata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.1±0.1	5.6
Unknown species Sp. 19.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.1±0.1	5.6
<i>Coldenia paronychoides</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.1±0.1	5.6
Unknown species Sp. 20.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.1±0.1	5.6
Unknown species Sp. 22.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.1±0.1	5.6
Total number	18	25	21	162	11	18	20	28	22	1311	38	20	12	221	44	73	21	21	115.9±140.2	

Table 3. Seed densities (seeds/0.5 m<sup>2</sup>/2 cm) of each sampling point, mean values with the confidence limits ( $\phi=95\%$ ) and frequencies in the dead seeds by species on the Ancon plateau in spring of 1984.

Sampling point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Mean number of seeds (/0.5 m <sup>2</sup> )	Freq. (%)
Species name																				
<i>Nolana humifusa</i>	1663	1197	342	135	1	313	1544	1386	18	2463	777	1588	2	0	0	946	977	742.1±352.0	88.9	
<i>Drymaria weberbaueri</i>	0	0	0	1688	698	0	0	0	1799	3	0	45	1576	55	809	745	1	0	421.2±300.9	55.6
<i>Loasa urens</i>	3	117	13	1	2	0	0	0	283	132	10	429	1501	201	1070	1271	0	0	279.6±222.5	72.2
<i>Villanova oppositifolia</i>	12	0	1	3	7	0	1028	1763	5	241	83	21	17	1169	19	4	1	0	243.0±238.6	83.3
<i>Oenothera laciniata</i>	0	0	0	2	119	0	9	26	437	138	124	469	253	1497	652	323	1	0	225.0±173.0	72.2
<i>Solanum pinnatifidum</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	86	454	1	0	71	1505	206	325	0	0	147.2±167.8	44.4
<i>Salvia rhombifolia</i>	0	1	0	0	106	1	4	491	205	11	1	101	506	292	120	356	0	1	122.0±80.7	77.8
<i>Solanum tuberosum</i>	4	11	6	11	0	0	0	13	1	2021	0	0	11	54	2	11	1	0	121.6±219.1	66.7
Unknown species Sp. 1	1	0	0	0	19	0	2	13	26	1630	0	0	16	255	99	0	0	0	114.5±177.1	50.0
<i>Spilanthes olaracea</i>	0	0	0	0	1	0	16	0	20	1139	0	5	1	3	0	0	1	0	65.9±123.8	44.4
<i>Carandrinia ruizi</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	40	4	0	0	1	1110	1	0	0	0	64.3±120.6	33.3
<i>Palava rhombifolia</i>	0	0	0	0	9	0	0	1	9	8	29	25	182	162	170	430	0	0	56.9±52.1	55.6
Unknown species Sp. 10	0	0	0	0	15	0	3	19	36	8	0	47	16	471	209	164	0	0	54.9±55.2	55.5
<i>Urocarpidium peruvianum</i>	0	0	1	0	2	0	7	53	9	717	1	0	3	51	4	1	0	0	47.2±77.6	61.1
<i>Nolana gayana</i>	94	107	27	14	0	0	96	11	7	191	84	170	0	0	0	0	4	39	46.9±28.6	66.7
<i>Tetragonia crystallina</i>	33	79	13	5	0	5	212	166	1	14	149	3	0	0	0	0	16	31	40.4±30.5	72.2
Unknown species Sp. 11	0	0	0	0	1	0	0	1	254	1	0	0	3	5	260	61	0	0	32.6±38.3	44.4
<i>Parietaria debilis</i>	0	0	0	0	9	0	1	115	31	32	1	15	7	141	31	1	0	0	21.3±18.8	61.1
Gramineae sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	0	0	0	0	0	0	0	2.9±5.7	5.6
<i>Chenopodium petiolare</i>	0	0	0	4	0	1	1	5	0	0	0	2	35	0	0	0	1	0	2.7±3.8	38.9
Unknown species Sp. 4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	15	0	0	1.1±1.7	11.1
<i>Nicotiana paniculata</i>	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0.6±0.9	11.1
<i>Cuscuta</i> sp.	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0.3±0.4	22.2
Malesherbia arequipensis	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0.3±0.5	11.1
Unknown species Sp. 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0.3±0.6	11.1
Unknown species Sp. 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0.3±0.4	11.1
<i>Cryptantha parviflora</i>	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0.2±0.3	11.1
Unknown species Sp. 19	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0.2±0.3	5.6
<i>Crassula connata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1±0.1	5.6
Unknown species Sp. 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.1±0.1	5.6
<i>Amaranthus</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1±0.1	5.6
Total number	1811	1513	407	1859	995	319	2924	4060	3276	9219	1313	2918	4168	5898	4767	3714	987	1048	2844±1042*	

Table 4. Ratios of dead seeds/viable seeds and viable seeds/all seeds for all species together, and mean values with the confidence limits ( $p=95\%$ ).

Sample No.	Total number of viable seeds (/0.5 m <sup>2</sup> )	Total number of dead seeds (/0.5 m <sup>2</sup> )	Dead seeds/viable seeds	Viable seeds/all seeds (%)
1	18	1811	100.6	0.98
2	25	1513	60.5	1.63
3	21	407	19.4	4.91
4	162	1859	11.5	8.02
5	11	995	90.5	1.09
6	18	319	17.7	5.34
7	20	2924	146.2	0.68
8	28	4060	145.0	0.68
9	22	3276	148.9	0.67
10	1311	9219	7.0	12.45
11	38	1313	34.6	2.81
12	20	2918	145.9	0.68
13	12	4168	347.3	0.29
14	221	5898	26.7	3.61
15	44	4767	108.3	0.91
16	73	3714	50.9	1.93
17	21	987	47.0	2.08
18	21	1048	49.6	1.96
Mean	116±140	2844±1042	86.6±38.1	2.8±1.5



NELSON and CHEW (1977) have reported that this procedure is effective and accurate for extracting seeds from the soil. All seeds and hulls were sorted out of the dried samples under a binocular stereoscopic microscope (at 12 $\times$ ). The numbers of viable and dead seeds per 1,000 ml were counted for each species, and were showed with the values per 0.5 m<sup>2</sup> in tables (Tables 2, 3 and 4) and in figures (Figs. 3 and 4). The fraction of dead seeds included those which had lost germinability and the identifiable hulls of seed remaining after germination. The number of dead seeds was counted by putting together two or occasionally three pieces of the hull. The viability of extracted seeds was determined mainly from the manner in which seeds could not be crushed with the point of the forceps after the tetrazolium test of viable seeds and the crushing strength of sample seeds of each species.

Fig. 3. Total distribution of the buried viable seeds (seeds/0.5 m<sup>2</sup>/2 cm deep) of *Nolana humifusa*, *Solanum tuberiferum*, *Salvia rhombifolia* and all species together on the Ancon plateau.

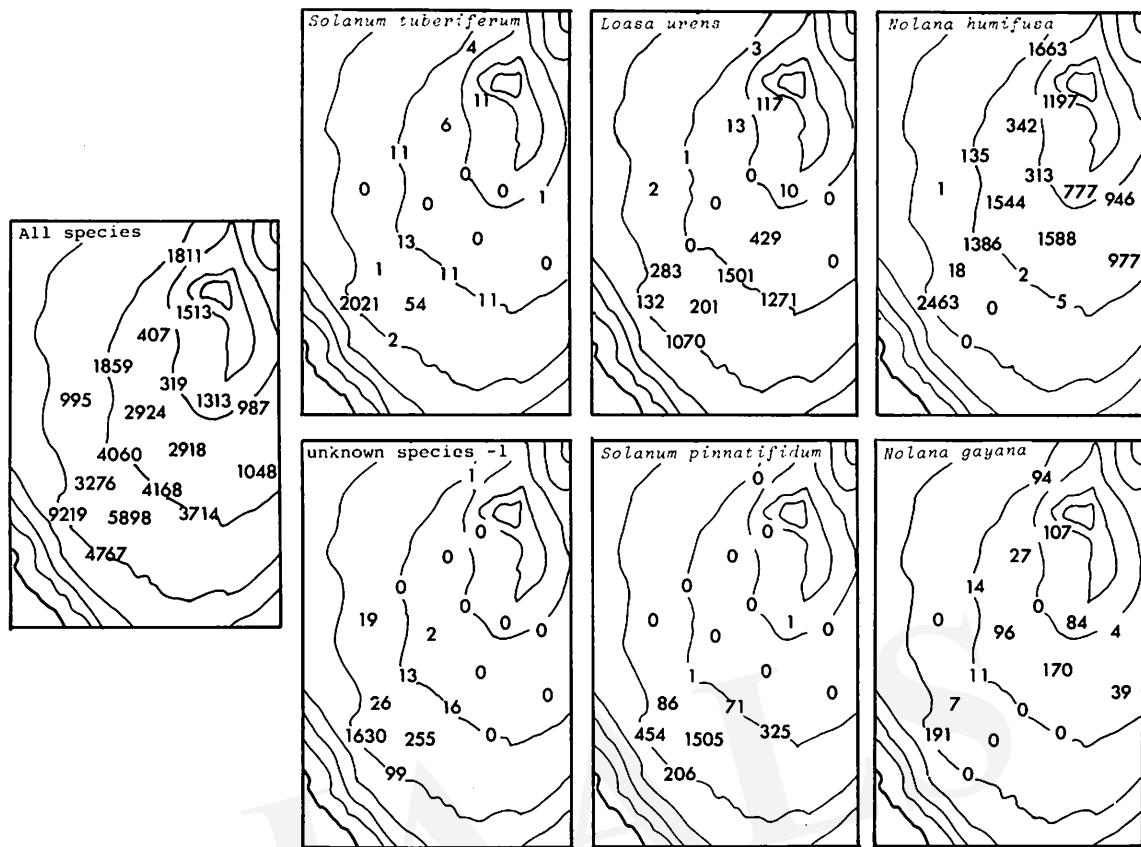


Fig. 4. Total distribution of the buried dead seeds (seeds/0.5 m<sup>2</sup>/2 cm deep) of *Solanum tuberiferum*, *S. pinnatifidum*, *Loasa urens*, *Nolana humifusa*, *N. gayana*, unknown species Sp. 1 and of all species together on the Ancon plateau.

### 3. Results

There was a different number of seeds among the samples; dead seeds, hulls and occasionally viable seeds also were found in every sample though the HL stands does not cover only fringe of plateau facing the sea and in the neighboring area (Tables 2 and 3).

There were 24 viable seed species, and the density of viable seeds for all species together ranged from 11 seeds/0.5 m<sup>2</sup> to 1,311 seeds/0.5 m<sup>2</sup>. The mean value was  $116 \pm 140$  seeds/0.5 m<sup>2</sup>. The dominant species were *Solanum tuberiferum* (Solanaceae) and *Nolana humifusa* (Nolanaceae), but the viable seeds of *S. tuberiferum* were found only at two sampling points, and the frequency of *N. humifusa* was 66.7%. The species having the frequency of more than 30% were *Salvia rhombifolia*

(Labiatae), *Cuscuta* sp. (Cuscutaceae), *Solanum pinnatifidum* and *Nolana gayana* (Table 2).

The viable seeds of *Solanum tuberiferum*, *Drymaria weberbaueri* (Caryophyllaceae), *Nolana gayana* and unknown species Sp. 10 were distributed within limited areas on the plateau (Pt. 4, 10, 14 and 15), while *Salvia rhombifolia* (Labiatae), *Solanum pinnatifidum* and *Nolana humifusa* were distributed widely in the area (Fig. 3). The existence of even a few viable seeds buried, would show that there still is a chance for the establishment of HL community over a wide area on the plateau.

The number of dead seed species was 31 spp., the density of dead seeds for all species together ranged from 407 seeds/0.5 m<sup>2</sup> to 9,219 seeds/0.5 m<sup>2</sup>, and the mean value was  $2,844 \pm 1,042$  seeds/0.5 m<sup>2</sup>. The dominant species was *Nolana humifusa*, which was distributed nearly throughout the plateau area at the frequency

of 89%. There were ten species having viable seeds of more 100 seeds/0.5 m<sup>2</sup>, and fourteen with a frequency of more than 50%; *Villanova oppositifolia* (Compositae), *Salvia rhombifolia*, *Loasa urens* (Loasaceae) and *Oenothera laciniata* (Onagraceae). Species such as *Tetragonia crystallina* (Tetragoniaceae), *Nolana gayana*, *Parietaria debilis* (Urticaceae) and *Urocarpidium peruvianum* (Malvaceae) had a frequency of over 60% in spite of the small number of dead seeds (Table 3).

Thirty-one species with a large number of dead seeds were distributed all over the surface of the plateau (Table 2). The dominant species were *Nolana humifusa*, *Drymaria weberbaueri*, *Loasa urens* (Loasaceae), *Villanova oppositifolia* (Compositae), *Oenothera laciniata* (Onagraceae), *Solanum pinnatifidum*, *S. tuberiferum*, *Salvia rhombifolia* and unknown species Sp. 1 (Table 3). The distribution patterns of each species in terms of the number of dead seeds have been classified into three types with a characteristic distribution pattern. The first type consists of species of which abundant dead seeds (>100 seeds/0.5 m<sup>2</sup>) are found only at a few sampling points around 400 m in altitude, such as *Solanum tuberiferum* and unknown species Sp. 1 (Fig. 4) as well as *Spilanthes oleracea* (Compositae) and *Calandrinia ruizii* (Portulacaceae). Species such as *Loasa urens* and *Solanum pinnatifidum* (Fig. 4) and also *Salvia rhombifolia*, *Oenothera laciniata*, *Palava rhombifolia* (Malvaceae), *Drymaria weberbaueri*, two unknown species of Sp. 10 and Sp. 11, belong to the second type. The dead seeds were distributed widely. The center of distribution of abundant dead seeds was limited to about 550 m in altitude and located in the lowland of the southern part, nearer the edge of the plateau facing the sea (Fig. 4). The species of the third type were distributed rather evenly throughout the plateau (Fig. 4). *Nolana humifusa* and *N. gayana* (Fig. 4) and *Villanova oppositifolia* and *Tetragonia crystallina* (Tetragoniaceae) also belong to this type, with the centers of seed distribution of these species were seen in the middle of the plateau.

The number of dead seed species far outnumbered that of viable seed, and about 3.9% of that of all seeds containing viable, dead

seeds and hulls were viable seeds. The number of sampling points with the viable seed content under 2.0% accounted for 61.1% and that under 5.0% was 83.3%; the maximum was 12.5% at Pt. 10 (Table 4). This suggests that HL community had been established all over the plateau in the past. It seems there were some areas where it established frequently, while it has seldom been covered recently in most of the plateau areas.

#### 4. Discussion

The whole area of the Ancon plateau was not covered with HL community in 1984, but the distribution patterns of the buried seeds were investigated throughout the whole plateau, and the extents of the past HL community on this plateau area were ascertained.

Viable and dead seeds were found in all eighteen samples. The maximum number (=1,311 seeds/0.5 m<sup>2</sup>) of viable seeds was obtained from the soil sample of Pt. 10, where the HL community had been established in 1980. There were few viable seeds in other soil samples, and only the soil samples of Pt. 4 and 14 had over 100 viable seeds (Table 2). The number of dead seeds ranged from 7.0 times to 347.3 times that of viable seeds, and was about 87 times on the average (Table 4). The ratio of the number of dead seeds to that of viable seeds (=death/life rate of seed) represents the time since the last establishment of HL community, and the great number of dead seeds in each soil sample is an evidence of the frequent establishment of a HL community in the past. Low rates of death/life of seed at Pt. 3, 4, 6 and 10 are considered evidence that HL community has established recently, and the very few dead seeds at Pt. 3 and 6 indicates establishment of HL community at a low frequency (Fig. 5).

There is an area having numerous buried dead and viable seeds in the vicinity of the plateau edge and its upper part, 400–450 m in altitude on the ridge II and III. In future, HL community will mainly be restricted to this area. Establishment of HL community throughout Loma Ancon has become more difficult due to the altogether too few viable seeds of the seed bank (Table 5-b).

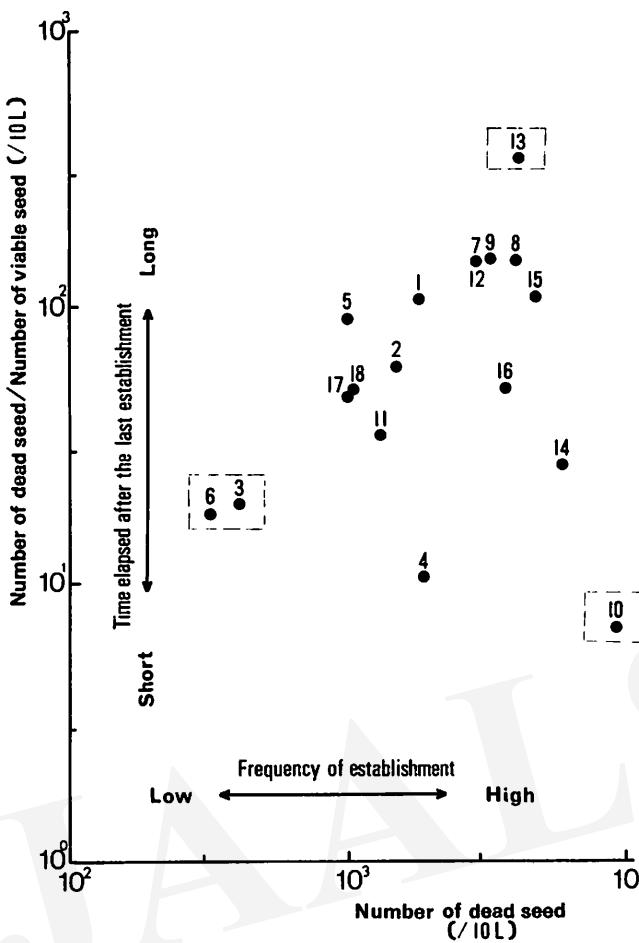


Fig. 5. Relationships between the number of dead seeds for all species together and the number of dead seeds/that of viable seeds in each sample.

The characteristic distribution patterns of the dead seeds in the sampling area suggest that the moisture conditions of the soil surface are not uniform enough. The fog is slowly driven over the ground surface by the prevailing southerly winds, and the soil of topographically higher ground and lower parts of ridges will be kept in moist conditions with the falling of dew by contact with fog. The wet conditions of the ground surface enable the development of more herbaceous plants, and the area of buried seed distribution for each species becomes larger, with *Nolana humifusa*, *Villanova oppositifolia*, *Salvia rhombifolia*, *Loasa urens* and *Tetragonia crystalina*, which have a low water-requirement for the growth of plants; on the other hand, it is limited for species having a high water-requirement, such

as *Solanum tuberiferum*, *Calandrinia ruizii*, *Spilanthes oleracea* and *Urocarpidium peruvianum* (Tables 3 and 6-a).

Most of the viable seeds here are in a state of dormancy. If enough moisture were present in the soil of each sampling point before seeds lost their viability, sparse HL community such as the species shown in Table 6-b, could be established over the whole area. This cannot be expected, however, except in a year characterized by a special meteorological condition caused by the 'el niño'. Moreover, the HL community of a single dominant species, *Nicotiana paniculata* (Solanaceae), may keep growing until the next vegetative period, if the effects of the 'el niño' phenomenon continue long. A typical and sporadic HL community established in spring will therefore only be

**Table 5.** Relative establishing frequency in the past (a) and relative establishing possibility in the future (b) of herbaceous lomas at each sampling point of Pt. 10. Pt. 2-Pt. 5: on ridge I; Pt. 6-Pt. 10: on ridge II; Pt. 11-Pt. 15: on ridge III; Pt. 16-Pt. 18: on ridge IV at the end of herbaceous lomas habitat.

Ridge					Ridge				
(a)	I	II	III	IV	(b)	I	II	III	IV
600 <sup>m</sup>	16	4	14	40	600 <sup>m</sup>	2	1	3	6
550	4	32	32	11	550	2	2	2	2
500	20	44	45	11	500	12	2	1	2
450	11	36	64		450	1	2	17	
400		100	52		400		100	3	

**Table 6.** Dominant species (a and b) in each sampling point, judging from the number of buried dead and viable seeds. If the decomposition rate of dead seeds is similar for every species, the dominant species (a) among dead seeds once frequently established at each sampling point. Dominant species (b) are the main species of herbaceous lomas established at each sampling point when wet soil conditions prevailed.

(a)	I	II	III	IV	(b)	I	II	III	IV
600 <sup>m</sup>	Nh	Nh	Nh/Tc	Lu/Dw/Pr	600 <sup>m</sup>	Nh	Nh	Nh	Sp/Sr/Dw
550	Nh	Nh/Vo	Nh/Ol/Sr	Nh	550	Nh	Nh	Nh	Nh/Cu
500	Dw	Vo/Nh/Sr	Dw/Lu/Sr	Nh	500	Dw	Sr/Nh	Pr/Sr	Nh
450	Dw	Dw/Ol	Sp/Ol/Vo		450	Dw	Sp	Sp/Un	
400		Nh/St/Un/So	Cr/Lu/Dw/Ol		400		St/Nh	Un/Sp	

Cr: *Calandrinia ruizii*, Cu: *Cuscuta* sp., Dw: *Drymaria weberbaueri*, Lu: *Loasa urens*, Nh: *Nolana humifusa*, Ol: *Oenothera lacinata*, Pr: *Palava rhombifolia*, So: *Spilanthes oleracea*, Sp: *Solanum pinnatifidum*, Sr: *Salvia rhombifolia*, St: *Solanum tuberiferum*, Tc: *Tetragonia crystallina*, Un: Unknown species Sp. 1, Vo: *Villanova oppositifolia*

formed in certain moister parts of this plateau.

Since we cannot confirm in practice how many years after one can identify the species of dead seed and seed coat under arid soil conditions, we cannot estimate the time required for HL community to cover the whole areas of the plateau and changes its species composition. Therefore, problems for future research include longevity of seeds in various species under extremely dry conditions, the optimum moisture condition for seed germination of constituent species in HL community and the fluctuations of soil moisture content during the period from before the seed germination until after the seed dispersal period at sampling points and the variations among sampling points.

## 5. Conclusion

In 1980, HL community covered only in the

vicinity of the edge of the Ancon plateau, but in 1984 the whole area of this plateau was not covered with HL community. With the expectation of finding many viable and identifiable dead seeds in the soil, the distribution patterns of the buried seeds were investigated throughout the whole plateau area in order to ascertain extents of the past HL community and the possibility of establishment of it in the whole plateau area.

There were three types in the distribution patterns of seeds, which were caused by a water-requirement of each plant for seed germination and completion of the life-cycle and by the soil moisture contents that were supplied from the fog driven by the prevailing southerly winds. Species having a small, middle and large distributional area were *Solanum tuberiferum*, *Loasa urens* and *S. pinnatifidum*, and *Nolana humifusa* and *N. gayana*, respectively.

In future, establishment of HL community will mainly be restricted in the vicinity of the plateau edge and its upper part, and *Solanum tuberiferum* and *Nolana humifusa* will be co-dominant.

### Acknowledgements

This investigation was conducted with the aid of a scientific research fund from the Ministry of Education, Science and Culture of Japan. Thanks are due to Professor Dr. M. Ono, Tokyo Metropolitan University, for the opportunity to conduct this research. I also wish to thank Dr. S. Oka, Tokyo Metropolitan University, Dr. T. Masuzawa, Shizuoka University and Mr. H. Ogawa, Takushoku University, who assisted with the investigation. Gratitude is also expressed to Miss S. Nishitani, who performed the laborious work of extracting seeds from 100 samples.

