

沙 漠 研 究

JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

目 次

口 紋

杜 明遠：中国タクラマカン沙漠における水と植生の関係

展望・総説

吉野正敏：タ克拉マカン沙漠の自然と人間生活 85-94

原 著 論 文真木太一・杜 明遠・大場和彦：中国の乾燥地トルファンにおける防風林による
気象改良と作物生育との相互関係 95-104

西上泰子：沙漠開発の視点からみた世界人口と自動車台数の分布 105-111

KOTB, Tarek H.S.・渡辺紹裕・荻野芳彦・中桐貴生：水資源利用可能量からみた
エジプトにおける農業生産拡大の可能性（英文） 113-128SABI, Edward B.・天谷孝夫・西村直正・RHOADES, James D.・LESCH, Scott M.：
アメリカ Coachella Valley における畦中の塩類分布（英文） 129-140**資 料**山本太平・鳥井清司・アバス ケシャバル・エブラヒム バジラ・池浦 弘：
イラン国の沙漠化と塩類問題
—乾燥地の灌漑農業における持続的発展— 141-149川鍋祐夫・南 寅鎧・押田敏雄・寇 振武・蒋 德明：中国東北西部および
内蒙東部草原の沙漠化の現状と回復対策 151-160**小特集：第3回ダスト・ストーム研究会シンポジウム講演要旨集**

「乾燥地起源の風送ダスト—発生・長距離輸送・環境影響—」 161-218

書 評 219-222

中国タクラマカン沙漠における水と植生の関係 Relation between Water and Vegetation Cover in the Taklimakan Desert, China



写真1. トルファンからタ克拉マカン沙漠への途中の植生がない砾漠も、水（道路沿いの排水路）さえあれば植生が入ってくる。
Photo 1. Gobi desert on the way from Turpan basin to Taklimakan Desert. There would be covered by vegetation if water is enough as where along the drain.



写真2. 降水量増加により植生に被覆されているタ克拉マカン沙漠南縁の和田と策勒間の砾漠。
Photo 2. Gobi desert where used to be no vegetation cover was covered by vegetation between Qira and Hotan in the southern part of the Taklimakan Desert due to increasing in precipitation.

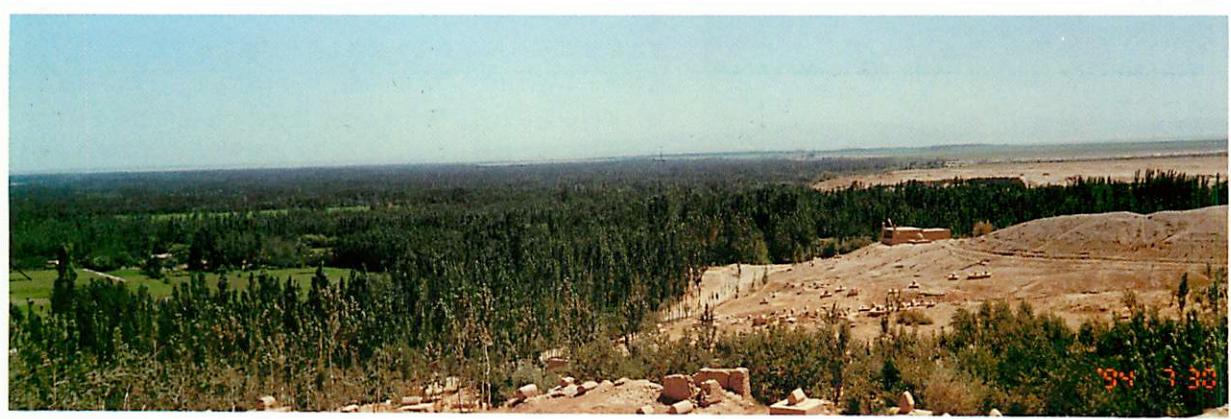


写真3. 灌溉による防風林が取り囲んでいる魅力的なタ克拉マカン沙漠西縁の喀什オアシス。
Photo 3. Very attractive Kashi Oasis in the western part of the Taklimakan Desert surrounded by well-grown windbreak forests networks due to human irrigation.



写真4. 地下水位上昇により塩類化した元は植生があつた砂地（タクラマカン沙漠北縁、庫車）。元タマリスク砂丘が見える。

Photo 4. Salinized sandy desert where used to be covered by vegetation such as Tamarix in northern part of the Taklimakan Desert, showing the destroyed sand dune with some Tamarix roots.



写真5. タクラマカン沙漠のオアシス内の防風林（喀什）
Photo 5. Windbreak forest along the road inside the oasis at Kashi.

タ克拉マカン沙漠は中国で最も面積の広い沙漠である。気候の特徴は、降水量が少なく（年80mm以下）非常に乾燥し、冬の気温は低く、気温の年較差と日較差とも大きいことである。したがつて植生は非常に乏しい。しかし、水さえあれば植生が自然に入ってくる。最近数十年間のオアシス内の気象データによると、夏の降水量は増加の傾向が見られる。降水量の変化は沙漠の植生に影響を及ぼす。1993年夏に多めに降った雨により、タ克拉マカン沙漠南縁の策勒と和田周辺の礫沙漠は、植生が生じ緑色になった。このような景色は1994年の夏にも見られた。

一方、タ克拉マカン沙漠には灌漑によるオアシスも多くあり、人口の増加に伴いオアシスが拡大している。オアシスで農業を行うには必ず防風施設（ほとんどが防風林）が必要とされ、数十メートルの防風林がよく見られる。オアシスの開発によって、局地的な気候変化や植生への影響が心配され、灌漑や地下水位の上昇による耕地の悪化と、植生のある地域への塩類化対策が求められている。

（杜 明達）

タクラマカン沙漠の自然と人間生活

吉野 正敏*

1. まえがき

日本沙漠学会では学会活動の活性化の一環として、季節フォーラムを新しくスタートさせることになった。その第1回を1998年7月6日に東京大学農学部2号館化学第3教室で開催した。計らずもその第1回目に講演する光栄に浴した。この報告はその時の内容を骨子として、新しく書き下したものである。

しかしながら、タ克拉マカン沙漠の自然と人間生活というような、一冊の書物の内容として適當なほどの大きな課題を、簡単にまとめることは至難のわざである。そこで、この10年間に行った現地調査を基礎にして、何が大切な研究テーマかを、ごく最近刊行された環境庁の地球環境総合研究推進費の成果やその評価報告書なども参考にして、今回の原稿をまとめた。図・表・写真などは、筆者の『中国の沙漠化』(吉野, 1997) と重複しないように心がけた。

2. 自然の特徴

1) タ克拉マカン沙漠はなぜあるか

タ克拉マカン沙漠は乾燥している。その原因是雨が降らないためだが、どうしてかと問われれば、地球上で最大のユーラシア大陸のほぼ中央に位置しているため、換言すれば、水蒸気の源である海洋（インド洋・太平洋・大西洋・北極海）のどちらも最も遠い位置にあるためである。しかも、中緯度の対流圏下部には、大気の大循環により、下降気流があり、高気圧帯が形成されている。タ克拉マカンはちょうどその緯度に相当している。中近東の乾燥地域からタ克拉マカン沙漠を経てモンゴルの半乾燥地域に至る部分は、東ほど高緯度側に偏るが、これも地球が自転し、太陽が東から昇る方向に回転しているためである。北アメリカでも同じような分布をしている。南半球でも乾燥地域が大陸の東へいくほど高緯

度側にずれることは同じである。つまり、タ克拉マカン沙漠はグローバルスケールで見た場合、北半球の最も乾燥したところに位置している。

次に、地域（リージョナル）スケールでタ克拉マカン沙漠をみると、タリム盆地という楕円形の鍋状の地形の底にある。北は天山山脈、南は崑崙山脈で、さらに西も東も高い山脈か山地である。

したがって、タリム盆地に流入する気流はいずれも高い山脈を越えてくるので、フェーン現象により昇温し、乾燥化する。地域スケールで見ても乾燥するような地形である。

2) タ克拉マカン沙漠の気候

地形学的にみて、この鍋は海拔高度の高いところにある。いわば柵の上にのった鍋みたいなものである。したがって夏は高温になるが、冬はかなりの低温になる。冷たい空気は重いので、底に堆積する。地表面近くほど低温な、いわゆる接地逆転層が形成される。地域スケールでみて、冬、高気圧性の循環系が形成されるのはこのためである。

沙漠でもわずかながら降水があることがある。雪として降ると、タ克拉マカン沙漠の北縁では冬中、積雪として残る。冬の河川の流量は極端に少ない。春になると、次第に地表面の温度が上昇し、接地逆転層は解消する。いわゆる季節の変わり目で、夏に発達する低気圧性の循環系へ次第に変わる。この季節、上空にはまだ寒冷な気流が吹いており、地上には寒冷前線となって吹き込む。先に述べた通り、タリム盆地そのものの海拔高度が高いので、タ克拉マカン沙漠の地表面に強い寒冷前線が侵入しやすい。この寒冷前線に沿って、後で詳しく述べるダストストームが発生する。沙漠の表面は細かい砂で覆われているから、強風によってこの細砂が大気中に舞い上がる。場合によっては視程（どこまで見えるかの距離）が0 mとなる。

* 筑波大学名誉教授。〒154-0012 東京都世田谷区駒沢5-1-8-202 Tel/Fax: 03-3703-7833

本稿は1998年7月6日開催、日本沙漠学会季節フォーラム'98夏（於、東京大学）での講演要旨である。



図1. (上) 移動するバルハンド丘(画面右から左へ), チーラ西方にて, 1993年9月4日.
 (下) 磐砂漠(ゴビ)の植生, 1993年7~8月の異常多雨のあと, 水の流れた跡だけ草丈20~30cmの植生がある(1993年8月31日, 和田とチーラの中間地点にて).

夏は非常に高温になる。回数は少ないが、まれに一日に10mm、20mmの雨が降ることがある(吉野, 1992, 1997)。図1(上)は磐砂漠(ゴビと呼ぶ)の中を移動するバルハンド丘(画面で右から下へ移動しつつある)を示す。図1(下)は1993年7~8月の異常多雨年の8月末、うす緑に遠望できるゴビの表面で、水が流れた跡だけ、20~30cmの植生があるところを示す。

沙漠の人々は乾燥に対しては充分な対策を立て、乾燥条件に適応してきたので、干ばつの被害は比較的少なく、かえって豪雨・強雨に対する被害が極めて大きい。これについては後で詳述する通りである。

3. 人間生活

1) オアシスの農業

水を利用できるところにはオアシスが成立した。天山山脈のふもと、崑崙山脈のふもとで、東西をつなぐ交通

路の要點として歴史的に発展してきた。2,000年以上にわたって、シルクロードを支えてきた。タクラマカン沙漠のオアシスの農民はほとんど100%がウイグル族で、オアシスの農業を支えてきた。1家族の構成員は少ない場合でも4人、多い場合は8人である。例外的には2.3~2.6haの耕地を持つ農家もあるが、ほとんどが0.6~0.9haの耕地で、ワタ・トウモロコシ・コムギ・コメを作り、ブドウなどの果樹を栽培する。その他、アブラナ、ヒマワリ、コウリヤン、牧草、野菜を作る。ワタは換金作物として最も重要で、収量は13~16kg/ha、コムギは26~33kg/ha、トウモロコシは悪いところで23~26kg/haの収量がある。

2) 燃料採取

燃料の利用には、現在3形態がある。すなわち、(i)沙漠から採取した植物の枯れた根や庭の枝やワラのみを使う、(ii)一部(冬)は石炭、一部(夏)は沙漠から採取した植物の枯れた根や庭の枝やワラを使う、(iii)夏冬とも石炭を使う、の3形態である。沙漠から採取するのはポプラ(胡楊)とタマリックスの根である。最近では、オアシスの近くはすでに取りつくしたので、50km以上も行かねばならないことが多い。ロバ一頭がひくロバ車で採取にいくが、オアシスから30kmまでは日帰り圏内で、それ以上は沙漠で野宿する。燃料の採取へいくことは、日中は暑いばかりでなく、夜間には、急に増水して流下する洪水流で溺死する危険も多い。石炭を使う農家数は増加しつつある。経済状態が比較的よい北縁と西縁のオアシスの農家は、上記の(ii)の形態の農家が80~100%であるが、比較的収入が少なく、貧困な南縁の農家では10~50%である。図2(上)(下)はスイカを道路端で売っている店を示す。自動車交通の発達と、上質のスイカ生産が伸びたことで、図2(下)では右下にテレビがあるように、ドライブインのレストラン化している。

現金収入を増やすことが、沙漠における燃料採取量を減らすことにつながる。特に、タ克拉マカン沙漠の南縁や南東縁のオアシスの農家では、副業などによる収入を上げることが、沙漠の植生破壊を弱めるために必要である。

3) 農民の住居

ウイグル族の農民の住居は、南または東を向いている家が多く、平屋建てである。屋根は平屋根でポプラ(胡楊)の丸太を天井に並べ、その上に葦のような植物で編んだアンペラを敷き、その上に壁と同じ土を約10cmの



図2.(上) トクスンの近くの道路端のスイカ売り。
1994年7月25日。
(下) 和田市内の道路端のスイカ売り。レストラン化し、右端にテレビがある。1993年9月4日。

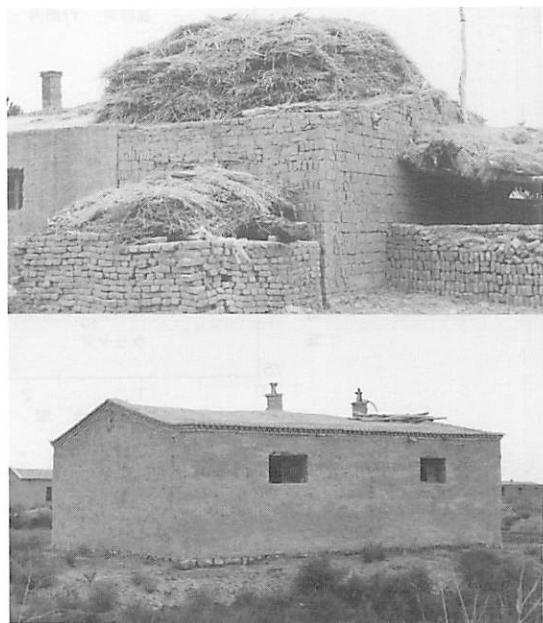


図3.(上) 新築中の住家。屋根は物置兼乾燥場。
(下) レンガ造りの新住宅の背面。
いずれも、1994年7月25日コルラ南方にて。

厚さに塗る。屋上は作物の乾燥場・物置場・洗濯物の干場を兼ねる。壁は土壁で厚さは約15cm、タマリックスの枝を塗り込めて強度を増している。一軒の家は、居間・客間・寝室兼用の部屋(L)と、冬の居間・寝室兼用の部屋(WL)が必ずある(有蘭, 1994, 1995)。家族数の増加や経済状態に応じて、部屋数が横方向に、さらにL字型に増えていく。窓は小さい。部屋の中は薄暗く、通気性はよくないが、日中の暑さは感じられない。各住家の家屋面積は約56m²から大きい家で182m²のものもあった。ただし、この大きな家も家畜部屋と離れた作業室を除くと118m²であった。以上のような造りだから、豪雨や強風に対しては非常に弱いことが容易に想像できる。

新しい住宅はレンガ造りになり、図3に見る通り、屋根も壁面も、しっかりしてきたし、小さいながらも屋根からの雨樋もついている。しかし、窓面積はやはり小さい。

4) 耕地灌漑率

タクラマカン沙漠の北縁と南縁における自然条件の大きな差のひとつは、利用できる水量の差である。その実態を明らかにするため、図4を描いた。この図に使用し

た数値は、中国科学院塔克拉瑪干沙漠綜合考察隊(1993)による刊行物の表2.14と表2.15の「流域別の土地面積、耕地面積、灌漑面積、現状供水量」から得た。横軸には耕地率[耕地面積/土地面積]を、縦軸には耕地灌漑率[灌漑面積/耕地面積]をとり、タクラマカン沙漠の11の流域についてプロットし、両者の関係をみたものである。この図から明らかになる事実は次の通りである。

(i) 一般的にみて耕地灌漑率は北縁では90~100%だが、南縁では75~85%で、比較的小さい。この差は、気候・水など自然環境の地域差のすべての反映で、南縁のオアシスの悪条件に起因すると考えられる。

(ii) 北縁における耕地灌漑率は、耕地率が4%付近で減少し始め、4%を超えると激減し、4.3%以上では耕地灌漑率は90%以下で頭打ちとなる。この曲線に示される事実は、将来、耕地面積がいくら増加しても、耕地灌漑率は大きくなりえないことを意味している。

(iii) 南縁でも、曲線が示す傾向は北縁と同じと考えられるが、耕地率が2%以上であったのに比較すると約半分の閾値で、これは(i)に述べた南縁の悪条件のひとつ具体的な数値である。

(iv) 南縁において耕地灌漑率が激減するときの閾値

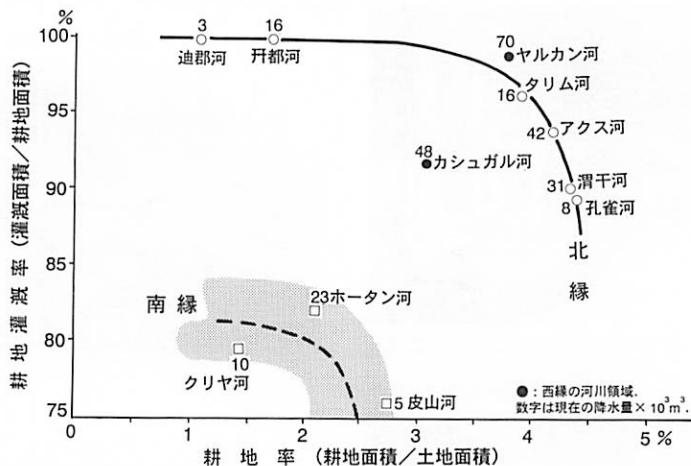


図4. タクラマカン沙漠におけるオアシスの耕地率と耕地灌漑率との関係。

は約80%で、これは北縁より約10%低い値である。この値は、北縁において耕地率が3%以下の場合、耕地灌漑率はほぼ100%であるが、南縁では、かなりの幅はあるが、耕地率2%以下で耕地灌漑率は80~82%と図から読み取れる。すなわち、北縁も南縁も両者の関係（傾向線の形）は同じだが、南縁は閾値が小さい（傾向線の位置が左下に来ている）。これは沙漠における人間活動の限界を示すもので、非常に重要なことであると思われる。図5はオアシス内の道路（画面右側）に沿う胡楊の並木の中の灌漑水路を示す。

このような人間活動に対する制限は、水の絶対量の不足が最大の原因であるが、塩類化の影響も大きい。乾燥地域では蒸発が盛んなため、地表面に塩が結出する。一面、あたかも雪が積もったかのように真白になる。

図5. 道（右側）に沿う胡楊の並木の中の灌漑水路。
和田北西部にて、1993年9月4日。

4. タ克拉マカン沙漠の自然災害

1) カラ・ブラン

カラ・ブラン (Kara bran) とは“黒い風”を意味する。3~4月になって、地表面温度が次第に上昇してくる。天山山脈の東を廻って北東方向からタ克拉マカン沙漠に侵入して、一部はコルラ付近へ、一部はルオシャン（若羌）を経てチエモー（且末）付近に至る気流が特に発達するときにカラ・ブランを沙漠の南縁にもたらす。この2つの気流は風速が大きく、風の乱れが強い。中国語では黒風暴と呼ぶ。砂をまきあげ砂じん嵐となった場合、中国語で尘暴（塵暴）、英語ではダストストームと言う。

タ克拉マカン沙漠の南縁のオアシスでは年間30~40回で最も多く、ホータン（和田）では7級 ($17.3\text{m}^2/\text{sec}$) 以上の大風は4~6月に集中し、1年に6~7回は起こる。1978年5月、1983年4月、1984年4月、1993年5月などには大被害があった。大風で家屋の屋根が飛ばされる。また小学生が登下校できなくなる。沙漠へ燃料を採取を行っているとロバと人が離れてしまうことがある。人は帰宅してもロバが帰宅できない場合がある。砂嵐で農作物、特にコムギに被害が大きい。目に砂が入り、いわゆる“砂眼”となる。その他、呼吸器疾患、じん肺の率は高い。家畜の死亡や行方不明の被害も大きい倒壊家屋がある。交通では、線路上に砂が堆積し、列車が運休となる。電柱が倒れて停電になり、電話線が切断されて通信不能になったりする。

2) 干ばつ対策と被害

沙漠は雨が少なく非常に乾燥しているから、干ばつ対策が必要なことは言うまでもない。1949年から1987年の資料によって、永久的な水利施設によって干ばつを防いでどれだけの効果があるかを試算すると以下の通りである。食糧作物については7,000万トンで、新疆は全国の省の中で6番目である。ワタについては339.9万トンで全中国の1番目、油(ナタネ・ヒマワリなど)については275.2万トンで、これも全中国の1番目である(国家防洪抗旱總指揮部办公室・水利部南京水文水资源研究所、1997)。ところが、問題点は、様々な農業生産物すべてについて、効果を金額に換算して合計すると、1990年における新疆の合計は291.13億元で、全国では15番目と

なる。つまり、沙漠では、耕作可能な作物の種類が少ないので、農業全体への水利施設の生産性に対する効果は、小さくなる。華北などの半乾燥地域の省においては、水利施設への投資がより有効で効果が大きい。沙漠において干ばつを防ぐのはやはり大変だということになる。

表1には、1959年以降の新疆における干ばつの被害の統計を示す。この表によると、1961年、1962年、1974年、1989年などにはかなりひどい干ばつによる被害が発生している。

しかし、最もひどかった1989年で受旱率では13.5%、1962年は10.6%であった。中国全体をみると、例えば中国の東北地方では1982年に53.8%のように極めて深刻な被害状況が発生しており、30%以上の被害も2~3年

表1. 新疆における干ばつによる災害年表。

	受旱率(%)*	受災率(%)**	干ばつと災害の事情
1959	1.5	1.5	
1960	1.4	1.3	
1961	5.4	5.0	北部で冬春に雪少し、イリ、昌吉、塔城、輪台などで被害。
1962	10.6	10.0	早春と秋に乾燥厳しく、全疆28県市で被害。
1963	4.4	3.6	
1964	1.4	1.2	
1965	4.8	3.9	
1966	1.0	1.0	
1967	3.2	2.8	昌吉で春に干ばつひどかった。
1968	4.0	3.6	
1969	1.0	1.0	
1970	0.4	0.4	
1971	2.2	2.1	
1972	2.5	2.2	
1973	0.8	0.8	
1974	6.7	5.9	前年から積雪少なく、春夏に少雨で乾燥、河川流失量減、21.8万haの田畠で干ばつ被害、畜産の被害も大。 1974年末の乾燥・少雨の継続、25.7万haの田畠で干ばつ被害。
1975	3.8	3.0	
1976	2.0	1.9	
1977	3.4	3.0	
1978	4.7	4.3	
1979	2.0	1.7	
1980	3.6	2.9	
1981	4.0	3.8	
1982	3.8	2.4	
1983	6.2	5.0	
1984	3.0	2.3	
1985	5.6	3.8	
1986	8.8	7.0	春と秋に干ばつ、34の県市で受旱、そのうち31で受災、その中の21は重大な被害。
1987	1.3	1.0	
1988	2.6	1.5	
1989	13.5	4.6	まれにみる大干ばつ、北疆の方がより南疆よりひどかった。
1990	4.8	1.3	

* 播種面積に対する干ばつの影響を受けた田畠の面積の100分率。

** 播種面積に対する干ばつの被害を受けた田畠の面積の100分率。

(資料は、国家防洪抗旱總指揮部办公室ほか、1997、による)

に1度は中国のどこかの地方で発生している。これに比較すると、新疆では、面積からみる干ばつの被害の程度は、中国の他の地方より弱い。これは、そもそもが極端な乾燥地域だから、乾燥に対する対応ができあがっており、干ばつによる被害面積の割合は、他の地域より小さいのである。沙漠では、まれに発生する強い雨（吉野、1992）による災害の方がひどく、その影響は大きい（吉野、1997）。

3) 洪水と降雹

上に述べたように、タクラマカン沙漠では干ばつによる被害はむしろ予想以上に少ない。それに対して、降雨による災害が大きいので、その一端を紹介したい。

古くは、970年に高昌（トルファン）で雨五寸降り、家屋が多数壊れたという記録がある。次いで、1734年には、ハミの星星峡で山地から洪水が流出し、大被害が発生したという。18世紀末から19世紀にかけては迪化、ウルムチ、アクスなどで、洪水が多発した。その原因は暖候期の降雨による他、融雪時のものもある。住家の被害は場合によっては500棟以上に達した。城中（オアシス内）で「水深数尺」と書かれているから、その降水量は想像に余りある。

表2に示すように、最近の約100年間をみると、近年ほど資料が詳しくなり、人口や人間活動が増加しているため、回数は多くなる。その増加傾向の中でも波があり、1913年から1921年の期間、1949年から1961年の期間、1981年以降など、30数年～40年の周期らしき物が認められる。中央アジアに卓越するいわゆるブリックナー周期（約35年）に相当するものかも知れない。

図6は1918年以降、田畠の洪水による被害面積が記述されている（新疆維吾爾自治区地方志編纂委員会ほか、1995）資料によって、図を作ったものである。1949年以前は1,000haに到達してなかったが、その後、2,000～

表2. 新疆における洪水の発生。

年	回数	発生年
1901-10	1	1905
1911-20	6	1913, 1914, 1915, 1916, 1918, 1920
1921-30	1	1921
1931-40	1	1936
1941-50	5	1941, 1943, 1944, 1949, 1950
1951-60	8	1951, 1952, 1953, 1954, 1956, 1958, 1959, 1960
1961-70	6	1961, 1963, 1964, 1966, 1969, 1970
1971-80	9	(1980年を除く毎年)
1981-90	10	毎年

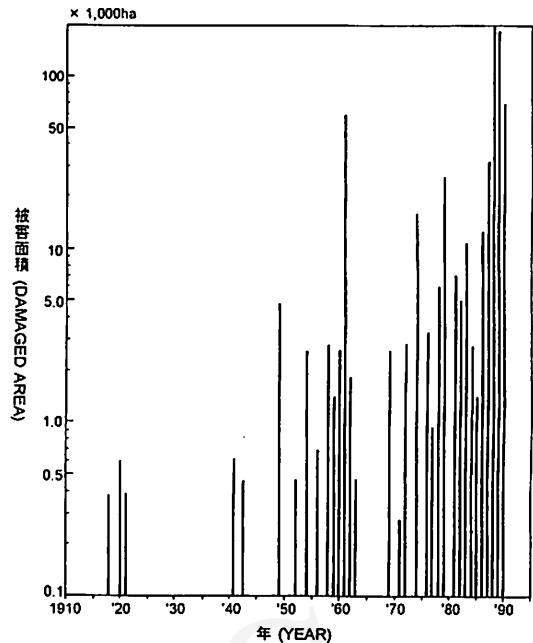


図6. 新疆における洪水による田畠の被害面積の最近80年間の変化。

3,000haにおよぶ被害をみるとようになり、1970年以降は10,000haを超す面積の田畠が洪水の被害を受ける。特に深刻な被害を受けたのは、1963年、1974年、1979年、1988年、1989年である。

1963年5月19～23日には喀什（カシ）で、豪雨と雹で田畠の流失の他、657頭の家畜が死亡、248棟の住家が倒壊、死者3人に及んだ。さらに5月20～24日には喀什（カシ）で豪雨があり、8,485棟の住家が倒壊、死者32人、家畜は11,173頭死んだ。また6月1～6日には同じ地方で3度目の豪雨があって死者4人、家畜684頭が死亡、住家257棟が倒壊した。このように、一度、豪雨の気象条件がタリム盆地に形成されると、すぐには解消せず、持続する特徴がある。そのため、通常は極端に乾燥している地域だから、災害はひどくなる。

1989年も4月中旬から6月上旬に至る間、タ克拉マカン内の多くの地点で豪雨、場合によっては雪、雹が降り、洪水ばかりでなく、大風、雹のため、ワタ・小麦などに大きな被害がでた。英吉沙・疏附の他、莎車・温泉・阿克苏（アクス）などの地域で大きな被害をみた。8月になつてタ克拉マカン南縁の民豊、墨玉、和田、洛浦、策勒で洪水になった。9月には北疆、東疆で同じような洪水その他の異常気象が発生し、それによる被害は莫大な額に達した。

特に雹による被害が見逃せない。降雹は5~8月に集中し、日変化では、日中に集中し(81.9%)、17時前後(北京時間)に多い。

図6から、21世紀の状況を外挿してみると、非常に被害面積は大きくなる。また、ある年に、同じ地域において、少しづれて発生する。これらは、その地方にとっては、大きな相乗効果によって深刻な経済的影響を受けることになる。ここに洪水災害の与える深刻さの特徴がある。

5. 沙漠化

1) 自然と人間のかかわりの限界

人間活動の結果もたらされる沙漠化は、次のような諸現象にみられる(門村、1998)。まず自然条件のうち、(1) 地形・土壤に対しては、a:砂の移動、b:砂丘の移動、c:加速的土壤侵食/堆積、d:表土の固結化・皮殻の形成と拡大、e:塩性化、f:礫・岩石の裸地の形成と拡大、g:ダストストームの頻発である。(2) 植生に対しては、a:植被率の低下、b:群落構成の変化、c:バイオマスの低下、d:群落高・密度・多様性の低下、e:耐乾性種・非可食性種の増加である。(3) 水文に対しては、a:河川流量の減少、b:地下水低下、c:水質悪化であろう。

次に社会経済条件のうち、(1) 土地利用に対しては、a:土地利用変化(耕地放棄など)、b:作物収量の低下、c:家畜頭数の減少、d:その他である。(2) 人間社会に対しては、a:飢餓/栄養失調、b:集団移動、c:その他である。筆者の考えでは、人々の収入源の限界が結局貧困の最大の理由で、すべてがここに集約される。

アクスなど大きなオアシスでは、図7(上)に見るよう非常に大規模な温室栽培がすでに行われている。このような農業経営による農家収入を増加させる方針は問題を解決するひとつの方策であろう。先に述べた南縁のオアシスにおけるじゅうたん織りなどの副業による収入を増やすこともよいであろう。

図7(下)は胡楊の丸太で骨を組み、灌木の枝を壁材とし、さらにその外側を胡楊などの枝で掩った家畜小屋を造っているところ。屋根もほとんど同じ構造である。沙漠で農民が容易に入手できる建材のすべてである。頻度は少ないにしても、強風・突風・豪雨・洪水などの災害が発生するが、これにはほとんど無防備な現状である。これから抜け出さなければ貧困から脱出することは不可能である。



図7.(上) 石炭で加温する大きな温室、アクス南部にて、1992年3月4日。
(下) 造成中の家畜小屋。胡楊の丸太を組み、灌木の枝を壁材とし、その外側を胡楊の枝などできらに掩う、アクス南方にて、1992年3月4日。

2) 今後の研究の問題点

1998年夏から秋にかけて、環境庁の地球環境研究総合推進費による研究の現状の把握と評価が行われ、今後の研究の方向を明らかにする作業が行われた。各分野ごとに約20名の検討委員の意見が書面・ワークショップ・ヒアリングなどを通してまとめられた。その中に「沙漠化」の巻がある(国立環境研究所地球環境研究グループ、1998)。今、この報告書を参考にして、「沙漠における自然と人間」の研究課題をまとめてみたい。

そもそも、1992年の地球サミットで行動計画として採択された「アジェンダ21」の第2部の第12章が沙漠化に関する章である。その中に6つ項目があるが、その1は、沙漠化と干ばつにさらされやすい地域の経済・社会的側面を含めた地域ベースとモニタリングシステムの強化、その2は植林などの活動の強化、その3は貧困をなくし生活・生産様式の転換と促進、その4は沙漠化対策と国家開発・環境計画との統合、その5は自助努力を含めた総合的対策、その6は住民参加と環境教育を指摘している。

わが国の研究活動もこの線に沿って推進されてはいる

が、今後の問題は、次の点にある。すなわち、これまでタブー視されていた住民の貧困、すなわち経済的基盤、生活習慣や思考形態、少数民族問題、人口問題、政治問題を扱う必要がある。

沙漠化のモニタリングでは、人工衛星などからの広域リモートセンシングによる土地利用、植生指数、地表面温度の解析などによって、社会・経済的側面も含めた総合的なモニタリングが要求される。

その他、地域社会の生産活動の基盤である土地利用が重要である。地域の発展の持続的な生活活動、すなわち、土地利用の持続性を、もともと生産性の低い土地でいかに保たせるかが最大の問題である。

タクラマカン沙漠のように、半沙漠でなく、純粹な沙漠では、オアシス周縁の沙漠化を防ぎ、持続的な、そして経済性の高い土地利用を行うことを目標としなければならない。沙漠化研究の構図とその流れは図8に示す通りである。沙漠における自然と人間の問題は、すべての原因、影響、知識ベースに関係している。これまでの研究が、自然科学的あるいは工学的側面に偏りがちであった。今後は、社会・経済学的面からのアプローチを強力に進める必要がある。

3) 沙漠化機構における人間次元の課題

沙漠化と人間活動との関連については、環境庁や農林水産省その他の省庁などのプロジェクトで、これまで扱われてきた。しかし、まだ単発的である。系統立った視点のもとに計画・立案されて、日本人による研究が推進された例が、タクラマカン沙漠ではもちろん、他の沙漠地域でもほとんどない。人間活動、すなわち、人間の社会・経済的視点を重視した研究を強力に推進すべきである。可能ならば、わが国のイニシアティヴの下に国際的プロジェクトを計画すべきである。

現地の政策決定者への参考になる提言は、やはり、現地の住民の経済状態・思考形態・習慣などを充分に把握して、それらの裏付けの下に科学的な研究成果を現地に還元すべきである。この点で、人間次元の研究を欠くことが出来ない。

6. あとがきにかえて

沙漠化の問題の複雑性を最後に写真で示して、結論としたい。図9(上)は、もし農民の副業としてじゅうたん生産を盛んにするとすれば当然、過放牧にならないよう留意しなければならない。もともと貧弱な沙漠の植生を保護しつつ、毛糸の生産量をあげる必要がある。図9

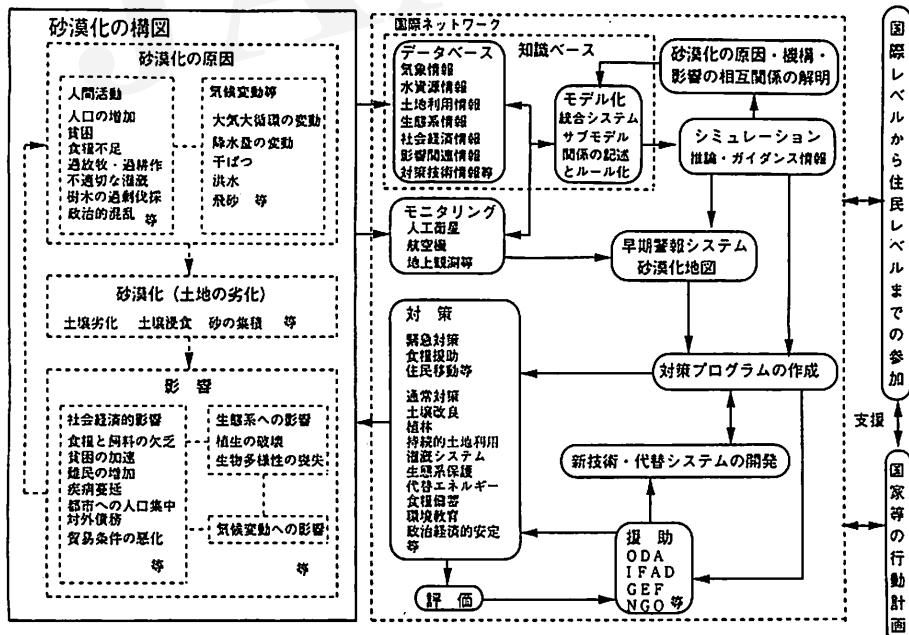


図8. 沙漠化の構図と沙漠化研究の流れ図。(国立環境研究所地球環境グループ、1998による)

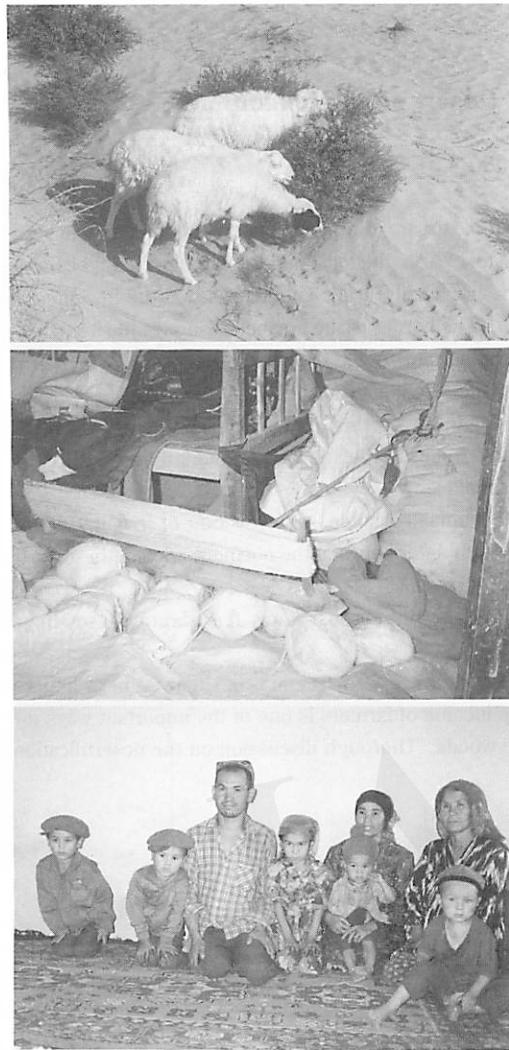


図9. (上) チーラ西方の砂丘にて、1993年9月1日。
 (中) 毛糸をつむぎ製品として売る。1993年9月5日、
 和田にて。
 (下) 美しい客間のじゅうたんと、ウイグル族農民
 の一家。1993年9月5日、和田にて。

(中) は毛糸の段階で市場に出す農家が多い。これはじゅうたん織りの技術が農民の段階に充分にはゆきわたっていないためである。これは技術教育の問題である。図9(下)は客間に敷いた美しいじゅうたんでわかる通り、デザイン・染料などの問題がからむ。特に国外に輸出することを計画する場合には、欠かせない課題である。また、ウイグル族には、漢民族に対するように「一人っ子政策」が適用されない。人口増加が食糧問題とかかわり、オアシスにおける農作物生産、ひいては灌漑水問題になることを考えねばならないことに連結する。図10は和田



図10. 和田のじゅうたん工場で働く人 (1993年9月)。

における唯一のじゅうたん工場である。ここがじゅうたん生産の工場であるばかりでなく、技術教育の場をかねているような現状である。若い一経営者に地域社会の発展のことまでまかされている現状で、はたしてよいのであろうか。

沙漠化問題を人間次元で考えると、この他にも多数ある。じゅうたん織りだけを考えるだけでも、これだけがかわる。全体像をつかみ、問題を解決していくことの困難さが想像されるであろう。

引用文献

- 有薗正一郎 (1994) : タクラマカン沙漠南縁オアシスにおける民家の平面形態、「愛知史学」3: 29-51.
- 有薗正一郎 (1995) : タ克拉マカン沙漠北縁オアシスにおける民家の縦形態、「愛知史学」4: 37-59.
- 門村 浩 (1998) : 沙漠化、国立環境研究所地球環境研究グループ編『地球環境研究展望』資料、20-24.
- 国立環境研究所地球環境研究グループ (1998) : 「地球環境研究展望—砂漠化—」本文25pp.+意見文2pp.+参考資料24pp.
- 国家防汛抗旱總指揮部办公室・水利部南京水文水资源研究所 (1997) : 『中国水旱灾害』中国水旱灾害系列專著、中国水利水电出版社、北京、569pp.
- 新疆维吾尔自治区地方志编纂委员会、「新疆通志・气象志」編纂委员会 (1995) : 「新疆通志、第十卷气象志」新疆人民出版社、烏魯木齊、413pp.
- 吉野正敏 (1992) : 新疆の沙漠地域の風と風、「沙漠研究」1: 1-15.
- 吉野正敏 (1997) : 『中国の沙漠化』大明堂、301pp.

Naturel and Human Life in the Desert of Taklimakan

Masatoshi YOSHINO*

Taklimakan desert in Xinjiang, NW-China, is located in the inner-most part of Eurasian continent, which means the distance from the sea/oation as a source of water vapor is the greatest. Also, the location is just under the mid-latitude anti-cyclone felt. The topography of the Taklimakan desert is a basin named Tarim, This means that the invading air streams become warmer and drier due to the so-called Foehn effect. The border of the northern fringe is the Tienhsian Mountain range and the south Kunlung Mountain range; both are important source of water in the oases. The desert has been suffering from heavy rainfall and strong wind, even though their frequency is not high.

The 98-99% of the farmers are Uigur, but Han peoples are working in the sectors of industry, commerce, and other service industry. The farmers have to go into the desert to collect fire woods, if they do not get enough money through side works; for example carpet production mainly by women of the families.

Rates of cultivated lands depend upon the rate of irrigation for cultivated lands. But the rate of irrigated lands decreases sharply, when it becomes higher than threshold values, which differ between the northern and southern parts of the desert.

Amounts of damages caused by heavy rainfall are unexpectedly lange. Strong dust-storm (kara-bran) causes huge amount of socio-economie disasters.

In the last part of the present paper, desertification problems were dealt with. Constructions of Uigur farmers' houses were sketched. It is pointed out, as a conclusion, that to higher up income of farmers is one of the important ways for decreasing or weakening the desertification through collecting fire woods. Thorough discussion on the desertification studies was given.

Key Words: Desert, Desertification, Human Life, Nature, Taklimakan

中国の乾燥地トルファンにおける防風林による 気象改良と作物生育との相互関係

真木 太一*・杜 明遠*・大場 和彦**

1. はじめに

中国北西部の乾燥地では、気候的な乾燥に人为的な過放牧、過伐採、過開発や水の過剰消費などの影響が加わり、植生が減少して沙漠化が進行している。この中で著者ら(真木ほか, 1994b)および今回の観測によると、1989~93年の少雨期と最近の1994~96年の多雨期に区分されることが明らかになった。

この最近の降水量の増加については、乾燥地の特徴として1日~数日間の短期に、乾燥地としては多量で多くは強雨が降るため、沙漠で洪水という一見、不思議とも思われるような洪水が発生する。そこで僅かにある植生が被害を受けたり土壌が水食を受け、後で裸地化して逆に風食を受けるため、過開発が進むと沙漠化、荒地化が進行する地域も多く認められる。従って、乾燥地では多雨は一概には良いことだけとはいえないが、広域的には沙漠化を軽減させることになる。特に、乾燥地で農業を行うには水が不可欠であり、降水の増加は歓迎すべきことである。

中国の乾燥地域における防風林に関する研究結果には、①風速減少による蒸発散量の20%減少と作物収量の増加(新疆農業科学研究院, 1976)、②乾燥条件下における夜間気温の0.7~3.4°C低下と相対湿度の13%増加(治沙造林学編委会, 1984)、③風速減少、蒸発量減少、土壤含水率増加とトウモロコシ・ダイズ・コウリヤン・アワの増収(張ほか, 1990)、④夏季の気温2.4~3.6°C低下、生育初期の昼間地温0.3~0.5°C上昇、夜間地温1.1~2.5°C上昇、土壤水分1~4%増加(XIAO, 1990)、⑤圃場内の風速減少、土壤水分増加、穀物収量増加、穀物の千粒重増加(SONG and WEI, 1990)、⑥ゴビ沙漠で5列の防風林帯による減風率70.3%、1列の場合より27.2%増加、蒸発量31.6%減少、夏季の気温0.1~0.4°C低下、湿度2.0~9.7%増加、発芽率33.6%増加、2日間の発芽と4日間の開花促進、1Hでの収量17.7%減に対

して3~10Hでの50.3%増、全体で20.7%増(ZHAO, 1990)などがある。

しかし、防風林による減風以外の気温、地表面温度、湿度などに関する詳しい報告は、著者ら(真木ほか, 1992, 1994a, b, 1995a, b; MAKI *et al.*, 1993; 黄ほか, 1993; 潘ほか, 1993)を除いて少なく、特に沙漠からオアシスへの気象改良変化の定量化と作物の生産との関係を評価した研究は少ない。

これに関連して、黄ほか(1993)は灌木林、すなわち植生被覆度の増加につれての減風、気温・地温低下、相対湿度上昇、蒸発量減少の気象改良効果、潘ほか(1993)はポプラ・白榆・沙棗防風林による減風、気温・地温低下の効果について述べている。

さて、乾燥地では気候が厳しいため、作物を栽培するには防風林が欠かせない。防風林がなければ、特に強風の吹く地域では商品価値の高い作物は望むべくもない。本報告では乾燥地トルファンにおいての防風林による気象改良効果による作物の生育促進、収量増について調査した結果を報告する。

具体的には、1996年9月に測定した防風林・垣による数種の作物の気象反応特性および防風林の配置・位置による生育状況の差異を報告するとともに、平均的な気象条件と比較して一般的・汎用的な効果特性を評価する。次に、防風林による気象改良効果(例えば、真木ほか, 1992, 1994a, b, 1995a, b; MAKI *et al.*, 1993)に起因した作物への影響およびその効果(真木ほか, 1995a, b)について比較検討する。そして、防風林と作物が作る二次的な気象環境と作物の生態反応、すなわち気象と作物の相互作用について考察するとともに、作物の生育時期の差異による作物への気象の影響度を評価する。

2. 防風林・垣の特徴および観測・解析方法

1) 防風林・防風垣の特徴

中国新疆トルファンで調査した5種類の防風林・防風

* 農林水産省農業環境技術研究所環境資源部気象管理科

** 農林水産省九州農業試験場生産環境部

(受付: 1997年9月25日、受理: 1998年10月6日)

垣は、①若いポプラ防風林、②沙棗、白榆、胡楊の防風林、③沙棗、白榆の防風林、④沙棗、白榆、胡楊の防風林（樹種は②と同じであるが、別の防風林）、⑤コウリヤンの防風垣である（3-1節を参照）。

①1列の若いポプラ（銀白楊または新疆楊）（*Populus alba* L.）樹でできた防風林である。その高さは5.0m、林帶幅（枝張り）は0.5m、長さは57mであり、密閉度は平均60%である。密閉度（率）は防風林のない場合を0%、隙間のない場合を100%として、地面から鉛直方向に防風林の平均樹高までの風に対する面積における樹木の枝葉の占める割合、百分率（%）を指し、間隙率（度）は100%から密閉度を引いた値である。

②白榆（*Ulmus pumila* L.）樹、沙棗（*Elaeagnus angustifolia* L.）樹、胡楊（*Populus euphratica* Oliv.）樹で構成された混交（複合）防風林（3-3節ではB防風林に相当）である。その高さは8.0m、林帶幅は10.0m、長さは500m、密閉度は平均70%（上層60、中層70、下層80%）である。なお、その防風林の下層には高さ1.0mの枸杞（*Lycium barbarum* L.）の防風垣が風下側の末端にある。

この②項の防風林の風下側203mには別の防風林があり、さらに10.0mの道路を挟んだ風下側にも防風林がある。これらの防風林は同じく白榆・沙棗・胡楊樹でできており、高さはどちらも8.0m、密閉度は70%（上層60、中層70、下層80%）である。

③白榆樹と沙棗樹でできた混交防風林である。その高さは8.0m、林帶幅は15.0m、長さは500m、密閉度は平均70%（上層60、中層80、下層70%）である。ただし、観測は防風林の切れ目（隙間のある場所）で実施したため、その密閉度は30%である。なお、この③項の防風林は②項の防風林の風上側（強風時）の防風林に相当し、その防風林の間隔は203mである。

④第1列目の防風林は白榆樹、沙棗樹、胡楊樹で構成された混交防風林（3-3節ではA防風林に相当）である。その高さは7.0m、林帶幅は11.5m、長さは1km、密閉度は平均70%（上層70、中層80、下層60%）である。1列、2列目の防風林間隔は107mである。なお、風下側の第2列目の防風林の林帶幅は6.0mで、高さ6.0mの沙棗と高さ8.0mの銀白楊（新疆楊、ポプラ）で構成されている。そして幅11.5mの道路を隔てた第3列目の防風林の林帶幅は6.0mで、高さ8.0mのポプラ、6.0mの沙棗、高さ1.0mの枸杞があり、第2、3列目の防風林とも密閉度は70%である。

⑤作物自体が防風機能を果たすコウリヤン（*sorghum*）でできた1列の防風垣である。その高さ（草丈）は2.5m、幅は0.5m、長さは100m、密閉度は平均50%である。

2) 観測方法と解析方法

中国北西部のトルファンにおいて蒸発散量評価のための定点気象観測（10気象要素）を1990年7月より継続中である（真木ほか、1994a, b）。ここでは、防風林による移動気象観測として、1990～96年の12回にわたって実施した気象（風速、地表面温度、相対湿度、気温）調査のうち、主として1994年6月15～16日の気象データ（真木ほか、1995a, b）について解析する。

移動気象観測用の風速計はアネモマスター（日本科学工業社、型番6061）、気温・湿度計はデジタル温湿度計（チノー社、型番HN-K）、地表面温度計は赤外線放射温度計のスポットサーモメータ（ミノルタ社、型番TR-0510）を用いた。風速は地上1.5m、気温・湿度は地上1.0mで、また0cmの地表面温度は地上30cmより非接触で測定した。その観測位置は防風林からの風上・風下側の各地点であり、その地点は防風林の高さの倍数で表した距離、すなわち高倍距離（nH）を用いて、風上側は一、風下側は十で表す。なお、防風林は強風時の卓越風向（WNW～W）にほぼ直角に設定されており、特に断らない限り風上・風下は、この主風向に対するものである。

1996年9月5日にトルファンで防風林・防風垣による作物の生育調査を実施した。5種類の各防風林・垣からの風上・風下側の距離による作物の草丈変化を調査した。各地点の草丈は10個体の平均で、距離別に測定した。

また、作物の生育状況については、1991～96年の数回の調査のうち、生育初期から後期のワタ、コウリヤン、トウモロコシの各種防風林・垣による距離別の草丈の変化およびワタの果実数（収量）の変化について、同様の調査を行ったデータについて平均的な特徴を解析する。なお、解析には、ワタ・コウリヤンでは1991年11月上旬、1992年10月中旬、1994年6月中旬、1996年9月上旬のデータ、トウモロコシでは1992年10月中旬のデータを用いた。

3. 調査結果および考察

1) 1996年における作物の生育調査結果

トルファンの防風林による作物への効果の評価は次のような結果である。

(1) 若いポプラ防風林 (Fig. 1)

若いポプラ防風林（樹高5.0m、林帶幅0.5m、長さ57m、密閉度60%）による2種類の作物の草丈の変化分布を求めた。

①ワタの草丈 (Fig. 1)

防風林で風下まで十分保護されている場合には、4 H

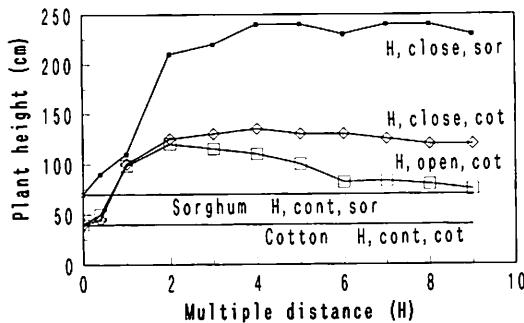


Fig. 1. Relations between multiple distance from windbreak and plant heights of cotton (cot) and sorghum (sor) under the sufficient (close) and insufficient (open) conditions protected by a windbreak made of young popular trees, and under control (cont.).

(高倍距離、防風林の高さの倍数で表した距離で、風上側を一、風下側を十で表す)付近でワタの草丈(◇)は最高の135cmで、2~7Hではほぼ同じ130~135cmの草丈であり、あまり変化がなく、防風林の効果が良く出ている。一方、圃場に斜風(防風林に対して斜めに吹く風)または横風が進入する場合には、ワタの草丈(□)は2H付近で最高であり、6H付近ではかなり減少して効果範囲が狭くなっている。なお、基準区のワタの草丈は40cmである。

②コウリヤンの草丈(Fig. 1)

防風林で風下まで十分保護されている場合には、コウリヤンの草丈(■)は4~5H付近に約240cmの最高値があり、2~9Hではほぼ同じ230cm前後の草丈を示している。この変化傾向は、次節のコウリヤンの平均的な変化の傾向と比較して、斜風の影響のない、また水分欠乏などのない、ほぼ理想的な状況下での草丈の変化を示した結果である。なお、基準区のコウリヤンの草丈は70cmである。

(2) 沙棗、白榆、胡楊の混交防風林(Fig. 2)

沙棗、白榆、胡楊の混交防風林(樹高8.0m、林帯幅10.0m、長さ500m、密閉度70%)による作物への影響を調査した。ワタ、コウリヤンとともに2H付近で最も草丈が高く、ワタ(◇)は120cm、コウリヤン(■)は280cmとなり、その後ワタでは僅かに、コウリヤンではやや大きく減少して、6H付近でワタは95cm、コウリヤンは220cm程度になっている。なお圃場の区画が6.3Hで小さいため、効果範囲としてはそこで途切れている。そして基準区のワタ、コウリヤンの草丈はそれぞれ、40cm、70cmである。

(3) 沙棗、白榆の混交防風林(Fig. 2)

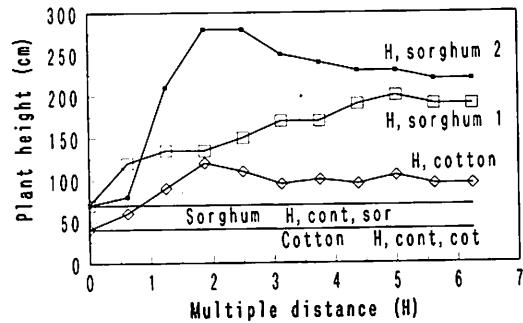


Fig. 2. Relations between multiple distance from windbreak and plant heights of cotton and sorghum under the conditions of relatively sufficient protection (cotton and sorghum 2) and insufficient protection (sorghum 1) with windbreak gap for a windbreak made of mixed trees, and under control.

沙棗、白榆の混交防風林(樹高8.0m、林帯幅15.0m、長さ500m、密閉度70%)は一般に良く整備されているが、調査場所は、特に防風林の切れ目を選定して実施した。このため切れ目付近の平均の密閉度は30%と低い。この結果、Fig. 2に示すように、防風効果は1~5Hで、次第に草丈(□)が上昇しており、5H付近で最高200cmとなり、6H付近でも同じ値となっている。従って、防風林の後方2H付近から効果が現れ、その効果は後方にずれる特徴が認められる。

(4) 沙棗、白榆、胡楊の混交防風林(Fig. 3)

沙棗、白榆、胡楊の混交防風林(樹高7.0m、林帯幅11.5m、長さ1km、密閉度70%)による作物への影響を調査した。この防風林の風下側1~7Hには草丈の低いブドウとスイカが植えられており、防風林の風下側7Hからワタの圃場となっている。このため、ワタの最前線

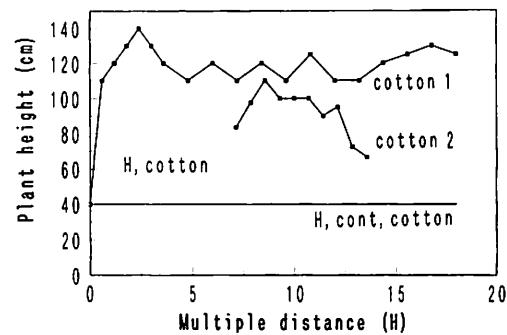


Fig. 3. Relations between multiple distance from windbreak and plant heights of cotton under the conditions of sorghum windbreak hedge (cotton 1) and having open space of 7H in the leeward side (cotton 2), and under control.

(7 H) の草丈 (Fig. 3 の下方の ■, cotton 2) は 85cm で、その風下の 8.5H (ワタ圃場の端からは 2H) 付近で最高の 110cm となり、かつ草丈の高い範囲は 8 ~ 12H (ワタ圃場からは 1 ~ 5 H) である。ワタ圃場の風下にある第 2 防風林の直前では、やや低くなっている。

以上を要約すると、混交防風林による効果を考えると、防風林直後に商品作物の草丈の低い作物が栽培されていて、その領域では気象改良効果が大きい。その後方のワタの草丈は 8 H 付近で草丈が高く、12H まで高いが、その後は 2 列目防風林による水分・養分の競合でやや低い。換言すれば、防風林の効果が幾分小さくなる範囲でのワタの草丈は作物自体の保護作用で増加するが、同一作物を栽培する場合よりは低く、やや効果が小さい。

(5) コウリヤンの防風垣 (Fig. 3)

コウリヤンの 1 列の防風垣 (草丈 2.5m, 長さ 100m, 密閉度 50%) によるワタの草丈の変化を求めた結果、作物による防風垣は有効であることがわかった。ただし、この防風垣については約 15H の風上に高さ 6 m の防風林があり、その防風林の影響をある程度受けていることになる。このためコウリヤンの草丈が、風上側で 250cm にもなっており、畦の上に植えられていることもあって草丈は高い。従って、ワタの草丈 (Fig. 3 の上方の ■, cotton 1) は 2 ~ 3 H 付近で最高となるが、その後、効果は減少して、4 ~ 14H ではほぼ同じ値であり、15 ~ 18H では 125 ~ 130cm で、2 列目のコウリヤンの防風垣 (草丈 170cm) によって、その防風垣の風上側にも効果が出ている。また、風上側の防風林の影響がある程度出るとしても、コウリヤン防風垣は、防風垣の直後からワタの草丈が高くなる特徴がある。

2) 1991 ~ 96 年における作物の生育調査結果

(1) 生育時期による防風林の効果の差異

ワタを例にして解析した結果を報告する。Fig. 4 に高倍距離を基準化した相対高倍距離 Dr (%) に対する 4 生育時期におけるワタの平均的な相対植物高度 (相対草丈) Hr (%) を示す。相対高倍距離とは 2 列の防風林の高倍距離 (nH) に対する各距離の百分率で、ここでは区別のため % (D) で表す。この意味は異なる高倍距離を持つ 2 列間の防風林の効果を相対的に比較することが目的である。また、相対草丈とは基準区の基準草丈に対する各草丈の百分率で、ここでは区別のため % (H) で表す。なお、生育中期の防風林は生育初期・後期の防風林とは異なる。

① 生育初期のワタの相対草丈の変化

1994 年 6 月中旬に行われた生育初期のワタの草丈の平均的な測定値を用いた。

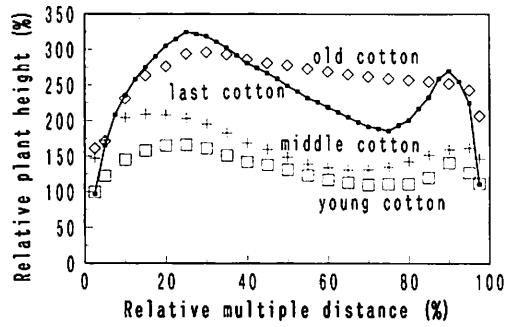


Fig. 4. Relations between relative multiple distance from windbreak and relative plant height at young, middle, old and last growth stages of cotton plant.

