

沙 漠 研 究

JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

目 次

口 絵

- 高橋 悟・渡邊文雄・ISMAEL, Tabarek M.・高橋久光・福永健司：ジブチ共和国における水面蒸発量の推定と緑化への利用

原 著 論 文

- 横田博実・切岩祥和：沙漠地域における農業開発と緑化—アラブ首長国連邦の場合—1-12
- 張 兵・童 慶喜・鄭 蘭芬・王 錦年・王 相軍：中国黄土高原の土地被覆状態の変化（英文）13-18
- 小川哲夫・安部征雄：蒸発排水法における蒸発促進剤の性状と形態の相異が蒸発量に及ぼす影響19-25
- 高橋 悟・渡邊文雄・ISMAEL, Tabarek M.・高橋久光・福永健司：ジブチ共和国における水面蒸発量の推定と緑化への利用について27-35
- レゲア メルカム・北村義信・矢野友久：サージ流給水法の効果の検証および畦間浸入量推定法の評価（英文）37-46
- 楠美順理・森下豊昭：灌漑農業の長期的効果予測のための水分・塩分収支のシミュレーションモデルの構築（英文）47-60

短 報

- 金 鳳鶴・西崎 泰・尹 懷寧・白 鴻祥・鄭 応順・王 春裕・山口達明：ビートによるアルカリ土壌の改良効果—中国カルチン沙漠におけるトウモロコシ露地栽培のケーススタディー—（英文）61-68

小特集：沙漠工学分科会・バイオビレッジ分科会合同講演会 （第8回沙漠工学講演会）講演要旨集

- 概 要69-70
- 長濱 直：中国内蒙古ホルチン沙漠におけるバイオビレッジ建設構想—庫倫旗額勒順鎮における沙漠化防治モデル事業—71-76
- 真木太一：中国の沙漠化・緑化と食料危機77-83

ジブチ共和国における水面蒸発量の推定と緑化への利用
Estimation of Water Surface Evaporation and Greening in the Republic of Djibouti



写真1. ジブチ国の代表的な地形の山岳沙漠、植生はほとんどみられない。

Photo 1. Desertic mountain is one of typical topography found in Djibouti, where vegetation is hardly found.



写真2. ジブチ国の海岸平野の状況、ワジ沿いに植生がみられる。

Photo 2. Coastal topography in a desertic area, where a few vegetation can be seen along the Wadi.



写真3. ジブチ国の中央部に位置するグレート・バラ沙漠、沙漠周辺部の山から流亡した粘性土の堆積作用によって形成されている。

Photo 3. Great Bara Desert which is located in the central area of Djibouti, it is characterized by its clayey texture caused by sedimentation during rainy season.



写真4. ジブチ国内でよくみられる地表面を覆っている石（岩石沙漠）。

Photo 4. Stony desert, which is one of the characteristics of the topography in Djibouti.

沙漠地域における農業開発と緑化 —アラブ首長国連邦の場合—

横 田 博 実*・切 岩 祥 和**

1. はじめに

アラブ首長国連邦 (UAE) は、アラビア半島の東南部に位置し、1972年に建国された新しい国である。アブダビ、ドバイ、シャルジャ、フジャイラ、ラスアルハイマ、アジュマン、ウムアルクウェインの7首長国からなる (図1)。国土の大半は沙漠に覆われ、亜熱帯乾燥地に属している。国土面積は約80,000km²である。年間降水量は地域によって異なるが、少ないところでは50mm以下、多いところでも150mm前後である。夏季の月平均最高気温も40℃を超えるなど農業にとっては不利な気候条件下にあるが、石油収入を背景に食糧安全保障と石油に依存した経済から脱却することを目的として沙漠地における農業開発が奨励されている。また、住環境の改善、道路や農地の防風・防砂を目的とした沙漠緑化が一部の首長国で盛んである (吉崎ほか, 1991)。

沙漠地における農業開発が奨励され、近代的な灌漑方法が導入されて農耕地の面積が急速に拡大するようにな

ったのは1970年以降である。1978年のUAE全体の農耕地の面積は約20,000haであったのに対して、1990年には2倍以上に拡大している (AL-ARFI, 1993)。これらの農耕地では、従来から栽培されてきたナツメヤシ (*Phoenix dactylifera*) やアルファルファ (*Medicago sativa* L.) に加えて野菜などが大規模に栽培されるようになった。

しかし降水量が少なく、農業に用いる灌漑水を全面的に地下水に依存しているため、農耕地の拡大に伴う過度な地下水の汲み上げによって地下水位が低下し (UAE UNIVERSITY, 1993)、灌漑水の塩類化も進んでいるといわれている。農業の発展によって一部の野菜などは自給できるようになったが、灌漑水の不足や塩分濃度の上昇、さらに農耕地土壌の塩類集積によって耕作ができなくなり、放棄された農場がみられる地域もある。その一方で依然として大規模な農地開発が行われている。

緑化面積も1970年以降増加し始め、1992年の全国の植林地は累計で約200,000haに達している (AL-ASAM, 1992)。緑化はとくにアブダビ首長国で大規模に行われている。緑化に用いる灌漑水も地下水に依存しているが、樹木の場合は灌漑水の塩分濃度が高くてもある程度生育が可能である。このため土壌や灌漑水の著しく高い塩分濃度が問題となっている植林地もみられるが、農業に比較すれば今のところ大きな問題はない。

本稿では、筆者らが1985年以来行ってきた調査や得られた資料をもとに、過去20～25年の間に拡大されてきたUAEの農業開発及び緑化の現状と、それらの拡大に伴って生じている問題点及びその対策について述べる。

2. UAEの農業

1) UAEにおける農業の位置付け

UAEでは1960年代から石油が産出されるようになり、石油収入を使って幹線道路が建設され、遊牧民の定住化を促進する住宅も建設されるようになった。食糧や生活

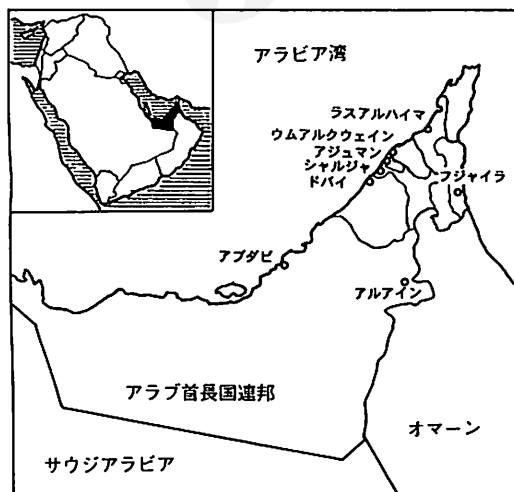


図1. アラブ首長国連邦及びその構成首長国。

*静岡大学農学部応用生物化学科
**静岡大学大学院農学研究科

表1. 湾岸諸国のGDP (国内総生産)、所得、人口及び国土面積 (1991年).

(資料: Suri, 1993)

国	GDP (10億ドル)	人口 (百万)	1人当所得 (ドル)	面積 (10,000km ²)
UAE	34	1.9	18,000	83.6
サウジアラビア	108	11.5	9,500	2,150.0
クウェート	20	1.7	12,000	17.8
オマーン	8	1.2	6,500	300.0
カタール	7.5	0.5	15,000	11.5
バーレーン	4	0.4	10,000	0.7

用品なども大量に輸入されてUAEの人々の生活は大きく変わった。また、近隣諸国からは全人口の70%ともいわれる多くの外国人労働者が流入し、さまざまな仕事に従事している。

UAEは湾岸諸国のなかでも最も豊かである。UAEのGDP (国内総生産) は湾岸諸国ではサウジアラビアに次いで多く、人口が190万人と少ないことから国民一人当たりの所得は18,000ドルと湾岸諸国では最も高い (表1)。UAEは前述したように7首長国からなるが、石油の産出はアブダビ首長国とドバイ首長国で多い。GDPにおいても両首長国がUAE全体の87%を占めており、石油収入の多いこの2つの首長国が他の首長国に比べて豊かである。

石油採掘関係が主要な産業であるが、産業別にGDPの分布をみると、石油採掘関係が43%と最も多く、次いで政府、貿易、建設業、諸工業などとなっており、農業は1.7%とGDPに占める割合は最も少ない (表2)。しかし産業別の就業人口をみると、農漁業に働く人口は貿易・ホテルに次いで多く、10%程度を占めている (表3)。しかも他の産業に比べて1986年 (8.4%) から1990年 (11.4%) の間の増加傾向は3%と最も著しい。このデータからわかるように、農業がGDPのなかに占める割合は小さいが、農業に関わる人が多く、他の産業に比べて急速に拡大してきたことがうかがえる。

このような豊かな国で農業が奨励される理由の一つは、食糧安全保障という観点から農産物の国内自給率を向上させ、石油に依存した経済を変えることにある。もう一つの目的は、農産物の買い上げや農業を行うための補助金給付など農業をととして比較的就業人口の多い農民の収入を増大させることにある。農業を行う際には、農地は国から支給され、農民は国から補助金を得て、種子や農薬、肥料を半額あるいはそれより安く購入できるし、灌漑に必要なポンプや灌水チューブなども安く入手できる。そして生産物は国が必要に関係なく買い上げてくれる (Al-Afifi, 1993)。なお農業が奨励されて拡大し

表2. UAEにおけるGDP (国内総生産) の産業別分布 (1991年). (資料: Suri, 1993)

産業	割合 (%)
石油関係	43.1
建設	8.4
貿易	9.4
工業	7.4
政府	10.8
金融	5.0
不動産	5.5
輸送	5.2
サービス	2.0
農業	1.7
その他	0.8
合 計	100.0

ている第三の理由として、緑化とともに農業をととして緑に対するある種のあこがれを実現できることもあげられる。

2) UAEの農業立地

UAEの地形をみると東隣りのオマーンとの国境沿いに標高1,000m程度の山岳地帯がある (図4に山岳地帯の位置を示した)。この山岳地帯の麓には礫原やワジがあるが、その西側には砂丘が広がり、サウジアラビアから広がるルブアルハリ沙漠につながっている。東部海岸では山岳地帯の麓が海になっている。

UAEの年平均降水量は地域によって異なり、北部山岳地帯で最も多く、160mmを超える地域がある (図2)。ここから砂丘が広がる西側に向かって徐々に降水量は減少し、アルアイン地区では80~100mm程度となる。さらに西に位置するリワ地区では40mm以下となる。

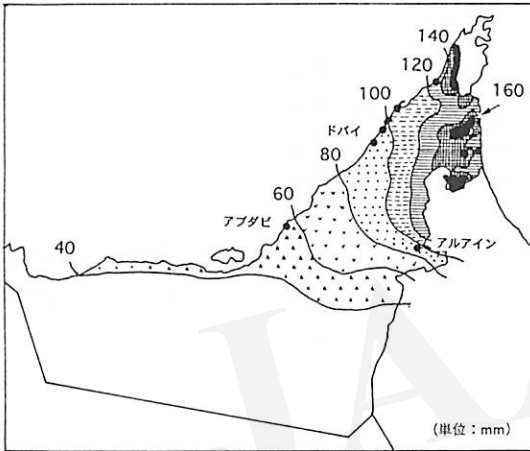
農業や植林した樹木の灌漑には地下水が用いられている。地下水利用で問題となるのは灌漑水の塩分濃度である。調査された地下水の水位や調査時期、調査地点など明らかではないが、UAE北部を中心とした地下水の塩分濃度 (図3) をみると、降水量の多い北部の山岳地帯

表3. UAEの職種別雇用人数 (1991年).

(資料: SURI, 1993)

職種	1986	1988	1990
農漁業	59,913 (8.4)	78,480 (10.0)	98,942 (11.4)
石油・ガス	14,180 (2.0)	14,581 (1.9)	14,875 (1.7)
工業	54,952 (7.7)	64,653 (8.2)	75,321 (8.7)
電気・水	14,637 (2.1)	15,468 (2.0)	15,875 (1.8)
建設	106,430 (14.9)	92,415 (11.8)	75,778 (8.7)
貿易・ホテル	99,145 (13.9)	104,443 (13.3)	109,496 (12.6)
輸送・通信	51,585 (7.2)	53,056 (6.8)	54,306 (6.3)
銀行・保険	25,276 (3.5)	30,314 (3.9)	35,471 (4.1)
その他サービス業	283,763 (39.8)	328,370 (41.8)	382,298 (44.1)
無職	3,345 (0.5)	3,646 (0.5)	3,938 (0.5)
合 計	713,232 (100.0)	785,246 (100.0)	866,300 (100.0)

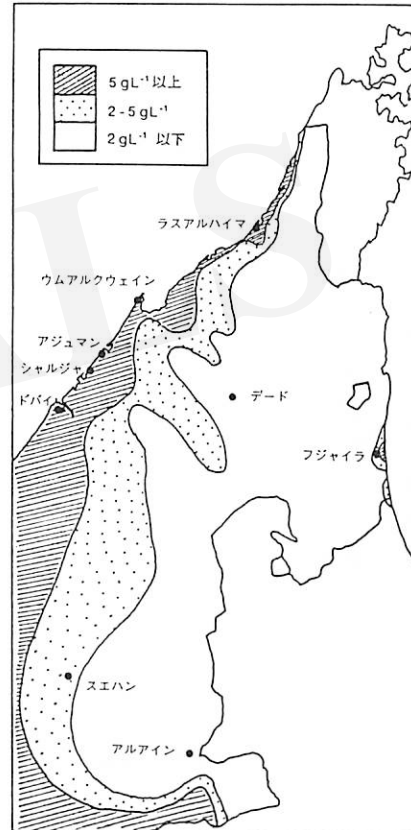
カッコ内の値は%を示す.

図2. UAEの年平均降水量の分布.
1972～1989年の平均. (資料: UAE UNIVERSITY, 1993)

と山岳地帯に近い場所で水質が良く、地下水1リットルに含まれる総塩類が2g以下である。しかし、山岳地帯から西側の平原地帯に向かって塩分濃度が高くなり、アルアインやスエハン地区を越えた西部や海岸近くでは地下水1リットルに5g以上の塩類が含まれるようになる。山岳地帯に近い場所でも海岸部の東部フジャイラ地区では地下水の塩分濃度が高い。

このように地下水の塩分濃度は降水量の減少とともに高くなる傾向があり、農業は降水量が比較的多く、水質の良い北部山岳地域とその周辺で盛んである。山岳地帯のデード地区や山岳地帯の麓に位置するアルアイン地区のように、2,000年以上前から農業が行われてきたところもある (UAE UNIVERSITY, 1993)。

UAEの農業地域は、現地では首長国を単位として北部、中部、東部、西部地域に分けられている (UAE UNIVERSITY, 1993)。本稿では、位置と立地条件が大きく

図3. UAEの北部及び中部を中心とした地域の地下水の塩分濃度.
(資料: UAE UNIVERSITY, 1993)

異なるため西部地域 (アブダビ首長国) を2つの地域に分け、以下の5地域として示した (図4)。

- 1) 北部地域: ラスアルハイマ首長国のディグダガ地区やハマラニア地区などを中心とした番号1の地域。降水量が多く、自然植生も多い。

- 2) 中部地域：シャルジャ首長国のデード地区を中心とした番号2の地域。シャルジャ首長国の他、ドバイ、アジュマン及びウムアルクウェイン首長国の農業地帯も含む。降水量は少なくなるが、北部地域と類似の立地条件にある。
- 3) 東部地域：フジャイラ首長国の東部海岸に沿った農業地帯を中心とした番号3の地域。山岳地帯が近く、平地が少ない地域である。
- 4) アブダビ首長国東部地域：山岳地帯の麓アルアイン地区を中心として、西側の砂丘のなかに広がる番号4の地域。
- 5) アブダビ首長国西部地域：ルブアルハリ沙漠のなかに位置するリワ地区を中心とした番号5の地域。

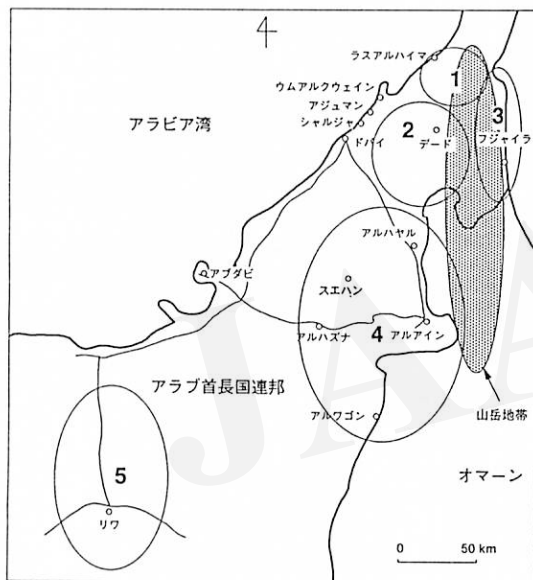


図4. UAEの主要な農業地域。

この地域だけは山岳地帯から離れた位置にある。

UAEの1990年の農耕地面積、農場数及び1989年の農業生産量について各首長国別の割合を上述した地域に分けてみると（図5）、農耕地面積、農場数ともに最も多いのはアブダビ首長国東部及び西部地域である。次いで中部地域、北部地域であり、東部地域は最も少ない。しかし、年間農業生産量は北部、中部及び東部地域の占める割合が多い。アブダビ首長国東部及び西部地域は農家数や農耕地面積が他の地域に比べて多いにもかかわらず、いずれの作物も他の地域に比べて年間生産量が少ない。北部、中部及び東部地域に比べて、この地域では灌漑水質が悪く塩分濃度が高い地域が多いことから、塩類過剰害などが影響して単位収量が低いと考えられる。

年間生産量を野菜、果樹、牧草等に分けて地域別割合をみると（図5）、地域によって栽培されている作物に違いがある。北部地域では果樹に比べて野菜の割合が多く、中部地域で果樹の生産量が多い。アブダビ首長国の東部、西部地域は他の地域と異なり、野菜の生産量が多く、果樹と牧草等が著しく少ない。このように地域によって栽培作物に違いがあるのは、灌漑水質などの立地条

表4. UAEの主要な生産作物（1989年のデータ）。
野菜、牧草等、果樹とも生産量の多い順に示した。
（資料：UAE UNIVERSITY, 1993）

野菜	牧草等	果樹
トマト	アルファルファ	ナツメヤシ
ズッキーニ	ローズグラス	柑橘類
ナス	ミレット	マンゴー
キャベツ	コムギ	
ピーマン	タバコ	
カリフラワー	オオムギ	
オクラ		
キュウリ		

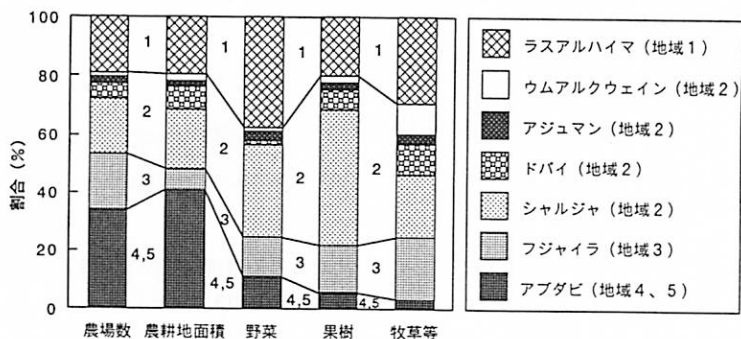


図5. 各首長国の農家数、農耕地面積及び年間農業生産量の割合。

農家数と農耕地面積は1990年、年間農業生産量は1989年のデータ。

（資料：UAE UNIVERSITY, 1993）

件や各酋長国の農業政策が異なるためと思われる。

UAEで行われている野菜の露地栽培は、10月から5月にかけての気温が低い時期に行われ、最高気温が45℃を超えることもある夏季にはスイカ以外の生産は行われない。野菜で生産量が多いのはトマト、ズッキーニ、ナス、キャベツである（表4）。牧草等ではマメ科の牧草であるアルファルファとヒネ科の牧草であるローズグラス（*Chloris gayana* Kunth）が多い。UAEではタバコも栽培されているが、主に東部地域や中部地域でみられる。ムギ類は、オアシスなどで小規模に栽培されている他、アブダビ酋長国でスプリンクラー灌漑法による大規模なコムギ生産が試みられたが、一部は灌漑水の不足から栽培が中止されており、生産量は少ない。果樹ではナツメヤシが最も多く次いでライムやレモンなどの柑橘類である。ナツメヤシは全国的にみられるが、柑橘類はアブダビ酋長国の東部及び西部地域では少ない。

3) 農業の形態

UAEでは、露地栽培のほか通年栽培を目的とした施設（ハウス）栽培も行われている。露地栽培は伝統的な水盤灌漑法や近代的なドリップ灌漑法により行われている。また、露地栽培では灌漑水の水源にも違いがみられる。

(1) 施設栽培

施設栽培には特徴的な形態がみられる。それは通年栽培が可能な冷房ハウスである。この方式は沙漠の内陸部では昼間著しく湿度が低く水が蒸発しやすいことを利用している。水が蒸発すると気化熱が奪われる。これによって温度が下がった空気をハウス内に取り込んでハウスの温度を下げることににより45℃を超える夏季の栽培を可能にしている。この冷房ハウスは野菜生産や一部花卉栽培にも利用されている。ハウス栽培による生産量がUAE全体の農産物の生産量に占める割合は明らかではないが、多くはない。

(2) 露地栽培

露地栽培には、以下のような伝統的な①水盤及び②畝間灌漑法と、近代的な③ドリップ及び④スプリンクラー灌漑法が用いられている。

①水盤灌漑法は格子状に小さく区切られた畑に作物を栽培し、水田のような湛水状態になるように灌水を行う方法である。格子の大きさは1辺が数メートル程度である。

②畝間灌漑法も水盤灌漑法と同様に伝統的灌漑法である。畑に畝を作って畝の上部に作物を栽培し、畝と畝の間に水を流して灌水する方法である。

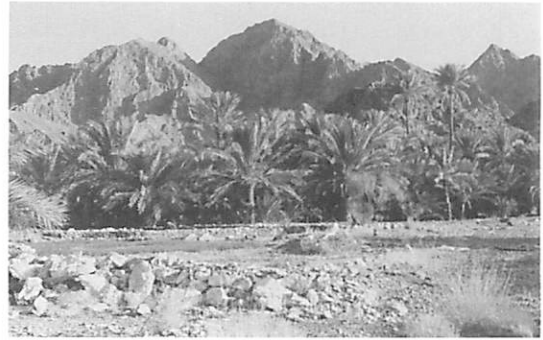


図6. 山岳地帯にみられる小規模な農場。
地域4の山岳地帯。

③ドリップ灌漑法は、ほとんどが野菜栽培に利用されている。農耕地の地中に井戸から配管して水を引き込み、そこから灌水チューブを配置し、チューブにさまざまな形のノズルを付けて根圏に灌水する方法である。最も節水が可能な方法として広く用いられている。

④スプリンクラー灌漑法はコムギ栽培やアルファルファなどの牧草の大規模な栽培に利用されている。

(3) 水源による栽培方法の違い

灌漑水の水源には、ほとんどの場合地下水がポンプで汲み上げられて利用されているが、一部の地域では古くから地表水や地下水路の利用も行われている。これら水源の違いによってUAEで行われている露地栽培の形態は①地表水を利用する型、②カナートやファラジとして知られている地下水路によって地下水を導き利用する型、③井戸を掘り地下水をポンプにより汲み上げて利用する型の3つのタイプに分類できる。

①地表水を利用する型：山岳地帯で古くから行われている形態である（図6）。山の谷間を流れる水を山腹に沿った水路によって農場まで引き込んで灌漑水として使用している。現在は揚水ポンプを利用して農場まで汲み上げている場合もある¹⁾。

農場は小規模な場合が多い。主にナツメヤシや柑橘類（ライムなど）が栽培されている。農場によっては葉菜類などの野菜をナツメヤシの樹蔭で栽培している。

得られる灌漑水の水質はかなり良好で土壌の塩類集積はまったくおこっていない。しかし、大量の降雨の際におこる洪水によって農地や水路、さらに道路が冠水し、流出することがある。最近ではコンクリート製のしっかりした水路もできているが、時には補修が必要となる。この栽培形態が全体の農業生産に占める割合はきわめて小さく、徐々に減少していると思われる。

②地下水路を利用する型：山岳地帯の麓で行われてき



図7. 水盤灌漑法によるアルファルファの栽培。
地域4のアルハヤル地区付近。



図8. 沙漠の中に広がる農場。
地域5のリワ地区。

たいわゆるカナート式の灌漑形態であるが、UAEではこの地下水路をファラジと呼んでいる。①の型と同様に古くから行われている。灌漑方法は伝統的な水盤灌漑や畝間灌漑法が用いられている。

水源は地下水であるが、高度差を利用したファラジによって水を導いている。良質の地下水が得られる場所に井戸を掘り、ファラジを作ってその水を農耕地まで送っている。現在もかなり利用されているが、地下水位の低下やポンプによって井戸から地下水が得られるようになったことにより、使われなくなったファラジもある。

ファラジによって導いた水を利用している農耕地がいわゆるオアシスとなっている。主にナツメヤシが栽培され、以前はその樹陰でムギ類や野菜などが栽培されていた。現在はナツメヤシだけでムギ類などはあまり栽培されていない。地域4の山岳地帯の麓や中部から東部海岸地域に多くみられる。

③地下水を汲み上げて利用する型：揚水ポンプによって井戸から地下水を汲み上げて利用する近代的な形態であり、現在ほとんどの農業がこの形態である。灌漑法は伝統的な水盤灌漑や畝間灌漑が用いられる場合とドリップ灌漑やスプリンクラー灌漑が用いられる場合がある。この型の水利用は平地ばかりでなく、山岳地帯でもある程度の平地がある場所では行われている。

水盤灌漑法では、アルファルファ、ムギ類が、野菜では葉菜類が主に栽培されている。畝間灌漑法ではキャベツやナスなどの野菜が栽培されている。ナツメヤシは農場の周囲で栽培されることが多く、①や②の型のように、ナツメヤシを一面に植え、その樹陰で野菜等を栽培する農場はほとんどみられない。図7は水盤灌漑法によるアルファルファの栽培例である。

ドリップ灌漑法では主に野菜が栽培されている。1970年以降の野菜生産の増加は主にドリップ灌漑法を用いる



図9. ドリップ灌漑法によるキャベツの栽培。
地域4のアルハズナ地区。

このタイプの農場の増加による。現在最も多く行われている形態であり、一つの農場で水盤灌漑や畝間灌漑と混在していることも多い。比較的規模の大きな農場がみられる。図8は地域5のリワ地区にみられるこのタイプの栽培例を示した。また、図9はドリップ灌漑法によるキャベツ栽培の様子である。地域4のアルハズナ地区における栽培例であるが、塩分濃度の高い灌漑水が用いられているため、地表面に塩が集積している。

スプリンクラー灌漑法は、アルファルファやローズグラスなどの牧草やコムギの栽培に利用されている。この灌漑法は、UAEでは小規模な場合には民間で行われることもあるが、ほとんどは連邦や首長国の政府が運営している大規模農場にみられる。栽培面積は少ない。

3. 農業拡大のもたらす諸問題

1) 農業の拡大の実態

農耕地面積は1975年以降1980年まで急速に増加し、その後も緩やかであるが増加している（図10）。ここで

示したデータは1989年までであり、その後の増加はデータとしては明らかではないが、現在も地域によっては農耕地が増加している。とくに地域4と5（アブダビ首長国）のスエハン地区、アルワゴン地区、リワ地区では砂丘を整地して大規模な農耕地が開発されている。しかし、地域2のデード地区のように放棄された農場も多くみられ、実際には農耕地が減少している地域もあると考えられる。

農耕地を拡大するために地下水を汲み上げる井戸も多く掘られている。現在UAEで使用されている井戸の本数は明らかではないが、1976年から1980年の間にUAE全体で約3,000本の井戸が掘られている（UAE UNIVERSITY, 1993）。

このような農耕地の増加によって農産物の生産量は増加した。生産量は明らかでないが、1991年のUAE全体の野菜生産量は1978年の748%にも増加している（Al-Afifi, 1993）。ナツメヤシについても生産量は明らかではないが、UAE全体で植栽されている本数は1978年には240万本であったが、1990年には1,370万本となり5倍近く増加している。牧草その他の作物も、UAE全体では1978年の3万トンに対し、1991年は50万トンと10倍以上に増加している（Al-Afifi, 1993）。