### References

- CHILDS, S. and GOODALL, D. W. (1973): Seed reserves of desert soils. In *US/IBP Desert Biome Research Memorandum*: 73-75.
- ELLENBERG, H. (1959): Über den Wasserhaushalt tropischer Nebeloasen in der küstenwüste Perus. *Ber. Geobot. Forsch. Inst. Rübel für 1958*, 47-74.
- ELLENBERG, H. (1981): Ursachen des Vorkommens und Fehlens von Sukkulanten in den Trockengebieten der Erde. *Flora*, 171, 114-169.
- ENGEL, F. (1973): New facts about precolumbian life in the Andean Lomas. *Current Anthropology*, 14, 271-280.
- FERREYRA, R. (1953): Comunidades vegetales de algunas lomas costaneras del Perú. *Bol. Est. Exp. Agr. La Molina*, 53, 1-88.
- FERREYRA, R. (1960): Algunos aspectos fitogeográficos del Perú. *Rev. Inst. Geogr. Lima, Perú. Univ. de San Marcos* (Fac. de Latras), No. 6, 41-88.
- NELSON, J. F. and CHEW, R. M. (1977): Factors affecting seed reserves in the soil of a Mojave Desert ecosystem, Rock Valley, Nye Country, Nevada. *Am. Midl. Nat.*, 97, 300-320.
- SARMIENTO, G. (1975): The dry plant formations of South America and their floristic connections. *J. Biogeogr.*, 2, 233-251.
- TORRES, G. J. and LOPEZ, O. C. (1981): Productividad primaria en las lomas de la costa central del Perú. *Bol. Lima*, No. 14, 54-63.
- TROLL, C. (1948): Der asymmetrische Aufbau der Vegetationszonen und Vegetationsstufen auf der Nord- und Sudhalbkugel. *Ber. geobot. Forschungsinst. Rübel Zürich*, 46-83.
- TROLL, C. (1956): Das Wasser als pflanzengeographischer Factor. *Handb. Pflanzenphysiol.*, 3, 750-786.
- VARGAS, C. (1940): Formaciones vegetales del Departamento de Arequipa. (Ensaya Fitogeográfico). *Bol. Mus. Hist. Nat. 'Javier Prado'* (Lima, Perú), 4, 338-345.
- WEBERBAUER, A. (1911): Die Pflanzenwelt der peruanischen Anden. In *Die Vegetation der Erde*, hrsg. v. A. Engler u. O. Drude, 12, Leipzig.
- WEBERBAUER, A. (1939): La influencia de cambio climáticos y geológicos sobre la flora de la costa peruana. *Actas Acad. Nac. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, Lima, 2, 201-209.

## 中央ペルー沿岸沙漠におけるアンコン台地の草本性ロマス群落の埋土種子の分布パターン

大賀宣彦\*

ペルー沿岸沙漠の草本性ロマス群落は春季に、濃霧によって土壤表面が湿潤になる沿岸南斜面だけに形成される。その霧の発生時期や濃さは年によって大きく変化し、そのため草本性ロマス群落は必ずしも毎年定期的には成立しない。現在、アンコン台地では台地の縁だけに形成されるが、埋土種子の分布パターンから判断すると、以前は草本性ロマス群落が台地全域を被っていたことが明らかになった。台地上の18カ所の埋土種子（53,282個）中には3.9%の生種子が含まれ、ほぼ全域に分布する。しかし、さらに霧の発生量が少なく乾燥状態が続くと、台地縁以外のアンコン台地上には草本性ロマス群落の成立の可能性はなくなる。

\* 千葉大学理学部生物学教室

(受付：1991年8月9日、受理：1991年10月4日)

# SPOT衛星画像による沙漠地形の3次元解析 —1986年タクラマカン沙漠チーラ地区砂丘地帯の沙漠地形—

長島秀樹\*・内田修\*\*

## 1. まえがき

沙漠域の地形を立体的に把握することは、沙漠におけるさまざまの物理・化学過程を調べる上で基本的に必要であるのみならず、沙漠の開発・防災等社会的な側面からもきわめて重要である。とくに移動沙漠における地形の把握は、沙漠の広がりや砂の移動を知る上に不可欠である。そのためには現地での測量、航空機を利用した測量などが考えられるが、地域の特殊性からそのような作業が困難な場合がある。そこで考えられるもう一つの手段は、人工衛星画像の3次元解析である。

人工衛星ステレオ画像解析の手法(建石, 1990; 土屋ほか, 1985; ARAI *et al.*, 1989)は、すでに確立されている航空写真測量の延長線上にあるが、画像縮尺が非常に小さいため従来用いられているGCP(基準点)の同定が困難となるなど工夫すべき点を残している。さらにSPOT衛星のようにセンサとしてリニアアレイセンサを用いている場合には走査線ごとに衛星の位置と姿勢が変化するため、これらを考慮したアルゴリズムが必要と

なる。内田(1989)は基準点同定の困難を補うために、道路・鉄道・河川などの特徴線を用いる手法を開発しSPOT衛星ステレオ画像解析に成功している。

中国新疆省タクラマカン沙漠南西部和田付近は、4月から5月にかけての西北西の卓越風により、沙漠からオアシス方向にむけて砂が移動し深刻な砂の被害が生じている。とくに、移動する砂丘が道路や村を埋めてしまう例も過去において少なくない。これらの被害を最小限とするような適切な対策を講じるためには、この地域の気象状況の正しい把握とともに移動砂丘の現在の形状を知り、その特徴を把握することが必要である。そこで本論文では、この地域のSPOT衛星ステレオ画像(1986年撮影)を入手し、内田の手法により3次元解析を試みる。さらにこれによって得られた標高データ(DTM)をスペクトル解析し、卓越風の方向の砂面の凹凸の水平スケールを推算する。

## 2. SPOT衛星画像の3次元解析

SPOT衛星(フランスが1986年に打ち上げ)による

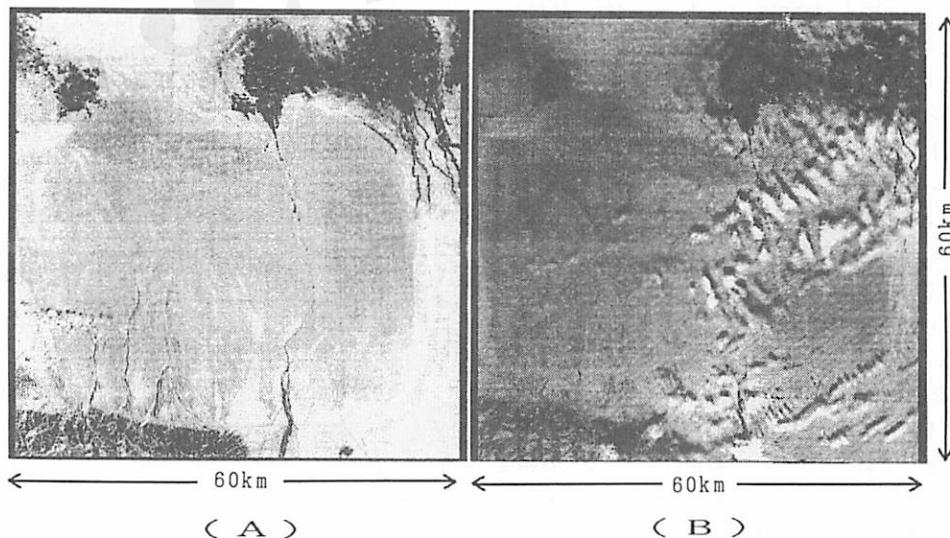


Fig. 1. SPOT satellite images.  
A: left image (1986 June 18), B: right image (1986 June 13)

\* 理化学研究所地球科学研究室

(受付: 1991年8月21日, 受理: 1991年10月14日)

\*\* アジア航測株式会社情報システムセンター

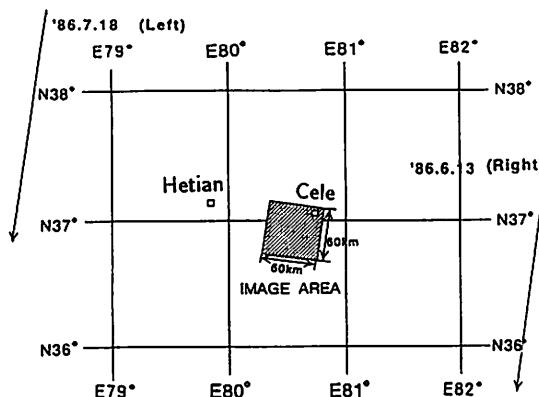


Fig. 2. Orbit of SPOT satellite and position of the image.

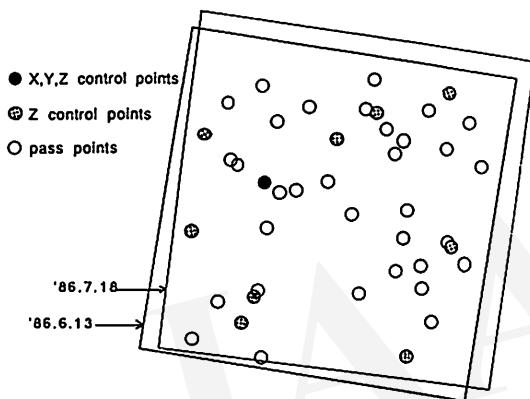


Fig. 3. Control points used in the three dimensional analysis.

2枚のパンクロ画像（1986. 6. 13 および 1986. 7. 18 撮影）を入手した（図1）。撮影範囲は図2に示すようにタクラマカン沙漠南西部チーラ地区（和田より東に約100km、北緯37°、東経80.7°）を東北端とする60km×60kmの区域で、2枚の画像は図3に示すように90%以上重なっている。この2枚の画面から3次元解析を行う手順は(1)標定点計測、(2)標定計算、(3)検査、(4)3次元計測で、(1)～(3)の手続きにより、2枚の画像（1986. 7. 18 撮影のものを左画像、1986. 6. 13 撮影のものを右画像とする）のそれぞれの撮影時におけるSPOT衛星の位置および姿勢（センサーの傾き）をできるだけ精度よく求める（標定）。つぎにステレオ画像の各点に対し互いに同一である点を左右画像から精度よくかつ効率的に認識し（マッチング）、3次元計測を行なった。以下に順を追って述べる。

### 1) SPOT 画像の標定

地形計測のためには、まず画像撮影時における衛星の位置および姿勢を精度よく算定しなければならない。これらの情報はトラッキングおよび姿勢センサーにより通常自動的に記録されているものの、SPOT衛星の場合画像撮影時（約9秒間）を通してのトラッキングデータではなく、姿勢に関する角速度成分のみで不十分である。そこで地上で既知のコントロールデータを併用し標定を試みる。いま図4に示すように地上座標系を $(X, Y, Z)$ とし、 $L$ 番目のライン走査時におけるリニアアレイセンサの位置を $O(X_0, Y_0, Z_0)$ 、3つの姿勢、すなわちロール角、ピッチ角、ヨー角をそれぞれ $\omega(L), \phi(L), \kappa(L)$ とするとき、これらは

$$\begin{aligned} X_0(L) &= X_0 + X_{01} \cdot L \quad \omega(L) = \omega_0 + \omega_1 \cdot L \\ Y_0(L) &= Y_0 + Y_{01} \cdot L \quad \phi(L) = \phi_0 + \phi_1 \cdot L \\ Z_0(L) &= Z_0 + Z_{01} \cdot L \quad \kappa(L) = \kappa_0 + \kappa_1 \cdot L \end{aligned} \quad (1)$$

のように走査ライン( $L$ )についての1次式で近似できる。したがって(1)式における12個の未知の係数を合理的に決定することが標定の主題である。つぎにセンサ座標系を $(x', y', z')$ とすると、地上対象物 $P(X, Y, Z)$ のセンサ座標系における座標 $(x'_p, y'_p, z'_p)$ は

$$\begin{pmatrix} x'_p \\ y'_p \\ z'_p \end{pmatrix} = [M] \begin{pmatrix} X - X_0(L) \\ Y - Y_0(L) \\ Z - Z_0(L) \end{pmatrix} \quad (2)$$

で表わされる。ここに $M$ は3次の正則行列でその成分 $m_{ij}$ の中には、6個の未知数 $(\omega_0, \phi_0, \kappa_0, \omega_1, \phi_1, \kappa_1)$ を含む

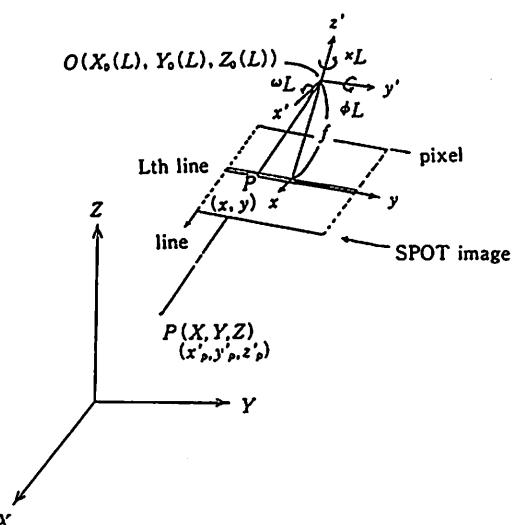


Fig. 4. Co-ordinate system.  $(X, Y, Z)$  and  $(x', y', z')$  are the ground and sensor co-ordinates, respectively.  $(x, y)$  is the co-ordinate in the film.

でいる。次に図4に示したようにPの画像上の位置を $(x, y)$ とする。なお $f$ は焦点距離を表わす。ここでセンサの位置(投影中心)、地上対象物、画像が一直線上にあるといふいわゆる共線条件を用いると(2)式より

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{x_p'}{z_p'} = \\ &-f \frac{m_{11} \cdot (X - X_0(L)) + m_{12} \cdot (Y - Y_0(L)) + m_{13} \cdot (Z - Z_0(L))}{m_{31} \cdot (X - X_0(L)) + m_{32} \cdot (Y - Y_0(L)) + m_{33} \cdot (Z - Z_0(L))} \\ y &= f \frac{y_p'}{z_p'} = \\ &-f \frac{m_{21} \cdot (X - X_0(L)) + m_{22} \cdot (Y - Y_0(L)) + m_{23} \cdot (Z - Z_0(L))}{m_{31} \cdot (X - X_0(L)) + m_{32} \cdot (Y - Y_0(L)) + m_{33} \cdot (Z - Z_0(L))} \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる。この中には(1)式で示した12個の未知数を含む。したがってこれらを(3)式より求めるためには、少なくとも6個の基準点(12の関係式)が必要となる。本解析では(3)式を近似値のまわりに展開して線形化し、図3に示すように合計42個の標定点を用い最小自乗法により逐次近似値を補正した。なお、この標定の際に参照する地形図(アメリカ航空宇宙局発行の100万分の1の航空地図)の精度が粗いため、標定点の個数を多くとり計測せざるを得なかった。

## 2) マッチング

次に2枚の画像を多段階相関法(一般にはCoarse-to-Fine法と呼ばれる)によりマッチングし、DTMデータを求める。まず最初に計測範囲の標高を一定と仮定し、左右画像の幾何補正画像を作成する。この画像には

まだ縦視差(y-視差)が数画素存在しているが、第一段階の粗いマッチングでは無視することができるため、探査を2次元から1次元にすることが可能となり、処理の単純化と高速化をはかることができる。また、画像のフィルタリングを行ない低周波からマッチングを移行することにより、安定した精度のよいマッチングが可能となる。この際画像間の類似度の尺度として相関係数を用いる。以上のようなマッチング操作により対応する点 $(i, j)$ の $x$ -視差( $P_x$ )が得られる。これにより、高さの補正量 $\Delta Z$ は

$$\Delta Z_{i,j} = (H/f) \cdot (B/H)^{-1} \cdot \Delta CCD \cdot P_x \quad (4)$$

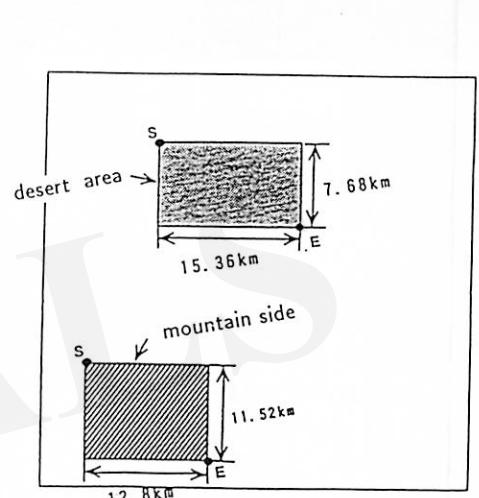


Fig. 5. Analyzed area.

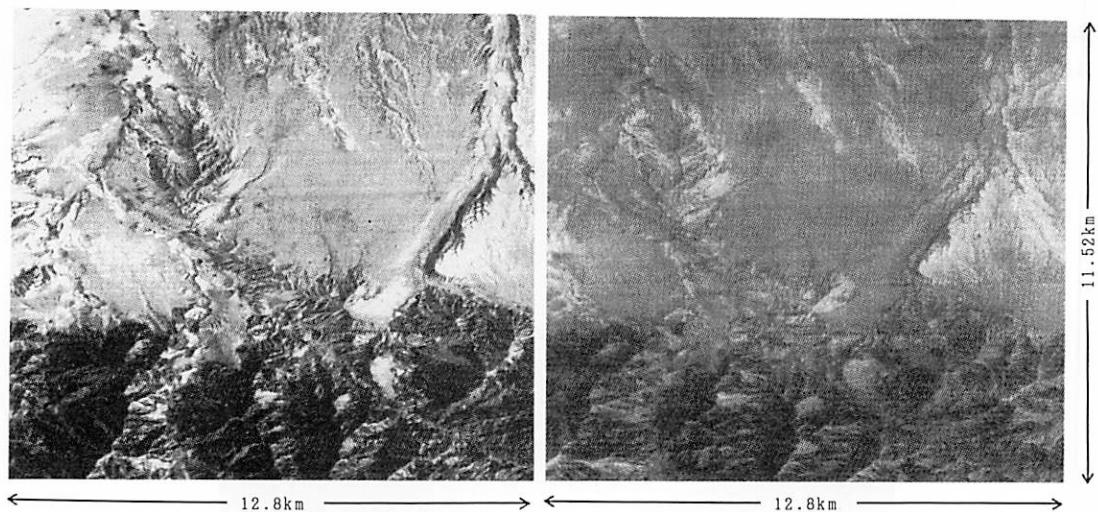


Fig. 6. Geometrically corrected image of mountain side area.  
A: left image, B: right image

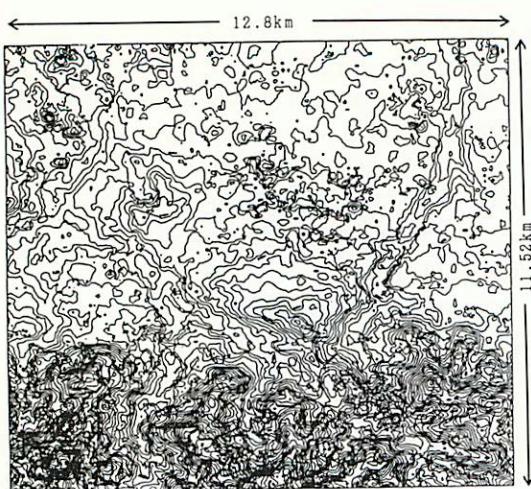


Fig. 7. Contour map of mountain side area.  
contour interval: 40 m

と表わせる。ここに  $f$ ,  $H$  はそれぞれ焦点距離と SPOT衛星の高度を、また  $B/H$  は  $B/H$  比を、 $\Delta CCD$  は CCD素子の間隔を表わす。

### 3. 結果と考察

#### 1) 山岳地域の3次元計測

図1に示した画像の中で、解析対象地域としてクンルン山北麓を一部含む  $12.80 \text{ km} \times 11.52 \text{ km}$  の広さの比較的起伏の大きい山岳域（図5参照）をまず選び、3次元計測を行なった。図6に幾何補正後の左右画像を示す。また図7に解析の結果として得られたこの地域の等高線図を示す。等高線の間隔は 40 m で、標高は  $1,832 \sim 3,639 \text{ m}$  となっている。さらにこれを見やすくするために、スライス間隔 100 m で描いた等高線カラースラ

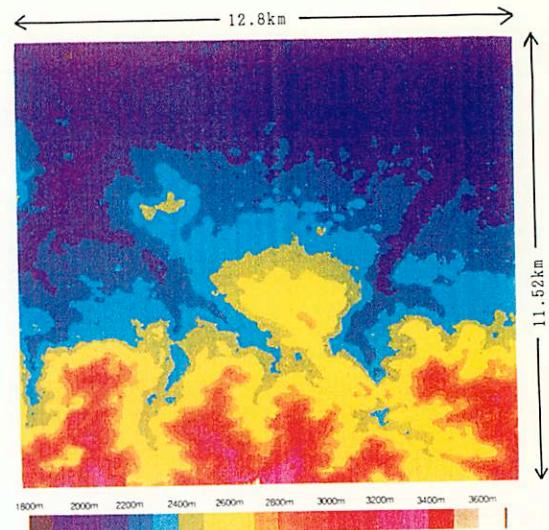


Fig. 8. Color sliced image of Fig. 7.

イス画像および鳥瞰画像を図8,9に示す。これらの解析結果の精度については比較可能な地形図の入手が困難なため結果の評価は難しく、今後、実測あるいは詳細な地形図との比較による検討が望まれる。

#### 2) 沙漠地域の3次元計測

次に図5に示すように、チーラ地区の砂丘地帯 ( $15.36 \text{ km} \times 7.68 \text{ km}$ ) を対象として3次元計測を行なった。この地域はタクラマカン沙漠周辺のオアシスの中で砂の被害がもっとも大きいところである。とくに沙漠の中に突き出た形のオアシスの南西側には、西北西から東南東にかけて移動沙漠が舌状に延びている。このため和田からチーラに至る道路の一部が砂に埋もれ、現在では新しい迂回道路が建設されている。したがってこの地域の沙漠地形とその変化を把握することは、砂の被害を今後最小

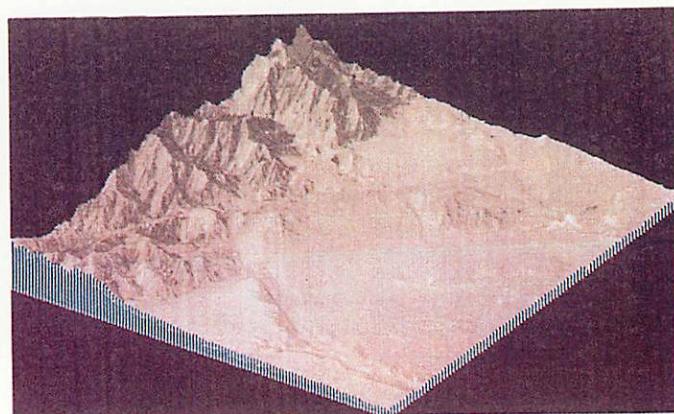


Fig. 9. Bird's-eye view of Fig. 7.