防風林の影響のない、または防風林のない畑地での基準区の草丈 (11cm) に対する防風区での相対草丈 Hr, % (H) (□印) の相対高倍距離 Dr, % (D) による変化を示す。その変化幅は 100 ~ 170% (H) 程度であり、防風区の 9 ~ 41% (D) (17H, 高倍距離間隔の防風林の場合には 1.5 ~ 7.0H に相当) では 140% (H) を越えている。また、90% (D) (17H 間隔の場合 15.3H で、2 列目防風林の前方 - 1.7H に相当) でも 140% (H) の第 2 の極大値がある。

全般に基準区 (基準値) よりもかなり高いが、1 列目防風林の直後 (左側) と 2 列目防風林の直前 (右側) 付近での基準値との差異はあまり大きくない。これは生育初期であり、また効果の差異が草丈に反映する積算値、すなわち積算効果としては妥当な値である。一方、後述のように生育後期では草丈の基準値との差異は大きくなっている。

② 生育中期のワタの相対草丈の変化

1994 年 6 月中旬に行われた生育中期のワタの草丈の平均的な測定値を用いた。

基準区の草丈 (14cm) に対する相対草丈 (+印) の変化をみると、生育初期の後半から生育中期の前半頃のワタの相対草丈は 130 ~ 210% (H) 程度であり、①期 (前項) の生育初期よりも平均的に 30 ~ 40% (H) 高くなっている。ただし、この場合は①期とは異なる 3 種の混交防風林であり、密閉度も高い。特に異なる点は次に示す防風林の風上側の特徴である。

①期では風上側が非常に乾燥した沙漠であるのに対して、②期 (本項) では一部に乾燥地 (荒れ地) はあるが、防風林で保護された畑地が広く、気候緩和されている。このため①期では生育初期の割に 1 列目防風林直後の 2.5% (D) 地点から 12.5% (D) 付近までのグラフ上に

おける距離に対する草丈の傾斜が急である。一方、②期の方では相対的に変化が小さく、生育ステージが異なるにもかかわらず、①、②期の2.5~12.5% (H) ではほぼ同一の傾斜角となっている。草丈の高い範囲は9~27% (D) (25H間隔の2.25~6.75H) が200% (H) 以上であり、また90~95% (D) (-2.5~-1.25H) でも160% (H) と少し高くなっている。

③生育後期のワタの相対草丈の変化

1996年9月上旬に行われた生育後期のワタの草丈の平均的な測定値を用いた。

基準区の草丈(40cm)に対する相対草丈(△印)の変化をみると、生育後期のワタの相対草丈は160~300% (H) であり、②期よりも100% (H) 前後高くなっている。この場合は3種の混交林であり、良く保護されているため50~80% (D) 付近でも、①、②期の場合よりも50~80% (D) で相対的にあまり減少していない。また、④期(次項)と比較して、その付近での減少が小さく、非常に良く保護されているといえる。これは防風林が数列あり、オアシスの農地として条件がかなり良く整っているためと考えられる。また、両防風林に近い両端ではかなり大きく減少しているとはいえない、オアシス内の良好な保護された農地であるため、他の防風林の例と比較してかなり大きい値である。

④生育終期のワタの相対草丈の変化

1992年10月中旬と1991年11月上旬に行われた生育終期のワタの草丈の平均的な測定値を用いた。

基準区の草丈(40cm)に対する相対草丈(■印)の変化をみると、相対草丈は100~325% (H) であり、中央部分で①、②期よりも非常に大きい値を示している。25% (D) (4.25H) で最高の325% (H) である。高い範囲は14~44% (D) (2.4~7.5H) であり、また90% (D) 付近でも270% (H) を越えている。

防風林の両端の±2.5% (D) では相対草丈は100% (H) 前後であり、草丈は生育初期の11cm、中期の14cmから後期と同じ値の40cmに増加しているが、相対値では生育初期の数値とほとんど同じであり、ワタが枯れたり、あまり生育していない状態を示している。一方、4~5H付近では非常に高くなってしまい、防風林の効果が良く出ている。

なお、③期と比較して50~80% (D) 付近でかなり減少しているのは、圃場内への両端からの灌漑水の時間的な遅れと水量不足も関与するとともに、特にこの防風林の風上側は極めて乾燥した厳しい気象条件下にあるため、この防風林の効果範囲が狭くなっていると判断される。従って、①、②、③期と比較して大きい減少が認め

られる。特に、75% (D) 付近で170% (H) 程度の極小値が認められる。また逆に2列目防風林の前方の90% (D) にも270cmの極大値として第2のピークが認められる。

(2) ワタの草丈と収量との関係

収穫期のワタの草丈と果実数(収量)との関係は真木ほか(1994a)のグラフ中のFig. 7に示され、相関が高いことが示されている。この図から関係式を求める、次の経験式が求められる。

$$H = 19.7F^{1.68}, r = 0.987$$

ここで、Hは草丈(m)、Fはワタ1株当たりの果実数(個)、rは相関係数であり、データ数n=21で、1%水準で有意である。すなわち、草丈よりも果実数の方がより大きい指数関係で増加することを意味する。例えば、ワタの草丈が0.5mでは6.1個の綿毛の入った果実数であるが、草丈が2倍の1.0mになると19.7個の3.2倍となり、また1.5mで3倍になると38.9個で6.3倍になっている。

従って、乾燥地のような全般的に水分、養分の制約状況下では草丈が高くなれば、それだけ収量が増加することを明確に表している。

(3) コウリヤンの草丈の変化特性

防風林が17H(高倍距離)間隔の場合におけるコウリヤンの草丈の変化をFig. 5に示す。まず、基本的な栽培として、防風林直後からコウリヤンを作付した場合(Sorghum-1、□印)の草丈の変化は、3.5H付近の237cmを最高にする草丈と2列目防風林の風上側-1.5~-1.0H (15.5~16H) にもう一つ183cmの草丈のピークがあり、概して1~7Hで高くなっている。

一方、防風林直後からの作付ではなく、3.5H間隔の

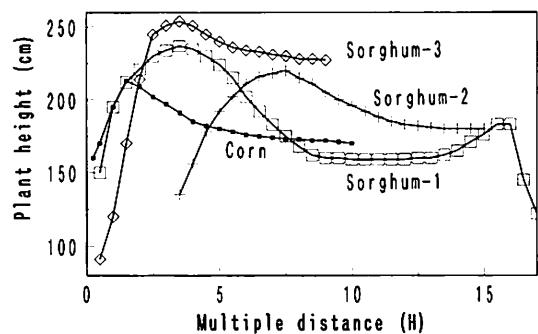


Fig. 5. Relations between multiple distance from windbreak and plant heights of sorghum (1, 2 and 3) under the conditions of cultivation from immediately adjacent to windbreak, with an uncultivated area from 0~3.5H and yielding a good effect, and of corn plants.

空地（雑草もほとんどない裸地）をおいた後方からの作付の場合（Sorghum-2, +印）には、最高値は7.5Hで220cmであり、風下15Hまでかなり高い効果が認められる。しかし、その後方には防風林がないため条件が幾分異なるが、風下側の最高値などの比較は可能と考えられる。それによると最高は17cm低くなっている、やや効果が落ちるが比較的草丈の高い効果範囲は後方にずれており、効果範囲もかなり広い。

しかしながら、空地を3～5H間も取る場合には、本来、草丈の高くなる領域での収量が望めなくなるため、作物栽培上あまり好ましくない。従って、この空地を他の目的に利用することが適切である。例えば、前述のスイカなどの高収益の作物を栽培するとか農道を造るとか、何らかの目的以外は、後述するように防風林の後方1Hから栽培することが適当である。

最後に1996年9月のデータで、Fig.1の若いボプラ防風林による良好保護されたコウリヤンとFig.2の3種の混交林による保護されたコウリヤンのデータを平均化した結果（Sorghum-3, ◇印）を示す。なお、表示方法はFig.1の9Hの高倍距離に合わせて示した。

風下の作物に対して防風林は高さは高く、長さも長く、良く整備されているため、3.5Hにピークがありコウリヤンの草丈も高い。また圃場範囲が狭いが、9Hまでは減少程度も小さく、良好保護された典型的な観測結果である。

以上のような結果から判断すると、防風林から1H（防風林の高さの幅の0～1H）間の作物は水分、養分の競合や日陰などによって生育が悪くなるため、前述したとおり、この1H間は栽培しない方が得策であり、水路とか農道などへの利用が適する。

一方、特に風上側が沙漠となっている極めて厳しい気候条件下では、例えば上述のコウリヤンのように作物自体をある程度犠牲にして、保護用防風垣と考え、栽培することも必要である。

（4）コウリヤンとトウモロコシとの減風効果の比較

トウモロコシではFig.5の■印によると最高が1.5Hで214cmであるが、その効果は比較的早く低下して、170～180cmの値になっている。これは2列の風上側の防風林はコウリヤンの場合には11.5mであるが、トウモロコシでは2m程度で狭いため、この差が草丈の変化に影響を与えているとも考えられる。しかし、それだけではなく、コウリヤンと比較すると単子葉植物のため草型は比較的類似しているが、細かくみるとコウリヤンは出穂してもまだ上層に葉があるが、トウモロコシでは出穂すると上層部は穂のため葉が疎らで密閉度が低くなり、風に

対して抵抗力が小さく、その結果、効果範囲は狭くなると判断される。僅かな草型の違いが効果範囲に影響を及ぼしていて興味深い。

前節の結果から考えると、コウリヤンの場合には葉が上層まであり、また穂も高くならないため、上層部の作物体（穂と葉）は風に対して抵抗体となり、コウリヤン自体が防風垣の役割を果たすことが可能である。

作物自体が防風垣の役割を果たす事例として、国内ではテオシント、キビ、エンバクなどが利用されており、また単子葉植物の防風垣としては、ススキ、カヤ、ダンチクなどが利用されている。一方、同じ単子葉植物で比較的類似した草型を示すトウモロコシについては、もちろん防風効果は認められるが、その効果は小さく防風垣としての利用価値は低い。

なお、トルファンでは夏季に非常に高温・乾燥であるため、7～8月にトウモロコシは出穂・開花しても受精できないため、秋季に開花する栽培方式を取っている。従ってトウモロコシの草丈は十分生長していないことも、草丈が低いことに関与している。

3) 作物の生育と気候との関係

（1）A, B防風林における平均的な気象変化

作物の生育について、ここではワタの草丈を指標にして、その草丈と各気象要素（風速、地表面温度、湿度、気温）との関係を比較する。

気象データは1994年6月15日14, 17, 20時、6月16日11, 16, 20時（ウルムチ時間）のデータを平均化して利用した。A防風林（2-1節④, 3-1節（4））の相対高倍距離Dr（%（D））に対する相対風速Ur（%）、地表面温度（地表温）Ts（℃）、相対湿度RH（%）、気温Ta（℃）との関係をFig.6に示す。

相対風速Urは15～50%（D）領域で低く、70%（D）付近にも少し高い領域があるが、両端で高い一般的な減少形態を示す。一方、地表面温Tsは10～55%（D）で高く、また85～95%（D）付近でもやや高く、防風林の両端と70～80%（D）で低く、風速とは逆の関係を示す。また相対湿度RHは20～95%（D）で高くなっているが、両端が低い。気温Taは15～30%（D）でやや高いが、距離別の気温の変化幅は0.5℃で小さく、湿度では1.5%で小さい。

気象データは1994年6月15日15, 18, 21時、6月16日12, 15時のデータを平均化して利用した。B防風林（2-1節②, 3-1節（2））のDrとUr, Ts, RH, Taとの関係をFig.7に示す。Urは10～35%（D）で低く、両端の、特に90～97.5%（D）で高くなっている。Tsは25～40%

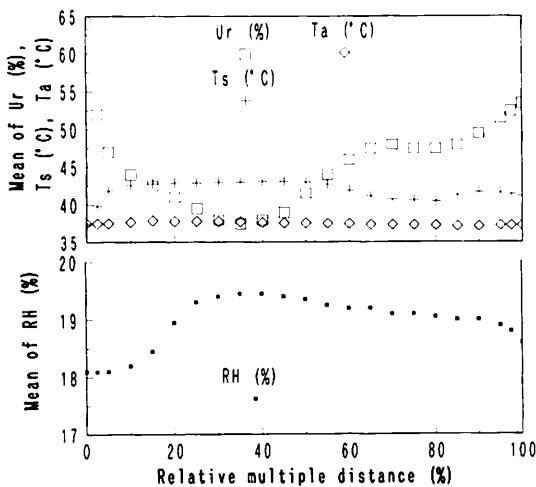


Fig. 6. Variations of relative wind speed (Ur), soil surface temperature (Ts), air temperature (Ta) and relative humidity (RH) to relative multiple distance from windbreak under the condition of desert located on the windward side from a windbreak made of 7m-high mixed trees.

(D) 付近にピークがあり、両端で低く、またTaは25~35% (D) にピークがあり、両端で低い。RHは25~35% (D) にピークがあり、10~55% (D) で高い変化形態を示す。

気象の変化形態では、1990~94年の春季~秋季の観測時の各気象要素の平均的な変化と天候条件が同一(晴天)であれば、変化パターンは類似している。

(2) A, B防風林による気象と草丈との関係

これらの気象の変化 (Fig. 6, Fig. 7) と草丈の変化 (Fig. 4 の△印と■印) を比較する。相対風速Ur (%), 地表温Ts (°C), 相対湿度RH (%), 気温Ta (°C) のそれぞれに対するワタの草丈Hp (m) との関係をTable 1 に示した。ただし、0% (D), 100% (D) では気象の値は示したが、作物が栽培されてなく草丈の値がないので、2.5~97.5% (D) の値を解析した。

Table 1 左の上段に、①A防風林の1994年6月中旬の気象とA防風林のワタ生育後期(1996年9月上旬)の草丈との関係、左の下段に②B防風林の1994年6月中旬の気象とB防風林のワタ生育後期(1996年9月上旬)の草丈との関係を示す。また、Table 1 右の上段に、③A防風林の1994年6月中旬の気象とA防風林のワタ生育終期(1991年11月上旬と1992年10月中旬の平均)の草丈との関係、右の下段に④B防風林の1994年6月中旬の気象とA防風林のワタ生育終期(1991年11月上旬と1992年10月中旬の平均)の草丈との関係を示す。

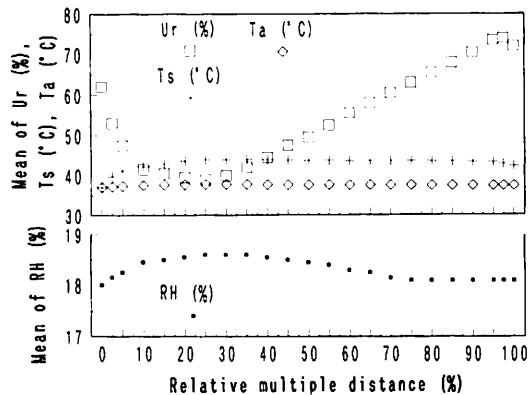


Fig. 7. Variations of Ur, Ts, Ta and RH to relative multiple distance from windbreak under the condition of oasis located on the windward side from a windbreak made of 8m-high mixed trees.

①では生育終期の草丈との関係では相対湿度との相関が最も高く、次に風速、地表温の順であり、気温が最も低い。また、②では気温と地表面温度の相関が非常に高く、相対湿度も高いが、相対風速との関係は低い。

③では、風速との相関が最も高く、また地表温ともかなり高いが、気温、相対湿度についてはやや低い。また、④の場合には気温との相関が最も高く、湿度も高いが、地表面温度、風速がやや低い。しかし、データ数21(自由度19)では1%水準の相関係数が0.549であるため、いずれの場合も1%水準で有意である。

Table 1より、①の気温との相関の低い理由は、風上側が乾燥した沙漠であり、一般に気温の変化の大きい時間帯では風が強く、強風時には気温があまり変化しないため、また午後~夜半の強風と夜半~午前中の弱風による気温の違いを平均化したため、平均的には気温がほとんど変わらない結果、気温との相関が悪くなったと考えられる。一方、②の風速の相関の低い理由は、防風林に囲まれたオアシス内では風速は弱くなっているため、この場合は地表面温度や気温の影響が大きくなるためと考えられる。

両者を比較すると、沙漠とオアシスの差異によって、沙漠から防風林直後では防風林による気温の差は小さいため相関が低く、一方オアシス内では風上側の防風林によって風速が弱まっているため風速との相関が低いことになる。すなわち、オアシスの最前線では風速との関係が大であるが、オアシス内では風速との関係が低い。

草丈の変化については長期間の積算による結果であり、6月中旬の短期間平均の気象との関連は意味がある

Table 1. Relation between meteorological data and mean plant height of growth stage for A and B windbreaks.

Ur: relative wind speed, Ts: surface soil temperature, RH: relative humidity,
Ta: air temperature and r: correlation coefficient

Relation between meteorological data in middle ten days of June for A (①upper item) and B (②lower item) windbreak and mean plant height; Hp of late growth stage in first ten days of September for A and B windbreaks, respectively.		Relation between meteorological data in middle ten days of June for A (③upper item) and B (④lower item) windbreaks and mean plant height; Hp of last growth stage averaged in first ten days of November and middle ten days of October for A windbreak.	
$Hp = -0.022Ur + 2.00$	$r = 0.716$	$Hp = -0.042Ur + 28.25$	$r = 0.822$
$Hp = -0.004Ur + 1.23$	$r = 0.313$	$Hp = -0.012Ur + 1.58$	$r = 0.574$
$Hp = 0.086Ts - 2.58$	$r = 0.601$	$Hp = 0.191Ts - 7.11$	$r = 0.796$
$Hp = 0.132Ts - 4.67$	$r = 0.925$	$Hp = 0.159Ts - 5.94$	$r = 0.663$
$Hp = 0.294RH - 4.57$	$r = 0.864$	$Hp = 0.319RH - 5.12$	$r = 0.554$
$Hp = 0.421RH - 6.69$	$r = 0.574$	$Hp = 0.936RH - 16.23$	$r = 0.760$
$Hp = 0.257Ta - 8.65$	$r = 0.373$	$Hp = 0.696Ta - 25.18$	$r = 0.597$
$Hp = 1.034Ta - 37.86$	$r = 0.953$	$Hp = 1.551Ta - 57.39$	$r = 0.847$

上段：1994年6月中旬の気象（A防風林）に対する1996年9月上旬の生育後期の草丈（Hp）（A防風林）。

下段：1994年6月中旬の気象（B防風林）に対する1996年9月上旬の生育後期の草丈（Hp）（B防風林）。

上段：1994年6月中旬の気象（A防風林）に対する1991年11月上旬と1992年10月中旬の平均の生育終期の草丈（Hp）（A防風林）。

下段：1994年6月中旬の気象（B防風林）に対する1991年11月上旬と1992年10月中旬の平均の生育終期の草丈（Hp）（A防風林）。

かどうかを考える必要がある。トルファンでは春～秋季（5～9月）は高温で乾燥した気候が多く、平均的な変化形態としては類似しており、また防風林による平均的な気象改良効果も類似しているため、代表的な短期間のデータでも長期間の気候の影響の結果である作物の草丈と十分比較が可能であり、その妥当性を表している。

4. まとめ

(1) ワタ、コウリヤンの草丈は十分保護された若いボラ防風垣では、特に2～10H（高倍距離）間で効果が高い。一方、防風林に対して斜風が入る場合にはワタでは3Hから減少し始め、6H以降でかなり大きく減少して効果範囲が狭くなる。

(2) 混交林によるワタ、コウリヤンの草丈は、特に2～2.5H付近で高く、以降7H付近までかなり高い。そして若いボラ防風垣の場合と同程度であり、両作物とも比較的良く保護されている。

(3) 切れ目のある防風林では防風林直後では作物保護効果はかなり小さいが、次第に作物自体の保護作用によって草丈が高くなる。しかし、良く保護された場合の草

丈までは回復しない。

(4) 防風林の効果の小さくなる風下領域での作物栽培は作物自体の気象改良効果と保護作用で草丈は増加するが、同一作物を防風林直後から栽培するより効果が低い。

(5) コウリヤン防風垣によるワタの草丈では1～4H付近で高く、その後方では相当程度保護され、相対的に高くなっている。乾燥・強風に強いコウリヤンは草丈の低い作物に対して気象改良効果が期待でき、簡易な防風垣としての役割を果たし、またコウリヤン自体からの収量も期待でき、一挙両得である。

(6) ワタの果実数（個）または収量は比例係数19.7で、ワタの草丈（m）の1.68乗に比例して増加する。

(7) 防風林による作物の草丈への効果は、生育につれて次第に顕著に現れる。また風上側が沙漠の場合には、防風林直後から気象が次第に改善され、それと同時に草丈も増加する。

(8) ワタ、コウリヤンを栽培する場合には防風林の後方1H付近からの栽培が有効であり効果範囲も広くなる。一方、トウモロコシでは上層部の葉の繁茂が低いことも関与して草丈の増加範囲は比較的狭い。

(9) ワタの生育終期の草丈と気象（風速、地表温、湿度、気温）との相関係数は1%水準で有意である。

(10) ワタの生育中期の気象と草丈との相関で、風上側が沙漠で厳しい乾燥気候の場合、昼夜の気温の平均化による気温変化の縮小によって、風速、湿度との相関が高く、気温との相関は低い。一方、風上側がオアシスの場合、気象が改良されているため、気温、地表温との相関が高く、風速との相関は低い。

引用文献

- 黄 丕振・潘 伯榮・周 智斌・真木太一 (1993) : 吐魯番沙地人工灌草植被対小気候の改良効果. 真木太一編「日中共同研究成果発表報告会論文集」35-41.
- 真木太一・潘 伯榮・黄 丕振・閻 国榮 (1992) : 中国トルファンの乾燥地におけるタマリスク防風林による微気象改良. 「農業気象」48: 157-164.
- 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・上村賢治 (1994a) : 中国トルファンの乾燥地における2列の防風林による微気象、堆沙、作物への影響. 「農業気象」49: 247-255.
- 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・上村賢治 (1994b) : 中国北西部の乾燥地トルファンにおける砂漠・オアシス気候と蒸発散特性. 「農業気象」50: 185-195.
- 真木太一・潘 伯榮・鯨島良次・杜 明遠・川方俊和 (1995a) : 中国トルファンの乾燥地における複数列の混交防風林による農地の微気象改良. 「農業気象」51: 229-238.
- 真木太一・潘 伯榮・鯨島良次・杜 明遠 (1995b) : 中国新疆の乾燥地トルファンにおける防風林による農作物生育環境の微気象改良. 「沙漠研究」5: 21-32.
- 潘 伯榮・黃 丕振・劉 志俊・真木太一 (1993) : 吐魯番防護林の気象効應. 真木太一編「日中共同研究成果発表報告会論文集」23- 30.
- 治沙造林学編委会 (1984) : 「治沙造林学」中国林業出版社. 323pp.
- 新疆農業科学研究院 (1976) : 吐魯番県林網系統防風効能的研究. 「沙漠的治理」科学出版社. 81-87.
- 張 廉良・徐 文輝・林 長清 (1990) : 乾安県農田林網生態經濟効益的研究. 「防護林研究」1: 296-305.
- MAKI, T., DU, M. and PAN, B. (1993) : The effect of windbreaks on meteorological improvement and the prevention of wind erosion. *J. Agr. Meteorol.*, 48: 683-686.
- SONG, Z. and WEI, L. (1990) : The relation between microclimatic factors in shelterbelt networks and crop yield. *Protective Plantation Technology*, Northeast Forestry University, 211-217.
- XIAO, L. (1990) : Shelterbelt benefits and planting technique in the mixed zone between farmland and pasture land in Houshan, Inner Mongolia. *Protective Plantation Technology*, Northeast Forestry University, 301-304.
- ZHAO, H. (1990) : Evaluation of effects of farmland shelterbelts in the Gobi Desert area. *Protective Plantation Technology*, Northeast Forestry University, 209-210.

Mutual Relationship between Meteorological Improvement and Crop Growth by Windbreaks at the Arid Land of Turpan in China

Taichi MAKI*, Mingyuan DU* and Kazuhiko OHBA**

(1) Plant heights of cotton and sorghum protected by a sufficient windbreak hedge made of young popular trees are particularly high at distances of 2H to 10H (where nH is the multiple distance of windbreak height, H, and a negative sign indicates the windward side and a positive sign indicates the leeward). However, in the case of wind blowing from the side of the windbreak, cotton plant height decreases gradually from 3H and decreases sharply after 6H. Consequently the effective region of the windbreak is decreased.

(2) Plant heights of cotton and sorghum protected by a windbreak made of mixed trees are particularly high at a distance of 2H to 2.5H, and considerably high at distances up to 7H. The effect of the windbreak is similar to that of the young popular hedge. Both crops are relatively well protected by windbreaks.

(3) The protective effect for crops in cases when there is a gap in the windbreak is smaller than that for crops with no windbreak gap. The plant height increases gradually due to the protective effect of the crop itself. However, the crops will not attain the maximum plant height under the condition of full protection.

(4) Considering the crop cultivation from the decreasing area of the typical windbreak effect, plant heights increase due to climatic improvement and protection of the crop itself. However, the effect is lower than that of cultivation in the area immediately adjacent to the windbreak in the case of the same crop.

(5) Cotton plant heights protected by sorghum windbreak hedge are high at distances of 1H to 4H and also comparatively high at distances up to 17H based on fairly large protection. Climatic improvement by sorghum being resistant to dryness and strong wind can be achieved for crops of lower height, so that the sorghum acts as a windbreak hedge. Moreover, crop production can be also got from the hedge itself; that is, it serves two purposes.

(6) Cotton lint number or production volume increases with the cotton plant height to the 1.68 power and a proportional coefficient of 19.7.

(7) The effect of a windbreak forest for crops becomes significant at more advanced growth stages. When the windward side of the windbreak is desert or dry land, climatic improvement appears from the point of the windbreak and the plant height also increases gradually.

(8) It is suitable that crops are planted from a distance of 1H from the windbreak for cultivation of cotton and sorghum, and improvement area also increases. On the other hand, the area of increased corn plant height is not always wide because crop density of the upper part of corn is low.

(9) Relations between the meteorological elements (wind speed, surface soil temperature, humidity and air temperature) and the cotton plant height at the last growth stage are all significant at the level of 1% on the correlation coefficient.

(10) Considering correlations between the meteorological elements on the cotton plant height at the middle growth stage, the correlation between plant height and relative wind speed and/or relative humidity is higher than for air temperature based on the small variation in air temperature averaged between day and night in the case of desert or dry land on the windward side. However, the correlation between the plant height and air temperature and/or surface soil temperature are higher while that for relative wind speed is lower due to the climatic improvement in the case of oasis on the windward side.

Key Words: Crop growth, Meteorological improvement, Plant height, Windbreak, Wind speed

* Division of Agrometeorology, Department of Natural Resources, National Agro-Environmental Sciences, 3-1-1, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan.

** Department of Agro-Environmental Management, Kyushu National Agricultural Experiment Station, 2421, Suya, Nishigoshi, Kumamoto 861-1192, Japan.

沙漠開発の視点からみた世界人口と自動車台数の分布

西 上 泰 子*

1. はじめに

人類は今、エネルギーの枯渇問題に直面している（西山, 1998）。石油や天然ガスの寿命はあと数十年である。省エネルギーやりサイクルは枯渇時期を遅らせるることはできても、現在のようなエネルギー需要が持続されれば、枯渇そのものを避けることはできない。一人当たりのエネルギー消費量は先進国と発展途上国との間で大きな格差がある。OECDの先進国は世界の人口の15%を占めるに過ぎないにもかかわらず、世界のエネルギーの52%を消費している（依田, 1993）。発展途上国では経済発展によって現在一人当たりのエネルギー消費量が増大している基調にある。発展途上国における人口増加は極めて深刻で、来世紀には世界人口は100億人に達すると予測されている。発展途上国の人口増加と生活水準の向上により、今後エネルギー需要は急増し、エネルギーの枯渇問題はさらに深刻さを増す。

一方、地表上には、世界の一次エネルギー消費量の1万倍にもなる太陽エネルギーが到達している。しかし太陽エネルギーは希薄であり、また太陽電池のエネルギー変換効率は10%前後であるため多くの受光面積を必要とする。これらのことから、沙漠の未利用の広大な土地に降り注ぐ豊富な日射が、現在の化石エネルギー供給を代替する、新しい自然エネルギーとして有望視される。

しかしながら、沙漠の太陽電池で獲得したエネルギーは直接電力の形で利用することができれば最適であるが、電力のままでは沙漠近傍にしか輸送できない。可搬性燃料の合成等の、エネルギー長距離輸送技術の開発が必須である（佐野, 1995）。本研究は、最適エネルギー輸送方法の選択の際に前提条件となる、世界レベルでのエネルギー需要の実体を明らかにすることを目的とした。世界の全陸域、人口、自動車台数が、太陽エネルギーの巨大な資源庫である沙漠から、どのような距離を隔てて分布するのかを、先進国と発展途上国に分けて以下に述べる。また、自動車台数が国別エネルギー消費レベルを

表わす指標であることを、国別商用エネルギー消費量と国内総生産（GDP）との相関をとって確認した。

2. データと解析方法

1) 沙漠分布図

将来の利用開発を考慮した沙漠の分類とその対象面積については調査例がないが、筆者はすでに世界の降水量データをもとに、緯度経度0.5度四方のメッシュデータとして世界の沙漠の分布図を作成している（西上, 1997）。この沙漠分布図では、極沙漠（年間降水量：25 mm未満）、真沙漠（年間降水量：25mm以上50mm未満）、沙漠（年間降水量：50mm以上100mm未満）および半沙漠（年間降水量：100mm以上250mm未満）の4種類に沙漠を分類したが、今回はこれらの沙漠を一つの「沙漠」（年間降水量：250mm未満）として総計し直している。地球全体を緯度経度0.5度四方のメッシュで区切ると、総メッシュ数は25万9,200（720×360）個であるが、それらのうち、8,757個のメッシュが今回の沙漠（Desert）である。

2) 統計データ

人口データは「世界の資源と環境1996-97」（世界資源研究所ほか, 1996）に収録されている1995年の国別統計値を使った。データが収録されていない国については「1993国際連合世界統計年鑑」（国際連合, 1996）のデータで補完した。自動車台数のデータは「96/97世界国勢団会」（矢野恒太記念会, 1996）に記載されている1993年時点の、乗用車とバス・トラックの合計値を用いた。データの記載がない国については、1993国際連合世界統計年鑑に記載の乗用車と商業車の合計台数で補った。これら人口と自動車台数の両方のデータが揃う国は全部で153カ国である。

「世界の資源と環境1996-97」で、国上面積と商用エネルギー消費量およびGDPのデータを揃え、自動車台数との相関を世界117カ国について調べた。商用エネルギー

* 地球エネルギーシステム研究所

(受付：1997年10月6日、受理：1998年10月6日)

—消費量は国内で生産される化石燃料総生産量に風力、水力、原子力等の一次電力の発電量を加え、さらに純輸入分を加えたものである。国の経済的豊かさを表わす指標としてはGDPを採用した。GDPは国際ドル(\$)で示される。

3) 解析方法

沙漠分布図は国境のない、緯度経度毎のメッシュデータである。他方、人口や自動車台数のデータについては、世界的規模で得られるのは国別統計値のみである。両者のデータを結びつけるために、地理情報システムを用いた。まず、沙漠の縁からの陸域全体の距離を計算し、陸域のメッシュの一つ一つに沙漠からの距離を割り当てる。そしてその距離の1,000km毎に陸域全体を分類し、それぞれの面積を算出した。次に、世界153カ国の人口と自動車台数を国毎の国土のメッシュ数で割り算し、世界の陸域全部のメッシュにメッシュ当たりの人口と自動車台数を割り当てる。割り当てに際しては先進国と発展途上国に場合分けしている。先進国とは1994年時点でのOECD各国(25カ国)とOECD以外のヨーロッパ(東欧を含む)各国、および旧ソ連である。発展途上国はこれら以外の国々をいう。そして人口と自動車台数が割り当てられたメッシュ図と、上記の沙漠から距離1,000km毎の分類のメッシュ図とを重ね合わせた。各1,000kmの分類毎に、先進国と発展途上国に分けて総人口と総自動車台数を集計した。

エネルギー消費水準を表わす指標としての自動車台数

を用いることの有意性を確認するために、資料の揃う世界117カ国について、一人当たり自動車台数と、一人当たり商業エネルギー消費量、一人当たり国土面積、および一人当たりGDPとの相関をそれぞれ調べている。

本研究におけるプロセスフローは図1に示すとおりである。データを統計解析し、画像処理した地理情報システムはIDRISIソフトウェア(EASTMAN, 1995)である。IDRISIソフトウェアはアメリカのクラーク大学において開発された、コンピュータによる地理的解析ツールである。

3. 結 果

1) 沙漠と世界の全陸域との位置関係

沙漠の縁からの距離を計算し、1,000km毎に陸域全体を分類したのが図2である。世界140.3億haの陸域に対して、沙漠はその16.5%の23.1億haである。沙漠の縁から1,000km未満、1,000km以上2,000km未満、2,000km以上3,000km未満、3,000km以上4,000km未満、4,000km以上の地域はそれぞれ、50.2億ha、35.4億ha、22.6億ha、6.1億ha、2.9億haである。図からエネルギー需要地の日本とヨーロッパは沙漠から2,000km離れていることがわかるが、特に日本は途中で深海をはさんでいる。沙漠の太陽エネルギー利用の観点から日本の特殊な地理的条件を考えると、深海敷設パイプラインがコスト的にもしくは技術的に進まない場合には、液体合成燃料のタンカー輸送の可能性が唯一残される。

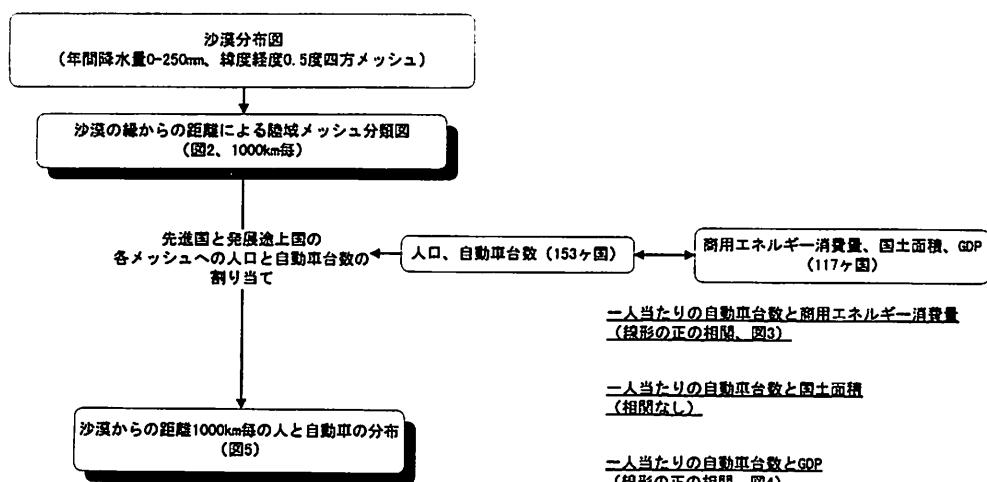


図1. 解析のプロセスフロー図。

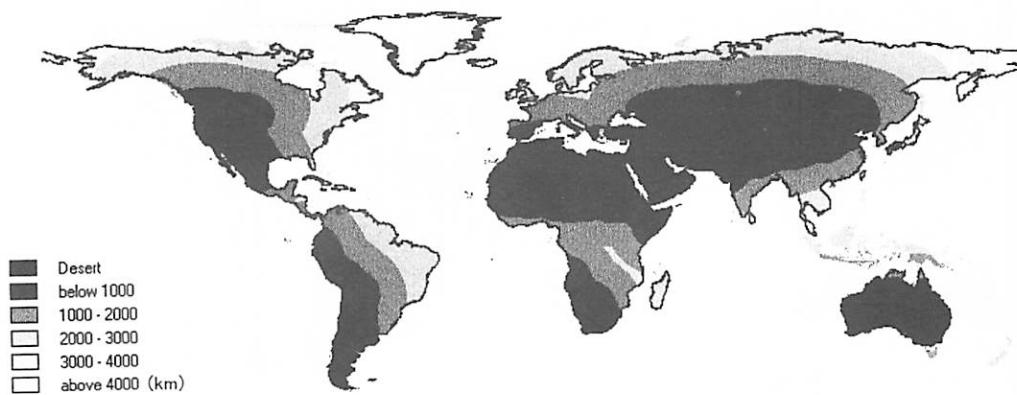


図2. 沙漠からの距離1,000km毎の陸域メッシュ分類図。

2) 自動車台数とエネルギー消費、国内総生産との関係

各国のエネルギー消費がどのようなレベルにあるのかを表わす指標として、本研究では自動車台数を用いてい。車の所有はエネルギー消費量に直結する。一人当たりの自動車台数と商用エネルギー消費量の相関を調べると、決定係数が0.6554の、正の線形相関関係が見られた(図3)。車の所有台数は生活全般におけるエネルギーの全消費量を反映しているといえる。図中で一人当たりの年間商用エネルギー消費量が0.546TJ(テラジュール)と突出する国は、アラブ首長国連邦で、産油国の特殊なエ

ネルギー消費の事情があるものと思われる。

車所有の背景には二つの意味が考えられる。交通輸送のため不可欠な手段として車が所有されるか、もしくは車が一種のステータスシンボルになっていて、豊かな生活の象徴として所有されるかである。一人当たり自動車台数と、国内移動距離を表わす一人当たり国土面積、および豊かさを表わす一人当たりGDPとの相関を調べた。前者は決定係数が0.0198になり相関関係は見られなかった。後者は決定係数が0.8786になり、線形の正の相関関係が見られた(図4)。これらのことから、車は移動輸

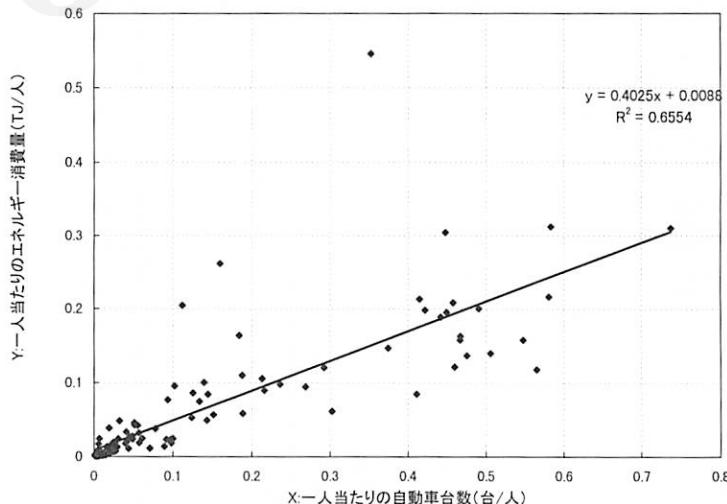


図3. 一人当たりの自動車台数と商用エネルギー消費量。(世界資源研究所ほか、1996より)

一人当たりのエネルギー消費量は、1993年の商用エネルギー総消費量(固体燃料、液体燃料、気体燃料、一次電力)を人口で割って得ている。1TJ=10¹² ジュール。

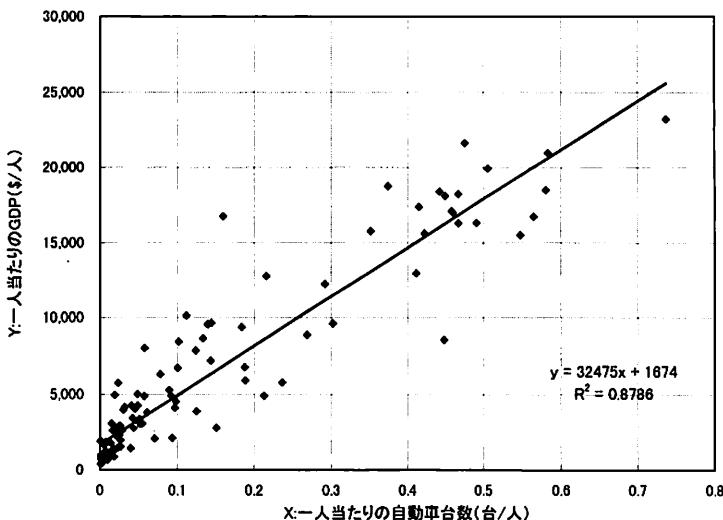


図4. 一人当たりの自動車台数とGDP. (世界資源研究所ほか、1996より)
GDPは1992年の購買力平価(PPP)によって算定される。単位は国際ドル(\$).

送手段として必要に迫られて所有されるというよりも、豊かな経済生活を反映して購買力があるから所有されるといえる。

3) 沙漠からの距離毎の人口と自動車台数の分布

世界153カ国の人口と自動車台数の両データを地表面上のメッシュに割り当て、沙漠から1,000kmの距離毎にそれらの総数を集計した。153カ国の人口は56億3,400万人で、6億2,100万台の自動車を保有する。(ただし、153カ国以外のデータ欠損国があるので、実際の世界全体の総計は両者ともに増える。「世界の資源と環境1996-97」によれば1995年の世界総人口は57億1,600万人である。) 人口一人当たりの車所有台数は0.11台である。先進国の人口は13億8,600万人(全体の24.6%)で、5億2,700万台の自動車(全体の84.9%)を所有する。一人当たりの車所有台数は0.38台である。一方発展途上国は42億4,800万人(全体の75.4%)で、9,400万台の自動車(全体の15.1%)を所有する。一人当たりの車所有台数は0.022台であり、先進国の約17分の1である。

先進国と発展途上国の、沙漠および沙漠の縁から1,000kmの距離毎の、面積、人口、自動車台数を図5に示す。先進国の人囗は沙漠から1,000km以上2,000km未満の距離の陸域に全体の37.8%が存し、そこを中心としてならかな山型の分布を示している。発展途上国の人団は沙漠および沙漠から1,000kmまでに、全体の半数を超える60.1%の25.5億人が住む。そして沙漠から離れるに従っ

てその人口は減少する。世界の総人口の分布は、発展途上国がその4分の3を占めることから、発展途上国型の沙漠寄りの分布になる。世界の自動車台数は、先進国と発展途上国の人団当たり車所有台数の違いを反映して、先進国の人団分布に似た、沙漠から1,000km以上2,000km未満の距離が中心のならかな山型の分布になる。

前節2)で示したように、経済力が増すにつれ自動車保有台数は増える傾向にある。今後、発展途上国で見込まれる生活水準の向上により、世界の自動車保有台数の分布グラフは世界人口の分布の形に似てくる可能性がある。つまり、沙漠から1,000km未満のところで自動車用液体燃料を含む商用エネルギー需要の急増が予想される。

4. 考 察

太陽電池等で獲得した沙漠の太陽エネルギーを需要地に輸送するには輸送手段の選択が行われる。現在の商業技術で300km送電が一般的である電力の直接輸送、天然ガスでは1,000kmの輸送実績があるものの電解水素では未知数のパイプライン輸送、および合成液体燃料に転換してのタンカー輸送等があげられる。エネルギーの輸送手段をパイplineに限定した場合には海路横断距離といった補正が必要になってくるが、今回は陸路と海路の区別は考慮せず単純に輸送距離を計算した。海路補正を考慮した距離の算出は今後の課題とする。

厳密には、乗用車とバスやトラックでは1台当たりの

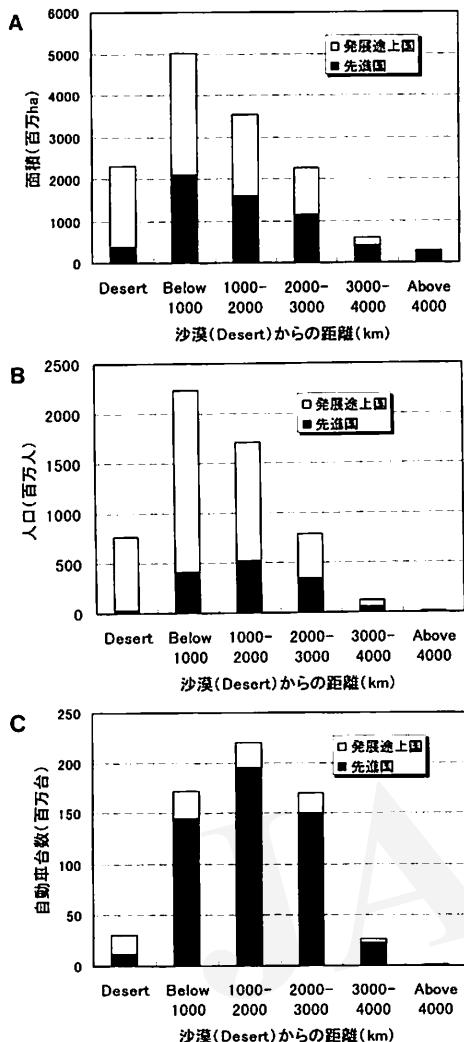


図5 A. 沙漠からの距離1,000km毎の陸地面積.
B. 沙漠からの距離1,000km毎の人口.
C. 沙漠からの距離1,000km毎の自動車台数.

エネルギー消費量が違うが、それぞれの総数を正確に区別した統計が世界各国で揃わなかったので、これらの総数を自動車台数とした。自動車台数と商用エネルギー総消費量の間には、正の線形相関関係があることが今回確かめられている。

人口および自動車台数のデータは、今回の計算にあたって国別の統計しか得られなかった、計算の前提として、世界各国の国土には均一に人口と自動車台数が分布するという条件を仮定している。つまり一つの国のそれぞれの総数を、その国土の総メッシュ数で割り、国内の全メッシュに同じ数値を割り当てている。例えば日本のように狭い国土の国では、国内の全メッシュに均一に同じ数

値を割り当てても計算結果の誤差は小さい。しかしながら、旧ソ連やカナダ、アメリカ合衆国のような広い国で同じような割り当てを行うと誤差が生じてくる。ただし国土の広い国の場合、州や郡、あるいはもっと小さい自治体単位の詳細なデータを投入しない限りは、その誤差の程度はわからない。また各メッシュの面積は緯度が大きくなるにつれ減少するので、南北に長い国ではメッシュ毎の面積の違いによる影響があるが、その影響は全メッシュに均一の割り当てを行うことによる誤差よりも小さい。

今回の計算では、沙漠からの距離1,000km毎でのおよその人口と自動車の配置の傾向を知ることに主眼を置いているので、国別統計を用いた結果でも十分に目的は達せられたと思われる。旧ソ連の15の共和国それぞれのデータが揃いつつあるので、今後の課題としてはそれらを用いることで人口と自動車の配置を調べた計算の精度が上がるところが期待できる。

5. 結 語

世界経済の持続的発展を前提としてエネルギー枯渇対策を考える時、各国の置かれている地理的条件や資源的条件は様々である。本研究では沙漠の太陽エネルギーを化石燃料代替の未来の新エネルギーと位置づけて、世界の人口と自動車台数の分布を、沙漠からの距離という観点で調べた。

自動車を所有する経済力豊かな先進国人口は沙漠の縁から1,000km未満の地域、沙漠から1,000km以上離れた地域、および沙漠から2,000km以上離れた地域にほぼ均等に分布する。エネルギー需要の大きい日本は、深海をはさんで沙漠と2,000km以上離れている。沙漠で獲得した太陽エネルギーを液体合成燃料に転換してタンカー輸送することが一つの有力な選択肢になる。

発展途上国は沙漠および沙漠から1,000km未満の地域に全体の約60%の25.5億人が住んでいる。発展途上国全体の一人当たりの自動車保有台数は0.022台であり、先進国はその経済力を反映し、一人当たりの自動車保有台数は発展途上国の約17倍の0.38台である。今後発展途上国の経済発展による生活レベルの向上が、沙漠近傍において自動車用燃料を含むエネルギー需要の急増をもたらすかもしれない。

石油や天然ガスの枯渇は来世紀中には訪れる。沙漠の豊富な太陽エネルギーを利用しやすい形の燃料で沙漠近傍の発展途上国に供給できれば、エネルギー危機のいくらかは緩和される。本研究で得られた世界人口と自動車

台数の分布に関する知見は、21世紀の沙漠の太陽エネルギー利用とエネルギー輸送技術の開発を考える上で基礎情報になると考えられる。

謝 辞

地理情報システムのIDRISIについて多くの情報を提供して頂いたパシフィックコンサルタンツ株式会社の原雄一氏にここに記して深謝いたします。

引用文献

- 国際連合編（1996）：「1993国際連合世界統計年鑑」原書房。
西上泰子（1997）：沙漠開発の視点からみた世界の沙漠面積。
「沙漠研究」7: 47-52.
西山 孝（1998）：長期的視点からの資源問題の行方。「エネルギー・資源」19-1: 23-28.
佐野 寛（1995）：CO₂リサイクルシステムと地球エネルギー資源活用設計。「化学工学会第28回秋季大会研究発表要旨集」S118.
世界資源研究所ほか編（1996）：「世界の資源と環境1996-97」中央法規。
矢野恒太記念会編（1996）：「'96/'97世界国勢図会」国勢社。
依田 直（1993）：『トリアンマへの挑戦』毎日新聞社。
EASTMAN, J.R. (1995) : *IDRISI for Windows User's Guide*. Clark University.

Distribution of World Population and Cars from the Viewpoint of Desert Development

Yasuko NISHIGAMI*

Utilizing much solar energy in the deserts could be one alternative option for the fossil fuels depletion issue in the next century. The long distant transportation cost of the electricity is extremely high. Electricity acquired by photovoltaic power plants in the deserts must be converted to other energy and transported to the world energy demand sites through the various methods such as pipeline transportation of hydrogen and tanker transportation of liquid synthesized fuel. Human beings consume much energy and car is much related with total energy consumption and individual wealth. The aim of this paper is to clear the circumstance and the trend of world wide energy demand in order to consider the suitable energy transportation system. World land area, population and the number of cars were calculated in every 1,000km distance from each world desert. The contribution of developing countries to each value was also elucidated. Japan is an island country located 2,000km far from any world deserts. Tanker transportation system might be suitable for Japan while the energy efficiency is low. About 60% of developing countries, 2.55 billion people live in deserts and within 1,000km distance from deserts. In developed countries people live almost uniformly in every 1000km distance from deserts. Car number per capita is 0.022 in developing countries and 0.38 in developed countries. A future economic and industrial development in the developing countries might cause the increase of energy demand near deserts. Supply of solar energy in deserts to the surrounding developing countries might mitigate the future world energy crisis. The world wide distribution of population and cars from the view point of the distance from deserts in this study will give much important information for a future utilization of solar energy in deserts.

Key Words: Deserts, World population, Cars, Solar energy

* Laboratory Office of Global Energy System. 5-8-2-106 Makiochi, Minoo-shi, Osaka 562-0004, Japan.

(Received, October 6, 1997; Accepted, October 6, 1998)

Possibility of Agricultural Expansion in Egypt in View of the Available Water Resources

Tarek H.S. KOTB*, Tsugihiro WATANABE*,
Yoshihiko OGINO* and Takao NAKAGIRI*

This paper aims at examining the possibility of the new agricultural expansion policy in Egypt in view of the available water resources. In this regard, a different approach from that adopted officially is developed and applied. It merely considers the non-recoverable consumption by plant and other users, unavoidable losses due to evaporation from free water surface, and the drainage requirement into the Mediterranean Sea and Terminal Lakes to keep the salt balance in the Northern Delta and control seawater intrusion.

In the beginning, the objectives of the new agricultural expansion policy in Egypt are introduced likewise the interrelated governmental measures.

Firstly, the authors argue the attainability of the governmental measures providing evidences in support of their opinion. Secondly, they apply the approach of the non-recoverable consumption and unavoidable losses, and develop their own assumptions and calculation procedures to examine the possibility of meeting the objectives of the new agricultural expansion policy.

The non-recoverable consumption by crops in old lands after replacing rice by less water consumer crop like maize in 50 percent of its growing areas is estimated as 36.348×10^9 (BCM); consumptive use by crops in the newly reclaimed areas at the fringes of the Nile Valley and Delta, and in the Sinai Peninsula is 4.586 BCM; consumptive use by crops in the New Valley Project is 2.838 BCM; and the non-recoverable consumption by domestic sector is 3.100 BCM. The industrial sector has ineffective contribution to the non-recoverable consumption because the vast amount of supply returns to the water resources system to be recycled. The evaporation losses from free water surface of the irrigation and drainage networks were estimated in previous research as 2.000 BCM. On the supply side, Egypt's share from the River Nile is assumed to remain fixed as 55.500 BCM. Therefore, in the newly developed water budget, an amount of 6.628 BCM will be available to dispose into the Mediterranean Sea and Terminal Lakes (difference in balance between supply, and consumption and losses). Corresponding values were also computed following two different assumptions as 5.506 and 6.300 BCM. Both assumptions aim at recycling all drainage waters that fall in a salinity category less than $2,000 \text{ mgL}^{-1}$.

Finally, the study concludes that the objectives of the new agricultural expansion in Egypt are attainable, however, the authors recommend some measures that they believe of their convenience if the whole irrigated agriculture system is to be developed and sustain.

Key Words: Egypt, New agricultural expansion policy, Water resources, Non-recoverable consumption, Unavoidable losses

* Laboratory of Irrigation and Environmental Engineering, Faculty of Agriculture, Osaka Prefecture University.
1-1, Gakuencho, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan.

1. Introduction

Egypt enters the twenty-first century with an ambitious policy regarding water resources management and agricultural expansion. The per capita share of agricultural land is about 0.05 ha. The figure is very low compared with its corresponding values in the United States (5.88 ha) and Europe (1.26-1.68 ha) (MPWWR, 1997). On the other side, the population continues increasing rapidly with an annual rate of 2.1 percent (1.2×10^6 capita per year).

The water resources are limited, while increasing supply is very much doubted on the mean time, since the unstable political situation in South Sudan restricts the completion of the Upper Nile Development Projects that can yield additional quantities to Egypt's share from the River Nile. The vast population is concentrated in the Nile Valley and Delta likewise all agricultural activities. Moreover, considerable portions of the agricultural soils, especially near the Mediterranean Sea coast, are salinized or threaten by salinization; about 33 percent of the agricultural lands are salt-affected (GASSEMI *et al.*, 1995).

After the completion of the Aswan High Dam in 1970, the Government started to reclaim new agricultural lands adjacent to the old lands in the Nile Valley and Delta. This reclamation pattern was defined as the '*creeping land reclamation pattern*' since it was only developing newly agricultural areas at the fringes of the Nile Valley and Delta. As a consequence, the cultivated area became confined to these spots, leaving more than 96 percent of the country's territory deserted. Apart from Cairo (15×10^6 capita), the remaining population is concentrated in the rural societies and even the metropolitan areas were established and developed within the relatively narrow valley and delta. This pattern was, however, very feasible from the economic and water saving viewpoints. The construction costs were less than those estimated for remote areas. The water conveyance losses were reduced, and the expansion was conducted in the form of extending already existing canals, or constructing some branches in the reclaimed areas. The immigration to the newly established communities was very smooth, since they are an extension of old societies.

In 1996, the Government has adopted a new reclamation pattern, which aims at adding more agricultural lands in the remote areas in the Sinai Peninsula and the Southwestern Desert. Such pattern is called the '*frog land reclamation pattern*' for leapfrogging outside the Nile Valley and Delta to establish new communities in relatively remote areas based on irrigated agricultural practice. The strategic purpose of this pattern is to redistribute the population in newly formed communities. Agriculture is indeed envisaged as the basic attractive activity that can be complemented with others such as mining, industry and trade with neighboring countries. Currently, two gigantic projects are under-construction: El-Salam Canal (at the east of the Nile Delta and in the Sinai Peninsula) and the New Valley Canal (in the Southwestern Desert near Lake Nasser).

The main objective of this paper is to examine the possibility of attaining the new policy towards agricultural land expansion in Egypt in view of the available water resources. In the beginning, we present the objectives of the new policy and the interrelated governmental measures. Then, we argue the viability of the governmental measures providing the necessary evidences. Finally, but increasingly important, we apply different approach from that adopted by official authorities in examining the possibility of attaining the objectives of the new policy. In this approach, we only consider the non-recoverable consumption and unavoidable losses in balancing supply and demand, developing our own assumptions and calculation procedures. We end with some recommendations that we believe of their high consideration if the new policy is to be carried out successfully.

Again, it is necessary to emphasize that the argument regarding the declared governmental measures and the results of examining the possibility of attaining the new agricultural policy included in this paper are entirely based on the authors view and assumptions. It is a trial, but considerably reliable, to visualize the future situation in Egypt as well as estimating the exact water consumption by agricultural command in old lands, reclaimed commands in the newly expansion projects, and municipal and industrial sectors. Further, we try to answer the question of how much water must be disposed into the

Mediterranean Sea and Terminal Lakes to keep the salt balance in the Northern Delta and prevent seawater intrusion.

2. Agrarian Environment in Egypt

1) Geography and climate

Egypt is located in the northeastern part of Africa with the Sinai Peninsula at the southwest of Asia (Fig. 1). The country has an area of 10^6 km 2 . The total cultivated area is 3.276 Mha (MPWWR, 1997). The population is 60×10^6 capita. More than 96 percent of Egypt's territory is uninhabited desert. The River Nile is the only considerable source of water. Egypt is the downstream country amongst ten beneficiary nations from the Nile's water. The Nile enters Egypt from the south at Sudan and flows northward for about 1,545 km (including the length of both branches). The two Nile Branches, Damietta and Rosetta, fan out

nearby Cairo and flow towards the Mediterranean Sea to form the Nile Delta. The Nile Valley and Delta possess very fertile soils formed by deposits carried down by the Nile, especially, during flood time.

The climate is categorised as arid at the north and extremely arid at the south. The summer season is completely dry with highly recorded temperatures: 30.6°C at Alexandria; 34.4°C at Giza, to the south of Cairo; and 42°C at Aswan (ABOUKHALED *et al.*, 1975). In Cairo, the temperature reaches a range from 38–43°C (GHASSEMI *et al.*, 1995). The most humid area is along the Mediterranean Sea coast wherein the annual precipitation rate was recorded as 191 mm. It dropped drastically southward to record 20 mm at Giza, and 1.4 mm at Aswan. As a conclusion, precipitation can not be a countable source of water. Egypt is very unique all over the world for developing a 100 percent irrigated agriculture system.

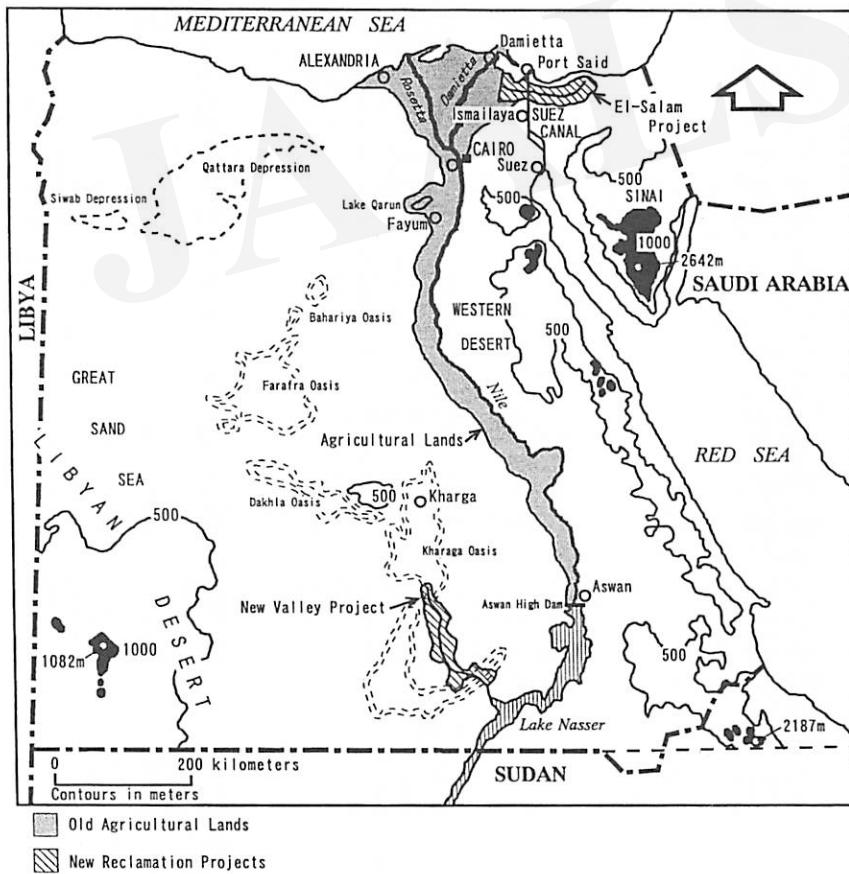


Fig. 1. Map of Egypt.

2) Water resources

Egypt depends entirely upon the River Nile's water. The annual share has been determined as $55.500 \times 10^9 \text{ m}^3$ (55.500 BCM) according to the articles of the agreement of full utilisation of the Nile's water, which was covenanted between Egypt and Sudan in 1959. Other resources such as ground and drainage waters are nothing but recycling sources. The exception is given to the nonrenewable groundwater aquifers in the Western Desert and the Sinai Peninsula. In 1990, the contribution of these aquifers to the water budget was insignificant (about 0.500 BCM). In the Western Desert, the aquifer resources and sustainability are uncertain, notwithstanding, there is a contention on its hugeness and suitability for all purposes. Further, its water is easily obtainable in several locations. The aquifer age lies in the range from 20,000 to 30,000 years. The recharge rate per year can be 0.008 BCM from the south and 0.040 BCM from the west (Libyan Desert). The total storage was estimated as 200.000 BCM. The capacity of the aquifer allows safe exploitation of an additional 1.460 BCM (MPWWR, 1997). The total water mining including the shallow and deep aquifers in the Sinai Peninsula can account for 2.500 BCM according to the Government's plans.