2) 農業の拡大に伴う諸問題と対応策

(1) 水資源の不足

UAE農業のもっとも大きな制限要因となっているのは水資源の量と水質である。UAEで農業が急速に拡大し始めたのは1970年代に入ってからであるが、1984年にはすでにアルアイン地区の地下水位の低下が報告されている（TOWN PLANNING DEPARTMENT, Al Ain UAE, 1984）。図11に地域2のデード地区から海岸のウムアルクウェイン地区の間の1969年と1985年の地下水位を示した（UAE UNIVERSITY, 1993）。デード地区からウムアルクウェイン地区に至る地域全体で地下水位が明らかに低下しており、中部地域や北部地域でも15年以上前にすでに地下水位の低下現象がおきていたことを示している。

地域2のデード地区では、1979年の調査時には、新たに開発され、野菜などが栽培されている農場が広がっていたが、1993年にはほとんどが放棄された農地となっていた。これは地下水位の低下により灌漑水が得られなくなったためである。地域4のアルアイン地区にある規模の大きなオアシスでも、1979年にはオアシスの周辺に野菜栽培が拡大されていたが、1993年には拡大された農地の耕作は行われていなかった。これも地下水位の低下によってオアシスに供給される水量が減少したことによると考えられる。アルアイン地区にある面積約1,000haのコムギ栽培を行っていた国営農場も灌漑水の不足により栽培を休止している。

このように地下水位の低下はとくに古くから農業が盛んな地域である地域4のアルアイン地区や地域2のデード地区で顕著である。最近の報告によればアルアイン地区やデード地区の地下水位は毎年1～2mの速度で低下し、これまでに35～50m低下したと報告されている（UAE UNIVERSITY, 1993）。

UAE全体の水収支に関する最近のデータはないが、1987年の報告（ABDULLAH, 1987）によると、UAEにおける年間水消費量は10億5,500万m³である。このうち農業に利用される量は8億6,000万m³であり、降雨により補われる量は1億8,000万m³である。UAEの農業が山岳地

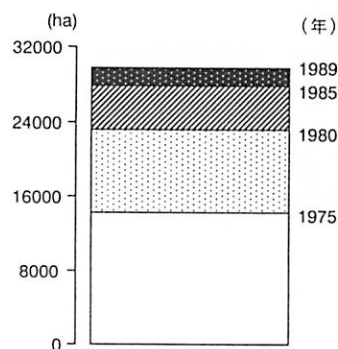


図10. UAEにおける農耕地の増加。
(資料：UAE UNIVERSITY, 1993)

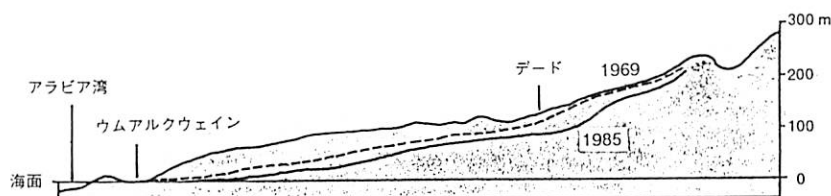


図11. UAE中部地域（デード～ウムアルクウェイン）における地下水位の低下。
(資料：UAE UNIVERSITY, 1993)

帯とその近くで行われてきたことは、降雨が伏流水となり貯えられた水が¹、塩類を含まない良質の灌漑水として利用されてきたことを示していると考えられる。1970年代以降の地下水位の低下は降雨によって補われる量を超えて水が農業用水として利用された結果であると考えられる。なお、UAEで利用されている井戸の深さは100～200m程度といわれており、さらに深層の地下水は今のところ利用されていないと思われる。

地下水位の低下に対して、国は全国的な地下水位の監視体制の確立、新たな地下水資源の探索、ワジにダムを設置して雨水を確保するなどの対策を行っている。雨水の確保に関しては、地下ダムの建設が有効であるといわれているが、ダム下流の農地への影響が考えられるなどの理由によって実現していない。また地域4のアルアイン地区では、節水を目的として農家当たりの栽培面積や生産物買い上げの制限が行われているようである。

このほかの灌漑水不足に対する対策として注目すべきものをあげると、一つに、海水による塩性植物の栽培実験がある。これは1985年前後に地域3のフジャイラ地区に近い海岸で試みられた。アリゾナ大学がシャルジャ政府の援助で行った。塩性植物を海水で栽培して、収穫後種子からは油を生産し、植物体は洗浄して塩類を除去してから家畜の飼料にする計画であった。しかし予備栽培は行われたが実用化にはいたらなかった。

UAEでは主要な牧草であるアルファルファの栽培をやめることも節水を行う一つの有効な方法であると考えられている。アルファルファは通年栽培であり、夏季には大量の水を消費することから、アルファルファを輸入飼料に切り替えることによって、農業用水の35%の水消費が節約できると報告されている (TOWN PLANNING DEPARTMENT, AL AIN, UAE, 1984)。アブダビ首長国の地域4や地域5で新たに開発される農場でアルファルファが栽培されるケースは少ない。水資源の節約という面からすればいいことであろう。

なお、UAEでは海水の淡水化が大規模に行われているが¹、ほとんどは生活用水に使用され、コスト面から農業には使用されていない。一部公園緑地の灌水に使用されている程度である。また、生活排水の再利用も行われているが、量的には少なく、農業における水資源の不足を解消する方法にはなっていない。

(2) 灌漑水の塩類化

地域4のアルアイン地区ではすでに1985年に灌漑水の塩分濃度が高くなっていることも報告されている (TOWN PLANNING DEPARTMENT, AL AIN, UAE, 1984)。また、前述したアルアイン地区の1,000haの国営小麦栽培農場

表5. 1978年及び1993年におけるUAE各地域の灌漑水質 (EC). (dSm⁻¹)

地域 (地区)	1978	1993
地域2 (デード地区)	1.61	3.11
地域3	—	5.35
地域4 (山岳地帯)	—	1.34
地域4 (アイアイン地区)	2.38	3.46
地域4 (アルワゴン地区)	5.10	9.72
地域4 (アルサード地区)	6.49	7.83
地域4 (アルハヤル地区)	0.49	3.22
地域5	—	7.38

では数十本の井戸を掘って灌漑水を汲み上げたことから周囲の農場では地下水の塩分濃度が高くなったといわれている。さらに、地域4のアルワゴン地区にあった国営農場では、これまで牧草のローズグラスを大規模に栽培していたが、水質が悪くなり、ある程度塩分濃度が高い灌漑水でも生長する樹木を植えて植林地に転換した例がある。筆者らが行った1993年の調査 (横田・小澤, 1995) と1978年に行われた調査 (日本沙漠開発協会, 1980) をもとに灌漑水質を比較すると、地域2及び4では1993年の灌漑水の塩分濃度が高くなっている (表5)。この2回の調査は同一の井戸から灌漑水を採取していないなど厳密な比較はできないが、農業に使用されている灌漑水質が悪化している傾向は明らかである。

このように灌漑水質が悪化してきているメカニズムの全容は明らかではないが¹、基本的には、従来塩分濃度が低い地下水 (比較的浅い層にあった) が優先して利用されてきたが、地下水位が下がり、塩分濃度の低い地下水が減少するに従って、動きが遅く塩分濃度が高い地下水が使用されることになったと考えられる。しかし、灌漑水質は一つの農場のなかの同程度の深さの井戸でも著しく異なることがあり、水質の悪化を単純に地下水位の低下によって説明できない面もある。

地下水の塩分濃度が上昇するもう一つの原因として海水侵入による塩分濃度の増加があげられる。これは地下水を過剰に汲み上げたために海水が逆流したことによる。東部海岸地域でおこっている現象である。地域3のフジャイラ地区 (図3) で地下水の塩分濃度が高いのはこのためである。

地域4のアルワゴン地区では、1978年でも塩分濃度はかなり高いが1993年にはさらに高くなっている (表5)。このアルワゴン地区の他、地域5や地域4の一部も1993年の調査時には著しく高い。これらの地域は、もともと地下水の塩分濃度が高い地域 (図3) に位置しており、したがって、地下水の塩分濃度が高い地域に農耕地が開

発され、高塩分を含む地下水が農業上問題になっているとみることができる。

高塩分を含む灌漑水に対する対策としては、まず耐塩性の強い作物を選択栽培することである。耐塩性の強い作物としてナツメヤシの栽培は多い。野菜では、トマト、キャベツ、ナスなどの生産量が多い。これらの野菜は耐塩性が比較的強く（ALLISON, 1964）、耐塩性の強い野菜が選択されている傾向がうかがえる。このほか地域4のアルワゴン地区に近い農場では、アブダビ首長国の森林局が飼料にすることを目的として耐塩性の強いアトリプレックス（*Atriplex* spp.）の栽培試験を行っている。耐乾性の強いホホバ（*Simmondsia chinensis*）の栽培も試みられている。地域4のスエハン地区では灌漑水由来の塩分が集積した土壌を除去して、塩分濃度が低い砂丘砂を農地に入れて客土するという塩害対策が行われている。

3) 季節的な過剰生産

UAEの諸農産物の自給状況には大きなアンバランスが生じている。牛乳、鶏卵などは年間を通じてほぼ自給が可能になったのに対して、トマト、キュウリなど一部の野菜は冬季の間だけ自給可能となるが、他の季節には輸入に依存している。逆に冬の間に生産が集中するため、冬季にトマト、キャベツ、ナスなどは生産過剰となる。ナツメヤシも生産過剰となっている。国は需要に関係なく生産物を一定の価格で買い上げるため、保存ができない売れ残った野菜は都市ゴミコンポストの工場に運ばれ、堆肥の原料として利用されている。

1985～1986年には、余ったトマトを処理する加工工場が地域4のアルアイン地区に建設され、一部トマトペーストなどに加工されて輸出された例はあるが、このほかに過剰生産に対する対策はとられていないようである。

4. UAEの緑化事業

1) 緑化事業の実態

UAEでは農業とともに植林による沙漠緑化も積極的に行われている。UAEにおける植林事業の目的は、もともと樹木があった場所に樹木を植えて緑を回復することではなく、沙漠に植林を行い、それぞれの目的にあった新たな緑を形成することである。

都市住環境の改善、道路や農地の防風・防砂を目的とした緑化の他、アブダビ首長国では広大な砂丘地や砂丘間低地に100～200ha程度の規模の植林地が造成されている。この植林の目的は都市計画の一環だとされており、

国土の5%を植林するのが目標ともいわれている。毎年4月には植林週間のキャンペーンも行われている。

これまでにUAE国内で植林が行われた面積は1992年までに約200,000haとされている（Al-Asam, 1992）が、首長国別や目的別の内訳は明らかではない。各首長国のうち古くから緑化を積極的に行っているのは、国土の大半を占めているアブダビ首長国である。アブダビ首長国では、都市緑化や幹線道路沿いの防風・防砂林としての植林とともに、オマーンとの国境沿いや砂丘地（砂丘間低地を含む）など人が住んでいない地域にも1969年頃から植林を行っている。アブダビ首長国東部地域（図4の地域4）の一部幹線道路沿いの植林地も含めた砂丘地の植林地の面積は、1993年までに36,745 haに達している。

このような沙漠のなかの植林地の植栽樹種や植栽方法、灌漑方法など植林地の造成については、すでに報告されている（吉崎ほか, 1991）が、概略は次のようである。1植林地の規模は100～200ha程度であり、最初に灌漑水を汲み上げる井戸を掘り、灌漑を行うための配管を設置する。植林地の周囲にはラクダなどによる樹木の食害を防ぐためのフェンスを設置し、1年生程度の苗木を植栽する。灌漑はすべてドリップ灌漑方式で行われている。このような植林地の造成は、民間会社がアブダビ首長国政府との契約によって行い、植林が終了して一定の期間が過ぎると政府に引き渡されるケースが多い。政府に引き渡された後の植林地の管理はパキスタン人の労働者が現地に住み込んで行っている。

都市部での緑化には外国から導入された樹種も多く用いられているが、砂丘地に造成されたほとんどの植林地では、現在UAEの自生種が用いられている。主要な樹種は現地名でアラーク（*Salvadora persica*）、ガフ（*Prosopis cineraria*）、サマー（*Acacia tortilis*）、シダー（*Zizyphus spina-christi*）である。これらの4樹種は耐塩性が著しく異なり、アラークの耐塩性が最も強い（YOKOTA *et al.*, 1997）。これまでの筆者らの現地調査（YOKOTA *et al.*, 1997）では、灌漑水質の悪い場所には耐塩性の強いアラークが、灌漑水質の良い場所には耐塩性の弱いサマーなどが多く植栽されている傾向がみられた。

アブダビ首長国以外の首長国では、幹線道路沿いに植林が行われている例を除いて、緑化はあまり行われていない。北部地域では降水量も多く、自生している樹木が多いこと、これまで石油収入が少なく緑化事業を行う経済的余力が小さいことなど、それぞれの首長国の自然・経済状態と政府の方針などの要因によると思われる。

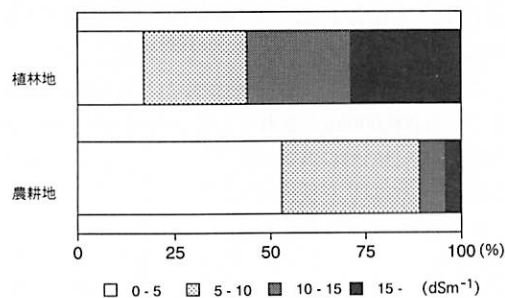


図12. 農業と緑化に用いられている灌漑水の水質。灌漑水のEC値を4段階に分け、その割合で示した。

2) 緑化事業の拡大に伴う諸問題

緑化事業には、農業と異なり大きな問題はないとされているが、場所によっては灌漑水や塩性湿地の高塩分に由来する塩類ストレスによって樹木の生育不良がおこるなどの問題が生じている。また、植栽されたほとんどの樹木には継続して灌漑が行われていることを考えると、将来的には灌漑水に用いる水資源が不足することも考えられる。

樹木の灌漑に用いる灌漑水の水質は農業に用いる灌漑水に比べてかなり悪い。現地では、農耕地の塩類集積が少なく、農業が継続可能な灌漑水のEC（電気伝導度）は 5dSm^{-1} 以下だといわれている。筆者らが行った各地の農場や植林地の調査（図12；横田・小澤, 1995; YOKOTA *et al.*, 1997）によると、ECが 5dSm^{-1} 以下の灌漑水を使用している農場は調査した全農場の50%以上であった。一方、植林地ではその割合が全植林地の10%程度であり、 10dSm^{-1} を超える灌漑水を用いている植林地が50%以上に達している。このように、植林では農業に利用できない高塩分濃度の地下水が灌漑水として用いられている。それでも前述したアラークのように耐塩性樹種を植栽すれば、ある程度樹木の生育が可能である。さらに灌漑量を多くして土壌の塩類集積を抑制し、土壌表層に集積する塩類を定期的に除去すれば、灌漑水の高塩分もあまり問題にならない。しかし、塩性湿地のように極端に塩分濃度が高い場所では、ほとんど樹木が生育しないケースもみられる。このような塩性湿地やUAE西部の海岸近くに広がる塩集積地（サブハ）の一部では、塩分を含まない土を載せて、そこに植林を行う方法も試みられている。土壌の下層から上昇する塩分によって樹木の生育が阻害されることも考えられるが、今のところ樹木は生育している。また、塩性湿地のように塩分濃度の著しく高い場所でも生育する樹木の検索も行われている。

アブダビ首長国では、1970年代に植栽され20年以上経過した植林地でも、依然として灌漑が継続されている。これら植林地の地下水位の低下や灌漑水質の変化などは明らかではないが、将来にわたって全植林地で灌漑を継続するには地下水資源が不足する可能性が考えられる。また、灌漑など植林地を管理するためのコストも問題になる。それ故一部の植林地では灌漑を停止する試みも行われているが、その面積はわずかである。しかし今後は適正灌漑量の把握による節水や灌漑の停止、日常の管理を軽減するなどしたうえで植林地を維持していく方策を検討する必要があると思われる。

5. おわりに

ほとんど降雨がない乾燥地において、農業が拡大して一部農産物の自給が可能になったが、その一方でさまざまな問題が生じているというUAEの農業について述べた。UAEにおいて今後も農業を継続していくとすれば、最も問題なのは水資源の不足である。現地の新聞に、対岸のインダス川からパイプによって水を得るプランが紹介されていた。このような計画が実現するか、淡水化された海水が大量にしかも農業で使用できるようなコストで供給可能になれば、灌漑水の不足に悩むことなく現在の農業を維持していくことは可能かもしれない。

しかし、こうした事業による灌漑水確保のコストはきわめて高い。農産物の安価な生産という面から今後も農業を継続していくことを現実的に考えれば、一つにはもつと身近な水資源である雨水の利用の効率化などによって水資源の確保に関する対策を実行することを考えなくてはならない。他方こうしたことが不可能な地域では、栽培面積を減らし、貴重な水資源を使って最低限自給するものを栽培するという対策がむしろ必要となろう。

アブダビ首長国では、現在も大規模な農耕地の開発が行われている。このような地域では、水資源についてどのような見通しをもって開発が行われているか明らかではない。しかしこれまでに開発されてきた地域の状況を見ると、長期的に良質の灌漑水を得ることは難しいと考えられる。農耕地の開発が、農家が農業をととして国から収入を得るために行われているとすれば、何をどの程度自給するかという点も含めて農業をめぐる国家政策の再考が必要かもしれない。

緑化では、アブダビ首長国のように豊富な資金を背景に、沙漠のなかに井戸を掘って灌漑設備をつくり、大規模な植林を行っている例について述べた。この緑化事業は、ほとんど降雨がない乾燥地でも資金があれば比較的

短期間に新たな緑を造成することが可能であることを示している。

このように沙漠のなかに作り出された植林地を長期的に維持、拡大していくためには、植栽後ある程度樹木が生長した植林地の灌水を中止して無灌漑植林地として維持していくことができれば、それが最良の方法であろう。しかし現地の自然条件を考えれば、ほとんどの地域で無灌漑による植林地の維持は難しいと思われる。したがって前述したように適正灌水量の把握と節水、耐塩性樹種の導入など技術面での改善や管理コストの低減を図っていくことが必要である。そして、植林地の維持・拡大を図っている現在の国家政策が継続されることが必要であろう。

注

- 1) 地域4の山岳地帯にみられるこの型の農場の多くはUAEに隣接するオマーンに位置する。

引用文献

- 日本沙漠開発協会 (1980): アラブ首長国連邦における土壌・水質の調査ならびに土壌改良資材の施用効果に関する研究。「日本沙漠開発協会研究報告」4: 2-60.
- 横田博実・小澤晃一 (1995): 土壌塩類集積とアルファルファの養塩分吸収に及ぼす灌漑水質の影響—アラブ首長国連邦の農耕

- 地土壌について一。「日本土壌肥科学会講演要旨集」41: 107.
- 吉崎真司・村井 宏・横田博実・湖東 朗 (1991): アラブ首長国連邦 (UAE) における砂防植樹事例。「日本緑化工学会誌」16: 54-60.
- ABDULLAH, H. (1987): United Arab Emirates. In, *Arab Agriculture 1987*, Falcon Publishing, 93-100.
- AL-AFIFI, M.A.R. (1993): UAE's agriculture offers business and food security. *Agriculture and Equipment International*, 44: 122-123.
- AL-ASAM, M.S. (1992): Country report for the United Arab Emirates. *Symposium on the Greening of the G.C.C. Countries, Proceedings, II* : 135-166.
- ALLISON, L.E. (1964): Salinity in relation to irrigation. *Advance in Agronomy*, 16: 139-180.
- SURI, R. (1993): *UAE Business World 1993*. Skyline Advertising Co., 15-54.
- TOWN PLANNING DEPARTMENT, AL AIN, UAE (1984): *The master plan and traffic and transportation study for Al Ain and its region*. Working paper No. 2, Agricultural Sector.
- UAE (UNITED ARAB EMIRATES) UNIVERSITY (1993): *The National Atlas of the United Arab Emirates*. United Arab Emirates Univeirsity.
- YOKOTA, H., ABE, M., SHOJI, T., KIRIWA, Y., OZAWA, K., YOSHIZAKI, S. and OISHI, A. (1997): Effect of irrigation water salinity on the growth of trees for revegetation in the United Arab Emirates. *Proceeding of XIII International Plant Nutrition Colloquium*, 415-416.

Agriculture Development and Afforestation in Desert Region – Case Study in the United Arab Emirates –

Hiromi YOKOTA* and Yoshikazu KIRIWA**

The United Arab Emirates (UAE) is located on the southeast of Arabian peninsula, and harsh dry climate is not suitable for agriculture and afforestation. However, agriculture has been encouraged and the cultivated area has considerably expanded. Afforestation has also been carried out since the end of 1960s. Some problems have been caused by the development of agriculture and afforestation, and the most serious problem is the shortage and salinity of groundwater, especially in agriculture. In this paper, present condition of agriculture and afforestation and the problems caused by the development of agriculture and afforestation are described.

The GDP level and per capita income of UAE are higher among GCC countries. Although the contribution of agriculture to GDP is rather small, agriculture has encouraged since 1970s to increase the ratio of self-sufficiency of agricultural products and to maintain the income of farmers.

Major agricultural areas mainly locate near mountains in northeast region, where annual precipitation is higher and salinity of groundwater is lower. Four types of irrigation methods, including basin, fallow, drip and sprinkler irrigation, are used in UAE. Drip irrigation as the most water saving method is widely used most often for vegetable cultivation. The traditional basin and fallow irrigation methods are still used for cultivation of alfalfa and vegetables etc. Farming method is also classified into three types based on water resources. In the two traditional types, surface water is used through open channel or groundwater is used through underground channel (locally called Falaj), and crops such as date palm, citrus or vegetables are cultivated in mountain areas or at the foot of mountains. In these types the size of farm is smaller. In the other type, groundwater is obtained from wells, and the four irrigation methods are used. The latter as the major in UAE has a great contribution to the recent increase of agricultural products, mainly vegetables cultivated with drip irrigation method.

The cultivated area has considerably increased since 1970s. The area in 1990 was more than twice compared to that in 1978. Agricultural production has also increased and contributes to raise the ratio of self-sufficiency in some kinds of vegetables. In UAE, almost all irrigation water is groundwater. The water table in UAE has dropped dramatically with increase of agricultural land because the great number of wells has drilled and water has consumed. Approximately 3,000 wells were dug from 1976 to 1980. Increase of water salinity and seasonal surplus of vegetables such as tomato, cabbage and eggplant in winter are additional disadvantages. Although not adequate, some strategies such as construction of dams in wadi and cultivation of some salt tolerant plant irrigated with sea water have been taken against the above-mentioned problems.

Afforestation has been carried out especially in Abu Dhabi Emirate to protect roads and town areas from strong wind and shifting sand and to increase green area. The afforestation areas in UAE had increased to 200,000 ha by 1993. Local tree species are mainly planted although the species introduced from foreign countries were used at the beginning of the afforestation. Almost all planted areas have been continuously watered with drip irrigation method. The shortage and salinity of irrigation water are not serious problems on afforestation unlike agriculture. However, water resources and the cost of irrigation and so on may become problems in near future in case of that irrigation is continued in all afforestation areas.

Key Words: Afforestation, Agriculture, Groundwater, Salinity, United Arab Emirates

*Faculty of Agriculture, Shizuoka University. 836 Ohya, Shizuoka 422-8529, Japan.

**Graduate School of Agriculture, Shizuoka University. 836 Ohya, Shizuoka 422-8529, Japan.

(Received, July 10, 1997; Accepted, November 27, 1997)

Study on the Land Cover Change in the Loess Plateau of China

Bing ZHANG*, Qingxi TONG*, Lanfen ZHENG*, Jinnian WANG*
and Xiangjun WANG*

The Loess Plateau of China is a fragile ecological area with severe desertification and soil erosion problems. On the other hand, there are rich natural resources in this area, such as coal, natural gas, etc. In the past twenty years, the bad natural condition and increased pressure by social and economic development have had very drastic effects on the local land cover change. For investigating such change, the Landsat data of the study area in two periods (MSS in 1970's and TM in 1990's) have been normalized and geographically corrected to the same spatial cover and the same pixel size. From these remote sensing data, two periods of land cover maps have been produced for the analysis of land cover change. The results can be summarized as follows: (1) Under the efforts of planting trees and grasses, the vegetation cover has increased quickly, especially in the residential areas. (2) On the contrary the sandy land increased in some remote areas far beyond human planting activities.

Key Words: Loess Plateau, Land cover change, Remote sensing

1. Introduction

Desertification, as a global environment issue, is continuously spreading under human economical activities and the influences of natural factors such as loess surface material, dry climate and frequent wind, etc. (ZHU, 1994). With an area of 111,617km², the study area lies between latitude 36° 49' and 40° 56', longitude 106° 58' E and 111° 12' (Fig. 1). The climate of this area is semi-arid with drought, strong wind and concentrated precipitation, etc. Two major geomorphologic units can be distinguished, desert area in the northern part (Kubuqi and Maowusu deserts) and loess hill area in the southern part. The Loess Plateau abounds in coal resources. There are several world famous coal fields in this area, such as Shenfu and Dongsheng coal fields. In addition, the plateau has rich deposits of aluminum, nonferrous metals, oil and gas (ZHANG, 1991). Due to the severe climate and natural conditions, the Loess Plateau is considered as an ecologically fragile zone with a lot of serious environmental problems, especially

the desertification and soil erosion, which affect not only the local environment but also the environment of the eastern part of China and Asia as well. Serious soil erosion has produced a large quantity of silt washed into the Huanghe River, which is still threatening all forms of life on the river's lower reaches. The dust particles blown high in the atmosphere are transported to the East Asia and further to the Pacific region (YANG, 1991).

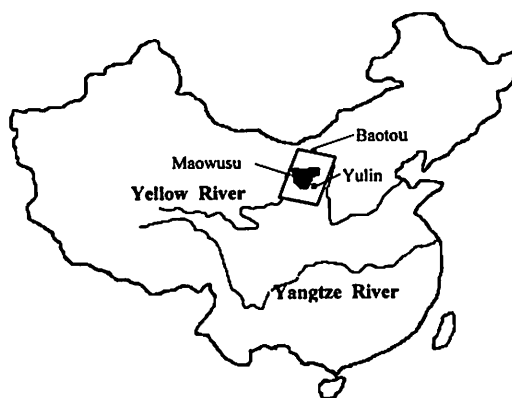


Fig. 1. Location of the Study area.

*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 9718, Beijing, China.

(Received, March 12, 1997; Accepted, November 27, 1997)

This study is an attempt to promote better understanding of the environmental situation and problems in the Loess Plateau, and to investigate the land cover changes quantitatively in the past twenty years in such large area. In the recent ten years, the rapidly increasing social and economic activities, such as tree planting, coal mining and oil exploitation, railway and road expanding, etc., have had very drastic effects on the local environmental conditions and the people's life. This could be very valuable for the regional planning and especially for the sustainable development of the area.

Six scenes of TM data in the same seasons of 1990's (1991, 1992) and nine scenes of MSS data in the same seasons of 1970's (1972, 1973) which covered the study area have been acquired and then been processed and mosaiced separately for two periods. Due to the difference of orbits for Landsat Satellites, the TM mosaic image (6scenes) is not strictly coincident with the area of MSS mosaic image (9scenes), and not with the same pixel size. So, the normalization and geometric correction between them have been carried out to make sure these two sets of composite mosaic of satellite images have the same coverage, the same pixel size, the same spatial location and the same image size (Fig. 2), which are very important for the next step of land cover classification and the quantitative analysis of environmental changes.

2. Land Cover Classification and Dynamic Change Analysis

A land cover type refers to the actual land surface situation in an area. Supervised spectral angle mapper (SAM) classification technique has been used for the land cover classification from two periods of remote sensing data separately. MSS4, MSS5, MSS6 and TM2, TM3, TM4 band data have been separately selected for such classification. Because most types of land cover unit blocks are larger than $80\text{m} \times 80\text{m}$, the different original pixel size between TM data and MSS data should have little influence on this comparative analysis. Considering the accuracy of remote sensing classification, synoptic land cover types are used for detecting land cover change. Table 1 shows the statistics of land cover change obtained from the analysis of remotely sensed data in 1970's and 1990's.