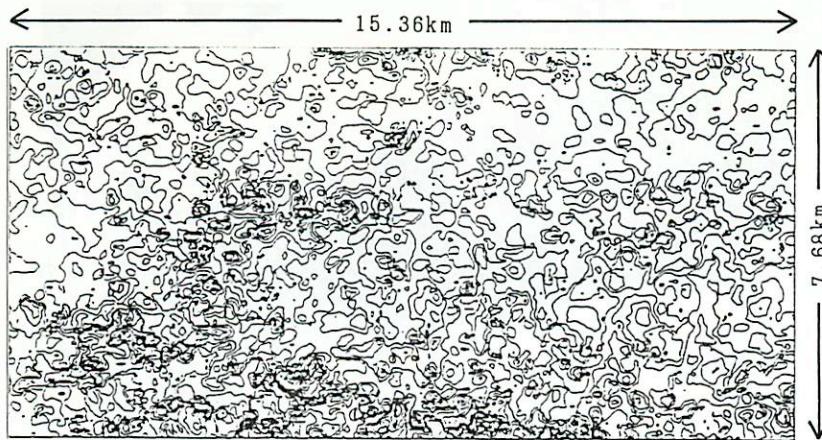


Fig. 10. Contour map of desert area.  
contour interval: 20 m

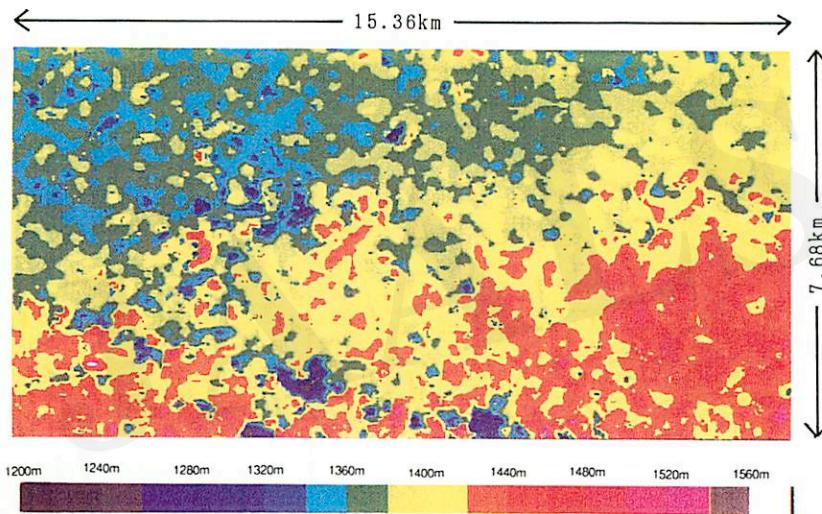


Fig. 11. Color sliced image of Fig. 10.

限にとどめるためにも極めて重要な意味を持つ。

本解析により得られた等高線図（等高線間隔 20 m）を図 10 に、またカラースライス画像（スライス間隔 20 m）を図 11 に示す。これらによるとこの地域の標高は 1,172～1,576 m であり、標高差が約 400 m となっている。また、数百 m から 1 km 程度と思われる水平スケールを持つ凹凸が明瞭にみられる。

### 3) 沙漠地域の凹凸の波数スペクトル

図 12 に示す沙漠地域の幾何補正画像（左画像）中の★印は、1990 年 10 月より 1991 年 3 月にかけて行なった自動気象観測の観測点を表わす（長島ほか、1991）。ここにおいて風向・風速等の気象要素の毎時の記録が得られている。図 13 はこの期間の強風（風速 7 m/sec 以

上）の風向頻度分布で、西北西の風が卓越していることがわかる。この方向は図 7 に示した等高線図のほぼ左から右に向かって吹く風に対応する。そこでこの方向の起伏の水平スケールを知る目的で波数スペクトル解析を行なった。解析には最大エントロピー法（Maximum Entropy Method: 通称 MEM）を用いた（例えば、日野、1977）。なお、解析の際フィルター項数の決定は DNP (Deviation of Normalized Power) 基準によった。図 14 に計算された波数スペクトルを示す。これによるともっとも卓越する水平スケールは約 1 km であるが、ほぼこれに匹敵するスペクトルピークが約 400 m の水平スケールに対応する。図 10～12 の等高線図および画像と比較するとこれが砂丘と砂丘との間隔に対応することが推察される。タクラマカン沙漠にはさまざまな形の砂丘

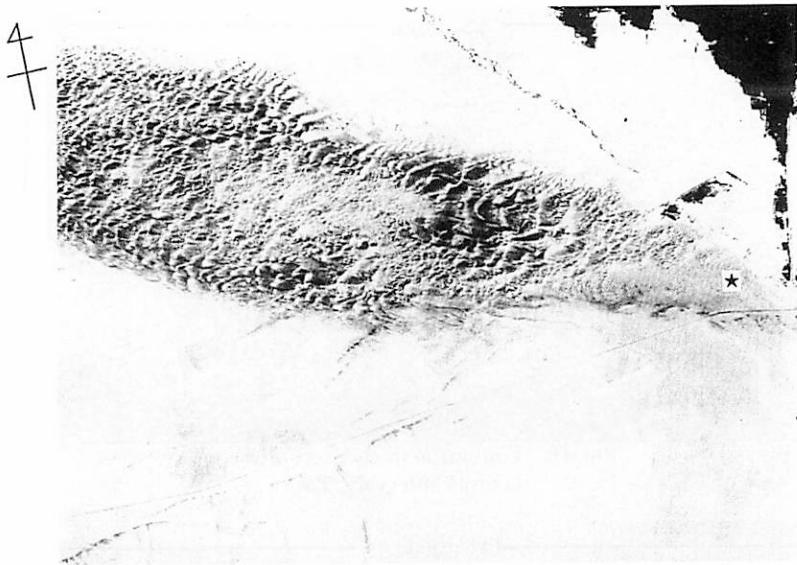


Fig. 12. Geometrically corrected image of desert area.  
★: meteorological observation station

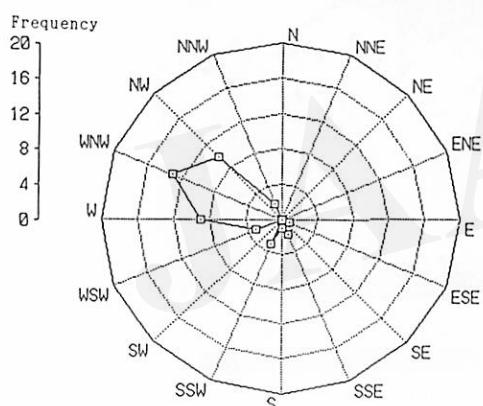


Fig. 13. Frequency distribution of wind direction.  
wind speed  $\geq 7$  m/sec

がみられ、中国の分類では十数種類におよぶ (ZHU *et al.*, 1986)。砂漠の中央部は規則的に峰の並んだ波長数kmの縦列砂丘が頻繁にみられるが、策勒地区のような沙漠の縁辺域では複合新月型砂丘列 (Compound Crescentic dunes) がみられる場合が多く、図10もこれを示している。砂丘の間隔は縦列砂丘に比べ狭く一般にやや不規則である。南アフリカの Namib 沙漠での観測によると (LANCASTER, 1989), 砂丘の間隔は 300~1,200 m で、そのうち 300~400 m, 600~700 m のスケールが多くみられるが、沙漠のフロント域では相対的にスケールが小さい。本論文で解析した策勒地区砂丘は沙漠からオアシスに向けて舌状にのびている地域であり、沙漠のフロント

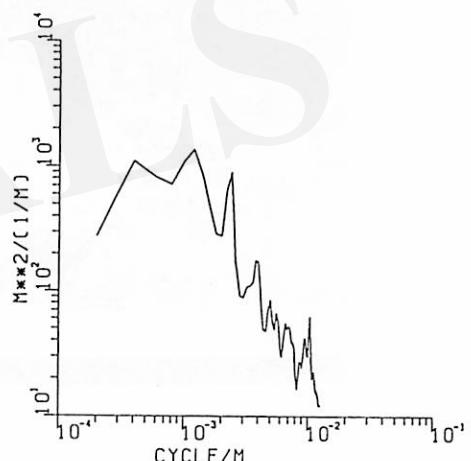


Fig. 14. One dimensional wave number spectrum of the sand surface undulation along the direction of prevailing wind.

トの典型的な例である。

#### 4. ま と め

2枚の SPOT 衛星画像を用いて3次元解析を行ない、40 m 格子点における標高データを求めることにより、沙漠地域における地形図を得ることができた。また、これを解析し風の主方向における卓越水平スケールを得ることができた。これによるとチーラ (策勒) 地区砂丘の水平スケールは約 400 m となっている。本3次元解析

は移動沙漠の数値モデルに不可欠な地形情報を与えるもので、良好な結果が得られたものと考えている。ただし、地上分解能が粗いため、砂丘の形を忠実に実現するまでには至っていない。今後現地における計測と比較しさらに精度のよい地形図を作成することが必要である。また、今回利用した衛星画像は1986年に撮影されたものであり、5年を経過した現在かなり変化していることが予想される。今後同一地域の画像を入手し解析することにより、現在の地形およびその間の変化量を推算することができる。これにより、砂の移動と沙漠地形変動に関する精度のよい数値モデル開発が可能となろう。

#### 謝 辞

本研究は平成2年度科学技術振興調整費による「沙漠化機構解明に関する国際共同研究」の一環として行なわれた。研究を進めるにあたり、いろいろとご指導いただいた理化学研究所杉原滋彦博士に感謝いたします。

#### 引用文献

- 内田 修(1989): ステレオ SPOT 画像の標定と自動計測。「写真測量とリモートセンシング」28-3: 30-41.
- 建石隆太郎(1990): 宇宙からの標高測定。「リモートセンシング概論」朝倉書店, 291-301.
- 土屋 清・建石隆太郎・伊田昌男(1985): Landsat-4 MSS ステレオ画像による3次元座標測定。「日本写真測量学会誌」24-2: 4-14.
- 日野幹雄(1977): 「スペクトル解析」朝倉書店, p. 83-94.
- 村井俊治(1989): ステレオ衛星画像を用いた地形の三次元測定。「生産研究」41-11: 27-32.
- 長島秀樹・趙 茂峰・岡崎守良・李 崇瞬・夏 訓誠(1991): タクラマカン沙漠における気象要素および砂面変動の自動観測一チーラでの1990年10月～1991年の観測から一。「沙漠研究」1: 61-66.
- ARAI, K., FUJIMOTO, N., TSUCHIYA, K. and TATEISHI R. (1989): Terrain height estimation based on stereoscopic pair images of SPOT / HRV. *Advance in Space Research.*, 9-1: 109-114.
- LANCASTER, N. (1989): *The Namib Sand Sea*. Balkema, Rotterdam, 111-131.
- ZHU Zhenda, LIU shu, WU Zhen and DI Xinmin (1986): *Desert in China*. Institute of Desert Research, Academia Sinica Lanzhou, 45-66.

### Three Dimensional Analysis of Desert Terrain Based on SPOT Stereo Data —Terrain mapping of a sandy area in Cele, Taklimakan desert in 1986—

Hideki NAGASHIMA\* and Osamu UCHIDA\*\*

Three dimensional analysis of SPOT image data was carried out to have a surface configuration of sandy desert. A couple of images we used are of 60 km × 60 km area in the southern part of Taklimakan desert; both images were taken in 1986. The procedure of the analysis has two steps. The first is to evaluate the position and angles of the satellite. The second is to identify positions in two images by using a suitable matching algorithm and an iterative correlation method.

For the present studies, we selected two areas from the SPOT images. One is an area of mountainous area where the relative difference of the altitude is fairly large. The result shows the altitude of the area is from 1,832 m to 3,639 m. The other area is of the sandy desert near Cele where a sandy disaster frequently occurs. Accordingly, it is necessary for the prevention against sandy disaster to have an information of the sand surface configuration. The estimated altitude in this area is from 1,172 m to 1,576 m. Although the altitude differences are smaller than those in the mountainous area, the sand surface configuration generated by sand dunes is clearly recognized.

Next, we calculated one dimensional wave number spectrum of sandy surface undulation along the path of the prevailing wind. There are several peaks in the spectrum. The first peak corresponds to the undulation whose horizontal scale is about 1 km. The second peak has the scale of about 400 m; this scale corresponds to the distance between neighboring dunes in this area.

**Key Words:** Taklimakan desert, Three dimensional analysis, SPOT images, Sand dunes

\* The Institute of Physical and Chemical Research (Riken), Hirosawa 2-1, Wako-shi, Saitama 351-01 Japan.

\*\* Asia Air Survey Co., Ltd., Tamura-chou, 13, Atsugi-shi, Kanagawa 243 Japan.

(Received Aug. 21, 1991; Accepted Oct. 14, 1991)

# タクラマカン沙漠における気象要素と砂面変動の自動観測

——チーラでの1990年10月～1991年3月の観測から——

長島秀樹\*・趙 景峰\*\*・岡崎守良\*・李 崇舜\*\*・夏 訓誠\*\*

## 1. まえがき

中国新疆省南西部に位置するタ克拉マカン沙漠は約33.8万km<sup>2</sup>の広さを持つ中国最大の沙漠で、周辺のオアシス地帯は沙漠から風によって運ばれる砂の被害をしばしば被る。そのような被害を最小限に止めるためには、沙漠の砂の輸送方向や輸送量を知ることがきわめて重要であり、そのためには現地における風の特徴を把握することが不可欠となる。

新疆省の風の特徴について吉野(1991)は気候学的見地から既存の資料をまとめているが、それによるとタ克拉マカン沙漠西部のカシ(喀什)からホータン(和田)にいたる地域は年間平均の卓越風はほぼ西風、沙漠南西部は南西ないし南よりの風、東部は北東風となっている。もちろんこれらは平均的な意味を持つもので、日々の風向は変化に富むものである。たとえば1988年5月のチーラ(策勒)地区(ホータンの東約100km)における現地観測(長島ほか, 1988)の際の風は3日間で西風から東風へと変化し、これにともなっていわゆる Reverse dune(MCKEE, 1979)の生成がみられた。したがって、砂の移動をより正確に予測するにはこの地域の風の特徴をもう少し詳しく把握する必要がある。

本短報では、1990年10月から1991年3月にかけてチーラ地区で実施した風向・風速等の気象要素の自動観測の結果について報告する。この地域で4カ月余りにおよぶ毎時の気象観測資料が得られたのは今回が初めてであり、気候学的資料解析では得られない動的実態が把握された。また、砂輸送の収束発散の結果として起こる砂面の変動はどの程度のものであろうかという単純な疑問に答えるために、チーラ地区の砂丘地帯で行った sand recorderによる砂面変動の測定結果も報告する。

## 2. 観測

タ克拉マカン沙漠南西部のチーラ(策勒)地区(ホー

タン(和田)の東約100km)の砂丘地帯(図1)に自動気象観測装置を設置し、1990年10月より1991年3月にかけて気象要素(風向・風速、気温、日射量、湿度、雨量)の自動観測を行った。サンプリング間隔は1時間としたので、データ総数は各要素3,292個におよぶ。用いた観測システムはアンディラー社(ノルウェー)製で、砂丘地帯の比較的平坦な地点にコンクリートで基礎をつくり、高さ10mのポールを立ててその先端に各センサーを取り付けた(図2)。つぎに sand recorder(光電式砂面計: 三洋測器社製)を策勒の砂丘地帯の高さ30mの砂丘の頂上に設置(図3)し砂面変動の連続測定を行った。自動測定の時間間隔は3時間、また測定期間は1990年10月25日から1991年3月2日である。

## 3. 結果と考察

### 1) 気象要素等の自動観測結果

砂面上10mの高さに設置したセンサーにより測定された気象要素の時系列を図4に示す。まず、風速資料を見ると1時間平均値での最大は10.1m/secで1990年11月28日12:00時に測定されており、このときの瞬間最大風速は15.2m/secとなっている。ここで平均値とはサンプリング間隔(1時間)内の算術平均値を、最大風速は同時間内に2秒以上続いた風速の最大値を表す。また、図5に示した風向の頻度分布を見ると西南西及び南南東の風が卓越しているように見えるが、7m/sec以上の風は西北西が卓越している。

気温は-15.5°C～21.4°Cで、11, 12, 1, 2月の平均気温はそれぞれ6.4°C, -3.2°C, -4.5°C, -1.2°Cである。

相対湿度は15～98%で、11, 12, 1, 2月の平均相対湿度はそれぞれ37.8, 62.9, 68.7, 57.1%となっている。また、日射量は最高77.6mW/cm<sup>2</sup>で、11, 12, 1, 2月における最大日射量はそれぞれ72.6, 60.2, 70.6, 77.6mW/cm<sup>2</sup>となっている。

全観測期間中、12月31日15:00に1.1mm、2月16日に0.3mmの降水量が記録されている。和田実験站で

\* 理化学研究所地球科学研究室

\*\* 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所

(受付: 1991年8月21日、受理: 1991年10月14日)

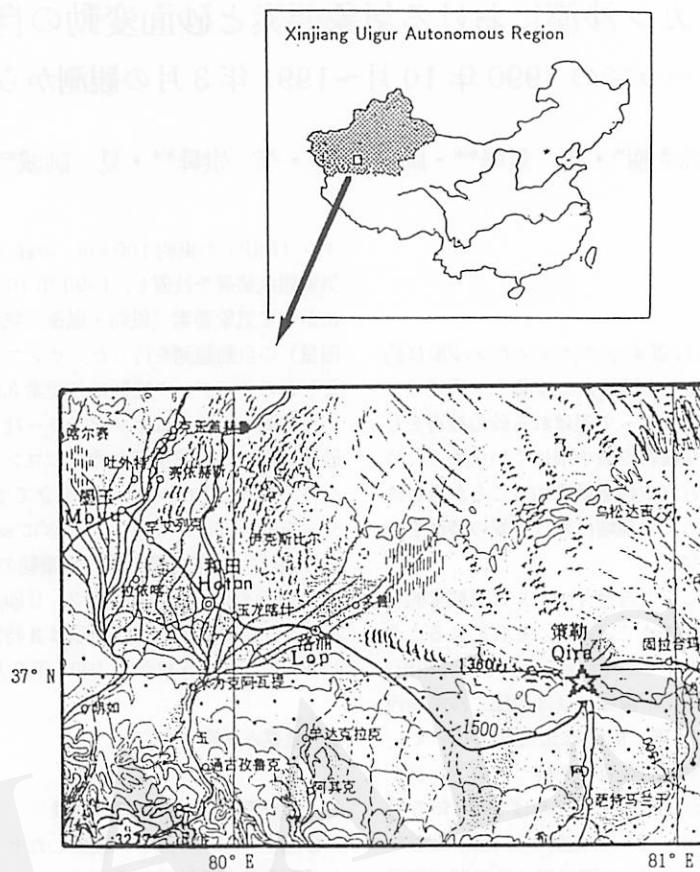


Fig. 1. Observation station in Cele ( $\star$ ), Taklimakan desert.

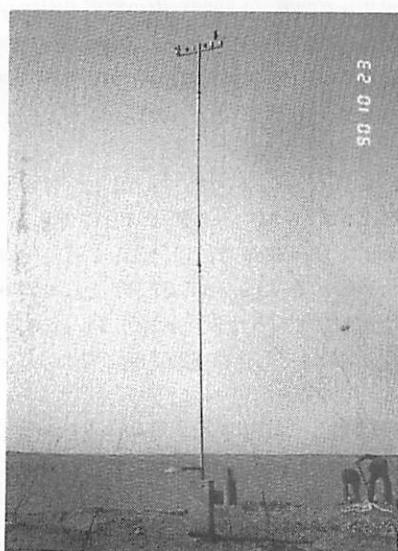


Fig. 2. Automatic weather station.



Fig. 3. Sand recorder on the top of a dune.

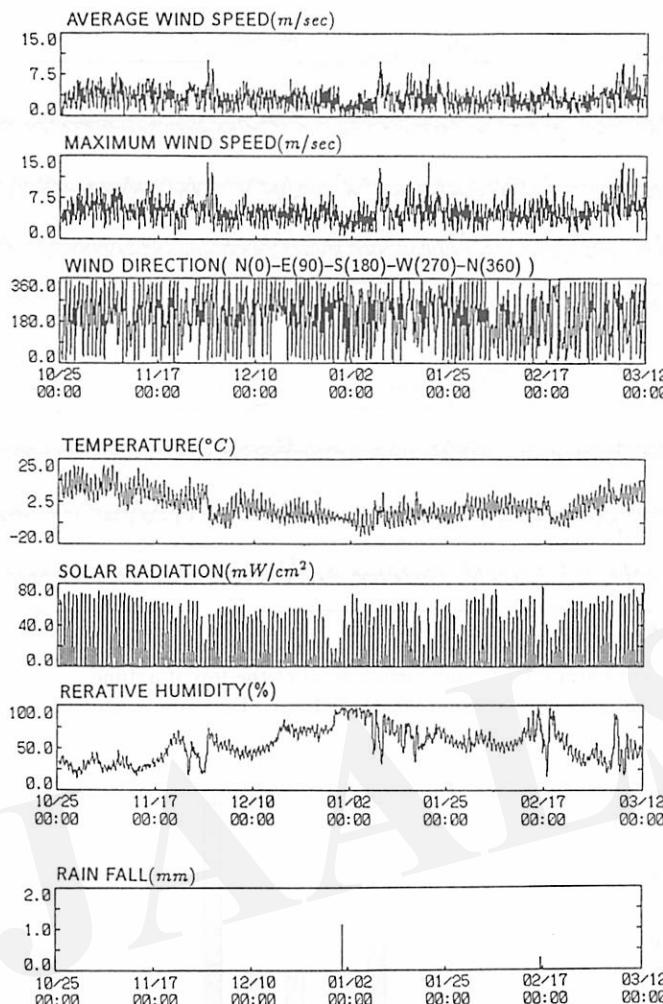


Fig. 4. Records of meteorological factors 10 m above the sandsurface.

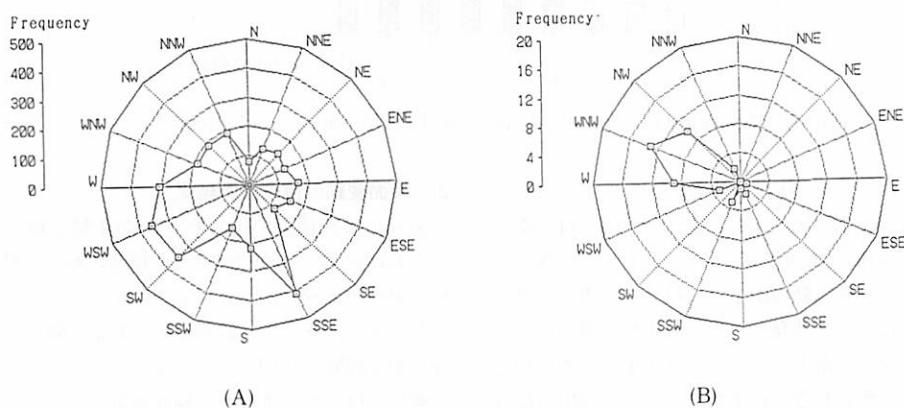


Fig. 5. Frequency distribution of wind direction.  
(A) all data, (B) wind speed  $\geq 7$  m/sec.