The River Nile, canals network, and drains recharge the groundwater reservoirs in the Nile Valley and Delta. The present annual pumping is totaling 2.600 BCM (ATTIA and TUINHOF, 1989). The targeted value by the year 2000 is 4.900 BCM.

Recycling drainage water is a very important source. In Upper Egypt, most drains return their flow to the Nile. This amount has been roughly estimated on yearly basis as 2.3 BCM; however, it

is unconsidered in the national water balance. Furthermore, and on field level, farmers illegally reuse other unconsidered quantities that may total 1.5 BCM per year. Officially, the recycled drainage flow was measured as 4.126 BCM in the Nile Delta at designated mixing stations (DRI, 1993). This figure is planned to increase to 7.000 BCM by the years to come.

The Government also gives a recent interest in treating municipal effluent for agricultural purposes. The current quantity is insignificant, but it is targeted to account for 1.1 BCM.

Briefly, the opportunity for increasing supply is through intensifying water recycling and mining the nonrenewable ground reservoirs. The current and targeted supply can be summarized as in Table 1. The increase in budget excludes the treated sewage water providing that this kind of source has its own special use as well as location outside the focused expansion areas. The table shows that the increase in supply can be as 7.174 BCM.

3. New Agricultural Expansion Policy

1) Objectives

In order to extend the cultivated areas in Egypt, the Government has launched an ambitious program for land reclamation. The program managed to increase the agricultural lands to 3.276 Mha according to the latest survey (MPWWR, 1997). The 1982 inventory was as 2.827 Mha. The program is still aiming at adding 0.588 Mha at the fringes of the Nile Delta and Valley by the year 2000 (the locations of the new land reclamation projects are shown in Fig. 1). The major component of this program is El-Salam Canal, which will

Table 1. Current and targeted supply from the different water resources in Egypt according to the government's plan.

No.	Source	Current supply	Targeted supply	Increase	Unit: BCM
1	River Nile	55.500	55.500	0.000	
2	Rechargeable groundwater in the Nile Valley and Delta	2.600	4.900	2.300	
3	Reuse of drainage water	4.126	7.000	2.874	
4	Fossil groundwater in the Western Desert and Sinai Peninsula	0.500	2.500	2.000	
	Total	62.726	69.900	7.174	

Sources: MPWWR (1997), ATTIA and TUINHOF (1989), DRI (1993).

supply water to 0.260 Mha: 0.092 Mha at the east of the Nile Delta and 0.168 Mha in the Sinai Peninsula. The cost of the project was estimated as about 4.4 billion Egyptian Pounds (LE) (US \$ 1.29 billion). Although the project has been included in the former policy, yet it has not been accomplished and obviously categorized as a '*frog land reclamation pattern*' according to the framework of the new agricultural expansion policy.

In the New Valley Project, a large canal will be fed directly from Lake Nasser upstream the AHD to reclaim an area of 0.149 Mha. In addition, an area of 0.061 Mha will be irrigated from the groundwater aquifer. The project command is 0.21 Mha with a total cost of LE 5.5 billion (US \$ 1.62 billion). The two projects are prominent examples of the new reclamation attitude (*frog land reclamation pattern*).

The selected area for the New Valley Project has been proposed since the early 1970s. Historically, this area had some agricultural activities and the production was used for export to surrounding regions. The main source of water was the ground aquifer. The current irrigated land is 0.029 Mha. An additional 0.061 Mha can be irrigated within the safe yield limit of the ground reservoir (MPWWR, 1997). This sums up the total benefited area on the groundwater aquifer to 0.090 Mha.

2) Water requirements

The MPWWR obliges farmers to apply micro irrigation techniques in the newly reclaimed lands (micro sprinkler, drip irrigation and advanced surface irrigation with high efficiency and minimal losses). The annual water duty for one reclaimed hectare was decided as $12,143 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ including overall losses. This figure is concluded from the

calculation procedures applied for estimating the agricultural expansion requirements when 5,100 m^3 was annually determined for every reclaimed feddan (1 feddan is equivalent to 0.42 ha) (MPWWR, 1994). The water requirements for the newly reclaimed areas at the fringes of the Nile Delta and the Sinai Peninsula can therefore be estimated as 7.140 BCM, as included in Table 2. In principal, the newly reclaimed areas are designed to obtain 50 percent of their water shares from recycled agricultural drainage. This implies that 3.570 BCM must be supplied from the Nile's water.

In the New Valley Project, the proposed irrigation system is a mix of surface and micro-irrigation. A cropping pattern was primarily suggested to suite the special agro-environment in the project region. It is also targeted to provide raw materials to the intended industrial and exporting activities. The suggested crops are palm, medical plants, winter vegetables, oil crops, sugar beat and potatoes.

The applied water duty at present is about $28,570 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$, while the crop reference evapotranspiration is estimated as from 19,050 to $21,430 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ (MPWWR, 1997). The comparison may conclude low application efficiency. We can also conclude that the area has an extremely arid climate. The evaporation rate is 12–26 mm per day during summer and 5–21 mm per day in winter (MPWWR, 1997). The MPWWR considers improving the current overall efficiency, at least for design purpose, to become as high as 90 percent. Thus, when using a crop reference evapotranspiration equal to $21,430 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$, the bulk duty will be as high as $23,810 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ including all losses. The water requirement for the benefited area from the Nile's water in the New Valley Project is therefore

Table 2. Water requirements for agricultural expansion according to the MPWWR assumptions.

No.	Project	Area (Mha)	Bulk water duty ($\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$)	Total consumptive use (BCM)
1	New reclaimed areas at the fringes of the Nile Valley and Delta, and the Sinai Peninsula	0.588	12,143	7.140
2	Irrigated lands with the Nile's water in the New Valley at the southwestern part of Egypt	0.149	23,810	3.548
3	Irrigated lands with the groundwater in the New Valley at the southwestern part of Egypt	0.061	23,810	
	Total	0.798		12.140

3.548 BCM, and the requirement from the groundwater aquifer is 1.452 BCM, as shown in Table 2.

The total water requirements for the new expansion projects can be estimated as 12.140 BCM. The planned sources are: 7.118 BCM from the Nile's water (3.570 BCM for the lands at the fringes of the Nile Valley and Delta, and the Sinai Peninsula, and 3.548 for the New Valley Project); 3.570 BCM from recycling drainage flow; and 1.452 BCM from the nonrenewable groundwater aquifer in the Western Desert.

3) Governmental measures

The future balance shows a deficit between supply and demand. The opportunities for increasing resources can supply additional 7.174 BCM, while the demand is 12.140 BCM. The deficit is thus 4.966 BCM.

However, the future policy regarding water resources utilization has been recently reformed. The reliance on increasing resources through the Upper Nile Projects, especially Jounqli Canal, has considerably waned because of the unpredictable end of the civil war in South Sudan. The recent scenario considers that the share from the River Nile remains fixed at 55.5 BCM.

The latest declared measures by the government to save water for the newly reclaimed lands are through two managerial actions. The first is reducing the area cultivated with rice gradually from 0.588 Mha, at present, to 0.294 Mha, to result in 50 percent decrease (MPWWR, 1997). Rice will be replaced by less water consumer crop, for example maize, to save about $14,523 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ providing that the MPWWR currently supplies $20,952 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ for rice corresponding to $6,429 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ for maize (KOTB, 1992). The annual saved water can be consequently 4.27 BCM ($294,000 \text{ ha} \times 14,523 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{y}^{-1} \times 10^{-9}$).

The second action is the generalization of the Irrigation Improvement Projects (IIP), which are funded by several international donors and aim at using water optimally on field level to increase agricultural productivity. The IIP adopt an interdisciplinary approach in dealing with both physical and institutional issues. For improving the system physically, an intensive rehabilitation or replacement of inefficient components is carried out. The physical improvement activities include: control structures, canal section reshaping or

realignment, canal lining, crossing works and land leveling using laser beam. On the institutional improvement level, an irrigation advisory unit was established to provide farmers with irrigation extension services. The most important institutional reform is involving farmers in operation and maintenance through organizing them in non-governmental and self-dependent water users associations (NASHED, 1997). Field facilities are constructed within the framework of a flexible cost recovery program and farmers are encouraged to participate effectively by the improved outputs in the projects pilot areas. By the advent of the year 2007, the planners expect a save of 1.5 BCM from the projects (MPWWR, 1997).

The MPWWR hopes to succeed in carrying out these two actions, which may enable for a total save of 5.77 BCM per year. The deficit in balance can therefore be overcome, and the supply side exceeds the demand side by 0.804 BCM.

4. Viability of the Governmental Measures

In this section we argue the possibility of carrying out the two governmental measures regarding the cut in rice growing areas and the saved water due to the generalisation of the IIP. Although we only express our opinion that is supported with evidences, we use, on the other hand, another evaluation approach to prove that the objectives of the new policy can be attainable, as will be concluded finally. However, a group of recommendations are to be considered and implemented rigidly.

Basically, the water resources system in Egypt is very tightly controlled. Resources are interrelated to each other in a sense that making the overall system efficiency very high. KOTB (1992) estimates the overall system efficiency as the ratio between the actual consumed water by different sectors including evaporation losses from free water surface to the input from the River Nile as 77 percent for the hydrological year 1989/90. Practically, water, which is lost from one source, is captured by another and reused for the same or even different purpose. The municipal and industrial effluent normally flows to drainage channels. The drainage flow is intensively recycled either on official or unofficial basis. Therefore, consideration of losses within every sector is not feasible when

the system resources are planned globally. The sectors' distribution and utilization efficiencies, which are to be improved individually, are mainly subjective to the management and operation within every sector. For effective evaluation, it is convenient to skip the matter of efficiency and only focus on the non-recoverable consumption and unavoidable losses, as will be introduced in the following section. Prior to such evaluation, let us discuss further the attainability of the declared governmental measures.

1) Replacement of rice in 50 percent of its growing areas

Typically, rice cultivation is intensified in the northern part of the Nile Delta and some regions in the middle, while it is prohibited in other regions (South Delta, and Middle and Upper Egypt). Violating law in this regard is heavily penalized financially. The rice intensity during summer season is usually 50 percent in the northern strip near the Mediterranean Sea coast and decreases gradually southward till reaching about 10 percent near the southern part of the Nile Delta (EL-QUOSY, 1994). The three main folds for growing rice are: its importance as staple food; remedial practice for the prevailing salinized soils; and preventative action against seawater intrusion.

EL-QUOSY and RISSEEUW (1987) support rice cultivation as a counter measure against salinized soil in the Nile Delta. Rice is also tolerant to the supplied low quality water as its growing regions are considered the downstream ends of the system. Moreover, the net benefit from growing rice is the highest among other summer crops: rice yields net benefit of LE 2,158 (US \$ 635); cotton LE 1,455 (US \$ 428); and maize LE 993 (US \$ 292) (MALR, 1994).

Although the reduction of rice areas will save a considerable quantity of water, it will, on the other side, affect soil salinization adversely if it is conducted in unsuitable regions. The tolerance of proposed crops for replacement in this case would be suspected. Another economic issue is that the self-sufficiency ability in 1990 was reported as: 114 percent for rice; 28 for wheat; 78 for maize; and 63 for sugar (GOUELI and EL-MINIAWI, 1993). The cut in rice growing areas by 50 percent may bring the self-sufficiency ability of rice to 64 percent. This means that the country will have to import rice to

fulfill the requirements of local market instead of exporting it at present. Hopefully, part of the income from the newly reclaimed areas will be allocated to compensate for importing demands.

However, if the attitude is to be implemented to save water in first place, it must limit the rice growing areas to the heavily salinized soils in the northern part of the Nile Delta. Law must be reformulated and strictly enforced in this regard. This matter is very doubtful since it deeply involves some socio-economic issues as well as complicated political constraints in the rural societies. For instance, farmers who will be deprived of growing rice must obtain financial subsidy to overcome their loss since rice is one of the most profitable summer crops. Within this context, a complete reform of the agronomic system must be discussed in which this issue is tackled sensibly. The other critical problem is related to the financial penalty for violating law and growing rice in restricted areas. Although the penalty is deterrent, the parliament representatives in the penalized regions always succeed to terminate the encroachments after influential mediation.

The attitude could therefore be beneficial with respect to water saving, however, the consequences and implementation procedures must be studied and formularized carefully.

2) Saved water due to the generalization of the IIP

The second issue concerns with the output from the IIP. Till the moment, the projects are successfully implemented in some pilot areas: not more than 5 percent of the total agricultural lands nationwide. The output is encouraging for further implementation and generalization is targeted in the years to come. The projects are mainly funded by international donors with high support and interest from the National Government. However, the output analysis in some pilot areas does not show a concrete evidence for water savings. Nonetheless, it shows very promising results in other respects.

OAD (1994) introduced some outputs from the IIP when he compared between the situations before and after project. He reported that the cost of irrigation paid by farmers was reduced by 33 to 57 percent. The labor saving or time spent on

irrigation management was also impressively reduced by a ratio from 16 to 45 percent. The reduction of system maintenance at tertiary level has incredibly decreased by at least 80 percent. Farmers in a selected pilot area, Herz-Numania in Middle Egypt, reported an increase of 6 to 20 percent in crop yield. The increase was reported immediately after the project completion, which expectedly indicates higher potential during the following few years after farmers become accustomed to the new field management aspects. Land was also saved where new conduits replaced old open canals, for instance, 25 to 50 percent saving in raised channels areas and 100 percent saving in pipelines areas.

The conclusion regarding water saving is that; conveyance, distribution and field application losses can be dramatically reduced. However, the projects were oriented primarily to increase productivity, assuming that the current practice does not allow for effective use of water. Thus, the allocated water remains the same in quantity, probably in better quality, but it would be distributed and utilized in more effective manners to increase average productivity over the project command. Furthermore, and as explained above, the system is tightly connected. In other words, if the water is dispelled somewhere, it is captured through other resources, *i.e.*, drainage system or groundwater aquifer, and reused in successive region.

The other alternative is to keep the current productivity level at the expense of using the saved water in reclaiming new areas. Nevertheless, the concept needs further study because, and again, the system losses are minimal on global level. The overall potential saving is yet doubtful.

We also have to keep in mind that the MPWWR gives the IIP sites the priority over other areas with respect to sufficient water supply as well as qualified staff on micro level. The case is very typical as that for any pilot project and indeed the generalization in an efficient manner as in the pilot areas will add more financial and administrative burdens to those of the MPWWR, at least during the initiation stage.

5. New Water Budget According to the Approach of the Non-Recoverable Consumption and Unavoidable Losses

The introduced evaluation approach in this paper is rather different from that conducted by official authorities. It focuses on the non-recoverable consumption and unavoidable losses in balancing supply and demand. In order to examine the possibility of achieving the new policy in view of the available water resources, the following assumptions and calculation procedures are applied.

1) Estimation of the crop consumptive use in old lands

The crop consumptive use is estimated using the national cropping pattern of the year 1993 collected from the MPWWR records and shown in Table 3, and the regional crop water duties developed by the Master Plan for Water Resources Development and Use in 1980 (MALR, 1980) and upgraded by the Water Management and Irrigation Systems Research Institute in 1989 (Table 4). Normally, the annual cropping pattern in Egypt is not significantly changeable and therefore the total crop consumptive use can lie in the vicinity of an average number. The applied crop water duties were validated scientifically and experimentally (MOTT MACDONALD CONSULTING ENGINEERS LIMITED, 1990).

The areas occupied with rice were 448,112 ha in total during 1993. This value was reported officially, nevertheless, the actual situation included many violations, some were reported, while others were only recognized through production and water consumption. The actual value declared officially to be reduced by 50 percent was previously introduced in chapter 3 (the intended reduction is from 0.588 to 0.294 Mha). Assuming the correctness of the reported value, the crop consumptive use on national level can be estimated as 37.177 BCM (Table 5). The values in Table 5 were obtained simply using the following two equations:

$$U_{cr} = A_{cr} \times D_{cr} \times 10^{-9} \quad (1)$$

Where U_{cr} is the consumptive use in BCM by crop (c) in a region (r) (Egypt is divided climatologically into three regions as follows:

Table 3. Cropping pattern in Egypt on regional level during 1993.

Unit: ha

Crop	Upper Egypt	Middle Egypt	Lower Egypt (Nile Delta)	Total
Wheat	160,622	148,944	481,102	790,668
Beans	39,986	62,517	68,833	171,336
Barely	6,282	4,573	44,103	54,959
Fenugreek	400	2,186	487	3,074
Lupins	699	696	1,084	2,479
Chickpeas	2,459	0	664	3,123
Lentils	5,203	173	899	6,276
Clover (temporary crop)	23,738	27,300	354,001	405,039
Clover (full season crop)	56,524	148,544	530,190	735,257
Flax	0	336	23,461	23,797
Winter onion	4,615	3,884	5,623	14,122
Winter garlic	881	5,720	2,972	9,573
Winter vegetables	29,531	90,768	242,822	363,121
Winter potatoes	0	0	0	0
Sugar beat	0	0	0	0
Cotton	41,013	80,227	373,317	494,556
Rice	0	7,348	440,764	448,112
Summer maize	111,930	159,483	541,687	813,099
Summer sorghum	109,614	20,037	0	129,651
Soya beans	6,701	27,257	26,854	60,812
Sugar cane	112,708	17,281	6,012	136,001
Sesame	19,325	1,443	2,419	23,187
Groundnut	1,410	2,626	9,791	13,828
Summer onion	0	4,023	1,110	5,133
Summer vegetables	33,287	110,416	283,766	427,469
Summer potatoes	0	0	0	0
Summer darawa	0	0	13,440	13,440
*Nili maize	2,312	81,128	8,287	91,727
*Nili sorghum	0	3,657	0	3,657
*Nili vegetables	3,023	53,442	48,429	104,895
Gardens	21,314	45,072	216,105	282,491
Sprinkler	0	0	104,000	104,000
Surface	0	0	69,446	69,446
Total	793,578	1,109,084	3,901,667	5,804,329

Source: Irrigation Sector of the MPWWR (1993).

*Nili is a marginal season that is named after the Nile flood and lasts from August to October.

Table 4. Crop water duties on regional level in Egypt.

Unit: $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$

Season	Crop	Upper Egypt	Middle Egypt	Lower Egypt (Nile Delta)
Winter crops	Wheat	5,227	4,754	3,830
	Beans	4,350	3,734	3,050
	Barely	5,129	4,286	3,352
	Fenugreek	2,957	2,571	2,381
	Lupins	2,957	2,571	2,333
	Chickpeas	3,026	2,631	2,410
	Lentils	3,850	3,580	3,180
	Clover (temporary crop)	2,830	2,600	2,090
	Clover (full season crop)	7,430	6,768	5,701
	Flax	3,690	3,624	3,350
	Winter onion	4,100	4,100	3,880
	Winter garlic	3,200	3,830	3,240
	Winter vegetables	3,830	3,830	3,240
	Winter potatoes	3,830	3,830	3,240
Summer crops	Sugar beat	0	0	7,214
	Cotton	9,241	8,432	6,710
	Rice	12,845	11,170	11,170
	Summer maize	6,680	6,220	5,786
	Summer sorghum	6,550	6,060	5,567
	Soya beans	7,084	6,160	4,810
	Sugar cane	21,690	17,066	11,905
	Sesame	6,174	5,369	4,875
	Groundnut	10,076	8,762	7,998
	Summer onioin	6,429	5,238	4,536
	Summer vegetables	5,580	5,580	4,560
	Summer potatoes	5,580	5,580	4,560
	Summer darawa	0	0	5,071
Nili crops	Nili maize	7,857	5,500	5,360
	Nili sorghum	7,381	5,373	5,187
	Nili vegetables	11,905	3,820	3,670
	Gardens	12,900	9,860	9,559
Micro irrigation	Sprinkler	0	0	12,712
	Surface	0	0	17,942

Source: WATER MANAGEMENT AND IRRIGATION SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (1989).

Table 5. Crop consumptive use on regional level and total nationwide.

Crop	Upper Egypt	Middle Egypt	Lower Egypt (Nile Delta)	Unit: BCM Total
Wheat	0.840	0.708	1.843	3.390
Beans	0.174	0.233	0.210	0.617
Barely	0.032	0.020	0.148	0.200
Fenugreek	0.001	0.006	0.001	0.008
Lupins	0.002	0.002	0.003	0.006
Chickpeas	0.007	0.000	0.002	0.009
Lentils	0.020	0.001	0.003	0.024
Clover (temporary crop)	0.067	0.071	0.740	0.878
Clover (full season crop)	0.420	1.005	3.023	4.448
Flax	0.000	0.001	0.079	0.080
Winter onion	0.019	0.016	0.022	0.057
Winter garlic	0.003	0.022	0.010	0.034
Winter vegetables	0.113	0.348	0.787	1.247
Winter potatoes	0.000	0.000	0.000	0.000
Sugar beat	0.000	0.000	0.000	0.000
Cotton	0.379	0.676	2.505	3.560
Rice	0.000	0.082	4.923	5.005
Summer maize	0.748	0.992	3.134	4.874
Summer sorghum	0.718	0.121	0.000	0.839
Soya beans	0.047	0.168	0.129	0.345
Sugar cane	2.445	0.295	0.072	2.811
Sesame	0.119	0.008	0.012	0.139
Groundnut	0.014	0.023	0.078	0.116
Summer onion	0.000	0.021	0.005	0.026
Summer vegetables	0.186	0.616	1.294	2.096
Summer potatoes	0.000	0.000	0.000	0.000
Summer darawa	0.000	0.000	0.068	0.068
Nili maize	0.018	0.446	0.044	0.509
Nili sorghum	0.000	0.020	0.000	0.020
Nili vegetables	0.036	0.204	0.178	0.418
Gardens	0.275	0.444	2.066	2.785
Sprinkler	0.000	0.000	1.322	1.322
Surface	0.000	0.000	1.246	1.246
Total	6.684	6.549	23.945	37.177

Upper, Middle and Lower Egypt); A_{cr} is the area in ha occupied by crop (c) in a region (r); and D_{cr} is the crop duty in $m^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ for a crop (c) in a region (r) as included in Table 4.

Then the total consumptive use for all crops in all regions is summed up using the following equation:

$$U = \sum_{c=1}^n \sum_{r=1}^m U_{cr} \quad (2)$$

Where U is the total consumptive use by all grown crops in Egypt in BCM; n is the total number of crops; and m is the total number of regions ($m=3$).

This value can be standardized since most estimated values by different planners rotate around this figure.

In our evaluation, we use the same assumption of the MPWWR regarding reducing the rice growing areas gradually to 0.294 Mha and replacing rice by maize in the saved areas (the reduced area in our estimation is from 0.448 to 0.294, resulting in 0.154 Mha). The crop consumptive uses of rice and maize in the Nile Delta are 11,170 and 5,786 $m^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ respectively as given in Table 4. The saved water annually per ha can be as 5,384 m³. The total annual saving resulted from such attitude is 0.829 BCM ($154,000 \text{ ha} \times 5,384 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1} \times 10^{-9}$). This can bring the total crop consumptive use down to 36.348 BCM.

2) Estimation of the crop consumptive use in new lands

Assuming two growing seasons in the newly reclaimed areas in Lower Egypt, in which winter and summer vegetables are grown, the crop water duty can therefore be 7,800 $m^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$. This value is computed from Table 4 wherein the crop water duties of winter and summer vegetables are included as 3,240 and 4,560 $m^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ respectively.

The crop consumptive use can be estimated as 4.586 BCM, as shown in Table 6.

In the southwestern part of Egypt, the crop water duty was estimated as high as 19,050 $m^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$. Thus, the crop consumptive use in the total benefited area from the Nile's water can consequently be estimated as 2.838 BCM (Table 6).

3) Municipal and industrial consumption

The municipal sector consumes about 3.100 BCM as non-recoverable consumption. Although population is rapidly increasing, the figure is expected to remain the same providing that the conveyance, distribution and utilization efficiencies will be improved to double their present values as a result of the concurrently implemented projects in both urban and rural areas (KHOZAM, 1994).

The vast amount of allocated water for industrial sector returns to the system, either through agricultural drains or sewage networks. Many factories use water only for their cooling systems. Some factories treat their effluent before disposal, but many, on the other side, do not. If the quantity is the considerable matter in water budgeting, despite the large importance of the quality, the industrial sector has therefore no effective contribution to the non-recoverable water consumption.

4) Flow to the Mediterranean Sea and Terminal Lakes

The discharged fresh water into the sea for navigational purpose during the winter closing is included in the total disposed flow. Winter closing is the period that occurs during the peak of winter season when irrigation is not practiced and most of the canals, especially the minors, are closed for maintenance works. The major canals, which convey water for municipal purpose as well as navigational canals, are functioning with minimum discharges that merely satisfy the water levels of

Table 6. Total crop consumptive use in the intended lands for agricultural expansion.

No.	Project	Area (Mha)	Crop consumptive use ($m^3\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$)	Total consumptive use (BCM)
1	New reclaimed areas at the fringes of the Nile Valley and Delta, and the Sinai Peninsula	0.588	7,800	4.586
2	Irrigated lands with the Nile's water in the New Valley at the southwestern part of Egypt	0.149	19,050	2.838
	Total	0.737		7.425

water treatment plants and navigational drafts. The Drainage Research Institute (DRI) in its yearly monitoring of the drainage system during 1992 estimated that the amount of discharged water to the sea and Northern Lakes was 12.285 BCM (DRI, 1993). This value can be taken as an average; for instance, it recorded 13.5 BCM in 1989 and 12.82 BCM in 1990. The DRI classifies the disposed water according to its salinity as shown in Table 7.

The DRI (1993), accordingly, suggested the possibility of reusing drainage water of salinity less than 1,500 mgL⁻¹. These quantities are totaling 3.070 BCM. On the other hand, an amount of 4.126 BCM was actually reused on official basis (DRI, 1993). Hence, the amount of recycled water could sum up 7.196 BCM, while the disposed to sea 9.215 BCM.

The amount of water that is of salinity less than 2,000 mgL⁻¹ is still usable without severe problems (calculated from AYERS and WESTCOT, 1976; the calculated figure is about 1,920 mgL⁻¹). The process is largely subjective to soil and crop management. The quality of drainage water must be firmly controlled to guarantee its non-harmful inclusion, if unavoidable, of other domestic and industrial pollutants. The future expectations in Egypt necessitate badly the adoption of modern managerial techniques on all levels. If the hypothesis is brought to practice, the reused quantity can account for 10.905 BCM (4.126 BCM is currently reused in addition to 6.779 BCM that is falling in a salinity category less than 2,000 mgL⁻¹). In other words, the disposed quantities into the sea can be reduced to 5.506 BCM.

Now, the question is how much water must be

Table 7. Salinity of the disposed water into the Mediterranean Sea and Terminal Lakes during 1992.

Salinity (mgL ⁻¹)	Quantity (BCM)
< 1,000	1.339
1,000-1,500	1.731
1,500-2,000	3.709
2,000-3,000	1.193
> 3,000	4.313
Total	12.285

Source: DRI (1993)

discharged into the sea to keep the salt balance and prevent seawater intrusion into the northern part of the Nile Delta. This amount is very much dependent upon the quality of drainage water. If the irrigation efficiencies are improved according to the IIP plans, the losses will expectedly decrease, and therefore, the amount of available drainage water will also decrease in terms of both quantity and quality. As such, discharging drainage water, which will be of very low quality and minimum quantity, is very reasonable on the ground that, the action is taken to dump the excessive salts into the sea and prevent intrusion. Yet, the actual situation is not as optimistic as the hypothesis, but it is possible with very high managerial skills and enough financial support. The possibility of bringing the assumption to reality is mainly subjective to the effective and responsible contribution of all involved parties.

For more support of the assumption, EL-QUOSY (1989) argues the possibility of expanding the reuse of agricultural drainage. He points out that about 13.5 BCM of drainage water of reasonable quality flowed to the Mediterranean Sea and Northern Lakes during 1989. He concludes from the salinity classification of the disposed water that about 65 percent, or about 9 BCM, fall in a salinity class of 2,000 mgL⁻¹ or less. However, he draws the attention to some restricting issues, for instance:

- The quantity of drainage flow is normally measured at the drain out-fall, and therefore, it is expected to be less elsewhere in the upstream.
- The location and level are governing factors for constructing a reuse project.
- Soil salinization and consequent salt accumulation must be importantly considered in irrigated areas with recycled drainage water.
- The effective implementation of the IIP will surely reduce the available drainage water for recycling as well as deteriorate its quality.

Within the same research theme, EL-QUOSY suggests the viability of reusing about 9 BCM of drainage water in the Nile Delta. Firstly, he calculates the salt load of the average yearly drainage to sea as 32×10^9 kg (14 BCM of an average salinity of 2,300 mgL⁻¹). Then, he separates the locations where the drainage water salinity is 2,000 mgL⁻¹ or more. He repeats the calculation for the remaining points, which have a total discharge of 9 BCM. He

Table 8. Water budget in Egypt (demand and supply) considering the agricultural expansion requirements, and applying the approach of the non recoverable consumption/unavoidable losses.

		(Unit: BCM)
Supply		Quantity
No.	Fixed share from the River Nile	55.500
	Demand	Quantity
1	Consumptive use by crops in old lands in the Nile Valley and Delta	36.348
2	Consumptive use by crops in the newly reclaimed lands at the fringes of the Nile Valley and Delta, and in the Sinai Peninsula (El-Salam Canal Project)	4.586
3	Consumptive use by crops in the New Valley Project considering only the irrigated area from the Nile's water	2.838
4	Non-recoverable consumption by the domestic sector	3.100
5	Evaporation losses from free water surfaces	2.000
Total demand		48.872
Drainage into the Mediterranean Sea and Terminal Lakes		6.628

estimates the salt load as 15.6×10^9 kg, with about 50 percent drop in magnitude. He finally concludes that the excluded points, mostly lie along the coastal plain near the Mediterranean Sea, are responsible for the major portion of saline water seepage and seawater intrusion, and therefore, he recommends the reuse of 9 BCM of drainage water after in depth study and taking necessary measures concerning environmental hazards.

Based on EL-QUOSY's calculations, an amount of 9 BCM could be recycled during 1989 and the disposed amount to the sea accordingly could have been reduced to 4.5 BCM. For more logical assumption, let us assume that the additional reuse will be applied in irrigating new lands, either directly, or after mixing with fresh water. The law enforces the application of micro-irrigation system of high efficiency in the newly reclaimed areas (say about 80 percent). If this is the case, the losses can be estimated as 1.8 BCM, and hence, the total disposed water into the sea may be brought to 6.3 BCM.

5) Benefited lands from the fossil groundwater

The approach considers only the present and planned agricultural areas irrigated with fresh, ground and drainage waters in the Nile Valley and Delta. The planned lands to be reclaimed on fossil groundwater in the western desert and the Sinai Peninsula are unconsidered in the budget, since they have their independent resources apart from the River Nile and interrelated resources system.

6) Results and water budget

The absolute water budget based on the new approach can be concluded as in Table 8. The share from the River Nile is assumed fixed as 55.5 BCM. The non recoverable consumption by crops in old lands after replacing rice by less water consumer crop like maize in 50 percent of its growing areas is estimated as 36.348 BCM; consumptive use by crops in the newly reclaimed areas at the fringes of the Nile Valley and Delta, and in the Sinai Peninsula is 4.586 BCM; consumptive use by crops in the New Valley Project is 2.838 BCM; and the non-recoverable consumption by domestic sector is 3.100 BCM. Hence, the total non-recoverable consumption is 46.872 BCM. ATTIA (1997) estimates the evaporation losses from free water surface throughout the whole irrigation and drainage systems in a previously introduced national water balance as 2.000 BCM (the unavoidable water losses). The non-recoverable consumption and unavoidable losses therefore total 48.872 BCM. The excess, which can be disposed annually into the sea, is 6.628 BCM.

The estimated flow to the sea is larger than the corresponding values calculated according to the assumption using the DRI estiamte, and AYERS and WESTCOT's suggestion, and the other assumption based upon EL-QUOSY's calculations, *i.e.*, 5.506 and 6.300 BCM respectively. The newly estimated water balance supports the attainability of the new agricultural expansion policy taking into consideration the drainage requirement into the Mediter-

ranean Sea and Terminal Lakes. However, several measures must be taken, as will be summarized below.

6. Conclusion

The new ambitious policy of the Egyptian Government in maximizing the output from the limited water resources and reclaiming new lands in the desert can be achievable, needless to rely on the concurrently halted projects in the Upper Nile regions. This policy aims at increasing the total cultivated area to 4.074 Mha: 3.276 Mha in the Nile Valley and Delta; 0.588 Mha at the fringes of the Nile Valley, Nile Delta and in the Sinai Peninsula; and 0.21 Mha in the southwestern part of the country, following the recently adopted reclamation pattern '*frog land reclamation pattern*'. The application of the non-recoverable consumption /unavoidable losses approach proves that the demands can be satisfied giving the room to an amount of 6.628 BCM to be drained into the Mediterranean Sea and Terminal Lakes. This amount is larger than other estimated quantities using two different calculation methods based on the assumptions developed by both the DRI and EL-QUOSY. In order to make this policy attainable; the following measures concerning the water resources management must be taken:

- 1) Decreasing the area cultivated with rice to 0.294 Mha and limiting rice-growing areas to the northern part of the Nile Delta, where soil salinity problem is at its severity. Law must be reformulated and enforced strictly in this regard since the situation does not allow for lenient behavior with violators.
- 2) Generalizing the IIP, which are expected to improve the efficiencies of using surface water with respect to quantity and quality, and consequently, decrease losses to the drainage system and groundwater aquifer. The broad objective of the projects, which is the maximization of the agricultural production, will therefore be attainable because the water will be used in an optimal manner.
- 3) Improving the efficiency of the domestic water networks to double its current value.
- 4) Enforcing law firmly in obliging factories to carry out the necessary treatment of their effluents according to the established Egyptian

standards, since this water is reused for agricultural and other purposes.

- 5) Minimizing the amount of disposed water into the Mediterranean Sea owing to it contains a large quantity of relatively low salt concentration that can still be desirable for agricultural activities.
- 6) Integrating efforts of all involved parties in water resources management and allocating enough financial resources for carrying on these plans, either from national budget or through active cooperation with international donors.

Reference

- ABOUKHALED, A., ARAR, A.M., BALBA, A.M., BISHAY, B.G., KADRY, L.T., RUTEMA, P.E. and TAHER, A. (1975): *Research on Crop Water Use, Salt Affected Soils and Drainage in the Arab Republic of Egypt*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Near East Regional Office, Cairo, Egypt.
- ATTIA, B.B. (1997): Water resources policies in Egypt – Options and evaluation. *Water Resources Outlook for the 21st Century: Conflicts and Opportunities, A Special Session on Water Management under Scarcity Conditions: The Egyptian Experience, IXth World Water Congress of IWRA (International Water Resources Association), Montreal, Canada*, 9–26.
- ATTIA, F.A. and TUNIHOF, A. (1989): Feasibility of Tube-well Drainge in the Nile Valley. In AMER, M.H. and de RIDER, N.A. eds., *Land Drainage in Egypt*, Drainage Research Institute, National Water Research Centre, Egypt, 303-325.
- AYERS, R.S. and WESTCOT, D.W. (1976): *Water Quality for Agriculture*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, Italy, 15-31.
- DRI (Drainage Research Institute-Reuse Monitoring Programme) (1991): *Drainage Water in the Nile Delta, Yearbook of 1990*. Drainage Research Institute, National Water Research centre, Egypt.
- DRI (Drainage Research Institute-Reuse Monitoring Programme) (1993): *Drainage Water in the Nile Delta, Yearbook of 1992*. Drainage Research Institute, National Water Research centre, Egypt.
- EL-GUINDY, S. and RISSEEUW, I.A. (1987): *Research on Water Management of Rice Fields in the Nile Delta, Egypt*. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ ILRI Eningen, The Netherlands.
- EL-QUOSY, D. (1989): Drainage water reuse projects in

- the Nile Delta: The past, the present and the future. In AMER, M.H. and de RIDER, N.A. eds., *Land Drainage in Egypt*, Draiange Research Institute, National Water Research Centre, Egypt, 163-174.
- EL-QUOSY, D. (1994): *Control of Water Consumption of Rice*. VIII-IWARA World Congress on Water Resources, Egypt.
- GHASSEMI, F., JAKEMAN, A.J. and NIX, H.A. (1995): Chapter 5: Egypt. GHASSEMI, F., JAKEMAN, A.J. and Nix, H.A., *Salinisation of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies*. Centre of Resource and Environmental Studies, The Australian National University, Canberra ACT 200, Australia, 270-290.
- GOUELI, A. and EL-MINIAWY, A. (1993): *Food and Agriculture Policies in Egypt 1970-1990*. Report to the Ford Foundation, Egypt.
- KHOZAM, R.F. (1994): *Strategic Water Planning: An Exercise — Case Study: Egypt*. VIII-IWARA World Congress on Water Resources, Egypt.
- KOTB, Tarek, H.S. (1992): *Irrigation System Management in Egypt — Calibration of the Nile Water Resources Management Model*. M. Sc. Dissertation, Institute of Irrigation Studies, Southampton University, England, UK.
- MALR (Ministry of Agriculture and Land Reclamation) (1980): *Consumptive Use of Water by Major Field Crop in Egypt*. Technical Report No. 17. Master Plan for Water Resources Development, Egypt.
- MALR (Ministry of Agriculture and Land Reclamation)
- (1994): *Annual Agronomy Bulletin*. Egypt. (in Arabic)
- MPWWR (Ministry of Public Works and Water Resources) (1993): *Cropping Pattern for the Year 1993 — Personal communication*. Irrigation Sector, Egypt.
- MPWWR (Ministry of Public Works and Water Resources) (1994): *Policies and Plans of Horizontal Expansion*. Egypt. (in Arabic)
- MPWWR (Ministry of Public Works and Water Resources) (1997): *Development of South Egypt: The New valley Canal Project*. Egypt. (in Arabic)
- MOTT MACDONALD CONSULTING ENGINEERS LIMITED (1990): *Nile Water Resources Management, Inception Report*. Cambridge, England, UK.
- NASHED, Nabil F. (1997): A significant irrigation improvement project in Egypt. *Water Resources Outlook for the 21st Century: Conflicts and Opportunities, A Special Session on Water Management under Scarcity Conditions: The Egyptian Experience, IXth World Water Congress of IWRA (International Water Resources Association), Montreal, Canada*, 27-40.
- OAD, R. (1994): *Technical and Organisational Changes in Irrigation Rehabilitation Programs: Management of the Water Delivery System in Irrigation Improvement Project (Egypt)*. VIII-IWARA World Congress on Water Resources, Egypt.
- WATER MANAGEMENT AND IRRIGATION SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (1989): *Crop Water Duties in Egypt on Regional Level — Official Correspondence with the Irrigation Sector of the Ministry of Public Works and Water Resources*. Egypt.

Salinity Distribution in Seedbed and Furrow Sections in the Coachella Valley, USA

Edward B. SABI*, Takao AMAYA**, Naomasa NISHIMURA**,
James D. RHOADES*** and Scott M. LESCH***

The hindrance of salinity to agricultural production is very well known, particularly, the hazard caused to crops by salt concentration in the root-zone. Thus, there is the need for clear mapping out of actual salinity distribution in seedbeds especially in areas where the salinity of irrigation water is known to be high. In this paper we present the results of a study conducted to determine salinity distribution in seedbeds in the direction of flow of furrow irrigation water. Soil sampling and experimentation were done shortly after the growing season in the Coachella Valley of USA in March 1991. The results from our study showed that salts move to and accumulate along the top of seedbeds and decrease in concentration with increasing depth. However, at the furrow sections, the salt concentration is lowest near the surface and increases with depth. The highest salinity of 96.9 dS/m was recorded at about mid-section of the seedbed (about 300 m long), which then decreased in both directions and the lowest value of 1.2 dS/m was recorded near the entrance of the irrigation water and in the furrow section. From the top of the seedbed, the salt concentration gradually decreased along the shoulders down to the furrows. We found also that the variations in soil moisture content was small and did not affect the salinity distribution along the seedbed. The soil in the study area was silt loam with an average CEC of about 30 cmol kg⁻¹ soil. The ESP at some points in the seedbed was quite high (about 18%) inferring a sodic condition. There were high ion concentrations especially of soluble Na at the sections where high salinity was recorded and this confirmed the relationship between salinity and soil chemical properties

Key Words: Salinity distribution, Seedbed, Southern California, Coachella Valley, Soil properties,
Salt concentration

1. Introduction

Soil salinity is a widespread limitation to agricultural production in semiarid and arid soils throughout the world (JANZEN, 1993). Saline and sodic soils occur naturally in arid and semiarid regions, and as water development brings more land into irrigation, the salinity problem expands (BACKLUND and HOPPES, 1984). Poor soil drainage, improper irrigation methods, poor water quality, insufficient water supply for adequate leaching, and insufficient disposal sites for water that leaches

from the soil aggravate this condition.

One region that has seriously been plagued by salinity and drainage problems is the California region in the USA from the time irrigation was introduced in the second half of the nineteenth century (KELLEY and NYE, 1984). Even though, annual precipitation in this area is sporadic and limited to only about 80 mm, supply of water from the Colorado River, good climate, and alluvial soil have created ideal conditions for large scale production of many vegetables, fruit, and field crops. However, the Colorado River is highly saline ranging in average salinity from less than 50

* United Graduate School of Agricultural Sciences, Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.

** Faculty of Agriculture, Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.

*** US Salinity Laboratory, Riverside, California. USA.

mg/L in the headwaters to 825 mg/L at the Imperial Dam, the last U. S. diversion point, and 950 mg/L in Mexico (HOLBURT, 1984). Continuously irrigating with the highly saline water from the river has worsened the salinity problem. Over-irrigation, which has caused the water table in the region to rise, has also created frequent flooding problems.

The Coachella Valley, where this study was undertaken is a desert area of Southern California, extending from Palm Springs to the Salton Sea. It receives a limited amount of rain, like the other areas, with average annual precipitation of 50 to 120 mm. The mean minimum winter temperature is 4.4°C and the mean maximum summer temperature is 38°C. The floor of the valley has deposited soils consisting of fine-textured sediments (Indio very fine sandy loam, wet), and near the mountains washed-down alluvium and weathered rock created coarse-textured soils (Salton silty clay loam), (KNECHT, 1974). Water from the Colorado River used to irrigate the Coachella Valley area has an average salinity of 1.25 dS/m (TDS of about 800 mg/L) (RHOADES *et al.*, 1989a). Almost all soils in the valley are slightly alkaline (pH 7.0~8.4).

More than thirty different kinds of crops are grown commercially in the Coachella Valley area. The growing season for most of the crops is from late January to early December. It is therefore an important agricultural area and the need for countermeasures to deal with the salinity problem that adversely affects agricultural production cannot be over-emphasized. Moreover, because plants vary in their tolerances to salts, it is important to avoid planting less tolerant young seedlings in portions of the seedbed with high salt concentrations. In order to be able to propose appropriate countermeasures, with regards to leaching requirements and crop selection, the process and trend of salt concentration along seedbed and furrow sections must first be well understood. This follows from the findings of BERNSTEIN *et al.* (1955), BERNSTEIN and FIREMAN (1957), who reported that salts tend to accumulate to excess levels in certain regions of the seedbed under furrow irrigation.

Soil properties also play an influential role in the way salts move and accumulate in the seedbed. Successful management of salinity therefore depends to a great extent on the nature and

properties of the soil. Water movement through the soil is also dependent on properties such as texture, porosity, and hydraulic conductivity.

The purpose of the present study was to document the actual levels of salt accumulation in seedbed and furrow sections, and to use the results to promote better management of agricultural fields that are prone to salinity problems, and also to determine how salts accumulate in the seedbed after the harvest period when no crops are growing and there is little or no rainfall and irrigation water is no longer applied. Particularly, it is very important to ensure effective use of water in the California region where the water supply system is becoming stricter with time. This can be achieved by avoiding over-irrigation that leads to excessive salt accumulation, and requires the use of already scarce water for leaching out the excess salts.

2. Materials and Experimental Methods

1) Field description and sampling

The study area was located in the Coachella Valley at Indio (about 110 km east of Riverside, where the US Salinity Laboratory is located) in Southern California State (see Fig. 1). The Salton Sea lies between the Coachella and Imperial Valleys and is 70 m below sea level. From the Colorado River in the east, runs the main Colorado River Aqueduct that conveys water to Los Angeles and its surroundings. The Coachella Valley Canal, also supplies water directly to the Indio region for irrigation and other purposes. Drainage water from the two valleys is discharged into the Salton Sea resulting in the subsequent rise in its water level thus, creating drainage water disposal problems.

We carried out the study on a seedbed on Site 5 located between Avenues 60 and 62 (Fig. 2). Furrow irrigation water is applied from the Ave. 60 section, and flows in the direction of Ave. 62. This site was selected for our study because there had previously been other studies on the same site. We did not anticipate any particular influence on this site by external factors due to its location. Irrigation water was applied evenly irrespective of position as a network of roads separated all plots from each other.

Soil samples were collected at the end of the harvest season from sections of the seedbed

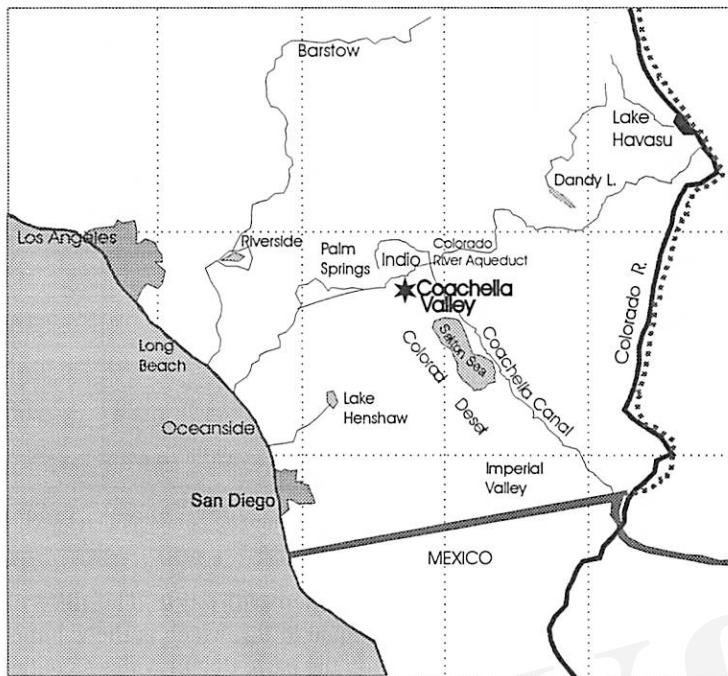


Fig. 1. Position of the Coachella Valley in South-western USA.

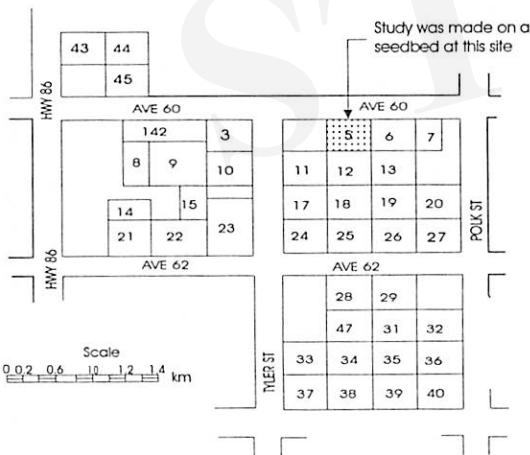


Fig. 2. Location of seedbed at site No.5 between Ave 60 and 62.

measuring about 300 m in length and 0.76 m in width between furrows (Fig. 3). A total of 140 samples were collected from 10 locations on the seedbed. At each location 14 samples were collected across the section of the seedbed and its adjoining furrows as shown in Fig. 3. To ensure

that the samples were representative of each sampling point, soils were taken from three points at about 10 cm apart with a 1-inch diameter auger and thoroughly mixed together to form one sample. The samples were then placed in cups and tightly sealed. The first 3 sampling points were located at 15-m intervals starting from the entry point of the irrigation water, and the subsequent ones at 30-m intervals. Each sample was collected at depths of every 15 cm (see Fig. 4). All the other soil properties were determined from the samples collected at location No. 8. The results from the 4-electrode conductivity probe (RHOADES, 1994) indicated that this site had properties that were typical of the area (silty loam soil).

2) Experimental methods

Saturated soil-pastes were prepared from each of the 140 samples using standard methods described by RHOADES (1982). The electrical conductivity of the saturated soil-paste (EC_p) was measured in a calibrated "Bureau of Soils Cup" (RICHARDS, 1954: 7-33) using a conductivity meter. The measured EC_p was then converted to electrical conductivity of the saturated soil-paste extract (EC_e) using

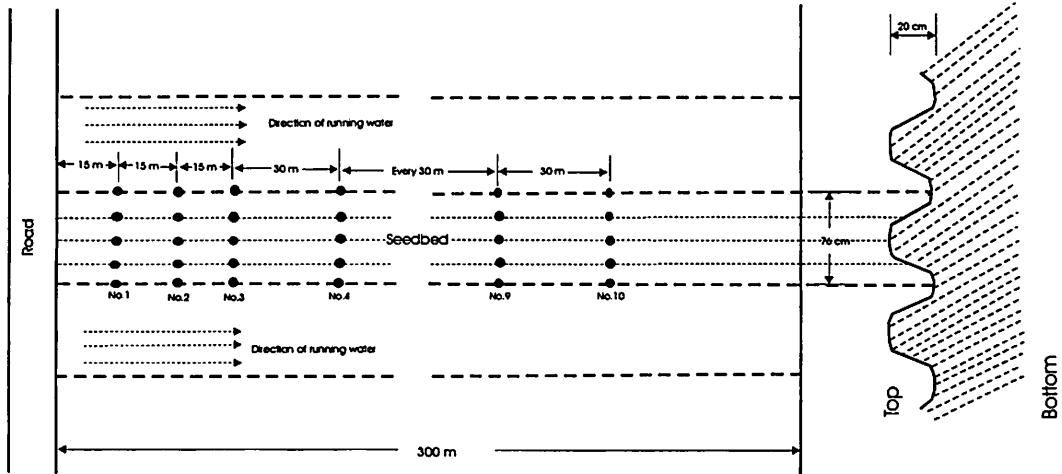


Fig. 3. Schematic drawing of the seedbed showing sampling points and end section.

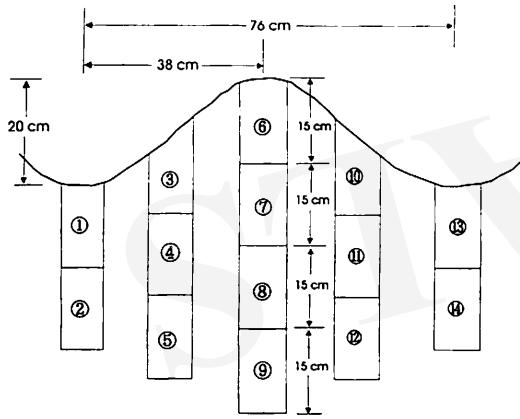


Fig. 4. Section of seedbed showing sampling points and depths.

equation (1) below, developed by RHOADES *et al.* (1989b),

$$EC_p = \frac{[(\theta_s + \theta_{ws})^2 EC_e EC_s]}{[(\theta_s) EC_e + (\theta_{ws}) EC_s]} + \frac{(\theta_w - \theta_{ws})}{(\theta_w - \theta_{ws})} EC_e, \quad (1)$$

where EC_p and EC_e are as defined above, EC_s is the electrical conductivity of the solid phase of the soil (due primarily to exchangeable cations adsorbed on clay minerals and secondarily to metallic minerals), θ_s and θ_w are the volume fractions of the solid particles and total water in the paste respectively, and θ_{ws} is the volume fraction of water in the paste that is coupled with the solid phase to provide an electrical pathway through the paste (a series-

coupled pathway). The difference ($\theta_w - \theta_{ws}$) is equal to θ_{wc} , which is the volume fraction of water in the paste that provides a continuous pathway for electrical current flow through the paste (a parallel pathway to the series-coupled pathway). EC_e is used in preference to EC_p because it is directly related to the field moisture range from field capacity to the permanent wilting point, which is a good parameter for evaluating the effect of soil salinity on plant growth (FOTH, 1990: 73-99).

We determined the moisture content by the standard gravimetric method with oven drying described by TOPP (1993). The results of moisture content were calculated and recorded as percent on mass basis. The particle size distribution was determined by a combination of the standard procedure of sieving the oven-dried soil and the hydrometer method.

The CO_3^{2-} and HCO_3^- were determined from the original saturation extract solution using the Standard Potentiograph E36 meter. Details of the method for the preparation of the saturation extract are described by RHOADES (1982). From this solution, a pH meter was also used to measure the pH. An Aminco Chloride Titrator was used to determine the Cl^- . The soluble ions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and SO_4^{2-} were measured by Inductively Coupled Plasma (ICP) Atomic Emission Spectrometer machine. For details of method of extraction of the ions see RHOADES (1982). The cation exchange capacity (CEC) was determined by the procedure described by POLEMIO and RHOADES (1977).

3) Exchangeable sodium percentage (ESP)

The ESP, a measure of soil sodicity, is the molar proportion of cation-exchange sites in a soil (CEC) occupied by exchangeable sodium (Na_{exch}). The ESP was calculated from equation (2) given below (JANZEN, 1993), to enable us determine the level of sodicity of the soil in the study area:

$$\text{ESP} = (\text{Na}_{\text{exch}})/\text{CEC} \times 100 \quad (2)$$

Traditionally, sodic soils have been defined as having an *ESP* greater than 15 (RICHARDS, 1954).

3. Results and Discussion

1) Soil properties at location No. 8

The particle size distribution and other soil properties of samples at this location are presented in Table 1. The results showed that all the samples were silt loams. The soil in the area of our study has been reported to be uniformly silty loam (RHOADES, 1994). Leaching, which is the method used in reclaiming saline soils, is dependent upon the hydrodynamic permeability of the soil to water from the surface. The pores, which are also directly related to the texture as well as the structure, control the movement of the water. We were of the view that the silt loam soil, which was high in silt and low in sand, might not be suitable for effective leaching to reduce the accumulation of salts. Providing adequate drainage to reduce salt accumulation in the seedbed will avert this problem.

The pH results (see Table 1) confirmed the soils in the valley to be slightly alkaline with an average value of 7.4. The CEC, Ex-Na, and ESP are also shown in Table 1. The average CEC was about 30 cmol kg⁻¹. Thus, the amount of exchangeable cations adsorbed in the soil was high enough to

allow exchange activity between sodium ions and other cations and cause salinization. The ESP values were much lower than the sodic soil limit of 15, except for one sample. As the ESP is directly related to the amounts of soluble Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , it follows that the ESP changes in accordance with changes in salt contents along the seedbed. However, as long as a large quantity of soluble salts remains in the soil, exchangeable sodium does not cause dispersion of colloids. The high concentration of ions in the soil solution will keep the colloids flocculated.

Results of soluble anions and cations representing the sampling points at location No. 8 are shown in Table 2. The moisture content, also presented in Table 2, was nearly the same at all the sampling points in contrast to the ion concentration, which had significant variations at the various points. Values for Cl^- ions were very low ranging from $1.1 \sim 2.1 \text{ cmol kg}^{-1}$ and HCO_3^- ions were moderately low, ranging from $3.3 \sim 72.0 \text{ cmol kg}^{-1}$ respectively, while those of SO_4^{2-} and NO_3^- ($4.1 \sim 291.0$ and $40.6 \sim 102.6 \text{ cmol kg}^{-1}$ respectively) were high. Similarly, for the cations, the values for K^+ were very low ($0.9 \sim 4.8 \text{ cmol kg}^{-1}$) compared with those for Na^+ ($8.8 \sim 297.6 \text{ cmol kg}^{-1}$), Ca^{2+} ($23.5 \sim 57.9 \text{ cmol kg}^{-1}$), and Mg^{2+} ($8.5 \sim 84.4 \text{ cmol kg}^{-1}$) which were high. Sodium had the highest concentrations at the various sections in the seedbed. Thus, high concentrations of the sulfates and nitrates of sodium, calcium, and magnesium produced the saline condition in the soil. The total salt concentrations were consistent with the variations in the salinity levels at the sampling points. Both anion and cation concentrations were highest close to the top of the seedbed, where salinity was highest, and nearly equal at each sampling point. Thus, a condition of ion balance exists at the various

Table 1. Particle size distribution and other properties of selected points at location No. 8.

ID No.	Sand (%) 2mm ~ 50 μm	Silt (%) 50mm ~ 2 μm	Clay (%) < 2 μm	Texture	CEC cmol kg ⁻¹	EX-Na cmol kg ⁻¹	ESP %	pH
①	15.3	61.3	23.4	silt loam	24.22	4.401	18.17	7.28
④	20.0	57.9	22.1	silt loam	24.81	2.389	9.63	7.46
⑥	17.4	59.2	23.4	silt loam	29.13	1.290	4.43	7.40
⑨	19.4	58.5	22.1	silt loam	33.16	0.862	2.60	7.56
⑪	20.1	57.8	22.1	silt loam	31.66	2.124	6.71	7.38
⑬	18.7	59.2	22.1	silt loam	30.33	0.233	0.77	7.36

CEC: Cation-exchange capacity, EX-Na: Exchangeable sodium, ESP: Exchangeable sodium percentage

Table 2. Water-soluble anions and cations measured at location No. 8.

Samp. No.	← A N I O N S →					← C A T I O N S →					SP*	PW**
	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	ΣA	Na	K	Ca	Mg	ΣC	cmol kg ⁻¹	cmol kg ⁻¹
①	2.1	8.7	74.6	—	85.4*	38.8	1.3	24.2	20.6	84.9	59.0	23.2
②	1.3	4.1	40.6	6.6	49.3	8.8	0.9	29.4	8.5	47.6	57.8	21.6
③	2.0	32.7	98.3	6.8	139.8	79.6	1.9	25.6	30.3	137.4	60.3	24.8
④	1.4	10.5	86.4	3.4	101.7	54.4	1.9	24.4	19.4	100.1	56.6	26.7
⑤	1.2	20.0	45.5	—	66.7*	22.7	1.9	36.1	18.6	79.0	56.7	24.4
⑥	1.6	291.0	89.0	72.0	453.6	297.6	4.8	57.9	84.4	444.7	56.2	24.4
⑦	1.3	111.8	101.0	25.9	240.0	158.5	3.4	33.9	41.1	236.9	56.3	25.4
⑧	1.2	113.4	92.6	23.9	231.1	140.3	2.8	33.7	47.7	224.5	57.1	27.4
⑨	1.1	68.5	102.6	11.8	184.0	112.0	2.3	29.2	38.6	182.1	61.1	25.1
⑩	1.3	63.4	96.5	12.3	173.5	105.8	2.3	29.2	37.7	175.0	58.8	28.9
⑪	1.2	57.7	96.9	—	155.8*	112.1	2.6	29.2	36.7	180.6	57.2	26.1
⑫	1.2	49.4	71.1	—	121.7*	90.1	2.4	34.4	28.1	155.0	55.8	26.3
⑬	1.4	20.0	94.7	—	116.1*	66.5	1.8	23.5	25.7	117.5	57.9	24.1
⑭	1.7	9.7	53.0	—	64.4*	22.7	1.3	27.9	14.0	65.9	57.2	30.0

* Partial totals, * Saturation percentage, ** Moisture content

sections of the seedbed and a relationship between the amount of soluble salts accumulated and salinity was established. We also observed gradual decreases in salt concentrations along the shoulders of the seedbed to the furrow sections.

2) Salinity distribution

Data for the soil salinity expressed as the electrical conductivity of the saturated soil paste extract (EC_e in dS/m) and the per cent moisture content are presented in Table 3. The results are presented at positions corresponding to the sampling points as shown in Fig.4. The EC_e levels at each sampling point of the 10 locations are presented in Fig. 5a. We grouped the salinity levels into five categories, which are represented diagrammatically (see Fig. 5a). The actual salinity values along the midsection of the seedbed are shown in Fig. 5b. The highest salinity was at the top of the seedbed and along its entire length ranging between 26.8~96.9 dS/m. From the top of the seedbed, salinity decreased consistently with depth to values ranging from 6.2 to 27.6 dS/m (see Fig. 5b).