In general, the area covered with thick vegetation (farmland and forest and grassland) has increased about 12.30%, which mostly came from bare soil or sparse vegetation-covered areas. Due to their relatively moist conditions than desert area, some environmental improving measures, such as air seeding, afforestation, soil erosion control, etc., usually result in relatively fast and evident vegetation-cover increment or environmental rehabilitation. The ground

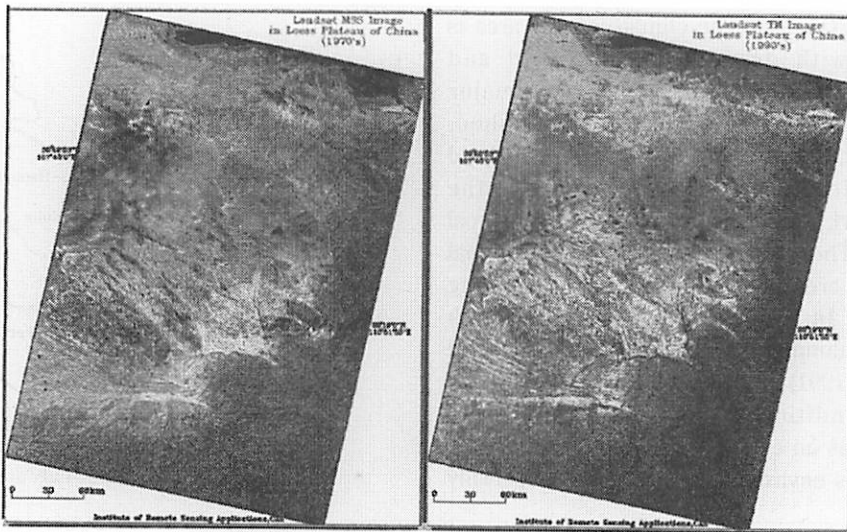


Fig. 2. MSS composite mosaic image in 1970's (left) and TM composite mosaic image in 1990's (right).

Table 1. Land cover change in whole study area.

Land Cover Type	Area (km ²)		Desertified Area (km ²)	Improved Area (km ²)	Percentage (%)
	1970s	1990s			
High Vegetation Cover Area (≥ 30%)	56,386	64,295		7,909	12.30
1) Farmland and Forest	19,580	23,975		4,395	18.33
2) Grassland	36,806	40,320		3,514	8.71
Low Vegetation Cover Area (< 30%)	54,647	47,126		-7,521	-13.76
1) Sandy Land	32,537	34,853	2316		7.12
2) Bare soil	22,110	12,273		-9,837	-44.49
Open Water	583	196		-387	-66.38

Table 2. Relation between the distance from city center and environmental change in Yulin pilot area.

Distance from city center	Vegetation cover increment		Vegetation cover decrement	
	Area (km ²)	Percentage (%)	Area (km ²)	Percentage (%)
< 4.5km	23.46	36.8	1.38	2.16
< 9.0km	64.35	25.27	22.87	8.98
< 13.8km	106.32	18.01	57.83	9.79
Full area	150.81	16.76	88.26	9.81

investigation shows that, in the past twenty years, the great efforts have been taken to prevent large areas of grassland and forest land from unreasonable reclamation and other utilization. Along the highway from Baotou to Yulin, some massive grassland areas have been formed from the bare land during the past ten years. All these facts indicate that the local people have made a great success in improving the regional environment.

In the meantime, the sandy area has also been increased by 2,316km² in the study area. In order to seek for more details about the causes and the distribution of such spatial changes of desertification or desert expansion, two pilot areas were selected. One sample area is Yulin pilot area (Fig. 1), which represents the regions more strongly influenced by human activities. The second pilot area is located in the interior Maowusu desert (Fig. 1), which almost has no remarkable effects of human activities, for it is very far from the local settlement.

In Yulin pilot area (Fig. 3), in the whole 900km² region, 150km² (16.76%) sandy land has been improved to high vegetation covered area during the past twenty years. Such environmental

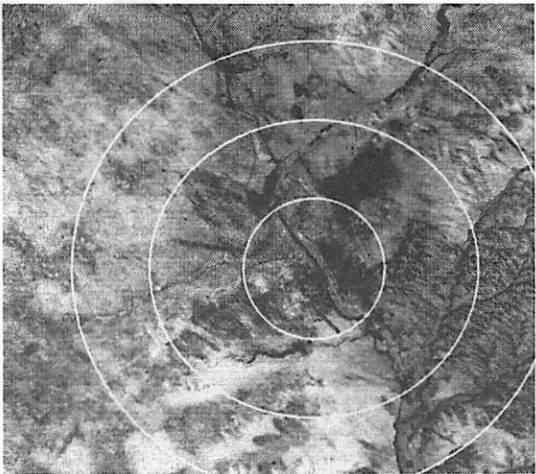


Fig. 3. Landsat image showing ecological circles (radius: 4.5, 9.0 and 13.8km) of Yulin area.

improvement was dramatically related with grass planting and afforestation. For better understanding of the causes of such environmental changes, the Yulin pilot area was divided into four ecological circles by the distance from the city center (Fig. 3). Table 2 shows that the percentage of vegetation-cover increasing area is in inverse proportion to the distance from Yulin city center.

Most areas which now have high vegetation cover degrees were still sandy land twenty years ago.

In the past twenty years, 36.80% of sandy land has been improved to grassland, forest or farmland in the first circle (within a radius of 4.5km from the city center). There is 25.27% of improved land within a radius of 9.0km from the city center, and 18.01% of improved land within 13.8km radius. In the whole Yulin pilot area, 16.76% of bare desert area has been improved to high vegetation cover area. On the other hand, the proportion of environmental degradation increased according to the distance from the city center.

From above statistics, it can be seen that the regional environmental change is mainly determined by the local people's activities and usually is in inverse proportion to the distance from residential place. Such situation shows that the planting of trees and grasses has played a most important role in the environmental rehabilitation of the Loess Plateau area.

On the other hand, in the interior of Maowusu desert (Fig. 4), there is no remarkable human improvement works. Comparing the land cover

classification results of TM data in 1990's and MSS data in 1970's, the expansion of sand dune area is very clear. Under the influence of strong northwesterly wind, some sand dunes have moved to the southeast direction. Although the main bodies of the sand dunes have not shown evident changes, but their areas have enlarged. Some small sand dunes have linked together and formed a large one. In this pilot area, the sandy area has increased by 51.34km², 5.7% of the whole pilot area (Table 3). In some desert areas far from the human intervention, sand dunes have extended to the leeward.

3. Conclusion

From the dynamic analysis of the land cover change by remotely sensed data in the past twenty years, the conclusion can be made as follows: Under the human efforts of planting trees and grasses, the vegetation cover area has much increased (7,909km²), particularly in some urban and suburban areas. This fact shows that the great role has been played by the national and local environment improving plans (*e.g.*, Yulin

Table 3. Land cover change and desertification in Maowusu pilot area.

Land Cover Type	Area (km ²)		Altered Area (km ²)	Percentage (%)
	1970s	1990s		
1. Sandy land	505.57	556.91	51.34	5.70
2. Grassland	386.05	335.87	-50.18	5.57
3. Bareaen land and water bodies	8.38	7.22	-1.16	0.13
Total	900.00	900.00		

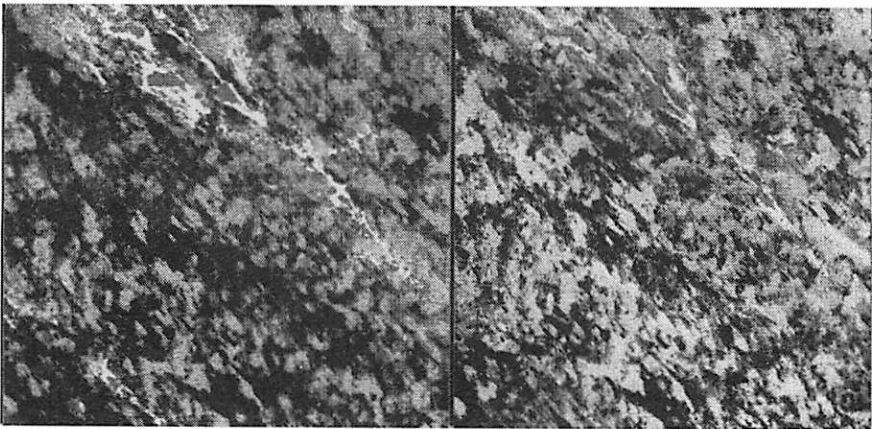


Fig. 4. Maowuwu inland RS image separately acquired in 1970's (left) and 1990's (right).

pilot area). These improved areas include the Three-North Forest Sheltering Belt areas, some areas near the railways, highways or cities, and some bare or sparse vegetation covered land with relatively moist conditions, etc. On the other hand, the area of sandy land increased in the whole study area (2,316km² from Table 1) which is mostly distributed in Kubuqi desert and Maowusu sandy land. Especially in some remote regions far beyond the human intervention, sand dunes have shown evidently expanding trend because of the arid climate, loose surface materials and strong northwesterly wind (Table 3). Therefore, great attention should be paid to the desertification development in the inland of desert of the Loess Plateau area.

Acknowledgements

Great thanks to the local environmental and water and soil protection agencies for their help in the field survey and data supply.

References

- YANG, G.S. ed. (1991): *Comprehensive Control on the Desertification in the Northern Part of Loess Plateau*. Science Press, Beijing, 74pp. (in Chinese)
- ZHANG, T.Z. ed. (1991): *Loess Plateau*. Science Press, Beijing, 98pp. (in Chinese)
- ZHU, Z.D. (1994): Development trend of sandy desertification in interlaced agropastoral region of northern China in recent ten years. *J. Desert*, 14-4:1-2. (in Chinese)

J A A L S

中国黄土高原の土地被覆状態の変化

張 兵*・童 慶喜*・鄭 蘭芬*・王 錦年*・王 相軍*

中国黄土高原は、厳しい砂漠化と土壤侵食により経済的には貧しいが、石炭・天然ガスなど豊富な天然資源に恵まれている。この20年、自然条件の悪化に加え、社会的・経済的な発展により土地被覆が著しく変化してきた。この変化を調べるために、人工衛星ランドサット画像の解析を行なった。用いた画像は1970年のMSSおよび1990年に得られたTM画像で、画像間の整合性を図り土地被覆図を作成し、解析した。その結果は次のようにまとめられる。(1) 居住地域においては、植樹等の努力により、植生が著しく増加した。(2) 一方、居住地域から遠い地域では植樹作業が行なわれず、砂地面積が増大した。

J A A L S

蒸発排水法における蒸発促進材の性状と形態の相異が 蒸発量に及ぼす影響

小 川 哲 夫*・安 部 征 雄**

1. はじめに

土壌内の塩類集積および過剰灌漑の結果に伴う排水の問題は、乾燥地域の農業におけるもっとも重要な課題であり、抜本的かつ早急な解決が求められている。例えば、森林伐採に基づく蒸散量の減少が地域の水収支バランスを崩し、地下水位を上昇させ、塩害を進行させたり、灌漑後の高塩濃度となった排水を低地に貯留させたり、河川へ排出させたりすることによる弊害の発生などが事例としてあげられる(三浦, 1991; 安部ほか, 1994)。本研究はこのような乾燥環境下での過剰水分の処理問題に対する対処方法として、乾燥地の強力な蒸発力を積極的に利用することにより排水を大気に蒸発させて処理する方法を提案、検討することにし、この方法を蒸発排水法と名付けた。

蒸発排水法は、多孔質材質の蒸発促進材(安部ほか, 1992; 井伊ほか, 1993; Li *et al.*, 1995; Abe *et al.*, 1995)を使用し、毛管力によって水分を吸い上げ、蒸発促進材中の水分上昇高に起因する蒸発表面積の拡大により、蒸発量を促進させようとする考えに基づく方法である。つまり、材料の毛管力と乾燥地のもつ強い蒸発潜在能力といった自然力を積極的に利用することにより、排水を無動力により実現し、過剰水分の処理をおこなうというものである。最終的には、土壌内からの過剰水分の除去を目的としているが、まず蒸発排水法の概念そのものが成り立ち得るか否かの検討をおこなうため、貯留した排水の自由水面からの水分の大気への除去を想定し、その有効性の検討からはじめることとした。

従って、本報では蒸発の促進という観点から主に蒸発促進材の蒸発性能について実験をおこない、自由水面上で蒸発促進材を実際に蒸発を生じさせたときの蒸発促進材の材質や配置方法、および形状が蒸発能力に与える影響について検討をおこなった。

2. 実験方法

1) 蒸発促進材

本研究で使用した蒸発促進材の材質は、医薬用ガーゼ(東邦商會: 30cm × 1,000cm, 日本薬局方ガーゼタイプ I)を用いた。ガーゼは約0.02mmの径の単糸により1cm²につき間経6.8本、緯5.6本に織られたもので、これを数枚重ねて縫い合わせて構成材を作成した。構成材はガーゼの重ね枚数を変えることで性状を変化させた。各構成材の性状を表1に示した。構成材はガーゼの重ね枚数が多いほうが乾燥密度が大きくなり、構成材内部の間隙がより小さくなることが推察され、これによる毛管力の増大が水分上昇高の増大に寄与するものと期待した。そして各構成材を各実験に応じて大きさや形状を変えて成形したものを蒸発促進材として各種作成、用意した。また、各蒸発促進材は十分に純水に浸した後、各測定装置に設置して測定を開始した。

2) 実験装置

図1は蒸発促進材からの蒸発量を測定する装置で、恒温恒湿槽内に純水で満たした蒸発ポットを設置し、マリOTT管により水位を一定に保ちつつ蒸発量に応じて水を供給し続けられるようになっている。マリOTT管は電子天秤上に置き、質量の経時変化を測定し、マリOTT管の目盛りの読みとり値と合わせて蒸発ポットからの蒸発量を算出した。蒸発ポットの水面の表面積は

表1. 蒸発促進材の構成材の性状.

構成材の種類	G2	G4	G8	G12
ガーゼの重ね枚数	2	4	8	12
厚さ (cm)	0.11	0.23	0.34	0.44
乾燥密度 (g/cm ³)	0.061	0.060	0.079	0.092

*筑波大学大学院農学研究科

**筑波大学農林工学系

227cm²であり、この面積を基準に蒸発量の計算をおこなった。

蒸発環境条件は、恒温恒湿槽内の蒸発能力を乾燥地に相当させるものとして乾燥地域の年間可能蒸発量3,000mm/year以上の地域を想定したものとなるように温度、相対湿度、風量を調整した。そして、温度40℃、相対湿度50%、風速3m/secの設定に固定したときの蒸発ポットからの自由水面蒸発量10.0mm/dayを本実験の環境条件として設定しておこなうこととした。

また、水面付近の風速と風向を測定すると風流は場所によって風速1～2m/secの範囲で循環しており、水面からの高さ10cm、幅10cmの平板型の蒸発促進材を設置したときの水面からの高さ5cm付近の主流の風向・風速分布は図2のようになった。蒸発促進材を主流方向に対して0°に設置した場合の風流は蒸発促進材に対し並行流に近く、また主流に対して90°に設置した場合の風流は主に垂直に蒸発促進材の左側面にあたり、蒸発促進材の右側面での風流が弱くなる傾向が確認できた。

3) 蒸発実験

蒸発速度を左右する因子は、気温、熱の供給、空気湿度、空気の循環、蒸発表面積などが考えられる。そこで乾燥環境下で本法を用いる場合、まず技術的に改良しやすい課題として、蒸発表面積の効率的な拡大方法を中心に蒸発量に及ぼす影響について次に示す実験をおこない検討した。

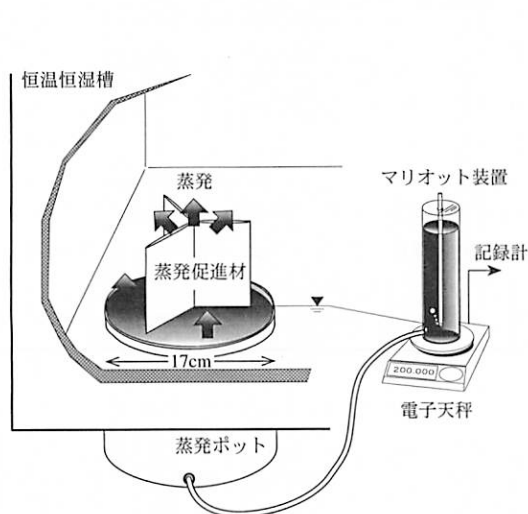


図1. 実験装置。

(1) 高さごとの水分量と蒸発速度

構成材G2、G4、G8、G12を高さ22cm、幅5cmに加工した蒸発促進材を作成し、蒸発ポットに下部2cmが浸るように設置した。そして、定常蒸発になったところで、蒸発促進材を高さごとに切り分けサンプリングをおこない、高さごとの含水比を測定した。また、一方で蒸発促進材に部分的に図3のようにビニールで被覆をほどこし被覆部からの蒸発を遮断し、任意の高さ部分の蒸発速度を測定できるようにした。そして、高さごとの含水比と蒸発速度との関係について検討をおこなった。

(2) 平板型蒸発促進材による蒸発促進

構成材G4を12cm×10cmに加工した平板型の蒸発促進材を使用し、水中に2cmが浸るように蒸発ポット中央に設置したものを蒸発促進材S1とし、蒸発量を測定した。このときの有効蒸発面積は蒸発促進材S1の200cm²（高さ10cm×幅10cm×2面×4個）と水面の227cm²の合計の427cm²とした。

また、蒸発促進材S1を4個使用し、蒸発ポットに平行に並べて設置し、蒸発面積を拡大させた。このときの各蒸発促進材の配置間隔を1cm、2cm、3cm、4cmと異なった4種類を用意し、それぞれS4-1、S4-2、S4-3、S4-4と表わした。さらに、各蒸発促進材の設置向きを恒温恒湿槽内の主流方向に対して0°とした場合と90°とした場合の2通りの角度で設置し、それぞれの場合の恒温恒湿槽内の風の影響についても検討をおこなった。

(3) 形状の違いによる蒸発量の変化

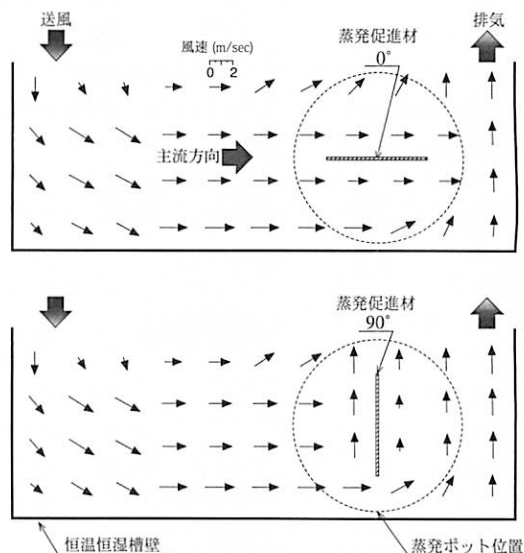


図2. 恒温恒湿槽内の風向・風速分布。

構成材G4を高さ12cm、幅7cmに加工したものを放射状に配置し、図4に示すような羽根型の形状の蒸発促進材（F1、F2、F3、F4、F8）を作成した。また、別に構成材G4を使用して円筒型、同心円型、屏風型の3種類の形状の蒸発促進材も作成した。作成した蒸発促進材はいずれも水面からの高さは10cmであり、水中に2cm浸るように各々設置した。

3. 実験結果および考察

1) 蒸発促進材の蒸発特性

蒸発促進材からの蒸発がもっとも効率的におこなわれる条件の一つとして、水面からの蒸発と同じく、常に蒸発促進材表面に自由水分が存在し、それが蒸発し続ける条件下に蒸発促進材が置かれることが挙げられる。特に蒸発促進材は毛管力によって水分を引き上げるため、蒸発促進材中の水分分布は高さ方向で変化し、1つの蒸発促進材においても高さ方向で蒸発条件が異なると考えられる。これは蒸発促進材の高さ方向の含水比変化と蒸発速度変化との関係として表わせられ、さらにこの関係は、十分に湿潤した材料が一定の温度、湿度および風速中で

徐々に蒸発乾燥していく過程にみられる含水比と乾燥速度との関係を表わす乾燥特性に照らし合わせることができ、乾燥は、①材料が予熱され含水比が徐々に減少する期間（材料予熱期間）、②材料含水比が直線的に減少し、材料温度が一定の期間（恒率乾燥期間）、③含水比の減少割合が緩やかになり、平衡に達するまでの期間（減率乾燥期間）の3期間に分類され、自由水面からの蒸発は②の期間に相当する（藤田・東畑, 1963）。そこで本報では、この恒率乾燥期間にあたる含水比の範囲内にあるとき蒸発促進材がもっとも効率的に作用すると考え、蒸発促進材を高さ方向に分割した際の各高さごとの蒸発速度が恒率蒸発速度にある高さを蒸発有効高さとして定義した。図5に構成材の蒸発性能を確認するために、本蒸発環境下における乾燥特性曲線を示した。この乾燥特性曲線は構成材の含水比が約100%以上において恒率乾燥がおこることを示していた。しかしその後、構成材の含水比が約100%～50%の範囲で乾燥速度が減少し始め、有効自由水分表面が存在しなくなる限界含水比に達し、減率乾燥期に移ることが示されていた。故に、蒸発促進材を使用するにあたっては、恒率乾燥速度を維持できる状態にある限界含水比以上の水分を蒸発促進材に供給するために、蒸発有効高さについて検討する必要があると結論づけられる。

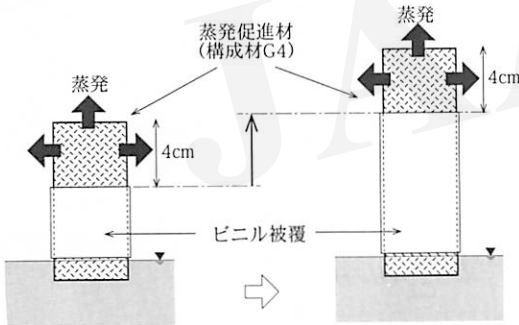


図3. 高さごとの蒸発速度測定。

2) 高さごとの水分量と蒸発速度

実験開始前に一度純水に浸し、全体が飽和状態に近い状態で設置された各蒸発促進材は、時間がたつにつれ重力と蒸発によって脱水され、図6に示す水分分布で定常となり、恒率的な蒸発状態になる。各蒸発促進材の高さごとの含水比を比較すると、ガーゼの重ね合わせ枚数が多いほうが水分上昇高が高く、各高さでの含水比も高くなっていることが示された。蒸発促進材はより高位置まで水分が上昇するほど蒸発表面積が拡大し、蒸発の促進

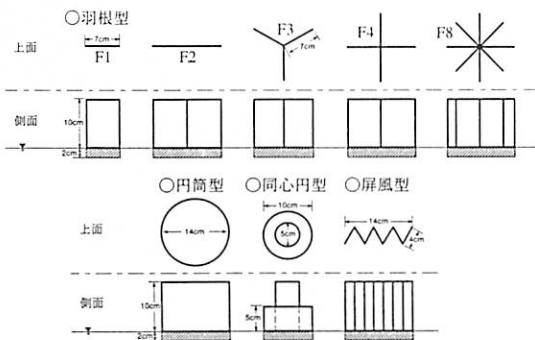


図4. 蒸発促進材の形状。

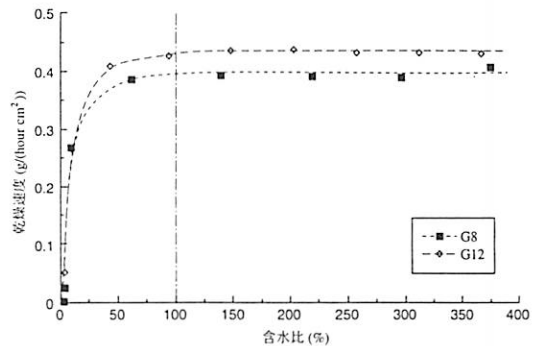


図5. 構成材の乾燥特性曲線。

に有利であるため、より高位置まで蒸発能力に見合う水分量を供給し続けることが重要である。本実験では、G2においては水面からの高さ10cm以上、G4は17cm以上の部分で含水比0%を示しており、これらの高さ以上に水分供給がなされず、これらの部分において蒸発促進材が機能していないことが示唆された。しかし、G8、G12においては双方とも水面からの高さ20cm以上まで含水比100%以上の水分が供給されており、図5の乾燥特性から判断すると、双方の蒸発促進材が必要とする水分量は本実験環境下には十分に供給されているものと判断された。これらは、表1に示したように構成材の乾燥密度の増加が構成材内部の間隙孔の縮小を導き、毛管上昇高を増大させるとともにガーゼ重ね枚数の増加による間隙孔数の増加が構成材の保水性を高め、含水比を増加させたものといえる。

一方、図7にG4の各高さ部分の含水比と蒸発速度の関係を示した。含水比が蒸発促進材の高位置ほど減少するのに対して、蒸発速度は高さ14cmの部分までは、ほぼ一定速度を示していることが認められた。しかし、それ以上高位置になると急激に蒸発速度が低下し、蒸発能力に対して水分の供給が充分におこなわれていないことが示されている。このときの一定蒸発速度から減速する領域は含水比でみると100%から50%の範囲に存在し、これは蒸発促進材の乾燥特性の恒率乾燥から減率乾燥へと変わる領域である限界含水比と一致することが認められた。このように、本蒸発促進材の場合、例えばG4においては、高さ14cmの場合がこの環境下においてもっとも効率的な働きをおこなうものと推察でき、この場合の蒸発有効高さは14cmということが出来る。つまり、蒸発促進材の蒸発有効高さは、蒸発促進材の乾燥特性と蒸発促進材の高さ方向の水分分布によって決定されるものと考えられた。

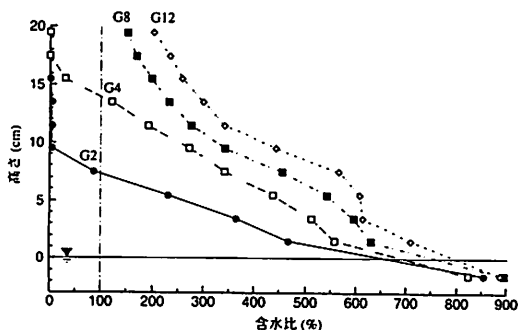


図6. 蒸発促進材の含水比分布。

3) 平板型蒸発促進材による蒸発促進

平板型の蒸発促進材S1を蒸発ポットに設置したときの蒸発量は、蒸発促進材の設置向きを恒温恒湿槽内の主流方向に対して0°とした場合で17.4mm/day、90°とした場合で20.8mm/dayであった。蒸発促進材の蒸発速度は、風と蒸発促進材との温度差または湿度差を推進力として次式で表わされる（桐柴, 1966）。

$$R_c = \left(\frac{W}{A} \right) \left(\frac{-dW}{d\theta} \right) = \frac{h_c (t - t_w)}{r_w} = k (H_w - H)$$

R_c = 蒸発速度 (kg/hr m²)

W = 無水蒸発促進材質量 (kg)

A = 蒸発促進材の蒸発表面積 (m²)

k = 物質移動係数 (kg/(m²hour °C))

h_c = 境膜伝熱係数 (kcal/(hr m² °C))

t = 空気温度 (°C)

H = 空気中の絶対湿度 (kg/kg)

t_w = 湿球温度 (°C)

$r_w = t_w$ での蒸発潜熱 (kcal/kg)

$H_w = t_w$ での絶対湿度 (kg/kg)

また境膜伝熱係数 h_c と物質移動係数 k との間には次式のLewisの法則が成立する。

$$\frac{h_c}{k} = C_H$$

C_H = 空気の湿り比熱 (kcal/°C kg)

そして伝熱係数 h の値については、並行流下による係数 (SHEPHERD *et al.*, 1938) を用い、さらに風速から空気の質量速度を求めれば次式から蒸発速度が計算できる。

$$R_c = \frac{h_c}{C_H} (H_w - H)$$

$$h_c = 0.0176 G^{0.5}, 2,500 < G < 15,000$$

G = 空気の質量速度 (kg/hr m²)