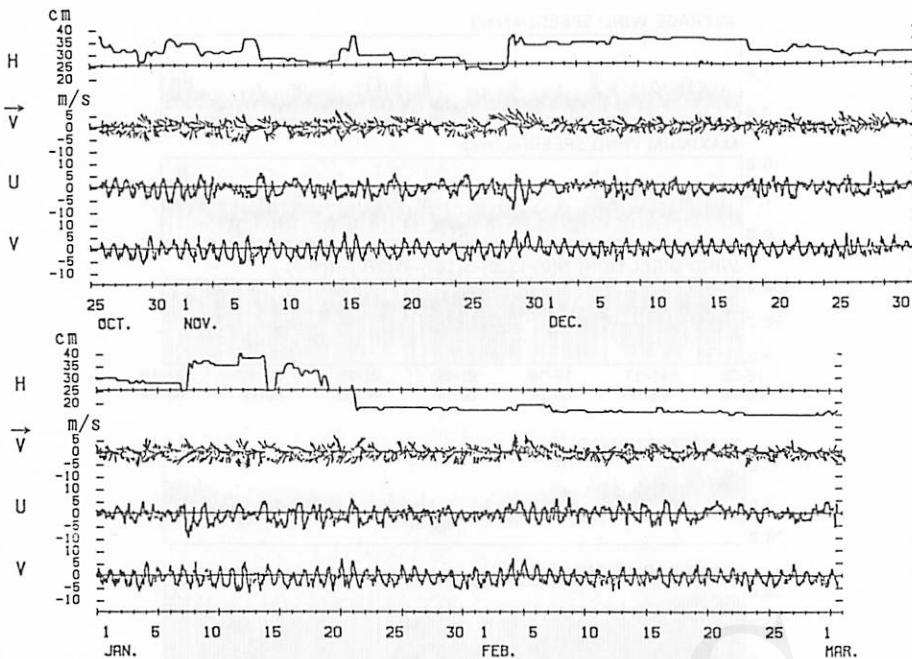


Fig. 6. Wind speed and variation of sand surface level of the top of a dune.

H: sand surface level (cm),  $\vec{v}$ : wind speed vector,  $U$ : East component of wind velocity,  $V$ : North component of wind velocity.

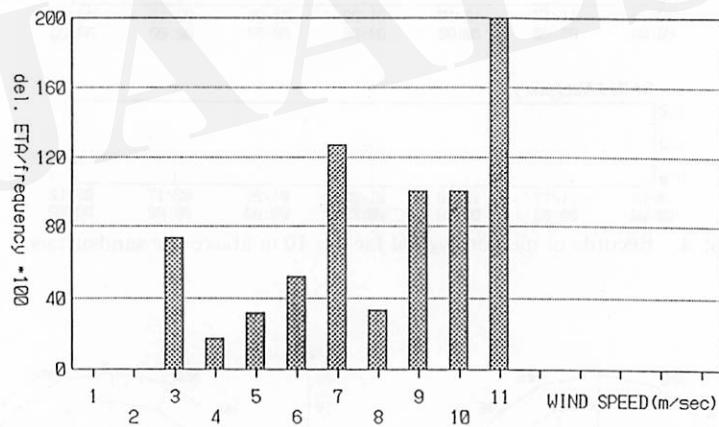


Fig. 7. Relation between wind speed and variation of sand surface level.

の観測によると 12 月 29 日から 31 日にかけて合計 5 mm の降水量が記録されている。また 2 月 15 日の夜半には 2.2 cm の積雪（降水量 9.2 mm）があったと報告されており、このとき策勒の雨量計に積もった雪が翌日の日射で融けてほとんど蒸発し、ごくわずかな量だけが雨量センサーを通して落下したときに降水量として自動記録されたものと思われる。いずれにしろ、今回用いた雨量計（アンディラー社雨量センサ 3064）はごく微量な降水量の計測には適さない。

## 2) 砂面変動の自動観測結果

図 6 に砂丘頂上で得られた砂面変動記録を風速資料とともに示す。砂面は 25 cm 程度の幅で変動しているが、風速が 6~7 m/sec 以上の時にとくに大きいことがうかがえる。そこで、砂面変動（測定間隔 3 時間）と風速（測定間隔 1 時間）との関連を調べるために次のような解析を行った。すなわち砂面変動が認められたときの風速を調べ、変動前 3 時間以内における最大風速（1 時間平均値）を横軸に、砂面変動の積算値の 100 倍をその

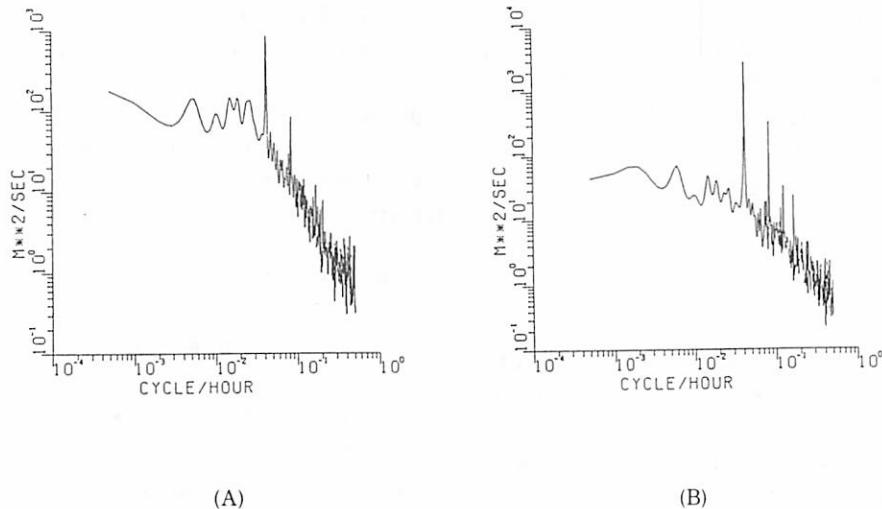


Fig. 8. Power spectral density of wind.  
(A) East component, (B) North component.

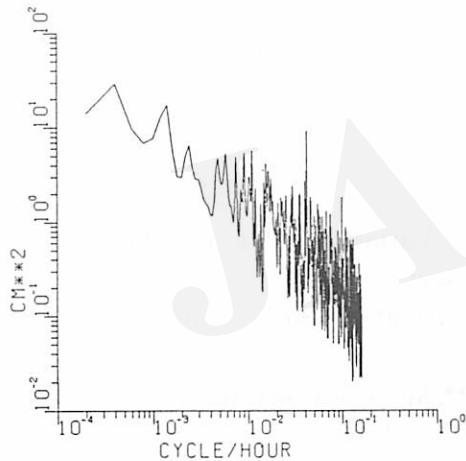


Fig. 9. Power spectral density of variation of sand surface level.

風速の頻度で割った量を縦軸にとり図7に示す。これにより、風速7m/sec以上では砂面変動が著しいことが解る。

### 3) 風速および砂面変動のスペクトル解析

図8に風速変動の東西、南北成分のパワースペクトルを示す。解析は最大エントロピー法（例えば日野、1977）を用い、その際のフィルター項数はDNP基準に従った。図8より風速の変動は周期1日に非常に鋭いスペクトルピークがあり、日射による日中の加熱と夜間の放射による冷却に起因すると思われるlocal windが示

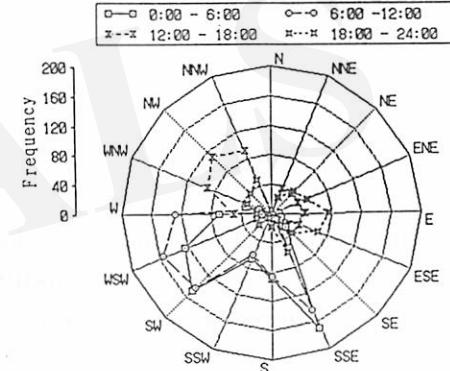


Fig. 10. Time dependent frequency distribution of wind direction.

唆される。また、半日、1/4日にもスペクトルピークが見られるが、これは1日周期のlocal windの波形の非線形性に起因するものと思われる。

図9に砂面変動(S-1)のスペクトル解析結果を示す。風に比べあまり顕著ではないがやはり1日周期のスペクトルピークが見られ、local windに対応して砂丘の頂上が移動し、それにともなって砂面が変動する様子がうかがわれる。また、低周波側でかなりエネルギー密度が高いが、これに対応する風速変動は見られない。

### 4) 風の日変化

上述したようにスペクトル解析の結果は風の日変化を示している。そこで1日を4つの時間帯(0:00~6:00, 6:00~12:00, 12:00~18:00, 18:00~24:00)に分けてそれ

ぞれの時間帯における風向の頻度分布を風速 2 m/sec 以上の風について調べた。図 10 にその結果を示す。これによると、風は夜から午前中にかけて山岳地帯から沙漠に向かって吹き、午後は沙漠より山岳地域に向かって吹くと言える。詳細にみると夜から午前中にかけての風向には 2 つの頻度 (WSW と SSE) がある。また、北から北東にかけての頻度はきわめて少ない。

#### 4. まとめ

以上のようにタクラマカン沙漠南西部に位置する策勒地区の移動沙漠に自動気象観測装置、sand recorder 等を設置し、1990 年 10 月から 1991 年 3 月にかけて 137 日間におよぶ長期連続観測を行なったが、その主な結果は次のような。

- (1) 風向きは西南西および南南東が卓越している
- (2) 風速 7 m/sec 以上の風は西北西が卓越している
- (3) 風の変動は 1 日周期が卓越している
- (4) 高さ 30 m の砂丘の頂上付近の砂面でも 1 日周

期の変動が卓越している

- (5) 風速 7 m/sec 以上で砂面変動が顕著である

#### 謝 辞

本研究は平成 2 年度科学技術振興調整費「沙漠化機構の解明に関する国際共同研究」の一環として行われたものであり、現地観測に際し協力していただいた中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所の所員各位、ウルムチ（烏魯木齊）、ホータン（和田）、チーラ（策勒）の多くの方々に深く感謝いたします。

#### 引用文献

- 長島秀樹・夏 訓誠・李 崇舜・周 興佳 (1988): 策勒県西南砂丘の特徴. *Proceedings of Sino-Japanese Symposium on Desert*, 2: 60-68.  
 日野幹雄: 「スペクトル解析」朝倉書店.  
 吉野正敏 (1991): 「中国の乾燥地域と半乾燥地域の気候—特に沙漠化気候に関連した既存資料の調査—」76 p.  
 McKEE, E. D.: *Introduction to a study of global sand seas. A study of global sand seas.* U.S. Geological Survey Professional Paper, 1052: 1-19.

## Observation of Meteorological Factors and Variation of Sand Surface in Taklimakan Desert

—Observation in Cele from October 1990 to March 1991—

Hideki NAGASHIMA\*, ZHAO Jingfeng\*\*, Moriyoshi OKAZAKI\*,  
 LI Chongshun\* and XIA Xuncheng\*

In this work, meteorological factors in the desert were measured by using an automatic weather station. The test area is the desert near Cele located in the southern edge of the Taklimakan desert where moving sands cause severe disasters frequently. The data were obtained every one hour from October 1990 to March 1991. The most frequent wind direction is SSE, and next are WSW and SSW. Strong wind (say  $\geq 7$  m/sec), however, blows from WNW direction. The spectrum of wind was calculated by using Maximum Entropy Method. The spectral peak is recognized at the frequency of daily fluctuation. This suggests the existence of the local wind that is caused by the differences of daytime radiation and nighttime cooling between the desert and mountainous area. A fluctuation of sand surface of a dune was also measured by using a sand recorder. It was found that the strong wind ( $\geq 7$  m/sec) causes a notable change of sand surface level.

**Key Words:** Taklimakan desert, sand dunes, local wind

\* The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Hirosawa 2-1, Wako-shi, Saitama 351-01 Japan.

\*\* Xinjiang Institute of Biology, Pedology and Desert Research, No. 40 South Beijing Road, Urmqi, Xinjiang, China.

(Received Aug. 21, 1991; Accepted Oct. 14, 1991)

## 特集 沙漠工学を考える ——第1回沙漠工学講演会講演要旨集——

日本沙漠学会沙漠工学研究分科会\*

総合司会：農水省熱帯農業研究センター

### 概 要

本講演会は、日本沙漠学会沙漠工学分科会の今後の活動方針とその研究内容をまとめ、多くの方にその活動を知っていただくとともに、議者のご意見を伺い、今後の指針を得ることを目的として行われたものである。幸い会場をうめつくす80人以上の方のご参加を得ることができ、盛会となったことは本分科会としてたいへん喜ばしく、光栄であるとともに、今後期待に応えるべく、会員一同さらに活発な活動を展開していく所存である。さらなるご支援のほどをお願いする次第である。

本稿は本講演会のプログラムとともに講演内容および質疑応答の概要をまとめたものである。（小島紀徳）

### プログラム

1991年9月27日(金)，於学士会館（東京 神田）

13:00～挨拶：日本沙漠学会副会長 増田彰正  
(敬称略、以下同)  
：環境庁官房総務課広報室長 南川秀樹

13:20～講演Ⅰ. 沙漠工学の提唱	理化学研究所主任研究員 遠藤 勤	小林登史夫 (株)荏原製作所環境事業本部 結城邦之
13:50～講演Ⅱ. 沙漠にもっと水を	成蹊大学工学部工業化学科	小島紀徳
14:20～講演Ⅲ. 沙漠での有用物質生産	電力中央研究所経営調査室	新田義孝
15:00～講演Ⅳ. 沙漠を快適居住空間に	気象研究所応用気象研究部	吉川友章
15:30～講演Ⅴ. 日本に沙漠の研究施設を	清水建設(株)エンジニアリング本部	高野義大
16:00～沙漠工学の研究事業計画の説明	沙漠工学研究分科会コーディネーター 遠藤 勤	
16:10～総合討論		全パネラー

### Special Report Proceedings of First Symposium on Arid Land Technology

THE JAPANESE RESEARCH GROUP FOR ARID LAND TECHNOLOGY\* (REAL Tech.)

This symposium, held at Gakushi-Kaikan, Kanda, Tokyo on September 27th, 1991 was planned to publicize the activities and the research schedule of The Japanese Research Group for Arid Land Technology (REAL Tech.). We received much more participants than we expected. We feel honored and are encouraged to activate our research. We would also ask you to join us and support our research.

This article consists of the proceedings of the symposium including the questions, answers and discussions. The followings are its contents.

\* 〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1 理化学研究所化学工学研究室 Tel. 0484-62-111

\* c/o Chem. Eng. Lab., The Institute of Physical and Chemical Research, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-01  
Tel. 0484-62-1111

# I. 沙漠工学の提唱

遠 藤 熊\*

## I. On Desert Technology

Isao ENDO\*

### 1. はじめに

最近、オゾン層の破壊、地球の温暖化、酸性雨、熱帯雨林の激減、野生生物の減少、沙漠化など地球環境問題が国内外で真剣に論じられている。最近と言ったが、正確に言えば、この問題は今急に起こったわけではない。約4半世紀前、わが国をはじめ欧米先進諸国では、過度の産業化に伴いそれぞれの国内において空気汚染、河川・湖沼・内海の水汚染、都市および工場廃棄物の問題などいわゆる局所的な公害が大きな社会問題となっていた。人々が豊かさと便利さを追求して年月を経る間に、局所的な社会問題が地球規模の国際社会問題へと発展したのである。

産業先進諸国だけが地球環境問題の責を負うのではない。伝統的社会文化圏、いわゆる開発途上国にも政治・経済の面から観て責任の一端はある。こうして国連を中心、「将来にわたって持続可能な開発」、「生態学的に健全な開発」など世界的対応策が盛んに討議されるようになった。人々はいまこそ「地球——すべての生物の公共財——の保全」を強く認識すべきである。ここでいう保全とは、事前、事後の監視、予防、整備、修復を行う意味である。

われわれ人類は、宇宙の塵埃から海洋で生命が誕生し、数億年の進化、適応と絶滅とを繰り返しながら陸地に棲息するようになったそのような生物の頂点に立つ。人類がこのような進化の方向に逆らって陸地を放棄し、再び海洋に移り棲み、さらに地球を放擲して宇宙を放浪することは考えられない。だとすれば、われわれの生活圏である陸地の約1/3が沙漠であり、毎年600万haの土地が沙漠化している事実をわれわれはもっと深刻に受けとめるべきであろう。沙漠化の発端は、われわれの祖先およびいまのわれわれの政治、経済、文化の諸活動であることは歴史が証明している。われわれが、いま英知

を結集して子孫のために住み良い陸地環境を保全する努力を行うことは当然の義務であると考える。

この小論の目的は、沙漠環境をわれわれのより身近な生活環境にとり戻し、沙漠化を防止、緑化するために工学はどんな役割を果たすべきか、議題を提唱することである。筆者は、沙漠のような極限環境で対応できる工学を発展させることによって、いまよりさらに工学の方法論、先端技術がブレイクスルーできると信じている。

### 2. 沙漠環境で培われてきた諸技術と方法論の見なおし

アメリカ、イスラエル、中国、オーストラリアなど国内に沙漠がある国々や、フランス、ベルギーなどかつて沙漠を持っていた国々は、沙漠をいかに自分たちの生活空間に取り込むかという問題を解決するために長年努力し、大きな実績がある。例えば、中国においては、表1-1に示すような各種技術を材料、エネルギーではなく、豊富な人的資源を投入して開発している。アメリカ、イスラエル、オーストラリアなどでは、材料、エネル

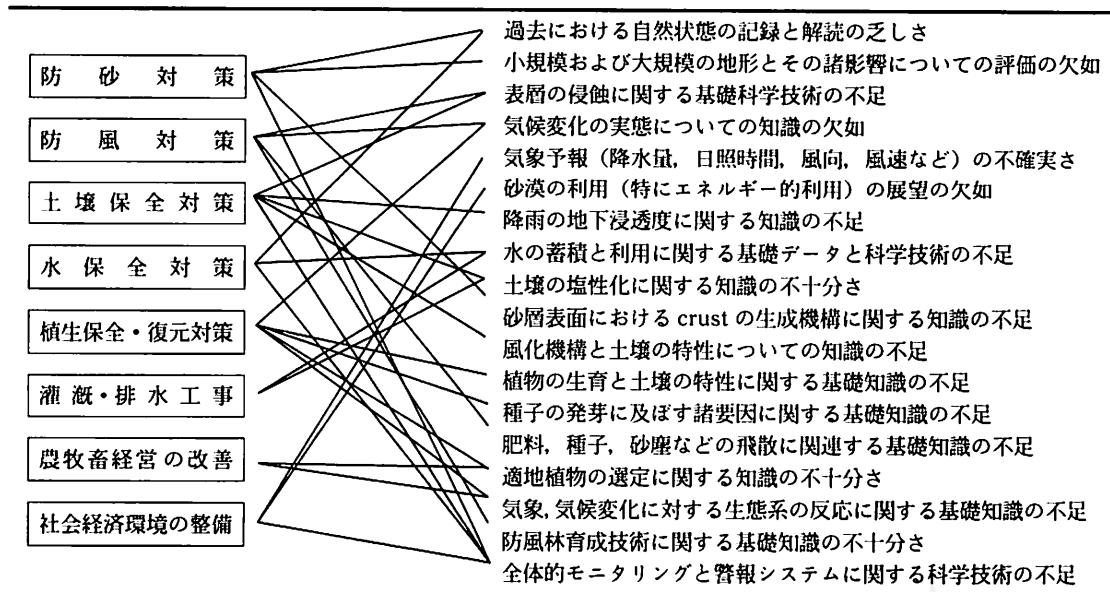
表1-1. 中国における対処方法

A. 生物学的方法
(1) 封砂育草
(2) 防砂林帯
(3) 耕地防護林網
(4) 砂丘間低地造林
(5) 砂丘表面の草木、灌木群による固砂
B. 物理的方法
(1) 高立式砂障
(2) 半隠蔽式および隠蔽式砂障壁
(3) 円レキ又は粘土による砂の被覆
C. 化学的方法
(1) 化学的固化材の吹き付け
(2) 流砂改良化学薬剤の使用

\* 理化学研究所化学工学研究室

\* Chemical Engineering Laboratory, The Institute of Physical and Chemical Research

表 1-2. 砂漠化防止対策の実施状況と問題点



(科学技術庁研究開発局(1989):『砂漠化の機構解明に関する調査成果報告書』別添資料 5)

ギーの面から沙漠化防止、水資源の確保に努力を傾注している。

そうした国々の努力にも拘らず、沙漠環境は未だわれわれの身近な生活環境になっているとは思えない。それには多くの理由があろう。このような理由を1つ1つひろいあげたとき、すべての問題を解決できる工学は万能ではない。にしても工学は何にどう寄与できるであろうか？以下に私見を述べたい。表1-2は、これまで開発されて来た種々の沙漠環境対策と問題点とを示している。問題点はつきのように要約されよう。すなわち、第1点は、技術対策を講ずるための科学上の基礎データが不備であること、第2点は、基礎データをどのようにして蓄積するか、対策はどこでどう講ずるかなどの方法論が欠如していることである。基礎データは対象とする場所を限定しなければ効率良く蓄積できない。しかし方法論は特定な場所を考えていては健全な展開が望めない。

方法論に対して筆者はつきのように考えている。従来の沙漠化防止諸対策とそこで発展された諸技術は、主として農業土木、土壤肥料など農学関係者の努力に負うところが多かった。それゆえ、従来の method論は現場中心にならざるを得なかった。筆者は、現場中心、言いかえればフィールドワークの重要性を否定するつもりはまったくない。しかし、フィールドワーク以外にモデル実験やシミュレーションの有効性を無視してはならないであろう。研究者、技術者の活動寿命や現場の広さ、多様性、現象の再現性が困難であることなどを考えるからであ

る。モデル実験やシミュレーションの効用は、わが国のように沙漠がない国でも施設さえあれば十分行うことができる点にある。沙漠のように人為的行為に極めて脆弱な環境では、ひとたび現場における実験が失敗すれば、また持続性がなければ環境破壊を一層助長する危険が大きい。それに対し、モデル実験、シミュレーションは、そこに今住んでいる人たちの生活を脅かすことも環境破壊の危惧もなく何度も試行錯誤できる強みがある。

### 3. 沙漠工学の提唱

ここで、沙漠工学を提唱し、そのような分野が今後沙漠環境を舞台にして展開されることを筆者は強く望みたい。

沙漠工学とは、沙漠環境の種々の特性、例えば広大な面積（全陸地面積の約1/3）、塵埃・土・砂・礫などからなる土壌、太陽光、温度差（日较差、年较差）、乾燥、風、塩濃度、乾地生態系、豊富な地下資源等を活用し、われわれの生活圏を拡充するための新しい工学の一分野であるとひとまず定義しておく。

すなわち、われわれは、

- ①沙漠に学ぶ
- ②沙漠を活かす
- ③沙漠で生きる

という3つの方向性を沙漠工学に求めたい。

そのような方向に沿って沙漠工学を展開するために

表 1-3. 沙漠の役割の可能性と開発要素

1) エネルギー開発	4) 廃棄物処理処分
① 太陽熱光発電システム ② 耐熱性風力発電システム ③ 地熱発電システム ④ 探索、抽出、有価発電システム ⑤ 高安全性原子力発電システム ⑥ 海洋温度差発電システム ⑦ 淡水化システム ⑧ 石炭火力発電システム ⑨ LNG 発電システム ⑩ 原子力発電システム ⑪ 水力発電システム、大規模堤防	① 破碎、焼却、固化、埋設、分解技術 ② 地下浸透 ③ 飛散防止 ④ closed-system ⑤ 放射性物質隔離システム ⑥ 情報ネットワーク
2) 鉱物資源	5) 交通、通信、気象
① 鉱物資源探索システム (ランドサットシステム) ② 鉱物資源発掘システム ③ 残渣処理システム ④ 資源リサイクルシステム ⑤ 鉱物資源貯蔵システム	① 交通手段およびシステム ② リモートセンシング ③ 簡易通信気象システム
3) 材料、装置開発	6) 食糧
① 簡易移動型ロボット ② 簡易通信システム ③ CO <sub>2</sub> 固定化コンクリート ④ 耐塞性建材の開発 ⑤ 耐摩耗性建材の開発 ⑥ 耐摩耗性太陽電池の開発 ⑦ 耐熱性、耐乾性コンピュータ、 コンピュータ回路の開発 ⑧ 保水材の開発 ⑨ 固砂材の開発 ⑩ 防風林 ⑪ 紫外線保護シェルター ⑫ 耐酸建造物 ⑬ 森林再生 ⑭ 機器の開発 ⑮ 情報ネットワークの開発	① 緑化施設 ② 防砂施設 ③ 保水・貯水システム ④ 種子開発 ⑤ バイオテクノロジー利用 ⑥ 生産施設 ⑦ 貯蔵施設 ⑧ 加工施設 ⑨ インフラシステム ⑩ 農地開発 ⑪ 散水システム ⑫ 給水・廃水システム ⑬ 情報ネットワーク
	7) 人間生活空間
	① 簡易移動型発電システム ② 固定発電システム ③ 燃料開発 ④ 最適放牧システム ⑤ 水利システム(塩水湖、氷湖、脱塩) ⑥ ソーラオアンス ⑦ 飛砂防止 ⑧ 固砂 ⑨ 防風 ⑩ 情報ネットワーク