Salinity on the shoulders also decreased with depth along the entire length of the seedbed ranging in values from 2.5~8.5 dS/m. The lowest concentrations of salts were at the furrow sections ranging from 1.2~16.2 dS/m, but unlike the other

sections salinity increased with depth as shown in Fig. 5a. At the furrow sections, the salinities at 30-cm depths (1.7~25.7 dS/m) were about twice the values of the 15-cm depths (1.2~16.9 dS/m). This was probably due to the downward seepage of irrigation water in the furrows leaching the salts and reducing the salt concentration near the soil surface. Conversely, water moved to the top of the seedbeds and salt was deposited as the water evaporated. The lowest salinity value of 1.2 dS/m was recorded within the 15-cm depth of the furrow at the first sampling point. The highest value of 96.9 dS/m was recorded at the top of the seedbed at the sixth sampling point which was about halfway along the seedbed (see Table 3a).

From the entry point of irrigation water, salinity increased gradually along the seedbed and reached a peak value about midsection of the seedbed (Table 3a). From this point it decreased towards the end of the seedbed. We were of the view that this situation occurred because the volume of water running through the furrow was high from the entry point and hence a better leaching effect. Thus less salts accumulated in about the first 50 m of the seedbed. But as the volume of the water gradually decreased resulting in insufficient leaching, accumulation of salts increased. From this section of the seedbed

Table 3. Electrical conductivity, ECe and moisture content.

	(a) ECe (dS/m)					(b) Moisture content (%)				
No. 1	48.1 7.3 23.8 12.8 1.2 4.7 16.2 7.1 2.6 3.4 4.3 11.4 6.2 5.0					24.2 26.5 25.0 24.4 23.5 26.9 25.0 24.3 23.1 25.7 23.1 29.0 27.0 25.1				
	34.7 5.5 14.5 5.3 1.7 3.9 12.2 3.7 2.3 1.7 2.8 8.1 2.5 2.2					26.2 27.1 28.6 27.6 27.0 25.9 28.1 27.9 26.1 25.5 28.4 30.7 29.2 26.3				
	36.7 6.7 13.9 5.8 1.6 5.2 9.7 3.7 1.6 1.6 5.2 9.7 3.7 1.6 3.7 4.7 6.2 2.5 4.2					23.5 22.3 24.2 22.7 23.6 25.3 24.9 25.3 22.2 23.6 25.3 24.9 25.3 22.2 25.2 25.9 27.9 28.2 27.7				
No. 4	82.3 22.4 42.6 38.5 5.8 16.5 34.6 20.0 6.8 12.2 13.6 22.5 16.4 12.3					23.7 23.1 22.6 28.1 22.9 24.9 26.3 24.8 24.5 26.1 24.7 25.4 26.2 28.2				
	89.8 12.2 32.7 18.4 6.6 9.2 27.6 14.7 5.4 13.4 8.6 20.2 11.1 13.0					23.4 23.7 25.9 27.5 23.9 24.6 25.0 25.4 26.0 25.3 29.1 23.8 24.3 24.4				
	96.9 29.0 50.2 19.1 5.9 22.4 28.0 13.7 6.9 13.6 14.5 23.7 13.2 16.2					24.6 31.9 28.9 24.1 25.8 22.3 31.4 28.6 26.5 22.0 23.6 25.2 22.9 24.1				
No. 7	26.8 13.4 22.4 11.2 3.7 8.9 16.8 9.7 4.7 7.8 8.4 10.9 5.1 11.1					23.0 22.2 24.7 20.1 21.2 24.2 26.5 28.6 22.2 26.5 26.3 29.5 31.4 28.2				
	36.9 10.8 18.9 14.6 3.7 7.8 18.7 14.2 5.2 6.6 6.5 14.6 13.1 9.5					24.4 24.8 25.4 28.9 23.2 26.7 27.4 26.1 24.1 21.6 24.4 25.1 26.3 30.0				
	79.8 26.8 57.1 27.8 7.9 25.7 28.8 25.8 16.9 15.8 18.4 27.5 22.5 25.7					23.2 22.7 23.3 23.4 26.8 23.1 25.6 24.7 20.9 25.5 26.6 29.6 28.5 26.4				
No. 10	38.1 14.9 36.9 25.7 4.4 10.2 24.8 25.0 6.5 11.0 9.3 23.8 16.5 14.4					26.8 24.6 27.5 27.1 22.7 26.3 26.7 26.1 23.7 25.9 28.9 32.3 29.2 26.4				

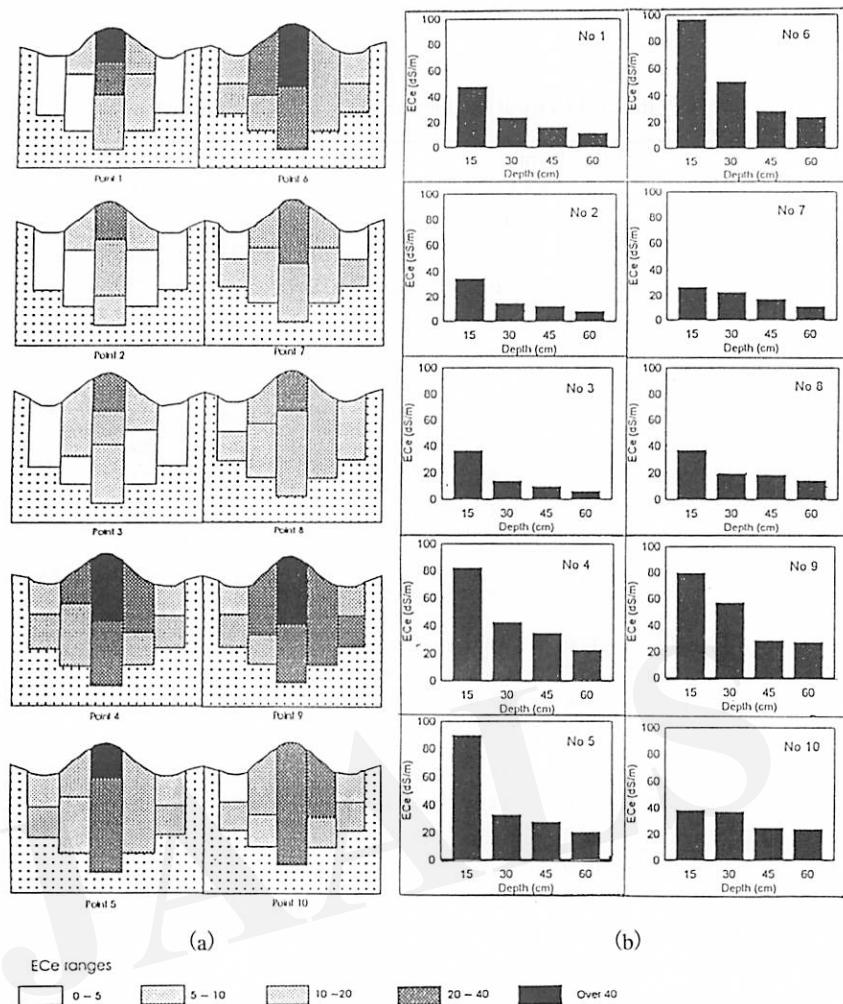


Fig. 5. Salinity distribution.

- (a) along the entire seedbed
 (b) along the mid-section of seedbed

further reduction in irrigation water (less salts) may have caused the decrease in salinity towards the tail end of the irrigation water.

The EC_e as calculated from equation (1) and presented in Table 3 produced values, some of which were quite high. We were, however, convinced that the accuracies of the experimental procedure and the formula used to obtain the salinity values were high. This study was done at the end of the harvest season and there was nearly zero rainfall to provide water during this period for leaching out some of the salts which probably was responsible for the extremely high accumulations of salts in parts of the seedbed. Moreover, mean

salinity values that were quite high, in some instances >26 dS/m in the 0~15-cm depth have been reported for the Coachella Valley (RHOADES, 1994). However, these high salinity values do not pose much danger to crops because leaching is normally carried out before the next planting begins.

Out of the total 140 samples analyzed, we observed that only 10% recorded salinity values lower than 4.0 dS/m, the figure set as the tolerant limit beyond which the yields of most very salt-sensitive crops are affected (BERNSTEIN and FIREMAN, 1957). Salinity decreased from the top to the furrow sections of the seedbed. This agrees with

the findings of RHOADES and LOVEDAY (1990) who reported that under moderately saline conditions, most of the salt is carried into the center of the seedbed, leaving the shoulders free for seedling establishment. At nearly all the sampling points the highest EC_e values on the shoulders were smaller than or nearly equal to the lowest values at the center of the seedbed (Table 3a). This further confirms the assertion that salts accumulate less on the shoulders of the seedbed.

We deduced from these results that the shape of the seedbed is important in determining the degree of salt accumulation in the various sections. A slightly flat-topped seedbed is more desirable for preventing excessive salt accumulation near the root zone of young seedlings than a round-topped seedbed (RHOADES *et al.*, 1992). Also, double row planting on flat-topped seedbeds or planting on the shoulders of sloping beds can be effective in preventing excessive salt accumulation near the root zones of young seedlings (RHOADES and LOVEDAY, 1990).

The soil moisture content at all the sampling points fell among 20 and 32% (see Table 3b). The difference between the highest and the lowest moisture contents was small which greatly contrasted the corresponding salinities of 1.2 and 96.9 dS/m. The moisture content at the point of lowest salinity was nearly the same as that at the highest salinity (23.5 and 24.6% respectively). We were, therefore, of the view that salinity levels were insensitive to the small variations in moisture content. This is consistent with the findings of RHOADES *et al.*, (1989b), who reported that the relatively small deviations from field capacity water content do not seriously interfere with salinity diagnosis, because the salt concentration of the soil water increases as the volume of soil water decreases with evapotranspiration and the content of dissolved electrolyte (current carrying capacity) remains essentially constant. There were slight increases in moisture content with depth at some of the sampling points. This was probably due to loss of water near the soil surface through evaporation.

Graphical representations of the values in Table 3 for variations in salinity levels and moisture content are shown in Fig. 6. The patterns of salinity at corresponding points along the seedbed (Fig. 4) can be recognized as against the moisture

content, which showed no clear patterns. The most significant pattern in the salinity variations is that it generally decreased slightly from the entry point of the irrigation water and then increased towards the midsection of the seedbed. The variations in salinity were much higher for the end of the seedbed than for the entry point of irrigation water. Fluctuations in salinity were more pronounced around the midsection of the seedbed. There was no pattern in the moisture content variations as the graphs in Fig. 6 show.

The larger standard deviations (SD) among the salinity values were a clear indication of the difference in salt concentration at the different points. For instance, the SD's for the center of the seedbed were 7.6 ~ 26.9 and for the furrows it was 2.3 ~ 6.8. The shoulders, had SD's between 8.6 ~ 10.0 for the left and 4.9 ~ 8.5 for the right side. These results showed that unlike the center of the seedbed, the other sections produced no big differences between salinities at corresponding sampling points. However, the SD's for the moisture contents along the entire seedbed ranged among 1.3 and 3.0. This further reveals that only slight changes in moisture content occurred which further emphasized the difference in the salinity variations.

The most significant pattern, however, was along the center of the seedbed (Fig. 5). There was also some pattern in the variation of salt concentration along the entire length of the seedbed as corresponding points in Fig. 6 show. Salt accumulation in seedbeds under other forms of irrigation may be different from the results we obtained for furrow irrigation.

4. Conclusions

From the studies we arrived at the following conclusions. However, it must be pointed out that our results were basically consistent with the findings of other researchers.

1. The highest salinity is along the top of the seedbed (96.9 dS/m) and generally decreases with increasing depth. The shoulders of the seedbed and the furrows have lower levels of salt concentration. It is presumed that during irrigation salinity in the furrow sections was much lower than the recorded values due to leaching effects. It was also observed that salinity increases in the direction of

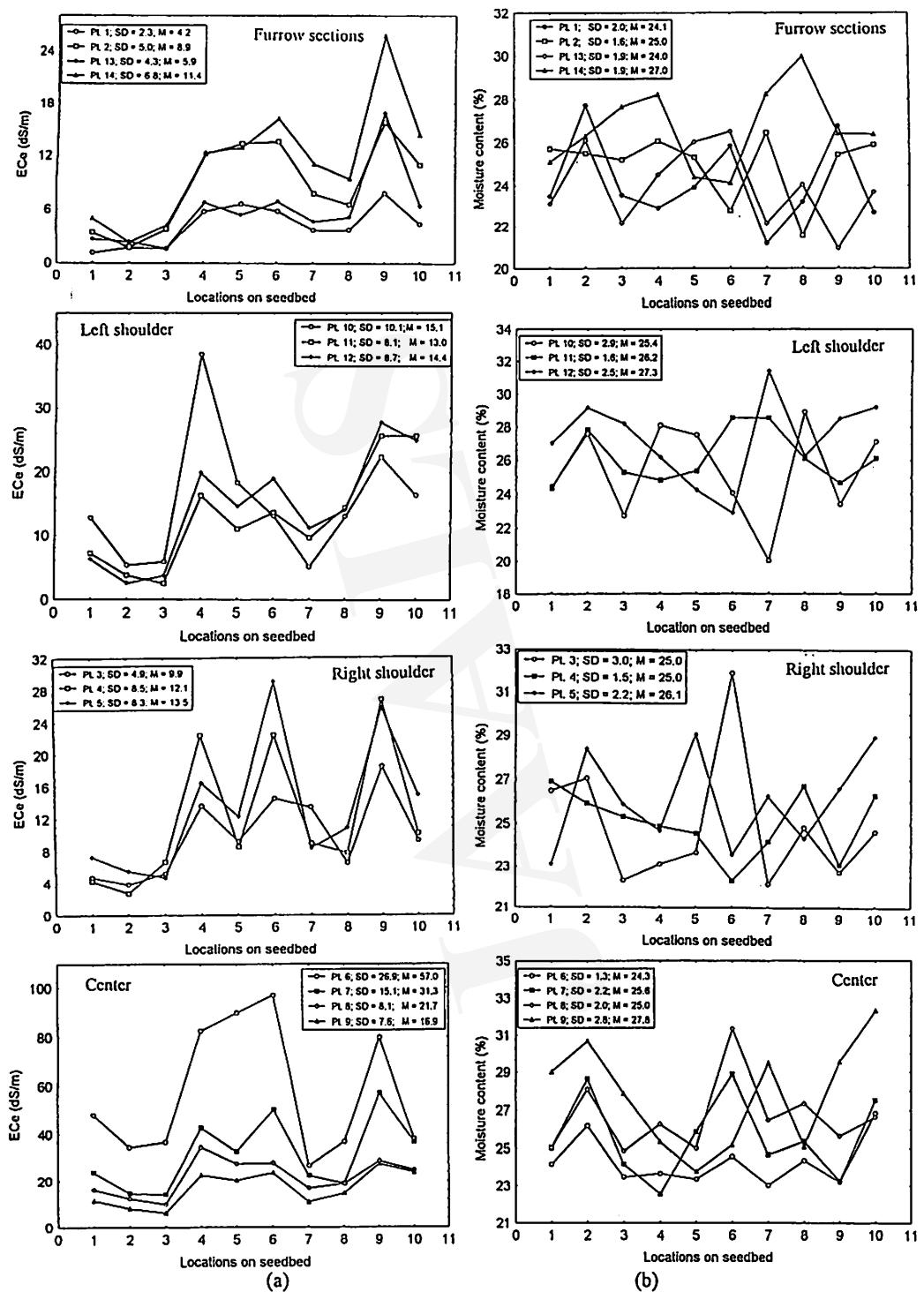


Fig. 6. Salinity (a) and moisture content (b) variations along seedbed.

flow of water up to a point and then decreases towards the tail end of the water. In direct contrast to the salinity in sections of the seedbed, salt accumulation in the furrows increased with increasing depth.

2. The shape of the seedbed is very important in determining the level of salt accumulation at the various sections. A slightly flat-topped seedbed is probably the best to ensure that salts do not accumulate to excessive levels near the root zones of young seedlings.

3. As the salinity increased in the direction of the running water, we were of the view that a reduction in the length of the seedbed could lower the salt accumulation in the sections of the seedbed.

4. Salinity was insensitive to variations in moisture content, which were within a narrow range and along the entire seedbed. This result was consistent with the findings of other researchers.

5. Salinity distribution in seedbeds is related to soil chemical properties. Properties such as pH and soluble salts affect the process of salt accumulation in the seedbed. High salinity values were recorded at points where the accumulation of soluble cations and anions was also high.

6. Due to the scarcity of irrigation water in the study area, strict management practices are required to avoid salt accumulation in the seedbed because salt accumulation requires the use of the already scarce water for leaching.

Acknowledgement

The authors are very grateful to staff of the US Salinity Laboratory for the various forms of assistance and facilities provided for the successful completion of this research. Particularly, the immense assistance rendered by Mrs. Nahid Vishteh is greatly appreciated.

Reference

- BACKLUND, V.L. and HOPPES, R.R. (1984): Status of soil salinity in California. *California Agriculture*, **38-10**: 8-9.
- BERNSTEIN, L., FIREMAN, M. and REEVE, R.C. (1955): Control of salinity in the Imperial Valley, California. US Dept. Agric. ARS-41-4: 16.
- BERNSTEIN, L. and FIREMAN, M. (1957): Laboratory studies on salt distribution in furrow-irrigated soil with special reference to the pre-emergence period. *Soil Sci.*, **83**: 249-263.
- FOTH, H.D. (1990): *Fundamentals of Soil Science*. John Wiley & Sons, New York..
- HOLBURT, M.B. (1984): The lower Colorado – A salty river. *California Agriculture*, **38-10**: 6-8.
- JANZEN, H.H. (1993): Soluble salts. In CARTER, M.R. ed., *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Canadian Soc. Soil Sci., 161-166.
- KELLEY, R.L. and NYE, R.L. (1984): Historical perspective on salinity and drainage problems in California. *California Agriculture*, **38-10**: 4-6.
- KNECHT, A.A. (1974): *Soil Survey of Riverside County, California Coachella Valley Area*. USDA, SCS, 89pp.
- POLEMIO, M. and RHOADES, J.D. (1977): Determining cation-exchange capacity: A new procedure for calcareous and gypsiferous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41**: 525-528.
- RHOADES, J.D. (1982): Cation exchange capacity. In BLACK et al. eds., *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties – Agronomy Monograph No. 9 (2nd ed.)*, 149-157.
- RHOADES, J.D., BINGHAM, F.T., LETEVY, J., HOFFMAN, G.J., DEDRICK, A.R., PINTER, P.J. and REPLOGLE, J.A. (1989a): Use of saline drainage water for irrigation: Imperial valley study. *Agricultural Water Management*, **16**: 25-36.
- RHOADES, J.D., MANTEGHI, N.A., SHOUSE, P.J. and ALVES, W.J. (1989b): Estimating soil salinity from saturated soil-paste electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **53**: 428-433.
- RHOADES, J.D. and LOVEDAY, J. (1990): Salinity in irrigated agriculture. In STEWART, B.A. and NIELSEN, D.R. eds., *Irrigation of Agricultural Crops*, 1089-1142.
- RHOADES, J.D., KANDIAH, A. and MASHALI, A.M. (1992): The use of saline waters for crop production. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, **48**: 93-119.
- RHOADES, J.D. (1994): Soil salinity assessment: Recent advances and findings. *Transactions of the ISSSS 15th World Congress of Soil Science, Volume 3a: Commission II. Symposia "Impacts and hazards of salinization on ecological environmental issues and sustainable agriculture"*, Acapulco, Mexico, 293-319.
- RICHARDS, L.E. ed. (1954): *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. U. S. Salinity Laboratory, USDA Handbook No. 60. Government Print Office, Washington, D.C.
- TOPP, G.C. (1993): Soil water content. In CARTER, M.R. ed., *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Canadian Soc. Soil Sci., 541-557.

アメリカ Coachella Valley における畦中の塩類分布

SABI, Edward B.*・天谷孝夫**・西村直正**
 RHOADES, James D.***・LESCH, Scott M.***

この研究は、乾燥気候のアメリカ・カリフォルニア州東南部に位置するCoachella Valleyのビート畑地帯において、塩類の集積実態を迅速に把握する方法の確立を目指して行われたもの一部である。本地域では厳しい農業用水供給量の削減が続いている、コロラド川の渇水状況によっては灌漑不能の圃場が放棄され荒廃し、一種の沙漠化現象さえ発生する事態に至っている。調査は、収穫後の畦間灌漑圃場地域において、事前調査から平均的と判断された長さ約300mの1本の畦を対象に実施した。すなわち、流下方向に大体30m間隔で10個所の畦断面から、それぞれ14個の土壤試料を採取し、平衡状態での塩濃度分布状況を測定した。その結果、各断面中では畦の上部から畦間に向かい次第に塩濃度が減少すること、1本の畦では中央部分で最大となり、その上下流で塩濃度が減少することなどが明らかとなった。これらのデータは、畦間を流下する灌漑水による除塩管理に役立つ。

また、調査断面の代表的な位置と判定した土壤による物理・化学性の精密測定から、土性は均質なSilt Loamであること、CECは30前後で相当に活性であり、一部のESP値からはソーダ質化の危険性があると判断された。このことは、水溶性陽イオンに占めるナトリウム比の高さからもうかがわれ、灌漑水の組成によっては十分な注意が必要とされる。

* 岐阜大学大学院連合農学研究科

(受付：1998年7月6日、受理：1998年11月20日)

** 岐阜大学農学部

*** アメリカ塩類研究所

イラン国の沙漠化と塩類問題 —乾燥地の灌漑農業における持続的発展—

山本太平*・鳥井清司**・アバス ケシャバル***
エブラヒム パジラ****・池浦 弘*

1. まえがき

乾燥地では沙漠化が発生しやすく、沙漠化面積が年間500万haに達するといわれる。沙漠化は気象、水資源、土壤等の自然的要因の急激な変動で発生する現象であるが、直接的な引金になるのは人為的要因の場合が多い。沙漠化は近年に始まったものではない。古代オリエントの灌漑農法が「環境に対する挑戦と敗北」とされたように、人類の歴史において文明の繁栄に伴う現象である(中島, 1983)。特に灌漑開発に伴う沙漠化はプロジェクト実施による要因も強く、水資源や土壤の塩類化を招き再生不能な生産基盤を生ずる。本研究では乾燥地における灌漑の現状と灌漑に伴って生ずる塩類化要因について検討し、持続的な灌漑計画の確立を目指して今後わが国の技術協力に不可欠な基礎資料の収集・整備を試みるものである。

ここでは、まず最近のイラン国における沙漠化の概況とEsfahan州、Fars州、Khuzestan州の灌漑農業について紹介する。次にこれらの3州の灌漑農業地帯を対象に塩類化の要因について検討し、灌漑排水学の立場から農地の塩類化対策を提案する。

2. 調査の概要と方法

イラン国¹⁾の現地調査は1995年4月と9月に行った。Khuzestan州、Esfahan州、Fars州に分布する主要灌漑農業地帯を広域にわたり移動調査し、これらの3州で収集した水・土壤サンプル、気象・土壤・水質データ、統計資料等を検討した。これらの3州は革命前に実施したイラン国土壤研究所との共同研究(1973~1978年)の対象地域でもある(長ほか, 1977)。今回の研究は18年ぶりに

再開されたものであり、灌漑農業の基準データとして前回の研究成果も利用した。

3. イラン国の沙漠化と3州の灌漑農業

1) イラン国の土地利用と沙漠化

イラン国²⁾は北緯25°~40°、東経44°~63°30'に位置し、北部のカスピ海域を除き大部分が乾燥地である。気候は乾燥帯~半乾燥帯に属し、年降水量が100~400mm、雨期は12~3月である。この20数年来イラン国は歴史的な革命と戦争を乗り切り、農業生産物の国内自給率は灌漑施設や防風林のインフラ整備が進み大きく改善されている。1993年現在、総人口16,000万人(1977年の2倍増)、農業人口1,600万人を示す。農業人口は1966年当時と同程度であるが、総人口に占める農業人口の割合は60%から25%に減少している。国内総生産では農業が21%で部門別で一位を示す(国際農林業協会, 1993)。農業生産では畜産と灌漑農業がその中心になる。畜産は山地や高地の傾斜部に広く分布する草地を利用する。灌漑農業は山地の平野部や低地で行われる。イラン国³⁾の土地利用状況を表1に示す。国土面積16,480万haのうち、38%が農地、農地の70%が草地、耕地が30%を示す。耕地面積1,716万haは国土面積のわずか10%程度であり、灌漑地、降雨依存地、休耕地がそれぞれ1/3程度を示す。耕地面積に対する平均灌漑率は、休耕地の灌漑面積も含めた場合、52%(1.4倍)を示す(佐野, 1995)。

イラン国⁴⁾の水収支では総降水量4,130億m³が、蒸発散量71%、地表流出量20%、地中浸透量9%に配分される。地表流出量810億m³は主に河川水源となり、このうち灌漑水量が1/3程度といわれる(PAZIRA, 1995)。地中浸透量363億m³が主な地下水涵養となり、井戸、カナート等により利用される。地下水利用は年々急増し1992

* 島根大学乾燥地研究センター

** 京都大学農学部

*** イラン国農学研究・教育・普及機構

**** イラン国農業工学研究所

(受付: 1998年3月4日、受理: 1998年10月6日)

表1. イラン国の土地利用状況（1992年）
Table 1. Land use in Iran (1992)

Agricultural land 17.16 million ha	Irrigated field Rainfed field Fallow land Fruit field	4.88 million ha 5.83 million ha 5.35 million ha 1.10 million ha	Irrigated field Rainfed field Irrigated field Rainfed field	1.78 million ha 3.57 million ha 0.93 million ha 0.17 million ha
Pasture	44.00 million ha			
Forest	11.40 million ha			
Others	92.24 million ha			
Total	164.80 million ha			

年は1972年の3.4倍になるといわれる (*Iran Statistical Year Book: PLAN & BUDGET ORGANIZATION STATISTICAL CENTER OF IRAN 1993*)。水資源の利用は農業以外にも増加し、上水道の普及率は1993年で農村部が83%、都市部が99%に達する。特に農村部では革命前1975年の3倍近くに増大している。年間の水需要量は降水量で賄うことができず、地下水の過剰取水を生じ、その水量が地下浸透量の10%を占める。

社会変動や人口増が引き金になり、最近、次の①～④に示すような人為的沙漠化要因が指摘されている (原, 1996; 中川, 1996MS)。①水利条件の良い既耕地が市街化され、水資源の乏しい周辺地域の開発、特に揚水機を導入した地下水利用の灌漑面積が増加した。②化学肥料や農薬散布の使用量が急増し、土壤塩類化の促進要因になった。③灌漑システムの整備や農業機械化が進み休耕地面積が少なくなった。④自作農が増加し灌漑農業による商品作物の生産が増加した。

2) AREEO研究機関

イラン国の農地や水源の塩類化は、戦後の人口増を賄う農産物を灌漑農地に大きく依存した結果といえる。この沙漠化対策の一つとして、政府は科学技術システムの再整備を実施している。即ち従来の研究機関が改組され農業研究教育普及機構 (AREEO: Agricultural Research, Education and Extension Organization) が新設された (MINISTRY OF AGRICULTURE OF IRAN, 1994)。これは農業省の研究機関を統合し、研究から普及までを一貫して行う組織であり、従来Tehranの本省から各州の支所に有機的につながっていた各研究所の独立性 (縦の関係) を解体し、各研究所間の横の関係を強化するものである。AREEOは全州に配置される計画であり、既に主要な州 (Tehran州, Esfahan州, Fars州) では活動を開始している。Khuzestan州の場合、Safibad農業試験場を中心にAREEOの計画が進行している。

3) 3州の大規模灌漑施設

Esfahan州は、人口368万人、全面積980万ha、農耕地43万ha、灌漑面積27.5万haである (図1)。水資源に乏しく、Zagros山系を水源とする地表水だけでは不十分である。代表的な灌漑プロジェクトとしてZayandeh Rud川を利用したZayandeh Rudプロジェクト8万haがあげられ、貯水量15億m³のZayandeh Rudダム、2基の取水堰と灌漑水路網等で構成される。主な調査地のRudasht平原4.5万haは下流域に分布し、その中央部付近にAREEOのRudasht試験場がある。その他Esfahan州では灌漑可能地 (USBR分類: SOILS RESOURCES, MANAGEMENT AND CONSERVATION SERVICE, 1985) が46万ha分布している (TORII et al., 1996; 杉山, 1997MS)。

Fars州は、人口354万人、全面積1,270万ha、農耕地109万ha、灌漑面積44.2万haである (図2)。主要な水源はZagros山系に依存する。代表的なDariush-Kabir灌漑プロジェクトは貯水量8.7億m³のDariush-Kabirダムとライニングされた開水路網等で構成される。Marvdashtの北部に分布する灌漑面積4.2万haを中心で、近代的な灌漑システムとされる。一方、Kor川下流域 (Marvdashtの南側) には4基の取水堰による伝統的灌漑地域7万haが分布する。その他Fars州には灌漑可能地63万haが分布している (TORII et al., 1996; 杉山, 1997MS)。

Khuzestan州は人口364万人、全面積630万ha、農耕地106万ha、灌漑面積42.7万haである (図3)。Dez川、Karun川、Karkheh川はイラン国的主要河川であり、河川水量が豊富である。北部には、Dez灌漑プロジェクト12.5万haが分布し、貯水量33.4億m³のDezダム、Dez取水ダム、用水路、排水路で構成される。灌漑面積3.8万haのKarun灌漑プロジェクトも北部に分布する。中部には灌漑面積2.1万haのKarkheh灌漑プロジェクトと灌漑面積6千haのShavour灌漑プロジェクトが分布している。Shavour地域の中央部には前回の共同研究の試験地であったShavour土壤研支所がある (長ほか, 1977)。Khuzestan

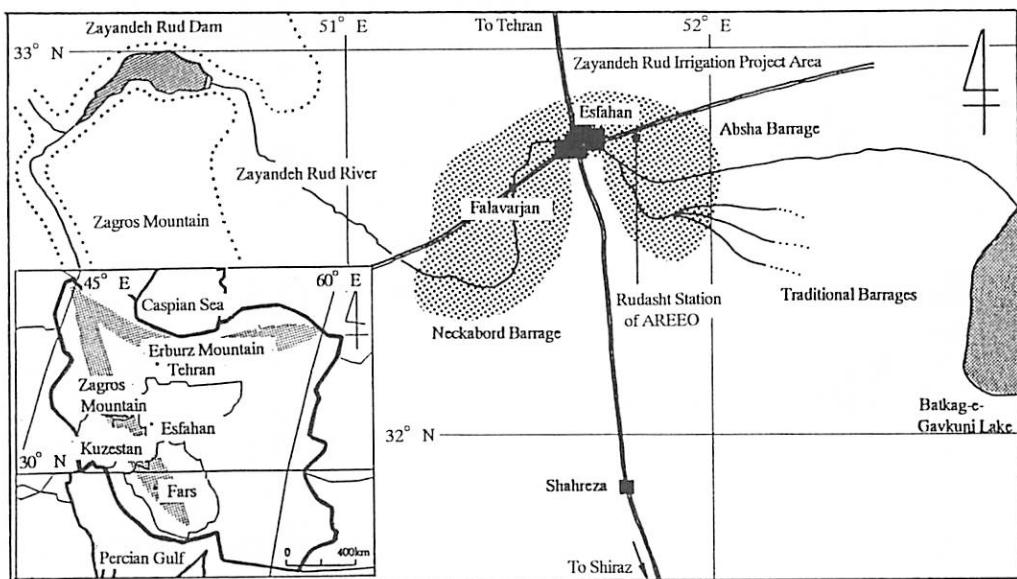


図1. Esfahan州のプロジェクト地域.
Fig. 1. Project areas in Esfahan province.

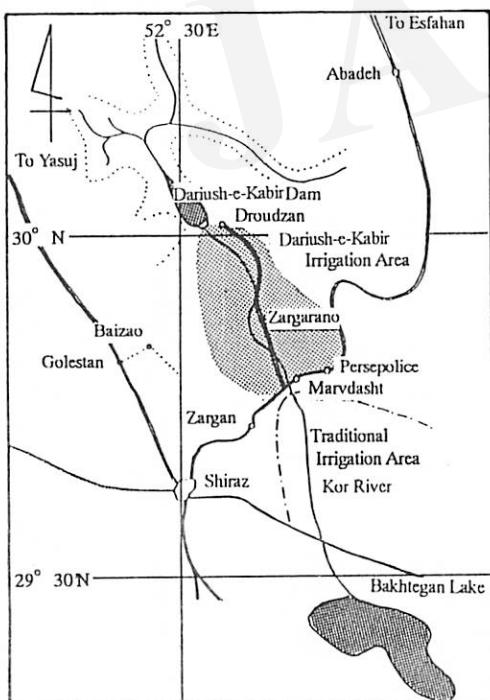


図2. Fars州のプロジェクト地域.
Fig. 2. Project areas in Fars province.

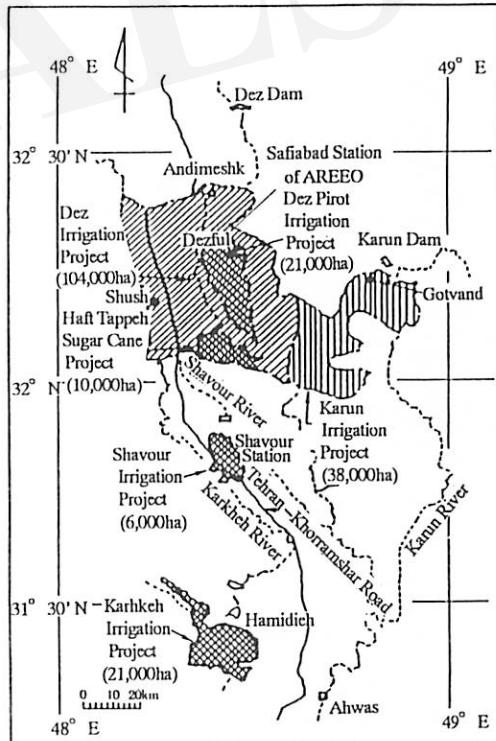


図3. Khuzestan州のプロジェクト地域.
Fig. 3. Project areas in Khuzestan province.

州は平坦な沖積大平原であり、上流域が砂壤土で農業に適しているが、中・下流域は壤土、粘質土であり、塩類・ソーダ質土壤が多い。一方、灌漑可能地270万haが分布していること、各河川において河川水源の利用効率が悪く無駄に流去していること等から、今後河川の広域的な水管理が確立されれば灌漑農業が最も期待できる州と推定される (TORII *et al.*, 1996; 杉山, 1997MS; 山本ほか, 1998a, b)。

4. 3州における灌漑農業の沙漠化特性

1) 作物の水消費と収量

3州における年間の降水量、平均気温、蒸発量 (Class A pan) を表2に示す (長ほか, 1977; MINISTRY OF AGRICULTURE OF IRAN, 1995)。高温乾燥条件はKhuzestan州が最も厳しく、次いでFars州、Esfahan州の順になる。作物の水消費量は気象条件に左右され、Khuzestan州、Fars州、Esfahan州の順序になる。一例として主要作物の粗用水量をEsfahan州の場合を表3に、Khuzestan州の場合を表4に示す (長ほか, 1977; MINISTRY OF AGRICULTURE OF IRAN, 1995)。リーチングを考慮しない場合作物根群域の塩類集積は水消費量に左右されるので (山本・藤山, 1989)、塩類化の程度は作物の水消費と同様に Khuzestan州、Fars州、Esfahan州の順序が推定される。

年間における作物栽培のローテーションは3州ともほぼ同様である。4~9月の上半期にトウモロコシ栽培の場合、10~3月の下半期はコムギ、オオムギ、テンサイ、アルファルファ等の栽培が多い。上半期がジャガイモの

表4. Khuzestan州における年間水需要量 (AREEO, Safiabad 試験場)。

Table 4. Annual gross water requirement in Khuzestan province (Safiabad station of AREEO).

Wheat*	800 mm	Cotton	2,400 mm
Barley*	650 mm	Sorghum*	1,900 mm
Corn	1,900 mm	Water Melon	1,200 mm
Sugar Beets*	1,300 mm	Melon	1,200 mm
Alfalfa	3,000 mm		

* Cultured season is winter.

場合、下半期がコムギ、アルファルファが多い。上半期がイネの場合は下半期がコムギや野菜類 (タマネギ、キャベツ等) の組み合わせになる。植付け時期は気温の低いEsfahan州では若干遅れる。Fars州の南部やKhuzestan州では冬期の温暖な気候を利用した野菜の促成栽培が盛んである。

1977年以降の農地の灌漑面積と主穀類の収量について検討した。このうち、灌漑面積の変遷を図4、コムギの生産量変化を図5に示す (MINISTRY OF AGRICULTURE OF IRAN, 1995)。全国の場合と同様に3州とも農地の灌漑面積にあまり変わりがないが、降雨依存の非灌漑面積が減少している。また、1991~1994年のコムギの生産量はFars州が5倍、Esfahan州が2倍、Khuzestan州が8倍の増加を示した。オオムギ、イネについても同様の傾向を示した。全国に対して3州は総耕地面積は15%であるが、主穀類においてコムギが26%、オオムギが24%、イネが20%の生産増を示す。反対収量はEsfahan州を100とした場合、Fars州が91~94、Khuzestan州が45~61を示しKhuzestan州の場合著しく低い。この理由として、Esfahan州とFars州では古来伝統的な集約農業が行われ

表2. 3州における年間気象データ。

Table 2. Annual climatic data in three provinces.

Province	Rainfall	Temperature	Evaporation (class-A pan)
Esfahan	100~200mm	15°C	2,000~2,400mm
Fars	300~400mm	15~20°C	3,000~3,400mm
Khuzestan	200~300mm	25°C	3,400~4,000mm

表3. Esfahan州における年間水需要量 (AREEO, Rudasht 試験場)。

Table 3. Annual gross water requirement in Esfahan province (Rudasht station of AREEO).

Wheat	915 mm	Alfalfa	2,692 mm
Barley	698 mm	Cotton	1,849 mm
Corn	1,026 mm	Sunflower	1,495 mm
Sugar Beets	2,193 mm	Rice	1,495 mm

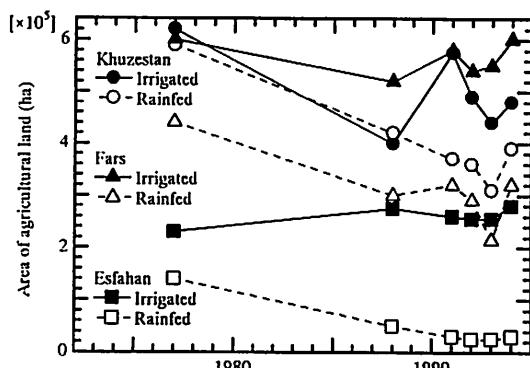


図4. イラン国の3州における農地面積の変化。

Fig. 4. Variation of agricultural land area in three provinces, Iran.

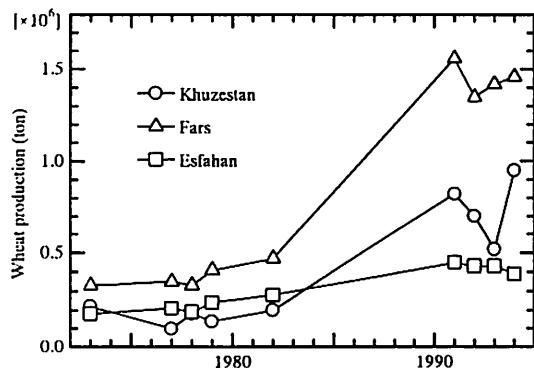


図5. イラン国における小麦生産量の変化。
Fig. 5. Variation of wheat production in three provinces, Iran.

個々の農民が高い農業技術を有すること、またKhuzestan州の気象、土壤条件等が作物栽培に厳しいことがあげられよう。

2) 水資源と水質

3州の灌漑農業では、灌漑率(灌漑面積/(灌漑面積+降雨依存面積))がEsfahan州で90%、Fars州で65%、Khuzestan州で55%に達し、前述の全国平均より高い。地表水では、大河川数の多いKhuzestan州が最も豊かで、次いでFars州、Esfahan州の順になる。一方、地下水源の利用はこの逆の順序になる(表5参照)。Esfahan州やFars州では、河川水量だけでは不足するので補充水源として地下水の利用が盛んである。特にEsfahan州は地表水が乏しく、井戸やカナートが発達している。

3州における河川水は上流域では良質であるが、いずれも下流域で塩類化が生じる。即ち、Esfahan州のZayande Rud川水系の場合、上流域の塩類濃度に比べて下流域のRudasht試験場では灌漑水が数10倍、排水が数100倍以上になる(MINISTRY OF AGRICULTURE OF IRAN, 1995)。Fars州のKor川水系では上流域の近代的用水系で数100ppmの水質を示し塩類化が少ないが、その下流

表5. 3州における地下水の利用状況。

Table 5. Groundwater resource use in three provinces.
(unit: number)

Province	Shallow well	Deep well	Kanat	Spring
Esfahan	15,741(12%)	6,359(12%)	4,672(11%)	5,513(4%)
Fars	23,802(12%)	4,808(9%)	2,555(6%)	4,743(3%)
Khuzestan	3,305(2%)	544(1%)	60(0.1%)	1,195(2%)

% shows percentage of total resource in Iran.

域の伝統的用水系では灌漑システムが古く漏水によるwaterlogging地帯が多い(MATSUBARA, 1992)。Khuzestan州のDez川水系では、上流域が数10~100ppm、中流域が数千ppm、下流域が数万ppmを示す結果が得られている(長ほか, 1977; MINAMI and PAZIRA, 1982)。

3) 農地の塩類化

Esfahan州とFars州では伝統的集約農業が行われ、小区画農地の分散や細長い屈曲した農地が多い。水管管理が不十分な農地では用排水系において次の塩類化要因があげられる。まず用水系では水路の漏水と水配分の低下が生じ、灌漑効率が30%程度に減少する(MATSUBARA, 1992)。次に排水系では排水の漏水や散逸により地下水位の上昇を生じ、waterloggingによる水質の塩類化と土壤の塩類化またはソーダ質化が発達する。

一例としてRudasht試験場における土壤分析結果を表6と表7に示す。土壤の粒度分析は国際法を用いた。イオンに関する詳細な検討は今後の課題とし、ここでは1:5浸出法を用いECと主要陽イオンを求めた。この試験地では土壤改良のため最近排水システムを設け地下水位を下げたといわれる。土壤の塩類化は地表面付近ほど顕著であった。またソーダ質化の現象は0~20cmの層において生じ粘土の分散が観察された。

Khuzestan州の場合は農地の区画が比較的大きい。しかし海岸に近い平坦な地形を形成し高地下水位地帯が多いので、低灌漑効率とwaterloggingが河川と農地の塩類化を一層促進させている。

これらの塩類化の対策として次の①~⑥の事項が提案される(表8参照)。①コンクリート・ライニングによって土水路を改良する。②暗渠から塩湖までの排水系において排水の汚染を常時モニタリングする。③農地ではリーチングや石膏を施用し、塩類土壤の改良に必要な水管管理法を確立する。④小区画農地の交換分合等の圃場整備を進め、④で後述する標準的地面灌溉システムを適用する。交換分合や古い水路・小畦を除去し潰れ地を回復することで、灌漑効率が50%、農地が50%回復するといわれる(MATSUBARA, 1992)。⑤水、土壤、營農管理を改善し、圃場の機械化の促進が必要である。⑥用水の過大利用を防ぐために一農家当たり水田耕作面積を適正規模に押さえる(AREEOでは0.5ha以内を推奨している)。

4) 灌溉とリーチング

3州では地表灌漑法が主体である。牧草、サトウダイコン、イネはボーダ法、野菜類は畦間法、果樹はベースン法が用いられる。灌漑水はダムから1次~4次用水路

表 6. 塩類土壤の粒径分析結果 (AREEO, Rudasht試験場) (国際土壤学会法).

Table 6. Particle size analysis of saline soil (Rudasht station of AREEO) (International method).

Depth (m)	Coarse Sand (%)	Fine sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Water content for dry sand (%)	Soluble ion for dry sand (%)	Soil type
0.0~0.2	0.0	8.8	42.0	49.2	8.58	55.6	HC
0.5~1.5	0.0	15.0	46.7	38.3	4.28	39.9	SiC
1.6~2.5	0.1	20.6	42.0	37.3	4.06	37.6	LiC

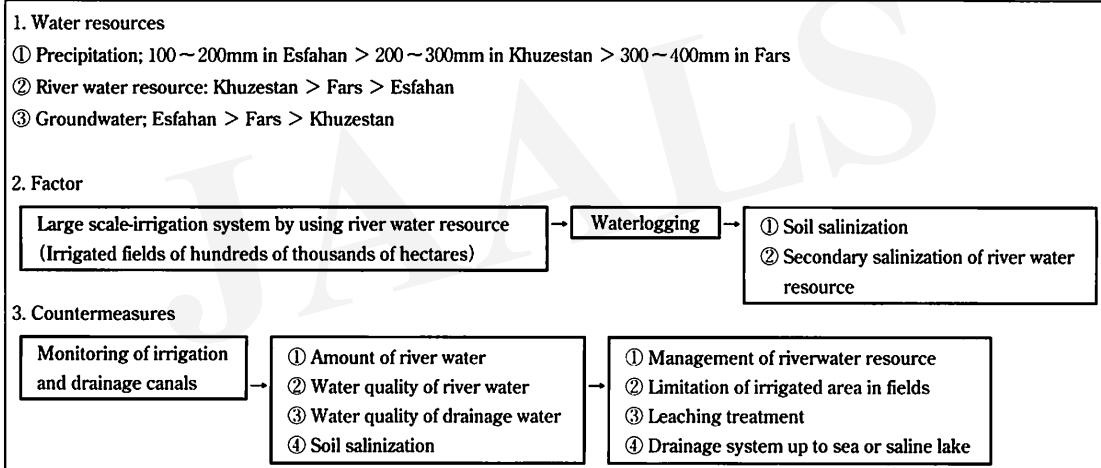
表 7. 塩類土壤の陽イオン組成 (AREEO, Rudasht試験場).

Table 7. Cation composition of saline soil (Rudasht station of AREEO).

Depth (m)	EC(1:5) Ds/m	pH	Na ⁺ meq/100g	Ca ²⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	
0.0~0.2	66.3	8.7	436.133	35.835	1.099	0.058	Clay dispersion
0.5~1.5	29.1	8.5	237.876	7.453	0.410	0.058	Non-clay dispersion
1.6~2.5	25.6	8.8	124.498	10.985	0.347	0.058	Groundwater-2.5m

表 8. 灌溉農業に伴う沙漠化の要因と対策.

Table 8. Factor and countermeasures of desertification due to irrigation agriculture.



と末端給水路を経て適用される。この用水システム系に対し、排水処理を考慮して次のような標準的地面灌漑システムを提案する(図6, 表9参照)。一灌漑圃場の大きさは300m×500m=15haにする。一回の灌水時には仮畦を10m間隔に設け、最小灌水区を1,500m²(=150m×10m)にする。灌漑時間24hr/dayにおいて、用水量は畦間法が0.67 l/s/ha(5.8mm/day)、ペースン法が1.2 l/s/ha(10.4mm/day)と考える(長ほか, 1977; MATSUBARA, 1992)。用排水路の配置間隔は、末端の用水路と排水路が300m、農道が用排水路に沿って短辺150m×長辺500mの配置にする。

乾燥地では灌漑と同時に農地に集積した塩類のリーチ

ングが不可欠となる。灌漑によって増加した地下水位は暗渠によって適正な水位まで調整される。地下水の適正水位として、Shavour支所では地表面から2.0~2.5m、Rudasht試験場では2.5m程度が推奨されている(長ほか, 1977; MINISTRY OF AGRICULTURE OF IRAN, 1995)。排水はまず暗渠から末端排水路に排出される(図6参照)。次に4次~1次排水路を経てスムーズに海や塩湖に至る必要があり、この過程をモニタリングすることが提案される。塩類は最終的にZayande Rud川ではBatkag-e-Gavkuni塩湖、Kor川ではBakhtegan塩湖、Khuzestan州の場合ペルシャ湾へ直接排出されることが重要になろう(山本, 1997)。

表9. 標準的な地表灌漑法の諸元値。
Table 9. Dimension of standard surface irrigation system.

Type of canal	Water requirement	Irrigated area	Field number
Irrigation ditch	20~24 l/s (0.67~1.2 l/s/ha)	500m × 500m = 15ha	①~⑤
Quarterly canal	52.5~90.0 l/s	500m × 1,500m = 75ha	(1)~(10)
Tertiary canal	0.5~0.9 m ³ /s	1,500m × 5,000m = 750ha	(I)~(II)
Secondary canal	2.0~3.6 m ³ /s	5,000m × 6,000m = 3,000ha	—
Main canal	16.0~29.0 m ³ /s	6,000m × 40,000m = 24,000ha	—

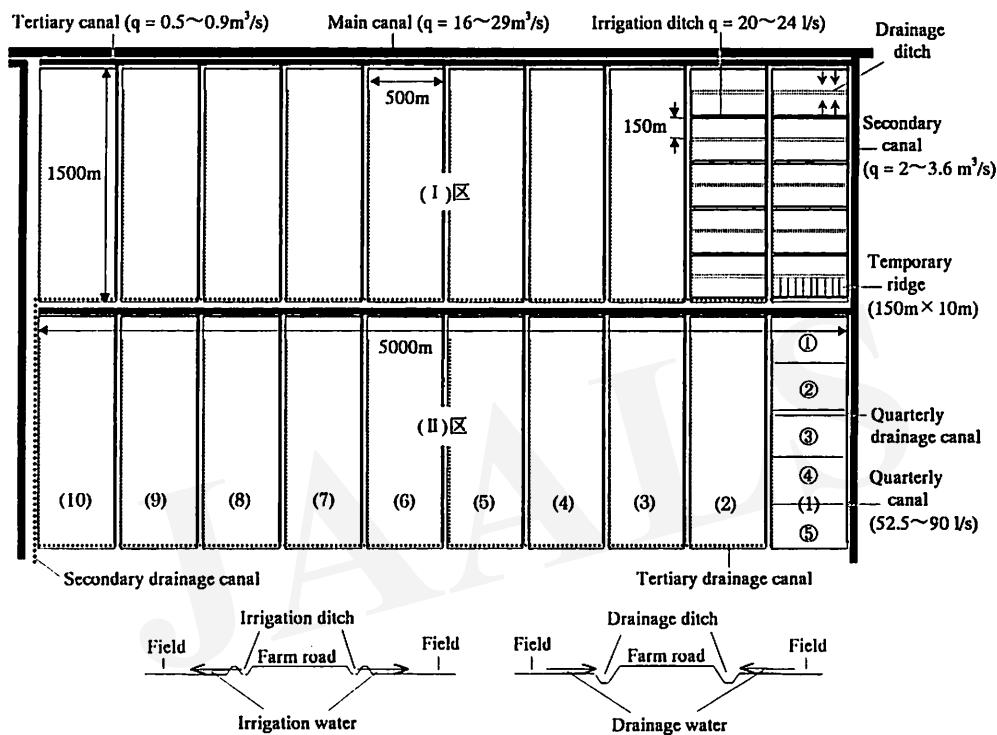


図6. 3,000haの農地を対象にした標準的地表灌漑システム。
Fig. 6. Standard surface irrigation system in the field of 3,000ha.

5. 総括

ここではイラン国的主要な灌漑農業地帯が分布するEsfahan州、Fars州、Khuzestan州の沙漠化、特に灌漑農業に伴う塩類化特性について検討し、二、三の灌漑排水対策を提案した。3州はいずれもザグロス山系と同じ水源にし、河川を利用した大規模灌漑農業が発達している。一方、圃場と河川の塩類化は一層深刻な様相を示す。人口増に伴う主穀類の生産増、食生活の向上に伴う野菜・果樹類の生産増、商品作物の普及等により灌漑面積と灌

漑水量が増加し、waterloggingによる水源や農地の塩類化が著しい。それぞれの灌漑プロジェクト地域では圃場内において川排水が分離されてはいるが、平坦な地形で地下水位が高いため最終的に排水が河川に流入する。このような河川利用方式では、各河川とも下流の塩類濃度が増加し、下流域における灌漑プロジェクトほど水源の塩類化が進む。河川水源の塩類化対策として、農地の土壤劣化に不可欠な水管理、土壤管理をきめ細かく実施し、地域全体の河川・土地利用を考慮した広域的な灌漑排水計画と同時に、河川の水量、水質を常時モニタリングすることが必要である。

最後に、本研究の一部は平成7年度の文部省国際学術研究（学術調査、課題番号07041142）によるものである。イラン国の現地調査に参加された神近牧男教授（乾地環境学；鳥取大乾燥地研究センター）、林 静夫助教授（水文学分野；九州大熱帯農学研究センター）、新村義昭助教授（林学分野；島根大生物自然科学部）からは貴重なコメントをいただいた。ここに深く謝意を表する。

引用文献

- 長 智男・矢野友久・神近牧男・松本 聰・山本太平（1977）：『中近東乾燥地域の農業開発に伴う灌漑方式と水管理に関する調査研究』文部省海外学術調査報告。
- 原 隆一（1996）：イラン、東部地方の地下水灌漑。堀井健三・篠田 隆・多田博一編『アジアの灌漑制度、水利用の効率化に向けて』新評社、389-417。
- 国際農林業協力協会（1993）：『農林水産業協力便覧—中近東・北アフリカ編』
- 中島健一（1983）：『灌漑農法と社会=政治体制』校倉書房。
- 中川陽子（1996MS）：イラン革命政権の農政と農業発展の実態。東京外国语大学ペルシャ語学科卒業論文。
- 佐野文彦（1995）：『世界の小規模灌漑の概観』農業土木機械化協会。
- 杉山 靖（1997MS）：衛星画像の適用によるイラン国大規模水利システムの機能と評価に関する研究。鳥取大学農学研究科修士論文。
- 山本太平（1997）：乾燥地の灌漑農業における持続的発展—砂漠化と灌漑計画—。日本砂丘学会市民公開講座、砂丘研究の明日を目指して、40-48。
- 山本太平・藤山英保（1989）：乾燥地における砂漠緑化と農業開発（その4）—塩類特性とリーチング技術—。「農業土木学会誌」57-1: 53-60。
- 山本太平・鳥井清司・アバス ケシャバル・エブラヒム バジラ・池浦 弘（1998a）：イラン国クーゼスタン州における灌漑農業と塩類問題—乾燥地の灌漑農業における持続的発展—。「日本砂丘学会誌」45-1: 11-14。
- 山本太平・鳥井清司・アバス ケシャバル・エブラヒム バジラ・池浦 弘（1998b）：イラン国クーゼスタン州のシャブル地域における灌漑の用水計画—乾燥地の灌漑農業における持続的発展を目標にして—。「水文・水資源学会誌」11: 387-395。
- MINISTRY OF AGRICULTURE OF IRAN (1991) : *Prospect of the Iranian Agricultural Engineering Research Institute.*
- MINISTRY OF AGRICULTURE OF IRAN (1995) : *Agriculture Year Books, 1991-1992, 1992-1993, 1993-1994, 1993-1995, 1995-1996.* Statistical & Information Department.
- MATSUBARA, Y. (1992) : *Observation-study Report on Land Conservation in Fars and Esfahan Provinces.* The Feasibility Study Team for the Irrigation and Drainage Project in the Haraz River Basin, JICA.
- MINAMI, I. and PAZIRA, E. (1982) : *Irrigation and Desalinization in Iran.* 白川書院新社。
- PAZIRA, E. (1995) : County report on resources (soil & water) potentiality, limitations and utilization in agricultural sector of Iran. *Regional Workshop on Improved Water Management Technologies for Sustainable Agriculture in Arid Climates, Cairo, Egypt,* 25-29.
- PLAN & BUDGET ORGANIZATION STATISTICAL CENTER OF IRAN (1993) : *Iran Statistical Yearbook, Mar. 1992~Mar. 1993.*
- SOILS RESOURCES, MANAGEMENT AND CONSEVATION SERVICE (1985) : Guidelines; Land evaluation for irrigated agriculture. FAO Soils Bulletin, 55: 103-109
- TORII, K., YAMAMOTO, T., KAMICHika, M., OTSUKI, K., HAYASHI, S., SHINMURA, Y. and HOSHI, T. (1996) : Application of satellite image data to large-scale water use system in arid areas of Iran. *Proc. 17th Asian Conference on Remote Sensing, Colombo, Sri Lanka,* 1-8.

Desertification and Salinity Problem in Iran
– Sustainable Development in Irrigated Agriculture in Arid Land Areas –

Tahei YAMAMOTO*, Kiyoshi TORII**, Abbas KESHAVARZ***
 Ebrahim PAZIRA**** and Hiroshi IKEURA*

Compared to the results obtained by the joint research with Iranian Soil Research Institute in 1974 ~ 1978, recent desertification is discussed in the Provinces of Isfahan, Fars and Khuzestan in Iran, where salinity due to irrigated agriculture is the most serious problem. In those Provinces, irrigated agricultures were originally developed by using the large-scale irrigation projects with rivers whose water source went up stream to the Zagros Mountains. Due to the increase in crops production with population during the past 20 years after the revolution, irrigated farms and water resources became more seriously polluted from salinization caused in agricultural areas by waterlogging and in rivers contaminated with drainage water, respectively. It is recommended as a countermeasure of soil and water salinization to carry out the practices of water and soil managements delicately in the distributed farm, as well as the practice of planning and monitoring for irrigation and drainage in the wide-project areas including human societies.

Key Words : Large-scale irrigation project, River water resource, Waterlogging, Sodic soil, Surface irrigation system, Drainage system

* Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori 680-0001, Japan.

** Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake, Sakyo-ku, Kyoto 606-8224, Japan

*** Iranian Agricultural Research, Education, Extension Organization, P.O.Box 111, Tabnak Av., Tehran, Iran.

**** Iranian Agricultural Engineering Research Institute, P.O.Box 31585-845, Karaj, Iran.

(Received: May 4, 1998; Accepted: October 6, 1998)

中国東北西部および内蒙古東部草原の沙漠化の現状と回復対策

川鍋祐夫*・南 寅鎧**・押田敏雄***・寇 振武**・蒋 德明**

1. はじめに

世界の乾燥地域（約5,200万km²）の88%は放牧草地として使われ、残り12%が灌漑農地および非灌漑農地として利用されている。乾燥地の大部分は放牧草地として利用されているのである。それら草地、農地中程度以上の沙漠化や土壤劣化を受けている土地の面積割合をみると、放牧草地は73%を占め、灌漑農地および非灌漑農地はそれぞれ、30%および46%を占める（安部ほか、1994: 128-129）。広い面積の放牧草地の大部分が沙漠化の被害を受けているのである。これらのこととは、地球の沙漠化阻止や沙漠化した土地の回復を考える場合、放牧草地、すなわち草原が極めて重要な対象であることを示す。草原の沙漠化過程を考えてみると、まず植生の軽微な退化、生産量の低下から始まる。退化が進行すると、植生の破壊、生産の激減、土壤の浸食・劣化、そして終局が沙漠となる。沙漠化阻止、綠化修復のためにには、植生の退化を早期に診断し、対策を講ずることが必要である。筆者らが前から現地調査を行っている中国東北部および内蒙古の一部地域について、草原植生の退化に関する情報を得るために文献調査を行った。

この地域の草原退化の激しさの概況を述べると、東北平原のうち、東北西部および内蒙古東部の草原は黄土高原やチベット高原に比べ生産力が高く、牧畜業が発展していた地域である。しかし最近の40年～50年間に広義の沙漠化、すなわち草原植生の退化、土壤の塩性化（塩化）および移動沙丘など飛沙による土地被覆（沙化）が進み、土地生産力の低下が憂えられている。一例として著者の一人南 寅鎧の体験を述べれば、かつては1.2mあった草高が最近は0.5mになった。また、1950年代以前には火入れが広く実施され、現在は行われなくなつたが、草原の退化はそれに関係している。当時は草がよく茂り、利用しきれないで残草ができた。枯れた残草は採

草や家畜の採食の邪魔になるので焼いて除いていた。しかし現在は残草ができないので、火入れの必要がなくなったのである。

この地域では草原の退化、その防止、回復法について多くの調査、研究が行われてきた。本報はそれらの報告を収集整理して沙漠化の現状と回復対策について記述する。問題とするのは、主として1950年代以降の人為の影響による沙漠化、特に草原の退化で、退化前の植生、退化草地の面積、地上生物量（現存量）、退化の直接原因および退化植生の実際的回復法である。

2. 調査対象地域の概況

対象地域は、北緯42°30'～59°30'、東経115°30'～120°30'に位置する。黒龍江省、吉林省および遼寧省の西部と、内蒙古東部のフルンベル（呼倫貝爾）盟、シンアン（興安）盟、ゼリム（哲里木）盟、赤峰市（元のチオウタ盟）が含まれる。その土地総面積は67万km²、全体の約半分を占める32.9万km²は草原で、フルンベル高原、松嫩平原（東北平原）、カルチン（科尔沁）沙地等を含む。地域の人口は3,100万人、家畜頭数は1,600万頭で、その85%は内蒙古東部で飼養されている。

3. 調査対象地域の自然条件

当地域の自然条件および農業形態は、表1に示すように東部と西部でかなり異なっている。通例黒龍江省のチチハル（齊齊哈尔）と内蒙古ゼリム盟の通途とを繋ぐ線を基準として東部と西部とに分ける（図1）。地勢は西部地区はフルンベル高原で海拔500m～1,000m、東部地区は海拔50m～100mの松嫩平原で、西から東に向って低くなる。東部地区は西部地区より湿润で、無霜期間が長い。

* 中国内蒙古沙丘・草原綠化研究会

** 中国科学院沈阳应用生态研究所

*** 麻布大学獣医学部

(受付：1998年6月24日、受理1998年10月22日)

表1. 研究対象地域の地形、気候、土壤条件および農業形態。(川鍋ほか原表)

東 部*	西 部**
地 形	主に平原地形、局部的に低い沙丘と沙地
気 候 型	大陸性温帶湿润気候
降 水 量	400~500mm, 7~8月に集中
平均気温	2~4°C
無霜期間	110~160日
土 壤 型	主に炭酸塩チャルノーゼム 塩基性土壤と湿草原土壤
地下水平位	主に2m以上、低地は1~1.5m
農業形態	半農半牧經營

* 黒龍江省西部、吉林省西部、遼寧省西部

** 内蒙古東部(フルンベル盟、シンアン盟、ゼリム盟)、赤峰市

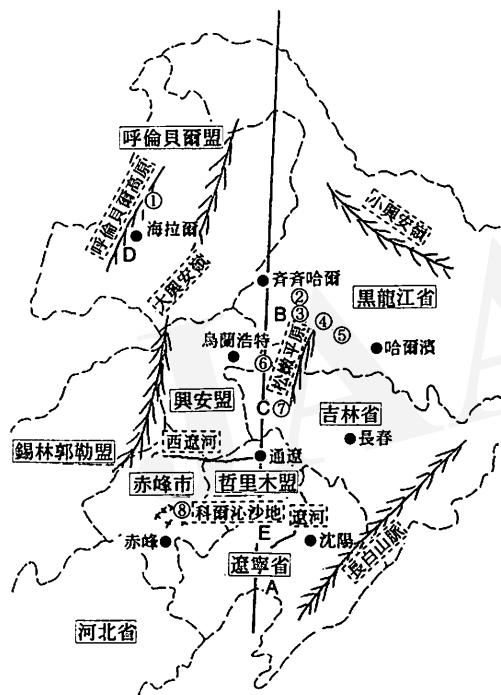


図1. 本稿の対象地域(中国東北部、内蒙古東部)の行政区画と地名。

- ①陳巴爾虎旗、②林甸、③泰康、④大慶、⑤安達、⑥乾安、
 ⑦長嶺、⑧烏蘭浩特
 A: 遼河下流、B: 黑龍江省西部、C: 吉林省西部、D: フルンベル草原、E: 遼寧省西部

1) 東部地区的草地植生とその退化

東部地区的原植生は森林が草原に移行する meadow steppe である。人為による退化前の主な植生型はハネガヤ (*Stipa grandis*) 草原、ノゲナガハネガヤ (*S. baicalensis*) 草原、ヨモギギク (*Tanacetum sibiricus*) 草原およびシバムギモドキ (*Aneurolepidium chinense*) 草原で、所々にノ

ニレ (*Ulmus pumila*) の林が生えて、サバンナ状の特別な植生景観を構成していた。

当地区の現植生の全般的特徴は、塩性土壤(塩類土壤およびアルカリ土壤、中国では塩土、鹹土という)が多く、それに伴って耐塩性植生が多く分布していることで、シバムギモドキ群落、コゴメヌカボガヤ (*Puccinellia tenuiflora*) 群落およびモウコマツナ (*Suaeda corniculata*) 群落から構成される塩性植物群落のモザイクがみられる。これらの多くは過度の放牧利用によって発生した二次的な塩性群落(原生植物群落が土壤の塩性化によって塩性群落におきかわったもの)で、土地の僅かの高低差に対応して土壤塩性が異なり、裸地化したアルカリスポットを中心とした同心円構造の分布がみられる。この地区的草地の著しい退化の方向は、土壤の塩類化・アルカリ化と、それに伴って耐塩性でない植物が衰退、消滅し、耐塩性植物や塩性植物(halophyte)におき代ることである(川鍋・祝, 1991; 川鍋ほか, 1993)。

地区別に草地植生を細かくみると次のようである。

①遼河下流地区では塩性土壤が広く分布し、シバムギモドキ群落、ツルオニシバ (*Aeluropus litoralis*) 群落とマツナ (*Suaeda spp.*) 群落が主となっている。

②黒龍江省西部地区では草地の大部分、77.5%が退化し、退化草地に対する割合は塩性化草地が16%、沙化草地が10%を占める。退化草地のうち22.6%は重度退化している。重度退化とは、生産量が40%~50%以下に低下、または塩性土壤による裸地が1/3以上の面積を占める場合である。

③吉林省および遼寧省西部の退化草地の面積割合は、表2に示すように黒龍江省西部ほどではないが、それでも45.4%および39.4%の広い面積を占めている(張, 1988)。

表2. 中国東北部および内蒙古東部の草原退化面積. (張, 1988)

地 区	土地面積 (万ha)	退化面積 (万ha)	退化面積の割合 (%)
黒龍江省西部	214.6	166.3	77.5
吉林省西部	186.7	84.7	45.4
遼寧省	224.4	88.4	39.4
フルンベル草原	995.0	245.7	24.7
カルチン沙地草原	1,208.0	552.0	45.7
大興安嶺*	459.4	124.0	27.0
計 (平均)	3,288.1	1,261.1	38.3

* 東部低山丘陵地帯 ** うち沙漠化草地9.3%, 塩性化草地15.5%

2) 西部地区の草地植生とその退化

①フルンベル草原は、典型的なステップ地帯に属し、退化前の植生はハネガヤ (*Stipa grandis*)、ノゲナガハネガヤ (*Stipa baicalensis*) 等を優占種とするハネガヤ草原が広く分布していた。その他ヨモギギク草原とカリヤス-ミノボロ (*Cleistogenes-Koeleria*) 草原の分布も少なくない。局部の沙地にはモウコアカマツ (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) の林が所々に分布している。全草原面積は9.95万km²で、そのうち低山丘陵と高平原に分布する草原が36.7%、低地草原が19.0%、沙地草原が10%を占めている。

②カルチン沙地草原は、内蒙古赤峰市とゼリム盟に分布している。沙地の所々にはノニレ林とオオミノニレ (*Ulmus macrocarpa*) 林が分布し、局部残丘（沖積物、風積物に被覆されない部分的に残った丘）にはアカマツ-ナラ (*Pinus-Quercus*) 林が分布して、カルチン沙地の原植生は森林-草原の移行地帯であることを示している（王作詳, 1985）。

退化前の植生は、ノゲナガハネガヤ草原とカリヤス-ミノボロ草原が広く分布し、低地にはシバムギモドキ草原が多い。

固定沙丘にはアオムレスズメ (*Caragana microphylla*) を主とする低木林が広く分布していた。しかし、過度の放牧利用に伴って固定沙丘が半移動沙丘に、半移動沙丘が移動沙丘に変り、低地には塩性植物群落が形成されて地区の外観は沙漠景観に似てきている。この地区的退化の最大の原因是、飛沙の移動・堆積、すなわち沙化である。

③大興安嶺東部低山丘陵地区の草原は、内蒙古シンアン（興安）盟に属する草原である。退化前はハネガヤ草原とヨモギギク草原が広く分布していた。

これら草原の面積と退化草地の割合は表2に示すようだ。24.7%~45.7%の面積が退化している。

4. 草地の生産力

草地の生産力は植生退化の程度によって、また、同じ草地植生型の草地でも地形、土壤によって異なっている。

草原は刈り取りして乾草を調製する採草地として、または羊などを放牧する放牧地として利用されている。草地学では採草地の生産力は、最もよく繁茂した時期に一定面積の草地の地上部の乾量（地上生物量、以下生物量）を測定してkg/haで表わしている。放牧地の生産力は一定面積の草地で養える羊などの頭数、または一頭の羊などを養える草地面積（牧養力）で表わす（高野ほか, 1989: 250-256）ことが多いが、正確な調査には困難を伴うのであまり実施されていない。ここでは採草地の生産力（生物量）だけを述べる。

①中国科学院内蒙古寧夏総合考察隊（1974）によれば、寧夏の生物量はシバムギモドキ草原は1.300t/ha~3.066t/ha、ハネガヤ草原は1.13t/ha~2.22t/ha、ヨモギギク草原は0.986t/ha~1.956t/haであった（表3）。1960年代の生産力は今日より高かったとみられる。

②松嫩平原に属する黒龍江省西部の草地の生物量の平均は2.124t/haとの高い数値の報告がある（張, 1988）が、この調査には湿草原、沼地や谷状地など生産性の高い草地を含んだ平均であるからであろう。

③黒龍江省の泰康、林甸、安達などの生物量は、1950年代初期に3.0t/haであったが、1960年代には2.25t/ha、1980年代になると約0.75t/haとなり、1950年代のそれぞれ75%, 25%に低下したとの報告（葉, 1988）がある。

④黒龍江省西部の草原の生物量を調査した陳の報告（陳, 1988）をまとめると表4のようである。シバムギモドキ草地やノガリヤス (*Calamagrostis angustifolia*) 草地は、2.6t/haレベルの高い生産をあげている。しかし、他の5草地はその50%程度の1.2t/ha~1.6t/haの生産量で、退化した草地の生産を表わしていると考えられる。

表3. 研究地域西部の地区・地形別の草地類型の地上生物量 (t/ha). (中国科学院内蒙古寧夏総合考察隊, 1974)

地 区	草地の類型	地 形		
		山 地	丘 陵	平 原
フルンベル盟	シバムギモドキ*	1.773	1.841	2.361
	ハネガヤ**		1.408	1.130
	ヨモギギク***	1.956	1.248	0.986
ゼリム盟	シバムギモドキ	3.066	1.856	1.858
	ハネガヤ	2.450	1.637	1.141
	ヨモギギク	1.575	1.667	—
赤峰市	シバムギモドキ	1.300	1.980	2.121
	ハネガヤ	1.670	1.660	2.220
	ヨモギギク	1.620	1.225	1.567

Aneurolepidium chinense*, *Stipa grandis*, ****Tanacetum sibiricus*

表4. 黑龍江省西部草原の地上生物量 (t/ha). (陳, 1988)

草地類型	地上生物量
シバムギモドキ ¹⁾ —草類	2.655
シバムギモドキ—オヒゲシバ ²⁾	1.327
ケトダシバ ³⁾ —草類	1.239
ケトダシバ—草類 (アンズ ⁴⁾ が散生)	1.593
コゴメスカボガヤ ⁵⁾	1.239
ハネガヤ ⁶⁾ —カリヤス ⁷⁾	1.416
ノガリヤス ⁸⁾ —草類	2.600
栽培牧草 ⁹⁾	3.540～6.195

¹⁾*Aneurolepidium chinense*, ²⁾*Chloris virgata*, ³⁾*Arundinella hirta*, ⁴⁾*Armeniaca sibirica*, ⁵⁾*Puccinellia tenuiflora*, ⁶⁾*Stipa grandis*, ⁷⁾*Cleistogenes squarrosa*, ⁸⁾*Calamagrostis angustifolia*, ⁹⁾*Aneurolepidium chinense*, *Medicago sativa*, etc.

栽培牧草 (アルファルファなど) は 3.5t/ha～6.2t/ha の最も高い生産量である。また同氏によると、同地区的草原 1 haあたりの畜産物の年平均生産額は 268.5 元である。これは 1988 年頃の羊 5～6 頭の価格に相当し、かなり高い牧養力を示している。

⑤吉林省西部草原の生物量は、1950 年代頃は 2.25t/ha～3.00t/ha であったが、1980 年代では 0.75t/ha～0.90t/ha で、1950 年代の 30% 程度に低下している (何ほか, 1988)。

⑥内蒙古赤峰地区的草原は退化が著しく、退化草地の面積は 70% を占め、沙化した草地面積は 28.5% を占めている。同地区的烏蘭敖都の生物量は、1950 年代には 2.2 t/ha～3.0t/ha であったが、1980 年代では 0.75t/ha～1.50 t/ha になった (南, 1988)。ここでは生産量は 34%～50% に低下している。

⑦西遼河流域のシバムギモドキ草地の生物量は、1962 年には 2.129t/ha であったが、1978 年には 0.89t/ha に低下したとの報告がある (兆, 1982)。ここでは生産量は 16 年間に 41% に低下している。

⑧フルンベル高原のチンバルフチ (陳巴尔虎旗) におけるシバムギモドキ-ズズメノチャヒキ (*Bromus inermis*) 草原では、1975 年の調査では草丈が 50cm～60cm あり、優良牧草が 70% を占め、生物量は 3.54t/ha であった。しかし、1981 年には 0.661t/ha～0.885t/ha であった (初ほか, 1985)。6 年間に 18%～25% に激減している。

このように大部分の草地の地上部生物量は、1950 年代より低く、その割合は 1/2～1/5 になっている。この理由は、単純に草地群落の退化の場合もあるが、土壤の塩化や沙化に起因する場合に、特に生産の低下が著しい。

5. 草地退化の主要原因

人口の増加に伴う家畜の増加や土地開発に伴う森林伐採は、地域生態系を破壊し、地域の沙漠化を来たした一大原因であるが、ここでは直接草地の退化、塩化、沙化に影響した原因についてのみ述べる。

1) 草地の開墾

中国の農耕民の伝統的観念は、草が生えている土地を荒れ地とし、荒れ地は農業用地に開拓できると考えた。それゆえ開墾の対象は草地であって、そのうちでも土壤肥沃度の高い草地、すなわち優良牧草が茂り、生物量が高い草地を開墾して農地とした。当地域の伝統的産業は主に半農半牧または牧畜業であったが、農耕民の移入や人口の自然増により耕地と食糧の要求が増大し、広大な草原が開墾された。

開墾は二つの面で草地の沙漠化に影響した。一つは草地面積の減少である。狭くなった草地では、食糧の要求增大の故に、草地の牧養力以上の家畜を放牧する過放牧が草地の退化を來した。

他は耕作放棄の悪影響である。内蒙古ゼリム盟の一部、沙地草原地区では、何年か作物を栽培し、土壤の肥沃度が衰えて収穫が少なくなるとその耕地を放棄して、また新しい草地を開墾する輪換耕作法が古くから行われた。植物の被覆を失った裸の土地は土壤の侵食、流亡を起こし、自然のままでは植被の回復が難しい。当地では一畝を開墾すると、三畝が沙漠化するといわれ、沙漠化された土地の 27% は、このような無理な開墾によるとされている (南, 未発表)。以下は開墾が悪影響を及ぼした事例である。

表5. 吉林省白城地区における耕地と草地の面積（万km²）および家畜頭数（万頭）の変化。（何ほか、1998）

年	草地面積	耕地面積	家畜頭数
1944	2.666	—	34.8
1950	2.111	1.216	—
1980	1.551	1.730	—
1984	1.377	—	77.4

①黒龍江省西部草原の面積は、1963年には2,933km²であったが、開墾により1978年には1,733km²に、つまり59%に減少した。このため羊1頭あたりの草地は0.31haに過ぎなくなった（李景信、1985）。

②吉林省白城地区の例は表5に示すように、1944年から1984年の間に草地面積は約半分に減ったのに家畜頭数は2.2倍に増加し、その結果1ヘクタールあたりの家畜頭数は1.3頭から5.6頭に、4.3倍に増加した。また、耕地面積が1950年から1980年に142%に増加したのに対し、草地面積は逆に73%に減少した（何ほか、1988）。

2) 草地の不合理な利用

当地域の牧畜は自然にまかせて家畜を養う伝統的放牧方式が行われてきた。自然草地の生産は季節により、年によって異なるが、それに関係せず草地を休ませることなく、継続して家畜を放牧している。特に草地面積が次第に縮少される一方、家畜頭数は次第に増加させようとする情況の下ではどうしても放牧強度が高くなる。過放牧により優良な牧草が次第に減り、劣等な草が増えて生産力が低下する。さらに過放牧が進むと劣等な草も消えて所々に裸地ができ、部分的に沙化、塩化を起こすようになる。以下に退化の一、三の事例を述べる。

①内蒙古赤峰市では、過放牧により放牧地の面積833km²のうち41.3%が土壤の二次的塩性化により、低被度、低生産の塩性草地となっている。連続放牧による家畜の踏みつけと採食のため、土壤の理化学性が悪化し、植生被度が低下、害草、毒草、雑草が増加し、草地の退化を招いた（南、未発表）。

②吉林省長嶺県の調査によると、放牧地は採草地より優良牧草が10%～20%少なく、劣質の草が10%～30%多く、草丈は1/2～1/4低く、被度は1/2～1/3に低下し、生物量は1/2～1/5に減っている（楊文臣、1988）。春から秋まで連続放牧を行っている放牧地の退化が、秋に1回だけ刈り取りする採草地より著しいことは内蒙古赤峰市の烏蘭放牧でも認められた（川鍋ほか、1994）。

③シバムギモドキ草地における放牧試験によれば、放

牧は牧草の成長、発育に影響を及ぼし、種子生産量を低下させた。採草地でも長期間の刈り取りは、植生の密度が高くて種子生産量に大きな影響を与える（楊允菲、1988）。このことは草地の更新に影響し、退化をひき起す。

④吉林省乾安県の調査によると、1960年代にシバムギモドキが優占する草地であったが、1981年にはすっかり退化し、優占種がおき代っていた。すなわち、シバムギモドキは0.1%に過ぎず、アサギリソウ (*Artemisia frigida*) が30%，チチクサ (*Euphorbia humifusa*) が20%，ノゲナガハネガヤが20%，その他草類が8.9%であった（李森林、1988）。これは過放牧等の不合理な利用により草地が退化した典型的な例である。

3) 薪の採取

対象地域の農村では燃料の不足が大問題で、直接、間接に農・牧畜業の発展に影響を与えている。

①黒龍江省西部草原地区では、作物の藁稈類の80%，草地の草の50%とヨシの20%が農家の燃料として用いられている。そのため土壤に還元される有機物が少なく、土壤の瘠薄化と草地の退化を来している（葉、1988）。

②内蒙古赤峰市の烏蘭放都東部は沙地草原で、牧畜を主業とする地区である。1950年代以前は灌木を切って主な燃料とし、牛糞をもって補充していたが、1970年代になると灌木は少なくなり牛糞を主な燃料とした。ところが1980年代では灌木と牛糞では足りなくなってしまった。木の落葉と草を主な燃料にするようになった。

どこの牧畜地帯でも、秋から春にかけて熊手で枯れ草を掻き集めている人がみられる。これは燃料の採取で、枯れ草が有機物として土壤に戻るのを妨げるだけでなく、草の根を傷つけて草地の退化を促進している。

4) 薬草の採取

以上の3点が草原退化の主な原因であるが、薬草の採取も無視できない原因の一つである。この地域は漢方薬に多く用いられる甘草 (*Glycyrrhiza uralensis*)、麻黄 (*Ephedra distachya*) の著名な野生地である。黒龍江省大慶では甘草の根1kgを堀り取ることにより0.5haの草地が破壊され、麻黄1kgを刈り取ることにより0.15haの草地が破壊されるという。1982年のある1日の観察では、何千人もの人が草地に入って薬草取りを行っていた。15%の草地が薬草取りによって破壊されているとの報告もある（吳浜生、1985）。

6. 退化草地の改良対策

草地を合理的に利用して退化を予防することは極めて重要である。他方、上述のように既に退化草地が広く分布し、20%～50%も生産量が低下している現状では、それを改良する、あるいは保護して回復させることも緊急の課題である。退化草地の改良に実施されているのは次のような方法である。

1) 牧柵で囲って保護する（封育復土）

家畜の採食および刈り取りを一定期間禁止し、草地を保護すると、自然の治癒力により疲弊した土壤、植生が回復してくれる。中国ではこれを封育復土といい、1960年代初期に提案されたが、普及されたのは1970年代になってからである。現在、全国的に実施される基本的な回復法となった（南ほか、1989）。多年の過放牧によって退化した草地は、優良草種が減って劣等草種が増え、生産量が少なくなっている。そればかりでなく、家畜の踏圧を長期間受けて土壤の物理性が低下している。封育復土により土壤物理性が改善され、優良植物の成長が促進される。このため、中等度に退化した草地では、一般に3年～4年の封育復土により元の1.7倍～2.2倍の生産に増加させることができる（南ほか、1989）。ただし、著しく退化し肥沃な表土が失われたり、原植生要素の多くが失われた場合には、土壤肥沃度の回復と新しい種の侵入に年月を要し、回復に長期間を必要とする。この方法により改良した烏蘭放牧地区の事例を以下に紹介する（南、未発表）。

①元はカリヤス・ミノボロ草地であったが、退化して1年生イネ科植物が主となり多年生牧草が散生していた草地に対し、封育復土を15年間行った。15年後に被度は25%から80%に増加し、生物量はヘクタールあたり450kgから1,875kgに、約4倍に増加した。

この間の元の植生類型に復帰するまでの植生変化の過程をみると、1年生イネ科植物（エノコログサ *Setaria* spp.、メヒシバ *Digitaria* spp.など）が消失する段階、根茎性イネ科植物（*Aneurolepidium* spp., *Calamagrostis* spp.など）が優占種となる段階、そして小灌木が混生して叢生性イネ科植物（カリヤス、ミノボロなど）が優占種となる段階の3段階が観察された。

②元は固定沙丘であったが、過放牧によって破壊され、沙漠景観となっていた沙化草地を20年間封育復土を行った。上記と同様の遷移段階を経て、20年後には半灌木のヨモギ (*Artemisia halodendron*) を優占種とし、多

種の草類を伴う草地に発展した。草丈は30cmから65cmに高くなり、被度は5%から65%に増し、生物量は1ヘクタールあたり21kgから1,125kgと5.3倍に増加した。

これらは、極端に破壊された草地を15年～20年の長期間の保護により、破壊される前の植生に復元し、生産量が4倍～5倍に高められた例である（KAWANABE *et al.*, 1996）。

③王寧（1981）によれば、ハネガヤ-オオメドハギ (*Lespedeza dahurica*) 草地の生物量は、封育復土後の2年目には22.5～40.7%増加し、3年目には50.5%増加した。

④吉林省白城地区では、封育復土の第2年の生物量は元の70%増加した（楊文臣、1988）。

これらは2年～3年の封育により、生産量を50%～70%高められた例である。同地区的統計によれば、1975年から1985年までに封育復土した草地面積は2,866km²におよぶ。

2) プラウ・ハロウイングによる改良（翻耕）

これは退化草地の土壤をプラウで耕した後、ハロウで土を搔きならして、そのまま放置する方法（中国で翻耕と呼ぶこの改良法は、施肥、牧草播種を伴わない簡易な更新法で、日本では実施されていない）である。この措置により、根茎の長い植物が勢よく成長して草地が若返る。場合によっては、土を搔きならしてから優良牧草の種子を播いて、草地の若返りを促進する。この方法の原理はロシアのI.V. LARIN (1956: 309-314) が述べている。

中国では、1960年代初期に東北防風林帯を造成するためプラウで耕した草地が、他の草地より生物量が著しく高いことが偶然見つけられた（南、未発表）。これが端緒となって、この方法による改良試験が開始された。試験結果によると、どんな草地植生でも1m²に10本以上の長根茎イネ科植物（シバムギモドキ、*Pennisetum flaccidum*など）があれば、翻耕後2年～3年目に質がよく、生産量の高い草地が形成され、3年目には元の1.5倍、4年目からは3倍以上の生産量となる（南ほか、1974）。

現在、この方法によって改良された退化草地の面積は数万ヘクタールとなり、中国の半乾燥、半湿润地帯草原の基本的改良法となっている。

この改良法には次の特徴がある（南ほか、1979、畢、1984）。

① 1m²あたり10本以上の長根茎イネ科植物があれば、沼地草原および重度塩性草地を除く半乾燥、半湿润地帯において効果が期待できる。

②翻耕の当年には根茎のない大部分の植物が消失し、

表6. 翻耕後の根茎性植物*の株数の変化(対照区を100とする%). (南ほか, 1979)

翻耕後の年数	シバムギモドキ (<i>Aneurolepidium chinense</i>)	コウバウ (<i>Hierochloa grabra</i>)	ヤマアワ (<i>Calamagrostis epigeios</i>)	ケトダシバ (<i>Arundinella hirta</i>)	オオアプラススキ (<i>Spodiopogon sibiricus</i>)
1	48	32.5	33	0.36	0.49
2	413	2,200	368	5.95	1.60

*シバムギモドキ、コウバウ、ヤマアワは長根茎植物。

表7. 翻耕による土壤物理性の変化. (Hu et al., 1989)

土壤物理性	土壤深度(cm)	対照区	処理区
硬 度 (kg/m ²)	0~10	2.6	1.60
	10~20	3.82	2.52
容積重 (g/cm ³)	0~10	1.67	1.52
	10~20	1.62	1.61
孔隙度 (%)	0~10	35.8	41.5
	10~20	37.7	38.1
透水率 (cm/min)	0~10	0.25	0.84
	10~20	0.25	0.75

翌年から根茎性植物、特に長い根茎を持つシバムギモドキのような優良牧草が優占する草地となる(表6)。根茎性植物が活性化するのは、土壤が軟らかになり根茎の生長が促進されること、根茎が切断されて不定芽による栄養繁殖が盛んになるためである(南・侯、1980)。

③翻耕によって土壤の物理的性質が著しく改善される(表7)。硝酸態窒素の増加も報告されている(Hu et al., 1989)。

④非根茎性草地(ハネガヤなど叢生型植物が優占する草地)において翻耕改良をした場合、生物量は改良第3年から非常に高くなり元の2倍~3倍になるが、第6年~7年からは次第に低くなり、10年後には元の水準に戻ってしまい、植生も元の状態に遷移する。しかし根茎性草地(シバムギモドキ草地など)の場合には変化が速く、生物量は第2年から直ちに著しく高くなり、元の2倍になるが、第5年から低下してくる。

この方法の変法として、ハロウで草地土壤の表層を軟らかくする方法がある。ハネガヤ草地においてこの変法で改良した試験結果によると、第3、4年の生物量が最も高く、第5年から低下してくるが、元の16.8%~66.5%に増加した(馬ほか、1987)。

また別の変法として、第1年のプラウ-ハロウの翌春、小麦または飼料作物を播種し、第2年はそれらを収穫し、第3年以降草地とすると小麦などの生産物が得られるほか、元の退化草地の生物量の0.9t/haに対して更新草地3年~9年間の平均生物量は2.2t/haとなった(Hu et al., 1989)。

以上の試験結果を要約すれば、翻耕法で中等度退化し

た草地を更新すると、一般に生物量は2.4t/ha~2.9t/haになり、元の1.5倍~2.0倍に増加することが期待される。

3) 航空機による播種

中国では航空機の播種による退化草地の改良が1970年代から始まった。この方法で播種する主な植物は、オルドスヨモギ(*Artemisia ordosia*)、サバクヨモギ(*A. halodendron*)、アオムレスズメ、ムラサキモメンヅル(*Astragalus adsurgens*)、アルファルファ、エビラハギ(*Melilotus suaveolens*)、シナガワハギモドキ(*Astragalus melilotoides*)、オオメドハギ(*Lespedeza hedysaroides*)などである。

航空機播種の成否を決める主な要因は、土壤水分と植生の被度である。土壤水分に影響する地形と降水量も間接的要因として重要である。この他、播いた種子を食害する鳥、鼠も無視できない生物的要因である(干、1988)。

対象となる草地は主に沙地なので、種子が発芽しても定着が難しい。それゆえ上の諸要因を考慮して、播種の場としては低地、湖および沙漠の周辺と半固定沙丘が適し、播種時期としては雨季の直前の6月中旬から雨季に入った7月中旬までが適している。

航空機播種の効果について2~3の調査結果を紹介する。

①ムラサキモメンヅルの航空機播種を行って5年後の生物量は4,081kg/haで、対照区の479kg/haに対し、8.5倍に増加した(干、1988)。

②内モンゴル赤峰地区において航空機播種による混播試験を行った結果、改良5年目には植物の被度はサバクヨモギが40%、オオメドハギが30%、アオムレスズメが10%で、生物量は表8に示すように第2年に976kg/ha、第5年には5,560kg/haと高くなっている(干、1986)。上述した①、②は草地の改良に成功した例である。

③相対高度のやや高い(7m~15m)移動沙丘においてオルドスヨモギの播種試験をした結果、発芽した幼植物が翌年生存している面積は播種した面積の3.5%と少なく、第4年になるとさらに減少して1.05%となった(許、1982)。また、発芽幼植物の生存している面積割合は半固定沙丘では50%であったが、移動沙丘では18%

表8. 航空機播種で造成した草地の地上生物量の変化。(冷, 1986)

造成後の年数	ムラサキモメンヅル (<i>Astragalus adsurgens</i>)	アオムレスズメ (<i>Caragana microphylla</i>)	オオメドハギ (<i>Lespedeza bicolor</i>)	その他	総生物量
2	581.2	363.7	—	31.6	976.5
3	1,598.2	13.5	60.0	345.0	2,016.7
4	3,578.2	75.7	71.2	459.1	4,184.2
5	4,081.5	—	888.7	590.3	5,560.5
対 照	—	—	—	—	476.2

に過ぎなかった、との成績もある。これらは明瞭な改良効果が認められなかつた例である。

このように、航空機播種の改良効果は封育復土や翻耕と違い、実施する土地の条件によって異なる。

4) ヌカボガヤによる塩性草地の改良

塩性草地はヌカボガヤ (*Puccinellia chinampensis*) によって改良することができる。この草は中国東北部の塩性土壤に分布する野草で耐塩性が強く、PHは9~10、土壤塩分含量が0.3%~0.4%で、ほかの草が生えないアルカリスポットにもよく生育する。また耐寒性が強い。その飼料価値は、東北地方で最もよいシバムギモドキに匹敵するとされ、栽培牧草として使用されている。

吉林省大安県における試験では、ヌカボガヤ人工草地の生物量は2,160kg/ha~2,377kg/haと高い値が得られた。3カ年栽培後の土壤塩分含量は、もとの1.8%から0.22%~0.24%に低下した。ヌカボガヤは塩性土壤で高い生産をあげるだけでなく、塩性土壤を改良することができる(吳 青年, 1986)。この方法による塩性草地の改良は中国各地に普及している。

ヌカボガヤと同属のコゴメヌカボガヤ (*P. tenuifolia*) も同様に生産性が高く、生物量は第2年から第6年まで安定して3,300kg/ha以上であった(唐ほか, 1980)。

裸地となった塩性草地を改良する場合のヌカボガヤの播種量は、普通の平地では40kg/ha~45kg/haで、傾斜地では55kg/ha~60kg/haである。移植用の苗床では200kg/ha~250kg/haを播種する。移植の場合の株の距離は、50cm×50cm、深さは15cmが適している(趙 喜印ほか, 1987)。

5) ムラサキモメンヅルによる沙地、乾燥地、痩せ地等の改良

沙地、乾燥地、痩せ地等はムラサキモメンヅル (*Astragalus adsurgens*) によって改良できる。この草はもとはマメ科の野草であるが、現在は馴化して重要な栽

培牧草の一つとなっている。草丈が高く生物量が多く、耐寒性、耐乾性、耐塩性が高く、また、痩せ地にも適るので、牧草として草地造成に用いるだけでなく、土壤侵食防止、沙地の固定などにも広く用いられている。

ムラサキモメンヅルの生物量は高く、カルチン沙地のような悪条件でも播種当年には草丈は30cmになり、翌年は150cmに達し、生物量は1,635kg/haとなった(魏・南, 1990)。

ムラサキモメンヅルの栄養価値は高いが、心配なのは有毒成分を含むことである。羊の動物試験の結果は次のようにある。

①6カ月間の羊飼養試験によれば、飼養効果はアルファアルファに劣らないが、アルファアルファと混合して給与するのが最もよかつた。その毒性についてはさらに研究の必要がある(趙銀, 1987)。

②ムラサキモメンヅル草地に放牧した羊とアルファアルファ-コスズメノチャヒキ草地に放牧した羊との間に増体量に大きな差がなく、また、中毒現象もみられなかつた(李翠英, 1988)。

③ムラサキモメンヅル80%、その他の飼料20%の混合飼料で長期間羊を飼育したが、羊には病理学的障害はみられなかつた(李鬱芳, 1987)。

このように、羊に対する毒性はあまり心配することはないといえる。

以上の改良法は、東北西部と内蒙古東部草原で広く採用される措置である。この他、微量元素を含む施肥による方法、優良牧草で高生産力の草地を造成する方法、石膏を施して塩性草地を改良する方法、総合的措置により改良する方法などがある。

謝 辞

本研究の実施には、財團法人・イオン環境財團の助成(平成9年度)を受けた。同財團に対し深く感謝の意を表します。

引用文献

- 安部征雄・小島紀徳・遠山柾雄編著(1994):「沙漠物語」森北出版。
- 川鍋祐夫・祝 延成(1991):中国東北部におけるシバムギモドキ(*Aneurolepidium chinense*)草地の退化の状態と草地保全。「日本草地学会誌」37: 91-99。
- 川鍋祐夫・押田敏雄・祝 延成・白 晓坤・邢 玉龍(1993):中国東北部における羊草(*Aneurolepidium chinense*)草地の退化と草地保全。2 植生退化とアルカリ化。「日本草地学会誌」39: 93-100。
- 川鍋祐夫・南 寅鎮・押田敏雄・寇 振武・今野幹雄・松本聰(1994):内蒙古アルカリ化ステップの植生と土壤。1 放牧地と採草地の比較。「日本草地学会誌」40: 294-300。
- 高野信雄・佳山良正・川鍋祐夫編著(1989):「粗飼料・草地ハンブック」養賢堂。
- 畢 英軒(1984):松嫩平原中部改良効果の調査報告。「中国草原」第三期: 44-46.(中国語)
- 初 国君・郭 洪健・鍾 貴廷(1985):調整呼盟牧区経済結構建立新的草原生態系。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」I: 297-301.(中国語)
- 陳 世俊(1988):松嫩平原防護林建設の雄議。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」II: 251-261.(中国語)
- 何 潤華・池 磊・馬 騥(1988):吉林省西部草原問題与对策。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」II: 354-358.(中国語)
- 冷 麗娟(1986):沙草場飛播牧草群落結構分析。「内蒙古草原」第一期: 21-26.(中国語)
- 冷 麗娟(1988):飛播牧草是沙地草場建立草地農業系統的有效方法。「中国草原」第三期: 27-29.(中国語)
- 李 景信(1985):提高松嫩平原生態經濟效益的幾點淺見。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」I: 238-241.(中国語)
- 李 鶴芳(1987):沙打旺乾草对飼喂綿羊的病理学的研究。「中国草原科学」第一期: 37-39.(中国語)
- 李 翠英(1988):沙打旺对绵羊的可牧性試験。「中国草地」第三期: 13-16.(中国語)
- 李 森林(1988):論治理草原生態系統“三化”問題の戦略意義。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」II: 359-362.(中国語)
- 馬 志広・陳 敏・龔 素梅・王 育青(1987):松土改良大針茅草原的研究。「中国草原」第三期: 20-23.(中国語)
- 南 寅鎮(1988):試論科沁沙地生態建設。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」II: 26-29.(中国語)
- 南 寅鎮・侯 家龍(1980):若干土壤物理因子对根茎性禾草的影响。「中国科学院林業土壤研究所集刊」第四期: 89-94.(中国語, 要旨英文)
- 南 寅鎮・魏 均・侯 家龍(1974):松嫩平原翻耙改良草場初步總結。「草原科技資料」第一二期: 11-17.(中国語)
- 南 寅鎮・侯 家龍・魏 均(1979):羊草及其草場的研究。「延邊農学院学報」第三三四期: 30-40.(中国語)
- 南 寅鎮・徐 嵩・寇 振武(1989):科沁沙地退化草場総合治理研究。曹 新孙編「中国草地科学与草業發展」158-162. 科学出版社。(中国語)
- 唐 超世・方 俊・王 守礼(1980):星星草栽培驯化的研究。「中国草原」第四期: 13-21.(中国語)
- 王 寧(1981):建設草庫倫的試驗研究初報。「草原科技資料」第二期: 1-11.(中国語)
- 王 作詳(1985):林業在科沁沙地生態系統中的地位。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」I: 234-237.(中国語)
- 吳 洪生(1985):草原生態系統良性循環の検討。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」I: 249-254.(中国語)
- 吳 青年(1986):鹽斑草地改良簡報。「中国草原与牧草」第四期: 9-10.(中国語)
- 魏 均・南 寅鎮(1990):風沙乾旱地区建立人工草場試驗研究。曹 新孙編「風沙乾旱総合治理研究, 第二集」内蒙古人民出版社, 99-105.(中国語, 要旨英文)
- 許 青雲(1982):飛播成功与沙区自然条件関係の調査。「中国草原」第一期: 49-51.(中国語)
- 葉 乃芳(1988):黒龍江省西部生態屏障建設の論述。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」II: 249-256.(中国語)
- 楊 文臣(1988):吉林省平原草甸草原の退化及治理途徑。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」II: 363-364.(中国語)
- 楊 允菲(1988):天然羊草草地在放牧和刈割条件下的種子生產性能。「中国草業科学」第六期: 30-32.(中国語)
- 于 海濤(1988):飛播造林は加速東北西部地区生態建設一項主要措置。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」II: 205-210.(中国語)
- 兆 彥臣(1982):西遼河流域草場資源及其生產力。「中国草原」第一期: 38-40.(中国語)
- 趙 喜印・佟 振宇・趙 彬・李 敏蘭・紫 凤娟(1992):星星草治理草原鹽斑的效果与種植技術。「草業科学」第五期: 61-62.(中国語)
- 趙 銀(1987):沙打旺对綿羊飼喂效果的研究。「中国草業科学」第一期: 34-37.(中国語)
- 張 順(1988):試論松嫩平原的生態建設。「東北地区生態建設戦略学術討論会論文集」II: 244-248.(中国語)
- 中国科学院内蒙古寧夏総合考察隊(1974):「内蒙古自治区及其東西部鄰地区天然草場資源文集」II: 205-210.(中国語)
- HU, Ming-Ge, LU, Ping-Zhang and WANG, Yu-Lin(1989): The research on the rehabilitation of deteriorated *Leymus chinense* grasslands. *Proc. XVI Intern. Grassl. Congress*, 1463-1464.
- KAWANABE, S., NAN, Y., OSHIDA, T., KOU, Z., JIANG, D. and WEI, J. (1996): Vegetationl change of desertified grasslands during 15~20 years preservation in Inner Mongolia, China. *8th AAAP Animal Science Congress Proceedings*, 2: 270-271.
- LARIN, I.V.(1956):「草地經營と放牧業」国家農業文献出版社, Moscow, 309-314.(ロシア語)

Present Situation of Desertification and Measures of Vegetation Improvement of Grasslands in North-Eastern China and Eastern Inner Mongolia

Sukeo KAWANABE*, Yinhao NAN**, Toshio OSHIDA***, Zhenwu KOU**, Deming JIANG** and Jun WEI**

Informations on grassland desertification during recent 40-50 years in regions of north-eastern China and Inner Mongolia were reviewed reffering some 40 literatures mostly in Chinese. Original vegetation types are meadow steppe and typical steppe. The former is characterized by *Aneurolepidium chinense* and the latter is consists of *Stipa grandis* and *S. baicalensis* etc. Areas of degraded grassland accounted for 1/3 of total area. Above ground biomass decreased from 2.2-3.0t/ha in the 1950's to 0.75-0.90t/ha in the 1990's. Degradations were mainly caused by salinization and/or alkalization of soil and by sand drifting. Other causes, such as overgrazing, collection of fuels and medicinal plants, and practical countermeasures against desertification were also presented.

Key Words: Biomass of grasslands, Countermeasures of degradation, Desertification, Degradation of Chinese grassland

* Association of greening desert and grassland of Inner Mongolia,China. c/o Azabu University, 1-17-71, Fuchinobe, Sagamihara, Kanagawa 229-8501, Japan.

** Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences. 72, Wenhua Road, Shenyang 110015, China.

*** School of Veterinary Medicine, Azabu University. 1-17-71, Fuchinobe, Sagamihara, Kanagawa 229-8501, Japan.

(Received : July 29, 1998; Accepted: October 22, 1998)

小特集
第3回ダスト・ストーム研究会シンポジウム講演要旨集
「乾燥地起源の風送ダスト—発生・長距離輸送・環境影響—」

<目 次>

概 要	163-164
吉野正敏：ダストストームに関する気候学的・人文地理学的研究の展望と課題 —中国のダストストームと人間生活—	165-168
三上正男：ダストストームの発生、ダストの長距離輸送—A Brief Review—	169-171
甲斐憲次・熊 小寧・小柴 厚：東アジアにおける砂塵嵐発生の地理的分布と 長距離輸送	173-176
安井元昭・水谷耕平・板部敏和・高部政雄・周 紀俠・凌 裕泉・劉 立超： 中国蘭州における大気中微粒子のライダー観測	177-180
長島秀樹：最近のWIND EROSION MODEL	181-184
羽田野祐子：切尔ノブイリでの放射性エアロゾルの長期挙動と砂漠のバルハ ンへの応用	185-189
真木太一・杜 明遠：中国トルファンの砂丘移動と防砂について	191-194
清野直子：ダストストーム発生に関する数値モデリングの試み（序報）	195-196
栗田 進：粒子状物質の大気中への再飛散と粒子層の相対湿度	197-198
小黒剛成・山田 研・菅 雄三・竹内章司・土屋 滉：衛星データによるタク ラマカン沙漠の土壤水分解析	199-201
岡田昭彦：大気ダストの発生源物質とその性状—発生源特定の地球化学的アプ ローチとその視点—	203-206
本多将俊・清水 洋：中国各地の砂漠堆積物と黄土の地球科学的特徴	207-208
田中俊平・柳澤文孝・小谷 卓：山形県山形市および鶴岡市における乾性降下 物中の主要成分の季節変化	209-213
田中真理子・柳澤文孝・矢吹貞代・小谷 卓：山形県におけるエアロゾル中の Sr同位体比の季節変動	215-218

Special Reports
“Proceedings of Third Symposium on Aeolian Dust Originated
from Arid and Semi-arid Lands”

< Contents >

Summary	163-164
Masatoshi YOSHINO: An Overview and Problems of the Climatological and Human Geographical Studies on Dust Storm — Dust Storm and Human Life in China —	165-168
Masao MIKAMI: Outbreak of Dust Storm and Long-range Transport of Dust — A Brief Review —	169-171
Kenji KAI, Xiao-Ning XIONG and Atsushi KOSHIBA: Geographical Distribution and Long-range Transport of Duststorms in the East Asia	173-176
Motoaki YASUI, Kohei MIZUTANI, Toshikazu ITABE, Masao TAKABE, Jixia ZHOU, Yuquan LING and Lichou LIU: Lidar Observation of Atmospheric Aerosol Particles at Lanzhou in China	177-180
Hideki NAGASHIMA: A Brief Review of Wind Erosion Model	181-184
Yuko HATANO: Long-term Migration of Radioactive Aerosols in Chernobyl and Applications to Barchans in Deserts	185-189
Taichi MAKI and Mingyuan DU: On the Movement of Sand Dune and Prevention of Wind Erosion by Windbreaks at Turpan in China	191-194
Naoko SEINO: Preliminary Study of the Numerical Modeling of a Dust Storm Event	195-196
Susumu KURITA: Resuspension of Particles and Relative Humidity of Particulate Layers	197-198
Yoshinari OGURO, Ken YAMADA, Yuzo SUGA, Syouji TAKEUCHI, Kiyoshi TSUCHIYA: An Analysis of Soil Moisture in Taklimakan Desert based on Satellite Data	199-201
Akihiko OKADA: Source Materials of Atmospheric Dust — Geochemical Approach for the Characterization of the Dust Sources —	203-206
Masatoshi HONDA and Hiroshi SHIMIZU: Geochemical, Mineralogical and Sedimentological Features of Desert Sands and Loesses in China	207-208
Shunpei TANAKA, Fumitaka YANAGISAWA and Takashi KOTANI: Seasonal Variation of the Concentration of Water-soluble Components in Dry Deposition in Tsuruoka and Yamagata, Yamagata Prefecture, Japan	209-213
Mariko TANAKA, Fumitaka YANAGISAWA, Sadayo YABUKI and Takashi KOTANI: Seasonal Variation of Strontium Isotopic Composition in Aerosol Collected in Yamagata Prefecture, Japan	215-218

第3回ダスト・ストーム研究会シンポジウム講演要旨集 「乾燥地起源の風送ダスト—発生・長距離輸送・環境影響—」

ダスト・ストーム研究会*

概 要

大陸の乾燥・半乾燥地域から風によって大気中に舞い上がる鉱物質ダストは、全球で年間3,000メガトン(TAGEN and FUNG, 1994)にもなると見積もられており、とりわけ気象擾乱に伴って発生するダスト・ストームは、強風とともに大量の砂塵を舞い上げ、発生域の農業生産や生活環境に大きな影響を与えている。大気上層部に送りこまれた風送ダストは大気上層の風によって東アジアから太平洋に及ぶ広い範囲に長距離輸送され、日射の散乱、吸収および赤外放射の吸収という過程を通じて気象・気候に影響を及ぼしている。こうした風送ダストの地球環境・気候への影響を正しく評価するために、風送ダストの実態把握が急務の課題となっている。

ダストストーム研究会（代表：吉野正敏筑波大学名誉

教授）は、ダストに関する様々な意見を交換することを目的として、1996年より、毎年ダストに関するシンポジウムを開催している。1997年、1998年度は、日本沙漠学会、日本リモートセンシング学会地球環境研究会の共催を得て、理研シンポジウムとして開催された。第3回ダスト・ストーム研究会シンポジウム「乾燥地起源の風送ダスト—発生・長距離輸送・環境影響—」は、1998年9月24日に理化学研究所において開催され、50名の出席者を得て、ダストストームの発生、発生地の環境、ダストの輸送、大気浮遊ダストの気象、気候、環境におよぼす影響など、ダストに関わる様々な問題を取り上げて熱心な発表、討論が行われた。本講演要旨集はシンポジウムの講演内容を示したものである。

（文責：矢吹貞代）

Proceedings of Third Symposium on Aeolian Dust Originated from Arid and Semi-arid Lands

The Dust Storm Research Group*

Total amount of wind-blown dust carried from the arid and semi-arid areas is estimated to 3,000 megatons annually. Especially a dust storm event, in which a vast amount of sand and soil particles is blown into the atmosphere by strong wind, causes serious damage to human activities, as well as to the social and economic environment of the areas. Furthermore, wind-blown particles reaching to the upper troposphere are transported to East Asia and Pacific Ocean, cause a strong impact on the climatological and meteorological environment of the earth. It is therefore very important and urgent to study the behavior and environmental consequence of aeolian dust.

The Dust Storm Research Group (Chairman: Prof. Masatoshi YOSHINO, professor emeritus of Tsukuba University) have organized symposium annually since 1996. The primary object of these symposiums is to provide a forum to exchange current scientific views and information concerning aeolian dust. In 1997 and 1998, the symposium was held as RIKEN Symposium supported by the Japanese Association for Arid Land Studies, the Remote Sensing Society of Japan, the Earth Environment Research Committee. The third symposium entitled "Aeolian Dust Originated from Arid and Semi-arid Land" was held at RIKEN, Wako, Saitama, on September 24, 1998. Total of fifty researchers of various scientific fields engaging aeolian dust participated at the discussion. There were fourteen presentations including a synoptic description and diagnostic studies of selected cases, theoretical approaches, physical and dynamical analysis, characteristics of various scales, and impact on human activities and environment. These reports are the proceedings of the symposium.

* The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN). 2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan.

ダストストームに関する気候学的・人文地理学的研究の展望と課題 —中国のダストストームと人間生活—

吉野 正敏*

An Overview and Problems of the Climatological and Human Geographical Studies on Dust Storm —Dust Storm and Human Life in China—

Masatoshi YOSHINO*

1. ダストストームの定義

ダストストームの定義は、ここでは「軽」は視程が500-1,000mで風力4-6級(10m/s以上)、「中」は視程は500-1,000mだが風力が6-8級(17m/s以上)、「強」は視程は500m以下で風力8級かそれ以上(20m/s以上)とする。中国では、省によってまたは研究者によって定義が異なるが、「特強」の場合を、視程が50m以下で最大風速が25m/s以上とか、10級以上とか、22m/s以上にする場合などがある。

2. 風災とダストストームの分布

災害は人間活動がなければ起らないので、近年になるほど多くなる。1949-1990年の合計で風害の回数は195回、死者数108人、家畜死亡(頭数)は46,000、家屋の倒壊(軒)4,000、損害額226万元で、洪水害・雪害に次ぐ第3位の損害額に達している。図1は1949-1990年の42年間の風災合計回数の分布図である。トルファンとハミを中心とする地域で20回以上、タクラマカン沙漠北縁のアクス、北疆のジュンガルやアルタイ西方で多い。図2は中国の北西部における乾燥・半乾燥地域のダストストームの分布図である。主要経路は3つあり、北疆からトルファン・ハミを経て、ユイリン・内蒙古に向かう経路が最も頻度が多く、次いで西方のタ克拉マカンから東進するもの、北方から甘肅に入り東進するものがある。

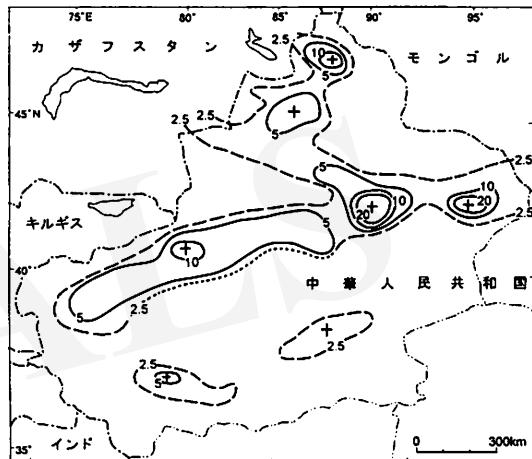


図1. 新疆における風災回数(1949-1990年)の分布。

3. 時代的な変化

ダストストームの「強」と「特強」の合計回数は、1950年代に5回、1960年代に8回、1970年代に13回、1980年代に14回、1990年代は前半だけでも8回に及び、次第に増加している。歴史的に見ると、地域別の人口統計がある1cBC, 8c, 12c, 16cと20cの値と世紀合計のダストストーム回数を図3に示す(資料は夏・楊、1996による)。20cは現在までの合計で71回を数えているが、大まかに見るとほぼ人口と比例している。近年の10年ごとで見

*筑波大学名誉教授

(受付: 1998年11月10日、受理: 1998年11月30日)

*Professor Emeritus, University Tsukuba, 5-1-8-202, Komazawa, Setagaya-ku Tokyo 154-0012, Japan. (Tel/Fax: 81-3-3703-7833)

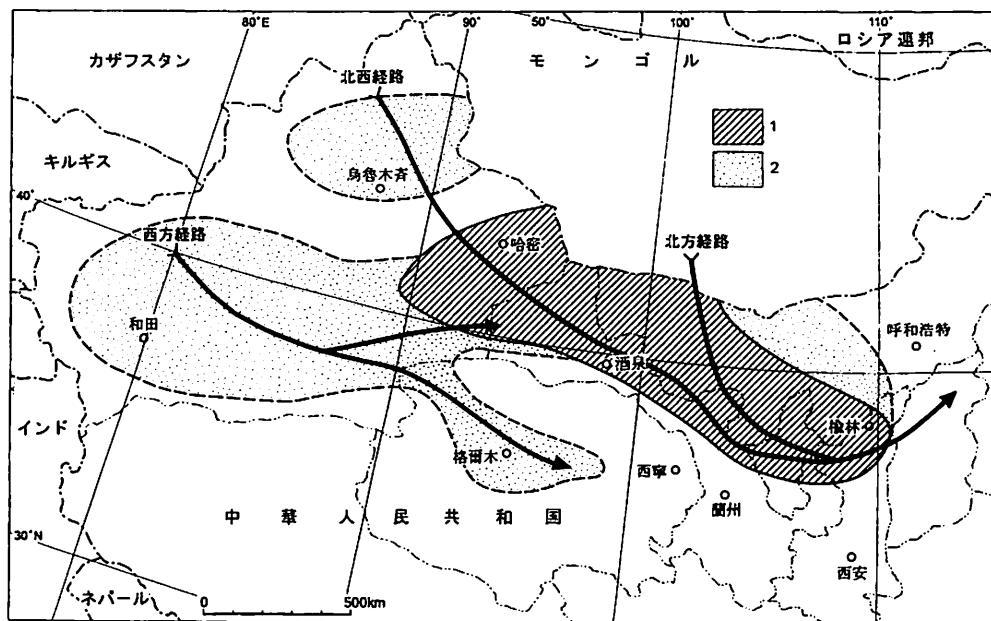


図2. 中国北西部のダストストームの主要な経路と地域区分。(徐・胡, 1997)
1は強いダストストーム天気が最も多発する地域。
2はその次に多発する地域。

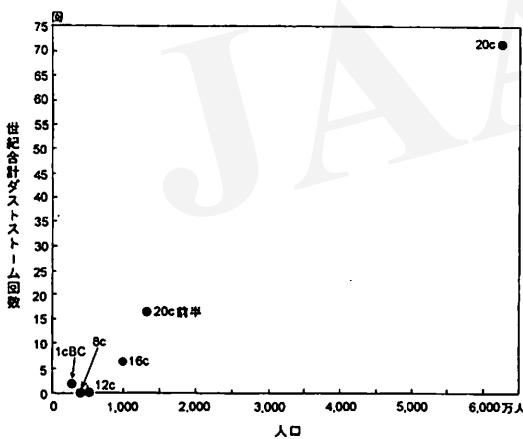


図3 中国北西部の歴史時代の人口とダストストームの発生回数。

ても、上述のように1960年代の8回から、1990年代には人口も回数もほぼ2倍となっているので大まかには比例している。

4. 季節変化

3月から7月までが多い。図4は1952-1992年間の中国北西部における「強」と「特強」のダストストームの出現回数の変化である。これは、タリム盆地、ジュンガル盆地くらいの地域スケールで見て、地面付近の冬の（高気圧性）循環系から夏の（低気圧性）循環系に移る季節であり、またシノプティックスケールで見た対流圈の安定度、上層への寒気の侵入機構などの季節変化の結果と考えられる（吉野, 1997）。

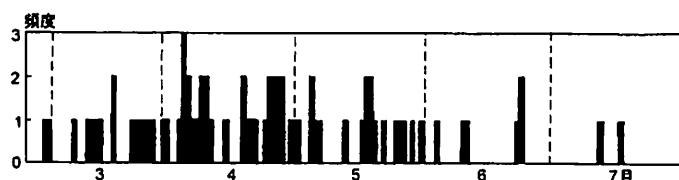


図4. 中国北西部における「強」と「特強」のダストストームの出現回数の月別変化、1952-1992年の合計。(錢ほか, 1997)

5. 日変化

ダストストーム開始時刻の日変化の気候学的な記録は少ない。しかし、極めて注目に値する日変化を示す。すなわち、図5に示す通り、夜半に多い。タクラマカン沙漠南縁の記録では、民勤では16-18時（以下いずれも北京時間）、和田では20時30分-23時に多い。歴史上の記録に残るような黒風（カラブラン）の開始時刻は、20-23時に最も多く、次いで明け方の4-5時であるが、図5が示す日変化とほぼ一致している。このような日変化

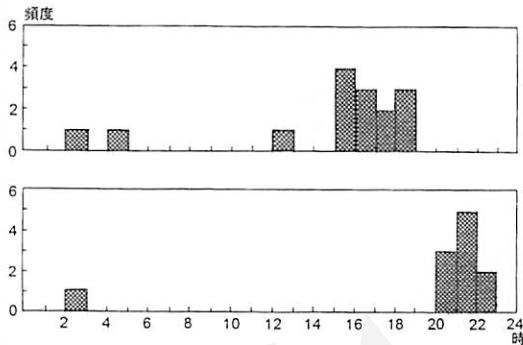


図5. タ克拉マカン沙漠南縁の民勤（上）と和田（下）における「強」＋「特強」のダストストーム開始時刻の日変化、1952-1992年。（錢ほか、1997）

は、強いダストストームの発生機構の解明の手がかりを与える。春季を中心とした時期における対流圈の安定度、地面付近の上昇気流や、大気の鉛直分布、寒冷前線活動などの日変化の結果と考えられる。

6. ダストストーム移動地域と天気図

1983年4月28-29日の寒冷前線の動きとダストの南アジアにおける分布範囲の移動を図6に示す。このとき蘭州では瞬間風速25m/s以上、視程は50m以下で、「特強」のカラブランであった。図6に示す急流とは700hPaのジェットで、その位置とダストの分布範囲との関連が明らかである。高気圧の前面の寒冷前線の移動速度は平均50km/hで速く、その後でダストストームが特に発達した。発生源地域からどのように輸送されるかについて、このような解析例を増やす必要がある。

7. 人間活動との関連

ダストストームの発生には夏・楊（1996）によると、過度の開墾、森林の濫伐、植被の破壊、過度の放牧、不適切な水資源利用や、河道の変遷、それによる植被の退化や地表の風食作用の強化、鉄道・道路などの交通施設の建設、石油や鉱産物産出のための地表の改変、などが関連している。また、農民の経済的基盤の確立、引いて

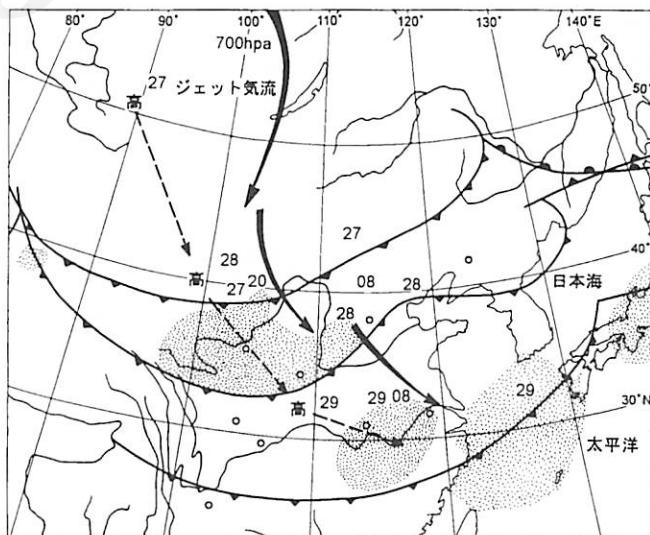


図6. 1983年4月27-29日のダストストームの移動と寒冷前線。（鄭・超、1997）

はオアシス経済の健全な発展（吉野、1997）が必要である。研究としてはこれらの各要因の定量的なデータの収集により、現状の解析が課題である。また、それぞれの現象の進行状況のモニタリングと保護・防御技術の開発が急務である。

8. 1998年4月18日の「特強」ダストストーム

極めてまれな「特強」のダストストームが1998年4月17-18日に新疆の北部・東部を襲った。発生したダストはジェット気流にのり、北海道上空から太平洋を横断し、1週間後には北米西海岸に達した。

強風で有名な七角井では大風は17時01分から21時02分で最大風速は40m/s以上、最大風速の出現時刻は19時41分、ダストストームは17時43分から21時12分、カラブランの吹送時間は18時01分-21時20分、視程は0であった。最高気温は31℃、最高地面温度は47.5℃、平均

相対湿度は30%，18日の平均風速は9.8m/sであった。ダストストームのフロントは高さ300-500mに達した。災害は強風による作物の（コムギ・ワタなどの）収穫皆無、樹木の倒折、家屋の全壊、列車運転不能、電柱の倒壊、田畠の施設の破壊、人畜の死亡、土壤侵食（最悪のところでは深さ7cmに及んだ）、火災や凍害など多方面に及んだ。経済的な損害は10億元（約170億円）に達した。

引用文献

- 方 宗又・朱 福康・江 吉喜・錢 正安（1997）：『中国沙尘暴研究』気象出版社、北京、158pp.（中国語）
 中国科学院（1998）：『新疆“98.4.18”特強沙尘暴研究初步報告』11pp.（中国語）
 夏 訓誠・楊 根生（1996）：『中国西北地区沙尘暴灾害及防治』中国科学環境出版社、北京、128pp.（中国語）
 吉野正敏（1997）：『中国の沙漠化』大明堂、301pp.