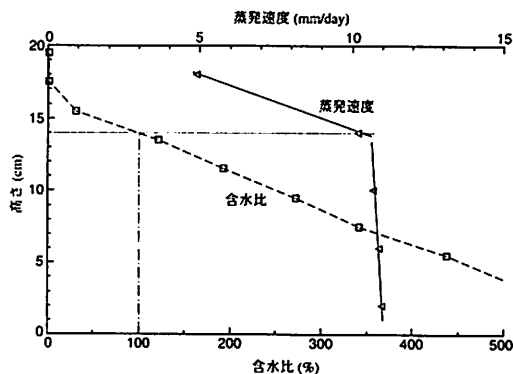


図7. G4の高さごとの蒸発速度と含水比。

ここで蒸発促進材S1を用いたときの平均蒸発量19.1mm/dayから、水面からの蒸発量10.0mm/dayを引いた値の9.1mm/dayを蒸発促進材S1からの蒸発速度と考えた場合、蒸発促進材にあたる風流を並行流とみなして前式から風速を求めると2.4m/secとなった。また、水面蒸発量10.0mm/dayに対する風速は2.3m/secとなることから、水面と蒸発促進材の高さ方向にあたる風流に大きな差はみられない。

図8に蒸発促進材の配置間隔と蒸発量の関係を示した。配置間隔を広げることにより蒸発量が顕著に上昇していることが示されており、一定環境下の槽内の中でも微妙な配置間隔の違いが蒸発量に与える影響は非常に大きいことが認められた。また、蒸発促進材の設置方向による影響についても、0°のほうが並行流に近いいためか間隔の拡がりに従って徐々に蒸発量が増加している傾向がみられる。

また蒸発促進材S1の蒸発量から4個設置時の蒸発促進材S4の最高は45mm/dayほどであると推測される。この最高値には図8から間隔3cm～4cmの間で達することがわかる。

ここで蒸発促進材S1のような平板型の蒸発促進材を本実験条件に準ずる層流下に置いたとしたときの蒸発促進材の蒸発について、蒸発促進材表面からの距離に対する絶対湿度の変化を表わすと図9のようになる(HENDERSON *et al.*, 1976)。この図から風速1.0m/sec以上の環境においては、平板型の蒸発促進材の場合、両者の間隔が3cm以上あれば充分であることが推察された。

4) 形状の違いによる蒸発量の変化

測定した蒸発量と各形状の蒸発表面積との関係を図10に示した。羽根型の蒸発促進材のF1とF2を比較すれば、蒸発量は蒸発促進材の蒸発表面積の拡大に伴って増加していた。しかし、F3、F4、F5と蒸発表面積が拡大

した場合、蒸発表面積に対する蒸発量の増加量は蒸発表面積が拡大するにしたがって減少しており、蒸発表面積当たりの蒸発量が減少していることが認められた。また、形状を変えたものと蒸発量を比較した場合、F4と屏風型のように同じ蒸発表面積であっても蒸発量が異なり、屏風型のほうが同一面積のF4に比べ蒸発量は大きかった。このことから、羽根型のように単に放射状に配置して蒸発面積を拡大させる方法は決して効果的ではなく、形状が蒸発量を大きく左右することが認められた。これは主に蒸発促進材の蒸発面にあたる風流の影響力の違いであると考えられる。例えば、風流が蒸発面に対して並行流のときは、垂直流に比べ風向面に対しては蒸発強度は小さくなる(藤田・東畑, 1963)。しかし、一方垂直流では、風流に方向に対する蒸発促進材の裏面での蒸発強度が極端に低下することが考えられる。つまり、風流に対しての蒸発面の抵抗力と風流の流れやすさの両方のバランスが重要であると考えられる。

ここで3)節で求めた水面を基準とする、風速2.3m/secの並行流下の条件下で任意の表面積をもつ平板型の蒸発促進材を蒸発させた場合の蒸発量を求めると、図10中の実線のようにになる。本実験では形状が複雑であるため、風流は蒸発促進材の部所によってかなりの相違があることが考えられる。したがって、必ずしも並行流の条件と比較することが適当であるとはいえないが、図から羽根型の増加率とほぼ一致していることがわかる。そして水面の風速を基準にとることで、実線付近の蒸発量であれば、拡大した表面積に対して確実に蒸発面積を拡大させて蒸発を促進させているということが示されている。実験からは、適当な凹凸がある屏風型や同心円型では実線を大きく上まわり、蒸発効率がよいことが示された。また3)節の実験の場合との比較では、S4-1～S4-4の配置間隔では、やはり3cm～4cmの間に適当間隔があることが推察できる。

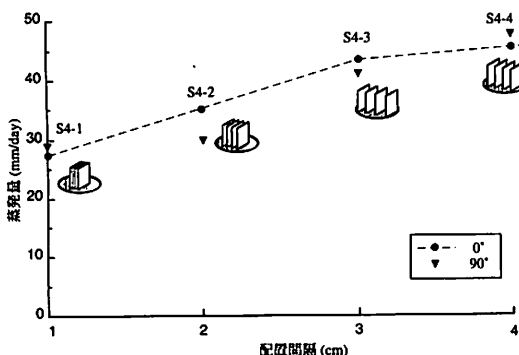


図8. 配置間隔の違いによる蒸発量の変化。

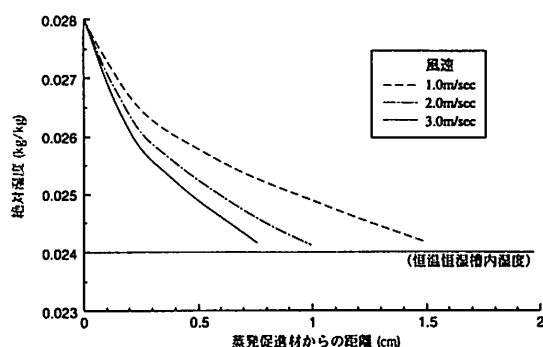


図9. 蒸発促進材からの距離による絶対湿度の変化。

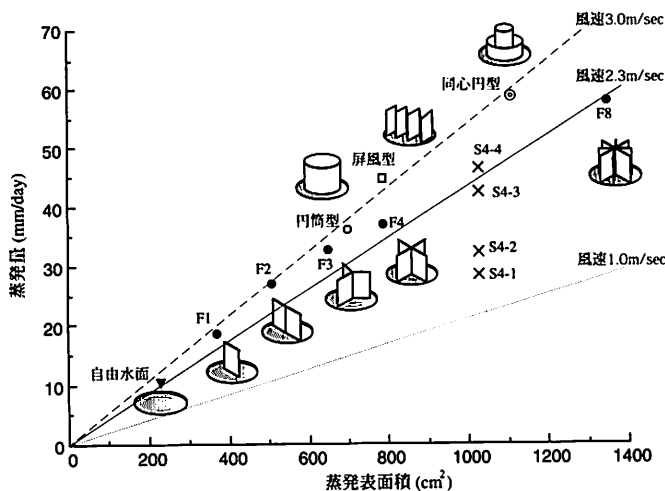


図10. 形状の違いによる蒸発量の変化.

また、本実験で用いた高さ程度の蒸発促進材ならば水面の風速がわかれば蒸発量を蒸発表面積から推定できることになり、自然環境下のような不規則な条件下において蒸発促進材を用いる場合でも蒸発量の推定は容易であると思われる。

4. ま と め

乾燥地における過剰水分の処理方法の一つとして、蒸発促進材を用いた排水処理について検討した。蒸発促進材は多孔質系の材質の毛管力を使って水分を上昇させ蒸発表面積を主に上方に拡大させ蒸発量を促進させることが可能であることが認められた。しかし、材質の性状と外気の蒸発能力によって蒸発有効高さは変化し、配置間隔や形状が大きく風流を変え、蒸発量を左右することから、実際の利用にあたっては、実施対象地の調査によって適合する材質、形状等の選択、作成が必要であると考えられる。また、同時におこなう塩類の処理に関しても蒸発促進材中に集積する塩類の蒸発量への影響や処分方法など検討する課題は多いと考えられる。しかし、蒸発に必要な熱エネルギーに関しては、乾燥地の強い日射が利用でき、簡易な装置で排水と塩処理が同時におこなえるという既存の技術にはない有利な点も多くある。今後は、日射や土壌、塩類の影響等について検討を進め、さらに現場における必要な能力との兼ね合い等を考慮することで、本法が効果を発揮する適用地のモデル作成を目標とした実用的な蒸発排水システムの構築を目指す。

なお、本研究の実施にあたっては筑波大学生物資源学類に在籍中であった山田菜緒子氏、志村幸子氏の御協力

を得た。記して深謝の意を表したい。また、本研究は文部省科学研究費助成金（基盤研究（A））の補助を受けた研究の一部であることを付記する。

引用文献

- 安部征雄・山口智治・横田誠司・大塚義之・井伊博行 (1992): 土壌表層に集積する塩類の捕集法. 「沙漠研究」 2: 19-27
- 安部征雄・小島紀徳・遠山柁雄樹 (1994): 「沙漠物語」 森北出版.
- 藤田重文・東畑平一郎編 (1963): 「化学工学3」 東京化学同人.
- 井伊博行・大塚義之・小川哲夫・安部征雄・山口智治 (1993): ペーパーロールを用いた土壌の塩類捕集法に関する実験的研究. 「沙漠研究」 3: 1-7
- 桐栄良三編 (1966): 「乾燥装置」 日刊工業新聞社.
- 三浦憲蔵 (1991): 東北タイにおける森林破壊による土壌の塩類化と植林による防止対策. 「土壌の物理性」 63: 51-59.
- ABE, Y., TSURUI, J., YAMAGUCHI, T., OHTSUKA, Y. and Ii, H. (1995): Evaporation effect of a salt capturing stick and its influence on movement of solution and solute in Soil. *J. Arid Land Studies*, 5: 43-54.
- HENDERSON, S.M. and PERRY, R.L. (1976): *Agricultural Process Engineering*, 3d ed. Avi Pub. Co.
- Ii, H., OHTSUKA, Y., OGAWA, T., ABE, Y. and YAMAGUCHI, T. (1995): Tracing the movement during evaporation of salt water through a sand layer and solid paper core using three different anions as Tracers. *J. Arid Land Studies*, 5: 33-42.
- SHEPHERD, C.B., HADLOCK, C. and BREWER, R.C. (1938): Drying materials in trays evaporation of surface moisture. *Ind. Eng. Chem.*, 30: 388-397.

Effects of Amount of Evaporation for Varied Properties and Forms of Evaporation Accelerators on the Evaporation Drainage Method

Tetsuo OGAWA* and Yukuo ABE**

An elevation in the groundwater table in arid regions resulting in waterlogging and salt damaged soil is known to be caused by both poor drainage conditions and the ponding of waste water. Although keeping shallow groundwater to a minimum and reducing drainage water are necessary precautions to be taken, these are not always feasible because of either technological or economic factors or unsuitable geographic conditions. Here we propose the usage of the "Evaporation Drainage Method" which effectively utilizes strong evaporation forces prevalent in arid regions.

Evaporation accelerators are the main tool involved in this method. These accelerators evaporate excess water by radiating it into the atmosphere. In addition, salt also accumulates naturally on the accelerator enabling evaporation and salt capture to occur simultaneously.

This report examines both the idea and the effectiveness of the accelerator method particularly in terms of its evaporative capacity of free-surface water. The accelerator, constructed of 2-12 sheets of porous and absorbent gauze, functions by taking up water by capillary force. As layers of gauze were increased from 2 to 12, rates of absorbency and capillary rise increased. Contained water values changed at each height layer of the accelerator. Speed of evaporation is a function of the amount of contained water in the accelerator.

Accelerators were inserted into a pot filled with pure water and placed in an enclosed chamber equipped with an air conditioner set to simulate an evaporation rates of 10.0mm/day. Evaporation within the chamber increased by increasing the number of accelerators and thereby increasing the total amount of evaporation surface area. However accelerators need to be appropriately set to work efficiently. Adequate evaporation space must be allowed. Evaporation rates also depend in part on the form of the accelerator as air flow around the accelerator varied with shape.

Key Words: Evaporation drainage, Excess water, Evaporative force, Evaporation Accelerator

*Doctoral Program in Agricultural Sciences, University of Tsukuba. 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan.

**Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba. 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan.

(Received, July 28, 1997; Accepted, November 27, 1998)

ジブチ共和国における水面蒸発量の推定と緑化への利用について

高橋 悟*・渡邊文雄*・ISMAEL, Tabarek M.**・高橋久光***・福永健司****

1. ま え が き

熱帯乾燥地であるジブチ共和国の食料生産にとって作物生育のための灌漑は、不可欠なものである。一般に、灌漑用水量の決定のためには蒸発散量が必要となるが、この値の推定が困難であることから、水面蒸発量との比である蒸発散比法（フランス共和国国際協力省, 1989, p. 64）を用いて蒸発散量を求めることが多い。この場合、水面蒸発量の推定が必要になる。

水面蒸発量を推定する方法としては、気象因子から推定する方法が一般的で、Penman法や空気力学的方法などの各種方法が提案されており、それらは気象観測データを多数必要とする（中山, 1992）。

総じて、アフリカ地域の気象観測資料の特徴として、海外からの援助実施期間に得られたものが大部分で、古くから存在するわりには連続性がないことが挙げられる。さらに、気温、湿度、降雨量などのような基本的気象要素が主体であり、水面蒸発量推定式の適用に必要な風速、日射量、純放射量などのデータが欠けているのが現状である。ジブチ共和国における気象因子による水面蒸発量推定もこの例外ではない。

そこで、本研究ではこのような現状を踏まえ、同国において現在資料として存在し、これからも無理なく簡単に各地で測定できる気温や湿度のような基本気象因子からの水面蒸発量推定の可能性を検討した。

まず、古くから存在する同国の各種気象因子を基にして、熱帯乾燥地における水面蒸発量に大きく影響を与え

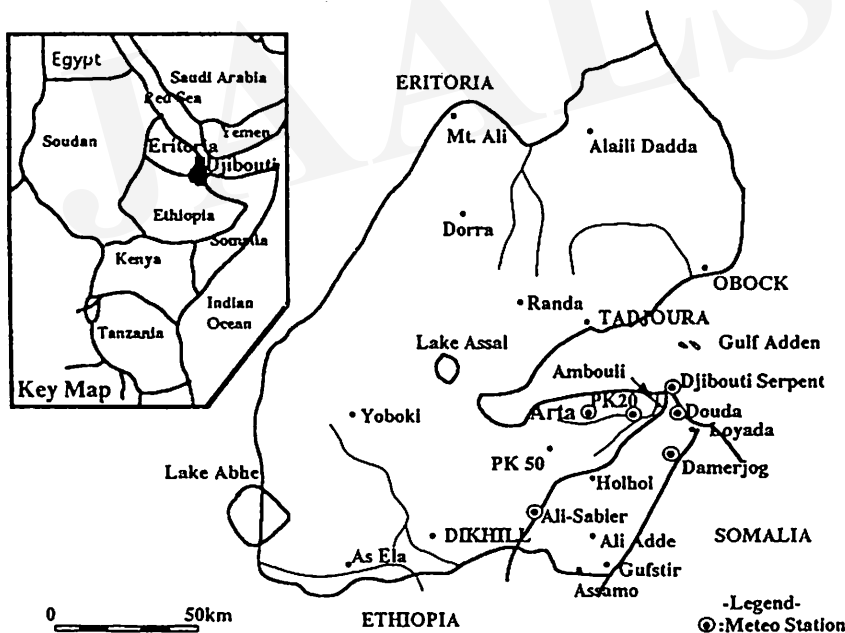


図1. ジブチ共和国内の主要な都市と気象台の位置図。

* 東京農業大学農学部農業工学科

** ジブチ共和国農業省

*** 東京農業大学農学部国際農業開発学科

**** 東京農業大学農学部林学科

る気象因子を探ると共に、これを踏まえた水面蒸発量の推定法を検討することとした。さらに、蒸発散比法による蒸発散量を推定し、降雨量との関係からこの国における雨水利用農業におけるウォーターハーベスティングの集水域の面積と耕作域との面積比、いわゆる CCR (Catchment/Cropped Area Ratio) を検討した。

2. 気象資料収集地点および解析方法

1) 気象資料収集地点

本研究の対象となるジブチ共和国は、紅海に面し、ソマリア、エチオピア、エリトリアの3国と国境を接する面積約23,000km²、人口約51万の小国である。気候は熱帯乾燥気候に区分され、5月から10月までの平均気温が35℃、11月から翌年4月までの平均気温は25℃で、年平均降雨量は155mmである。

今回用いた水面蒸発量に影響を与える気象因子の気温、湿度、日射量、風速等の気象資料収集地は、首都のジブチ市内から西方20km、標高30mの丘陵地に位置するPK20である。また、気温や湿度のような基本気象因子による水面蒸発量の推定法の検討のための気象資料収集地は、前述のPK20を含む、Djibouti Serpent, Douda, Arta, Ali-Sabieh, Damerjogの合計6地点である。それぞれの気象資料収集地の位置を図1に示す。

また、水面蒸発量の推定を基にした蒸発散量および雨水利用農業におけるウォーターハーベスティングのCCRについての検討は、ジブチの標高による気候区分の代表的地点と考えられるDjibouti Serpent, Artaの両地点について行なった。

2) 調査解析方法

調査解析方法として、水面蒸発量に影響を与える気象因子解析はPK20地点における1990年の365日間の日平均気温・日平均湿度・全日射量・日平均風速、A型蒸発計（直径120cm、深さ25cmの円筒容器に水深20cmまで水を貯めたもの：以下Aパンと記す）による水面蒸発量およびピュシュ式蒸発計蒸発量（フランス共和国国際協力省、1989, p. 20）を使用した。これを基にして、Aパンによる水面蒸発量（以下、水面蒸発量と呼ぶ場合はこれに相当）と各種気象因子との関係を比較検討した。なお、日射量は日照時間よりオングストレーム式（吉野、1978）を用いて換算した。

一方、水面蒸発量の推定およびその水面蒸発量を基にした蒸発散量、雨水利用農業の検討はジブチ共和国各地における1900～1990年の月別水文気象資料（各地点で観測年、月は異なる。）、Djibouti Serpentにおける1991～1995年、Doudaの1995年12月～1996年8月の月別水文気象資料（RDMADR, 1992）より、それぞれの該地点の月平均気温、月平均湿度、ピュシュ式蒸発計の月平均蒸発量を取り出し比較した。また、蒸発散量を蒸発散比法より求め、月平均降雨量と比較してウォーターハーベスティングのCCRを検討した。

3. 結果および考察

1) 水面蒸発量に影響を与える気象因子

水面蒸発量は一般に気温・湿度・日射・風などによって影響されると言われている（HUGUES, 1990, p. 228）ことから、まずジブチ国内で水面蒸発量とこれらの気象要

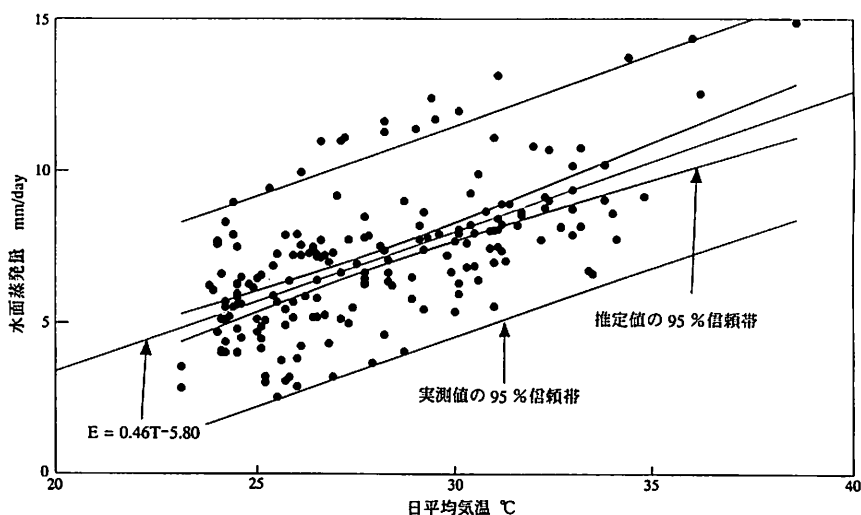


図2. 気温と水面蒸発量との関係。

素が同時に観測されているPK20地点のAパンによる水面蒸発量と日平均気温、日平均湿度との関係を求めたのが、それぞれ図2、3である。

図2および図3より、水面蒸発量と日平均気温、水面蒸発量と日平均湿度との間に特に高い相関関係が認められ、それぞれ両者の関係は、次式 (1)、(2) のように表わされる。

$E = 0.46T - 5.80 \quad (r = 0.85) \quad (1)$

$E = -0.15H + 17.88 \quad (r = 0.71) \quad (2)$

E : 水面蒸発量 (mm/day)

T : 気温 (℃)

H : 湿度 (%)

水面蒸発量に対する日平均気温と日平均湿度との間に高い相関関係が認められた理由は、同国が水面蒸発量に影響する気象要素の中でも、気温、湿度が卓越した値を

示す熱帯乾燥気候区に属し、年中高温で乾燥した気象条件であるためと推察される。また、水面蒸発量に対する他の代表的な気象因子である風速、日射量との関係をそれぞれ図4、図5に示す。両図から明らかなように、水面蒸発量との関係は、ばらつきが多く、明確な関係が認められない。したがって、ジブチ共和国の水面蒸発量は日射量、風速よりも気温、湿度が大きく関係していると言えよう。

2) 水面蒸発量と他の蒸発量との関係

ジブチ共和国をはじめとするフランスとの関係の深いアフリカの国々では、気象要素としての蒸発量としては、Aパンによる水面蒸発量よりもピュシュ式蒸発計による蒸発量が多く観測されている。蒸発散比法における水面蒸発量はAパンによる水面蒸発量であることから、ピュ

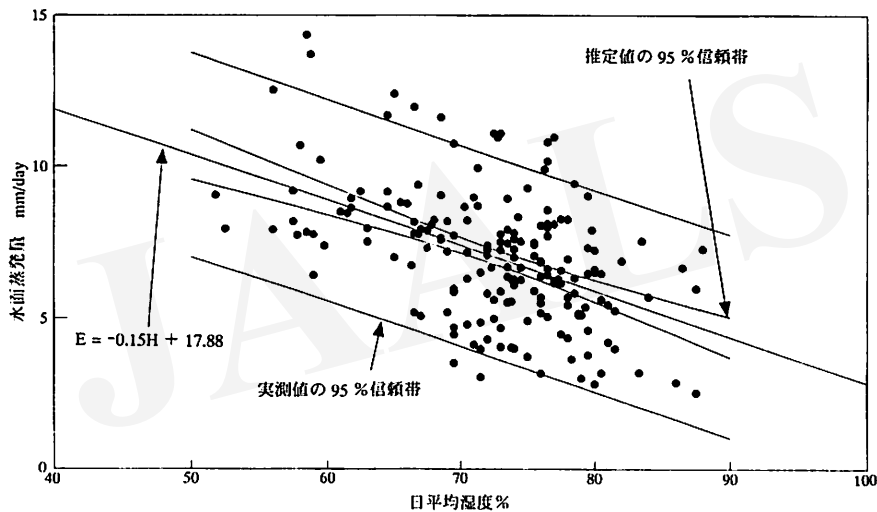


図3. 湿度と水面蒸発量との関係.

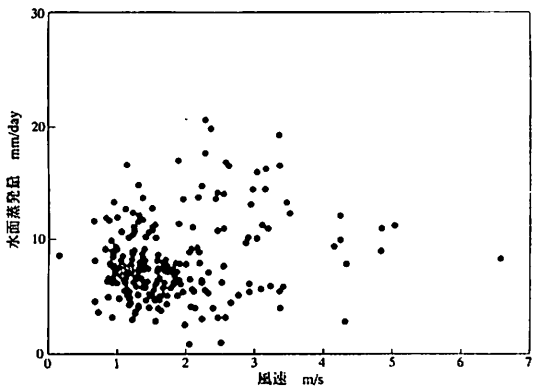


図4. 風速と水面蒸発量との関係.

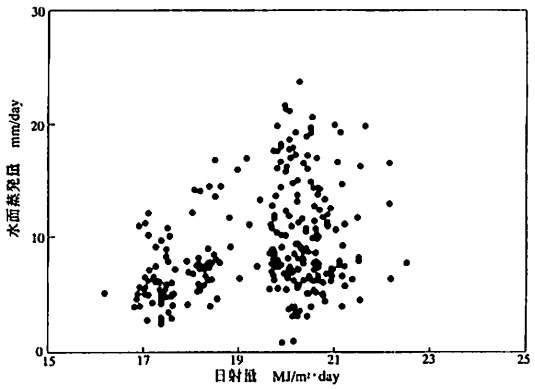


図5. 日射量と水面蒸発量との関係.