は、先ず第1に従来の理学、工学の体系を超えた総合的な研究を推進すべきである。第2に産・官・学の協調を密にする。第3に国際協力を大いに奨励する必要がある。

このような沙漠工学に、以下のような学術的、工業的、社会的意義を見出すことができる。

沙漠工学の諸研究を通じ、わが国先端技術を再評価し、ブレイクスルーできるポイントを見出すことは学術的に意義深い。例えば、計算機や太陽電池、自動車をは

じめ先端技術の多くは、極めてマイルドな環境下で創製された。われわれの生活圏を広げるためには、それらの技術を沙漠のような劣悪な環境下でも十分機能させることが重要である。このような努力を通じて、技術をいっそう進展させ産業に役立たせることは工業的にも意義がある。その際、先端技術を単純に、もしくは強引に沙漠地域に移転することには注意が必要である。沙漠地帯に昔から今日まで住んでいる人たちと協調し、彼らの、そしてわれわれの生活水準、生活空間が向上し、拡充する

表 1-4. 沙漠化防止技術・沙漠環境保全技術

1) 大規模環境改善と地球環境との関わり
① 沙漠、沙漠化の地球環境における役割、 地球環境の定量的評価 二酸化炭素、メタンなどの物質循環に関するシミュレーション
② 自然界での水移動経路の制御 (河川流路、水湖、塩水湖)
③ 沙漠化防止、環境保全技術、農地使用への可能性の評価
2) 沙漠化の原因と影響度の定量化
① 生態系
② 周囲環境
③ 人的影響
3) 砂、風
① 起砂、飛砂および砂丘移動過程のモデル化
② 人工的飛砂防止技術—地表建造物 —固砂技術
③ 農学的飛砂防止技術
④ 風食の速度論的定量的評価
⑤ 防止効果の①による評価
4) 土 壤
① 土壌中水分、塩類移動のモデル化 大気膜/地表面/地下水
② 水分塩分移動制御(遮水槽、有機物埋設) (遮水・通気性材料)
③ 土壤改良(化学物質、pH、肥料) (保水剤)
④ 灌溉・給水法、排水法開発
⑤ 蒸散防止(マルチ、被覆)
⑥ 防止効果の①による評価
5) 水の確保と集水
① 地表水の利用
② 地下水の利用
③ 淡水化 膜、蒸留 蒸発、凝縮、集水
④ 大気中からの凝縮、集水
⑤ 貯水法
⑥ 雨水の集水法

ように努力すべきである。先端技術を時の為政者の道具にしてはならない。以上のことを留意しつつ沙漠工学を通してわが国が世界に貢献することは、国際社会において大きな意義がある。

それでは、具体的にどのような研究テーマが考えられるであろうか。筆者は第1に沙漠環境が新しい技術を育成する土壤としての役割を果たしてくれるかどうか、その可能性とどのような開発要素があるかを先ず検討すべきであると考える。例えば表1-3に、エネルギー開発、鉱物資源、材料・装置開発、廃棄物処理処分、交通・通

信・気象、食糧生産、人間の生活空間という7つの沙漠環境の活用項目を選び、それぞれの項目に対して開発要素を列記した。

第2は、沙漠化防止、沙漠環境保全という観点から諸技術を開拓すべきであると考える。表1-4に、すでに述べた沙漠環境の種々の特性ごとにどのようなデータを実験で得、新しい技術を創製すべきかを整理した。とくに、沙漠環境が全地球環境の中で果たしている役割を物質循環、エネルギー循環の立場から定量的に明らかにすることは重要であると考える。

第3は、以上述べた諸技術を評価すると同時にモデル実験ができる研究施設(沙漠ドームと以下呼ぶ)が必要であろう。例えば、表1-5に沙漠環境の特性と小研究テーマ案、研究目標を示した。すでに前節で指摘したように科学上の基礎データを集積することと方法論の展開とは性格が相反するものである。沙漠ドームはこのような矛盾した問題を止揚できる機能を持たなければならぬと筆者は考える。図1-1は、そのための1案を示している。すなわち、工学上の諸問題を解決するためには、日本沙漠学会傘下の諸研究分科会、既存の諸団体とも緊密に情報交換、共同研究をすすめ、工学が万能であるという驕りは放棄しなければならないことは言うまでもない。

1990年5月に日本沙漠学会が旗揚げしたが、会員の中で沙漠工学に興味のある有志が集まり、表1-3、表1-4、表1-5に示した諸テーマを検討してきた。そして1991年9月27日学士会館において「沙漠工学を考える」というテーマで講演会を開催し、沙漠工学研究分科会を正式に発足させた。

上記分科会は、当面以下の5つの研究事業とそれぞれのテーマの責任者を決め、活動を開始することにした。

- ①自然エネルギーの活用(責任者:筆者)、以下( )内は責任者。
- ②水資源の確保(小島紀徳 成蹊大学工学部助教授)
- ③有用物質生産(新田義孝 電力中研経営調査室長)
- ④快適居住環境の創造(吉川友章 気象研応用気象研究所室長)
- ⑤日本に沙漠研究施設を(高野義大 清水建設(株)砂漠開発エンジニアリング部副部長)

われわれは、先ず調査活動と資料の検討から事業を開始し、沙漠を対象にした地球上にやさしい生活・産業基盤の創造に挑戦しようと考えている。沙漠工学に関心のある方が多数入会され、一緒に活躍されることを望んでいる。

表 1-5. 沙漠ドーム内の具体的実験テーマの策定

	砂および土壌	塩	水	エネルギー	材 料
小 研究 テ ー マ	・飛砂 ・乾河床よりの起砂 ・地表の風触 ・砂丘の形成、発達、移動など	・地下水からの起塩 ・地表における塩の蓄積と移動など	・局地的な水資源の確保 ・淡水化 ・生活排水の有効利用 ・衝撃的な降雨など	・太陽エネルギーの利用 ・風力発電 ・塩分濃度差を利用した発電 ・乾燥空気を利用した空冷システムなど	・防塩マット、保水材などの新材料の開発 ・機械・器具材料などの塩による摩耗 ・建築材料など
研究の目標	・固砂技術の開発 ・交通・輸送手段、電気通信網の確保	・防塩技術の開発	・上・下水道の確保	・エネルギーシステムの開発 ・ソーラーオアシス	・新材料の開発

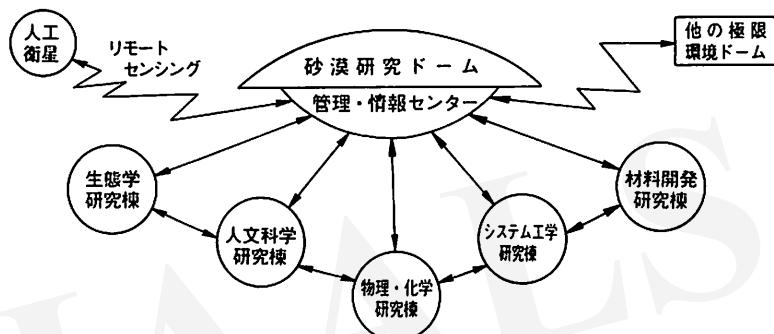


図 1-1. 沙漠ドームの構成図（沙漠環境研究会, 1989）

#### 4. おわりに

この小論で、沙漠環境を舞台にどのような工学上の諸問題が展開可能であるか、またインフラストラクチャーが見込まれるか私見を述べた。沙漠工学という学問分野は未だ広く認知されていないが、既存の諸工学分野を横断、統合した新しい学問分野として発展する可能性は極めて大きいと筆者は信じている。多くの有識者の御賛同を得て、一緒にこの新しい工学を育てていきたいと願ってやまない。どうかよろしくご支援賜りたい。

おわりに臨み、日本沙漠学会会長小堀巖先生をはじめ理事の諸先生、沙漠工学研究分科会幹事の方々に種々の観点から御意見、御討論いただいたことに感謝する。特に、沙漠工学の諸開発テーマを展開するにあたって

は、清水建設(株)エンジニアリング本部沙漠開発部の小笠原均郎氏にたいへんお力添え頂いた。同氏に心から感謝したい。なおこの論文の骨子は第1回日本沙漠学会学術大会（1990年11月30日、12月1日、東京大学理学部2号館）およびEngineering Foundation Conference（1991年8月4日～8日、Santa Barbara）で発表した。

#### 引用文献

科学技術庁研究開発局(1989):『沙漠化の機構解明に関する調査成果報告書』94 p.+別添資料17, 写真12.  
沙漠環境研究会(1989):『沙漠ドーム構想』。

**Key Words:** Desert technology, Development factors, Prevention technologies for desertification, Desert-Dome

## II. 沙漠にもっと水を

小 島 紀 德\*

### II. More Water for Desert

Toshinori KOJIMA\*

#### 1. 概 説

世界の年間降水量分布（国立天文台, 1990）を図2-1に示す。これを、世界の沙漠地図と重ね合わせると、もちろん完全に1対1ではないが、非常によい一致を示していることがわかる。例えば、低緯度地域に限って言えば、年間降水量100 mm以下の地域はすべて有名な沙漠に対応している。

確かに温度が高い地域では蒸散発量が多く、一方低温地域では少ないため、前者の方が沙漠化が起きやすいとは言えるが、第一次近似的にはある量の水さえ得られれば沙漠にはならないと考えてよいだろう。すなわち、沙漠を緑化するあるいは沙漠化を防止するためにはまず必要なのは水の確保と考えてよい。もちろんその後、農学的な様々な検討が必要であることは言うまでもないが、

工学としていかに安く、安定に水を確保するかが我々の使命と考えられる。

広義の沙漠として塩害地域があげられる。もちろん、狭義の沙漠でも、塩害はしばしば問題となるが、これらの地域では、年間降水量でいえば必ずしも水が不足しているとはいえない場合も多い。雨期にはある程度の降雨があるものの、乾期には蒸散発により地下水中の塩分が上昇し、地表が真っ白に覆われることもある。地下水位の上昇も原因の一つであり、これも人為的に引き起こされる場合が多い。タイの塩害地の状況（小島ほか、1990：成蹊大学沙漠研究グループ、1990）を図2-2に示す。乾燥地では灌漑水中の塩分の蓄積を引き起こし、塩類化を招くこともある。塩類化を招かないような灌漑法および塩類化土壤のリーチング法の開発、あるいはその基礎研究としての土壤中の塩分、水分の挙動も、もちろん農学的にも検討されているが、新しい観点から工学

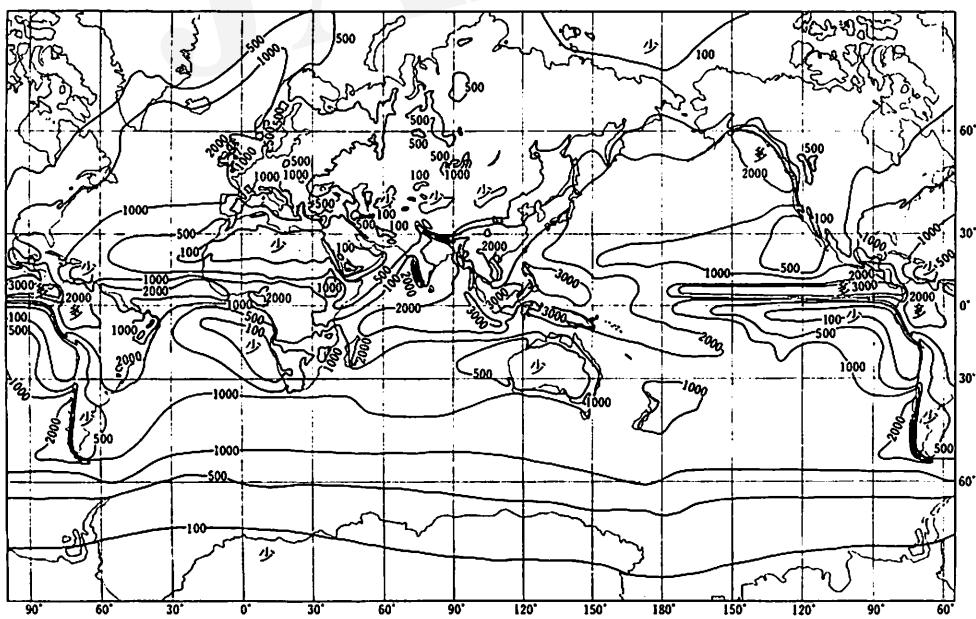


図2-1. 世界の降水量分布

\* 成蹊大学工学部工業化学科

\* Department of Industrial Chemistry, Faculty of Engineering, Seikei University



図 2-2. タイ東北部での塩害の実態  
上) 水田の塩類化と塩田への転換  
下) 塩類化した農場

的に検討して行く価値があるものと考える。乾燥地で水を得るにはこれらの地域での水の動き(図 2-3)を知る必要がある。この図からわかるように沙漠で得られる水源としては、①地下水(化石水、地下河川)があげられるが、その資源量や他への影響も問題となる。②ワジすなわち雨期のみに見られる河川水の利用は、その季節依存性のため貯水技術が必要となる。③大気中に存在する湿分の利用法としては凝縮水あるいは大規模人工降雨があげられる。④水が豊富な地域からの輸送は工学として蓄積の多いところである。⑤塩水、あるいは海水を輸送し、淡水化することも可能である。

## 2. プロジェクト

現在までに多くの沙漠緑化、沙漠化防止プロジェクトが世界規模で提案してきた(宮本, 1990)。これらのうちいくつかは多大な成果を修めたものもあり、そうでないものもあるが、多くの水が問題と深く関連してきた。

夢ともいえる大規模プロジェクトもいくつか提案され

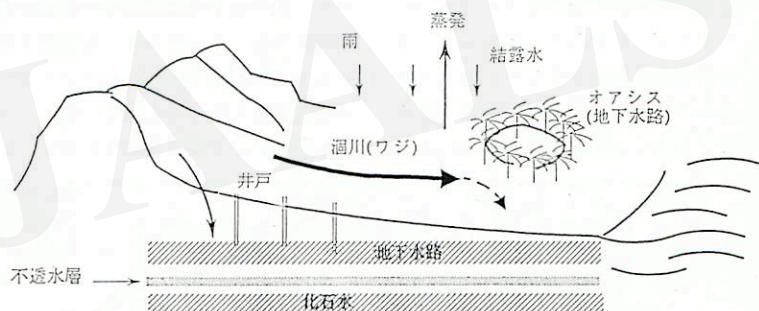


図 2-3. 乾燥地域における水の動き

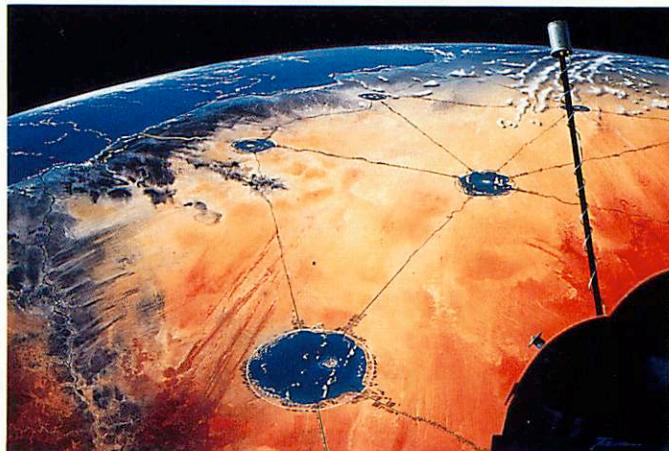


図 2-4. デザート・アクア・ネット構想(衛星からみた想像図, 清水建設(株)提供)

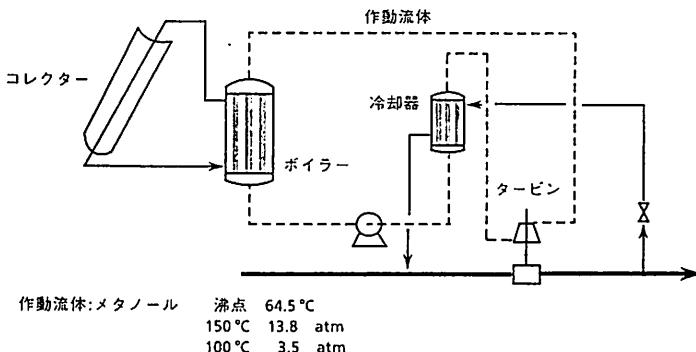


図 2-5. ソーラーポンプシステム

ている。例えば、日本で提案しているサヘルグリーンベルト計画（林・佐野, 1990）では地下ダムの建設が一つの柱となっている。この他、カッターラ低地開発計画（宮本・前垣内, 1990）では地中海からこの海面下地域に直接導水し、発電を行うとともに塩水湖からの水の蒸散による気候改善を図るというものである。沙漠に海水をポンプで導入し、人造湖ネットワークをつくり、様々な用途、気候改善を目的とするデサートアクアネット構想（図 2-4, 宮本, 1990）も日本から提案されたものである。

### 3. 水の動きを変える技術：輸送、貯水、灌漑

輸送については日本の産業界例えは鉄鋼、ゼネコン、重工、エンジなどにも蓄積が多く、サヘルを対象とした検討結果が報告されている（日本機械工業連合会, 1987: 97-112）。技術的問題は少ないものの、揚水・送水エネルギーの確保、管理の点での問題点が指摘されている。エネルギー源としては水力がまず検討されたが、発電量の点で不十分とする結果が報告されている。まだ実現してはいないが、太陽熱を直接ポンプ駆動に利用する、ソーラーポンプシステム（図 2-5, 日本太陽エネルギー学会, 1985: 554-557）が提案されており、沙漠での利用が期待される。

一部の塩害地域で季節降雨が期待できる地域に適した貯水法が提案されている（成蹊大学沙漠研究グループ, 1990）。かん水法についても同書他に詳しいが、要は地表からの蒸発防止と点滴灌漑などによる灌漑水量の削減と有効利用である。

### 4. 水を造る技術：淡水化、凝縮、人工降雨

淡水化技術は主として化学工学の分野に多大な蓄積があり、凝縮潜熱を何度も利用してエネルギー効率を高め

た多重効用缶や多段フラッシュ法、あるいは省エネルギー的な逆浸透膜法などが知られている。これらの技術を沙漠での海水、塩水淡水化に用いるには、前者についてはエネルギーコスト、後者については装置コストと保守が大きく問題となる。太陽熱利用の Basin 型脱塩装置も知られている。これらの詳細および、淡水化に必要なエネルギーを、ある一定の基準の下で評価した結果は別

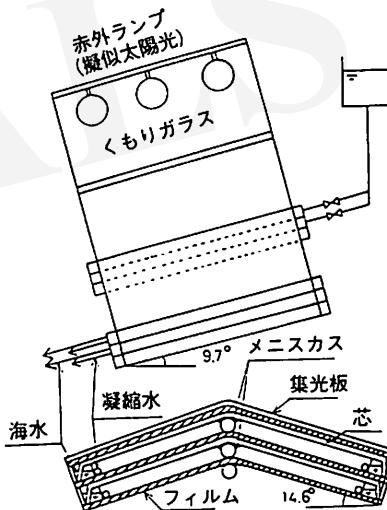


図 2-6. 太陽光発電と塩水淡水化との複合装置

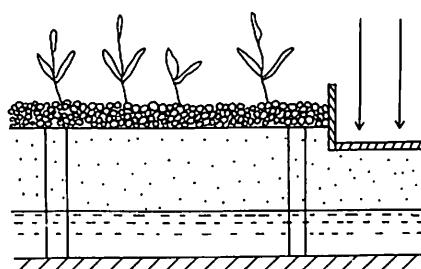


図 2-7. 海水淡水化による灌漑

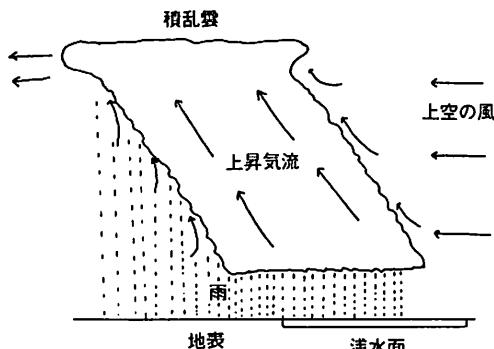


図 2-8. 人工降雨の概念

報（松村・小島、1991）に報告されている。参照されたい。

太陽利用法として太陽電池と淡水化装置を組み合わせた例（図 2-6, MURASE *et al.*, 1989）も報告されている。また、上述の蒸発凝縮を土壤下で行い、得られた淡水を直接植物の根に供給するとのアイデアも提案されている（図 2-7, 木下, 1989）。

沙漠では、特に夜間には湿度は意外と高くなることが多い。凝縮水を直接大気から得る方法がいくつか提案されているが、エネルギー的にみれば多くのエネルギーを要することは明らかである。

磯野ほか(1990)は人工山脈を沙漠に造り、上昇気流を生むことにより雨を降らせることを提案している。木下(1990)は上昇気流のエネルギーを海水の蒸発熱を蓄積することにより得ることを提案している（図 2-8）。夢のような話であるが、ちょっぴり期待せるものがある。

## 5. まとめ

別報（松村・小島、1991）にも記したように、沙漠で淡水を得ることは、もし海水や大気から淡水を得なければ

ばならないとすれば、エネルギー的にも決して容易なことではない。しかしながら、場所によっては季節的な降雨が得られるところや様々な可能性を秘めているところも少なくない。工学として、エネルギーの効率が高くかつ、沙漠に適した耐久性の高い、安価な淡水製造法を探求すると同時に、地域に即した複合的な水の供給法をシステムとして提案、評価して行きたいと考えている。

## 引用文献

- 磯野義人(1990): 空気膜構造の人工山脈により雨を降らせる構想。「燃料協会誌」69: 905-914.
- 木下幹夫(1989): 大規模砂漠緑化の可能性。「MACRO REVIEW」2-1: 35-38.
- 木下幹夫(1990): 亜熱帯沙漠における人工降雨。「燃料協会誌」69: 924-930.
- 国立天文台編(1990): 「理科年表」丸善。
- 小島紀徳・榎田 昭・前沢三郎・魏 啓陽・山崎慎一郎・斎藤芳郎・根岸完二・伊藤寧男・布施行雄・林 醇一郎・Pradit TERDTTOON(1990): アジア太平洋地域における砂漠化に関する調査、解説およびその防止法、緑化法の開発。「アジア太平洋研究」1989: 55-81.
- 成蹊大学砂漠研究グループ(1990): 「タイ東北部塩害地域における現状と対策」自費出版。
- 日本太陽エネルギー学会編(1985): 「太陽エネルギー利用ハンドブック」日本太陽エネルギー学会。
- 日本機械工業業連合会(1987): 「国際協力プロジェクトにおける機械産業のニューフロンティアに関する調査研究報告書」。
- 松村一夫・小島紀徳(1991): 砂漠緑化による炭素固定のエネルギー収支。「日本沙漠学会誌・沙漠研究」1: 17-26.
- 宮本孝雄(1990): 砂漠緑化（デザート・アクア・ネットワーク構想）。「燃料協会誌」69: 915-923.
- 宮本孝雄・前垣内正記(1990): カッターラ低地開発計画。「土木施工」31-11: 50-51.
- 林 静男・佐野 拓(1990): サヘル・グリーン・ベルト計画。「土木施工」31-11: 44-47.
- MURASE, K., KOBAYASI, M., NAKAMURA, M. and TOYAMA, S. (1989): Development and application of a roof type solar still. *Desalination*, 73: 111-118.