ダストストームの発生、ダストの長距離輸送 — A Brief Review —

三 上 正 男*

Outbreak of Dust Storm and Long-range Transport of Dust — A Brief Review —

Maso MIKAMI*

1. はじめに

砂漠乾燥域からの風成ダストについては、表土流出という観点から研究が進められてきた。また近年では、大気中に放出された鉱物質エーロゾルダストの大気放射過程を通じた大気への熱的効果が注目され始めている（たとえば、IPCC, 1995）。さらに、陸面からの鉱物質ダストエーロゾルの海洋への輸送が、海洋の一次生産を通じた地球規模の物質循環に重要な役割を果たす事も指摘されている（たとえば、DUCE *et al.*, 1991; DAYAN *et al.*, 1991）。このように風成ダストの発生・輸送に関する研究は近年特にその重要性が増してきたように思われる。ここでは、1980年代以降進められてきた風成ダストの発生と輸送に関する実態把握と数値モデルの研究について概観する。

2. ダストアウトブレークの実態把握

全球のダストの大気中への放出量は3,000Mt/y (TEGEN and FUNG, 1994)、アフリカ大陸北部に限っても年間60~460Mt ものダストが放出されていると見積もられており、このうち1/2から1/3は北大西洋に降下しているとの研究もある (SWAP *et al.*, 1996)。こうした風による表土の大量流出は農業生産に深刻な問題となっている。

ヨーロッパにおいては、サハラ砂漠起源の風送ダストの大西洋・ヨーロッパへの輸送についてバックトラジェクトリー手法 (REIFF *et al.*, 1986) や衛星画像を用いた実態把握のための研究が進められてきた。特に、衛星画像を用いた研究では、CARLSONによる一連の基礎研究や

Meteosatを用いたdust optical depth解析等が試みられている (JANKOWIAK and TANRE, 1992)。さらに、サハラなど砂漠乾燥地帯からいといったどの程度の量の鉱物質ダストが大気中に放出されているのか？また、そのうちどの程度の量が海洋に吸収されているのか？この点に関してもNOAAのAVHRRやMeteosatの赤外・可視画像を用いてDust outbreaksの時空間的特徴やダスト輸送量の季節・年々変動などが調べられてきた (SWAP *et al.*, 1996; MOULIN *et al.*, 1998等)。しかし、全球、特にアジア・ユーラシア域についてはDust outbreakの量的・時空間的特性についての実態把握は未だ不十分だと思われる。

3. ダスト輸送の数値実験

風成ダストの発生の素過程に関しては、比較的古くから研究が進められてきており (GILLETTE *et al.*, 1982; GILLETTE and PASSI, 1988)、ダストの発生とThreshold friction Velocityとの関係や発生量とGround surface characteristicsとの関係も詳しく調べられている。こうした知見をもとに、地表面条件と大気条件から風成ダストの発生量を評価するWind Erosion Modelが作られ (MARTICORENA and BERGAMETTI, 1995, 1996; SHAO, 1996)、さらに大気側モデルと組み合わせてダストの発生と長距離輸送の実験が行われて来た。これらは、80年代は簡単化した3次元モデル (LEE, 1983; WESTPHAL *et al.*, 1988) や2次元モデル (WESTPHAL *et al.*, 1987) であったのが、90年代に入ると、GCMを用いた全球スケールの実験 (JOUSSAUME, 1990; TEGEN and FUNG, 1994) 等が行われるようになってきた。

*気象庁気象研究所

(受付：1998年11月10日、受理：1998年11月30日)

*Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.

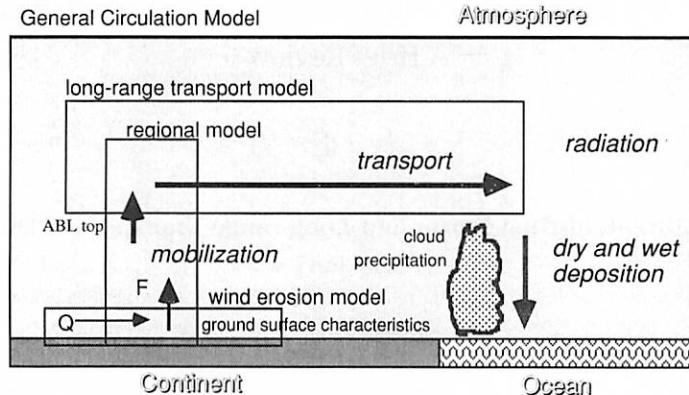


図1. 風送ダストの発生・長距離輸送モデルの概念図。

ここでは特に最近の優れた研究の一つであるSHAOら (SHAO *et al.*, 1996) によるIntegrated Systemを中心に紹介し、今後の問題点と我々の課題について議論の材料を提供する(図1参照)。SHAOらのIntegrated SystemはErosion ModelとTransport Modelを組み合わせ、地表面情報にはGIS databaseを利用したものである(LU *et al.*, 1997)。Erosion ModelはThreshold Friction VelocityとFriction Velocityからダストの放出量を算出する。これらのパラメーターはそれぞれ、土壤粒径・土壤タイプ・土壤流動性・土壤水分と風速・土地利用・植生等の関数として与えられている。ダスト放出量から最終的に4つの粒径クラスそれぞれの鉛直ダストフラックスを求める。Transport ModelはNew South Wales大学のHIRESを使い、ダスト分布予測はsource, sink項を含むダストの連続の式から求める。拡散係数は粒径タイプ別に異なった値を与えている。計算に必要な地表面情報は、GISと呼ばれる0.05°毎の地形情報を利用する。実際の計算はGISのレゾリューションの10倍の50kmメッシュの計算なので、サブグリッドの地表面非一様性効果を表現するためにPrinciple Component Analysisを用いてGIS情報の集約化を行っている。

引用文献

- DAYAN, U., HEFFLER, J., MILLER, J. and GUTNAN, G. (1991) : Dust intrusion events into mediterranean Basin. *J. Appl. Meteorol.*, 30: 1185-1199.
- DUCE, R.A. *et al.* (1991) : The atmospheric input of trace species to the world ocean, global biogeochem. *Cycles*, 5: 193-259.
- GILLETTE, D.A. and PASSI, R. (1988) : Modeling dust emission caused by wind erosion. *J. Geophys. Res.*, 93-D11: 14233-14242.
- GILLETTE, D.A., AMAMS, J., MUHS, D. and KIHL, R. (1982) : Threshold friction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air. *J. Geophys. Res.*, 87- C11: 9003-9015.
- IPCC (1995) : 気候変動に関する政府間パネル二次報告書.
- JANKOWIAK, I. and TANRE, D. (1992) : Satellite climatology of Saharan dust outbreaks: Method and preliminary results. *J. Climate*, 5: 646-656.
- JOUSSAUME, S. (1990) : Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 95-D2: 1909-1941.
- LEE, I. (1983) : Simulation of transport and removal processes of the Saharan dust. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22: 632-639.
- LU, H., SHAO, Y. and LESLIE, L.M. (1997) : Wind erosion assesment and prediction using an integrated system. *Proc. IEAS and IWGIS, 1997*, 936-950.
- MARTICORENA, B. and BERGAMETTI, G. (1995) : Modeling the atmosphere dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *J. Geophys. Res.*, 100-D8: 16415-16430.
- MARTICORENA, B. and BERGAMETTI, G. (1996) : Two-layer simulations of Ssasonal and interannual changes of the Saharan dust emissions. *J. Geophys. Letters*, 23-15: 1921-1924.
- NICKOVIC, S. and DOBRICIC, S. (1996) : A model for long-range transport of desert dust. *Mon. Wea. Rev.*, 124: 2537-2544.
- MOULIN, C. *et al.* (1998) : Satellite climatology of African dust transport in the mediterranean atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 103-D11: 13137-13144.
- REIFF, J., FORBES, G.S., SPIEKSMAN, F.T.M. and REYNERS, J.J. (1986) : African dust reaching northwestern Europe: A case

- study to verify trajectory calculations. *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**: 1543-1567.
- SHAO, Y., RAUPACH, M.R. and LEYS, J.F. (1996) : A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Aus. J. Soil Res.*, **34**: 309-342.
- SWAP, R., ULANSKI, S., COBBETT, M. and GARSTANG, M. (1996) : Temporal and spatial characteristics of Saharan dust outbreaks. *J. Geophys. Res.*, **101-D2**: 4205-4220.
- TAGEN, I. and FUNG, I. (1994) : Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *J. Geophys. Res.*, **99-D11**: 22897-22914.
- WESTPHAL, D.L., TOON, O.B. and CARLSON, T.N. (1987) : A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms. *J. Geophys. Res.*, **92-D3**: 3027-3049.
- WESTPHAL, D.L., TOON, O.B and CARLSON, T.N. (1988) : A case study of mobilization and transport of Saharan dust. *J. Atmos. Sci.*, **45**: 2145-2175.

東アジアにおける砂塵嵐発生の地理的分布と長距離輸送

甲斐憲次*・熊 小寧**・小柴 厚***

Geographical Distribution and Long-range Transport of Duststorms in the East Asia

Kenji KAI*, Xiao-Ning XIONG** and Atsushi KOSHIBA***

1. はじめに

黄砂は春の風物詩である。春先、中国大陸の沙漠地域では、しばしば砂塵嵐が発生する。舞い上げられた砂塵は上空の偏西風に乗って日本に飛来する。黄砂は大陸に近い西日本ほど多く観測されるが、東日本でも弱い黄砂はしばしば観測される。黄砂に関する記述は古文書にもみられる。図1は、日本の気象台、沖縄、および古文書における黄砂発生頻度の季節変化を示したものである。

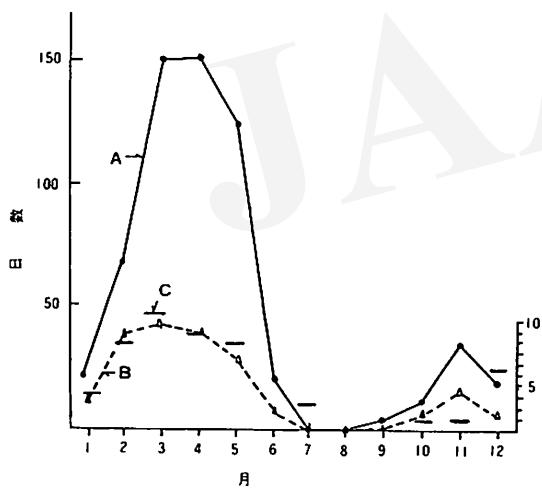


図1. 日本における黄砂発生頻度の季節変化。(村山, 1991)
A: 1914-1979年65年間の日本における月別発生日数(実線)。
B: 1952-1979年の沖縄における27年間の黄砂現象
(任意尺度、破線)。
C: 古文書に現れた黄砂現象で確からしいもの(回数、右側尺度)

(村山, 1991)。いずれも、春季の大きなピークのほかに秋季の第2ピークが認められる。

黄砂の放射過程や雲微物理過程の及ぼす影響については、古くから研究が行われている。春季、東アジアにおいて、黄砂の放射過程に及ぼす影響が重要であることは認識されている(TANAKA *et al.*, 1989など)。しかしながら、黄砂の地理的変動や季節的変動が大きく、その効果はまだ数値予報モデルに取り込まれていない(岩崎・北川, 1996)。HEIFEプロジェクトでは、従来の研究で欠落していた黄砂の発源地での黄砂の特性が明らかにされつつある(MITSUTA, 1994)。

中国のタクラマカン沙漠やゴビ沙漠の周辺地域では、気候変動、砂丘の移動、降塵、人間活動による沙漠化の進行が深刻な環境問題になりつつある。このような問題を解決するためには、沙漠からの砂塵の舞い上がり、そして輸送経路を定量的に予測することは重要である。図2は、1986年3月の黄砂現象を対象として、タ克拉マカン沙漠を起源とする黄砂の長距離輸送をシミュレートしたものである(甲斐ほか, 1998)。このシミュレーションによると、タ克拉マカン沙漠起源の黄砂は、タリム盆地を越えると上空の西風により東に流れ、5-6日で日本上空に達する。同じ事例で発生源をゴビ沙漠と仮定すると、日本に達するのに要する時間は2-3日である(KAI *et al.*, 1988)。このように移流拡散モデルの開発により、特定の黄砂現象に関する長距離輸送のプロセスの解明は大きく進歩した。

本研究では、1990-1992年の世界気象機関による地上気象実況通報式データを用いて、中国大陸における砂塵嵐の発生頻度を調べ、黄砂の長距離輸送を考察する。

*名古屋大学大学院人間情報学研究科

(受付: 1998年11月10日, 受理: 1998年11月30日)

**千代田ディムス・アンド・ムーア株式会社

***気象庁観測部統計室

* Graduate School of Human Informatics, Nagoya University, Furo-chou, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan.

** Environmental Department, Chiyoda Dames & Moore Co., LTD. Asahi Bldg., 5-38-3, Kamata, Ota-ku, Tokyo 144-0052, Japan.

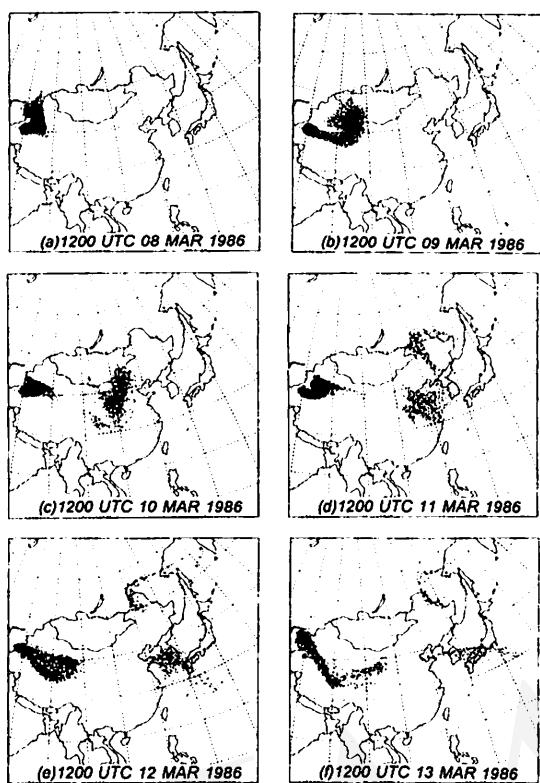


図2. タクラマカン沙漠を起源とする黄砂の長距離輸送。
(甲斐ほか, 1998)

2. データと解析方法

図3は、解析に使用したWMOの地域番号44（モンゴル）、47（日本、韓国）、50-59（中国）を示す。本研究では、WMOの地上実況気象通報式（SYNOP）データをもとに、砂塵嵐の日数を月別に統計処理した。ここで砂塵嵐とは、強風のため砂または砂が空高く舞い上がり、水平視程が1 km未満になる現象である。解析対象期間は、HEIFE（中国黒川流域における地空相互作用に関する日中共同研究）の観測が実施された年を含む1990-1992年である。

3. 解析結果

図4は、1990-1992年における東アジア全域とWMOの44, 51, 52, 53地域の砂塵嵐の季節変化を示す。いずれの地域も春季の第1ピークと秋季の第2ピークがある。この特徴は、冒頭で示した図1の黄砂の季節変化とよく一致する。

図5は、1990-1992年における砂塵嵐発生頻度の分布を示す。砂塵嵐は、中国最西端のタクラマカン沙漠から広い範囲に観測されるが、主にモンゴル中東部のゴビ沙漠から中国の黄河流域の乾燥地帯に沿って、タ克拉マカン沙漠までの地域に分布している。砂塵嵐発生の中心となっている地域は、第1にモンゴル中東部と中国内モンゴル、第2にタ克拉マカン沙漠とクムダク沙漠である。

砂塵嵐発生回数の季節変化は、次の通りである。砂塵嵐は一年中発生するが、ピークは3-5月の春季に存在

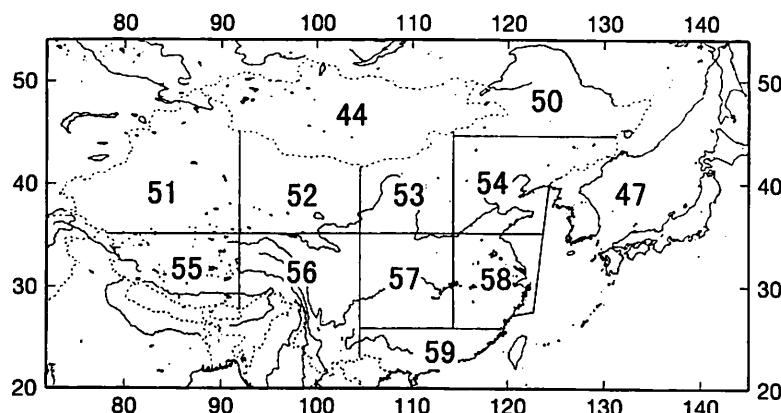


図3. WMOの地域番号44, 47, 50-59.

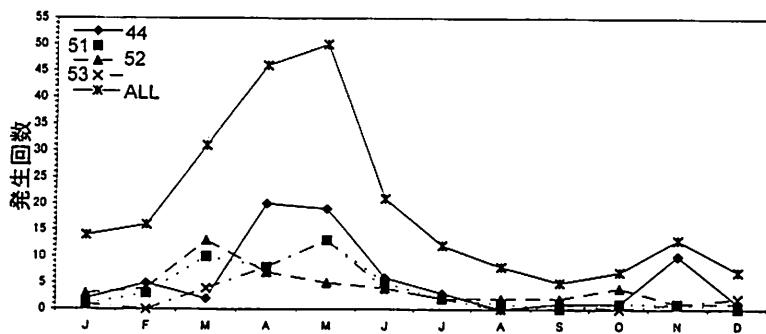


図4. 東アジア全域とWMOの44, 51, 52, 53地域における砂塵嵐頻度の季節変化（1990-1992年）。

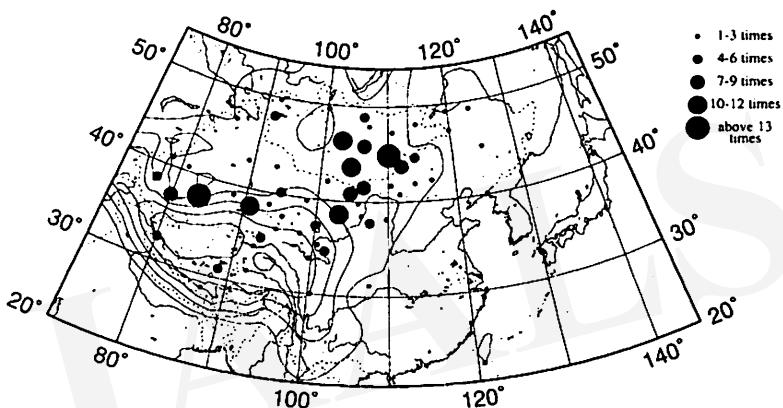


図5. 東アジアにおける砂塵嵐発生頻度の分布（1990-1992年）。

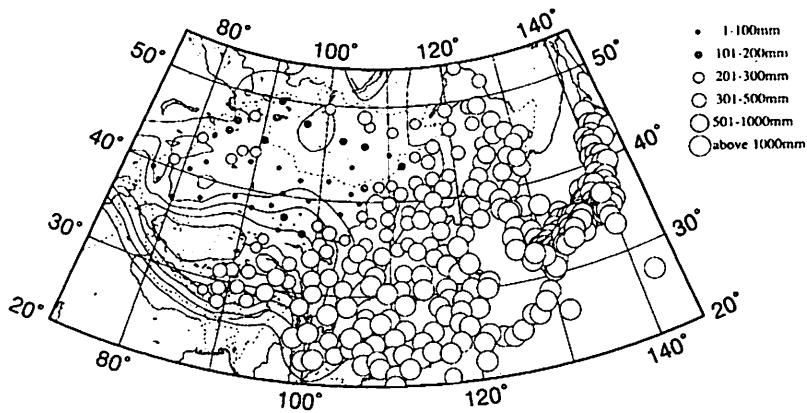


図6. 東アジアにおける年降水量の分布（1990-1992年）。

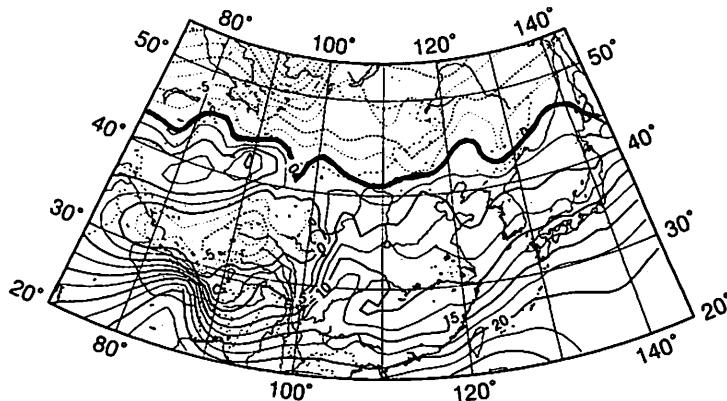


図7. 東アジアにおける3月の月平均気温の分布(1990-1992年).

する。3月には、砂塵嵐の多くは黄河流域からタクラマカン沙漠までの地域に観測されるが、モンゴルではまだほとんど観測されない。4月に入ると、低気圧活動に伴って強風の日数も増加し、砂塵嵐の発生回数は急激に増える。5月はモンゴル中東部・黄河流域、およびタ克拉マカン沙漠で砂塵嵐の発生が多くなる。夏季になると、降水量や水蒸気量の増加とともに砂塵嵐の発生は少なくなる。

図6は、1990-1992年における年平均降水量を示す。図5と比較すると、砂塵嵐の発生回数が多い地点は、ほとんど年降水量が100mm以下の極めて乾燥している地域である。特に砂塵嵐の多く発生している晩冬から春季において、その地域の月平均降水量は10mm以下か、無降水となっている。

図7は、1990-1992年の3月における月平均気温の分布を示す。図中の太い線は0°Cの等温線で、モンゴルの南部を通っている。砂塵嵐発生の中心は3月にはタ克拉マカン沙漠にあるが、4-5月にはモンゴルのゴビ沙漠に移る。これは0°Cの等温線の移動とよい対応がある。その要因として、0°Cの等温線は中国内陸部への低気圧の侵入、または低温による地面の凍結を表す指標と考えられる。

5. まとめ

本研究は、1990-1992年のSYNOPデータを用いて砂塵嵐の発生状況を解析した。その結果、東アジアにおける砂塵嵐の地理的分布と季節変化の特徴を明らかにするこ

とができた。砂塵嵐の発生する地域は、年降水量が100mm以下の地域とよく対応する。砂塵嵐発生の中心は、タ克拉マカン沙漠とゴビ沙漠周辺の2カ所にある。砂塵嵐の中心は、3月に段階ではタ克拉マカン沙漠にあるが、4-5月になるとゴビ沙漠周辺でも砂塵嵐が頻発するようになる。

速報資料のSYNOPは從来、天気予報作業が終わった後はほとんど利用されていなかったが、十分な品質管理を行うことにより、砂塵嵐の発生状況を調べるデータとして有効であることがわかった。

引用文献

- 岩崎俊樹・北川裕人(1996)：第1章 放射過程. 気象学編「1ヶ月予報に向けた全球モデルの開発」1-29.
- 甲斐憲次・高杉年且・中村一(1998)：タ克拉マカン沙漠を起源とする黄砂の長距離輸送について. 「沙漠研究」7: 107-117.
- 村山信彦(1991)：黄砂発生の仕組み. 名古屋大学水圈科学研究所編「大気水圈の科学 黄砂」古今書院, 20-36.
- 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. *J. Meteor. Soc. Japan*, 66: 457-472.
- MITSUTA, Y. ed. (1994) : *Proceedings of International Symposium on HEIFE*. 722pp.
- TANAKA, M., NAKAJIMA, T., SHIOBARA, M., YAMANO, M. and ARAO, K. (1989) : Aerosol optical characteristics in the Yellow Sand Events observed in May, 1982 at Nagasaki. Part I Observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67: 267-278.

中国蘭州における大気中微粒子のライダー観測

安井元昭*・水谷耕平*・板部敏和*・高部政雄*
周 紀侠**・凌 裕泉**・劉 立超**

Lidar Observation of Atmospheric Aerosol Particles at Lanzhou in China

Motoaki YASUI*, Kohei MIZUTANI*, Toshikazu ITABE*, Masao TAKABE*
Jixia ZHOU**, Yuquan LING** and Lichou LIU**

1. はじめに

大気中の微粒子は、雲形成の核となる吸湿性のエアロゾル、成層圏を広く覆い地球規模の気候に影響を与える成層圏エアロゾル層、黄砂として長距離輸送される砂漠起源の砂塵粒子、極域の成層圏オゾン破壊過程に重大な役割を持つPSC (Polar Stratospheric Cloud: 極成層圏雲) 等、様々な形で地球の気候、気象に影響を及ぼしている。これらの微粒子層のほとんどは光学的に厚すぎないため、レーザーを用いたリモートセンシングの観測対象として最も適したもの一つとなっている。現在、郵政省通信総合研究所では赤道域から北極域にわたる複数の地域にエアロゾルライダーを設置し、成層圏エアロゾル、対流圏エアロゾル、そして巻雲等の薄い雲の観測を行っている。

ここでは、中国蘭州の沙波頭 ($37^{\circ} 27' N$, $104^{\circ} 57' E$) に設置しているライダーによって観測された結果を報告する。

2. 観測と結果

観測は1994年4月に開始され、それ以後、12月から3月の厳冬期を除いて毎月約1週間の期間を設定して観測を続けている。観測に用いているライダーの主な仕様を表1に示す。送信光としてNd:YAGレーザーの第二高調波 (532nm) を用い、受信には光電子増倍管を用いてい

表1. 沙波頭のエアロゾルライダーの仕様。

送信系	
Laser	Nd: YAG Laser
Wavelength	532nm (SHG)
Output	150mJ/pulse
Repetition rate	10Hz
Beam divergence	0.1mrad
Coolant	Laser head: water Power supply: air
受信系	
Telescope	28cm (Diameter) Schmidt Cassegrain
Detector	Photomultiplier Hamamatsu H957-08 (April 1994 ~ September 1996) Hamamatsu R3234 (September 1996 ~)

る。受信系は対流圏内の微粒子からの信号をAD変換によって収録する部分と、成層圏エアロゾルからの信号をフォトンカウンティングによって収録する部分の2系統から成っており、それぞれが偏光の平行成分、垂直成分を分けて受信するように設計されている。偏光の各成分同士の比率を調べることにより、微粒子層が球形粒子を多く含むか、非球形粒子を多く含むかの判別を行うことができる。図1にフォトンカウンティングによって観測された高度30kmまでのエアロゾル高度分布の例を示す。図の左方に散乱比 (Scattering Ratio (R))、右方に偏光解

* 郵政省通信総合研究所

(受付: 1998年11月10日、受理: 1998年11月30日)

** 中国科学院蘭州沙漠研究所

* Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications. 4-2-1, Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan.

** Institute of Desert Research, Chinese Academy of Science. Lanzhou 730000, People's Republic of China.

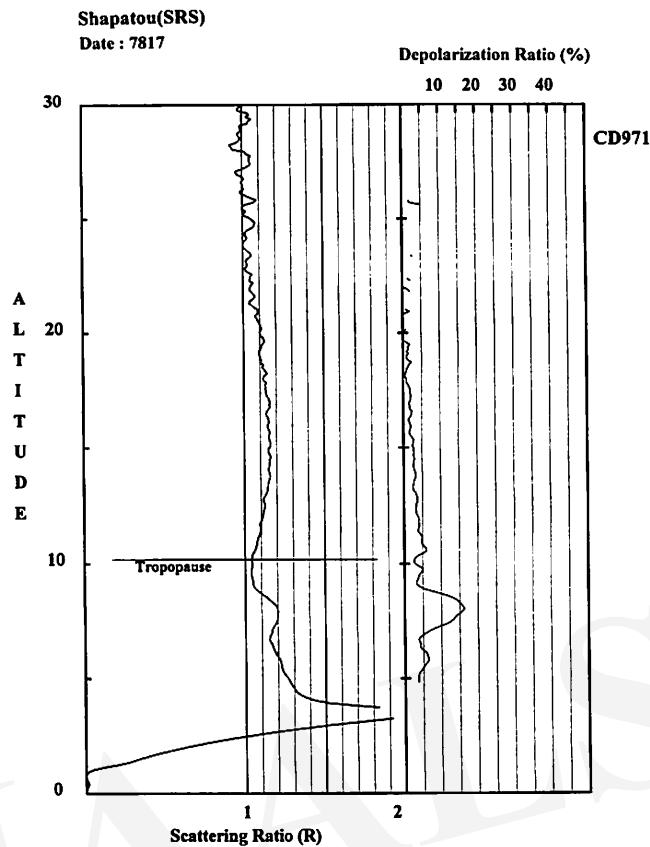


図1. 高度30kmまでのエアロゾル高度分布観測例。

消度（Depolarization Ratio）が示されている。散乱比は大気分子に対するエアロゾルの光学的な混合比を表すもので、 $R > 1$ を超える部分がエアロゾルの割合を示すものである。また、偏光解消度は信号の平行偏光成分に対する垂直偏光成分の比率を示すもので、この値が大きいほど非球形粒子が多く含む。エアロゾルは対流圏下層で最も多く、高度とともに減少し、圏界面付近で極小になる。成層圏内では圏界面から20km付近の間に極大を持つ層が観測される。この成層圏エアロゾル層はウンゲ層と呼ばれ、下部成層圏に常に存在しており、その主成分は硫酸の液滴であると考えられている。1991年のピナツボ火山噴火のような大規模な火山噴火による多量の硫黄化合物の成層圏への注入があった後には、極めて大きな散乱比の成層圏エアロゾル層が観測された（ $R > 10$ ）が、最近ではピナツボの擾乱によって形成されたエアロゾルのかなりの部分が成層圏から除去され、観測される散乱比は $R = 1.1 \sim 1.2$ 程度の小さな値になっている。

一方、対流圏内には、硫酸化合物、海塩粒子、土壤粒子等、様々な種類の微粒子が漂っている。図2は沙波頭で観測された対流圏エアロゾル高度分布の一例である。これは1998年6月11日に観測されたもので、最下層から3～4 km付近にかけて極めて信号の強い厚い層の存在が観測された。偏光解消度が大きいことから、この層は非球形粒子を多く含んでいたことがわかり、観測地が中国の砂漠地域であることを考えると、この層の大部分は砂塵粒子で構成されていたと考えられる。このような下層の厚い層は冬季を除いて常に観測され、日本へ黄砂が多量に運ばれてくる春季、秋季だけでなく、夏季にも比較的多くの砂塵粒子が漂っている。図3は1997年の7月28日に観測された結果である。偏光解消度が10%程度の地表～2 km付近の層と、偏光解消度が40%を超える2～5 km付近の層が観測された。これら二つの層のうち、下の層は、この時期ほぼ定的に存在していたが、上の層は下の層に対して不連続的に大きな値を示してお

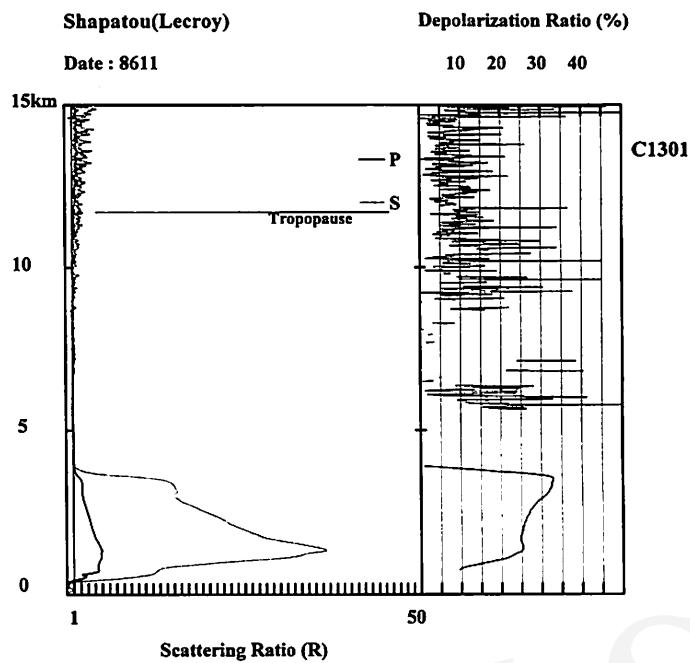


図2. 沙波頭で観測された対流圏エアロゾル高度分布の例（1998年6月11日）。

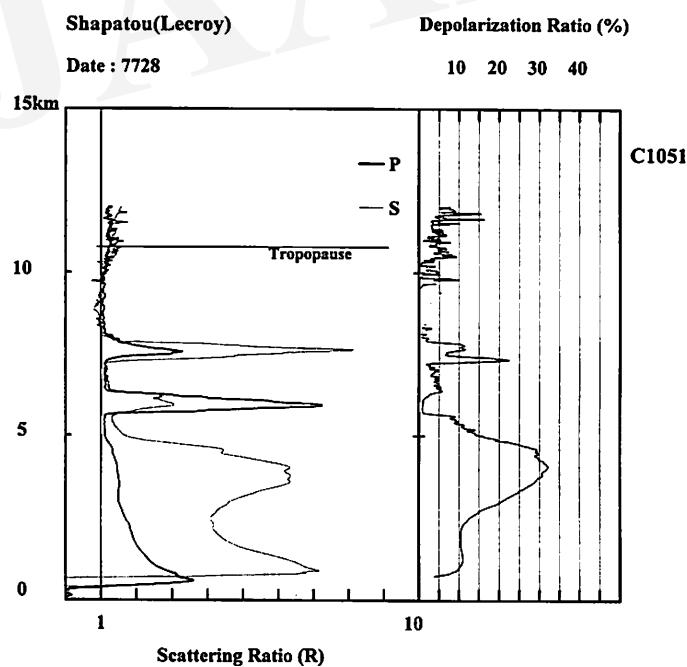


図3. 沙波頭で1997年7月28日に観測された対流圏エアロゾル高度分布。

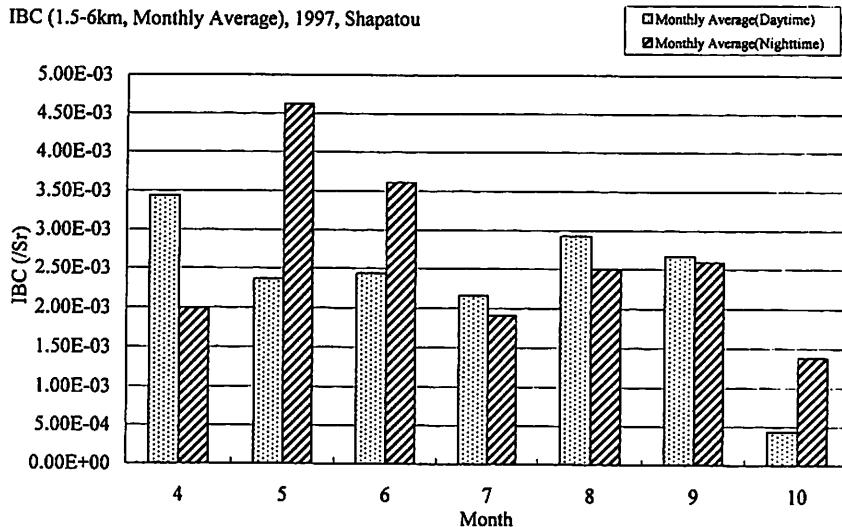


図4. 高度1.5~6kmの後方散乱係数積算値の月毎平均値。

り、粒子構成の異なる層であったと考えられる。これより上層の6 km付近に偏光消度が極めて小さな水雲と考えられる層が観測されていることから、この2~5 kmに現れた偏光消度の大きな層は雲であったとは考えにくく、他の場所で巻き上げられて運ばれてきた砂塵粒子の層であった可能性が高い。

下層で観測された砂塵粒子層の量が季節によってどう変化したかを見るために、高度1.5~6 kmの間の後方散乱係数の積算値を計算した結果を図4に示す。後方散乱係数はライダーによって観測された後方散乱信号から導き出される物理量で、その高度方向の積算値は積算した

気柱内のエアロゾル粒子の質量積算値とほぼ相似な特徴を示す。従って、この図に示された特徴は、1.5~6 kmの間にある粒子の質量の季節変化の特徴を示したものと考えることができる。冬季以外の季節には比較的多くの砂塵粒子が対流圏下層に漂っていたことがわかる。

ここで紹介した例は、ライダーによる観測が可能な晴天時、または光学的に薄い雲のみが存在する条件下的ものなので、ストームなどの大きな擾乱時の情報は含まれていない。他の観測手法も含めた総合的な観測体制の整備が望まれる。

最近のWIND EROSION MODEL

長 島 秀 樹*

A Brief Review of Wind Erosion Model

Hideki NAGASHIMA*

1. はじめに

強風による表土流出は、乾燥地では深刻な問題であり、たとえば1983年にメルボルンで発生したダストストームでは200万トンの表土が失われ、これに伴う窒素、燐の損失はそれぞれ3,400トン、110トンに達し、被害総額は45百万ドルと言われている (RAUPACH, 1994)。このような“WIND EROSION”にたいする問題意識は、すでに1930年代にもたれているが、これを近代科学の対象として取り扱ったのはBAGNOLD (例えば, BAGNOLD, 1941)であろう。ただ、彼の研究は砂の移動と砂の波を対象としたもので、農耕地では一般に複雑であり、土壤の集積状況、安定性、クラスト、植生など、考慮すべき事柄が多くある。しかし、農耕地での表土流出評価の必要性から、部分的にはBAGNOLDの力学モデルをよりどころに半経験的な表土流出量の評価が、CHEPILらアメリカの研究者により1950年代の中ごろから行われた。これらは対象地域の年間の表土流出量をいくつかのパラメータから推定しようとするもので、WIND EROSION EQUATION (WEQ) と呼ばれ (CHEPIL and WOODRUFF, 1963)、さまざまな改良が加えられながら (WOODRUFF and SIDDOWAY, 1965)、長い間利用されてきている。

一方、最近では計算機の発達にともない評価対象の区域が細分化されてきているのみならず、時間スケールも短くなり、イベントごと、あるいは日々の表土流出（表土輸送）を評価する傾向になっている。RWEQ (Revised Wind Erosion Equation: BONDY *et al.*, 1980), WEAM (Wind Erosion Assessment Model: SHAO *et al.*, 1996), WEPS (Wind Erosion Prediction System) 等と呼ばれるモデルが1980年代から1990年代にかけて、アメリ

カ、オーストラリアなどで開発されている。

本小論では、原点である砂移動の力学とWEQを簡単にReviewし、最近カンサス大学のWERU (Wind Erosion Research Unit) で開発しているWEPS (WAGNER, 1996; HAGEN *et al.*, 1998)について検討する。

2. 砂移動の力学

砂の移動に関する空気力学的な研究は、BAGNOLD以降数多くあり、移動限界摩擦速度、風速の鉛直分布、砂輸送量などについて知見が得られている。とくにSaltationと呼ばれる移動形態による砂輸送量については、BAGNOLD, OWEN, LETAU, KAWAMURAなどによる公式が提唱されている。しかし、これらはいずれも限界摩擦速度、摩擦速度、砂粒径の関数になっており、その点では大きな相違はない。一方、0.05-0.06mm以下の細かい粒径のparticleは沈降速度が遅く、鉛直乱流拡散によって浮遊したまま輸送される。このSuspensionと呼ばれる移動形態による輸送量の評価には、大気中への供給過程として最近“Saltation bombardment”という概念が考えられている (SHAO *et al.*, 1993)。

3. WIND EROSION EQUATION

1950-1960年代に発達したWind erosion equationは、対象地域の地表面状態と気候をパラメータ化し、年間の流失表土量を見積もることを目的として開発された。

CHEPIL and WOODRUFF (1963)によれば、Wind erosionによって失われる土壤の総量E (ton/year) は、

$$E = F (I, C, K, L, V) \quad (1)$$

*東京水産大学海洋環境学科

(受付: 1998年11月10日、受理: 1998年11月30日)

*Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Fisheries. 4-5-7, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan.

表1. Soil erodibility.

Soil erodibility I for soils with different percentages of nonerodible fractions as determined by standard dry sieving*

Percentage of dry soil fractions $>0.84\text{mm}$	Units									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
tens	tons/acre									
0	—	310	250	220	195	180	170	160	150	140
10	134	131	128	125	121	117	113	109	106	102
20	98	95	92	90	88	86	83	81	79	76
30	74	72	71	69	67	65	63	62	60	58
40	56	54	52	51	50	48	47	45	43	41
50	38	36	33	31	29	27	25	24	23	22
60	21	20	19	18	17	16	16	15	14	13
70	12	11	10	8	7	6	4	3	3	2
80	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* For a fully crusted soil surface, regardless of soil texture, the erodibility I is, on the average, about 1/6 of that shown.

とあらわされる。ここに、

Iは、soil erodibilityをあらわすパラメータで、土壤に標準的なDry sievingを行ったときの粒径0.84mm以上の粒子の占める割合に依存する。

Cは、Local climatic factorで、平均風速と土壤表面の水分量でパラメータ化される。

Kは、土壤表面のroughnessを、

Lは、対象としているfieldのequivalent widthで、風の主方向の有効距離をあらわす。

Vは、Vegetation indexで、植生の占める面積の割合、種類などでパラメータ化されている。

これらのパラメータを蓄積された表土流失資料をもとに評価する。

WOODRUFF and SIDDOWAY (1965)によるKansas stateの例では、まずDry sievingの資料からもとめたSoil erodibility (I) は25%となっている。したがって、表1より、Potential soil loss (E1) は、86tons/acreとなる。次に、図1はLocal climatic factor (C) で、Kansasの対象地域では50%となっている。これをE1に乘じ、第二段階のerodibilityは43tons/acreとなる。以下順次過去の資料からもとめたTableやChartをもちいて見積もられた損失土壤の総量 (E) は、15tons/acreとなっている。このような手法は著者も指摘しているように、きわめて粗い見積もりであり、使用されたパラメータも不確定な点があるが、この時代、とにもかくにも損失土壤の総量を評価する手法を開発した点が高く評価できるし、その後の表土流失モデルの原点となっている。

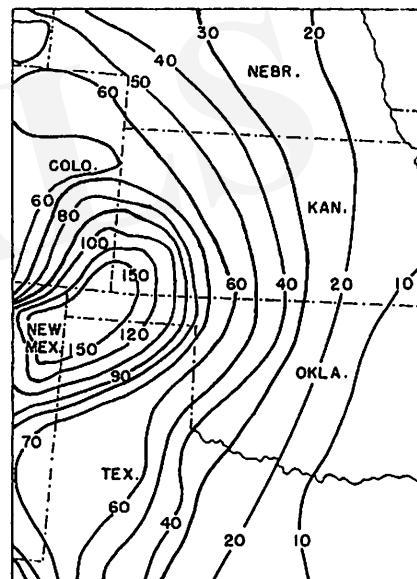


図1. Wind erosion climatic factor.
Wind erosion climatic factor C' (per cent) for Kansas and parts of Nebraska, Colorado, Oklahoma, New Mexico, and Texas. Similar maps for other parts of the USA are available from the Erosion Research Laboratory at Manhattan, Kansas.

4. WIND EROSION PREDICTION SYSTEM

WEQにかわる新しいモデルとして最近WERUが開発したWEPSは、7つのSubmodelと4つのData baseからなる“Process-based, daily time-step computer model”で

ある。図2にその構造を、図3にシミュレーション領域の概念図を示す。WEPSの目的には、農耕地からのSoil loss, Plant damage, PM-10 emissionの評価とうたわれている。

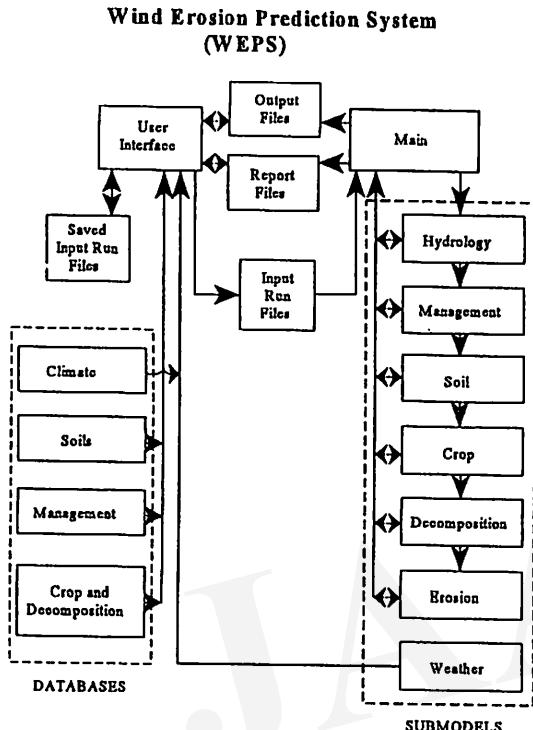


図2. WEPS System.

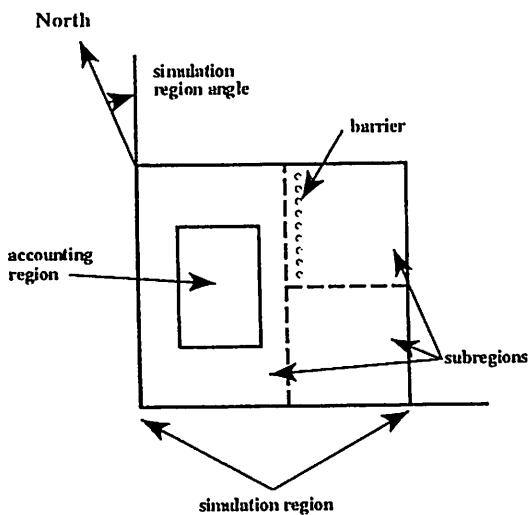


図3. WEPSのシミュレーション領域。

WEPSの特徴をWEQとの比較の上で例挙すると

- (1) Nonuniform areaを取り扱うことができるので、Wind erosionの空間変化を議論できる。(WEQ: Single, uniform, isolated fieldを対象とする)
- (2) Soil lossのみならず、depositionも評価できる。(WEQ: 平均的なErosionのみの評価)
- (3) GridごとのEstimationなので、2次元空間でErosionを評価できる。(WEQ: 風の主方向に沿った線上での評価である)
- (4) Daily time-stepなので、一つのイベントから、経年変化まで、自由に出力を選べる。(WEQ: 長期間平均のみの評価となる)
- (5) 多岐にわたる地表面過程を組み込むことができる。(WEQ: 単一な地表面状態として、パラメータを決定する)
- (6) 天候やErosionによる、地表面状態の変化をモデルにFeedbackできる。(WEQ: Feedbackできない)

以上のように、WEPS (Wind Erosion Prediction System) は、Wind erosionに関係すると思われるほとんどのプロセスを組み込んだ、Simulation Modelである。これに含まれるSubmodelのひとつ“Erosion”(図2)では、1) 摩擦速度の計算、2) 限界摩擦速度の計算、3) Grid pointごとに、soil loss/depositionの計算、4) Soil surface variablesのupdateを順次行っている。また、このSubmodelのなかで、Suspension discharge (SD) を推算しており、式の形はやや複雑であるが、SDはSaltation/creep dischargeと密接に結びついており、この点、あからさまではないにしろ Saltation bombardmentの概念が考慮されているといってよいだろう。

引用文献

- BAGNOLD, R.A. (1941) : *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London, Chapman and Hall.
- BONDY, E., LYLES, L. and HAYES, W.A. (1980) : Computing soil erosion by periods using wind-energy distribution. *J. Soil Water Cons.*, 35: 173-176.
- CHEPIL, W.W. and WOODRUFF, N.P. (1963) : The physics of wind erosion and its control. *Adv. Agron.*, 15: 211-302.
- HAGEN, L.J., WAGNER, L.E. and SKIDMORE, E.L. (1998) : Wind erosion process in WEPS: 1. Analytic solutions and sensitivity analyses for saltation/creep and suspension components. *1998 ASAE Annual International Meeting, Orlando, Florida*.
- RAUPACH, M.R. (1994) : Simplified expression for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary Layer Meteorol.*, 71:

- 211-216.
- SHAO, Y., RAUPACH, M.R. and FINDLATER, P.A. (1993) : The effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *J. Geophys. Res.*, 98: 12719-12726.
- SHAO, Y., RAUPACH, M.R. and LEYS, J.F. (1996) : A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Aust. J. Soil Res.*, 34: 309-342.
- WAGNER, L.E. (1996) : An overview of the wind erosion prediction system. *Contribution from USDA-ARS in Corporation with Kansas AG. Exp. Station*, Contribution No. 96-205-A.
- WOODRUFF, N.P. and SIDDOWAY, F.H. (1965) : A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29-5: 602-608.

Chernobyl の放射性エアロゾルの 長期挙動と砂漠のバルハンへの応用

羽田野祐子*

Long-term Migration of Radioactive Aerosols in Chernobyl
and Applications to Barchans in Deserts

Yuko HATANO*

1. チェルノブイリの放射能

1986年4月26日に起きたチェルノブイリ原子力発電所の事故では、大量の放射性核種が大気中にばらまかれた(図1)。原子炉の火事のため、風にたなびく煙(plume)の形で大量の放射性核種が放出され、その後地上に降り積もった。放射性核種は、ダスト表面に付着したり(Cs, Sr等の揮発性元素)、単一元素だけで凝集粒子を形成し

たり(Ru等の白金属)、燃料の破片中に含まれていたり(Pu, U等)、元素によって異なる形態を取るが、ある程度の重量範囲にあれば風によって再び空気中に舞い上げられ(再浮遊resuspension)エアロゾルとなり、そして重力で再び地上に降り積もる(沈降deposition)。この繰り返しのため事故現場付近での空気は長期間にわたって放射能を帯び続けるのである。

チェルノブイリとその近郊では、事故以来10年以上にわたってほぼ毎日放射性エアロゾルの空気中濃度を地上1.5mの高さで測定している。事故現場付近の測定地点の地図を図2に示す。サンプリングされた粒子の直径は約1.5-15 μm である。

チェルノブイリ事故については、様々な計算機シミュレーションが行われてきた。しかし、これらは緊急避難対策が目的であるため、再浮遊過程を考慮していない。そのため、事故後数週間で実測値と顕著にずれてしまう。そもそも再浮遊は微妙な気象条件に左右される大変複雑な過程であるため、長期にわたるモデル化は不可能だと考えられていたのである。筆者らはこの点を解決した(HATANO, Y. and HATANO, N., 1997; HATANO *et al.*, 1998)。以下にその概要を述べる。

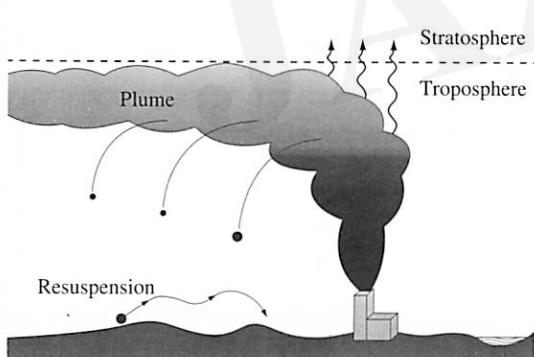


図1. チェルノブイリ事故の模式図。

4号炉の火事により放射性核種を大量に含むブリュームが発生した。このブリュームは対流圈を移動した。ブリュームに含まれる重い粒子は発電所近くに落ち、軽い粒子は数百キロも運ばれ、ヨーロッパ全域の汚染を引き起こした。放出された核種のうち、ごくわずかな部分は成層圏まで上がり、フォールアウトとなって北半球全体を汚染した。発電所近郊では、地面に落ちた放射性物質は風に舞い上げられ再び空気中を漂うため、事故後何年にもわたって空気を汚染し続けた。

2. 再浮遊の長期モデル

ここで提案するのは風速のゆらぎの統計的性質を考えたモデルである。本モデルにより、次の3つの予測式が解析的に導かれる。

予測1：ある地点における、ある放射性核種濃度の大気中濃度 C は時間が経つにつれて次のような形で減

*理化学研究所計算科学研究室

(受付：1998年11月10日、受理：1998年11月30日)

*The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Computational Science Laboratory, 2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan.