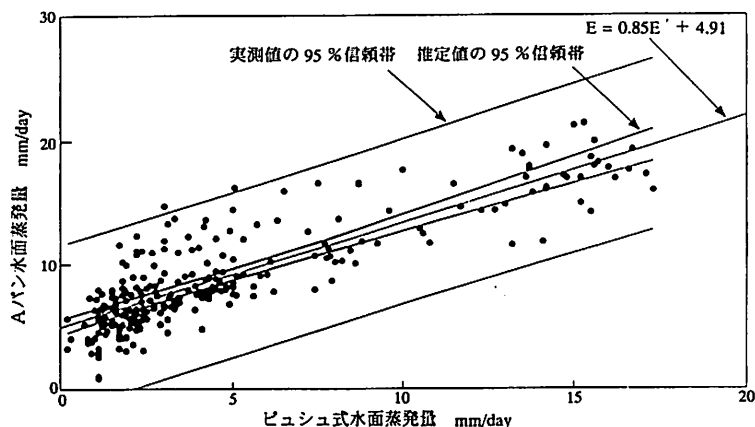


図6. ピュシュ式水面蒸発量とAパン水面蒸発量との関係。

ツシュ式蒸発量しか測定されない地点でAパンによる水面蒸発量を知るには両者の関係を求めておくことが重要である。

PK20地点のAパンによる水面蒸発量と、ピュシュ式蒸発計による蒸発量の関係を求めたのが図6である。水面蒸発量とピュシュ式蒸発計蒸発量の間には高い相関関係があり、次の式で表わされる。

$$E = 0.85E' + 4.91 \quad (r = 0.86) \quad (3)$$

E : 水面蒸発量 (mm/day)

E' : ピュシュ式蒸発計蒸発量 (mm/day)

このように水面蒸発量とピュシュ式蒸発計蒸発量の間には高い正の相関関係が認められるのは、図7に示すようにピュシュ式蒸発計の蒸発量は、水が満たしてあるガラス管を使用し飽和状態に保たれた円形ペーパーフィルターからの蒸発量であることから、Aパンからの水面蒸発の場合と同様に飽和面からの蒸発現象となり、水面蒸発の場合と非常に類似した機構であるためと考えられる。したがって (3) 式を用いれば、ピュシュ式蒸発計蒸発量しか測定されない地点においてもピュシュ式蒸発計蒸発量より水面蒸発量の換算が可能であると言えよう。

3) 月平均気温・湿度による水面蒸発量の推定

ジブチ共和国の水面蒸発量は、日平均気温および湿度と密接に関係していることが明らかになったことから、各地で気象資料として僅かに存在し、古くからまとめられている月平均気温と月平均湿度から水面蒸発量を求められないかについて続いて検討した。

同国内6カ所のピュシュ式蒸発計蒸発量の値より、先に示した (3) 式を用いて月平均水面蒸発量を求め、月平均気温および月平均湿度との関係を示したのが図8、

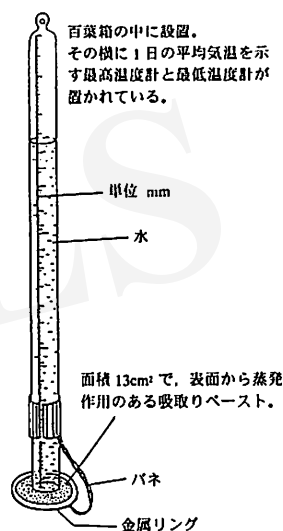


図7. ピュシュ式蒸発計。

9である。

月平均水面蒸発量と月平均気温および月平均湿度との間で、ともにジブチ国内の場所に関係なく高い正の相関関係が認められ、それらはそれぞれ式 (4)、(5) で表わされる。

$$E = 0.52T' - 6.89 \quad (r = 0.84) \quad (4)$$

$$E = -0.26H' + 26.88 \quad (r = 0.71) \quad (5)$$

E : 水面蒸発量 (mm/day)

T' : 月平均気温 (°C)

H' : 月平均湿度 (%)

3章1) で明らかにした水面蒸発量と日平均気温、水面蒸発量と日平均温度との関係と同様に、月平均気温および月平均湿度と月平均水面蒸発量との間に高い相関関

係が認められるのは、この国の水面蒸発量は気温、湿度に強く影響されていることを再確認するものである。

また、式 (1)、(2) と式 (4)、(5) で各係数が若干大きくくなっているのは、Aパンの水面蒸発量とピュシュ式蒸発計蒸発量との関係を表わした式 (3) により月平均水面蒸発量を求めたことによるためと考えられる。しかしながら、水面蒸発量と気温との関係、水面蒸発量と湿度との関係ともジブチ国内の場所に関係なく、それぞれ一本の回帰式で表わされる。また、95%の有意性を示す信頼帯の幅も狭いことから判断しても、水面蒸発量に

対して地域格差はなくジブチ国内どこでも同じように気温、湿度が強く影響し、これら気温、湿度より水面蒸発の良好な推定が可能であることを示したと考えられる。

いずれにしろ古くから存在する水文気象資料は月平均の形であり、さらに気温や湿度のような基本的気象データしかない同国にとって月平均気温、あるいは日平均湿度から灌漑計画に必要な水面蒸発量を推定できることは大変重要なことである。特に、月平均気温と水面蒸発量との関係における95%信頼帯が、月平均湿度と水面蒸発量との関係の信頼帯の幅に比較して狭いことより、月平

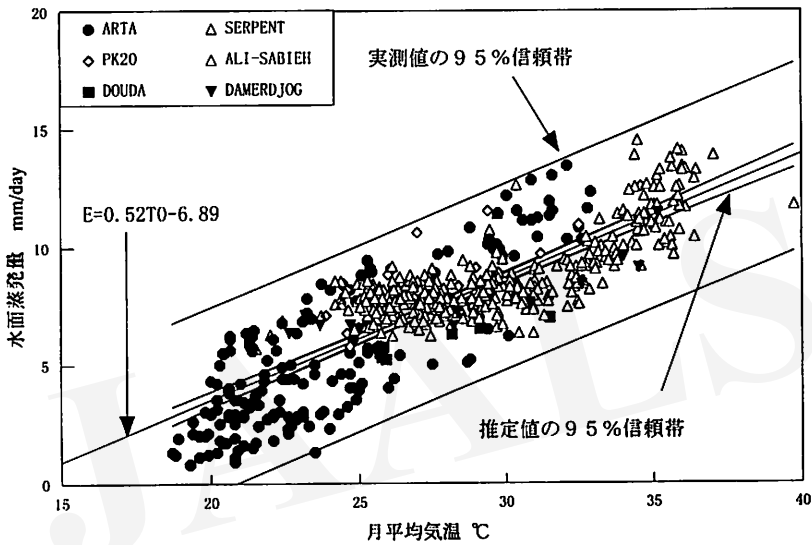


図8. 月平均気温と水面蒸発量との関係。

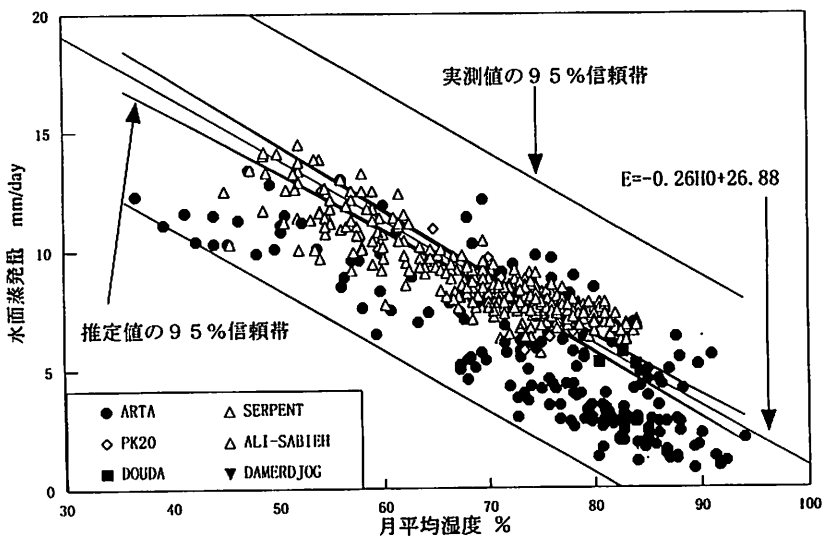


図9. 月平均湿度と水面蒸発量との関係。

均気温を用いた水面蒸発量の推定がより精度が良好であると考えられる。

4) 各地の水収支

同国内において月平均気温や月平均湿度から水面蒸発量が推定可能となったが、基本的気象要素の中でも湿度に比べて気温が最も観測が容易で精度も良いことから、標高の異なる代表的地点の各月の月平均気温を用いて各地点の水面蒸発量を推定し、降雨量を合わせて各地点の灌漑のための水収支を検討した。

実際の灌漑計画では水面蒸発量よりも蒸発散量が用いられることから、各地の月別および年間蒸発散量 (ET) を $ET = \alpha E$ の蒸発散比法により水面蒸発量 (E) を用いて求めたのが表1である。

なお、この場合の熱帯作物の蒸発散比、いわゆる作物係数 (α) は表2 (HUGUES, 1990, p.231) のように示されていることから、その平均として今回 $\alpha \approx 1.0$ として計算した。

同国の中の標高が低位、高位の代表的2地点の年間蒸発散量は、それぞれ Djibouti Serpent 3,125.1mm, Arta 2,363.5mm となり、標高が高い方が年間蒸発散量は少ない。

これは、標高が高いほど気候は温和になり、蒸発量に大きく影響する気象因子の中の気温が標高とともに低下していくためと推察される。

一方、2地点の月別の蒸発散量は各地点ともほぼ6月に最大、2月に最低となり、Djibouti Serpent ではそれぞれ 358.1, 183.1mm, また Arta では 300.0, 106.8mm の値を示す。蒸発散量がほぼ6月に最大になり、2月に最小になるのは同国の雨期、乾期にそれぞれ関係していると思われるが、基本的には年間蒸発散量と同様にその月の温度に関係が深いと判断される。

ジブチ共和国における農業の可能性について見た場合、少ないながらも良質の灌漑水としての降雨があることから、筆者の一人高橋は同国の農業に対してウォーターハーベスティングのような雨水利用の栽培方法を提案した (高橋, 1997)。

この国にウォーターハーベスティングを取り入れるとすれば、集水域と耕作域の面積比率 (CCR) が重要な要素となる。熱帯乾燥地における水収支から見ると、CCR は熱帯乾燥地において蒸発散量と降雨量の比がこれに相当することになる。

そこで、この2地点の年・各月の降雨量および蒸発散量より、年と各月の CCR を求めたのが表3である。年の CCR は Djibouti Serpent が 20.0, Arta が 10.6 となり、標高

が高いほど年の CCR は小さい。このように標高が高くなると年の CCR が小さくなるのは、この国の降雨特性の一つとして降雨量と標高との間に高い正の相関があり (TAKAHASHI *et al.*, 1997)、標高が高くなるにつれて降雨量も多くなるためと考えられる。

ウォーターハーベスティングを実施して作物栽培を行なう場合、ジブチ共和国全土で均一な CCR で耕作するのではなく、標高に応じて CCR を変化させることにより広い面積を耕作域として有効利用することが可能と考える。

また、今回得られた2地点の CCR の値は、ウォーターハーベスティングの実戦に長い歴史のあるイスラエルやアメリカのアリゾナ州の年間降雨量別 CCR (20:1 ~ 12:1)

表1. 代表的地点の月および年間蒸発散量。

単位: mm

	Djibouti Serpent	Arta
1月	195.5	109.3
2月	183.1	106.8
3月	221.7	143.2
4月	240.3	172.8
5月	282.8	243.6
6月	321.1	299.7
7月	358.1	300.0
8月	348.0	287.3
9月	301.4	241.2
10月	265.5	193.8
11月	220.7	144.4
12月	186.6	121.8
年間	3,125.1	2,363.5

Djibouti Serpent 標高: 5m, Arta 標高: 705m

表2. 作物別蒸発散比 (作物係数)。

作物名	蒸発散比 (最盛期)	作物名	蒸発散比 (最盛期)
ラデッシュ	0.80	グリーンピース	1.10
メロン	0.95	マメ科植物	1.10
キュウリ	0.95	ミレット	1.10
カボチャ	0.95	ダイズ	1.10
蔬菜	0.95	ヒマ	1.10
タマネギ	0.95	ソルガム	1.10
ラッカセイ	1.00	トウモロコシ	1.10
ナス	1.00	ジャガイモ	1.10
キャベツ	1.00	スイートコーン	1.10
ピーマン	1.00	エンドウマメ	1.10
サヤインゲン	1.00	バナナ	1.10
レタス	1.00	ヒマワリ	1.12
イネ	1.00	ワタ	1.15
ニンジン	1.05	トマト	1.15

フランス共和国国際協力省 (1989) p.20 より。

に近い値であり、ほぼ妥当なCCR（農用地整備公団、1993）と思われる。

次に、表3に示した2地点の月別CCRを比較してみると、各地点の月別CCRの値は各月で大きな変動が認められる。この原因としては同国においては熱帯乾燥地特有の大きな変動率が月降雨量において生じたためと推察される。

筆者らは、この国の降雨分布特性を考慮に入れた作物栽培を実施するとすれば、温帯のように終年の作物栽培の考え方でなく、低位地域11～3月、中位地域7～9月、高位地域6月を除く時期というように標高によって栽培時期を変える、きめ細かい作物栽培法を考えていくことが重要であると指摘した（高橋ほか、1997）。そこで、ウォーターハーベスティングを用いて標高により栽培時期を変えるきめ細かい作物栽培法を実施するための、2標高の栽培月間のCCRを求めたのが表4である。

CCRはDjibouti Serpentは14.9、Artaは9.1となり、両地点とも栽培月間のCCRは年間CCRよりも相当小さい値を示している。このように栽培月間のCCRは標高によって栽培時期を変えるきめ細かい栽培方法を実施するとすれば、年間CCRよりも相当小さなCCR値となり耕作域が広がり、その結果全体の収量も多くなるものと考ええる。

これまで検討してきた中で、CCRの低減は、降雨量が不変であるため蒸発散量の値をいかに低減させるかにかかっていることが指摘できる。このことからマルチあるいはアグロフォレストリーとの併用などで、蒸発散量をできるだけ低く抑える栽培環境を形成していくことが熱帯乾燥地農業にとって重要となってくると言えよう。

5. ま と め

月平均気温、月平均湿度、月降雨量のような基本的気象水文資料しか存在しないジブチ共和国において、これらの資料より灌漑計画の基礎となる水面蒸発量が推定できないか否かを検討した。さらに、この蒸発量をもとに蒸発散量を推定し、降雨量との係わり合いから同国における雨水利用農業におけるウォーターハーベスティングのCCRを検討した。

その結果、次のことが明らかになった。

1. 同国の水面蒸発量には気温、湿度が大きく関係している。
2. Aバンによる水面蒸発量とピュシュ式蒸発計蒸発量との間には高い相関関係があり、この関係式（3式）が

表3. 代表的地点の年および各月のCCR.

	Djibouti Serpent CCR	Arta CCR
年	20.0	10.6
1月	26.1	3.6
2月	9.3	2.9
3月	10.1	7.9
4月	7.0	5.5
5月	22.0	16.8
6月	—	1,331.1
7月	76.2	26.9
8月	201.9	19.3
9月	224.9	21.2
10月	10.2	14.8
11月	11.8	5.2
12月	24.8	8.9

表4. 代表的地点の栽培期間のCCR.

地点	標高 (m)	栽培期間	CCR
Djibouti Serpent	5	11月～3月	14.9
Arta	705	6月以外の月	9.1

らピュシュ式の蒸発量のデータの有効利用がさらに可能である。

3. ピュシュ式から得られたAバンの月平均水面蒸発量は、月平均気温と月平均湿度に対し、それぞれ0.84、0.71の高い相関係数を示し、この月平均気温と湿度から水面蒸発量が推定できる。

4. 同国の年間蒸発散量は標高が高いほど少なく、Djibouti Serpentでは3,125.1mm、Artaでは2,363.5mmを示した。また、月別の蒸発散量は乾期のほぼ6月頃に最大となり雨期の2月に最低を示し、その値はDjibouti Serpentではそれぞれ358.1、183.1mm、またArtaでは300.0と106.8mmであった。

5. 同国各地においてウォーターハーベスティングを実施する場合のCCRは標高が高いほど小さく20.0～10.0程度である。また、標高によって栽培時期を変える、きめ細かい栽培方法を実施する場合のCCRは、年のCCRよりも相当小さくなる。

今回明らかにした水面蒸発量の推定方法は、あくまでもジブチ共和国の水文気象資料の現状に合わせ、基本的気象因子を基にした相関性を主体にして検討してきた。

今後は、同国の気象観測網が整備充実していくことが期待されることから、気温・湿度など以外の気象要素を含め、蒸発量・蒸発散量などの灌漑に必要な要素が理論的に検討され、解明されることが、熱帯乾燥地の農業にとって不可欠となってくるものと考えられる。

引用文献

- フランス共和国国際協力省, 千葉 孝訳 (1989): 「かんかいの必要水量の算定」 122pp.
- 中山敬一 (1992): 3. 降水, 蒸発散と水収支. 堀口郁夫ほか「新版農業気象学」文永堂出版, 42-44.
- 農用地整備公団 (1993): 「平成5年度海外農業開発情報支援事業「作物生産のためのウォーターハーベスティング」 35pp.
- 高橋 悟 (1997): ジブチにおける砂漠緑化—Water harvestingによる実践—. 「沙漠研究」 7: 71-76.
- 高橋 悟・渡辺文雄・Tabarek, M. ISMAEL・高橋久光・福永健司 (1997): ジブチ共和国におけるドライファーマーミングの可能性について. 「開発学研究」 8-2: 9-16.
- 吉野正敏(1978): 「気候学」 大明堂.
- HUGUES Dupriez, Philippe de Leener (1990): *Les chemins de Leau. TERRES ET VIE*, 268pp.
- RDMADRR (Republique de Djibouti Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural) (1992): *Inventaire des Données Pluviométriques Mensuelles (disponibles jusqu'en décembre 1990)*.
- TAKAHASHI, S., WATANABE, F., ISMAEL, Tabarek and SAKURADA, K. (1997): The characteristics of rainfall in the Republic of Djibouti. *Proc. on Desert Technology IV International Conference 1997*.

Estimation of Water Surface Evaporation and Greening in the Republic of Djibouti

Satoru TAKAHASHI*, Fumio WATANABE*, Tabarek M. ISMAEL**, Hisamitsu TAKAHASHI*** and Kenji FUKUNAGA****

We tried to estimate the evaporation from water surface, that is used as fundamental data for irrigation planning, based on monthly average temperature, humidity and rainfall that are fundamental meteorological data collected in Djibouti. Furthermore, on the basis of this evaporation data, we made it clear that the relation with transpiration and the rainfall and we evaluated the value of CCR (Catchment/Cropped Area Ratio) for water harvesting of agricultural development in Djibouti.

The results presented in this paper are summarized as follows:

- (1) Relation with the evaporation from water surface measured by class A pan evaporimeter and the evaporation measured by Piche's evaporimeter has recognized high correlation.
- (2) The evaporation from water surface could be estimated by monthly average temperature and humidity.
- (3) The annual evaporation measured by A pan in Djibouti was higher in the lowland than the highland. The minimum monthly evapotranspiration occurred in February and the maximum in June.
- (4) Values of CCR are smaller in the highland, and ranges from 10.0 to 20.0.
- (5) When we do water harvesting in Djibouti, we have to consider the cropping period, especially on land which has different elevations.

Key Words: Water surface evaporation, Evapotranspiration, Water harvesting, CCR(Catchment/Cropped Area Ratio)

*Department of Agricultural Engineering, Tokyo University of Agriculture. 1-1-1, Sakuragaoka, Setagaya, Tokyo 156-0054, Japan.

**Ministry of Agriculture, the Republic of Djibouti. B.P.453, Djibouti.

***Department of International Agricultural Development, Tokyo University of Agriculture. 1-1-1, Sakuragaoka, Setagaya, Tokyo 156-0054, Japan.

****Department of Forestry, Tokyo University of Agriculture. 1-1-1, Sakuragaoka, Setagaya, Tokyo 156-0054, Japan.

(Received, July 30, 1997; Accepted, December 6, 1997)

Assesment of Surge Flow Irrigation and Evaluation of Furrow Infiltration Estimation Methods

Melkamu REGEA*, Yoshinobu KITAMURA* and Tomohisa YANO*

ON/OFF application of irrigation water to irrigation furrows (surge techniques), in many cases, is reported to have the potential to enhance the performance of traditional furrow irrigation systems by beneficially influencing (reducing) soil infiltration rate in a furrow.

Furrow irrigation water advance rates and advance volumes were evaluated under both traditional (continuous) and surge (intermittent) flows at the Arid Land Research Center, Tottori University. Parameters to estimate furrow infiltration, according to Kostikov and Modified Kostikov form relations, were evaluated by monitoring cylinder infiltrometer and from a volume balance approach during the actual irrigation event.

The study results indicated that up to 30 percent less water is consumed to complete furrow advance under surge compared to a continuous flow under similar set of conditions. Surge flow effects were observed to be pronounced during the first water application to newly formed furrows or following major cultivation.

With respect to infiltration analysis of the experimental plot, relative error percent RE (%) is defined to compare the relative infiltration prediction levels of the coefficients derived from cylinder infiltrometer and volume balance methods. The volume balance approach that takes into account data on furrow advance, inflow rate, slope, roughness, length and geometry to derive the infiltration parameters provided an infiltration level closer to the actual infiltration in the furrow compared to the level of infiltration predicted using coefficients from cylinder infiltrometer records.

Key Words: Furrow irrigation, Surge flow, Furrow infiltration, Volume balance

1. Introduction

1) Furrow irrigation

Of the estimated 250 million hectares irrigated lands worldwide, at least 60% is surface irrigated (LENTZ, *et al.* 1996). Furrow irrigation systems are the most extensively used among surface irrigation methods. Under furrow irrigation, the field serves as its own irrigation water distribution network and this makes it attractive to irrigators because of the low capital investment and relative ease of use. Anticipated shortages and high costs of energy to derive alternative irrigation systems suggest that furrow irrigation will remain popular for the foreseeable future.

However, furrow irrigation systems are relatively inefficient in terms of retaining the

water applied in the root zone immediately after irrigation. The inherent disparity in infiltration opportunity time between the two furrow ends and the interest to provide the minimum required depth of irrigation at all reaches along the furrow facilitate conditions that generate excessive deep percolation at upper reaches or runoff as tailscape or both.

Both on-farm runoff and deep percolations are due to mismanagement of furrow irrigation systems and are generally undesirable. Whereas, runoff is an obvious waste of the already scarce water resources, deep percolation has a far reaching effect because of its potential to leach agricultural chemicals, join and raise groundwater table to unacceptable levels (crop root zone) and/or degrade qualities of groundwater supplies. Most of the environmental disorders encountered

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

(Received, July 30, 1997; Accepted, November 27, 1997)

in irrigated arid and semi-arid regions have their causes directly or indirectly related to on-farm excessive runoff and deep percolation.

Runoff and deep percolation problems are more pronounced and commonly associated with furrow systems suffering from low water advance rates resulting in large infiltration opportunity time differences between the two furrow ends. Hence, design and management objectives for furrow irrigation are generally to complete the advance phase of the irrigation as quickly as possible to minimize these differences. The ideal system would be capable of automation, provides instantaneous advance, and prevents runoff during the intake phase of an irrigation event. Unfortunately, resources needed to achieve these conditions are not available for furrow irrigation systems. However, to attain these design objectives, traditionally, large initial inflows followed by small cutback furrow streams were recommended. In some cases, runoff recovery (reuse) mechanisms are also incorporated in the system design.

Recently, however, the performance of traditional furrow irrigation systems, in many cases, have been greatly enhanced by converting to surge flow techniques. By definition, surge flow is the intermittent application of irrigation water to irrigation furrows, creating a series of ON and OFF periods of constant or variable duration over part of, or the whole irrigation time (WALKER *et al.*, 1987).

Intermittent application of water to furrows has the potential to beneficially influence (reduce) infiltration. Such a reduction in infiltration is suggested to occur due to the following processes: when water first contacts a dry soil in an irrigation furrow, the infiltration rate is usually high. As the water continues to run, the infiltration rate at that point in the furrow gets reduced. If water is shut off and allowed to totally infiltrate, the surface soil particles consolidate and form a partial seal in the furrow. When water is re-introduced to the furrow, the intake rate can be reduced due to this partial sealing action. It results in accelerated water movement down the furrow and less infiltration into the soil, leading to an overall reduction in the size of advance volume and gross irrigation requirement.

Though quantitative study on their relative

significance is not yet available, other mechanisms suggested to cause further effective reduction in soil infiltration under surge techniques are sealing of water conducting pores by suspended sediments (MALANO, 1982 MS); surface drying during the OFF period which causes surface layer consolidation (SAMANI, 1983); soil swelling due to hydration of clays and reduction in hydraulic gradient as wetting of the soil progresses (BLAIR *et al.*, 1984). Where surge flow reduces infiltration rate of a soil, either or a combination of these factors may be accounted for the resulting effect, however.

2) Furrow infiltration and its prediction methods

Lack of quantitative knowledge on furrow infiltration behavior greatly contributes to mismanagement of furrow irrigation systems. The design, evaluation and simulation of a furrow irrigation system rely on the knowledge of the infiltration properties of the irrigated soil. Unfortunately, however, soil infiltration is spatially and temporally variable and this variability is difficult to characterize.

Furrow infiltration is conventionally and commonly evaluated from data collected using cylinder infiltrometer, inflow outflow measurements, and blocked furrow intake rate measurements among other methods. Two of the approaches considered herein are discussed below.

(1) Cylinder infiltrometer method

The use of cylinder infiltrometer data to characterize furrow infiltration, wherein cumulative (total) infiltration is power related to the infiltration time, is widely employed. This power relation is given as:

$$Z = kT^{\alpha} \quad (1)$$

where Z = cumulative infiltration (cm); T = total infiltration time (min); k and α = empirical fitting constants.

However, this power relation suggests that the rate of infiltration at large times approaches zero, contrary to what is observed in the field. Most agricultural soils exhibit a non-zero steady (basic) intake rate at large infiltration times. To account for the tendency of Eq. 1 to underpredict cumulative infiltration, a factor is included as:

$$Z = kT^{\alpha} + fT \quad (2)$$

where f =steady (basic) intake rate (cm min^{-1}). The factor f in Eq. 2 is obtained from cylinder infiltrometer minimum rate of infiltration usually attained at the end of the observation. Eqs. 1 and 2 are known as the Kostiakov and the Modified Kostiakov relations, respectively.

Yet, the way water infiltration into the soil takes place in a cylinder infiltrometer driven into the soil has very little in common with the way irrigation water infiltrates in a furrow and therefore there are enough reasons for a variation between measured furrow infiltration and that estimated using infiltration coefficients derived from cylinder infiltrometer method.

(2) Volume balance

The concern that the coefficients derived from cylinder infiltrometer method have some drawback as stated above, initiated a search for a method whereby an equation estimating water infiltration into the soil during a furrow irrigation event could be developed from data on water advance across the furrow together with information on flow rates, furrow length and slope, furrow roughness and geometry. The primary advantage of such a method is that infiltration parameters are derived from the actual irrigation event or are part of it.

One such method developed by CHRISTIANSEN *et al.* (1966) is a graphical method. The procedure involves plotting the water advance data on logarithmic chart to obtain the coefficients of a power advance equation. Infiltrated amounts versus time during the water advance, estimated as the difference between volume of inflow and surface storage (volume balance), are also plotted on logarithmic chart. Data from these plots are used to derive the parameters essential for characterizing furrow infiltration.

The volume balance approach for estimating soil infiltration parameters is based on the following basic assumptions:

Assumption 1: The trajectory of the advance of the water front in a furrow can be described as a simple power function of the form:

$$x = pt^r \quad (3)$$

where x = distance water advances in time t (m);

p and r = empirical fitting parameters, (r is referred to as advance exponent).

Assumption 2: Infiltration is characterized by the modified Kostiakov form equation:

$$Z = k\tau^\alpha + f_0\tau \quad (4)$$

where Z = infiltrated volume per unit length after an infiltration opportunity time (τ) at a given point along the furrow,

f_0 = basic intake rate in units of volume per unit length per unit time.

The factor (f_0) is separately determined from furrow inflow outflow records taken long enough for the outflow to reach a maximum constant rate.

Utilizing these two assumption, the volume balance equation is written for any advance time as:

$$Q_0 t = \sigma_y A_0 x + \sigma_z k t^\alpha x + f_0 t x / (1+r); \quad (5)$$

where, Q_0 = inflow rate ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$);

t = elapsed time since the inflow started (min);

σ_y = surface storage shape factor, a constant;

A_0 = inlet cross-sectional area of flow (m^2); and

σ_z = subsurface shape factor, defined as:

$$\sigma_z = (a+r(1-a) + 1)/(1+a)(1+r) \quad (6)$$

Eq. 5 states that for any given time during the water advance phase of an irrigation, the total inflow volume is equal to the surface storage and the infiltrated volume. Solving this equation for any two points along the furrow, preferably for half the furrow length ($L/2$) and full furrow length (L) substituted for x , provides two equations that can be simultaneously solved for the only two unknowns α and k . With some algebraic arguments and logarithmic transformations, Eq. 5 then provides:

$$\alpha = \ln(V_L/V_{0.5L})/\ln(T_L/T_{0.5L}) \quad (7)$$

where $V_L = Q_0 T_L/L - \sigma_y A_0 - f_0 T_L/(1+r)$ (8)

$$V_{0.5L} = 2Q_0 T_{0.5L}/L - \sigma_y A_0 - f_0 T_{0.5L}/(1+r) \quad (9)$$

Then σ_z is found from Eq. 6 and the parameter k is found by

$$k = V_L/(\sigma_z T_L^\alpha) \quad (10)$$

ELLIOT and WALKER (1982) further simplified the evaluation of infiltration parameters from advance data. They developed an algebraic method known as the two-point method and suggested a relation for the advance exponent:

$$r = \ln 2 / (\ln T_L - \ln T_{0.5L}) \quad (11)$$

where T_L and $T_{0.5L}$ are again advance times to L and $L/2$ furrow lengths, respectively. The aim is to reduce the number of advance data points without appreciable loss of accuracy in the value of the parameter to be determined.

However, the relative importance or merits associated with these various methods are either not thoroughly studied or not widely available for

use by irrigators. Our purpose in this study is, therefore, to compare advance volumes under continuous versus surge (ON/OFF) flows, to carry out soil infiltration tests and analyze how well commonly used methods and models describe furrow cumulative infiltration. Based on the results, to suggest appropriate furrow irrigation management practice that would eliminate or significantly mitigate its drawbacks and help exploit the potential advantages as best as possible.

2. Materials and Methods

1) Experimental site

A field experiment was carried out at the Arid Land Research Center, Tottori University on a limited set of furrows with maximum length of 30 m during the summer of 1994-1995. The experimental plot has a *Masa* soil (a yellowish brown in color, permeable, porous and non-viscous sandy loam) of 50cm average depth over a sandy soil. According to the particle size analysis, this soil consists of 77% sand and 23% silt and clay particles. Average bulk density over the 50cm depth was 1.35 g cm^{-3} . The soil's rate of infiltration at the end of the experiment falls within moderate infiltration rate category and was quite reasonable for surface water application tests. The plot was carefully leveled to a longitudinal slope of 0.001 m m^{-1} in the direction of irrigation. The test furrows were roughly trapezoidal in shape and had an average depth of 0.12m.