**Key Words:** Water transportation, Desalinization, Fresh water making, Energy balance, Artificial precipitation

### III. 沙漠での有用物質生産 ——沙漠を利用するバイオテクノロジー——

新 田 義 孝\*

#### III. Useful Material Production in Desert

Yoshitaka NITTA\*

##### 1. はじめに

地球儀で沙漠の分布を見ると、多くは南北回帰線を中心には緯度 10~30 度に位置している。赤道付近で太陽熱により生じた上昇気流が、上空で熱を放射した後、地表に向かって下降して地表にぶつかるのが、沙漠地帯である。下降気流があるため、降雨に必要な条件である上昇気流が防げられ、上空に湿った空気を送ることができないのが雨の降らない理由とされている。

沙漠とは文字どおり水の少ない大地をいう。近年沙漠の拡大、元来沙漠ではない土地の沙漠化が問題視されている。人間の活動が大地の再生産力を破壊して、不毛の地にしてしまうことの恐ろしさが、TV 映像で毎週のように訴えられている。

不毛の大地である沙漠と、沙漠化の危険にさらされている乾燥地は、表 3-1 に示すようにオーストラリアで 75%、アフリカで 55%、全世界で陸地の 1/3 に当たる 4,500 万 km<sup>2</sup> に達している（前垣内、1991）。

沙漠は降雨の少ない大地である。逆の視点に立てば、太陽エネルギーに恵まれた大地である。太陽エネルギーを上手に使って、自然の営みである光合成をフルに活用し、沙漠を有用物質生産のフロンティアにする方策の系図を考える。

##### 2. 沙漠は太陽光エネルギーの宝庫

沙漠には太陽光が豊かに降り注ぐ。それを全天日射量でみてみよう。全天日射量とは直接日射量と散乱日射量を合計した量である（福井ほか、1985）。緯度とともに減少するが、量とも関係するので、必ずしもそのとおりとはならない。図 3-1 に世界の全天日射量を示す。図中黒くぬりつぶした地帯が沙漠である。北アフリカとアラビアで年間 1 cm<sup>2</sup> 当たり 200 kcal 以上、オーストラリアで 180 kcal 以上、南北アメリカでは 130~200 kcal、ゴビ砂漠で 140 kcal と、沙漠でない地域より大きい。もちろんゴビ沙漠のように中緯度地域では冬の日射時間が多くとも、日射量は少ない。

表 3-1. 世界の沙漠化の危険度別面積と既砂漠化面積（前垣内、1991）（単位：km<sup>2</sup>）

地域名	危険度極大		危険度大		危険度中		既砂漠化		計	
	面積	%	面積	%	面積	%	面積	%	面積	%
南米	414,195	2.3	1,261,235	7.1	1,602,383	9.0	200,492	1.1	3,478,305	19.5
北中米	163,191	0.7	1,312,524	5.4	2,854,273	11.8	32,638	0.1	4,362,626	18.2
アフリカ	1,725,165	5.7	4,910,503	16.2	3,740,966	12.3	6,177,956	20.4	16,554,590	54.6
アジア	790,312	1.8	7,253,464	16.5	5,607,563	12.8	1,580,624	3.6	15,231,963	33.7
オーストラリア	307,732	4.0	1,722,056	22.4	3,712,213	48.3	—	—	5,742,001	74.7
ヨーロッパ	48,957	0.5	—	—	189,612	1.8	—	—	238,569	2.3
計	3,449,552	2.6	16,459,782	12.2	17,707,010	13.1	7,991,710	5.9	45,608,054	33.7

(UNCOD: World map of desertification 1977)

\* (財)電力中央研究所経営調査室

\* Management Advisory Group, Central Research Institute of Electric Power Industry

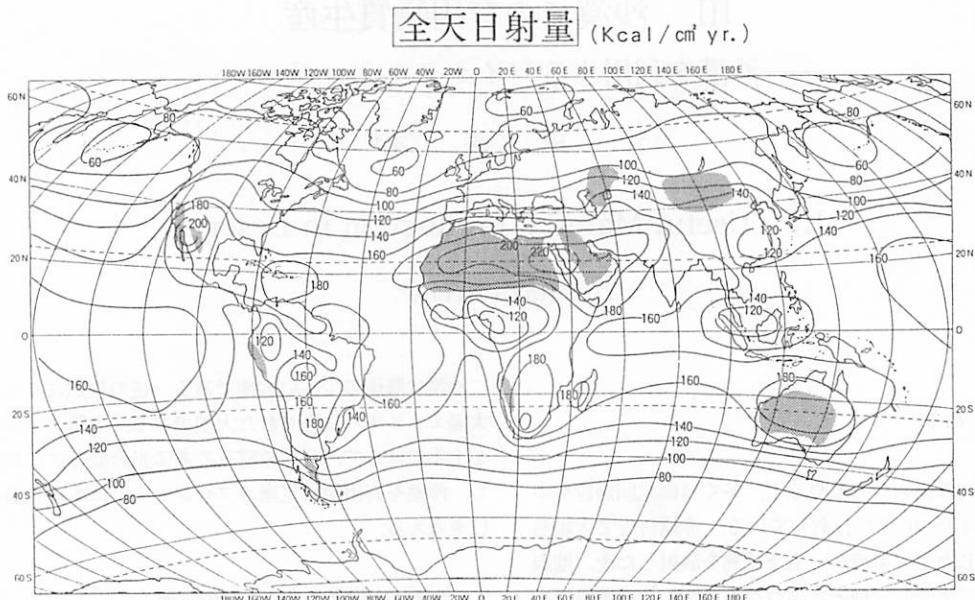


図3-1. 全天日射量(福井ほか, 1985)

沙漠は太陽エネルギーの宝庫であるといつても、そのままでこれを利用できない。人が住めるようにするには、まず砂丘の移動を止めなければならない。沙漠化があまり進んでいない中国オルドス高原の毛烏素沙地でさえ、20 m の高さの砂丘が1年間に1 m 移動する。せっかく緑化を試み、成功しても10年経てば10 m 砂丘が移動する、100年経てば100 m 移動するので、永久に緑化を定着させることができない。ましてや風のもっと強い沙漠では、仮に地下水脈があり、水資源が確保できたとしても、砂丘の移動速度が大きいと、人工居住地は数年内に埋められてしまう。

著者は沙漠に居住した経験がないので、人伝て聞いた話だが、数年の内に数 km も移動する例が、珍しくないという。

砂丘の移動に限らず、太陽光発電のパネルを支える台を設置したり、観測小屋をつくっただけでも、風上側に砂がたまり、吹きだまりができる。風下側では砂がえぐれて大きな穴ができる。小屋がひっくり返らんばかりになる。

人間の居住基地を構築するには、日夜ならびに季節間の気温較差に耐える工夫も必要である。地下に居住空間をつくり、風を上手にとり入れる工夫をこらすなど、沙漠に適した村づくり土木技術は未開拓の新しい分野である。沙漠に住んでいる小動物たちは、何千もの昔から地下に快適な住居をつくっている(坂田, 1991)。こうした知恵をとり入れるのが、自然と共に存するこれからの人類の生き方のひとつの典型になるだろう。

人が住める条件を整えたうえで、さてこれからどうやって稼ごうかと考える。このときに沙漠を有用物質のフロンティアにする方策があるだろうか。沙漠に住んだことのない人が東京の机の上で、図鑑や文献を頼りに知恵を働かせたところで、トンチンカンでしかないだろう。しかし昨年発足した日本沙漠学会が、今後沙漠で生活した人たちを交え、世界の沙漠研究所の科学者たちと交流を重ねて、沙漠工学という分野に挑戦しようとしていく際の、最初の足がかりになるかも知れないポンチケを、次節以降に展開する。

### 3. 沙漠に緑を

#### —気中水分の活用に、アイスプラントを—

沙漠には雨が降らない。年間降雨量 300 mm 以下、100 mm 程度のところも少なくない。だからといって、大気中に含まれる水蒸気の量が少ないと、必ずしもそうではない。空気が湿っていても雨は降らない場合もある。

南カリフォルニアは元来沙漠であった。白人たちが入植し、北カリフォルニアから水を導いて灌漑農業のもとをつくり、日系人も加わって農業を開拓した。フリーウェイの路傍やゴルフ場では、10年前まではスプリンクラーで散水して緑を確保していた。不経済であり、水資源上の制約もあるので、散水しなくとも育つ、アイスプラントを使うようになってきたようである。葉の表面から水分を吸収する植物で、美しい花の咲くもの、実の

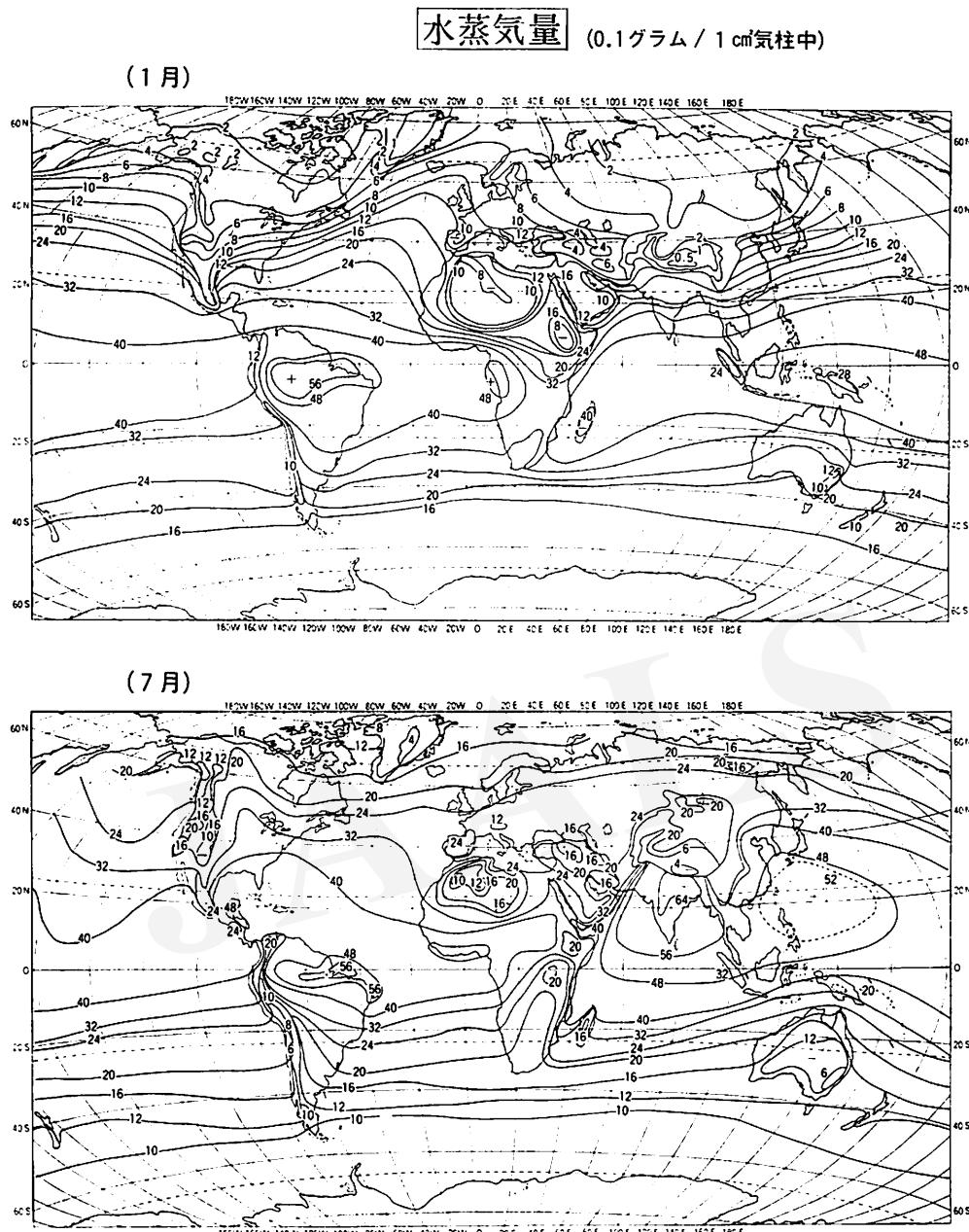


図3-2. 水蒸気量(福井ほか, 1985)

なるものなど、種々である。南カリフォルニアでは、2月頃に1~2度まとめて雨が降る。それ以外、年間360日以上は雨が降らない。しかし気中水分は多く、明け方になると霧が発生することが多い。植物にとって気中水分を利用するのに都合がよい。

図3-2は大気中の水蒸気量を0.1 g/1 cm<sup>2</sup>気柱という単位で表し、世界のマップに描いたものである。850,

700, 500, 300 mbの露点温度から算出したもので、地表近くの大気中に含まれる水分を示す。じめじめする日本の7月ではこの値が40~48である。また、霜が降りる日本の1月では6~10程度である。アラビアの7月には、20~40と、かなり湿った空気が沙漠を覆っている。湿った季節風が平坦な沙漠地帯を吹き抜けているので、アイスプランツの原理を、有用な植物に適用すれば、十

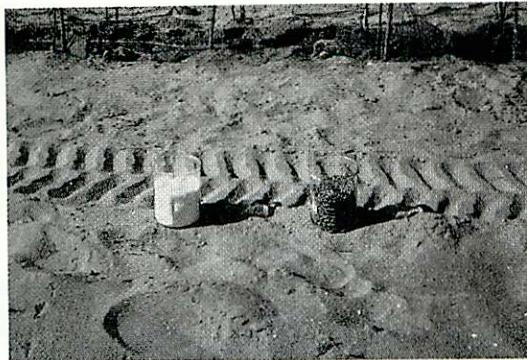


図 3-3. 吸水ポリマー（右は肥料とコンポジット化したもの）

分に光合成による食料生産あるいは緑化が可能である。さらには、アフリカのサハラ沙漠でも、大気中の水蒸気の量は、沙漠ではない地域より低いわけではない。

南カリフォルニアのアイスプランツをそのままサハラ沙漠に移植すれば事は解決するとはもちろん思えない。バイオテクノロジーの最先端の知見と技術を活かして、その地に適した植物へと品種改良する必要がある。緑と食糧がアイスプランツの品種改良あるいは他の有用植物との交配や融合により、沙漠に確保できるようになると、広大な緑がよみがえり、やがてもっと湿った空気が大気を占めるようになり、それが上昇気流をつくって、気候を変える可能性がある。

アイスプランツのDNAが首尾よく有用植物にとり入れられ、じゃがいもやとうもろこし、麦などが気中水分を固定するようになると、人類は21世紀に大きな希望がもてるようになる。そこまでの技術進歩がなくても、アイスプランツの根から水分が、図3-3に示すような吸水ポリマーを混ぜた土壤に補給できるようになるだけでも、小麦などが育つようになる可能性がある。

アイスプランツの品種改良を、著者と同じころに気がつき、実際にやってみようと考えている研究者がおられる。ODAなどの資金のほんの一部分を、こういう研究に廻せないだろうか。

#### 4. 太陽から藻類を

イスラエル南部は沙漠地帯であるが、そのペールシエバという町に、ベンギリオン大学がある。沙漠で生物を繁殖させる研究を行っている Agriculture and Applied Biology 研究所長 Dr. Dov PASTERNAK は、世界中の沙漠から有用植物を採集して、交配などにより食用の、しかも大きくて美味しい果実づくりで有名である。



図 3-4. 藻類を培養する PASTERNAK 教授

彼はもうひとつの研究に挑戦しており、著者が訪れた折に、沙漠の豊富な太陽光を利用して、1kg何万円もする高価な藻類の培養を行っていた。ポリエチレンの半透明の直径10~15cm、高さ1m位の袋の中に、クロレラなどの藻類が培養液と一緒ににはいっており、洗濯物のストッキングのようにあちこちに吊るしてある。袋の底から細い管で、二酸化炭素が供給されている（図3-4）。ポリエチレンの袋の中では太陽光が光合成を活発に行わせ、プールで培養する場合の10倍以上の速度でクロレラが生産される。もちろん食用に用いてもよいが、ずっと高価に輸出できる顔料用の藻類をねらっている。高級化粧品、食品などの顔料や、薬品の原料に使う藻類なら、1kg何万円にも売れるからである。

イスラエルのキブツでは、この研究所で開発した技術を導入して、藻類を生産していると聞いた。

このようにポリエチレン袋など単純な培養槽を使って、太陽光を効率高く利用するなら、沙漠は極めて有利な条件を備えていることになる。もちろん大量に培養しようとするには、ポリエチレンの袋やチューブでは駄目で、ガラスやポリエチレンを使った、連続した長いチューブを地面に張りめぐらせることになるだろう。

#### 5. 新しいバクテリアや藻類の宝庫かもしれない沙漠

沙漠に久方ぶりの雨が降ると、年に1~2度しかできない水たまりの中では、生命活動が活発に営まれるらしい。著者は子供の頃にウォルトディズニーの「沙漠は生きている」でその様子を学んだような気がする。

年に1~2度の雨を機会に世代交代を図るバクテリアや藻類などの生命力は大したものだと思うが、その生命力すなわち活発な細胞分裂を有効利用できないだろうか。太陽光と水がふんだんにあり、いつでも細胞分裂ができる状況にある、めぐまれた生物は、ゆっくりと繁殖

する。これに対して、年に1~2度しかその機会がない生物にとって、雨降りの機会を逃すと種が絶滅しかねない。よって繁殖のスピードは我々の想像を絶するのかも知れない。沙漠に眠っている藻類やバクテリアの胞子などを採集し、培養できれば、少ない水で効率良く食料生産ができるようになる手掛けりが得られないだろうか。

## 6. 沙漠のバイオテクノロジー研究の進め方への提案

### (1) 國際的であること

沙漠に住む人たちにとって、むやみに緑化することは、沙漠という自然を破壊することかも知れない。沙漠の拡大を防止し、自然の営みに逆らわずに、沙漠から有用物質を手に入れようと考える。沙漠とはまったく関係のない科学技術者が、沙漠の真実を知らないで研究を行うよりは、沙漠の拡大や草原の乾燥化により生活条件が悪化して困っている人達のニーズに立脚して研究を行うことが大切であると考える。

具体的には世界中の沙漠研究所に日本の研究者が1~2年滞在して、現地人のニーズの把握、バイオ状況の分析——沙地にどのようなバクテリアや藻類が採集できるか——を行う。それが不可能なら、沙漠で生きたままの砂や土壤サンプルを入手して日本で分析するなどにより、沙漠に未知の有用物質を見つける。

### (2) 学際的であること

沙漠には各々文明の歴史がある。そこからヒントになる事柄を抽出する、その沙漠で現代の文明人として、して良いこと悪いことの識別を行う、あるいは現在その近傍に生活している住民の文化から、沙漠利用のモラルを学ぶ。

沙漠の開発は、100年後にも役に立っていると思える方法を使うことを原則とする。地下ダム、広範囲な植林など大規模で見栄えのすることを考える前に、その沙漠の歴史上にあったこと——例えばかつて文明が栄えたが、それが滅びたのは、河の水路が変わってしまったからだ——に照らして考える。地下ダムが地下水脈を有効利用するのに役立ち、その結果2,000年の昔そこに文明が栄えたと同じ環境条件が復元できるなら、地下ダムづくり(例えば図3-5)は許されるにちがいない。

以上のように考えると、種々の分野の人々が集い、知恵を出して、何をなすべきかというところから議論すべ

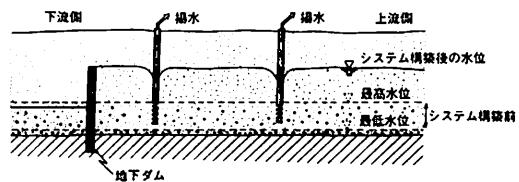
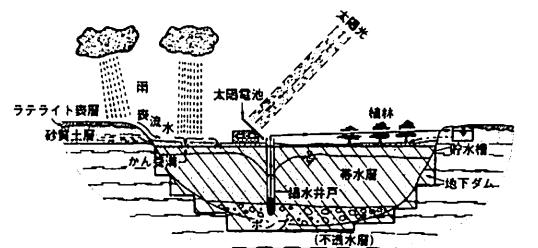


図3-5. 地下ダム概念図(資料提供: サヘルグリーンベルト研究会、前垣内、1991より引用)

きであることがわかる。

### (3) 沙漠学というマクロエンジニアリング

沙漠の拡大は、人類の生存を脅かす。沙漠が光合成の場に戻り、二酸化炭素の吸収という役割を果たすようにすることは、我々に共通した命題である。

仮に緑化するテクノロジーが——例えアイスプラントの改良により——使えるようになり、20年もなればどんな沙漠でも5割以上緑化できるようになったとしよう。考えようによっては、緑の原子爆弾なのかも知れない。

21世紀中葉の世界人口100億時代を、どのようにして迎えるのが妥当なのか、基本に戻って沙漠問題を考え、人類のグランドデザインの中に位置付けたいと考える。

## 引用文献

- 坂田 隆(1991):「沙漠のラクダはなぜ太陽に向くか」講談社ブルーバックス。  
福井英一郎ほか(1985):「日本・世界の気候図」東京堂出版。  
前垣内正記(1991):無限の可能性を秘める沙漠、「MACRO NEWS」No. 21。

**Key Words:** Desert, Solar energy, Photosynthesis, Water vapor collection, Ice plant

## IV. 沙漠を快適居住空間に

吉 川 友 章\*

### IV. Developing a Confortable Residence Space in Desert

Tomoaki YOSHIKAWA\*

#### 1. はじめに

人類は火を使うことで他の動物より優位に立ち、牧産と農業で食料を確保することで人口の増加を可能にした。ところが、産業革命以後は自然の浄化能力を超える大気汚染と水質汚濁が局地的な環境破壊をもたらすようになり、最近では酸性雨などによる広域的汚染、温室効果ガスによる地球規模の気候変動が問題になってきた。過密都市では人工排熱と汚染のため居住環境が悪化して空調を過度に使用し、電力供給が破綻したり、沙漠周辺地では住民と家畜の増加で沙漠域が拡大する事態となっている。

こうした環境破壊と人口爆発を抑制することは宗教や哲学の分野まで立ち入る必要があり、極めて難しいが、さああたり、人口集中によるはてしないエネルギーの乱用を避け、沙漠を含む広大な過疎地に省エネ型の居住空間と農業、工業の団地を開発するしかない。自然の素材とエネルギーを最大限に生かし、沙漠に快適居住空間を造ることは、人類の将来に係わる重要な事業となろう。