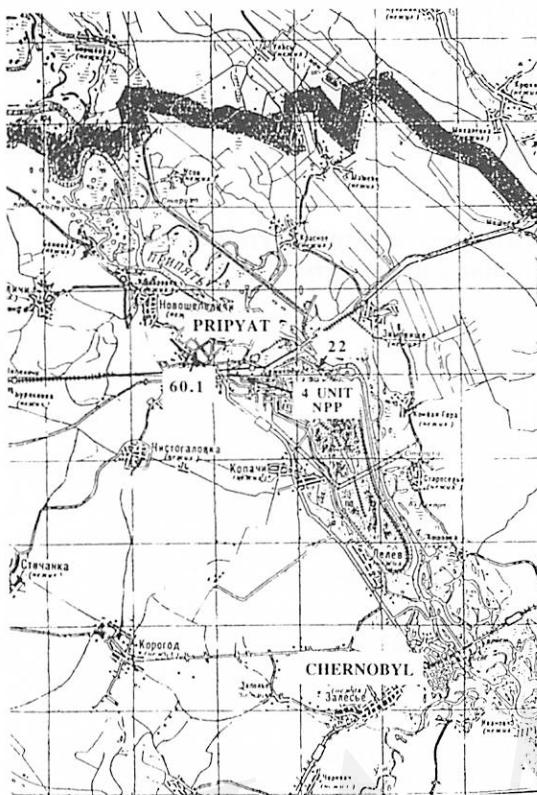


図2. チェルノブイリの発電所と大気中濃度測定地点。格子間隔は4 km。太い線はウクライナとベラルーシの国境。“4 UNIT NPP”は事故のあった4号炉の位置を示す。

衰する：

$$C \sim e^{-\lambda t} t^{-4/3} \quad (1)$$

ここで t は事故からの日数、 λ は $\lambda = (\text{放射性崩壊定数}) + (\text{植物の取り込み率}) + (\text{河川や地下水への流出率}) + \dots$ のように、一次反応の形で書けるプロセスによって核種が再浮遊-沈降のサイクルから取り除かれる速さを表す。

予測2：ある地点における再浮遊率 K ($K = \text{ある核種の大気中濃度}/\text{地表濃度}$) は次のような形で減少する：

$$K(t) \sim t^{-4/3} \quad (2)$$

予測3：ある期間 T 中に測定されたすべての濃度データの標準偏差は

$$\sigma(T) \sim T^{-0.33 \pm 0.08} \quad (3)$$

のように変化する。これはMANDELBROTによるフラン

タルゆらぎの形と一致する。

第1の予測についてチェルノブイリ近郊の実測データをフィットした結果を図3に示す。第2の予測についてはGARGERらが実測データを経験的にフィットした式 $K(t) \sim t^{-4/3}$ (GARGER *et al.*, 1997) と非常によく一致している(図4)。また第3の予測についても、GARGERらが実測データを解析して出した標準偏差 $\sigma(T) \sim T^{-0.33 \pm 0.08}$ (GARGER *et al.*, 1994) と大変よく一致している。

以上の予測は風による放射性エアロゾルの拡散と再浮遊、および重力による沈降を考慮した次のような移流方程式を解析的に解くことによって得られた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_1 \frac{\partial C}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial C}{\partial x_2} + \lambda C = \delta(x_1) \delta(x_2) \delta(t) \quad (4)$$

ここで v_1, v_2 はそれぞれ x, y 方向の実質的風速、 δ 関数は事故による核種の放出を表す。風速 v_1 および v_2 は確率変数と考えるので、式(4)は確率微分方程式になる。

ここで注意すべきことは、現実の風は全くランダムに吹いているのではなく、その風速は時間的に相関を持っていることである。これは乱流理論でCORRSIN-OBUKHOVの関係と呼ばれ、

$$\langle v_i(t) v_j(t+\tau) \rangle \sim \delta_{ij} \tau^{-2/3} \quad (5)$$

と書かれる。本モデルでは、風速の時間相関を取り入れたことが大きな特徴である。式(4)(5)を解くことによって上記の3つの予測式が導かれる。

ダストの再浮遊については、臨界風速の問題や、地表の状態によって再浮遊率が大きく異なるといった問題がある。しかし、ここでは拡散を現象論的に捕らえて現実のデータを再現することを研究の第一目的としているので、再浮遊に伴う細かいダイナミクスは平均化してしまうと考える。

3. チェルノブイリ以外の事例への適用

本モデルは乱流の基本的性質に基づいているため、チェルノブイリ以外の風による粒子の輸送現象に対しても成立立つのではないかと予想される。そこで、次の2例について検討した：(1) 米国東部の核施設から放出された ^{85}Kr の濃度の1,100kmにわたる観測結果；(2) 北極海上空の大気境界層でのエアロゾル観測結果。この2つの場合のデータについて、上記の予測3が成立した。 ^{85}Kr のデータはGIFFORDの解析により $\sigma(T) \sim T^{-0.35}$ であることが示されている(GIFFORD, 1991)。北極海エアロゾルの解析結果は図5に示す。データが $-1/3$ の直線に大変

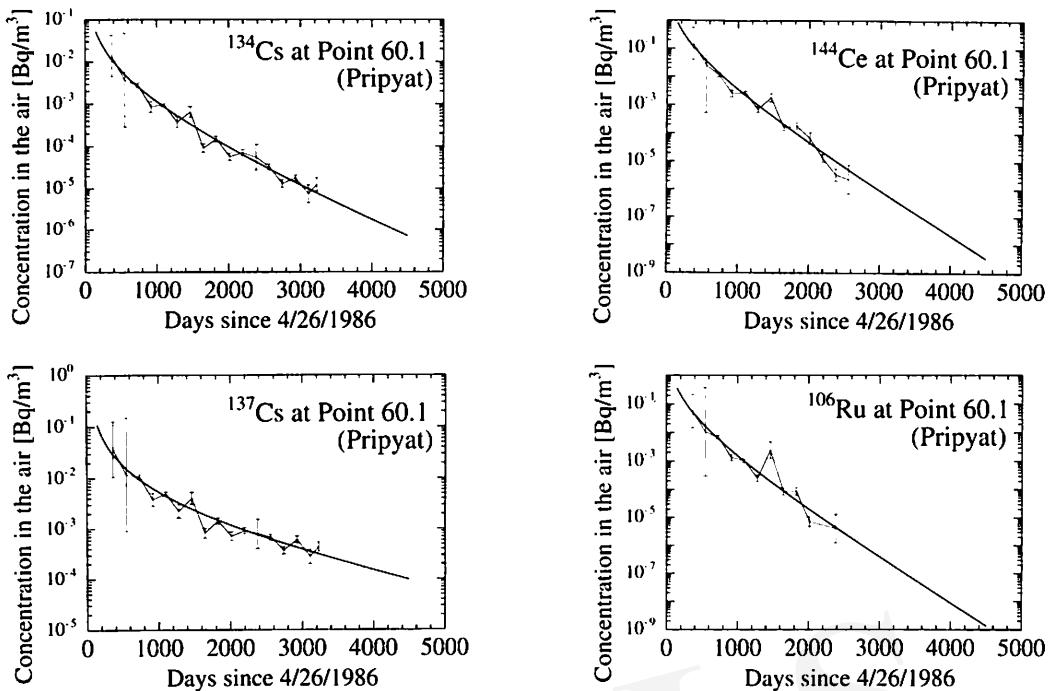


図3. 発電所の東4 kmの地点における ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru の大気中濃度。
折れ線は実測データの6カ月平均値。曲線が本モデルによる式(1)の予測。

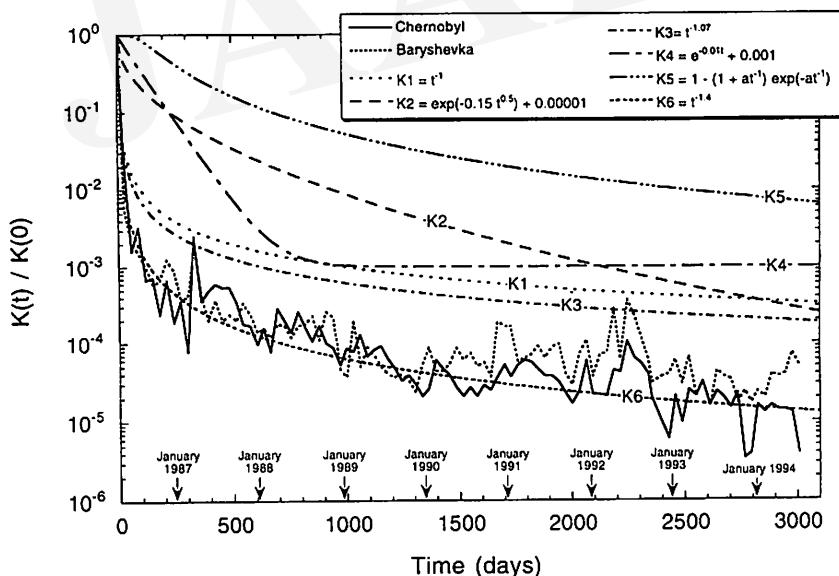


図4. 再浮遊率の実測値とそのフィッティング。

実測値は2つのサイト、チェルノブイリの町（発電所の南16km）とバリシェフカの町（発電所の南160km）のもの。実測値は初期の再浮遊率 $K(0)$ で規格化されている。フィッティング曲線は以下の通り。
 K1 : GARLAND モデル (1991) ; K2 : ANSPAUGH モデル (1975) ; K3 : HOETZL モデル (1992) ; K4 : LINSLEY モデル (1978) ; K5 : MAKHONKO モデル (1992) ; K6 : GARGER らによる実測値のベストフィット (1997)。
 従来のモデル (K1-K5) は実測値と合っていない。GARGER らは様々な関数を試し、 $t^{1.4}$ が最もよく実測値と一致することを見いだした。

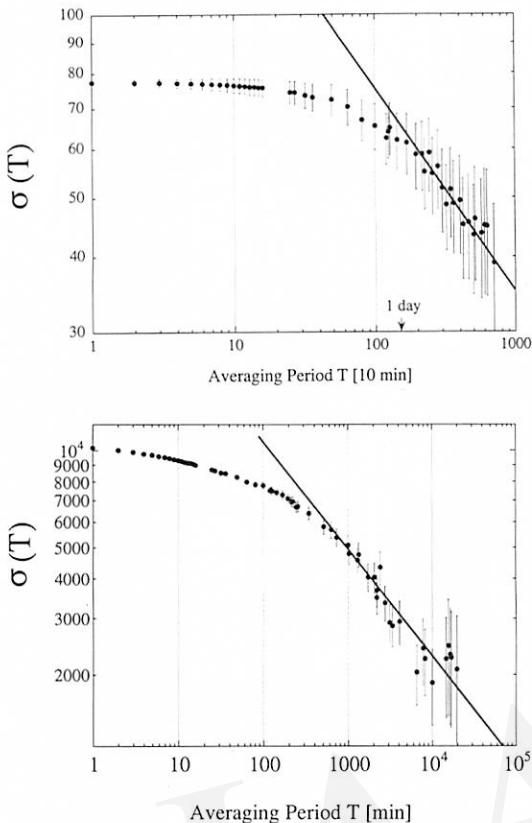


図5. (a) ラドン濃度、(b) CCN濃度。両者とも $\sigma(T) \sim T^{-1/3}$ に従っている。

よく従うことがわかる (HATANO *et al.*, 1999)。夏の北極海には、ヨーロッパ地方およびロシア東部で発生した大気汚染物質、例えばCO₂, NO_x, SO_x, O₃が輸送されると考えられている。雲凝結核(CCN, Cloud Condensation Nuclei)とラドンの濃度について、ゆらぎの標準偏差を求めた。ちょうど $T = 1$ 日のところで $-1/3$ の直線から外れているのが興味深い。これは1日以下の時間スケールでは式(5)が成り立っていないためだと考えられる。

このように、⁸⁵Krの場合も、北極海のデータの場合も、予測3が成立する。このように、我々のモデルは広域大気汚染に普遍的に適用可能であることが示唆される。

4. 砂漠のバルハンの移動への応用

以上の研究で用いられた風の性質を、砂漠のバルハンの移動問題に適用する。この問題では、従来風は数方向から吹くものと仮定されており、チェルノブイリの研究で本質的だと明らかになったCORRSIN-OBUKHOVの関係式

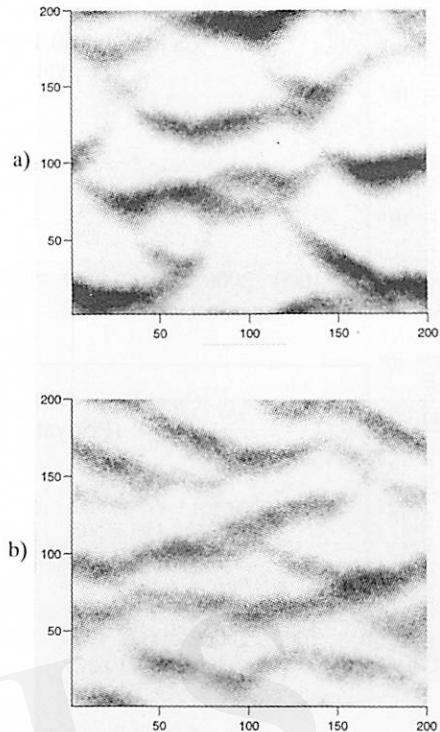


図6. 風速の相関を考慮したことにより砂丘の形状が変わる。
(a) 基本ケース。バルハンを形成する。(b) 相関を考慮したケース。(a)と同じ条件で風に式(5)の時間的相関を与えた。ストライプに近いパターンを形成した。

(5)で表されるゆらぎは採り入れられていない。そこで、CORRSIN-OBUKHOVに従うゆらぎをもった風速で計算を行った。バルハンのモデルには、広く使われているWERNER (WERNER, 1995)のものを用いた。

図6に、WERNERと同様な方法で計算した場合とCORRSIN-OBUKHOVの風速ゆらぎを採り入れた場合との比較を示す。前者は通常のバルハンが形成されるのに対し、後者ではストライプに近い砂丘が形成されている。この詳細は後に報告する。

引用文献

- GARGER, E.K., KASHPUR, V.A., GURGULA, B.I., PARETZKE, H.G. and TSCHIERSCH, J.(1994): Statistical characteristics of the activity concentration in the surface layer of the atmosphere in the 30km vicinity of Chernobyl. *J. Aerosol Science*, 25: 767-777.
GARGER, E.K., HOFFMAN, F.O. and THIESSEN, K.M.(1997): Uncertainty of the long-term resuspension factor. *Atmospheric Environment*, 31: 1647-1656.

- GIFFORD, F.A.(1991): The structure of atmospheric diffusion at regional scales. *U.S. Army Research Office, Final Technical Report*, Contract No. P-027096-GS-S.
- HATANO, Y. and HATANO, N.(1997): Fractal fluctuation of aerosol concentration near Chernobyl. *Atmospheric Environment*, **31**: 2297-2303.
- HATANO, Y., HATANO, N., AMANO, H., UENO, T., SUKHOCHIKIN, A.K. and KAZAKOV, S.V.(1998): Aerosol migration near Chernobyl: Long-term data and modeling. *Atmospheric Environment*, **32**: 2587-2594.
- HATANO, Y. and HATANO, N.(1999): Aeolian transport of radioactive dust in Chernobyl. *Zeitschrift für Geomorphologie*, in press.
- HATANO, Y., HATANO, N., LECK, C. and BARR, S.(1999): Turbulent transport of aerosols in the arctic marine surface layer. *J. Geophys. Res.*, in press.
- WERNER, B.T.(1995): Eolian dunes: Computer simulations and attractor interpretation. *Geology*, **23**: 1107-1110.

中国トルファンの砂丘移動と防砂について

真木太一*・杜 明遠*

On the Movement of Sand Dune and Prevention of Wind Erosion by Windbreaks at Turpan in China

Taichi MAKI* and Mingyuan DU*

1. はじめに

地球上の全陸地の1/3を占める乾燥地は地形、地質、標高などによってその特徴が大きく異なり、また気象、土壤、植生条件によっても著しい変化を示す。中国の沙漠面積は全国土の13.6%を占める中で、中国の乾燥地、特に新疆、タリム盆地のタクラマカン沙漠やジュンガル盆地のグルバントングト沙漠の周辺部では、開発によって緑化が進む一方、沙漠化が進行している。

砂丘地における砂の供給は、干上がった河川の川床からの移動および活動を再開した古い半固定・固定砂丘からの移動であって、これらは沙漠化の最も顕在化した動態である。ゴビ（石礫）沙漠や岩石沙漠では沙漠化の進行は小さいが、特に砂丘地では砂の移動によって農地、牧草地、灌木林、道路、水路、民家などが砂に埋まったり、飛砂による作物、家畜や住民の日常生活への被害が出るなど、影響が顕著である。

近年、新疆生物土壤沙漠研究所吐魯番沙漠研究站付近の砂丘は活動が活発化し、沙漠化拡大の危険性が高く、その砂丘の先端は農地に侵入しつつあった。それを防止すべく懸命に努力している中で、最近の植林作業が効果を果たしてきている。

乾燥地の植物は厳しい環境下にあり、耐干、耐風、耐熱、耐寒、耐塩性などを持つ植物でないと生育できない。乾燥地で気象改良を行うには、防風林帯、防風垣帯、草生帯などで環境改善を行う必要がある。

オアシスと沙漠との気候の違いをみると、オアシスの気・地温は沙漠よりも、夏季に低く冬季に高く、日中に

低く夜間に高い、また年変化・日変化は小さい。オアシスでは風速は半減する。沙漠では降雨後の気・地温の上昇は急激であるが、オアシスでは土壤水分と湿度の増加のため緩やかであり、気候緩和効果が大きい。

ここでは新疆地域、および主としてトルファンの砂丘の移動について考察し、砂丘の移動速度と移動量を気象との関係から明かにするとともに、防砂効果に関する研究をレビューする（真木ほか、1993a, b, 1994, 1995；真木、1996, 1998）。

2. トルファンの沙漠化地域の特徴

トルファン沙漠研究站付近の砂丘地域は近年沙漠化したものであり、活動の活発な砂丘では頂上より風下側に砂粒が滑落し、砂丘の風下斜面が33~35度の傾斜角、安息角を持った砂丘が1990年には10数個あった。それらの高さは3~8 mであり、また安息角の持つ急な傾斜の砂丘の内、大きいものでは長さ150mに達していた。もちろん、急傾斜面のない砂丘が大部分であるが、研究站付近の砂丘地域は南北約2 km、東西約5 kmで、10km²以上に及ぶ。また調査対象地域の風上側は砂の供給地域であって、砂丘は少なく、粘土質土壤の露出、風食地城の荒地（土漠）が広く分布しており、その面積は60km²以上である。従って、その風下側に砂が集積している。対象地域では前述した通りトルファン沙漠研究站による小規模な植林によって一部ではかなり活動が治まっているが、まだ不十分である（真木ほか、1993a）。

沙漠研究站の南東2~3 kmにある砂丘を用いて、1990年3月~1994年8月の4年半の砂丘移動距離と強風時

* 農業環境技術研究所環境資源部気象管理科

(受付: 1998年11月10日、受理: 1998年11月30日)

* Division of Agrometeorology, Department of Natural Resources, National Institute of Agro-Environmental Sciences, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 3-1-1, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan.

間・風向との関連について調査した。調査対象の砂丘は、片方に長く尾を引く変形したバルハーン型で、付近では最も大きい、高さ約7mの砂丘である。

3. トルファンにおける砂丘の移動方向と移動速度

1) 砂丘移動と気候要素との関係

①強風時（10分間平均風速8m/s以上）の最多風向についてみると、日最大風速の最多風向は大きくばらつくが、強風時（17.2m/s以上）の風向はW～WNWであった。

②高さ6mの風速8m/sは、高さ1mではほぼ6m/sに相当する。非常に軽く動きやすい砂では5m/sから移動し始めるが、一般的には砂の移動は大体この6m/sの風速からである。5～6m/sの風（高さ6m）では砂丘の移動への関与の程度は小さく、10m/s以上の風に依存する程度が大きい。

③5, 10, 15m/sを基準として、それ以上の風速（m/s）の発現時間（t, hr）と砂丘の移動距離（d, m）との関係を求めた。1991年9月1日～1992年8月31日には、それぞれ次式のようになった。

$$d = 0.0177t, d = 0.0687t, d = 1.125t$$

0.0177などの比例係数（k）と風速（u, m/s）には次式の通りべき関係があり、相関係数（r）は0.918であった。

$$k = 4.63 \cdot 10^{-5} u^{3.38}$$

その他の期間についても同様な関係があり、べき乗は2.98～3.38で、平均3.18となった。なお、全体のrは0.917～0.985で、平均は0.952で非常に高い。

ここで、移動距離（d, m）、吹走時間（t, hr）、風速（u, m/s）を考慮すると、

$$d = 7.3 \cdot 10^{-5} t \cdot u^{3.18}$$

で表せる。従って、砂丘は風速のほぼ3乗に比例して移動することになる。この関係式によると、強風の継続時間と砂丘の移動距離は8～10m/sの強風とよく対応する（真木ほか、1995）。また、風速の3乗に比例する関係式から時間の3乗をとれば、dは砂の容積（堆積）（v, m³）となり、次元的に一致する。

なお、短期間よりも長期間の相関が小さくなることは、長期間では逆向きの風も関与して移動量が減少するため、結果的には移動距離は短くなることを示す。

2) 砂丘の移動方向と移動速度

1991年5月～1992年10月（1年半）の砂丘の移動方向とベクトル表示の月別の移動距離を図1に示した。1991年9月～1992年8月の1年間では9.0m移動した。

砂丘の移動方向は強風時の風向に従って、W～WNW方向からの移動であった。また1993、1994年も同じW～WNWであった。砂丘はW～WNW方向からE～ESE方向に移動することになり、実際には、図1に示すように、E～ESE方向の中間的な移動方向である。

トルファンの高さ7mの砂丘の移動距離は1990年8月～1991年8月に9.5m、1991年8月～1992年8月に9.0m、1992年8月～1993年8月に12.0m、1993年8月～1994年8月に11.0m、1995年、1996年には10.0mずつであり6年間平均で10.3mとなった。

4. 防風林・ネットによる防風・防砂効果

1) トルファンにおける防風林による風食・堆砂状況

タマリスク防風林①は高さ4.6m、林帯幅12m、密閉度85%である。2列のタマリスク防風林②は強風時の主風向に対して風上側の防風林の高さは10.0m、風下側は5.5mであり、それぞれ、樹高は2.5m、4.0m、林帯幅は19m、13mである。密閉度は同じく上層部50%，中・下層部100%である。

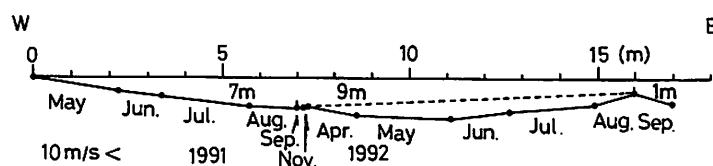


図1. トルファンにおける1991年5月～1992年10月の砂丘の移動方向とベクトル表示の月別移動距離。
(10m/s以上)

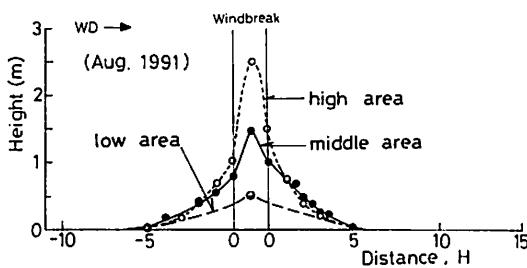


図2. トルファンにおける1列のタマリスク防風林による堆砂状況。
WD: 強風時の主風向

①1列防風林（真木ほか, 1993b）：タマリスク防風林による1991年8月の堆砂状況を図2に示す。堆砂は防風林内の高い所で2.5m、平均的な所で1.5m、低い所でも0.5mあった。堆砂範囲は防風林の前後-6H～6H（数字は防風林の高さの倍数で表した高倍距離、風上を一、風下を十で表す）で、ほぼ対称である。それ以上防風林から離れると風食・堆砂の混合域に変わるが、それは主風向、逆風向時の風食によるためである。

②2列防風林（真木ほか, 1994）：1994年4月の2列のタマリスク防風林による堆砂は、図3の断面図に示す

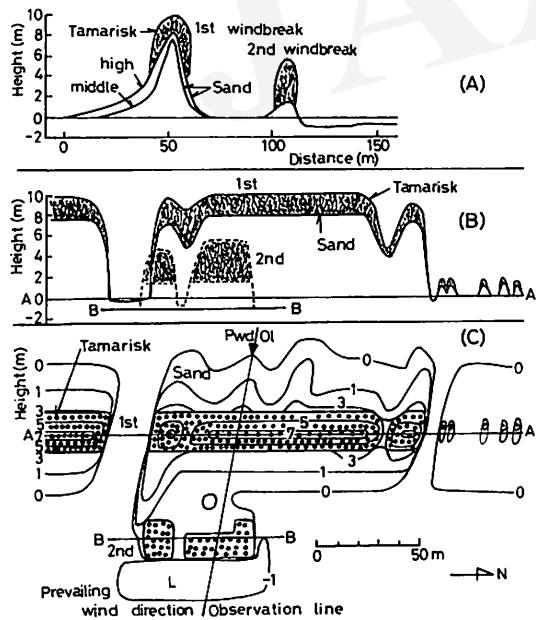


図3. トルファンにおける2列のタマリスク防風林による堆砂状況。
(A) 横断面, (B) 立面, (C) 平面

ように2列防風林とともに堆砂が認められる。強風時の主風向W～WNWに対して風上林となる広幅防風林帶の堆砂は6.5～8.5mで、平均的には7.5mである。林帶の風上側には堆砂が多く、風下側直後に堆砂はあるが、減少は早い。一方、風下林となる狭幅防風林帶の堆砂は1.5mである。なお、堆砂土のタマリスク林は風上林で2.5m、風下林で4.0mで、堆砂の少ない方が樹高が高い。また風下林の後方は冬季の灌漑用水路のため低く、堆砂は除去される。

③1列防風ネット（真木ほか, 1993b）：2種の防風ネット（密閉度はAネット40%、Bネット45%）による1990年11月～1991年4月の堆砂状況は、図4に示すように高い所は3Hにあり、Aネットは30cm、Bネットは40cmである。ネットの下方を5cm程度開けてあるので堆砂がなく、相対的に強い風が吹くために、むしろ風食が発生する。なお、これらの防風ネットは防風と風食防止を主目的として、砂があまり堆積しないように考えて設定したが、設定後に土埃や植物の種子などが付着して密閉度が高くなり、結果的にはかなり多く堆積した。

2) トルファンでの緑化の事例

新疆トルファンでの緑化方法について述べると、タマリスク、梭梭（ソウソウ）、沙拐棗（シャカイツオ）の苗（高さ数10cm、直径1cm程度）を寒候期に砂質または堅い粘土質土壤に移植する。活着率は場所によって大きく異なるが、10～70%である。また、地表面を這う老

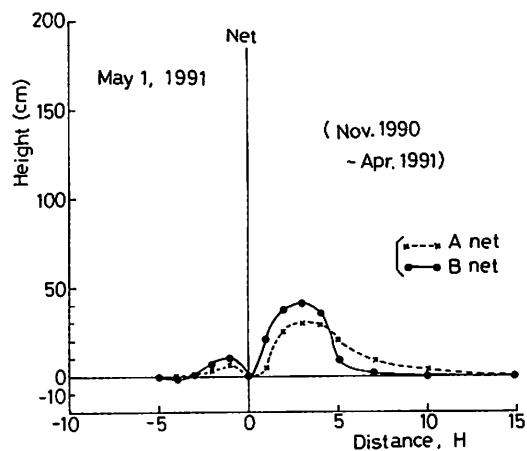


図4. トルファンにおける2種の防風ネットによる堆砂状況。

鼠瓜（ラウソウガン）の播種を行っている。寒候期に余った水を利用して毎年1回灌漑を行っているが、冬季は凍結しており、春季に氷が融けると利用できる。ただし、あまり広範囲には灌漑できない。また、道路沿いで灌漑水が十分ある場合には、主としてボプラを植林している。ボプラは葉の裏側が白い銀白楊、新疆楊が多い。これらのボプラを1~2列に密植している場合が多い。

タマリスクは耐風、耐干、耐熱、耐寒、耐塩性が大きく、乾燥農業限界地域に適する。柽柳（紅柳）（タマリスク、ギヨリュウ）は枝葉が細かく密生するため防風効果は大きく、砂に埋まると植物体が伸長する特性があり、トルファン沙漠研究站付近には植林当初からの樹高が10mに近いものもある。

中国西北部の乾燥地の代表として、トルファンにおける防風施設、防風・防砂林には、数種類の楊（ヤマナラシ属、ボプラ）、柽柳（タマリックス属、タマリスク）、沙棗（グミ属）、胡楊（ヤマナラシ属、コヨウ）、柳（ヤナギ属）、白榆（ニレ属）、沙拐棗（沙拐棗属）、梭梭（梭梭属）が多く利用されている（真木、1996）。

3) タクラマカン沙漠の沙漠道路と防風ネットの効果

タ克拉マカン沙漠（タリム盆地）の石油開発の目的で、1992~1995年当時、沙漠道路を建設中であり、砂丘地域では飛砂・堆砂防止を行う必要があった。そこでトルファンで実施した防風林、特に防風ネットによる風食防止・堆砂効果が評価されたため、その防風ネットを応用して試験を行った。輪台の南100km付近のタ克拉マカン沙漠内に2kmの試験道路を建設し、レンガ、コンクリート、アスファルト、塩散布などの各種の試験を実施していた。その道路を保護するために、草方格（ワラ、ヨシなどを1m×1mの基盤目状にシャベルで砂中に押し込み防風・防砂を行う高さ10~20cmの簡易な施設、幅100m）（真木、1998）、防風垣（高さ1~2mのヨシ束垣、ヨシズ垣など）、防風ネット（高さ1~2m）などで、防風・防砂効果の評価を実験した。なお、タ克拉マカンの沙漠縦断道路は1996年に開通している。

この防風ネットによる試験結果では、トルファンでの物理的、気象的評価結果と同様に効果が大きかった。しかも日本製（ポリエチレンラッセルネット、2mm目、密閉度30~40%、高さ2m、長さ100m）と中国製（密閉度50~60%）のネットを用いているが、日本製は密閉度が比較的低く、繊維が細いため、通風が比較的大きい割に防風効果が大きい特徴があり、さらに設置した防風ネットは砂に埋没したり、逆に支柱が掘れて倒れたりすることが少なく、より有効であった。この成果を試験段階から実施段階に持ち込むため、長さ1~2kmのネット設置によって効果を判定した結果、その効果は大きかった。

5. おわりに

本報告はすでに「沙漠研究」「農業気象」で発表した論文および著書など一部を要約したものである。詳しくは以下のオリジナルを参照されたい。本報告が、今後の研究の発展の契機となれば幸いである。

引用文献

- 真木太一（1996）：『中国の砂漠化・緑化と食料危機』信山社、191pp.
- 真木太一（1998）：『緑の沙漠を夢見て』メディアファクトリー、128pp.
- 真木太一・中井 信・高畠 滌・北村義信・遠山征雄（1993a）：『砂漠緑化の最前線』新日本出版、214pp.
- 真木太一・潘伯榮・杜 明遠・上村賢治（1993b）：中国トルファンの乾燥地における防風ネットによる微気象改良と飛砂防止。「農業気象」49: 159-167.
- 真木太一・潘伯榮・杜 明遠・上村賢治（1994）：中国トルファンの乾燥地における2列の防風林による微気象、堆砂、作物への影響。「農業気象」49: 247-255.
- 真木太一・潘伯榮・杜 明遠・鯨島良次（1995）：中国西北部の新疆および特にトルファンにおける沙漠気候と砂丘移動。「沙漠研究」4: 91-101.

ダストストーム発生に関する数値モデリングの試み（序報）

清野直子*

Preliminary Study of the Numerical Modeling of a Dust Storm Event

Naoko SEINO*

ダストストーム発生時の気象状況を知ることは、ダスト飛散の定量的な評価と詳細な機構解明のために重要である。発生地域での限られた観測データを補い、さらに多くの情報を与えるものとして、数値モデルを用いた気象状況の解析が有効と考えられる。

本研究では、今後の数値モデリングの足掛かりとして、実際の数値モデルによって大気中のどのようなスケール

の現象が再現されるのかを検討する。また、気象庁全球客観解析データから、1998年4月に生じたダストストーム例について考察する。

1998年4月18日から、新疆ウイグル自治区において大規模なダストストームが発生したことが報告されている。地上実況を図1に示す。全球客観解析データは、全球予報モデル(GSM)の予報値を第一推定値とする最適

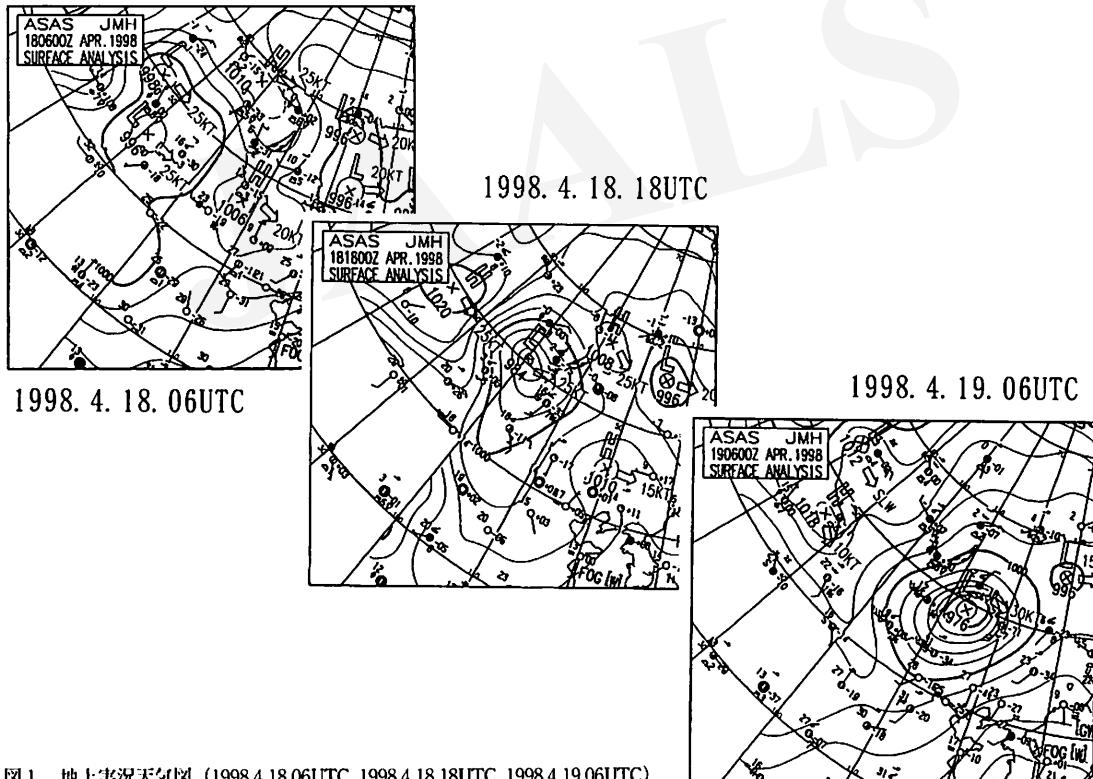


図1. 地上実況天気図 (1998.4.18.06UTC, 1998.4.18.18UTC, 1998.4.19.06UTC).

*気象庁気象研究所

(受付: 1998年11月10日, 受理: 1998年11月30日)

*Meteorological Research Institute, Nagamine, 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.

内挿法により、各種観測データを反映しつつ、6時間毎の均質な気象状況を提供するものである。この客観解析データによれば、4月18日にカザフスタン共和国東部に現れた低気圧がジュンガル盆地を経て発達しつつ東進し

た状況が示されている(図2)。低気圧の移動に伴い、その南西側を中心とする強風域も消長を見せながら移動していく様子が明らかである(図3)。今後、地形との関わりについてもさらに考察を進める。

GLOBAL ANALYSIS

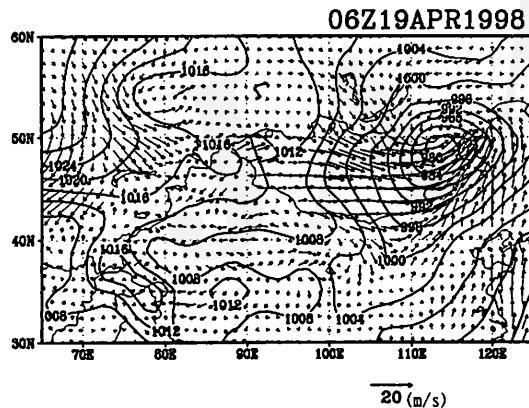
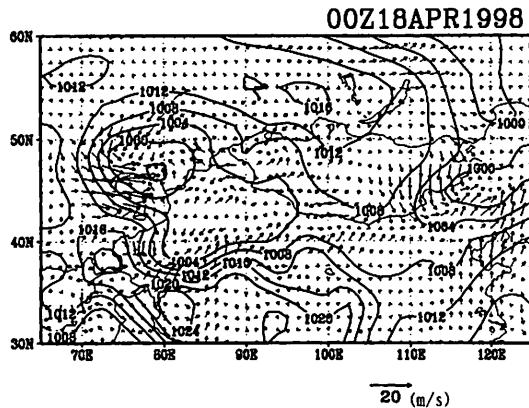
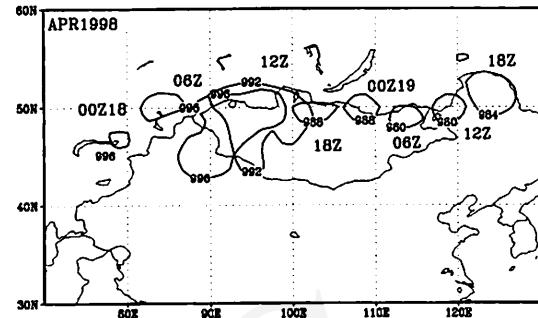


図2. 全球客観解析データによる地上気圧(海面更正値)と地上風の分布。
(上) 1998.4.18.00UTC
(下) 1998.4.19.06UTC

Low Pressure Track



Strong Wind Area

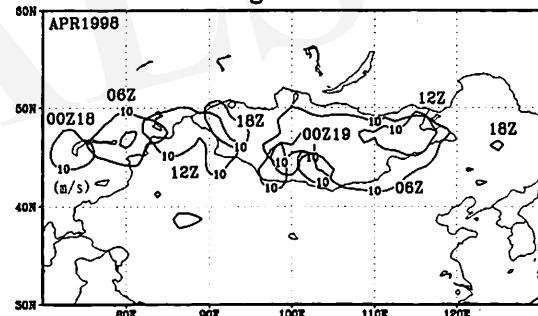


図3. (上) 全球客観解析データによる地上低気圧の移動と低気圧中心付近の等圧線および示度を表す。
(下) 同じく強風域の移動、各時刻の風速10m/sの等値線を示す。
(1998.4.18.00~4.19.18UTC) 数字は時刻(UTC)。

粒子状物質の大気中への再飛散と粒子層の相対湿度

栗 田 進*

Resuspension of Particles and Relative Humidity of Particulate Layers

Susumu KURITA*

原子力試験研究費により原子力事故時などに地表面に降り積もった粒子状放射性核種が、その後大気中に再飛散する過程をテーマにしていますが、学問的にはあまりやられていない、まともな物理現象としては把握されていません。その中で砂漠などの土壤からの再飛散は重要な課題の一つであり、SHAO (1996)などを参考にしています。ダストストームの研究はその実例として大変興味深く参考にしたいと思っています。

さて昨年度は草に降り積もった粒子の大気中への再飛散がテーマであり、草としてはリュウノヒゲ、粒子としては羊飼の胞子であるリコボジウムを用いた風洞実験・野外実験を行い興味深い結果が得られました。詳しくは気象学会および11月の原子力基盤技術シンポジウム「放射性物質の環境移行研究の新たな展開」に発表予定ですが、風洞実験からは土壤の場合と同様に再飛散率の摩擦速度依存性などがきれいに得られています。一方野外実験の方から、土壤の場合にも関わるであろうと思われる解析結果が得られております。それは、得られた再飛散率は日変化(図1)を示しますが、摩擦速度の変化だけでは説明しきれず、どうも日射または温度を敏感に反映していると思えます。日射が強い時には再飛散率が増大します。他方で、夜間に放射冷却が進んでいるときには、摩擦速度が大きい時でも再飛散が抑制されています。

この現象にはもちろん粒子の特性や接地境界層の構造等の議論もあるでしょうが、相対湿度が大変気になります。但し大気のではなくて、粒子層のです。一般に微粒子の付着力・凝集力は相対湿度に大変敏感だからです。60~80%を境に乾燥すると付着力が激減します。

ここで草から離れて、単に粒子層からの粒子の再飛散、という観点から土壤表面や葉面に降り積もった粒子を考えてみると、最も外側の表皮を構成する粒子層の相対湿

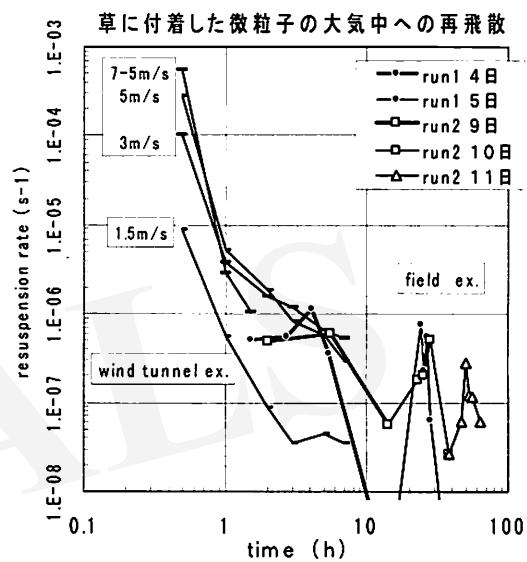


図1. 草からの微粒子の再飛散率の時間変化。
風洞実験では単調に減少したが、野外実験では日変化を示した。

度が問題になります。しかしながら、通常多くの土壤モデルでは表層の厚さは数cmで計算されています。この数cmの層とそのさらに1mm程度の表層の相対湿度の関係を知りたくなりました。そこで、このような現象を扱う計算モデルを作り結果も出てきましたので、みなさんのご意見を伺いたいと思います。なおモデルは、「水環境の気象学」の第8章を参考にした土壤水分モデルで、100ミクロンていどまでの層厚の土壤水分の分布を計算する物です。主な計算は13mmの砂層の表面1mmの表層に日射が照射されたり陰になったりした場合と放射冷却の場合を、含水率をパラメータにして示します。

*気象庁気象研究所

*Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.

図2は等温状態から日射を照射して300秒後の準平衡に近づいた各層の相対湿度を示したものです。表層の各層が基層に比べて30~50%も相対湿度が減少することが得られました。特に乾燥領域では大気よりも相対湿度が20%も減少すること、また含水量が増えても最表層は基層に比べてかなり乾燥することがわかります。

一方、夜間の放射冷却の効果を図3に示します。この場合は、冷却開始前の等温時に比べ300秒後の準平衡に近づいた相対湿度は、乾燥状態では10%近く増え基層にほぼ一致してきます。このように基層の含水率・温度や大気の状態が同じでも、日射により最表層の相対湿度は大きく違いますので、粒子の飛散にも影響してくると考えられます。

実際は基層そのものの温度・含水率・相対湿度も大きく日変化しますので、それに加えて最表層ではさらによく日変化することになります（これは表面に降り積もった放射性核種を含むダストを想定しているわけですが、大規模なダストストームのような場合にはより厚い層が効いていて、最表層はあまり関係ないかもしれません。）。

一方大気中に粒子が多く浮遊すれば、放射場・温度場を通して大気境界層の構造に影響を与えることも考えられます。従って、現在我々のところでは粒子の再飛散率は摩擦速度・土壤水分率を介してのみ大気・土壤と結びつけて考えていますが、今後は大気・土壤・浮遊粒子を動的に結びつけて考えることも必要と思われます。

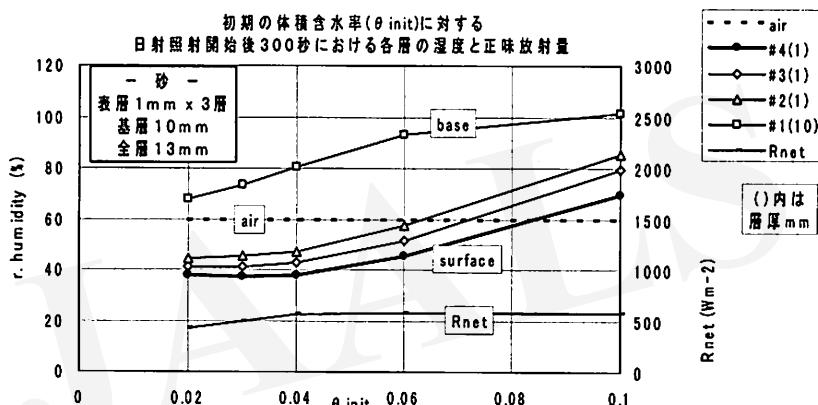


図2. 4層からなる砂層(10mmの基層とその上に1mmの表層3層)に日射が当たったときの各層の相対湿度。

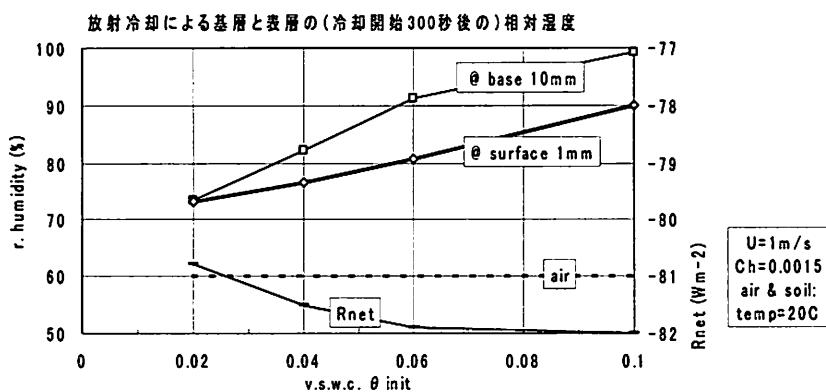


図3. 図2の砂層が放射冷却した時の基層と最表層の相対湿度。

衛星データによるタクラマカン沙漠の土壤水分解析

小黒剛成*・山田 研*・菅 雄三**・竹内章司**・土屋 清***

An Analysis of Soil Moisture in Taklimakan Desert based on Satellite Data

Yoshinari OGURO*, Ken YAMADA*, Yuzo SUGA**, Syouji TAKEUCHI** and Kiyoshi TSUCHIYA***

1. はじめに

人工衛星は準同一時刻で広域を観測できる。これにより、現地調査の困難な沙漠地帯内部の様々な情報を把握できる。人工衛星に搭載されているセンサには、光学センサとマイクロ波センサがある。光学センサは多くの波長帯（バンド）を観測できるので、これらの波長帯の組み合わせで植生・土壤水分・鉱物資源など様々な解析が行える。しかし、砂嵐・雲や雨等の気象の影響を受け易く、観測したデータ全てが利用できるとは限らない。一方、マイクロ波センサは全天候性の能動センサで昼夜を問わず観測できる利点がある。特に、合成開口レーダーは光学センサに匹敵する分解能を有し、地表面の起伏状態などが詳細に観測できる。

本報告ではフランスの衛星SPOTの光学センサ画像、日本の衛星JERS-1の光学センサ画像および合成開口レーダー画像を用い、中国タ克拉マカン沙漠南西部に位置するホータンオアシス付近の土壤水分を解析した結果を示す。

1. 使用した衛星画像

今回はフランスの衛星SPOTの2シーン（1988年10月12日観測と1992年2月24日観測、パス-ロウは共に207-275）と、日本の衛星JERS-1の2シーン（1993年3月27日観測の光学センサ画像と1993年12月7日観測の合成開口レーダー画像、パス-ロウは共に175-238）を用いた。

観測範囲はタ克拉マカン沙漠南西部のホータンオアシス付近である。

図1は衛星JERS-1の合成開口レーダーで捉えたホータンオアシスとその周囲の様子である。ホータンオアシスの南側にはクルルン山脈があり、この山脈からの流水が大河となって、ホータンオアシスを南北に通過して砂丘

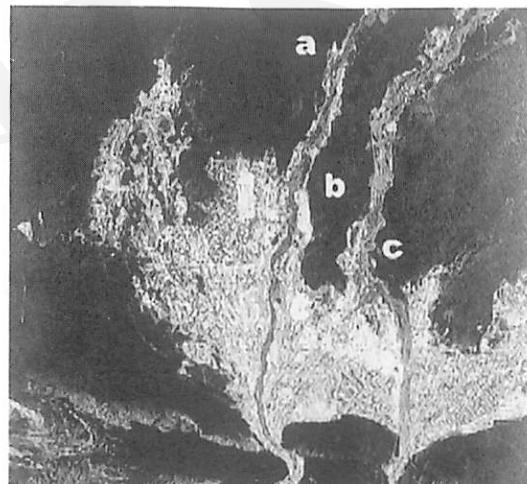


図1. 衛星JERS-1合成開口レーダー画像によるホータンオアシスとその周囲の様子（1993年12月7日観測）。明るい所は山脈・建造物・防砂林・果樹園、中位の明るい所は緑畑・未使用的耕地・河川敷、暗い所は貯水池・起伏の比較的小ない砂丘地帯を示す。ホータンオアシス内を南北に流れる2つの河があり、左側がカラカシ河、右側がユーロンカシ河である。

* 広島大学学校教育学部

** 広島工業大学環境学部

*** 財團法人広島地球環境情報センター

（受付：1998年11月10日、受理：1998年11月30日）

* Faculty of School Education, Hiroshima University, 1-1-1, Kagamiyama, Higashihiroshima 739-8524, Japan.

** Faculty of Environmental Studies, Hiroshima Institute of Technology, 2-1-1, Miyake, Saeki-ku, Hiroshima 731-5193, Japan.

*** Hiroshima Earth Environmental Information Center, 2-1-1, Miyake, Saeki-ku, Hiroshima 731-5193, Japan.

地帯へ流れている。ホータンオアシス内には南北に流れる2つ大河があり、西側がカラカシ河、東側がユーロンカシ河である。オアシス外部は砂丘地帯で、2つの大河付近には細かな砂丘が確認できる。

3. 解析方法

通常、水域の反射率は可視青バンドで約20%，可視緑バンドで約10%，可視赤バンドで約5%，近赤外バンドで約0%と、可視バンドから近赤外バンドに移るにつれて反射率が減少する。一方、植生域の反射は可視バンドで約10%～20%，近赤外バンドで約60%程度になり、この差を利用して植生解析が行える。そこで、水域の反射率が最も大きい可視青バンドの値から、近赤外バンドの値を差し引く。これにより可視・近赤外バンドを観測する光学センサのデータから、水域や地表面付近の土壤水分の多い場所が容易に検出できる。ここで、近赤外バンドの反射が強い植生域では、土壤水分が豊富であるにも関わらず負の値になるので、植生域の土壤水分解析では注意が必要である。

今回使用した衛星SPOTおよび衛星JERS-1に搭載されている光学センサは、可視緑バンド、可視赤バンド、近赤外バンドの3つのバンドを観測する。そこで、観測した3つのバンド中で水域の反射が最も強い可視緑バンドの値から近赤外バンドの値を引き、土壤水分の状態が明確になるように濃度変換を行った。この結果を図2に示す。但し、各画像の精密な幾何補正是行っていない。よってオアシスの位置や縮尺が多少異なるので注意されたい。

今回は使用していないが、衛星LandsatのTMなどのように可視青バンドが利用できる場合、可視青バンドの値と近赤外バンドの値を利用することで、より精度の高い土壤水分解析が行えるものと思われる。

4. 解析結果

図2より当然の結果として、水分の最も多い貯水池や河川などの水域が最も明るくなり、次いでカラカシ河やユーロンカシ河の河川敷など、土壤水分の比較的多い地域が明るくなった。また、オアシス外部の砂丘地帯を見ると、カラカシ河やユーロンカシ河周辺の砂丘地帯（図中のa～cの地域）では土壤水分の多い場所が確認できる。さらに、同じ砂丘地帯でもカラカシ河の西側遠方（図中のaの左側）では土壤水分の少ない地域が目立つ。したがって、本手法により砂丘地帯の土壤水分量の違い

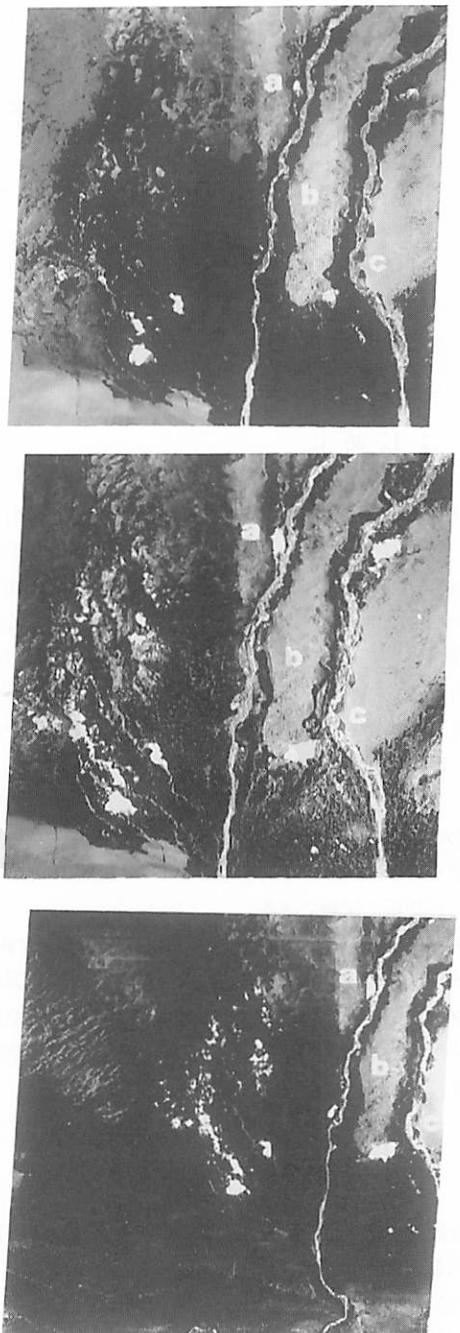


図2. 衛星画像によるタクラマカン沙漠南西部ホータンオアシス付近の土壤水分解析画像。
 (上) 衛星SPOTの差画像 (1988年10月12日観測)
 (中) 衛星SPOTの差画像 (1992年2月24日観測)
 (下) 衛星JERS-1の差画像 (1993年3月27日観測)
 可視緑バンドの値から近赤外バンドの値を引き、土壤水分の様子を強調した画像。最も明るい所が貯水池・河川などの水域、中位の明るさの所が比較的土壤水分の多い砂丘地帯（図中a～c）、暗い所が土壤水分の少ない砂丘地帯を示す。

がある程度検出できることが明らかになった。

石山ほか（1996）によると、1988年7月27日に観測した衛星LandsatのTMのバンド7（波長：2.08～2.35μm）を用いた同地域の土壤水分解析では、図中のa～cの地域の土壤水分は約4%、図中のaの左側の地域の土壤水分は約2%～3%であると報告されている。また、石山ほか（1996）が1990年10月、1991年9月、1993年10月に行った現地調査により、図中のa～cの地域の土壤水分（乾燥重量法）は約2%～3%であることが報告されている。さらに、砂丘地帯の砂丘底部では降雨が砂丘から浸透して一時的に湛水することもあることが確認されている。そして、小黒ほか（1998）が示した合成開口レーダによる同地域の土壤水分解析でも、土壤水分の異なる地域が砂丘地帯に存在することが報告されている。

5. おわりに

衛星データによる、水域の反射特性を利用した土壤水分解析法を示し、実際に砂丘地帯の土壤水分解析を行っ

た。その結果、同じ砂丘地帯でも土壤水分量が異なることが判明した。しかし、本手法は植生域の土壤水分の検出ができないこと、砂丘地帯の土壤水分を把握するためには極端な濃度変換を行っているので、見かけ上砂丘地帯でも多量の土壤水分があるよう判断されてしまうことなど多くの問題が残されている。

今後、多くの衛星データを収集し、詳細かつ広域、そして定量的な土壤水分解析を進める予定である。

引用文献

- 石山 隆・森山雅雄・竹内延夫・梶原康司・杉原滋彦・劉 培君（1996）：衛星データによるタクリマカン沙漠南部のホータンオアシス周辺の地表土壤水分の評価。「沙漠研究」5: 155-162.
- 小黒剛成・菅 雄三・土屋 清（1998）：乾燥地における土壤水分と人工衛星データの関係。「日本沙漠学会講演要旨集」9: 47-48.

大気ダストの発生源物質とその性状 —発生源特定の地球化学的アプローチとその視点—

岡田 昭彦*

Source Materials of Atmospheric Dust
—Geochemical Approach for the Characterization of the Dust Sources—

Akihiko OKADA*

1. はじめに

アジア内陸に位置する中央アジア諸国、中国西北～北部およびモンゴルに広がる乾燥～半乾燥地域は世界有数の大気ダスト発生地帯である。春先から夏にかけての乾燥期に、これらの地域で強風により大気圈上層に舞い上げられた大量のダスト粒子の一部は大気の流れに乗って長距離輸送される。日本上空の黄砂の発生源地点については、気流の流跡線の解析、衛星観測、ライダー観測等を通じて、タクラマカン砂漠を始めとする中国西北部の砂漠地帯およびオルドス高原等の黄土地域が有力なダスト発生源と考えられている (IWASAKA *et al.*, 1983; KAI *et al.*, 1988) が、まだ確証は得られていない。航空機や気球によるダスト発生源地帯の上空の浮遊ダストのサンプリングと、発生源地帯に特有の化学物質や鉱物物質を浮遊ダストから検知することが、最も有力な方法と考えられる。

2. どのような堆積物がダスト発生源になり得るか

乾燥地域のどのような物質がダスト発生源になるか考察すると、強風時に大量のダストを放出、飛散させるダスト発生源物質は、砂やシルトを多く含む未固結で、移動性の高い堆積物で、その表面が風や水による浸食作用を受け、大量の砂塵が生成しているものに規定できる (PYE, 1987)。このような堆積物でダスト発生の可能性の高いものは、砂漠およびその周辺域、レス地域、氷河およびその周辺域に産する下記のものに分類できる。

1) 砂漠および砂漠縁辺地域

<砂丘を構成する砂質堆積物>

現在活動中の流动砂丘地帯では砂粒が saltation による運動中に磨碎され、かなりの量のダストを生じるとの報告がある。しかし、このメカニズムによるダスト発生量は固定砂丘が再活動化した時に放出される微細粒子の量に比べれば大きなものではない。固定砂丘では、内部で砂粒子の風化反応が進行しているだけでなく、大気中の浮遊ダストが降水と共に砂丘内に浸透し、蓄積されているため、再活動を開始すると大きなダスト発生源になる。固定砂丘のシルトと粘土の含量は最大 5%にも達するとの調査結果がある。

<ワディ堆積物>

砂漠のワディに水が流れる時は主に flush floods の形態を取り、短時間の内に大量の堆積物を運んでくる。堆積物の粒度分布は供給源地域の lithology に依存しているが、通常、sorting は余り受けていない。イスラエルやシナイ半島の典型的な粗粒の沖積堆積層では、礫以外の組成として、砂が 80~90%、シルトが 10~15%、粘土が 1~5% から成っていると報告されている。

<プラヤ堆積物>

干上がった湖やプラヤの堆積物は通常細粒の成分に富んでおり、また湖やプラヤの周縁では、塩類風化によって未固結の細かい物質が作り出されている。干上がってしまった湖やプラヤの風下の地点にはシルトや粘土質の dunes が出現しているのが観察される。アメリカ、ネバダ州のプラヤで測定された例では、プラヤの風下に年間 1 平方メートルあたり 2 kg の風送ダストが堆積しているとの報告がある。

*理化学研究所

(受付：1998年11月10日、受理：1998年11月30日)

The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan.

<礫砂漠の堆積物>

中国北部およびモンゴル地域にはゴビと呼ばれる礫砂漠が広がっている。この地域は乾燥し、風が強く、冬期の気候がperiglacial的なので、他地域の礫砂漠に比べて砂やダストの生成速度が高いことが知られている。霜や塩類による作用や風食による作用によって細かい碎屑物を生じるが、その生成速度はまだ定量的には解明されていない。

<沖積扇状地堆積物>

沖積扇状地は、扇状地堆積層の表面部分での風化速度と新しい沖積物の供給速度のかね合いでダストの供給源にもなるし、ダストのシンクにもなる。扇状地表面が固定化してしまうと風送ダストがその上に堆積し、降水やrunoffの際に内部に浸透していく。一方、扇状地堆積層内部でも風化作用の進行により細粒物質が生産され、堆積層内部に蓄積される。このような扇状地が洪水や流路の移動によって壊されると風送ダストの大きな供給源になる。

<沖積氾濫原の堆積物>

チグリス・ユーフラテス河やインダス河の氾濫原に見られるような沖積堆積物は、かなり大量の細粒物質を含んでいる。この地域では耕作の間あるいは耕作直後にデフレーションが起きており、クウェートにおけるダスト・フォールアウトの大部分はイラクのメソポタミア氾濫原山脈と報告されている。また、インド北部のダスト・ストームの供給源としてはガンジス河の氾濫原の沖積土壌が原因であるとの指摘がある。RajasthanやTibesti南部等の地域では完新世後期以後の乾燥化と植被の減少が進み、砂質の沖積堆積層が広い範囲で風の作用により活性化してきている。

<風化した泥質基盤岩>

固結度の弱いシェール、シルト、泥灰岩が地表に露出している地域では、風化作用や風食の作用で崩れ易く、細かい粒子が生成する。中国、新疆のロブノール地域やチャドで見られる。

<深層風化レゴリスや古土壤>

地質時代のある時期に、現在よりも湿润な気候条件下で形成された深層風化レゴリスや古土壤がスーダンやエジプトの諸處に存在する。このようなレゴリスや古土壤が現在のような半乾燥～乾燥の気候下で浸食を受け、ダストの供給源となっている。第四紀の完新世初頭および更新世のある時期はサハラ南部の気候は現在よりも湿润であったことが知られている。完新世初頭に形成したヌビア赤色土壤は各所でガリー浸食を受けて崩壊し、ヨーロッパや大西洋に降下するカオリンに富む赤色ダストの

供給源となっている。

2) レス地域

<レス (loess)>

レス（あるいは黄土）は風送起源で堆積した黄色または灰黄色のシルト質堆積物を称し、5～50mmサイズの均質な微砂から成っているのが特徴である。耕作や放牧あるいは乾燥化などにより表面の植被が壊されると、侵食され易くダストを放出する重要な供給源となる。中国、黄土高原のレス堆積物は西方の砂漠地帯が供給源となって形成されたものである。ウズベキスタンやタジクスタンの各地にも第四紀更新世起源のレス地域が砂漠縁辺部に存在するが、各所でガリーが発達し、また強風時、地表面はデフレーションに曝されている。

3) 氷河縁辺地域

<氷河アウトウォッシュ>

氷河アウトウォッシュ堆積物はアイスランド、グリーンランド、カナダ北部などの氷河周辺地帯には広い範囲で分布しているが、山岳氷河の存在する地域にも局地的な分布が認められる。アウトウォッシュ堆積物は細かい礫、砂およびシルトの混った堆積物で粘土は少ない。シルトの含量は典型的なもので1～15%の範囲にある。

4) その他

<畠地および荒廃化した土地>

近年、人口の急増に伴って農地開発のための開墾が行われた結果、地表植被が破壊され、中国、内蒙ゴーのホロンバイルなどで、強風時にダスト・ストーム発生の原因になっており、社会経済的要因と土地利用形態の変化が新しいダスト発生源を作り出している（趙、1985など）。

3. 発生源特定の指標物質

ダスト粒子は大量のシルト・サイズの粒子を含む未固結の堆積物が放出源となっているが、大気浮遊ダストを採取した場合、どのような考え方で地上のダスト発生源を特定したらよいか、その可能性について検討してみる。図1に示すように、ダスト発生源となり得る砂漠堆積物、レス、氷河アウトウォッシュなどの堆積物は、粒子の一次生成地から風や流水の作用で移動し、現在の最終集積地に堆積したものと見なされ、粒子の生成および移動過程では粒子の混合により組成の均質化が進み、地殻の平均組成に近づくと考えられる。各地のレス堆積物氷河堆積物の希土類元素の分布パターンが地殻の平均値に互い

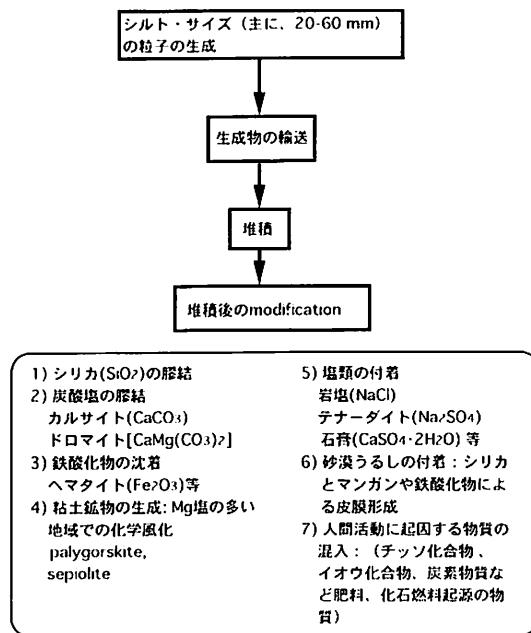


図1. 乾燥地域における堆積物の形成と堆積後付加される物質。

に類似している事実と対応している(文ほか, 1989など)。最終集積地に堆積した風成あるいは水成の未固結堆積物は、堆積後、その地域に特有の地質環境、水文環境、気候条件に依存して、堆積物粒子の表面や間隙に下記のような様々な新しい二次生成物を沈着することが知られている(WRIGHT and TUCKER, 1991)。

- (1) オパール状シリカ [SiO₂] の沈着。
- (2) カルサイト [CaCO₃] やドロマイ特 [CaMg(CO₃)₂]などの炭酸塩物質の沈着。
- (3) ゲーサイト [α-FeOOH], ヘマタイト [α-Fe₂O₃] あるいは非晶質の鉄酸化物の沈着。
- (4) 自生粘土鉱物の生成: モンモリロナイト、イライト、パリゴルスカイト、セピオライトそのほか混合層粘土鉱物の形成。
- (5) 地下水や土壤水の毛管上昇による溶存塩類(特に、石膏 [CaSO₄·2H₂O] などの硫酸塩)の析出。
- (6) 砂漠うるし(シリカとマンガン、鉄酸化物から成る皮膜)の形成。
- (7) ゼオライト鉱物の生成。

このような自生鉱物は堆積後に現地で生成したものであるため、自生鉱物自体の検出あるいは自生鉱物自体に

濃集する化学元素およびその同位体組成を測定できれば、地域の特定に有効な指標になると考えられる。サハラ砂漠ではパリゴルスカイトを産する地域があり(COUDÉ-GAUSSEN, 1991)、特有の針状の結晶形態からパリゴルスカイトを判別できるため、風送ダスト粒子中のパリゴルスカイトはサハラ起源を特定する重要な指標になっている(TOMADIN *et al.*, 1996など)。アジア内陸起源の風送ダストについては、電子顕微鏡観察やEDX分析(OKADA and KAI, 1995など)、酸素およびイオウ同位体比の測定(MATSUHISA *et al.*, 1994; YANAGISAWA and OBINATA, 1997など)が積み重ねられてきているが、さらに、発生源特定の有力な指標が見出されることが期待される。

引用文献

- 趙 松喬 (1985): 呼倫貝爾草原の風沙和“黑風暴”問題。趙松喬編『中国干旱地区自然地理』203-216。(中国語)
- 文 啓忠ほか (1989): 「中国黄土地球化学」科学出版社, 285p.
- COUDÉ-GAUSSEN, G. (1991): *Les poussières Sahéliennes*. John Libbey, London, 485pp.
- IWASAKI, Y., MINOURA, H. and NAGAYA, K. (1983): The transport and spacial scale of Asian dust-storm clouds: A case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*, 35B: 189-196.
- KAI, K., OKADA, Y., UCHINO, O., TABATA, I., NAKAMURA, H., TAKASUGI, T. and NIKAIDOU, Y. (1988): Lider observation and numerical simulation of a Kosa (Asian Dust) over Tsukuba, Japan during the spring of 1986. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 66: 457-472.
- MATSUHISA, Y., MIZOTA, C. and QIAN, Y. (1994): Homogenization processes of fine particles in the Taklimakan Desert, inferred from oxygen isotope composition of quartz. *Proc. Japan-China International Symposium on the Study of Mechanism of Desertification*, 236-240.
- OKADA, K. and KAI, K. (1995): Features and elemental composition of mineral particles collected in Zhangye, China. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 73: 947-957.
- PYE, K. (1987): *Aeolian Dust and Dust Deposits*. Academic Press, 334pp.
- TOMADIN, L., WAGENBACH, D. and LANDUZZI, V. (1996): Mineralogy and source of high altitude glacial deposits in the Western Alps: Clay minerals as Saharan tracers. In TOMADIN, L., WAGENBACH, D. and LANDUZZI, V., *The Impact of Desert Dust across the Mediterranean*, Kluwer Academic Pub.
- YANAGISAWA, F. and OBINATA, H. (1997): The influence of materials of Asian inland origin on Japan. *Abstract of Riken Symposium on Aeolian Dust of Asian Inland Origin*, June, 1997.