2) Data collection

(1) Water advance

Field water advance data measurements were conducted to identify furrow advance rates under continuous and surge flows. Water was supplied to the furrows from gated pipes provided with electric valves initially adjusted for a given volume rate of test flows.

Under given test inflow rates, common to both continuous and surge flows, water advance rates were recorded at stakes placed (prior to making test runs) at 6m interval along the furrow.

For the continuous flow set of furrows, once the inflow was diverted into the upstream end of the test furrow, the inflow was kept uninterrupted till the advance front reached the downstream end of

the furrows. The advance front was followed and the time it reached the stakes progressively were record.

For the surge flow set of furrows, the total furrow length was divided into 5 (five) equal segments of 6m each. The first surge flow diverted to these furrows wetted the first 6m segment of the furrow close to the inlet before the water was turned off. The surface storage due to this first surge was given just enough time to totally infiltrate. Then the second surge flow was turned on and run over the already wetted segment of the furrow by the previous surge but allowed to cover an additional (a downstream) dry segment of 6m to totally cover 12m furrow reach. The same procedure was repeated till the advance front reached the end of the furrow using 5 surges. Except for the mode of water application, experimental conditions were kept identical for both continuous and surge flow set of furrows.

(2) Evaluating soil infiltration coefficients

Two methods were employed and their results were compared to field observations.

The first method was where a cylinder infiltrometer of 30cm diameter and 40 cm height (with a buffer pond constructed around to minimize boundary effects) was used. The cylinder was driven into the ground a minimum of 15cm and water is filled to a known initial height within the cylinder and the buffer pond to measure water level drops against time. Every time the water level drops a few centimeters, sufficient water was added to bring it approximately to its initial elevation. In using the data, the refilling is assumed to be instantaneous.

The second method was where the infiltration parameters were evaluated from furrow advance data using a volume balance procedure presented in 1.-2)-(2), Eqs. 3-11. In conjunction with this, furrow geometry parameters essential for estimating inlet cross sectional area of flow, A_0 , was obtained from readings taken with furrow profilemeter following test runs. A_0 was then evaluated by either transferring the data onto computer and measuring same-scale print outs using portable areameter or by use of Manning's rigorous hydraulic relation that assumes a power relationships to exist between flow depth, wetted perimeter, hydraulic radius and furrow top width. The surface storage shape factor, σ_r , (Eq. 5)

represents the ratio of the actual volume of surface storage to the volume calculated by the cross-sectional area of flow at the inlet of the furrow at different advance times and advance distances. As a series of measured data on furrow flow cross-sectional area along the whole furrow run is not available, except for the inlet cross-sectional area (A_0), a recommended and commonly used constant value of 0.75 was used to enable us to estimate the surface storage volume. The subsurface shape factor was evaluated from the relation indicated in Eq. 6. The detailed procedure is provided by WALKER *et al.* (1987) and WALKER (1989).

3. Results and Discussion

1) Continuous versus surge advance volumes

The results given and discussed herein are for an instantaneous inlet discharge of 0.5 L sec^{-1} under the two flow patterns. Lesser instantaneous flows failed to complete the advance within reasonable times, whereas bigger discharges sustained considerable advance fronts even after the flow was turned off under surge flow.

Water advance trajectories for both flow types (data averaged for six sets of furrows each), in which the distances water advanced in a furrow versus corresponding advance times is illustrated in Fig. 1. For the continuous flow, water is turned on and was kept uninterrupted while advance rates were measured at 6m interval along the whole furrow length. Under surge flow, total advance was completed in 5 successive intermittent (ON/OFF) applications each covering additional 6m; with expanding off times of 2.86, 4.03, 9.47 and 13.11 minutes between the successive surges to allow complete dewatering of the surface storage resulting from preceding surges prior to allowing succeeding surges. The surge advance trajectory in Fig. 1, hence, is produced by removing this off times and concatenating the on times during each surge. The vertical increases in the surge trajectory time (with no increase in distance) represent the successive advance times required for the wetted reach as a result of the preceding surge advances. These times correspond to 0.79, 2.13, 3.6, and 4.52 minutes for surge 2 to surge 5, in the same order. As shown in Fig. 1, the average total

advance time for the continuous flow is 49 minutes, whereas that of a surge flow is only 34 minutes. As the same instantaneous inlet flow was used in both cases, the advance volume under surge is 69% of that of a continuous flow.

This result was obtained during the first irrigation of the trial that took place following extended dry days and the soil's hydraulic and infiltration characteristics, therefore, were extreme. A post irrigation event carried out after 7 continuous non-rainy days under similar treatment took a total advance time of 36 and 29 minutes for the continuous and surge flows, respectively. Average soil moisture levels gravimetrically determined from samples taken prior to the pre- and post-irrigations were 0.09 and $0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectively. Evidently, the decrease in advance volume consumed under surge during the pre- and post irrigation is less compared to the corresponding decrease under continuous flow. Further, the relative difference between the continuous advance time (volume) and that of the surge is lower for the post irrigation than the initial irrigation. BISHOP *et al.* (1981), COOLIDGE *et al.* (1982) also reported that the effect of surge application to reduce infiltration of a soil is remarkable during the first irrigation when the soil moisture level is at its minimum.

An attempt to study relative surge effects under various cycle times (ON TIME+OFF TIME) and

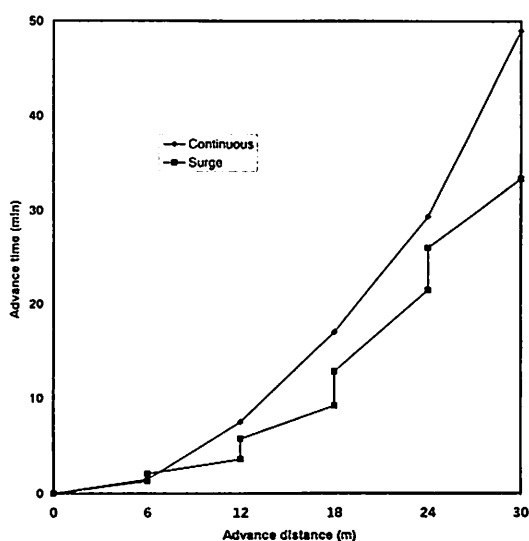


Fig. 1. Continuous and Surge flow advance trajectory.

various cycle-ratios (ON TIME/CYCLE TIME) were limited by a combination of factors ranging from research plot size limitation to the short duration of the weather pattern suitable for such field monitoring. It is, therefore, not intended to further discuss the several management options that surge flow technique offers to a furrow irrigator.

2) Furrow Infiltration

Models employed and pertinent arguments underlying estimating furrow infiltration are outlined in Section 1.-2) of this paper. Table 1 presents a summary of average data for

Table 1. Parameters for infiltration models' inputs.

1. Cylinder Infiltrometer		
k (cm min ⁻¹)		1.293
α		0.461
f (cm min ⁻¹)		0.04
2. Volume-Balance		
	Power advance	Two-point method
k (m ³ m ⁻¹ min ⁻¹)	0.0047	0.0069
α	0.368	0.334
fo (m ³ m ⁻¹ min ⁻¹)	0.0005	0.0005
Furrow length (m)	30	30
Flow rate (m ³ min ⁻¹)	0.03	0.03
A _o (m ²)	0.006	0.006

parameters essential in furrow infiltration modeling as measured or calculated from field data. The units for k and fo (Table 1) as given for the volume balance represent the volume per unit furrow length, per unit time. In evaluating total infiltration in a furrow, appropriate furrow spacing, furrow length and time of infiltration were used in conjunction with these units. The point is to compare how well furrow infiltration is estimated when infiltration parameters are derived from cylinder infiltrometer data against those derived from volume balance procedure.

Using the data in Table 1 along with other parameters evaluated according to the relationships given in Section 1.-2), Fig. 2 represents a time rate of infiltration as observed in a cylinder infiltrometer. Generally, infiltration rates are known to change not only with soil type but also with soil cover, soil temperature, previous soil moisture history and other conditions. For this particular study, as in the case for most furrow irrigated areas, these refinements were ignored and the infiltration parameters are assumed to be a function of soil type only. The soil infiltration rate decreased gradually from high average initial values of 65cm min⁻¹ to a final (steady) value as low as 0.04cm min⁻¹. This rates still indicate that the soil has a relatively high rate of infiltration as monitoring was completed. Fig. 3 shows a

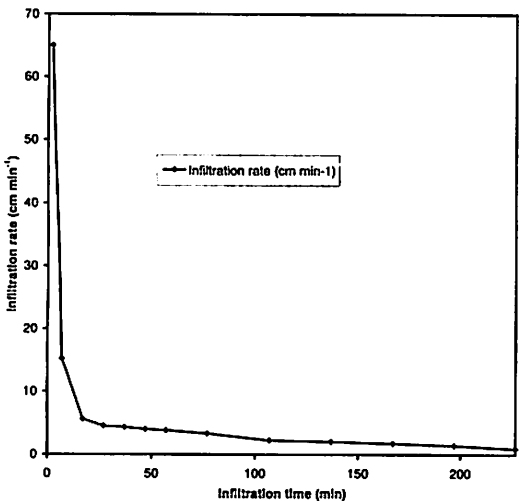


Fig. 2. Soil infiltration rate (Cylinder infiltrometer data).

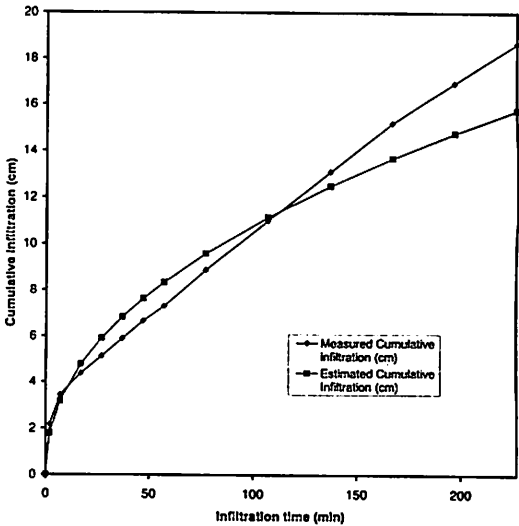


Fig. 3. Measured cumulative infiltration and a power curve fit (Cylinder infiltrometer).

measured cumulative infiltration curve fitted according to the Kostiakov power relation (Eq. 1). The power curve fit has k , α and a regression coefficient (r^2) values of 1.293, 0.461 and 0.962, respectively. This plot reveals the common criticism that this power relation inherently underpredicts cumulative infiltration beyond a range of few hours. As will be demonstrated later, the inclusion of the basic (steady) intake rate in the Modified Kostiakov relation could not produce a better estimate of cumulative infiltration, either.

Fig. 4 provides a superimposed infiltration plots as estimated for an irrigation event in a furrow using coefficients evaluated from both cylinder infiltrometer and volume balance method. The total infiltrated volume or depth for a given infiltration opportunity time was evaluated from furrow inflow-outflow measurements. The models' infiltration prediction levels are compared by defining percent relative error RE(%) as (BLAIR *et al.*, 1993) :

$$RE(\%) = 100(V_c - V_m)/V_m \quad (10)$$

where V_c = calculated infiltrated volume;

V_m = measured infiltrated volume.

This relation (Eq. 10) suggests that a plot of an ideal model that would predict infiltration equal to the measured value over the whole range of infiltration opportunity time would coincide with the zero line. Accordingly, positive RE values

indicate an overprediction by a particular model over that range of infiltration time, whereas RE values less than zero show underprediction.

With reference to Fig. 4, the Kostiakov model (Eq. 1) under-predicted ($RE = -18$) cumulative infiltration, at low infiltration time (soon after the onset of irrigation), followed by an equivalent overprediction ($RE = 16$) over a short range of time. At larger irrigation time a larger deviation (underprediction) from $RE = 0$ line is revealed. This is a matter of concern as large irrigation times are quite common on furrow irrigated areas and this model is the most likely to be used to characterize infiltration.

The Modified Kostiakov model provided large positive RE values over the whole range of irrigation time, though the deviation from the $RE = 0$ line tends to be smaller at the maximum irrigation time. The argument that the Modified Kostiakov model improves the drawbacks in the Kostiakov model is offset in this particular study due to the relatively high value associated with the f factor.

The volume balance power advance derived coefficients provided the least deviation ($RE = 6$) at the end of the irrigation event though the deviation was larger at the onset of irrigation. The fact that the method provides the least deviation by the end of the irrigation time is of practical significance.

The volume balance two-point method has the second least deviation ($RE = 11$) by the end of the irrigation time. This method is basically the same with the power advance method except that the advance exponent (r) is evaluated from only two-point advance measurements, and its result, as such, is not expected to markedly vary from that of the former. However, it is to be considered as a management option that has a potential to reduce data points without major offset in the variables of interest.

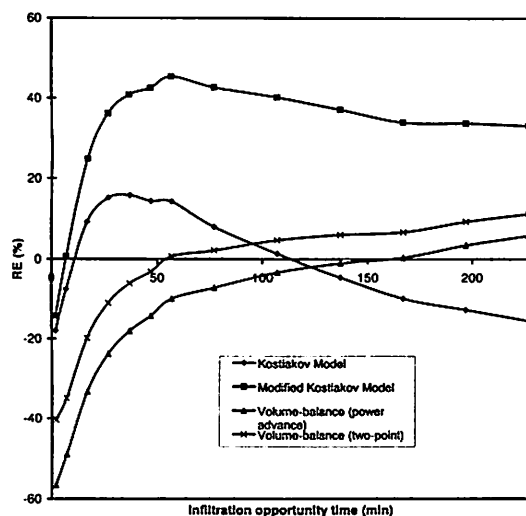


Fig. 4. Percent relative error, RE (%) versus infiltration opportunity time.

4. Conclusion and Recommendation

1) Surge flow

The need to initiate and implement improved furrow irrigation practices are numerous and varied. The immediate and long term sustainability of most irrigation schemes appear to heavily depend on improved irrigation practices.

This study showed that surge flow consumes less water to complete furrow advance under a constant advance distance variable on-time basis, compared to a continuous flow under similar set of conditions on a *Masa* soil of relatively high infiltration rate. The effects of surge flow were most pronounced during the first water application to newly formed furrows after prolonged dry days or following major cultivation. A comparison of limited data aggregated by treatment suggests that differences in advance rates under surge flow conditions were substantially less than under continuous flow.

Surge flow, when effective, offers advantages to a furrow irrigator that come from either or a combination of less water to meet irrigation demand, high application efficiency and uniformity, regulation of the runoff and a potential to semi-automate furrow irrigation.

Surge flow offers management flexibilities that continuous flow lacks due to the various options available in relation to furrow stream size, surge cycle time, surge cycle ratios, and number of surges that need to be optimized for the best combination that would result in a high level of application efficiency and uniformity. Despite, surge flow technique is not yet an advanced irrigation technology. Also its effects are not universal and may not produce the required advantages under all field conditions. Its effects are site specific and closely related to the soil properties and possibly to the quality of irrigation water used as much as to its management practice. These aspects of surge flow, if studied, would be essential in decision making regarding the suitability of surge flow technique to a furrow irrigator given site specific factors.

2) Furrow infiltration

The design, evaluation and simulation of a furrow irrigation system rely on a knowledge of the infiltration property of the irrigated soil. However, soil infiltration is spatially and temporally variable and the variability is difficult to characterize.

Generally, furrow infiltration prediction suffers from lack of representation when soil infiltration parameters are derived from the classical cylinder infiltrometer monitoring.

In this study, infiltration parameters derived

from volume balance method better estimated furrow infiltration compared to the cylinder infiltrometer derived coefficients. The volume balance method, in addition to having a merit of estimating furrow infiltration better, also offers the advantage of being part of the actual irrigation data that could be collected for an over all improved furrow irrigation management.

The fact that the level of infiltration estimated using cylinder infiltrometer derived coefficients compared to that of the volume balance had greater deviation from the measured infiltration is unfortunate as it is commonly used to characterize infiltration by consultants, irrigationists and others involved in evaluating furrow irrigation systems.

References

- BISHOP, A.A., WALKER, W.R., ALLEN, N.L. and POOLE, G.J. (1981): Furrow advance rates under surge flow system. *J. Irrigation and Drainage, ASCE*, 107: 257-264.
- BLAIR, A.W., SMERDON, E.T. and RUTLEDGE, J.L. (1984): Infiltration model for surge furrow irrigation. *Proceedings of the Specialty Conference, ASCE*, 154-161.
- BLAIR, R.H., TERRY, L.P. and HARBERT, S. (1993): Estimating furrow infiltration. *Agricultural Water Management*, 24: 281-298.
- COOLIDGE, P.S., WALKER, W.R. and BISHOP, A.A. (1982): Advance and run-off surge flow furrow irrigation. *J. Irrigation and Drainage, ASCE*, 108: 35-42.
- CHRISTIANSEN, J.E., BISHOP, A.A., KIEFER, F.W. and FOK, Y.S. (1966): Evaluation of intake rate constants as related to advance of water in surface irrigation. *Trans., ASAE*, 9: 671-674.
- ELLIOT, R.L. and WALKER, W.R. (1982): Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans., ASAE*, 25: 396-400.
- LENTZ, R.D., SOJKA, R.E. and CARTER, D.L. (1996): Furrow irrigation water-quality effects on soil loss and infiltration. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 60-1: 238-245.
- MALANO, H.M. (1982 MS): Comparison of the infiltration process under continuous and surge flow. M. S. thesis, Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Logan, 107 pp.
- SAMANI, Z.A. (1983): *Infiltration Under Surge Flow Irrigation*. Ph.D. Dissertation, Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State

University, Logan, 179 pp.

WALKER, W.R. (1989): *Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems*. FAO Irrigation and Drainage Paper 45. Food and Agricultural

Organization of the United Nations, Rome, 137 pp.

WALKER, W.R. and GAYLORD, V.S. (1987): *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 386 pp.

J A A L S

サージ流給水法の効果の検証および畦間浸入量推定法の評価

レゲア メルカム*・北村義信*・矢野友久*

畦間灌漑は、世界の灌漑農地2.5億haの60%以上を占める地表灌漑の中で、最も広く普及している伝統的な灌漑方法である。この畦間灌漑の灌漑効率を高めるための給水方法として、近年サージ流給水法が注目されている。本論では、サージ流給水法の効果を圃場実験に基づいて、従来の連続給水法と対比させて論じた。また、コスティアコフ系モデルおよびボリュームバランス法による畦間浸入量の推定法についても検討を加えた。

乾燥状態にあるマサ土の長さ30mの畦間でサージ流給水を行なった場合、水足が末端に到達するまでに消費した水量は、連続給水の場合に比べて30%少なかった。サージ流給水の効果は、新しく形成された畦間への最初の給水において大きいことが確認された。

畦間浸入量の推定においては、水足到達距離、給水量、勾配、粗度および地形等を考慮に入れたボリュームバランス法の方が、コスティアコフ系モデルより精度よく推定できることが明らかとなった。

J A A L S

Construction of Water and Salt Balance Simulation Model to Forecast Long Term Effect of Irrigation Agriculture

Ariyoshi KUSUMI* and Toyoaki MORISHITA**

In irrigation agriculture in arid or semiarid zone, there is conflict between pursuing short term benefit and sustainable agriculture, as long term effect of irrigation agriculture is not clear. Therefore, the purpose of this paper is to construct a simulation model to quantify the conflict and to evaluate long term effect of irrigation agriculture. Selecting two fields in Israel as samples, *Water Balance Model* and *Salt Balance Model* were constructed for each field. Main operational variables of both models are irrigation depth and crop year sequence. Objective variables are long term benefit in both model and accumulated salt under root zone in the latter model. Both models are composed of driving module, crop modules, fallow modules, and drainage module. In crop modules, evapotranspiration is evaluated, and daily soil moisture (also soil salinity in the latter model) is estimated, and then yield is forecasted. A fallow module plays a role to connect fallow period with other periods so that the soil moisture or soil salinity is considered throughout whole year. The drainage module deals with introduction of drainage system. The driving module combines other modules so that objective variables are evaluated. *Water Balance Model* is verified to evaluate long term effect of irrigation agriculture. *Salt Balance Model* is constructed with an unknown operational variable, so that the model is capable to present guide line to evaluate long term effect of irrigation agriculture.

Key Words: Waterlogging, Salinization, Irrigation agriculture, Simulation model

1. Introduction

Since the ancient Mesopotamian civilisation collapsed, inadequate irrigation in arid and semiarid zone always lead to salinization, and mankind has not discovered durable essential solution to the salinization problem in its history. This is due to a conflict between two different objectives of agriculture; one of them is increasing immediate benefit, and the other is sustainable agriculture based on environmental resources. While increasing immediate benefit requires more irrigation, an excess of irrigation over threshold bring about waterlogging and in turn salinization.

So there is need to abate salinization, different kinds of researches have been carried out so far, such as studies to develop measures which increase agricultural benefits, studies to develop

measures which abate salinization, studies to examine productivity of the measures, and studies to examine risks that may lead to salinization by the measures. These are researches about irrigation water quality, cultivated crops, cultivated variety of crops, crop rotations, developing irrigation systems, installing irrigation systems, temporal and spatial allocation of irrigation water, developing drainage systems, installing drainage systems, constructing drainage channels, constructing drainage ponds and so on. Although different researches were carried out, balancing aforementioned conflict has not been accomplished due to complexity of the problem. LETEY (1991) constructed a simulation model, which enables to deal with the conflict with some modification. However, as data were not available to carry out successive researches, this model was not adopted. There are other related researches of dynamic optimisation

*Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University. Suita, Osaka, 565-0871, Japan.

**Institute of Applied Biochemistry, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, 305-8571, Japan.

(Received, January 16, 1998; Accepted, Jun 12, 1998)

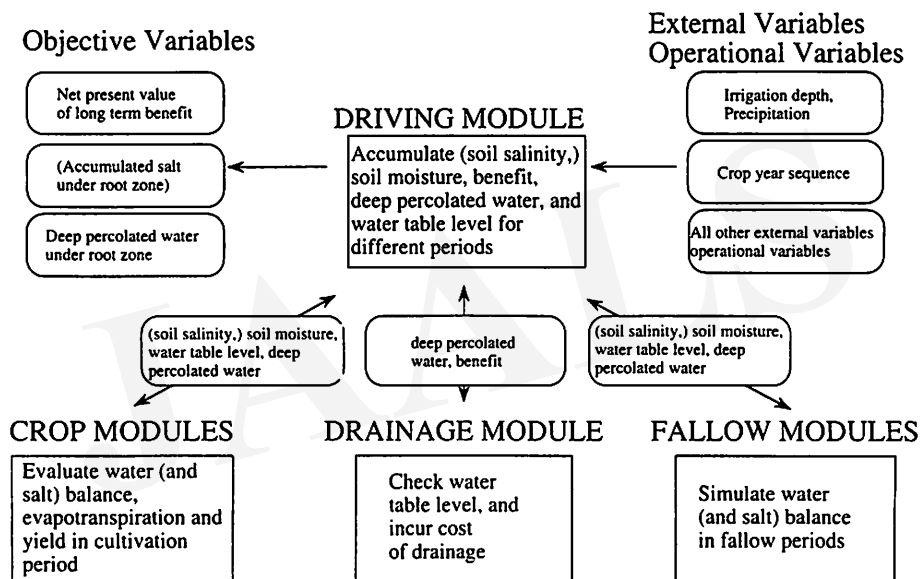
model, such as KNAPP (1991), these, however, assume the existence of technological solution to salinization and do not focus on the above conflict.

Appreciating researches mentioned above, this paper focuses on quantification of the conflicts by constructing a simulation model to forecast yield and salinization. A model was first made by data of experimental field Gilat (34° 38' E, 31° 20' N), located in the middle of Israel. As it mainly deals with water balance, it is named as *Water Balance Model (WBM)*. Later, it was expanded to another model by data of Kibbutz Sarid (35° 13' E, 32° 40' N), located in Yizreal Valley of northern Israel. This is named as *Salt Balance Model (SBM)*.

2. Overall View of the Two Simulation Models

As described above, *SBM* was constructed based on *WBM*. This is because experimental field Gilat has different kinds of data stock so that the model is relatively precisely verified, and Yizreal Valley has most serious salinization problem in Israel. Therefore constructing model is most needed in Yizreal Valley. This chapter presents the common structure of these models, and details of models are separately presented in following chapters.

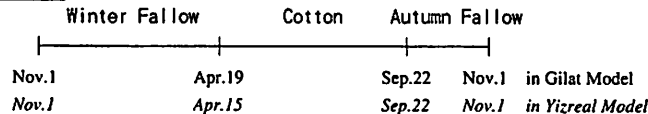
A model is composed of a driving module, two crop modules, a drainage module, and four fallow



Note: Factors in parentheses are only of *SBM*.

Fig. 1. Structure of whole simulation and relation of each module.

Unit C



Unit W

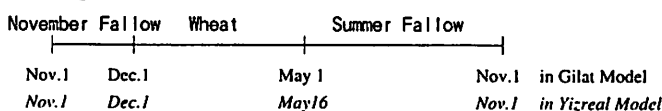


Fig. 2. Definition of periods in crop cultivation years in both models.

Table 1. Definition and values of standard scenario of main variables in both models.

External Variables	
<i>m-mb</i>	Cultivation period of crop period.
<i>at</i>	Daily maximum evaporation [mm] quoted from ISRAELI METEOROLOGICAL CENTRE.
<i>i</i>	Index to specify four of divided 30cm of soil layer. From the top layer $i = 1-4$ in turn.
<i>j</i>	Index to specify month of cultivation period.
θ_{in}	Initial soil moisture of each soil layer. Assumed as (0 15 20 20) [% of <i>TASM</i>] in both model
θ_{sum}	Assumed soil moisture at the end of summer fallow period. (0 7 15 20) [% of <i>TASM</i>] in both model
θ_{aut}	Assumed soil moisture at the end of autumn fallow period. (0 10 20 25) [% of <i>TASM</i>] in both model
<i>c_{in}</i>	Initial soil salinity of each soil layer. Assumed as (447 900 1940 2930) [cl ⁻ ppm] after LIVNE (1992).
<i>WT_{in}</i>	Initial water table level. Assumed as 2,000[mm] in Gilat and 5,000[mm] in Yizreal Valley.
<i>C_Q</i>	Irrigation water quality. Assumed as 300 [cl ⁻ ppm] after preliminary simulations.
<i>kc</i>	Crop coefficient. Monthly values are quoted for cotton in Gilat (Apr. May Jun. Jul. Aug. Sept.) = (0.00 0.30 0.35 0.78 0.60 0.30) , in Yizreal Valley (0.00 0.30 0.33 0.66 0.58 0.30) for wheat in Yizreal Valley (Dec. Jan. Feb. Mar. Apr. May) = (0.40 0.55 0.55 0.70 0.80 0.60)
<i>RAIN</i>	Precipitation.[mm] 22 years of every ten days data are given by ISRAELI METEOROLOGICAL CENTRE.
<i>FC</i> for both	Field capacity at each 30cm of soil layer.[mm/30cm] Quoted from observed data, they are 74.1[mm] in Gilat and 135[mm] in Yizreal Valley.
<i>PWP</i> for both	Permanent wilting point at each 30cm of soil layer[mm/30cm]. Quoted from observed data, they are 30.0[mm] in Gilat and 75[mm] in Yizreal Valley.
<i>TASM</i>	Total available soil moisture [mm/30cm]. 44.1[mm] in Gilat and 60[mm] in Yizreal Valley
<i>k</i>	Phenological stage of cotton. $k = 1-5$. Each stage ends at May 16 th , June 11 th , July 2 nd , 23 rd , and Sept. 21 st .
<i>NC</i>	Non-critical day[day], composing wheat yield function. It is the day when considered soil moisture is under critical level.
<i>G</i>	Days after sowing till the day of germination [day].
Operational Variables	
<i>Q</i>	Irrigation depth [mm]. In simulation, it is regarded as vector at different days of irrigation.
<i>I_{ET}</i>	Evapotranspiration level index, used to determine daily evapotranspiration level.
<i>r</i>	Discount rate [%]. In standard scenario, 10 % is assumed.
<i>T</i>	Evaluation period [year].
Internal Variables and Objective Variables	
<i>ET</i>	Daily evapotranspiration [mm].
θ	Soil moisture [mm/30cm].
<i>td</i>	Time [day]
<i>a, b</i>	Coefficients to determine daily evapotranspiration.
<i>f</i>	Ideal daily evapotranspiration[mm], where sufficient soil moisture is given for crop growth.
<i>x(k)</i>	Critical days at each phenological stage [day].
<i>Y_c</i>	Cotton yield [kg/0.1ha].
<i>Y_w</i>	Wheat yield [kg/0.1ha].
<i>SB_c</i>	Short term benefit derived from cotton [NIS/0.1ha].
<i>SB_w</i>	Short term benefit derived from wheat [NIS/0.1ha].
<i>SB</i>	Yearly benefit derived from all of crop modules and drainage module [NIS/0.1ha].
<i>t</i>	Time [year]
<i>c</i>	Salt concentration of specific water or soil salinity [cl ⁻ ppm]. First suffix indicates the water specified, and the second suffix indicates the time. Both are omitted to be noted in several sentences.
<i>TP</i>	Total potential of soil[-kPa], which affects crop growth.
<i>OP</i>	Osmotic potential of soil [-kPa].
<i>MP</i>	Matric potential of soil [-kPa].
θ	Dummy soil moisture [mm/30cm], which corresponds to <i>TP</i> .
<i>WT</i>	Water table level [mm].
<i>DP</i>	Deep percolated water under root zone[mm].
<i>DP_{salt}</i>	Amount of salt accumulated under root zone[g/0.1ha].
<i>NPV</i>	Net present value of long term benefit [NIS/0.1ha].