#### 2. 沙漠の気候特性

生まれながらに熱帯で裸で住む人たちや、極寒の地に住むエスキモーなどは特例として、人類の多くは気温が18度、湿度60%程度を快適と感じ、夏の平均気温が20度以下、冬の平均気温が10度以上の中緯度に集中して住んでいる。しかしこの条件を両方満たす場所は極く少なく、中緯度のほとんどの地域で1年のうち6ヶ月以上、冷房あるいは暖房を必要とする（図4-1）。

一方、沙漠地帯は、世界の公認最高気温58.8度（1921年7月8日、イラク・バスラ）が示すように、日中は極端な高温となって空気が乾き、逆に夜から朝にかけて30度以上も気温が下がるため、短時間内に冷房と暖房を使いわける必要がある。ただし、断熱効果のよい空間

で巧みに外気を導入、管理すれば、居住条件を安上がりに満たすことができる。こうした沙漠の気候は農業、牧畜には不利であるが、豊かな太陽光と気温・湿度の大きな変動を利用して、エネルギーと水分を取り出し、特殊な工業を発展させることが考えられる。

最近、 $\text{CO}_2$ や $\text{CH}_4$ など、温室効果ガスの濃度が上がり、地球全体の気候が変わると危惧されている。 $\text{CO}_2$ が現在の2倍になった時を想定した気候予測シミュレーションでは、図4-2のように、冬はシベリヤ、カナダで現在より10度も気温が上がり、夏は南半球の緯度60度付近が一様に暖まることを示唆している。また、FAO & UNESCO (1977)による沙漠化危険度の分布図は、現在の沙漠の赤道よりの端がさらに拡がる恐れがあるとしている（図4-3）。

#### 3. 沙漠に生きる

沙漠に永住するには、いくつかの段階を経なくてはならない。当初の開発段階では、主食の他の生活必需品を沙漠外から輸送し、限られた空間で生鮮食品を自給することになる。この時点では豊富な水はえられず、気象の変動にさからうと著しくエネルギーを消費することになる。古来から現地周辺に住む人たちの生活の知恵を取り入れて、省エネ生活をするのがよい（図4-4）。

例えば、水をえるのに、タクラマカン奥地では、周辺山地の氷河の水を地下水路（カレーズ）で沙漠に導き、適当な地に集落を作っているが、素掘りの水路の補修が大変で、水量や距離に限界がある。このような地域では近代都市のパイプライン方式が容易に導入できる。中近東などでは、地下水を汲み揚げているが、水質が悪く飲用に耐えない。のちにのべる太陽光蒸留器を配備して、手軽に真水をえることがのぞまれる。サハラ沙漠のように、地下水もえられにくい地域では、パイプラインで海水を大量に送って塩水湖を造って気候を温めにするほか、塩水の蒸留で生活用水をえるのがよい。

\* 気象研究所応用気象研究部

\* Meteorological Research Institute

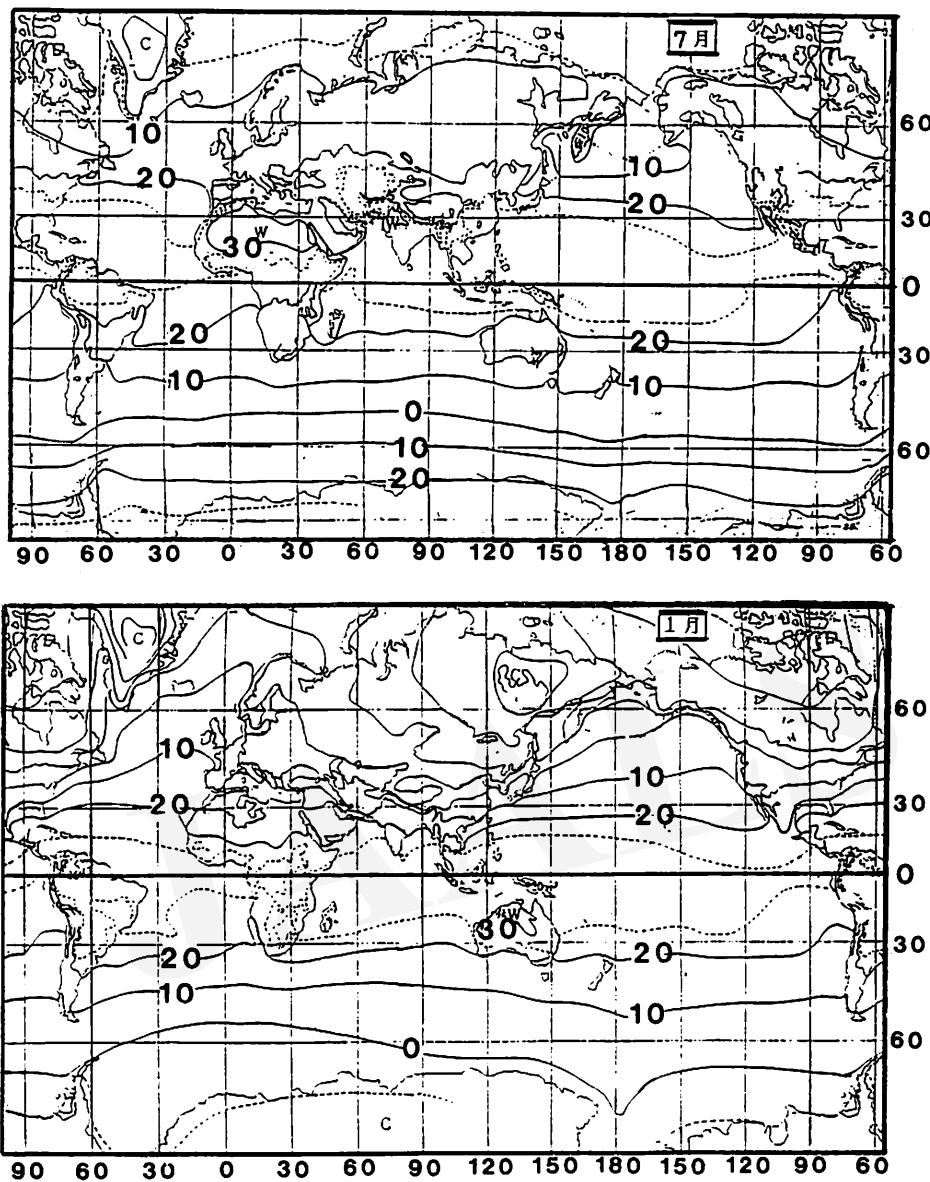


図 4-1. 世界の平均気温分布（7月と1月）[°C]

生鮮野菜は日射と風を調節できる閉鎖農地に給水管で結んだ素焼きの容器を埋めて、浸み出る水分で栽培する方法で供給できる。水分とともに水溶性肥料も容易に与えられる。

住居は断熱効果のよい土蔵が適し、外気温を適切に判断して換気するだけで、快適条件が期待できるが、さらに太陽光温水器と蒸発利用の冷水器を組み合わせた空調システムを使えば完全である。換気口には素焼きの壺を配置すれば、室内に湿気を補給するとともに飲用の冷水をえることもできる。

沙漠の開発が進展し、森林、農地、牧草地が拡がってくれば、全食料の地域内自給も可能となり、住居を増して街としての形態が整えられる。それでも時々、短時間ではあるが、沙漠域から50度を超える熱風や砂嵐が襲ってくることは避けられない。市街地は閉鎖できるアーケード街路やドーム式広場により短時間の外気のしゃ断ができる設計とし、農地、牧草地はスプリンクラー散水で保護する。さらに市外の沙漠道路には一定間隔で熱風や砂嵐を避ける壕を配置しておく（図4-5）。

こうして、パイロット村を拠点に、熱風と砂塵に強い

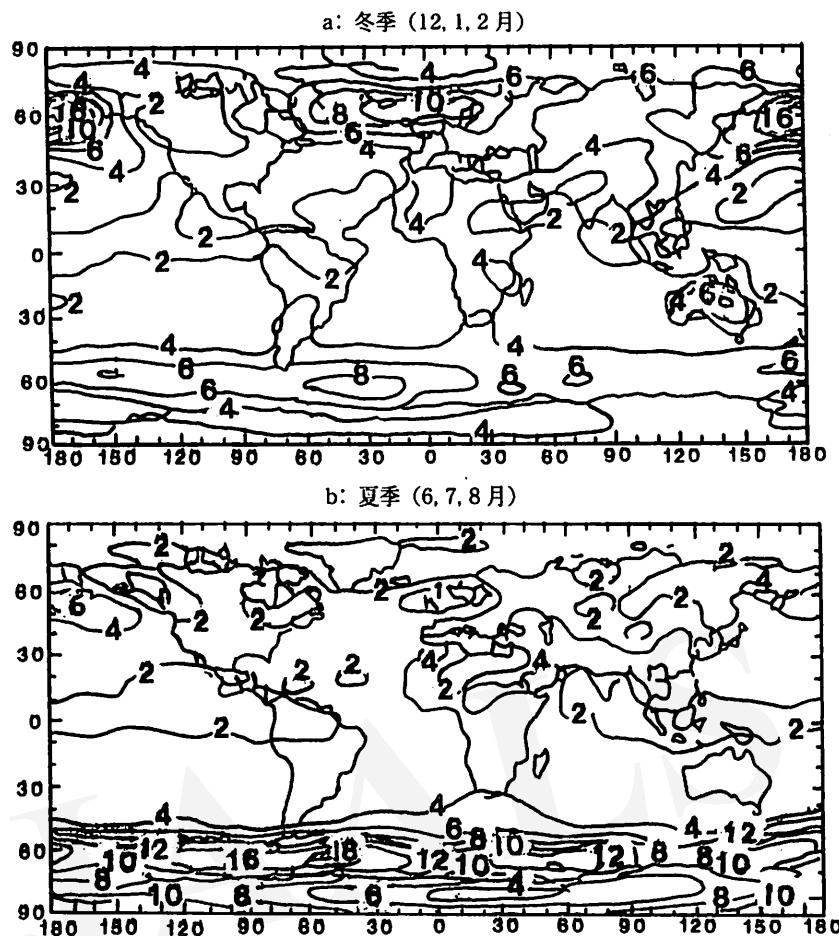


図 4-2. CO<sub>2</sub> が 2 倍になったときの平衡上昇気温

林地を育成し、林間に農地、牧草地さらに村落を造成していく。

#### 4. 沙漠の新資源

沙漠開発の目的は飽和してきた人類の生活空間の拡大、地球環境の保全、沙漠地の原住民の生活の安定などがあるが、実行には多くの資本と時間がかかる。また、沙漠地の農林、畜産業が採算ベースにのるにはほど遠く、沙漠に進出して住むためには、沙漠での資源開発と気候の特性を生かした工業の開発を行って経済基盤を築く必要がある。資源としては、金属、石炭、石油、核燃料など、従来から考えられている鉱物とエネルギー源はもちろん採掘するとして、さらに沙漠でえられやすく、また沙漠開発に重要な役目をはたす熱特性セラミックの原料採掘と製造を提案したい。

岩石はもとより、コンクリート、アスファルトなどの

素材は、程度の差はあるが、短波長の光エネルギーを吸収し、長波長の熱線を放出する性質がある。最近開発されたセラミックの中には、この性能が特にすぐれたものがあり、多くの分野での利用が考えられている。沙漠では、建物を断熱しながら太陽エネルギーを効率的に取り入れて、濁水蒸留器、熱水器、発電・冷暖房システムなどを低価格で可能にする。特にこの素材は砂嵐などの悪条件に強く、塗料として固体面や布面に塗ることもできることから、これを用いたパラソル状の折りたたみ式太陽光集熱器を作り、キャラバンの途中で手軽に煮炊きしたり、原住民にも提供して、燃料用の樹木の乱伐を防止することが可能となる（図 4-6）。

#### 5. 結語

凍土地や雪水地に居住地を求めるのが困難な現状では、人類の生活圏の拡大は地表の 1/3 をしめる沙漠に目

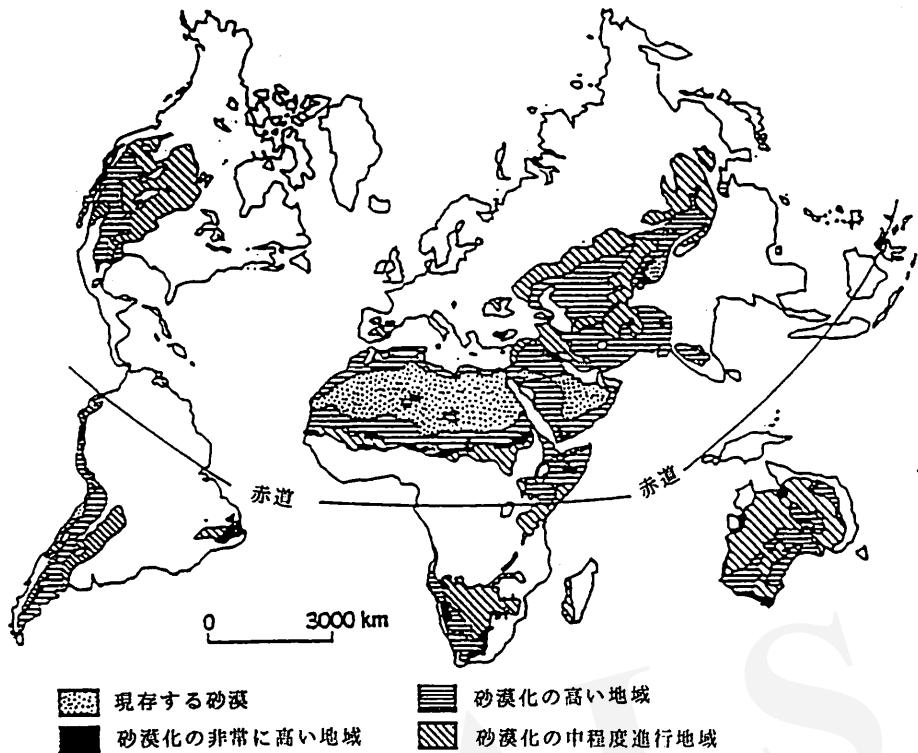


図 4-3. 沙漠化危険度の分布 (FAO &amp; UNESCO, 1977)

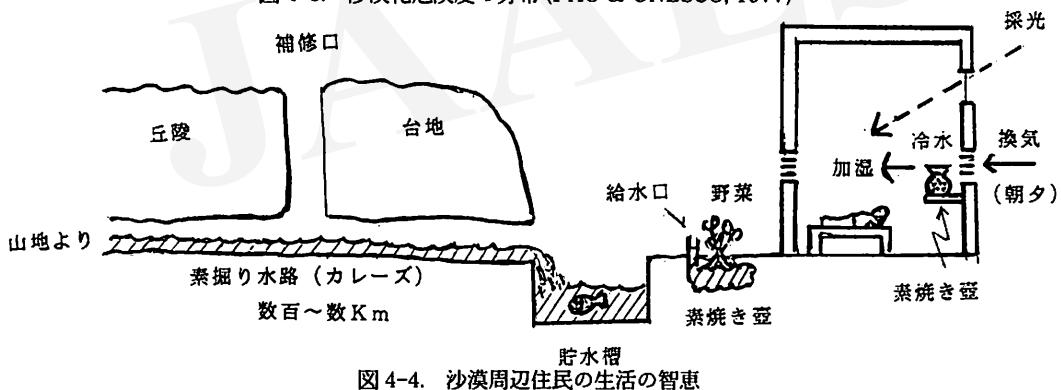


図 4-4. 沙漠周辺住民の生活の智恵

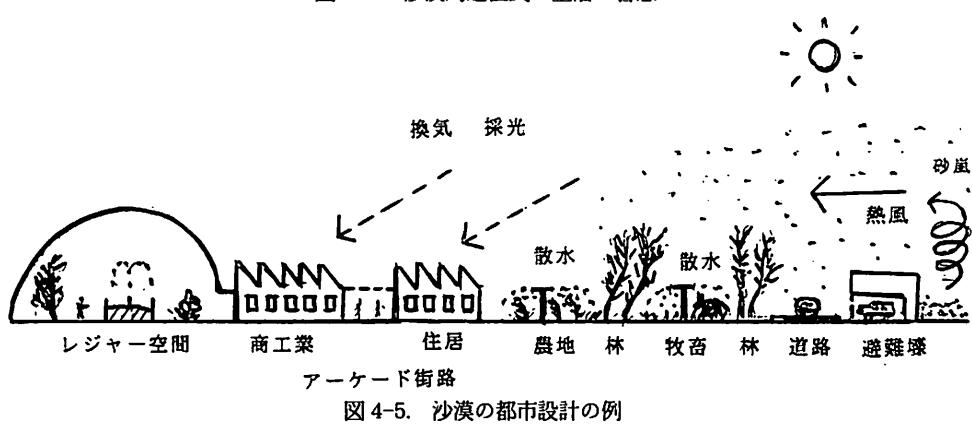


図 4-5. 沙漠の都市設計の例

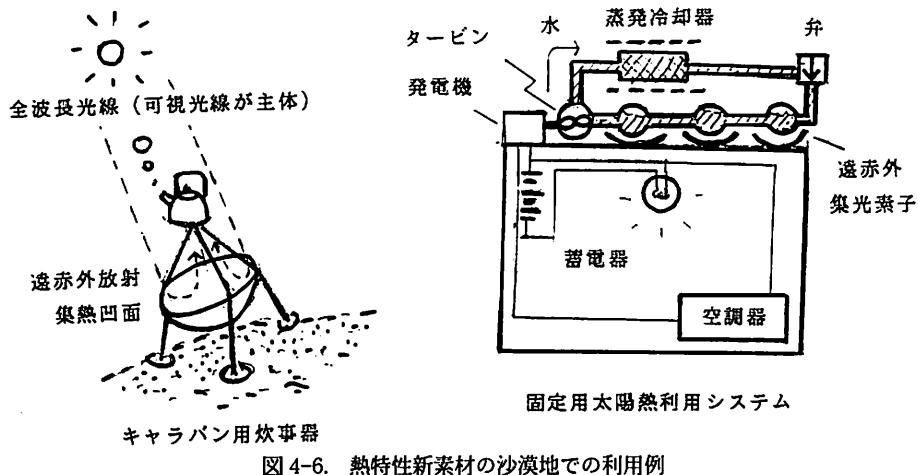


図 4-6. 热特性新素材の沙漠地での利用例

を向けるしかない。しかし、沙漠のきびしい条件に立ち向かうにはこれまでの経験、知見に頼るだけでなく、新しい発想と技術を導入しなくてはならない。21世紀は沙漠に夢の空間を築く時代であると考えられる。

#### 参考文献

DAVIS, M. B. (1981): Quaternary history and the stability of forest communities. In *Forest Succession: Concepts and Application*. Springer-Verlag, 132-153.  
EMANUEL, W. R., SHUGART, H. H. and STEVENSON, M. D. (1985): Climate change and the broad-scale distribution of ter-

restrial ecosystem complexes. *Climate Change*, 7: 29-43.  
HARE, E. K. (1983): Climate and desertification—a revised analysis. WCP-44.

PARRY, M. L. and CARTER, T. R. (1984): Assessing the impact of climate change in cold regions. IIASA, 42.  
WASHINGTON, M. M. and MECHL, G. A. (1984): Seasonal cycle experiments on the climate sensitivity due to a doubling of CO<sub>2</sub> with an atmospheric general circulation model coupled to a simple mixed layer ocean model. *J. Geophys. Res.*, 89.

東京天文台編 (1991): 『理科年表』丸善。

**Key Words:** Climate in desert, Greenhouse effect, Desert development, Traditional techniques, New materials and techniques

## V. 日本に沙漠の研究施設を

高野義大\*

### V. Desert Research Center in Japan

Yoshihiro TAKANO\*

#### 1. はじめに

近年、我が国においても沙漠への関心が高まってきて いる。これは世界的な地球規模の環境問題への関心が高まりと歩調をいつにしている。学会、民間会社、政府、 ジャーナリズム、NGOなどのそれぞれの視点からの沙

漠問題の取組が増加している。しかしながら日本では沙漠に関する論議は抽象的になりがちである。その原因の一つは日本国内に沙漠が存在しないことによると考察することができる。

一方、日本の国際社会における責任はあらゆる分野において増大しており、日本は国際的視点から地球環境を守ることに関し、リーダーとしての役割を果たすことが

\* 清水建設(株)

\* Desert & Human Geoscience Department, Shimizu Corporation



図5-1. 砂漠ドーム構想

パイロットスケール沙漠環境施設の提案: 実験施設構想図

求められている。

沙漠化の脅威にさらされている地球上の土地は、全陸地面積の35%、4,500万km<sup>2</sup>に達し、そこで生活する人口は、9億5千万人にのぼるという。そして、毎年沙漠化する土地面積は約600万haに達するといわれている(国連環境計画沙漠化防止会議1977年、ナイロビ)。したがって、沙漠に関して日本は積極的に課題に取り組むことが求められている。

しかしながら、日本には沙漠に関する学術的蓄積が乏しく、経験も限られている。さらに、日本には沙漠が存在しないことも重なり、学術、技術の面からも日本に求められている責任を果たすことに関し、大きな障害が存在する。この障害を克服するために沙漠に関する研究センター(図5-1)の設立を提案する。このセンター

は沙漠における問題の複合性と広がりと鑑み、総合された科学によって沙漠に対処する。

## 2. センターの役割

沙漠化の原因は地球規模の気象変動、大地そのものの持つ生物地質学的特性および人為的な行動が相互に複雑に影響している。

このような沙漠形成機構の因果連鎖を検討するには、問題をグローバルな課題として取扱う。短期間に繰り返し現象を再現・検討し解明するには、沙漠のモデルを人为的に創造する。

センターの設立は、日本における沙漠のあらゆる分野の研究者に研究の場を提供し、研究の振興に役立つ。さらに、このセンターは沙漠の研究のみならず開発に従事する機関、団体および個人に対して支援センターとして働く。

このように、設立された砂漠研究センターは国際的な沙漠に関する研究センターとして貢献し、世界の沙漠研究に携わる人材の養成に役立ち、沙漠化防止と研究開発のメカとなるであろう。

## 3. センターの基本視点

センターは研究は3つの視点と2つの時間軸をもって展開される。3つの視点としては、

- 1) マクロ視点
- 2) ミクロ視点

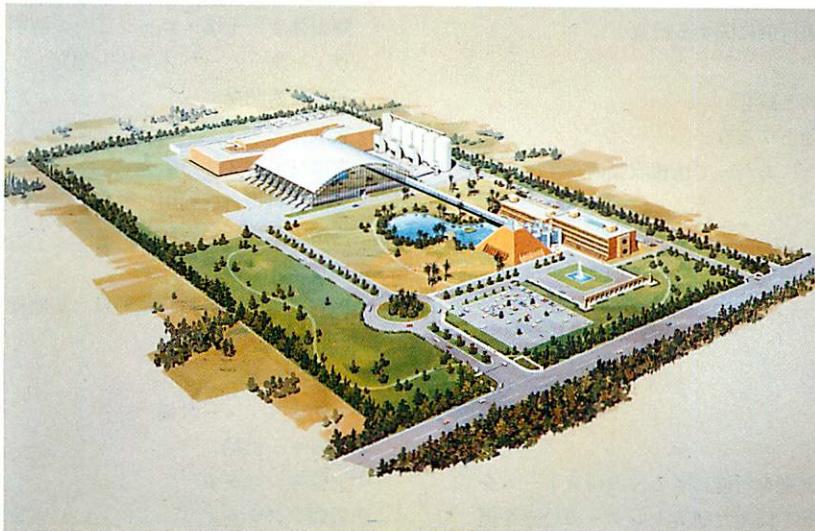


図5-2. 砂漠ドーム構想  
パイロットスケール沙漠環境施設の提案: 全体鳥瞰図

### 3) 人文的視点

であり、2つの時間軸とは、

1) 長期的展望にたった基礎研究

2) 短期的な実用研究

である。

上記の視点と時間軸に立脚した研究テーマを選定し推進する対象分野は、以下のとおりである。

## 4. 研究対象

マクロ視点からの研究は地球的規模で沙漠研究を推進することである。例としては以下のとおりである。

- ①リモートセンシングによる地球環境の変動と沙漠化の関連についての長期的な研究
- ②地球規模での沙漠の形成機構の長期的研究
- ③広範囲での飛砂・泥の移動、生物の移動
- ④広域での生態学的研究（動植物）
- ⑤沙漠における水文学的研究
- ⑥太陽エネルギーの分布と変動に関する研究