中国各地の砂漠堆積物と黄土の地球科学的特徴

本多将俊*・清水 洋**

Geochemical, Mineralogical and Sedimentological Features of Desert Sands and Loesses in China

Masatoshi HONDA* and Hiroshi SHIMIZU*, **

中国各地の黄土は、粒径約50μm未満の風成堆積物であり、東アジアの上部大陸地殻の平均化学組成の推定などに活用され（たとえば、TAYLOR and McLENNAN, 1985）。地球化学的研究において重要な役割を持つ。しかしながら、黄土の堆積過程には、いまだ不明確な点が多い。本研究では、黄土の堆積過程を解明する目的で、中国各地の砂丘堆積物と黄土の地球化学的・鉱物学的・堆積学的特徴を明らかにした。

本研究および引用した他の研究の砂丘堆積物、および黄土試料の主要な採取位置を図1に示す。中国北西部の

タクラマカン砂漠の砂丘堆積物の主成分元素組成の特徴は、方解石が多く含まれるために、上部大陸地殻(Upper Continental Crust: UCC)の平均化学組成(TAYLOR and McLENNAN, 1985)に比べてCaOに富む点(CaO sample/UCC = 1.04-2.32)である(HONDA and SHIMIZU, 1998)。また、タクラマカン砂漠の砂丘堆積物の希土類元素パターンの特徴(Nd = 14.0-46.3 ppm; (Nd/Yb)_N = 3.4-7.3; Eu/Eu^{*} = 0.51-0.89)は、上部大陸地殻の希土類元素パターンの特徴(Nd = 36.3 ppm; (Nd/Yb)_N = 4.1; Eu/Eu^{*} = 0.66)と類似している。なお、(Nd/Yb)_N

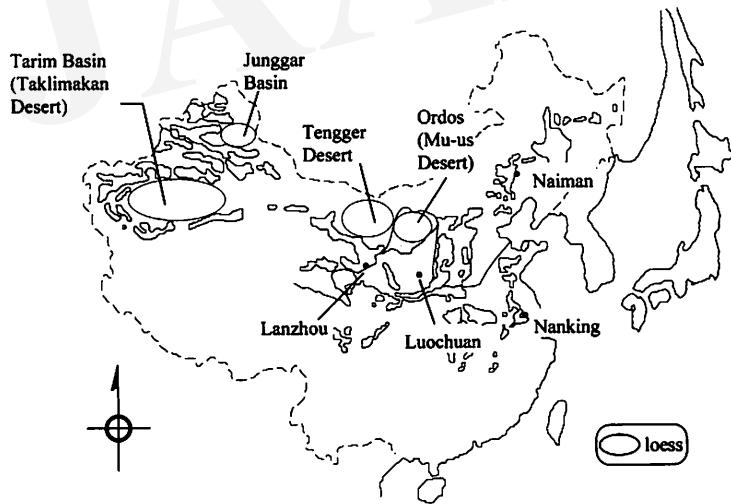


図1. 試料採取位置。

*熊本大学自然科学研究科

(受付: 1998年11月10日、受理: 1998年11月30日)

**熊本大学理学部

* Department of Environment Science, Graduate School and Technology, Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Japan.

** Department of Environment of Science, Faculty of Science, Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Japan.

とはコンドライトの値で規格化した試料のNdとYbの値の比であり、Eu/Eu*とはコンドライトの値で規格化した試料のEuの実測値とSmとGdの値から予想したEuの値との比である。中国各地の黄土、特に黄土高原以西の黄土は、タクラマカン砂漠の砂丘堆積物と似た主成分元素組成と希土類元素パターンの特徴を示す (CaOsample /ucc=1.97-3.80; Nd=21.0-49.2ppm; (Nd/Yb)_N=3.4-5.0; Eu/Eu*=0.52-0.79)。しかしながら、これらの堆積物は粒度組成が全く異なっており、平均粒径はタクラマカン砂漠の砂丘堆積物では2.0-4.0φ (HONDA and SHIMIZU, 1997, 1998; ISHII et al., 1995) であり、中国各地の黄土では5.0-7.0φ (ISHII et al., 1995; DERBYSHIRE, 1983) である。

テンゲル砂漠・オルドス砂漠は黄土高原に隣接し、これらの砂漠から離れるにつれて、黄土の層厚が薄くなり平均粒径が細粒化する傾向が見られ、更に黄土高原付近での卓越風向がこれらの砂漠から吹き込む方向であることから、黄土高原の黄土はテンゲル砂漠・オルドス砂漠から由来したと考えられている (たとえば、CHAO and XING, 1982)。更にWHALLEY et al. (1982) は、黄土高原の黄土は、テンゲル砂漠・オルドス砂漠内部での風成堆積物同士の衝突によって形成されたと主張した。しかしながら、テンゲル砂漠・オルドス砂漠の砂丘堆積物は、主成分元素組成・希土類元素パターン・粒度組成の特徴の全てにおいて、黄土高原の黄土とは異なる特徴を示す (CaOsample /ucc = 0.22-0.40; Nd = 7.8-11.3ppm; (Nd/Yb)_N = 3.5-4.1; Eu/Eu* = 0.84-1.61; Mean size = 2.7-3.0φ)。同様な違いが、ナイマン地域に分布する砂丘堆積物と黄土の間にも見られる。このような特徴の違いは、これらの砂漠では風成堆積物同士の衝突による黄土の形成は行われなかったことを示唆する。むしろ、タ克拉マカン砂漠の砂丘堆積物と黄土の主成分元素組成と希土類元素パターンの特徴が類似することから、風成堆積物同士の衝突による黄土の形成はタ克拉マカン砂漠で行われたのかも知れない。

中国各地の黄土の希土類元素パターンの特徴の変動幅が砂丘堆積物に比べて小さいことは、黄土を東アジ

アの上部大陸地殻の平均的物質とする意見 (たとえば、TAYLOR and McLENNAN, 1985) を支持する証拠の1つとなるかも知れないが、黄土の主要な供給源が共通していることが原因であるかも知れない。本研究における中国各地の砂丘堆積物と黄土の地球科学的特徴の比較は、タ克拉マカン砂漠の砂丘堆積物と黄土の供給源が共通していることを示唆する。黄土がどの程度の範囲の上部大陸地殻物質を反映しているのか、更に検討を加えていく必要がある。

引用文献

- CHAO, S.C. and XING, J.M. (1982) : Origin and development of the shamo (sandy desert) and the gobi (stony desert) of China. *Striae*, 17: 79-91.
- DERBYSHIRE, E. (1983) : Origin and characteristics of some Chinese loess at two locations in China. In BROOKFIELD, M.E. and AHLBRANDT, T.S. eds., *Eolian Sediments and Processes*, Elsevier, Amsterdam, 69-90.
- HONDA, M. and SHIMIZU, H. (1997) : Study of transport mechanics of aeolian sediments from the Taklimakan Desert: Implication of grain-size distribution and major-element composition. *J. Arid Land Studies*, 7: 139-146.
- HONDA, M. and SHIMIZU, H. (1998) : Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands. *Sedimentology* (in press).
- ISHII, T., ISOBE, K., MIZUNO, K., KANAI, Y., MATSUHISA, Y., MIZOTA, C., QIAN, Y., TERASHIMA, S. and OKUMURA, K. (1995) : Study of the formations processes and sedimentary environment of surface geological features in desertic areas of China, with special reference to the characteristics and origin of eolian sediments. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 46: 651-685.
- TAYLOR, S.R. and McLENNAN, S.M. (1985) : *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific, Boston, 312pp.
- WHALLEY, W.B., MARSHALL, J.R. and SMITH, B.J. (1982) : Origin of desert loess some experimental observations. *Nature*, 300: 433-435.

山形県山形市および鶴岡市における乾性降下物中の主要成分の季節変化

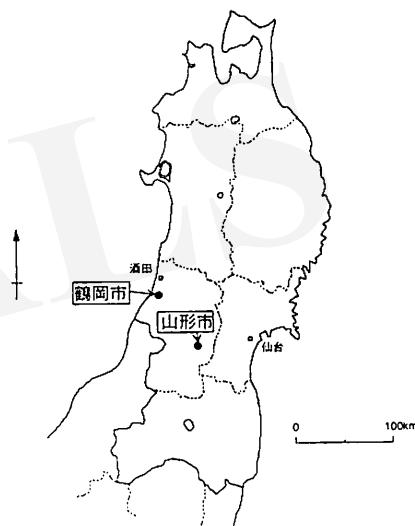
田中俊平*・柳澤文孝*・小谷 卓**

Seasonal Variation of the Concentration of Water-soluble Components in Dry Deposition in Tsuruoka and Yamagata, Yamagata Prefecture, Japan

Shunpei TANAKA*, Fumitaka YANAGISAWA* and Takashi KOTANI**

1. はじめに

日本は、冬季から春季の北西季節風が卓越する時期に大陸の風下となることから、大陸の都市部地域で発生した大気汚染物質が強い季節風によって日本まで輸送されていると考えられている。大日方ほか(1997)の鶴岡市、山形市における乾性降下物中の硫黄同位体比の分析結果から、冬季から春季に大陸起源と考えられる硫黄の飛来が報告されている。一方、関根・橋本(1991)は、日本と韓国でエアロゾル試料の採取を行い、主要、微量成分の分析を行った。この結果、日本ではPb/Zn比が夏季は0.2~0.3、冬季には0.8前後の値となることから、0.2~0.3は日本国内の現地性の値、0.8は韓国からの影響と推定した。本研究では、鶴岡市、山形市の2地点でハイボリュームエアサンプラーを用いてエアロゾルの採取を定期的に行い、主要溶存成分の起源について考察した。



2. 試料採取

試料の採取は、SIBATA社製ハイボリュームエアサンプラーHVC-1000型を用い、1分間に700リットルの割合で5日間連続で空気を吸引し、9日間休ませるサイクルで行った。なお、フィルターには東洋漉紙社製の石英織維フィルターQR100(203×200mm)を用いた。試料採取地点は、日本海側の鶴岡市および内陸の山形市(図1)である。

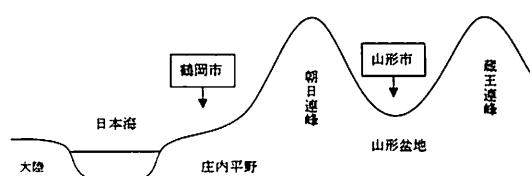


図1. 試料採取地点.

* 山形大学理学部地球環境学科

(受付: 1998年11月10日、受理: 1998年11月30日)

** 鶴岡工業高等専門学校

* Department of Earth and Environmental Science, Faculty of Sciences, Yamagata University, 1-4-12, Kojirakawa,
Yamagata 990-8560, Japan.

** Tsuruoka National College of Technology, 104, Sawada, Ioka 997-0842, Japan.

3. 分析方法

捕集フィルターの4分の1を超音波洗浄器を使い水溶性成分の抽出を行い、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、Na、K、Mg、Caを分析した。また、8分の1を酸分解により水に不溶な成分を抽出し、Al、Fe、Pb、Znを分析した。陰イオンはDIONEX社製イオンクロマトグラフィー、陽イオンはセイコー電子工業株式会社製のICP発光分光分析装置を用いて定量した。なお、Caと SO_4^{2-} については海塩粒子補正を行った。

4. 結果と考察

(1) 海塩粒子成分（ナトリウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオン、塩化物イオン）

図2に示したように、ナトリウムイオンの濃度は、冬季に高くなる傾向が見られる。また、年間を通じて鶴岡市の方が高くなっている。これは海からの距離といった地理的原因を反映したものと推定される。他の海塩粒子成分（K、Mg、Cl）も同様の傾向を示した。

(2) 酸性化成分（硝酸イオン、非海塩性硫酸イオン）

硝酸イオンは、山形市では冬季に濃度の上昇する明確な季節変化が見られるが、鶴岡市では明確な季節変化は見られなかった（図3）。一方、非海塩性硫酸イオンは、山形市でも鶴岡市でも明確な季節変化は見られなかった（図4）。大気環境測定結果のデータ（山形県環境保全センター、1990～1996）によると、窒素酸化物および二

酸化硫黄は、山形市で冬季に濃度が高くなる季節変化が見られたが、鶴岡では明瞭な季節変化は認められなかつた。また、濃度は鶴岡の方が常に低い値であった。水野ほか（1990）は、特殊な気象条件の下では大気浮遊物質や窒素酸化物が高濃度になる現象を報告している。従って、冬季間、山形盆地内にはガス状物質および硝酸イオンが滞留しているために濃度が高くなり、鶴岡では風によって拡散されているために低濃度となると考えられる。一方、大日方ほか（1997）によると、冬季から春季に大陸起源と考えられる硫黄の付加が報告されている。従って、硫酸イオンは異地性のものが付加されているため現地性のものの増加の影響が不明瞭になっているとも考えられる。

(3) 土壌粒子成分（非海塩性カルシウムイオン、アルミニウムイオン）

山形市、鶴岡市とともに春季に濃度が上昇する季節変化が見られた（図5、図6）。一方、大気環境測定結果の降下煤塵のデータでは、山形市、酒田市とともに冬から春にかけて濃度が上昇する季節変化が見られた（山形県環境保全センター、1990～1996）。1998年の3月は、山形でも黄砂現象が観測された時のサンプルであり、他に比べ著しく濃度が高くなっている。このことから山形市、鶴岡市ともに現地性の降下煤塵の影響とともに、黄砂粒子の影響を受けていると推定される。

(4) 排ガス成分（鉛、亜鉛）

亜鉛は両地域でほぼ同じ濃度であるのに対して、鉛は年間を通じて鶴岡市の方が高い値を示した。また、鶴岡では春季に鉛の濃度が高くなる季節変化が認められた。

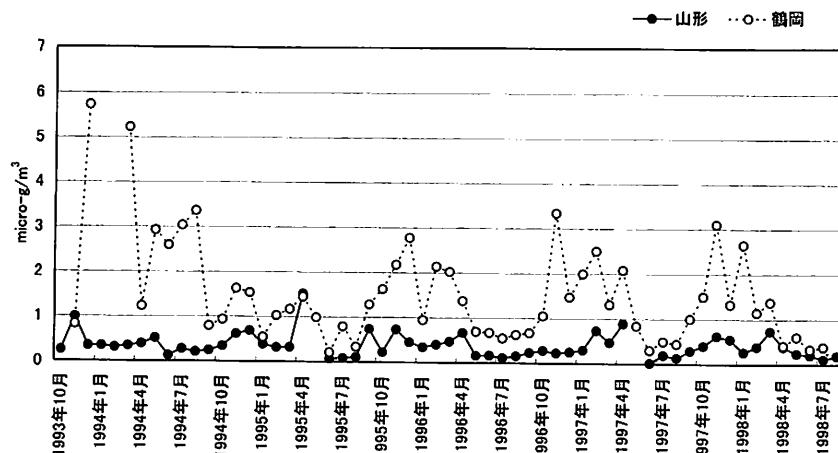


図2. ナトリウムイオンの濃度季節変化。

—●— 山形 …○… 鶴岡

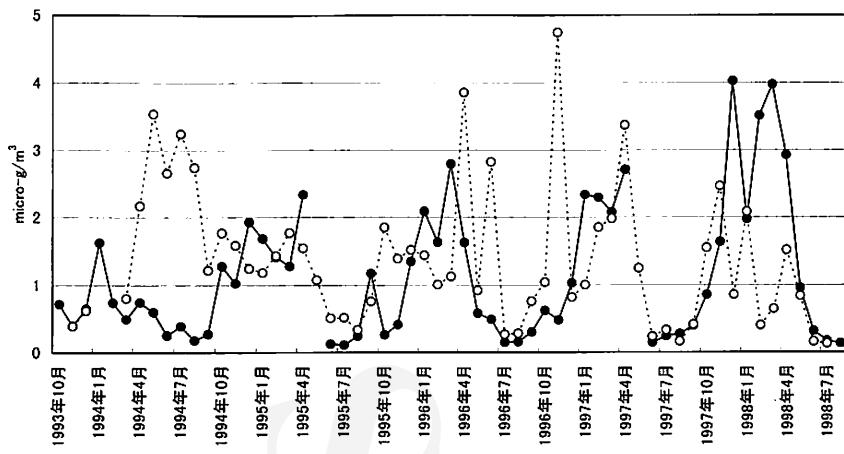


図3. 硝酸イオンの濃度季節変化。

—●— 山形 …○… 鶴岡

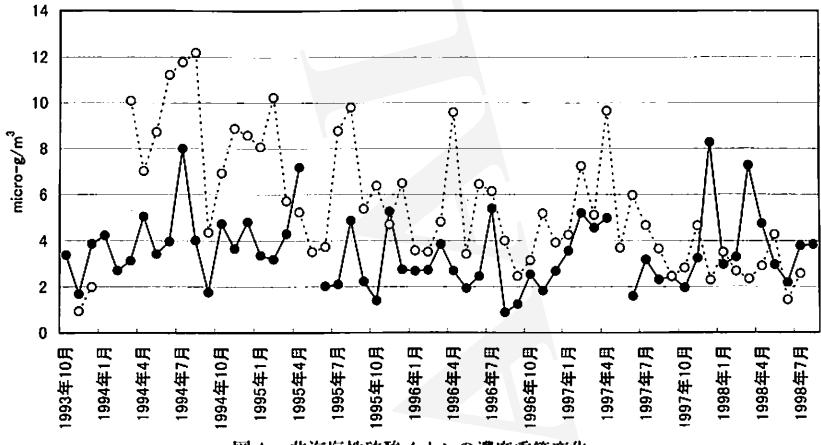


図4. 非海塩性硫酸イオンの濃度季節変化。

—●— 山形 …○… 鶴岡

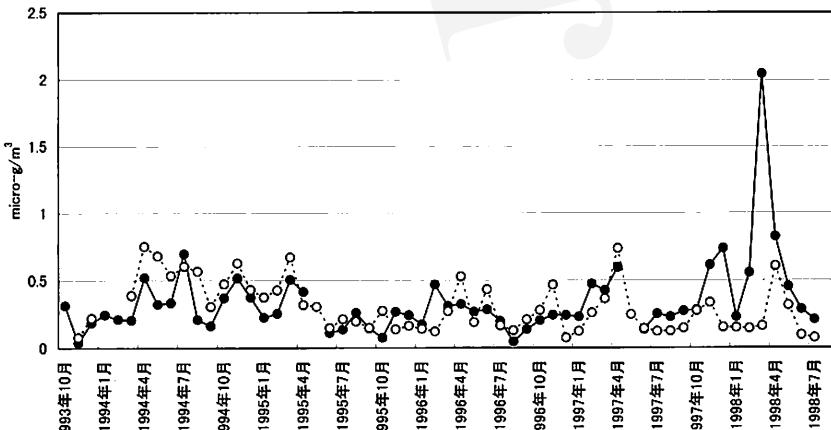


図5. 非海塩性カルシウムイオンの濃度季節変化。

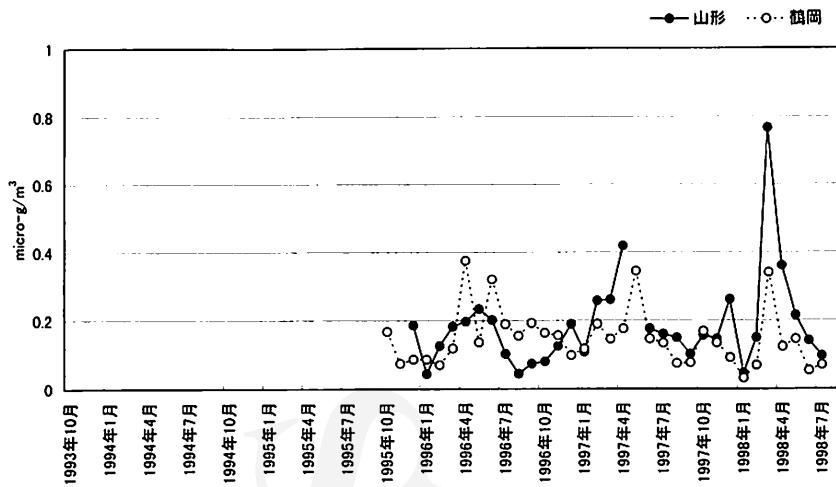


図6. アルミニウムイオンの濃度季節変化。

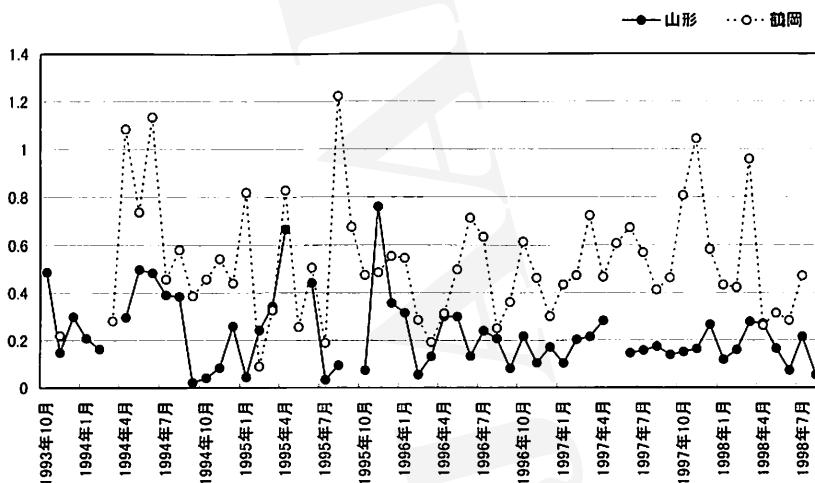


図7. Pb/Zn比。

山形市におけるPb/Zn比は年間を通じて0.2前後で推移しており、季節変化は見られない。一方、鶴岡市では年間を通じて0.6前後の高い値で推移している（図7）。関根・橋本（1991）による日本各地のPb/Zn比から考えると、山形市の値は日本国内の値で、鶴岡市の値は日本海側および西日本の冬季のものに近く、外部からのPbの付加が推定される。

5. 結論

- (1) 海塩粒子成分の濃度は、海岸からの距離によって左右される。
- (2) 酸性化成分のうち、ガス状物質、硝酸イオンは冬季間山形盆地に滞留するために濃度が上昇する。
- (3) 土壌粒子成分は現地性のもののに他に黄砂現象による影響が推定される。

- (4) Pb/Zn比は日本海側の鶴岡市において高く、Pbの付加が推定される。

引用文献

水野建樹・近藤裕昭・松川宗夫（1990）：関東平野において初冬に粉じんが極めて高濃度となる気象条件について、「大気

汚染学会誌」25-2: 143-154.

大日方 裕・柳澤文孝・小谷 卓・上田 光（1997）：山形県
鶴岡市と山形市の乾性降下物に含まれている非海塞性硫酸イ

オンの硫黄同位体比。「沙漠研究」7: 119-126.

関根嘉香・橋本芳一（1991）：東アジア地域における粒子状大

気汚染物質の長距離輸送。「大気汚染学会誌」26-4: 216-226.

山形県環境保全センター（1990～1996）：『大気環境測定結果』

山形県におけるエアロゾル中のSr同位体比の季節変動

田中真理子*・柳澤文孝*・矢吹貞代**・小谷 卓***

Seasonal Variation of Strontium Isotopic Composition in Aerosol Collected in Yamagata Prefecture, Japan

Mariko TANAKA*, Fumitaka YANAGISAWA*, Sadayo YABUKI** and Takashi KOTANI***

1. はじめに

大陸から日本へ長距離輸送される越境降下物の連続観測を行うため、山形大学では1993年10月より日本海に面した鶴岡市、内陸盆地の山形市の両地域においてエアロゾルの連続採取を行っている。大日方ほか(1997)は同試料の硫黄同位体比を測定した結果、日本海側の鶴岡市において黄砂期に値が上昇する季節変動がみられたが、山形市では明瞭な季節変動はみられなかつたと報告している。しかし大日方ほか(1997)は、乾性降下物中の非海塞性カルシウム含有量が黄砂期に両地域で増加することを示し、両地域に黄砂の影響があること示唆した。硫黄が、主として人為起源の大気汚染物質と考えられるのに対し、非海塞性カルシウムは、春先日本に飛来する黄砂粒子の指標としてしばしば用いられる。我々はカルシウムと同じアルカリ土類金属に属し、化学的挙動が類似しているSrの同位体比を測定し、黄砂期にアジア内陸部から飛来する鉱物質エアロゾルの影響について検討した。

2. Srの分離と同位体比測定

試料採取地点および採取方法については、前報(田中ほか、1998)を参照していただきたい。エアロゾルを採取したフィルターを蒸留水および酸(1:1 HCl+H₂O₂)

で抽出した後、陽イオン交換樹脂(Dowex 50w-x8, 100-200メッシュ)を用いてSrを溶離した。これを蒸発乾固した後、硝酸一滴を加えてタンタルシングルフィラメント上に塗布し、表面電離型質量分析計(VG Sector54)を用いて同位体測定を行った。測定された同位体比は⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194で規格化を行った。標準試料として使用したNBS987の⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値は0.71024±2(2σ)である。

3. 結果と考察

1) Srの供給源

表1に両地域のエアロゾル中の元素の地殻に対する濃縮係数を示す。Srの地殻に対する濃縮係数は、夏に最も低く冬～春にかけて上昇する傾向がある。また日本海側の鶴岡市の方が比較的高く、変動も大きい。しかし年間を通して両地域ともに1前後であった。これは、海塩の指標元素であるNaや、人類活動によってのみ放出され

表1. エアロゾル中の元素の地殻に対する濃縮係数。

	Sr		Na		Pb	
	山形	鶴岡	山形	鶴岡	山形	鶴岡
Yearly ave.	0.7	1.2	10.4	53.6	153.5	349.0
KOSA ave.	0.7	1.0	14.7	21.0	188.1	101.7
July ave.	0.9	0.6	4.5	19.3	177.7	138.5
Win ave.	0.6	2.6	12.6	163.5	138.5	431.2

* 山形大学理学部地球環境学科

(受付：1998年11月10日、受理：1998年11月30日)

** 理化学研究所

*** 鶴岡工業高等専門学校

* Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University, 1-4-12, Kojirakawa, Yamagata 991- 8560, Japan.

** The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan.

*** Tsuruoka National College of Technology, 104, Sawada, Ioka 997-0842, Japan.

るPbと比較すると明らかに地殻の組成に近いものであり、エアロゾル中のSrのソースは主として地殻の風化物質であることを示している。また、Sr濃度とSr同位体比($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)を海塩補正したものは、補正前に比べてあまり値が変化せず、全体としては海塩の影響は小さいと考えられる。

2) エアロゾル中のSr濃度

図1に1993年9月から1995年12月までに採取したエアロゾル中のSr濃度の季節変動を示す。Sr濃度は、特に日本海側の鶴岡市で変動が大きく、冬季から春季にかけて上昇し、夏季に低くなる傾向を示す。また、図2はエアロゾル中の非海塩性CaとSr濃度の関係をプロットしたもので、Sr濃度はCa濃度と正の相関を示し、特に黄砂季にその傾向が顕著にみられる。

3) Sr同位体比

エアロゾル中のSr同位体比の測定結果をまとめて表2に示す。エアロゾル中のSr濃度は非常に少ないため、同位体比測定中に減少してしまうことが多く、表2においても、水抽出成分、酸抽出成分の両方の値が出ているものが少ない。また、黄砂季にはSr濃度が高くなるためデータの数が多く、夏季のデータが少ない。したがってエアロゾル中のSr同位体比の季節変動をみると、データの数が充分とは言えないが、鶴岡、山形両地域において冬季から春季にかけて値が上昇する傾向がみられる(図3)。また、内陸部の山形に比べ、日本海側の鶴岡のエアロゾル中のSr同位体比は高い傾向がみられ、鶴岡の方が大陸からの越境物質の影響を強く受けている可能性を示唆している。また、エアロゾル中の非海塩性Ca濃度とSr同位体比を比較するとCa濃度の増加とともにSr同

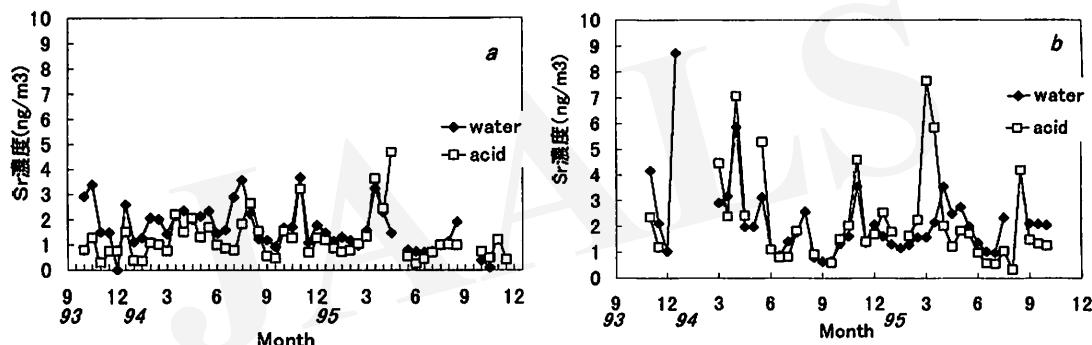


図1. エアロゾル中のSr濃度の季節変動
a: 山形, b: 鶴岡

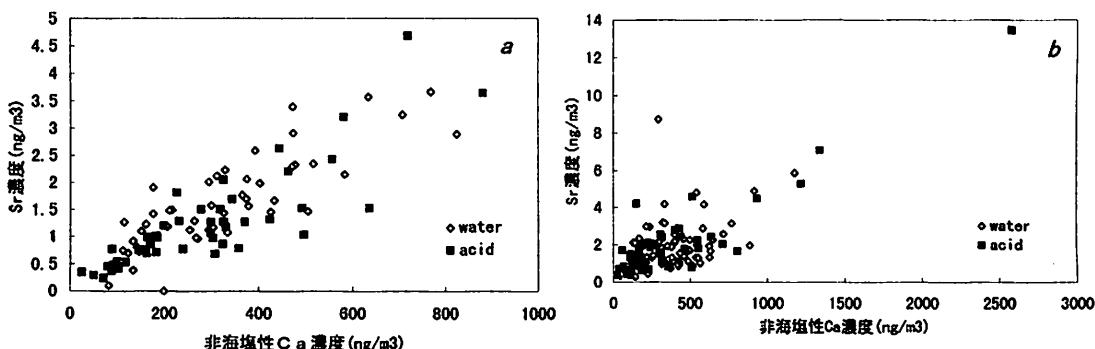


図2. エアロゾル中の非海塩性CaとSr濃度の相関.
a: 山形, b: 鶴岡

表2. エアロゾル中の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

	Tsuruoka			Yamagata		
		Acid	water		acid	water
1993	11.4		0.70965 ± 33			
1994				12.10	0.708328 ± 27	0.709001 ± 82
				1.6		0.709756 ± 36
				2.17		0.708933 ± 37
	3.2	0.710867 ± 95	0.709943 ± 33	3.3		0.708919 ± 52
	3.15		0.709285 ± 26			
	4.13	0.709948 ± 92	0.709767 ± 23	4.4	0.708999 ± 51	0.709453 ± 41
	5.25		0.710747 ± 30	5.4	0.709478 ± 33	0.70946 ± 38
				5.18		0.709439 ± 28
	8.1			6.1		0.709429 ± 47
				8.4	0.708264 ± 48	0.708962 ± 26
				8.18	0.708687 ± 23	0.708581 ± 62
				9.11		0.708874 ± 38
	11.1		0.710315 ± 40	11.10	0.708302 ± 64	0.701133 ± 38
				12.24		
1995	3.15		0.709261 ± 27	3.19	0.710401 ± 20	0.710136 ± 43
	3.20		0.710669 ± 23			
	3.29		0.708822 ± 27			
	5.26	172	0.709758 ± 35	4.18		0.710276 ± 26
	8.11	0.708619 ± 64	0.708924 ± 23			

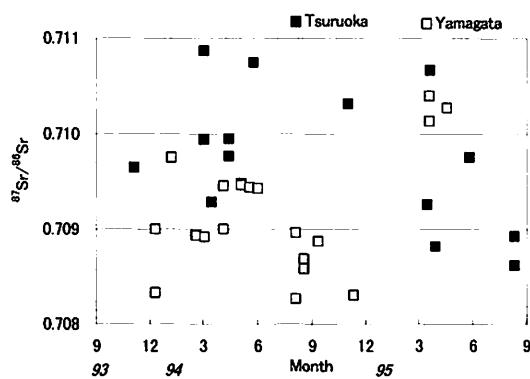


図3. エアロゾル中のSr同位体比の季節変動。

位体比が高くなる傾向がみられる(図4)。黄砂粒子はCa含量が高く、そのSr同位体組成も~0.719と高い値を持つ。今回測定したエアロゾル中のSr同位体比は、0.7083~0.711と比較的狭い変動幅を示す。一般に、日本列島の特に火山性土壤はSr同位体比が低く、アジア大陸の地殻物質は高い値を示す(YABUKI *et al.*, 1993; ASAHARA *et al.*, 1995)ので、エアロゾルはこれらの混合物であり、Sr同位体比も、その混合の割合によって左右されると考えられる。

4. おわりに

以上述べてきたように、山形県鶴岡市、山形市で採取したエアロゾル中のSr同位体比は、黄砂季に高い値を示す傾向がみられるが、エアロゾルはアジア大陸に起源を持つ長距離輸送粒子と、現地性成分の混合物である。今後鶴岡市、山形市における現地性成分のSr同位体組成、エアロゾルの全岩のSr同位体組成等を測定し、混合の割合等を検討したい。

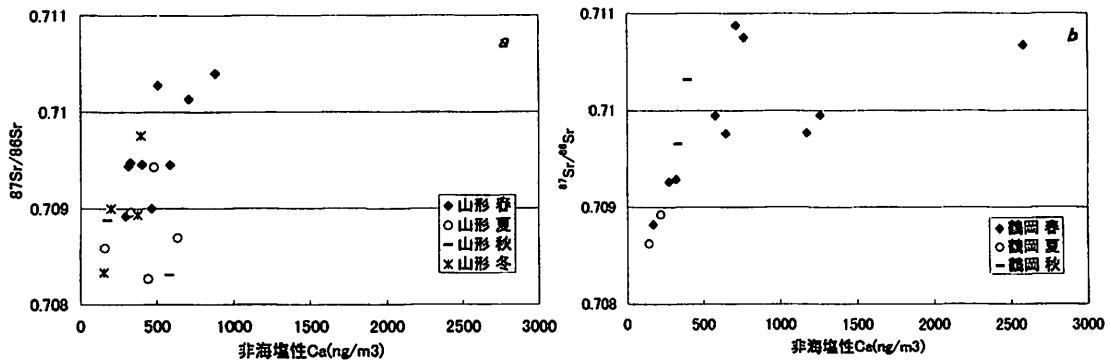


図4. エアロゾル中の非海塩性Ca濃度とSr同位体比の相関。
a:山形, b:鶴岡

引用文献

- 大日方 裕・柳澤文孝・小谷 卓・上田 晃 (1997) : 山形県
鶴岡市と山形市の乾性降下物に含まれている非海塩性硫酸イ
オンの硫黄同位体比. 「沙漠研究」7: 119-126.
田中俊平・柳澤文孝・小谷 卓 (1998) : 山形県山形市と鶴岡
市における乾性降下物中の主要成分の季節変化. 「理研シン
ポジウム要旨集, 乾燥地起源の風送ダスト—発生・長距離輸
送・環境影響—」, 1998年9月24日.」

- ASAHARA, Y., TANAKA, T., KAMIOKA, H. and NISHIMURA, A. (1995):
Asian continental nature of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in north central
Pacific sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 133: 105-116.
YABUKI, S., OKADA, A., TAKAHASHI, K., LIU, C.-Q., ZHANG, J., FAN, Z.-
L., TIAN, C.-Y. and CHANG, Q., (1993) : The compositions of
strontium isotopes in water, soil and salt samples from the
desert area of Xianjiang, China. *Proceedings of the Japan-China
International Symposium on the Study of the Mechanism of
Desertification, March 2-4, 1993 Tsukuba*, 227-235.

書評

イブラヒーム・アル・クーニー著、奴田原睦明訳：『ティブル』財團法人国際言語文化振興財團、1997年。

本書は小説である。サハラの遊牧民トゥアレグ族青年騎士が、自らが乗用とする「白黒まだら」模様の美しいラクダに憑かれるように魅入られたがために、破滅へとひた走る悲劇の物語である。作者もトゥアレグ族出身のリビア人で、サハラを舞台にした小説を書き続けているひとだという。本書はそれゆえ砂漠を生きる民の自画像として読める。

ストーリーの前半をまず紹介すると、主人公ウーハイドは、このうえもなく優美で、気品にみちた「白黒まだら」の牡の子ラクダを手に入れ育てる中で、このラクダに激しく恋人のように執着してしまう。そこから不幸と悲劇が、絵巻のように繰り広げられる。

まず、騎士のひのき舞台、女たちのまえでラクダを優美に踊らせる円舞の場でのラクダの暴走。それは、ラクダを愛するあまり、充分な調教を怠ってしまったからである。ついで、女のもとに忍んでいった夜、主人公のラクダが牝ラクダをめぐって他のラクダと激しく争いはじめ、キャンプ中の人々を目覚めさせてしまう。本人の夜這いは許されたが、まだラクダの交配が、衆人の目前で行われることになった。それはみずからラクダをわが身のように思うトゥアレグ族騎士にとっては自らの性交を衆人の目にさらすに等しい恥辱だった。こうした牡の荒れラクダを馴らすには去勢が必要だった。しかし主人公はまだラクダに去勢をほどこさない。そのためまだラクダは牝ラクダ漁りをつづけ揚句に疥癬をうつされ、それは醜く全身にひろがってゆく。その治療のため、主人公は命を懸けて、それを食わせるとラクダは荒れ狂うが効力のあるという薬草を砂漠の奥に求めてラクダに食わせ、荒れ狂ったラクダにひきずられ瀕死の重傷を負う一砂漠ではラクダに逃げられたら死である。

こうした青年騎士のラクダへの愛着物語を理解するためには、ラクダと生きるトゥアレグ族文化についての概略的な知識が必要である。

藍染めのターバンで顔をつぶんだトゥアレグの誇りたかき騎士は、マハリーという戦闘用に特化したひと瘤ラクダに乗っている。ラクダにはひと瘤のdromedaryと、ふた瘤のcamelとがある。ふた瘤ラクダはおもにアジアに分布し、ひと瘤ラクダはアラビアからアフリカに分布する。ひと瘤ラクダのほうが圧倒的に美しくスマートである。ふた瘤ラクダは荷駄獸として優れているが、ひと

瘤ラクダは乗用として優れている。ひと瘤ラクダのなかでもひときわ颯爽としたラクダのなかのサラブレッドが、マハリーである。毛並みも艶々した白が多い。

トゥアレグは遊牧民であるが、社会は階層化されていて、戦士階級、工芸職人階級、奴隸階級という身分秩序を有する。マハリーは貴族的な戦士階級のシンボルという以上にその実体である。マハリーなしに支配者たることはおろか、砂漠での生存さえも不可能だからである。それゆえ、トゥアレグの戦士の若者にとって自らが騎乗するマハリーへの愛着・感情移入は強い。

こうしたトゥアレグ文化を背景に、本書の物語は展開するが、眞の悲劇は後半にやってくる。主人公は結婚する。しかしそれはイタリアの侵略で家族を失って砂漠に逃ってきた女との結婚で（時代設定はそれゆえ20世紀はじめ）、部族長の血筋の女との婚姻を望んでいた父親の呪いをうける。しかもその後、海岸部との交易が途絶え、サハラ内部に飢餓がおしよせる。飢餓から逃れる手段はまだラクダを売ることであった。しかし主人公は家族の困窮をよそにラクダを売らない。主人公が最後に頼ったのは、よそ者の商人にまだラクダを担保として預けて、金を借りることであった。しかし預けたラクダは主人公のもとに戻ってしまう。ラクダは商人によって残酷な仕打ちをうける。それに耐えられない主人公は、商人に妻子を与えて借金の帳消しをはかる。その際商人は砂金を少々主人公に与える。主人公は躊躇するが受け取ってしまう。それが主人公の命取りとなる。

まだラクダとの砂漠での生活に戻った主人公は一時の至福を得るが、かれのもとには、砂金で妻子を売った男としての噂が追いかけてくる。怒った主人公は商人を殺す。その結果主人公は復讐を果たそうとする商人の親族によって追われる身となり、砂漠の岩山の穴に隠れる。しかしまだラクダが捕らえられ丸焼きされはじめたことに主人公は耐えられず、穴から出て捕らえられる。そして二頭のラクダに両足を引っ張られ八つ裂きにされて殺される。

このように本書のテーマをなすのは、ラクダに執着しそうな男の悲劇であるとひとまず言えよう。イスラームの隠者はこのことを、より一般的な真理として、次のように語る。「心を天以外の何処にも託してはならぬ。もしこの地上の被造物の何かに心を託すなら、神の下僕の手が伸び、心は火で焼かれるだろう。」

しかし本書を読了して印象に残るのはむしろ、騎乗のラクダにあらがいがたく同化してしまうトゥアレグの戦士階級の男の宿命みたいなものである。ラクダに心を託するが故に、心も身も火で焼かれてしまう男の運命を本

書はむしろヒロイックに描いている。それが悲劇であるほど、砂漠の戦士らしい生き方が強く印象に残される。

牧畜文化には人と家畜との同化現象がしばしば観察される。ラクダ遊牧民トゥアレグ族騎士の主人公は自ら騎乗するラクダの恥辱と苦しみを自らの恥辱と苦しみとしてうけとる。ここからすべての悲劇がはじまるのだが、この悲劇を単純にイスラーム的觀点から非難するだけでは問題は解決され得ない。なぜなら、酷乾のサハラで生きるトゥアレグにとって、ラクダへの執着なしにかれらの生はありえないからである。ましてかれらの誇りや名誉はあり得ない。本書の主人公の悲劇の決定的原因も、実はそこにはない。主人公を破滅に追いやるのはラクダではなく金である。金のことをアラビア語でティブルという。本書の題名である。

トゥアレグ族には人とラクダとの同化現象が存在することを示唆したが、それが存在するのは実は騎士とマハリートと呼ばれる美しい乗用のラクダとの間である。主人公は醜い荷駄獣ラクダについては嫌悪し侮蔑を隠さない。それはそのまま、荷駄獣ラクダを連ねてサハラの交易に従事する商人たちにたいする侮蔑・嫌悪でもある。しかしその商人によって本書の主人公の破滅は仕掛けられる。主人公がどんなにラクダに執着し同化しても、砂漠の中の牧草地で生活する限り、それがどんなに過酷な生活であっても、主人公は幸福であるかのごとくである。しかし主人公が商人と接触し、商人からそのシンボルとも言える砂金をうけとったことで、主人公の破滅は社会的にも身体的にも決定的となる。

金（ティブル）は、サハラでは特別な意味をもつ。サハラの交易商人たちが目指したものは、サハラの南の黒アフリカの奥深くで採集される金だったからである。この金によって広大なサハラには縦横に長距離交易網がはりめぐらされるに至る。しかし不思議なことに、トゥアレグ族はサハラ交易への参与が少なかった。時に、サハラ交易に敵対的であった。隊商を襲う強盗集團遊牧民というイメージはトゥアレグ族にあてはまる。そしてわたし常々不思議であったのは、これを象徴するように、トゥアレグ文化に金はほとんど導入されなかっことだ。

それが文化として意図的だったことを、わたしは本書のクライマックスで知った。金を災いをもたらすものと

して忌避するトゥアレグ文化の存在が明らかにされているからだ。主人公は商人が金をさだしたとき、「俺たちの部族ではそいつは災いをもたらすって言われているんだ」と金の受け取りを拒否する。「それは呪われ、不吉なものをもたらす」ともいう。しかし商人の、「それはこいつを手にいれることのできなかった奴らに伝染している戯れごとさ」「黄金というものは、人間が生まれてから死ぬまで全ての者が追い求めるものなのさ」という説得に、主人公は屈してしまう。その時商人の口は「怪しく光っていた」。それは、「ラクダに心を託すトゥアレグ文化」と「金に心を託す商人文化」とが火花を散らし、主人公が「金に心を託す商人文化」のなかに絡め取られてしまう瞬間であったと言える。

この時、ラクダに囚われた遊牧民青年の狂気の物語は一転して、サハラの遊牧文化の近代的悲劇の物語となる。金に象徴される近代文化に絡め取られてゆくのは、遊牧民の宿命だからである。しかし誤解してはならない。主人公の悲劇は金を失ったことにはない。商人も主人公を金銭的にだましたわけではない。主人公はむしろ金を得る。主人公が失うのは経済的価値ではなく、子々孫々代々伝えてゆかねばならない家族の名誉や信用である。サハラのような極限の世界で生きる人々は他者との危うい信頼関係の中で生きている。信頼関係なしに人々は生きてゆくことはできない。その信頼関係にとって最大の敵は金なのである。このことが、金を呪うトゥアレグの文化を背景としてアレゴリカルに本書では語られているよう思う。

砂漠の中の砂漠サハラ砂漠のど真ん中で生きてきた誇り高き遊牧民族トゥアレグ族について、わが国ではほとんど紹介されていない。本書はそんな砂漠の民の心情と文化の理解、さらにはかれらが生きる砂漠の理解に格好の手引きとなるであろう。とくに、「金の価値」の普遍性を無批判に信じて砂漠の開発政策に取り組まれている方には、是非一読をおすすめしたい。ただ本書の題名ティブルはわかりにくい。「金の呪い」みたいな副題をつけたほうがよかった。

また本書には原書についての記述がない。アラビア語からの翻訳だと訳者より聞いているが、編集上のミスであろう。

(鷲田義仁)

Iwao Kobori and Michael H. Glantz (eds.): *Central Eurasian Water Crisis: Caspian, Aral, and Dead Seas*
United Nations University Press (1998), 203pp.

本会会長 小堀 崑先生と米国大気研究センター M.H. Glantz博士編著の標題単行書が国連大学から刊行された。題名が示すように本書は中央ユーラシア乾燥地域における水問題を扱ったものであるが、刊行の背景には近い将来において世界各地で深刻な水問題が発生するという予測がある。急速な人口増加に対処するためには、大量の食糧が要求される。食糧生産のためには、当然ながら大量の水が必要である。

乾燥地域における水問題は、それが全地球的に波及する前触れと見ることもできる。従ってすでに顕在化している水問題を解決することができれば、将来の世界的規模の水問題を回避することも可能であろう。全体は、序論、アラル海、カスピ海、死海、国際機構の5部に分かれられ、以下の12章から構成される。

- 1 J.I. Uitto: Perspectives on water environment management
- 2 I. Kobori: Central Eurasian water perspectives and arid land studies
- 3 T. Kira: Major environmental problems in world lakes
- 4 M.H. Glantz: Creeping environmental problems in the Aral Sea basin
- 5 T. Tsukatani: The Aral Sea and socio-economic development
- 6 T. Sakata: Satellite image maps of the Aral Sea and Central Asia
- 7 O. Abdirakhmanov, U.M. Sultangazin, and Modjtaba Sadria: Voices from the region
- 8 G.N. Golubev: Environmental policy-making for sustainable development of the Caspian Sea area
- 9 P. Mojtahehd-Zadeh: Iranian perspectives on the Caspian Sea and Central Asia
- 10 A.T. Wolf: Principles for confidence-building measures in the Jordan River watershed
- 11 M. Murakami: Alternative strategies in the inter-state

regional development of the Jordan Rift Valley

- 12 M. Nakayama: The role of international organizations in the integrated management of international water bodies: The activities of the UNU, UNEP, and the World Bank in the Middle East

章の題目が示すように、地理学、環境科学、経済学、社会科学、工学などの視点から水の危機が多角的に論じられている。これらの異なる分野から提示された解決策を一本化することで将来への展望が開けることであろう。以下に内容の一部を紹介する。

アラル海の問題で指摘されたことは、水位低下が「忍び寄る環境問題」の一つということである。この種の問題の特徴は、危機が潜在的に進行し、人々がそれに気がついたときはすでに手遅れになっている点にある(4章)。水位低下の直接の原因是綿花栽培であるが、これを軸としてアラル海に関係したさまざまな環境問題が述べられている(5章)。地元の声(7章)は問題解決のために関係国の協力が必要であることを強調している。カスピ海については、水位の変動が沿岸諸国に与える経済的衝撃(8章)と世界でも有数の石油产地であるカスピ海とペルシャ湾にまたがる国土をもつイランの地政学的立場(9章)が議論されている。死海の部は、ヨルダン河流域における水をめぐる国際紛争とそれを解決するための国際協力的な流域開発のあり方(10章)と淡水供給を目的とした工学的、政治的戦略の概観(11章)からなっている。

本書はこの地域の水問題に関与している(しようとしている)人にとって水問題の全体像を把握する上で必読の書であると同時に、近い将来に予測されるグローバルな水問題に危機感を抱いている人にとっては手ごろな解説書もある。厚さも203ページと手ごろである。しかしもっと詳しく知りたいと思う読者にとっては、記述が短いということで不満が残るかもしれない。

本書を入手するには国連大学出版局(Fax: 03-3406-7345)に申し込めばよい。定価は3,740円であるが、それに送料が加算される。学生、図書館には割引価格も設定されている。

(一園雅巳)

遠藤 熊・安部征雄・小島紀徳編：「沙漠工学」森北出版、1998年、239p.、3,000円。

—工学者の夢と沙漠学会の夢—

沙漠化問題を解くにあたって、沙漠工学こそがその切り札となりうるに違いない、という心意気が本書の随所に感じられる。この心意気については後に立ち返るとして、まず第1に強調しておきたいことは、本書が本学会の創立以来、活発に活動を展開してきた沙漠工学分科会の2回目の総括集であるということである。最初のものは1994年に刊行された『沙漠物語』である。この2冊により当分科会の活動の足跡が着実に印されていることがわかる。

エネルギー、水、土壤といった沙漠地域に豊富に存在する資源とその利用に係わる技術、新規水資源創出技術、乾燥地特有の作物栽培技術や緑化技術、沙漠向けのバイオテクノロジー、居住空間・生産システムの創造技術などが最新の知見をちりばめて簡潔に紹介されている。從来から技術開発が進められてきたオーソドックスな研究や技術のほかに、ユニークな成果も紹介されている。アフリカ各地の伝統的水利用技術（ウォーターハーベスティング）を整理、紹介した章、個別技術だけでなく社会経済的な要素をも含めて新しいシステムを創出しようとするバイオビレッジ構想など、興味深い情報が随所にうかがわれる。意欲的な試みとしての実験的沙漠都市「アーコサンティ」や沙漠緑化都市「パシフィック」などの紹介、電気自動車の紹介もある。「沙漠ドーム」におけるシミュレーションの提案もおもしろい試みと思われる。当分科会で展開されている主な内容と成果がわかりやすくまとめられていると言ってよいであろう。

そして注目してよいと思われるのは、技術的なことだけに目が行くのではなく、それを取り巻く他の分野にも目を配った記述がうかがわれることである。日本沙漠学会が瞳のように大事にしようとしてきた学際的なアプローチが、そこに反映されているならばうれしいのであるが、毎年の学術大会で、パラレル・セッションでなく、ひとつの会場で文科系、社会科学系、自然科学系がともに語り、考え方をうかがってきたことの反映かもしれない。本書では、技術には不完全さがつきものであることが触れられている。そして、社会経済的側面だけでなく、環境影響評価や古くからの慣習や階級制度、宗教などに対する理解を深めた上で新しい技術の展開を試みようとする配慮がうかがわれる。

しかしながら、その実現が言うに易く行うに難いと本書のどこかでも触れられていた通り、それらと矛盾した

内容がまた目に付くことも事実である。このことは沙漠工学分科会だけでなく、沙漠学会全体が深く考えなくてはならないことであろう。例えば、「真っ白なキャンバスに絵を描くような沙漠都市開発」という記述に目がとまった時に、沙漠は新世界の沙漠だけではないと、旧世界の沙漠のカラフルに描き上げられた姿を想い浮かべる読者がおられるかと思う。また、個別技術の紹介の章にみられる技術者の楽天性に心もとなさを感じる読者もおられると思う。

誤解をしないでいただきたいのであるが、矛盾は悪いことではなく、昨今流行の競争と同じく進歩のための重要な契機なのである。この矛盾を生かすために日本沙漠学会として何を行う必要があるのだろうか。

私は、まず文系、社系の会員に本書を読んで頂きたいと思う。そして多くの意見を頂けたら大変有意義な結果が得られると思う。学術大会の限られた時間では十分な質疑ができないことも多いし、異なる分野からの質問や討論はなかなかしにくい。そして、私の観察が間違っているなければ、自然科学系の会員に比べて、とりわけ文系の方々は批判的な質問をすることが少ないようである。異分野にまで質問をむけることは一層のことかもしれない。学術大会の場における自然系から文系への質問に比べ、その逆はずっと少ないよう思う。かくして、論理的には完璧であっても、文化的、社会的には問題を残す成果が例えれば沙漠研究誌に掲載され、それらが成書となって社会に拡散して行く可能性が生ずる。

学問や科学技術の成果を、問題を起こさせずに社会に定着させる課題は21世紀においてこそ重要である。伝統文化の中にいわゆる近現代科学の成果をどう定着させるかは、嶋田（『異次元交換の政治人類学』1993）が基層文化の重視を強調するように、その間にしばしば存在する大きなギャップ故に、明治以来の我が国諸分野の歴史において再検討を要する大問題と思われる。沙漠学会は、組織に備わる学際性からしてそこにコミットできる集団であると思う。

この本は、一面において技術者集団から社会、文科系集団への知的挑戦状ととれなくもない。しかし、實際は挑戦状になっていない。少なくとも相手にそうは気づかれない。その理由をひとつだけあげれば、文科系の会員に面白く読んでもらえるような書き方にはほとんどなっていないからかと思われる。私はこの本を読んで、両者の知的対決の場を学術大会などで実現したらいいへん有意義だろうと思ったのだが、いかがであろうか。工学者の心意気と夢を沙漠学会の現実と化して行くために。

（嶋田共之）

編集委員 小島紀徳（委員長：成蹊大学） 岬田義仁（副委員長：静岡大学） 石山 隆（千葉大学）
梅村 坦（中央大学） 尾崎益雄（前橋工科大学） 相馬秀廣（奈良女子大学）
真木太一（農業環境技術研究所） 松本 聰（東京大学） 若林宏明（金沢工業大学）
書記：黒瀬匡子

日本沙漠学会編集委員会／〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1
成蹊大学工学部工業化学科 小島紀徳 気付
Tel: 0422-37-3750, Fax: 0422-37-3871, e-mail: kojima@chgw.ch.seikei.ac.jp

Editorial Board Toshinori KOJIMA (Chief Editor), Yoshihito SHIMADA, Takashi ISHIYAMA, Hiroshi UMEMURA, Masuo OZAKI, Hidehiro SOHMA, Taichi MAKI, Satoshi MATSUMOTO, Hiroaki WAKABAYASHI
Editorial Secretary: Kyoko KUROSE

Editorial Office of The Japanese Association for Arid Land Studies

c/o Department of Industrial Chemistry, Faculty of Engineering, Seikei University
3-3-1 Kichijyoji-kitamachi, Musashino-shi, Tokyo 180-8633, Japan
Tel: 0422-37-3750, Fax: 0422-37-3871, e-mail: kojima@chgw.ch.seikei.ac.jp

本誌の刊行にあたっては文部省科学研究費補助金（研究成果公開促進費）の援助をうけた。

編 集：日本沙漠学会編集委員会／〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1
成蹊大学工学部工業化学科 小島紀徳 気付
Tel: 0422-37-3750, Fax: 0422-37-3871, e-mail: kojima@chgw.ch.seikei.ac.jp

発 行：日本沙漠学会／〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1
筑波大学農林工学系乾燥地工学研究室 安部征雄 気付
Tel/Fax: 0298-53-4647, e-mail: abe@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

©The Japanese Association for Arid Land Studies
定価 1,500円（本体1,492円）

発行日 1998年12月25日

印刷：佐藤印刷（株）

JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

CONTENTS

Frontispiece

- Mingyuan DU: Relation between Water and Vegetation Cover in the Taklimakan Desert, China

Invited Reviews

- Masatoshi YOSHINO: Naturel and Human Life in the Desert of Taklimakan 85-94

Original Articles

- Taichi MAKI, Mingyuan DU and Kazuhiko OHBA: Mutual Relationship between Meteorological Improvement and Crop Growth by Windbreaks at the Arid Land of Turpan in China 95-104

- Yasuko NISHIGAMI: Distribution of World Population and Cars from the Viewpoint of Desert Development 105-111

- Tarek H.S. KOTB, Tsugihiro WATANABE, Yoshihiko OGINO and Takao NAKAGIRI: Possibility of Agricultural Expansion in Egypt in View of the Available Water Resources 113-128

- Edward B. SABI, Takao AMAYA, Naomasa NISHIMURA, James D. RHOADES and Scott M. LESCH: Salinity Distribution in Seedbed and Furrow Sections in the Coachella Valley, USA 129-140

Material & Data

- Tahei YAMAMOTO, Kiyoshi TORII, Abbas KESHAVARZ, Ebrahim PAZIRA and Hiroshi IKEURA: Desertification and Salinity Problem in Iran — Sustainable Development in Irrigated Agriculture in Arid Land Areas — 141-149

- Sukeo KAWANABE, Yinhao NAN, Toshio OSHIDA, Zhenwu KOU, Deming JIANG and Jun WEI: Present Situation of Desertification and Measures of Vegetation Improvement of Grasslands in North-Eastern China and Eastern Inner Mongolia 151-160

Special Reports

- "Proceedings of Third Symposium on Aeolian Dust Originated from Arid and Semi-arid Lands" 161-218

- Book Reviews** 219-222