Notes: -Among all variables used for simulation, variables which are not explicitly described in the text are omitted to be presented.

-“NIS” is abbreviation of New Israeli Shekel. 1[NIS] \div 35 [yen] in 1994.

modules, as shown in Fig. 1. Winter wheat and cotton are assumed as cultivated crops. It is also assumed that a crop is cultivated only once a year. Fig. 2 defines cotton cultivation year (C) and wheat cultivation year (W), both of which starts from November 1st. As illustrated in Fig. 2, C and W are composed of crop modules and fallow modules. Long term simulation is operated by the sequence of C and W , which is defined as crop year sequence. Drainage module is employed to install drainage system depending on water table level. Driving module plays a role to aggregate all other modules. Two of main operational variables are irrigation depth and crop year sequence. The objective variables are net present value of long term benefit (NPV) and deep percolated water under root zone (DP) in both models, and accumulated salt under root zone in SBM . These are obtained by all of operational variables and external variables listed in Table 1.

To simplify, following conditions are assumed. First, sodicity is not considered. Cultivated crops are limited to cotton and wheat. Crop variety and all other variables which do not appear in this paper are not specified. Technological innovation, development of new crop variety, temporary fluctuation of labour productivity and labour population are not taken into consideration. Yearly fixed costs which do not differ in different irrigation practices, such as long term maintenance cost of sprinkler, are also not taken into consideration.

3. Structure of *Water Balance Model*

(1) Water balance

Water balance is simulated in vertical one-dimensional simplified field. Soil profile is divided into root zone (which is again divided into four of 30cm deep soil layers), a soil layer under them, a groundwater layer. It is assumed that there is no runoff on the ground surface, and that inflated water source to ground is only rain and irrigation water. Movement of soil water is limited to evapotranspiration to the atmospheric air or to deep percolated water to the lower layer. Similar to cascade, soil water above the field capacity is assumed to percolate to the lower layer between the four soil layers. The soil moisture under root zone to water table level is assumed at field

capacity. The ground water system is assumed as closed, and therefore all of deep percolated water contribute to waterlogging, according to porosity assumed as 0.5. Water balance in the soil layers is calculated according to

$$Q_{td} + RAIN_{td} - ET_{td} - DP_{td} = \theta_{td+1} - \theta_{td} \quad (1)$$

Hereinafter, notation and definition of all the variables are listed in Table 1.

Since the field is simplified to vertical one-dimension, the initial water table level is simply assumed as 2,000mm under the ground surface.

(2) Crop modules

In crop module, daily soil moisture and daily water table level are estimated by water balance and evaluated evapotranspiration under initial conditions given by driving module. Then crop yield is forecasted by variables related to estimated soil moistures.

Irrigation pattern and precipitation pattern differ between cotton module and wheat module. During cotton cultivation period, no precipitation is observed in the last decades in Gilat. Therefore, only irrigation is considered as water input. On the other hand, wheat grows not only by irrigation water but also by rain. Therefore, both precipitation and irrigation are considered in wheat module. A precipitation pattern is composed of 36 data sets of every 10 days precipitation for a year period. Among such precipitation pattern data of previous 22 years, one is employed by random sampling for a crop cultivation year. Different irrigation patterns are possible for both crops, and therefore frequency of irrigation, their dates and depths on each date are made as operational variables.

Evapotranspiration (ET) is assumed as a linear function of soil moisture (STRATEENER *et al.*, 1975), and unknown coefficients are estimated below.

$$ET_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \theta_{ij} \quad (2)$$

Besides soil moisture, other factors which actually affect evapotranspiration are simplified and implicitly represented by monthly coefficients a and b . Considering ET as a continuous function of td , and ignoring occasional variables Q , $RAIN$ and DP , equation (1) is rewritten as (hereinafter suffixes i and j are omitted)

$$ET = -\{d\theta/d(td)\} \quad (3)$$

Eliminating ET from equations (2) and (3), θ is integrated as

$\theta(td) = -a/b + (\theta_0 + a/b)\exp(-b \cdot td)$ (4)
 where initial condition is θ_0 of θ at $td = 0$. Here, θ_0 is assumed as field capacity (FC). At $\theta = PWP$ (permanent wilting point), transpiration is nil and evaporation from the ground surface is nearly nil. That is,

$$a = -b \cdot PWP \quad (5)$$

Substituting equation (5) and $\theta_0 = FC$ to equation (4), following is derived.

$$b = -(1/td) \ln[(\theta - PWP)/(FC - PWP)] \quad (6)$$

$\theta(td)$ is drawn as a curve in Fig. 3.

Followings show how to estimate unknown coefficients a and b . First, θ_{dat} line is drawn in Fig. 3 as a preparatory procedure. θ_{dat} line is a linear function of td with gradient f .

$$\theta_{dat} = \theta_0 - f \cdot td \quad (7)$$

f is amount of ideal daily evapotranspiration where sufficient soil moisture is given for fine crop growth. Multiplying crop coefficient (k_c) (PLAUT, 1993MS) by daily class A pan evaporation (at), which is monthly observed by Israeli Meteorological Centre, the gradient f is derived. It should be noted that the condition; "sufficient soil moisture for fine crop growth" is quantitatively undefined and is sufficiently met for observing A pan evaporation and for calculating crop coefficients elsewhere.

Estimating unknown coefficients a and b corresponds to determining unknown coefficients in equation (4). θ^* is assumed so that crops grow finely where $\theta \geq \theta^*$. A ratio of total available soil moisture (TASM) is named as I_{ET} , and therefore θ^* is expressed as follows.

$$\theta^* = I_{ET} (FC - PWP) + PWP \quad (8)$$

According to assumptions of definition of f and θ^* ,

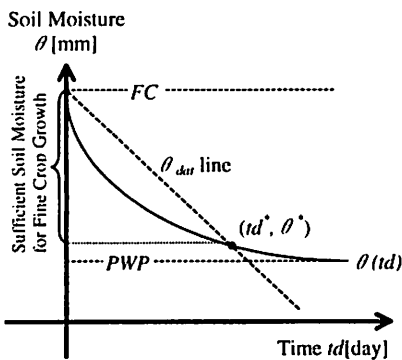


Fig. 3. Determining evapotranspiration level index (I_{ET}) based on observed potential evaporation data.

$\theta(td)$ curve must intersect with θ_{dat} line at (td^*, θ^*) . Thus, estimation of the coefficients a and b turned into determination of the value of I_{ET} . Determining or assuming the value of I_{ET} are running procedure of simulation, and therefore noted in following chapter.

Many kinds of yield functions are developed by different researchers. In this research, since a function should be of soil moisture or of evapotranspiration, following functions are adopted. For cotton, it is (YARON *et al.*, 1983MS)

$$Y_c = 650 \times 0.966^{x(3)} \times 0.980^{x(4)} \times 0.980^{x(5)} \quad (9)$$

$x(k)$ is a function of k ($k = 1, 2, \dots, 5$), which is phenological stage of the cotton. Each stage ends on May 16th, June 11th, July 2nd, 23rd, and September 21st, in that order. Each stage corresponds to establishment period, vegetative period, flowering period, yield formation period and ripening period in turn (FAO, 1986). $x(k)$ is a number of critical day, which is defined as the day when soil moisture is under critical level. YARON *et al.* (1983MS) defined the critical level as 40% of TASM of considered soil layers, and so is quoted here. Soil layers, where water evapotranspire, are considered depending on root development. Depending on the $x(k)$ which represent water deficit of each phenological stage, yield is forecasted based on potential yield 650 [kg/0.1ha].

The wheat yield function is quoted from STRATEENER (1974MS).

$$Y_w = 216.16 + 3.38NC - 2.97G \quad (10)$$

NC is a number of non-critical days, which is defined as the day when soil moisture is above critical level. The critical level for wheat is also quoted from STRATEENER (1974MS) as 40% of TASM of considered soil layers. G represents a number of days from date of sowing to date of germination. Wheat is assumed to germinate once accumulated amount of precipitation exceeds 40mm.

Concerning other conditions, basically simplified system was assumed. As an irrigation system, sprinkler irrigation system was assumed. On farm level irrigation efficiency, which is defined as ratio of the net amount of irrigation water quantity to the gross amount of irrigation water quantity, is assumed as 0.8. The difference between net amount and gross amount is due to loss to the atmospheric air, while water is sparyed from

sprinkler to the ground surface. Christensen's uniformity coefficient is assumed as 80% (KUSUMI, 1995MS). From the irrigation point, horizontal uniform distribution of 100% of Christensen's uniformity coefficient to 60% is assumed. Dividing the distribution into one-hundred points, it is simulated at one-hundred different points. Hereinafter, the result of simulation is expressed as the averaged result of these one hundred simulations.

It is conventionally assumed that evapotranspiration from each of the four layers generates by ratio of 4:3:2:1 in turn from the top layer (FAO, 1989). However, as water percolates more quickly in sprinkler system than other systems, it is considered that evapotranspiration from lower layer is relatively more in sprinkler system. Therefore, modifying the above mentioned ratio by a rule of thumb, 37:29:21:13 is assumed in this research.

Root of cotton is assumed to develop 2cm per day up to, an assumed maximum length; 120cm. Therefore, the aforementioned "considered soil layer" related to evapotranspiration and critical days are evaluated in each month depending on the root development. Similar procedure is adopted in wheat cultivation also.

(3) Fallow modules

A fallow module plays the role of connecting the preceding period and the following period, so that the soil moisture at each layers is considered throughout the whole evaluation period. As presented in Fig. 2, there are four fallow periods, and therefore four fallow modules.

In Summer module and in Autumn module, the soil moisture at the end of the periods are simply assumed disregarding the initial soil moisture of the periods, since the climate in these seasons at this field is dry without precipitation, and since it is almost stable over the years. Each value is assumed according to a soil scientist who is familiar to the field. The values are listed in Table 1.

On the other hand, precipitation in winter period varies depending on the particular year. According to an irrigation manager of the field, assumptions which are used there for a long time are adopted. These are, 1.0mm of evaporation only from the first layer on a day without

precipitation, and no evaporation on a day with precipitation. Water balance, which is the same as described in crop module, is calculated every 10 days. In the November module, the same water balance with precipitation is calculated once in whole month. The precipitation pattern is employed in the same manner described before.

(4) Drainage modules

This module deals with introduction of drainage system. At the end of every cultivation year defined by Fig. 2, water table level is checked in this module whether it is shallower than 1,400mm or not. When it is shallower than 1,400mm, it is assumed that subsurface drainage system is installed and that it functions to control the water table level at 1,400mm depth. Accompanied to the introduction of the drainage system, 713 [NIS/0.1ha] of installation cost is incurred. After installation, 7 [NIS/year] of running cost incurs every year for 20 years, and 35 [NIS/year] after that (AGRICULTURAL MINISTRY OF ISRAEL, 1993MS). The depth to install drainage pipe is assumed that the shallowest water table level between pipes does not invade the root zone.

(5) Driving module

This module plays a role of aggregating all variables transferred from other modules. Initial conditions of each variable are first employed by this module. Depending on a crop year sequence, this module selects one of other modules and transfer all the necessary variables, that is soil moisture, deep percolated water, water table level and so on. These are calculated and again transferred back to driving module with accompanied variables such as yield and drainage costs.

Short term benefit at year t is first derived by yields estimated in crop modules by following functions, depending on a crop.

$$SB_c = 1.62Y_c - 0.45Q - 400 \quad (11)$$

$$SB_w = 0.54Y_w - 0.45Q - 150 \quad (12)$$

Coefficients of these functions are derived, considering price of yield (including secondary yield that is straw of wheat), price of water, cost of cultivation and cost of harvesting (AGRICULTURAL MINISTRY OF ISRAEL, 1993MS). In this research, all the economic indexes are adjusted to the ones in 1994.

Aggregating SB_c , SB_w and drainage cost along

t , NPV is calculated by following formula.

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+r)^t} SB \quad (13)$$

While aggregating, future value is discounted by discount rate r , following the conventional procedure in economics (KUSUMI, 1995MS).

All the above mentioned are simulated according to a precipitation pattern among 22 patterns. To eliminate error, whole procedure is simulated 10 times, and averaged. The objective variables, that is the NPV and the DP at the end of evaluation period are thus derived.

4. Structure of Salt Balance Model

Since this model is an expanded model based on the WBM , only the differences are noted in this chapter. For instance, as the drainage module is completely same, it is not noted at all. Basically, the differences are of additional salt balance and other accompanied processes. Initial water table level is assumed as 5,000mm under the ground surface, to see the effect of installing drainage system in relatively further future.

(1) Water balance and salt balance

Although this model is named as SBM , it does deal with both water balance and salt balance. Water balance is dealt with by the same manner as WBM . Similar to the water balance, salt balance is calculated by the following equation.

$$Q_{id} CQ, id - DP_{id} CDP, id = C_{0, id+1} \Theta_{id+1} - C_{0, id} \Theta_{id} \quad (14)$$

$$DP_{salt} = \int_{id} CDP, id \cdot DP_{id} d(td) \quad (15)$$

It is assumed that salt concentration of rain and of evapotranspiration are nil. The salt concentration of deep percolated water at each layer is assumed as the averaged value of one at t and one at $t+1$. The amount of salt accumulated under root zone (DP_{salt}) is derived by amount of salt contained in deep percolated water under root zone (CDP). As implied by the equation, only the salt movement accompanied by the water movement is considered. All kinds of other salt movement, such as diffusion and dispersion, and all kinds of chemical reaction, such as ion exchange and salt precipitation, are not taken into consideration.

(2) Crop modules

During wheat cultivation period, as sufficient precipitation is given in adopted field, irrigation is not taken into consideration.

Evaluation method of evapotranspiration is adjusted as the salt balance is considered in this model. Soil moisture was assumed as a dependent variable of evapotranspiration in WBM . The linear function of soil moisture is actually elucidated as the simplified function of stress against the crops. The stress against the crops are expressed by total potential of soil water. In WBM , it was actually assumed that the total potential (TP) is only of matric potential (MP). On the other hand, it is assumed in SBM that the TP is composed of MP and osmotic potential (OP), while other kinds of potentials are still not taken into consideration (BLESER *et al.*, 1982). Therefore, through several unit transformation, a dependent variable θ of equation (2) is replaced by a variable corresponding to TP which includes OP .

OP is transformed from salt concentration by the following expression (KUSUMI, 1995MS).

$$OP [-kPa] \div 0.014c [mg/l] \quad (16)$$

Similarly, MP is transformed from soil moisture by the estimated retention curve below (KUSUMI, 1995MS).

$$MP [-kPa] = a_1 + a_2 \exp(-a_3 \times \theta) \quad (17)$$

where $a_1 = 6.164$, $a_2 = 2478313.274$, $a_3 = 0.0825$, $r^2 = 0.990$

Regarding the equation (17) as followed not only by MP but also by TP , the inverse relationship between TP and Θ are expressed as below, where Θ is defined as dummy soil moisture corresponding to TP .

$$\Theta = -(1/a_3) \ln[(TP - a_1)/a_2] \quad (18)$$

In stead of equation (2), following equation is employed to evaluate evapotranspiration in SBM .

$$ET = a + b\Theta \quad (19)$$

Yield function of cotton in WBM is adopted in SBM , also. On the other hand, concerning wheat cultivation, yield evaluation procedure itself is modified from WBM . This is because of Yizreal Valley's unique nature, which SBM is based on. In Yizreal Valley, waterlogging is already going on in winter period, and under present state wheat grows by taking up water from waterlogged root zone. (Cotton cultivation is not affected as it grows in summer period.) Such present state does not suit to the framework of this research,

especially because water uptake within root zone is out of consideration in this research. On the other hand, as such a phenomenon is not studied by any research fully enough at real field, this research employs simplified method to forecast yield. Providing data sets of precipitation and temperature pattern of last 22 years to an irrigation specialist of Agricultural Ministry of Israel, empirical forecasts were made and were adopted (KUSUMI, 1995MS). Empirical forecasts are expressed as ratio (%) of averaged yield over years; which is 525 [Kg/0.1ha] (AGRICULTURAL MINISTRY OF ISRAEL, 1993MS).

(3) Fallow modules

The only difference in this module is the amount of daily evaporation on a day without precipitation in the Winter module and in the November module. In stead of 1.0mm, 1.4mm was assumed by a comparison of climatic difference between Gilat and Yizreal Valley. In Summer module and in Autumn module, salt concentration fluctuates according to ratio of soil salinity and fluctuating soil moisture. Soil salinity remains constant because no salt moves out from or into root zone. This is because no deep percolation is brought about during this period as precipitation is limited.

(4) Driving module

Soil salinity is the additional important internal variable which is transferred among modules. Also, accumulated salt under root zone is added as objective variable.

5. Discussions

(1) Accuracy of two models

The *WBM* is carefully constructed, and composed only of established methods or assumptions. Among operational variables and external variables, most values are given by observed data or by simplified real state. And, there are no operational variables which determine the accuracy of the result or which can be manipulated even deliberately, except the *I_{ET}*. In other words, the error incurred by the most desirable value of *I_{ET}*, is hinged on the other assumptions, and therefore, the accuracy cannot be improved unless model itself is modified.

Values of a few other variables cannot be specified, and therefore will affect the result. Such variables are initial soil moisture, initial soil salinity, initial water table level, irrigation water salinity, porosity, Christiensen's uniformity coefficient, horizontal distribution of Christiensen's uniformity coefficient, and discount rate *r*. Among them, value of physical variables, that is all except *r*, should be simply given as assumptions according to the real state. On the other hand, *r* is an economic variable which can fluctuate depending on economic condition. Therefore, sensitivity analysis of *r* is required as complementary to the use of these models.

To run *WBM*, *I_{ET}* should be determined or assumed. Concerning cotton module, it can be determined by following way. MARANI *et al.* (1966) observed and presented different data sets of daily soil moisture, periodical evapotranspiration and irrigation schedule for whole cotton cultivation season at Gilat. Comparing observed values with simulated values accompanied by different values of *I_{ET}*, desirable *I_{ET}* can be determined if conditions, which are equivalent to observed conditions, are given to all related variables, such as *a_t*, *θ_{in}* and *Q*. Table 2 shows such comparison of evapotranspiration between observed values and several sets of simulated values. Ideally, a set of simulated evapotranspiration under desirable *I_{ET}* should be equivalent to the observed data set, as long as meteorological condition of the year, while these data are observed, is not unique. However, perfectly equivalent value of simulated evapotranspiration can not be attained, as each specific year (including actually observed year) has its own characteristic weather. Therefore, although having more observed data enables more accurate determination of *I_{ET}*, determination of *I_{ET}* is in fact always a kind of assumption with a certain amount of error. Under such circumstance, 0.35 of *I_{ET}* is recommended from Table 2 as appropriate assumption. Concerning wheat module of *WBM*, instead of determining *I_{ET}*, it is recommended to quote coefficients *a* and *b* directly from STRATEENER *et al.* (1975), where the same equation (2) is employed.

The structure of *WBM* is verified and supports the framework of *SBM*. Similar to most parts of

Table 2. Comparison of observed evapotranspiration and ones simulated by cotton module of *Water Balance Model*

	<i>ET</i> of Whole Cultivation Period [mm]	Daily Averaged <i>ET</i> in May [mm]	Daily Averaged <i>ET</i> in June [mm]	Daily Averaged <i>ET</i> in July [mm]	Daily Averaged <i>ET</i> in Aug. [mm]	Daily Averaged <i>ET</i> in Sept. [mm]
Observed Value	570	2.0	3.6	7.1	4.6	-
Simulated Value where $I_{ET} = 25$	592.52	2.3	2.5	8.0	5.0	2.1
Simulated Value where $I_{ET} = 30$	573.58	2.2	2.5	7.7	4.8	2.1
Simulated Value where $I_{ET} = 35$	556.48	2.2	2.4	7.4	4.7	2.0
Simulated Value where $I_{ET} = 40$	540.90	2.1	2.3	7.2	4.6	2.0
Simulated Value where $I_{ET} = 45$	526.58	2.1	2.3	7.0	4.4	1.9

Notes: I_{ET} [% of *TASM*] is assumed value to run this preliminary simulation. *TASM* indicates total available soil moisture in 30cm of soil layer. *ET* indicates evapotranspiration.

WBM, additional parts of *SBM*, that is mainly the salt balance calculation, cannot be manipulated deliberately.

Assuming the value of I_{ET} is required to run *SBM*, also. Although less data are available in Yizreal Valley, 0.10 and 0.60 are recommended by KUSUMI (1995MS) as assumed value of I_{ET} for cotton module and for wheat module, in turn. As these values anyway have less accuracy, I_{ET} should be considered as an operational variable, leaving their validity. Employing sensitivity analyses for I_{ET} is a prerequisite to use *SBM*.

It should be noted that the yield forecast of wheat in *SBM* is less accurate than other parts of the models, although this is due to unknown feature of actual root zone.

(2) Performance of two models

As noted in the beginning, this research aims to quantify the conflicts, or in other words, to construct simulation models to forecast yield and salinization. The salinization is classified into two categories. One is infield salinization in root zone. Salt concentration in root zone during crop cultivation period is calculated by equation (14). Its effect as salinization is expressed as decrease of yield, by adopting variable Θ in yield function (9) concerning cotton. Concerning wheat, damage incurred by salinization is simplified and expressed with less accuracy as described above.

However, by preliminary simulations, it was shown that salt concentration in root zone can be easily controlled by regulating salt concentration of irrigation water, to prevent significant decrease of yield. This is due to the assumption of introduction of subsurface drainage system and due to precipitation. Even in the case where most undesirable but feasible values are given to all of operational and external variables which determine soil salinity in root zone, it was shown in Fig. 4 that soil salinity converges to certain value depending on salt concentration of irrigation water. Therefore, it is concluded that introducing salt balance in *SBM* does not provide us much further information about the forecasting the damage due to salinization, although this information itself is confirmed by constructing the *SBM*. It is also concluded that actual effect of infield salinization is expressed mainly as all kinds of drainage costs.

The other category of salinization is outfield salinization potentially incurred by amount of salt accumulated under root zone. Although mechanism of outfield salinization is not simulated in *SBM*, amount of salt accumulated under root zone is derived as objective variable in this research.

As presented so far, the models are able to forecast accumulated amount of salt under root zone, and net present value of future benefit of irrigation agriculture, which together express

value of the conflict. Not only for intended purpose, but also for other purposes, such as, optimising irrigation depth and schedule, etc.. these models can be applied operating operational variables and/or external variables depending on

necessity. Furthermore, the framework of two models showed certain universality. Besides yield forecasting methods and salt balance calculation, the other core parts of the models are commonly adopted. Similarly, the core parts of the models

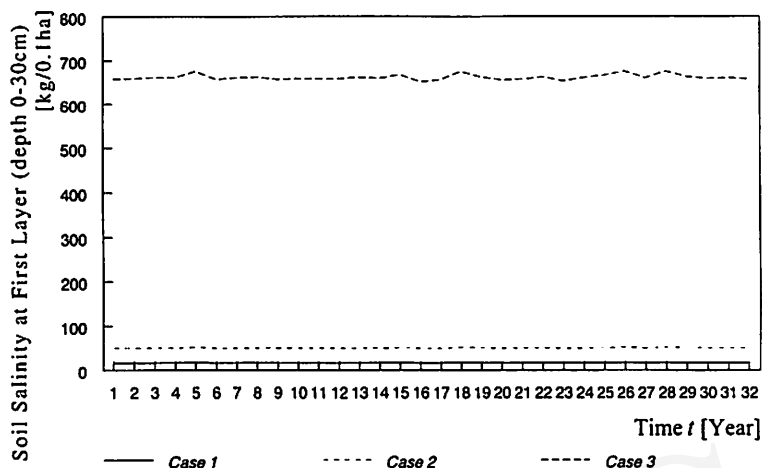


Fig. 4. Fluctuation of soil salinity at first layer (depth; 0-30cm) over 32 years under most undesirable but feasible conditions concerning salinity.

Case1, 2 and 3 present different fluctuation of difference salt concentration of irrigation water. Salt concentration is assumed as 100, 300, 4,260 [Clppm] in turn. Each represents idealistically clean water quality, actually used water quality (KUSUMI, 1995), most undesirable but feasible water quality (FAO, 1989), in turn.

Other "most undesirable but feasible conditions" are, only C of crop year sequence, 7,000 [Clppm] of initial salt concentration of soil salinity, field capacity of initial soil moisture, and $s3$ of irrigation schedule.

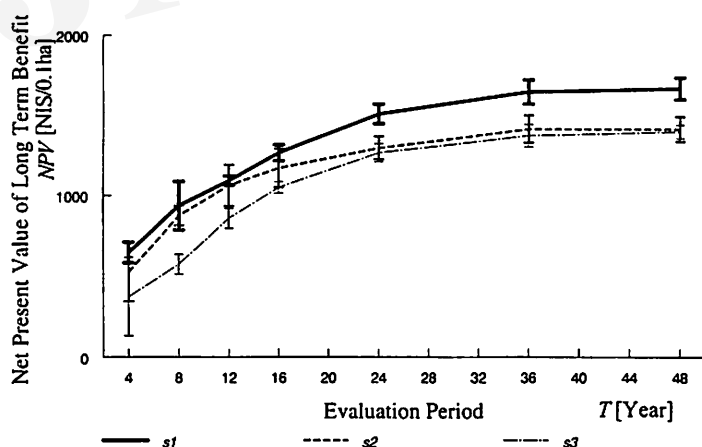


Fig. 5. Sample results as fluctuation of net present value of long term benefit along different evaluation period in *Water Balance Model*.

$s1$, $s2$ and $s3$ present different fluctuation of difference sample irrigation schedule for cotton cultivation. Idealistically, each represents recommended desirable irrigation depth, less irrigation depth to conserve water table, and more irrigation depth to obtain more yield, in turn. Irrigation are assumed as four times on (June 12th, July 2nd, 15th, and 28th). Irrigation depth are assumed as (111, 122, 134, 111), (90, 99, 108, 90) and (138, 151, 165, 138) [mm], in turn (KUSUMI, 1995).

can be applied to other fields.