ミクロ視点からの研究は次のようにある。

- ①地質成分分析
- ②水資源の確保
- ③生活排水の利用を含めた水の有効利用
- ④塩の集積を含めた塩害の研究
- ⑤自然エネルギー利用システムの確立
- ⑥土壤微生物生態学と微生物的土壤改良
- ⑦個別生物の生態研究と食糧資源への活用
- ⑧沙漠生物の遺伝子資源の保存と活用

人文的視点から沙漠に関し重要な研究としては、

- ①沙漠住民の生活習慣に関する研究
- ②沙漠の慣習法
- ③沙漠の経済活動と観念

などが重要な研究課題となろう。

これらの研究の遂行にあたって情報収集のうえ、

- ①モデル実験
- ②現象の再現性など

の実行が重要であり、研究のテーマを類別すると、

- ①砂および土壤
- ②塩
- ③水
- ④エネルギー
- ⑤材料

であり、上記の研究実施を可能にする沙漠研究ドームを中心とした施設、装置を備えた研究センターの設立を提案する。

## 5. 研究施設の概要

研究施設の全体配置図を図5-2に示す。施設は研究棟、会議棟、管理・特殊実験棟、各実験装置、材料貯蔵・搬送設備、受変電施設などからなり、全敷地面積は19haである。これらの施設装置は実大実験に近い状態で研究を行えるように規模を大きくした。主要な実験装置としては風洞装置、人工太陽装置、人工降雨装置がある。内部環境を精密にコントロールするために天蓋で覆い、外部環境の影響を受けないようにする。実験用の沙漠の砂の貯蔵施設と搬送設備を設ける。エネルギーは外部からの電力を利用するための受変電施設などを設ける。小規模実験のために小型人工気象室を備えたブースを設ける。

施設とそこで行われる研究の概要は以下のとおりである。

- (1) 研究・管理棟、会議棟  
敷地面積 3,700 m<sup>2</sup>、延床面積 10,200 m<sup>2</sup>
- (2) 実験装置
  - ①風洞装置  
飛砂機構の解明と防止技術開発  
砂丘移動の解明と防止技術開発
  - ②人工太陽装置  
植生と沙漠化の関係の解明  
大規模建築物による影響  
土壤改良と施肥改善研究  
太陽エネルギーの利用技術開発  
省エネルギー型生活システムの開発
  - ③人工降雨装置  
降雨強度と土壤エロージョンの解明  
ウォーターハーベスト法の開発  
節水技術開発
  - ④実験ブース（グロースチャンバー）  
資機材の耐久性の研究  
天然材料の有効利用  
極限環境生物の育種
- (3) 実験材料貯蔵施設  
土砂貯蔵設備、砂利貯蔵施設、集塵機
- (4) 実験材料搬送設備  
搬送コンベヤー
- (5) ユーティリティ設備  
エネルギー供給  
中央監視システム  
水管理システム
- (6) その他主要施設  
研究用コンピューター

**衛星通信システム  
情報管理ネットワーク**

**6. 建設費および運営費用**

概略仕様に基づく建設費の積算は以下の条件である。

- 土地は無償提供
- 自然災害に対する特別な対策は取らない
- 実験用の土砂、砂利などは無償提供
- 建設費の合計は 570 億円、運営費用は 25 億円と概算見積をしている。

**7. センターの運営方法**

共同利用施設として位置づけ、センター運営管理のための財団法人を設立し、沙漠研究に従事する研究者に開放される。財団法人の運営方針を決め、運営に責任を持つ理事会のメンバーである理事は世界的な沙漠研究者から選ばれる。

**8. 組織**

センターの組織体制(案)によればセンター長の基に 4

部門と 15 グループにより運営される(表 5-1)。

**9. センター設立による効果**

上記のような大規模で沙漠の現状を再現できる研究施設を保有することにより、以下のような効果を得られる。

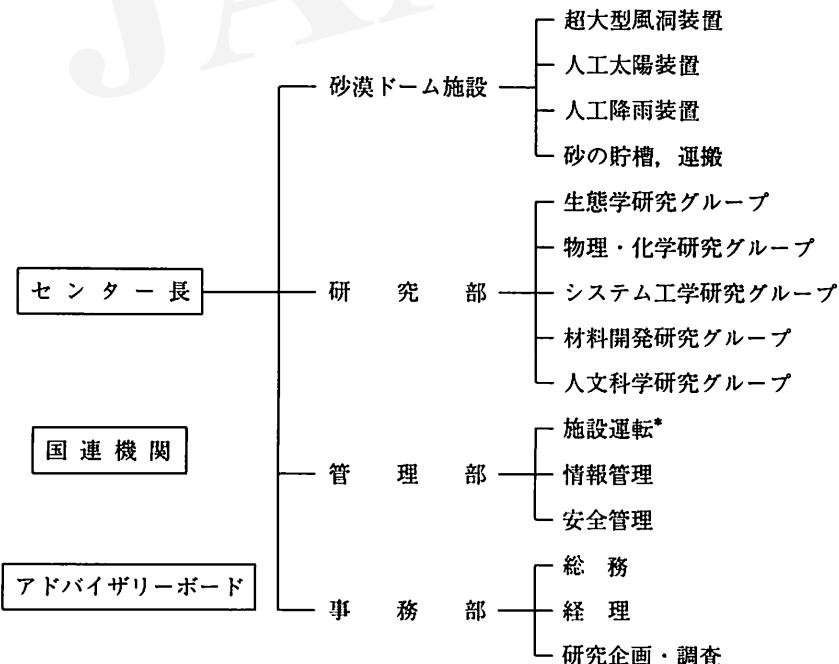
- (1) 日本の沙漠研究の拠点を生み出す
- (2) 世界の沙漠研究者の交流と研究の場を提供
- (3) 沙漠研究の促進を促す
- (4) 沙漠研究について関心を深める
- (5) 沙漠への投資を企画している者に基礎データなど、の情報提供などより貢献
- (6) 世界の沙漠研究をめざす若手研究者の訓練の場提供
- (7) 沙漠研究の異なる分野の統合を可能に

**10. 今後の課題**

センターの概要を以上述べたが、センター実現のためにはいくつかなすべき事項がある。

- (1) 今までセンター構想立案に参加していなかった人々をも結集したコンセプトのレビュー

表 5-1. センターの組織体制(案)



\* 全天候大型チャンバー、ファンジトロン、インセクトトロン、ファイトトロン、など上記沙漠ドーム施設以外の諸施設および各種研究棟施設

表 5-2. 砂漠環境研究会

構成員	遠藤 熊 吉川 友章 田中 剛 松本 聰 長島 秀樹 宮本 孝雄 藤岡 達也 富川 信一郎 大塚 義之 その他、清水建設(株)プロジェクトチームメンバー	(理化学研究所化学工学研究室主任研究員) (気象研究所応用気象研究部第三研究室長) (名古屋大学理学部教授) (東京大学農学部教授) (理化学研究所海洋物理研究室研究員) (清水建設(株)地球環境室長) (清水建設(株)設計本部部長) (清水建設(株)設計本部部長) (清水建設(株)技術研究所砂漠グループ長)
-----	---	---

- (2) 建設技術の検討
- (3) 運営方法と組織の明確化
- (4) 國際的協力支援体制の形成
- (5) 官庁、民間を含めた強力な国内推進体制の確立
- (6) 砂漠ドームを中心としたセンターの PR 活動
- (7) 建設資金の募金方法の検討と募金開始

## 11. 見通し

砂漠研究センター設立推進に伴う困難は以下のとおりである。

- (1) 建設事業費が大きく誰が出すのか不明確
- (2) 毎年発生する維持管理費が大きい
- (3) 砂漠研究を閉鎖系の人工環境下で行うことが最適であるとのコンセンサスが得られていない
- (4) これだけ多額の資金を研究施設よりも現地で緊急課題の沙漠化防止プロジェクトに使ったらとの疑問しかしながら、筆者としては上記の困難は克服できると判断する。なぜなら、日本において沙漠研究振興の緊急性に鑑み、今後 5 年位の準備機関を見込めば実現可能であろう。可能にするのは砂漠研究センターの必要性を確信した有志が中核グループを作り上げ、強力に設立の

推進をすることである。その根拠は日本の世界協調の役割が 21 世紀に向けてますます増大し、沙漠についても責任を取らなければならない状況がくる。また、砂漠ドームのような巨大科学振興を可能にする価値観が日本の社会にも生まれてくるであろう。

## 12. おわりに

本報告は沙漠環境研究会（1989、構成員を表 5-3 に示す）において検討した結果に基づいている。しかし、内容については多くの課題を残している。今後構想を具体化する過程で多くの有識者のご意見をいただき、広範囲な人々とセンター設立に向け努力したい。

## 引用文献

砂漠環境研究会(1989):「砂漠ドーム構想—パイロットスケール  
砂漠環境施設の提案」。

**Key Words:** Desert Research Center, Desert dome, Pilot scale, Research and development, International cooperation

## VI. 総合討論

### VI. Discussions

**Q1:** (マクロエンジニアリング・谷本) 研究施設設計画に対して、①その施設はどこに建てるつもりか。②施設の面積はどのくらいを考えているのか。③その施設では「塩害」の試験が行えるような計画が有るのか。

**A:** (理研・遠藤) ①施設の運転に際して加温より冷却に要するエネルギーとコストを考えると、日本の北の方に造ってはどうだろうか。例えば室蘭などがよいが、富山県庁からも照会がきている。②施設面積は大体 19 ha 位、ドームと付帯する研究棟、その研究設備などを合わせて、600 億円程度は必要と考えている。

③むろん、「塩害」の試験も行えるように計画したい。

**Q2:** (国際技術協力協会・生沼) 施設の建設、整備、運転に要するお金は、どこから調達する予定か。

**A:** (理研・遠藤) これから皆様のご支援を得て細かくまとめて行きたいと考えており、経費に関してはやはり国からを主体にしたい。多くの可能性に対して厚いご支援をお願いする。

**Q3:** (藻類研究所・岩淵) 施設の建設などに要する 600 億円はそれほど高いものとは思わないが、施設にどんな機能を持たせるかが問題ではないか。20 気圧程度までの加圧、反対に減圧、CO<sub>2</sub> ガス環境下での試験など沙漠開発と宇宙開発との共通部分を強調してはどうか。

**A:** (理研・遠藤) よいご意見をありがとうございます。そうした機能も含めた形で計画を進めて行きたいと思う。

**Q4:** (KK. 日さく・伊藤) タイの塩害問題などなるべく地域を特定した具体的な技術問題の対策を考えはどうか。

**A:** (成蹊大・小島) 今後とも特定地域の貯水システム、蒸発・濁水量の測定など具体的な問題を追跡したい。(気象研・吉川) 特定地域の熱収支、ヒートポンプによる熱の部分移動の効果など、地域別に興味深い問題がたくさんある。

**Q5:** (日揮・柴田) インフラの整備、開発計画の経済性と評価などの問題はどう考えているのか。

**A:** (理研・遠藤) むろん大変重要な問題である。今回はその技術面を強調したのであって、常に技術の裏側に経済性とインフラストラクチャーの問題が存在していることは忘れてはいるわけではないが、現実的に

は困難な問題が山積している。

**Q6:** (筑波大・阿部) 沙漠の開発には膨大な時間が必要と思っている。この研究分科会で扱う技術問題は、現場を前提とした目前の問題を考えているのか、それともやや先を見た新しい技術開発を対象としているのか。

**A:** (理研・遠藤) 目前の具体的な問題を考えるとともに、長期的な視野での夢の検討も大切だと思っている。強いていえば両方である。

**Q7:** (東洋エンジ・松村) ①沙漠に対する取り組み方に 2 種類あって、フランス・ドイツなどは、元の植民地への援助として、余裕のある対応をしている。一方、イスラエルは生き残りをかけた戦しい対応に迫られている。この研究会の対応姿勢はどちらを取るのか。②既に国内でも実績を持っている例えば鳥取大の遠山さんとの連携はどうなっているのか。

**A:** (理研・遠藤) ①技術として見た場合には、両者にそれほどの差があるとは思えないが、従来日本としてはほとんど実績のない分野であることも考えると、まず余裕のある方を取らざるを得ないのでなかろうか。②遠山さんは今日この会場に見えておられ、今後とも密接なご協力をいただく予定である。何か一言いただけますか。

**Q8:** (鳥取大・遠山) 沙漠開発は大事業で中途半端に取り組めるものではない、①今日の提案は何の目的のために場所はどこで実施するのかが聞きたかった。②また、国内の研究施設には、我々のようなグループも参加できるのか。

**A:** (理研・遠藤) ①対象地域の検討はこれから行いたい。②沙漠ドームには幅広い研究分野の方に参加いただく予定である。

以上（敬称略）

小林登史夫：熱帯農業研究センター

Toshio KOBAYASHI: Tropical Agriculture Research Center, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

結城 邦之：荏原製作所・環境事業本部

Kuniyuki YUUKI: Environmental Engineering Division, Ebara Corporation

## 日本沙漠学会誌「沙漠研究」投稿規定

(1991年3月9日制定)

1. 日本沙漠学会誌「沙漠研究」は、沙漠ならびに乾燥・半乾燥地域に関する広範な分野の研究成果を掲載し、内外の研究交流を図ることを目的とする。
2. 投稿の資格 投稿原稿の著者（連名の場合は1名以上）は日本沙漠学会の正会員でなければならない。ただし編集委員会が認めた場合はその限りではない。
3. 原稿の種類 原稿の種類と標準となる長さ（図表を含めた刷り上がりページ数）は次のとおりとする。なお標準を上回る長さの原稿の掲載が認められた場合、編集委員会の判断により超過ページ分の経費を著者の負担とすることがある。邦文原稿を原則とするが、原著論文・論説、短報については英文原稿も認める。
  - (1) 原著論文・論説 (Original Article): 著者のオリジナルな研究の成果で、他の著書、学術雑誌に未発表のもの。10ページ内外。
  - (2) 短報 (Research Note): 速報的・中間報告的、あるいは補遺的ではあるが、オリジナルな研究の成果で他誌に未発表のもの。3~4ページ。
  - (3) 総説・展望: 特定の問題について、従来の研究結果・資料に基づき総合的に論じ、あるいは将来への展望を述べたもの。10ページ内外。
  - (4) 資料: 研究あるいは実用面で価値が高い事項について関連する資料をまとめたもの。3~4ページ。

- ジ。
- (5) 講座・解説: すでに学問的体系が確立された事項について客観的に取りまとめ、専門外の会員にも理解できるよう平易に記述したもの。10ページ以内。
  - (6) 抄録・書評: 既に出版されている書籍等の内容を紹介したもの。1ページ以内。
  - (7) その他: 編集委員会が必要と認めたもの。
  4. 原稿の採否 原稿は編集委員会で審査し、採否を決定する。編集委員会は査読結果により原稿の一部変更を求めることがある。
  5. 原稿の送付先 オリジナル1部、コピー2部を日本沙漠学会編集委員会あてに簡易書留で送付する。
  6. 原稿の返却 受理された原稿は返却しない。ただし、図・表・写真については希望があれば返却する。
  7. 校正 著者校正は初校のみとし、以後の校正は原則として編集委員会が著者の初校に従って行うが、初校ミスは著者の責任とする。著者校正は誤植によるもののみとし、新たな加除訂正は認めない。
  8. 別刷 実費の範囲で著者に負担を求めることがある。負担額は別に定める。
  9. 著作権 すべて日本沙漠学会に属する。

## 日本沙漠学会誌「沙漠研究」執筆要領

(1991年3月9日制定)

1. 原稿の用紙・様式 邦文原稿はA4サイズの用紙を用い、天地・左右のマージンを十分とって、1ページ当たり25字×30行(750字)のフォーマットでワードプロセッサーにより書くことを原則とする。原稿用紙使用の場合は、A4サイズ横書き400字詰めのものを用いる。英文原稿(英文要旨を含む)はA4サイズ(または国際版)用紙にタイプライターあるいはワードプロセッサーを用いて書く。英文原稿は、著者の責任でネイティブ・スピーカーなど、しかるべき人の校閲を予め受けるものとする。編集委員会が校閲を必要と判断し、校閲者を斡旋した場合には、校閲に要する経費は著者の負担とする。
2. 邦文原稿は次の順に整える。英文原稿の場合は邦文原稿に準じて整えるが、(2)に相当する邦文要旨は編

- 集委員会の了承の上で省略することができる。
- (1) 表紙: 原稿の種類、題名(抄録・書評の場合は書名等)、著者氏名(会員資格)、所属機関名および所在地、連絡先住所・電話番号・FAX番号を書く。題名、著者氏名、所属機関名・所在地には英訳を併記する。英文原稿の場合は、それぞれに邦文を併記する。
  - (2) 英文要旨: 原著論文・論説、総説・展望には500語内外、短報・資料には100語内外の英文要旨を記載し、5語以内の英語のキーワードを添える。英文要旨から図一覧表までを通してページを付ける。
  - (3) 本文
  - (4) 引用文献

## (5) 表

- (6) 図一覧: 図番号, タイトル(必要に応じて凡例, 説明文を付ける)をまとめる。
- (7) 図: 図番号と著者名を, 鉛筆にて右下に記載する。

3. 図 表 表は別紙に書き, 縦野は用いない。図は14×19 cm以内にそのまま縮小印刷されることを考慮して書き, A4版サイズの用紙上にまとめる。写真も図扱いとし, 図とともに一連番号を付ける。図表の挿入位置は本文原稿の右端に明示する。図表中およびタイトルで用いる言語は邦文, 英文のいずれかとし, 一つの論文中で統一する。

## 4. 本文

- (1) 抄録・書評は次例の見出しから書き始め, 文の末尾に筆者の氏名を記す。

小川 了:『サヘルに暮らす—西アフリカ・フルベ民族誌』NHKブックス540, 日本放送出版協会, 1987, 222 p., B6版, 750円。

Rognon, Pierre: *Biographie d'un désert*. Plon, Paris, 1989, 347 p., A5版, 160 フラン。

- (2) 他の原稿種類については, 本文形式を特に限定しないが, 論旨を明確に簡潔に記載する。
- (3) 脚注は使用しない。注が必要な場合には本文末尾にまとめる。
- (4) 単位はSI(The System Internationale)を用い, 略記・略号の使用はスタンダードなものに限る。

5. 引用文献 本文中では市川(1988), 小川(1987), Rognon(1989), または……である(Tucker *et al.*, 1981, 1985; Grove, 1986a, b; Lean and Warrilow, 1989; 天谷ほか, 1984; 田中・長, 1987)のように書く。成書からページを指定して引用するときは, 小堀(1972: 15-17)のように, 年号の後にページ数を記載す

る。本文の後ろに引用文献をまとめる。邦文の文献について欧文の文献を, それぞれ著者名のアルファベット順に並べる。雑誌の場合, 卷(号): ページを記載するが, 通しページの場合は号は省略してもよい。そのほか詳細は以下の例および慣例に従う。

- 天谷孝夫・長堀金造・三野 徹(1984): 当面する物質移動の課題。「土壤の物理性」49: 3-8.
- 市川正巳(1988): 世界における砂漠化とその研究の現状。「地理学評論」61A: 89-103.
- 小堀 巍(1972):『沙漠』日本放送出版協会。
- 小川 了(1987):『サヘルに暮らす—西アフリカ・フルベ民族誌』NHKブックス540, 日本放送出版協会。
- 田中 明・長 智男(1987): 土壌の保水性及び透水性と作物根への水分供給力。「九大農学芸誌」41-1/2: 63-70.
- Grove, A. T. (1986a): The scale factor in relation to the processes involved in "desertification" in Europe. In Fantechi, R. and Margaris, N. S. eds., *Desertification in Europe*, D. Reidel, Dordrecht, 9-14.
- Grove, A. T. (1986b): The state of Africa in the 1980s. *Geogr. Jour.*, 152: 193-203.
- Lean, J. and Warrilow, D. A. (1989): Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, 342: 411-413.
- Rognon, P. (1989): *Biographie d'un désert*. Plon, Paris.
- Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H. and McMortrey, J. E. (1981): Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 11: 171-189.
- Tucker, C. J., Townshend, J. R. and Goff, T. E. (1985): African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227: 369-375.

# JAALS

編集委員 門村 浩(委員長: 東京都立大学) 赤澤 威(東京大学) 遠藤邦彦(日本大学) 甲斐憲次(筑波大学)  
勝俣 誠(明治学院大学) 小島紀徳(成蹊大学) 小西正捷(立教大学) 長島秀樹(理化学研究所)  
袴田共之(農業環境技術研究所) 書記: 黒瀬匡子  
日本沙漠学会編集委員会〒192-03 八王子市南大沢1-1 東京都立大学理学部地理学教室内  
TEL 0426 (77) 2605/FAX 0426 (77) 2589

編集発行: 日本沙漠学会/〒101 東京都千代田区神田駿河台1-1 明治大学研究棟808号室 小堀研究室内  
The Japanese Association for Arid Land Studies TEL 03 (3296) 2137/FAX 03 (3296) 2350  
発売所: TOTO出版/〒105 東京都港区虎ノ門1-1-28 TEL 03 (3595) 9689/FAX 03 (3595) 9450  
定価1,500円(本体1,457円)

印刷: (株)国際文献印刷社

# JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

## CONTENTS

### Original Articles

- Masatoshi YOSHINO: Wind and Rain in the Desert Region of Xinjiang,  
China ..... 1-15
- Kazuo MATSUMURA and Toshinori KOJIMA: Energy Balance of Irrigated  
Afforestation of Desert for Carbon Fixation ..... 17-26
- Kuninori OTSUBO: Water Balance and Evaporation Property on Bare  
Soils in Lysimeters under Constant Weekly Water Supply ..... 27-39
- Nobuhiko OHGA: Distribution Patterns of Buried Seeds in the Herba-  
ceous Lomas Community over the Entire Plateau on Loma Ancon  
in the Coastal Desert of Central Peru ..... 41-51
- Hideki NAGASHIMA and Osamu UCHIDA: Three Dimensional Analysis of  
Desert Terrain Based on SPOT Stereo Data—Terrain mapping of a  
sandy area in Cele, Taklimakan desert in 1986— ..... 53-59

### Research Note

- Hideki NAGASHIMA, ZHAO Jingfeng, Moriyoshi OKAZAKI, LI Chongshun  
and XIA Xuncheng: Observation of Meteorological Factors and  
Variation of Sand Surface in Taklimakan Desert—Observation in  
Cele from October 1990 to March 1991— ..... 61-66

### Special Report

- The Japanese Research Group for Arid Land Technology (REAL Tech.):  
Proceedings of the First Symposium on Arid Land Technology  
..... 67-91

**THE JAPANESE ASSOCIATION FOR ARID LAND STUDIES**