Leaving analyses of pursuing desirable irrigation style to further studies, some representative sample results are shown to present the performance of these models. An

irrigation pattern is assumed for wheat cultivation. And, three different sample irrigation scenarios ($s1$, $s2$ and $s3$) are assumed for each model for cotton cultivation. These sample scenarios are somehow assumed to reflect the

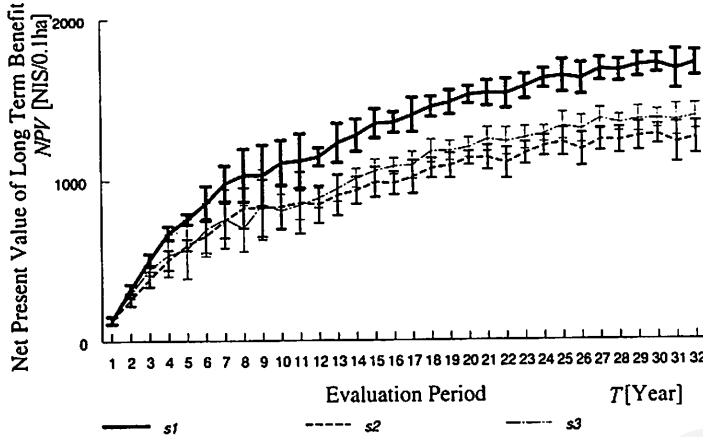


Fig. 6. Sample results as fluctuation of net present value of long term benefit along different evaluation period in *Salt Balance Model*.

$s1$, 2 and 3 present different fluctuation of difference sample irrigation schedule for cotton cultivation. Idealistically, each represents recommended desirable irrigation depth, less irrigation depth to conserve water table, and more irrigation depth to obtain more yield, in turn. Irrigation are assumed as four times on (June 12th, July 2nd, 15th, and 28th). Irrigation depth are assumed as (111, 122, 134, 111), (90, 99, 108, 90) and (138, 151, 165, 138) [mm], in turn (KUSUMI, 1995).

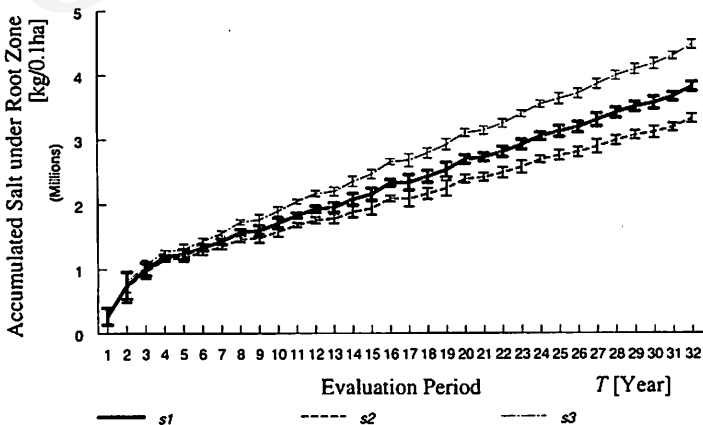


Fig. 7. Sample results as fluctuation of accumulated salt under root zone along different evaluation period in *Salt Balance Model*.

$s1$, 2 and 3 present different fluctuation of difference sample irrigation schedule for cotton cultivation. Idealistically, each represents recommended desirable irrigation depth, less irrigation depth to conserve water table, and more irrigation depth to obtain more yield, in turn. Irrigation are assumed as four times on (June 12th, July 2nd, 15th, and 28th). Irrigation depth are assumed as (111, 122, 134, 111), (90, 99, 108, 90) and (138, 151, 165, 138) [mm], in turn (KUSUMI, 1995).

following ideas, through preliminary simulations to quantify relationship of irrigation depth with yearly benefit, with accumulated amount of *DP*, and with yearly benefit without considering drainage cost. *s1* is the scenario to maximise yearly benefit disregarding waterlogging. *s2* is the scenario to conserve water table level. And, *s3* is the scenario to maximise yearly yield disregarding waterlogging. As a crop year sequence, a sequence of a unit sequence (*WCCC*), that is one year wheat cultivation year followed by three years of cotton cultivation year, is assumed. The value of most of the other variables, such as 10% of discount rate, are listed in Table 1. For instance, Figs. 5 and 6 presents fluctuation of *NPVs* of the three sample scenarios along different evaluation period, simulated by *WBM* and *SBM* in turn. Fig. 7 presents fluctuation of accumulated salt under root zone of the three scenarios along different evaluation period simulated by *SBM*. In each graph, error bars present standard deviation from the averaged value over 10 times of simulation.

As a sample comparison, Fig. 5 showed superiority in the monetary unit of *s1* followed by *s2*, *s3*, in turn, although drainage cost as abating cost of salinization is internalized. As the other sample comparison, Fig. 6 and Fig. 7 together showed trade-off relationship in monetary unit and in non-monetary unit of three sample scenarios. Thus, these models enable to analyse desirable irrigation strategy by comparing *NPV* of different irrigation strategy.

6. Conclusions

Two simulation models, that is, *Water Balance Model* and *Salt Balance Model* are constructed to quantify the conflicts between pursuing short term benefits and sustainable agriculture.

The simulated values of *WBM* when compared with observed variables, showed following characteristics. First, the model was capable of forecasting long term consequence of agriculture in experimental field Gilat, and therefore capable of evaluating the conflict in Gilat. Second, the model can be applied to any field in arid or semiarid zone, after studying the characteristics of the field. It will be at least a guide line to evaluate irrigation agriculture under the risk of

salinization in long term. Third, the model specifies the necessary data set to reinforce such assessment.

Constructing the *SBM* brought about following findings. First, damage of infield salinization is mainly incurred as waterlogging, and effect of salt accumulation in root zone can be easily controlled by regulating salt concentration of irrigation water, within the framework of this research. Second, *SBM* is able to present a guide line to evaluate irrigation agriculture under the risk of salinization in long term in Yizreal Valley. Third, it specified the necessary data set to reinforce the assessment.

Following subjects are left for further studies. It is desirable to replace the yield forecasting system of wheat of *SBM* by a superior system or function. Although water balance of waterlogged root zone at real field is physically not elucidated, research somehow including this may give us preferable consideration. It may also become more accurate if model is expanded to two or three dimension. From economic aspects, comprehensive study to pursue desirable irrigation strategy is expected by applying the models. The economic framework of the models can be expanded to different directions, such as dynamic optimisation, and so on.

Acknowledgements

Most part of this research is carried out under supervision of Prof. YARON, Dan and Dr. WALLACH, Rony of Hebrew University. Also, different data and co-operation were provided by Mr. EFRAIM, Bar and Mr. FLASH, Yigal of Agricultural Ministry of Israel, Dr. PLAUT, Zvi and Dr. HADAS, Amos of Volcani Institute of Israel, Prof. PINTHUS, M, Dr. SARANGA, Y. of Hebrew University, Prof. MORIOKA, T. of Osaka University, Mr. LIVNE, Abri of drainage company Pargei Maim, and Mr. BAR-ILAN, Alex of Kibbutz Sarid, and ISRAELI METEOROLOGICAL CENTRE. Here, I express my special gratitude to all those who have supported this research.

References

- AGRICULTURAL MINISTRY OF ISRAEL (1993MS): Extension Service "Crop Budgets". (Unpublished Data)
- BRESLER, E., MCNEAL, B.L. and CARTER, D.C. (1982): *Saline and Sodic Soils*. Springer-Verlag, 236pp.
- FAO (1986): *Irrigation and Drainage Paper 33 Yield*

- Response to Water*. FAO, 193pp.
- FAO (1989): *Irrigation and Drainage Paper 29 Water Quality for Agriculture*. FAO, 164pp.
- KNAPP, K.C. (1991): Optimal intertemporal irrigation management under saline, limited drainage conditions. In DINAR, A. and ZILBERMAN, D. eds., *The Economics and Management of Water and Drainage in Agriculture*, Kluwer Academic Publishers, 599-616.
- KUSUMI, A. (1995MS): Economic analysis to abate salinization in irrigation agriculture: Case study in Yizreal Valley in Israel. Master thesis at Tsukuba University, 151pp. (in Japanese)
- LETEY, J. (1991): Crop-water production function and the problems of drainage and salinity In DINAR, A. and ZILBERMAN, D. eds., *The Economics and Management of Water and Drainage in Agriculture*, Kluwer Academic Publishers, 209-227.
- LIVNE, A. (1992): *Sequer Melichut*. Palgei Maim co., ltd. (in Hebrew)
- MARANI, A., SHIMSHI, D. and AMIRAV, A. (1966): *The Effect of Time and Duration of Soil Moisture Stress on Flowering, Boll Shedding, Seed and Lint Development, Yield and Lint Quality of Cotton*. Hebrew University 88pp.
- PLAUT, Z. eds. (1993MS): Unpublished Data of Volcani Centre in Israel.
- STRATEENER, G. (1974MS): A Simulation Model for the Economic Analysis under Conditions of Stochastic Rainfall. M.Sc. Thesis Submitted to the Hebrew University of Jerusalem. (in Hebrew)
- STRATEENER, G., YARON, D., BRESLER, E. and SHIMSHI, D. (1975): Simulation model for evapotranspiration of wheat: Effect of evaporative conditions. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE, vol.101, No.1R1, Proc. Paper 11169, March, 13-19.*
- YARON, D., DINAR, A., MEYERS, S. and SEGEV, A. (1983MS): *Optimal Allocation of Water on Kibbutz Farming during the Peak Season of Irrigation of Cotton. Research Report*. The Center for Agricultural Economic Research. Faculty of Agriculture - Rehovot, Israel. (in Hebrew)

灌漑農業の長期的効果予測のための水分・塩分収支の シミュレーションモデルの構築

楠美順理*・森下豊昭**

乾燥地・半乾燥地での灌漑農業では、その長期的効果が不明瞭なために、短期的便益の追究とウォーターロギング、塩類集積の克服、という相反する目的の間にコンフリクトが存在する。最終的には持続可能な灌漑農業戦略の追究を目指し、本論文では、灌漑農業とその影響を評価し、コンフリクトの定量化を可能とするようなシミュレーションモデルの構築を目的とする。イスラエルの二つの農場を圃場例とし、一つの圃場に関し水分収支モデル、もう一方の圃場に関し塩分収支モデルを構築する。モデルは、いずれも灌漑水量、作物年配列を主要操作変数とし、前者に関しては長期的便益、後者に関しては更に地下累積塩分量を目的変数とする。両モデルは、ドライビングモジュール、作物モジュール、休閑期モジュール、排水モジュールで構成される。作物モジュールでは、蒸発散推定、土壌水分量予測、(後者では土壌塩分量予測を含む)、収量予測を行う。通年の水分、または塩分収支のシミュレーションのために、休閑期モジュールでは、休閑期における土壌水分量の変動を取り扱う。排水モジュールでは、地下水面の高さに応じた排水施設の導入を取り扱う。ドライビングモジュールはこれらモジュールを統括し、目的変数の計量を行う。水分収支モデルは、灌漑農業の長期的影響評価を可能とするものと確認された。塩分収支モデルは、灌漑農業の長期的影響評価のガイドラインを示すよう、データの不足する項目を操作変数化して構築された。

*大阪大学工学研究科

**筑波大学応用生物化学系

(受付：1998年1月16日，受理：1998年6月12日)

Effects of the Peat Application on the Improvement of Alkali Soil

— A Case Study of Maize Cultivation in the Field of Keerqin Desert, China —

Fenghe JIN*, Yasushi NISHIZAKI*, Huaining YIN**, Hongxiang BAI**,
Yingshun ZHENG**, Chunyu WANG*** and Tatsuaki YAMAGUCHI*

The application of local peat (from Beisiping, Fushun, Liaoning Province, China) for the amelioration of a highly alkali soil cropped to maize was carried out in a field of the Keerqin Desert (Kangping, Shenyang, Liaoning Province, China) without artificial irrigation. The total experimental area was 10m × 11.5m, consisting of two treatments (0, 10 kg peat per m²) without replication.

The results showed that chemical and physical properties of the alkali soil were improved by the peat application resulting in marked increases in the yield of maize. Soil pH, exchangeable sodium percentage, and total soluble salts decreased from 9.5 to 7.5, from 20.5 to 6.4%, and from 0.45 to 0.41 g/kg, respectively. The cation exchange capacity, organic matter content, total nitrogen content, total phosphorus content, available nitrogen and available phosphorus content increased from 11.2 to 29.5 cmol/kg, from 6.7 to 107.6 g/kg, from 0.47 to 3.28 g/kg, from 0.52 to 1.05 g/kg, from 38.2 to 228.7 mg/kg and from 1.7 to 10.4 mg/kg, respectively.

The soil hydraulic conductivity markedly increased from 1.26×10^{-5} to 2.17×10^{-3} cm/s, water content increased from 22.4 to 35.0%.

Through the improvement of physical and chemical properties of the soil, the maize yield increased dramatically from 2,430 to 5,520 kg/ha (127% increases) with the peat application.

Key Words: Alkali soil, Peat, Keerqin Desert, Exchangeable sodium, Maize, Field cultivation

1. Introduction

Alkali soil is a type of soil with low productivity, due to excessive quantity of exchangeable sodium in the soil. Generally, this type of soil occupies a limited area, distributed in isolated spots, and can be found in regions having a semi-arid or the sub-humid climate (WAN, 1985).

The Keerqin Desert is located in the Northeast of China, where both desertification and salinization of soil are progressing rapidly and alkali soils are distributed widely. The total alkali soil area amounts to 23,200km² or 16.9% of the total area of Keerqin Desert. The most serious

problem of alkali soil is the salinity hazard to plants by excessive exchangeable sodium. Therefore, the development of soil improvement technology, which can prevent salt accumulation and remove Na from soil, are increasingly needed in this district. A previous report (JIN and YAMAGUCHI, 1995) reviewed current alkali soil remediation techniques in the area, such as the planting of rice, grass, and trees; flood irrigation technique; and the application of chemical amendments, *e.g.*, gypsum and fertilizers. In each case, water holding capacity and fertility of soil were improved, and the alkalinity was reduced, but each had limitations for a wide application.

In this study, a field experiment was conducted

* Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275, Japan.

** Department of Geography, Liaoning Normal University, 850, Huanghe Road, Dalian, 116022 China.

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

(Received, September 18, 1997; Accepted, May 29, 1998)

to assess the improvement effect of peat on the growth of maize on the alkali soil of the Keerqin Desert, since peat is widely distributed also in this district of China. Improvement effects of peat application on water holding capacity and alkalinity were previously indicated by the successful cultivation of Chinese cabbage and pak-choi rape (JIN *et al.*, 1995a, b; NISHIZAKI *et al.*, 1995; JIN *et al.*, 1996), suggesting the effectiveness of peat in the neutralization of alkalinity.

2. Materials and Methods

1) Materials

The peat was transferred from Beisiping, the Liaoning Province of China to the site (350km from the experimental site, Fig. 1). The peat material was air dried, and subsequently ground to pass through a 5mm sieve in preparation for the experiment. The main properties of the peat are summarized in Table 1.

2) The field conditions

(a) Natural conditions of the experimental site

The experimental field is located in Shengli village farmyard, Kangping County, Liaoning Province of China. The exact position of the

location is 42°08' - 43°02'N, 122°44' - 123°45'E, situated in the Liaohe valley. During the experimental year, the mean air temperature was 8.2°C, and the mean relative humidity was 58%. The total precipitation was 510mm mainly concentrated during the growing season of maize from May to September. The evaporation capacity was about 1,907 mm, and the accumulated temperature was 3,166°C (daily mean temperature above 10°C) through the duration (Kangping County Weather Office).

(b) Chemical and physical properties of the soil

Properties of the soil at the experimental field are presented in Table 2. The electrical conductivity and exchangeable sodium percentage (ESP) of the soil were 1.06 dS/m and 23.6%, respectively, and the pH was 9.45, with the characteristics of an alkali soil (U.S. SOIL SURVEY STAFF, 1951). The main compositions of the soluble salt were carbonate and bicarbonate. In terms of physical properties, the soil was highly dispersed with low water permeability.

Description of the soil profile was as follows. 0-9cm: light brownish gray, blocky structure, light loam, few plant roots; 9-18cm: heavy brownish gray, angular columnar structure, compact and moist, light loam, few plant roots exist; 18-44cm:

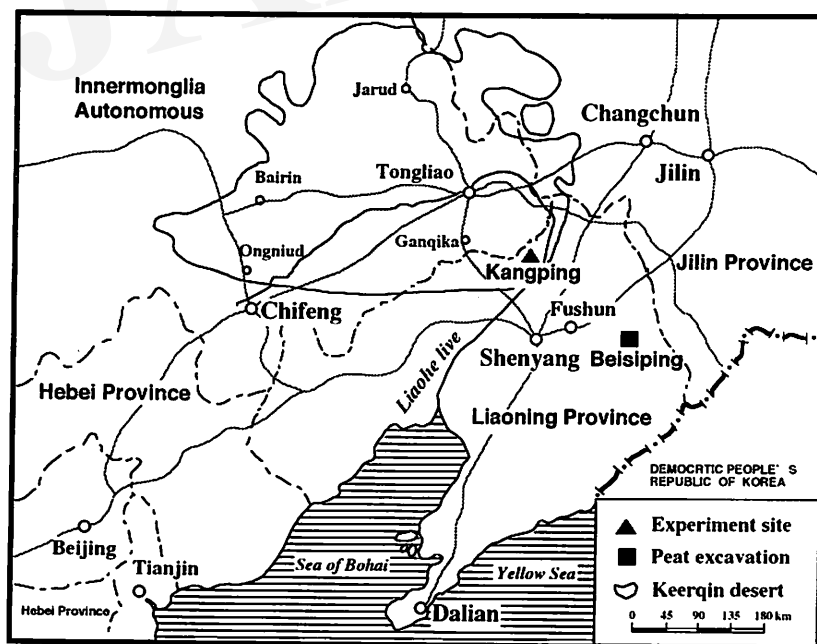


Fig. 1. Experiment site and the location of peat excavation.

heavy brownish gray, no structure, sandy, loose and moist, very few plant roots; 44cm-: brown gray, small blocky structure, light loam, loose and moist, very few plant roots.

The depth of ground water level was about 0.5-1.5m.

3) The experimental method

(a) The design of maize cultivation

The maize of the local 'Tie dan' type was selected for the experiment. The total experimental area was 11.5m × 10m consisting of two plots of 7.5m × 2m. There set two treatments each assigned to one plot without replication, since the experimental area was relatively uniform. Around the plot area, 2m wide prevention belt was allocated. The two plots were as follows: control plot; 10 kg m⁻² (100 t ha⁻¹) peat application plot. After plowing and ridging, the peat mixed with urea (30g m⁻²) was applied (the same amount of urea was supplied to the control plot), and the soil was cultivated to a depth of about 15cm to incorporate the peat and urea fertilizer as uniformly as possible.

The experiment was carried out from May 20 to September 25, 1995 without the artificial irrigation. Furthermore, in the exuberant period

of maize growth (in the middle of July), additional 22.5 g m⁻² of urea was applied during the intertillage weeding to the control and peat application plot.

(b) Soil analysis

Soil samples were taken before planting and immediately after harvest. For analysis, the soil samples were divided into plow layer (0-15cm) and subsoil layer (15-65cm). Moreover, in order to investigate changes occurring in each layer, soil samples were collected from the 0-5cm, 5-15cm, 15-30cm, 30-45cm, and 45-65cm layers. Air dried, fine soil samples (1mm pass) were prepared for the analysis.

The pH, EC, water soluble ions contents of soil, exchangeable cation properties, humic acid, organic matter, total and available nutrient contents of soil were measured in accordance with Chinese standards (NANJING INSTITUTE OF PEDOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, 1978; Su, 1988).

The soil hydraulic conductivity, apparent-specific gravity, water content, and three phase distribution of soil were measured in accordance with JSF T 311-1990, JSF T 111-1990, JSF T 121-1990 and JSF T 191-1990, respectively (JAPANESE SOCIETY OF SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION, 1985).

Table 1. Main properties of the Beisiping peat (dry basis).

pH ^{a)}	CEC ^{b)} (cmol/kg)	Exchangeable cation (cmol/kg)				Organic matter (g/kg)	Ash content (g/kg)	Humic acid (g/kg)	Total N (g/kg)	Total P (g/kg)	Total K (g/kg)
		Ca	Mg	K	Na						
4.83	129.3	28.0	19.8	1.7	1.1	774.5	225.5	438.0	10.2	1.1	12.7

Avail. N (mg/kg)	Avail. P (mg/kg)	Avail. K (mg/kg)	Functional group ^{c)} (cmol/kg)		Elemental analysis (wt%, d.a.f.)				Atomic ratio (mol%)	
			COOH	phenolic OH	C	H	N	O(diff)	H/C	N/C
931.6	21.8	242.0	299.8	67.0	69.1	6.2	1.6	23.0	106.8	2.0

a) measured in soil to water ratio of 1:2.5, b) cation exchange capacity, c) contents of functional groups of humic acid.

Table 2. Main properties of the experimental soil (before treatment)^{a)}.

pH	EC ^{b)} (dS/m)	ESP ^{c)} (%)	CEC (cmol/kg)	Exchangeable (cmol/kg)			TSS ^{d)} (g/kg)	Total(g/kg)			Texture	Hydraulic Conductivity (cm/s)
				Na	Ca	Mg		N	P	K		
9.45	1.06	23.6	12.9	3.0	7.2	1.8	0.5	0.47	0.52	24.1	SL ^{e)}	1.26 × 10 ⁶

a) 0-15 cm layer, b) measured in soil to water ratio of 1:5, c) exchangeable sodium percentage, d) total soluble salts, e) sandy loam (36.2% of small size fraction under 0.05 mm)

Table 3. Change in the soil chemical properties with peat application.

Peat apply ^{a)} (kg/m ²)	Sampling	Depth (cm)	pH	ESP (%)	TSS (g/kg)	CEC (cmol/kg)
0	Before planting	0- 5	9.5	25.2	0.46	13.1
		5-15	9.4	22.1	0.52	12.7
		15-30	9.2	16.9	0.32	13.6
		30-45	9.0	11.0	0.34	15.3
		45-65	9.0	9.4	0.45	13.1
	After harvest	0- 5	9.3	19.6	0.59	13.7
		5-15	9.4	24.3	0.58	10.8
		15-30	9.4	20.6	0.71	15.2
		30-45	9.2	10.8	0.82	16.3
		45-65	9.1	10.0	0.79	14.7
10	Before planting	0- 5	9.4	17.0	0.44	12.1
		5-15	9.5	22.2	0.45	10.8
		15-30	9.4	19.5	0.61	12.4
		30-45	9.3	20.8	0.64	15.7
		45-65	8.9	10.3	0.65	14.2
	After harvest	0- 5	7.2	3.1	0.41	31.6
		5-15	7.7	8.1	0.41	28.5
		15-30	9.2	13.7	0.29	14.1
		30-45	9.1	9.5	0.39	16.5
		45-65	9.3	13.2	0.43	17.1

a) 0-15 cm layer.

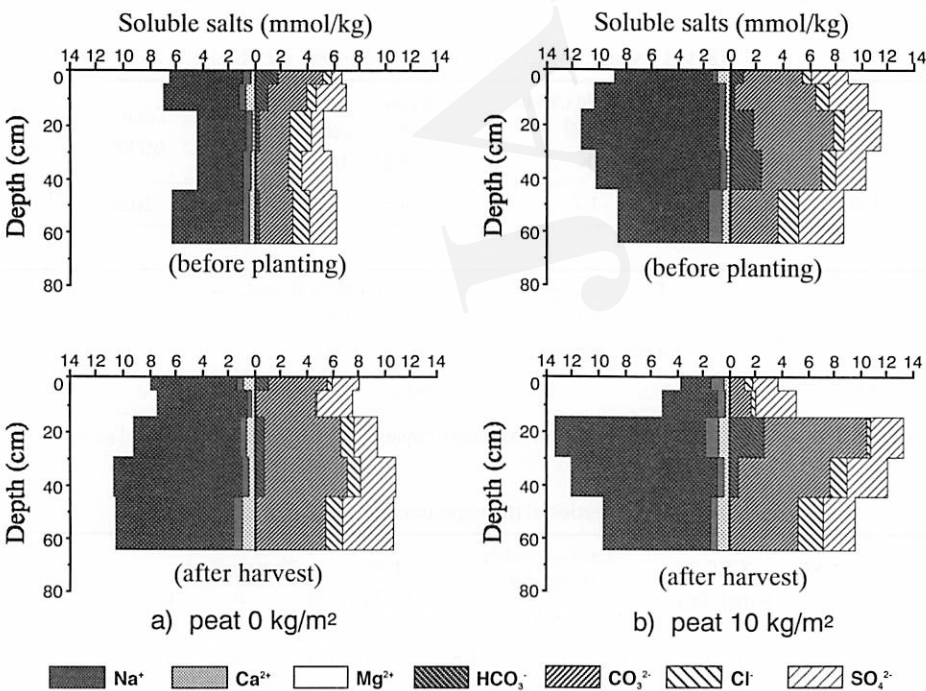


Fig. 2. Soluble salt distribution in the soil profile before planting and after harvest.

3. Results and Discussions

1) Chemical properties of the soil

Changes of chemical properties of the experimental soil with depth are summarized in Table 3. And Fig. 2 shows the changes of soluble ions concentration with depth and cultivation. As a result of the application of peat to the alkali sandy soil and the cultivation of maize, the improvement of the plow layer (0-15cm) was remarkable. Comparing values for the plow layer before planting and after cultivation (at harvest), peat applications resulted in pH decreases from 9.5 to 7.5, in ESP decreases from 20.5 to 6.4%, in TSS decreases from 0.45 to 0.41g/kg, in CEC increases from 11.2 to 29.5 cmol/kg. The amounts of Na^+ , HCO_3^- and CO_3^{2-} ions decreased greatly, Ca^{2+} and Mg^{2+} ions increased, and SO_4^{2-} , and Cl^- ions unchanged.

The effect of peat application was remarkable in terms of removal of sodium ion. This is attributable to the cation exchange nature of humic acid in peat, because of its high content of carboxyl and phenolic hydroxyl groups. By mixing of the peat with a large cation exchange nature, the CEC of the soil increases. Selective exchange of the cations by humic acid are performed in the priority of $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ (YAMAGUCHI *et al.*, 1997). Sodium ion in the soil is leached from the soil as water soluble sodium humate, while calcium and magnesium were absorbed in the soil in the form of water insoluble calcium humate and magnesium humate. In the soil section, the distribution feature of Ca^{2+} and Mg^{2+} in the peat plot increased from the plow layer to the subsoil layer,

and Na^+ in the peat plot decreased from the plow layer to the subsoil layer, and the Na^+ ion in the peat plot increased from the plow layer to the subsoil layer (Fig. 2).

The total anionic content also changed in connection with the change of total cationic content. Especially, when CO_3^{2-} was increased, Na_2CO_3 reacted with CaSO_4 and precipitated into CaCO_3 resulting in the decrease of CO_3^{2-} . Since HCO_3^- decreases and changes into CO_3^{2-} under the alkaline environment, the reduction of exchangeable sodium affords the lowering of the amounts of Na_2CO_3 , NaHCO_3 , pH, and ESP of the soil. More important view is that ESP increases with the increase of Na^+ , but it can not say that soil alkalinity also increases with the increase of HCO_3^- of the soluble salt.

Both the organic matter and nitrogen content were very low in the original soil, but the nutrient content increased by the mixing of peat (Table 4). The quantity of organic matter in the cultivation layer with peat increased by 10-20 times more than that of the control area. The total N, available N, total P, and available P increased by 4-6 times, 5-8 times, 2 times, and 5-10 times, respectively.

The increase in total P might be caused by the dissolution of insoluble $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ accompanied by the addition of peat. The amount of available K is not influenced by the mixing of peat but it remains constant. It might be considered that potassium minerals in soil (biotite [$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$] and illite [$\text{KA1}_2[(\text{Al}, \text{Si})\text{Si}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$]) dissolve in alkaline conditions, and they afford a large effect on the supply of potassium from the lower layer accompanied by evaporation of moisture (WAN, 1985).

Table 4. Organic matter and nutrient contents of the soil with peat application after the cultivation.

Peat apply ^{a)} (kg/m ²)	Depth (cm)	Organic matter (g/kg)	Total N (g/kg)	Total P (g/kg)	Total K (g/kg)	Avail. N (mg/kg)	Avail. P (mg/kg)	Avail. K (mg/kg)
0	0- 5	9.2	0.48	0.54	23.7	44.0	1.2	62.0
	5-15	5.5	0.47	0.51	24.5	35.5	1.9	62.0
	15-30	6.6	0.53	0.56	24.6	47.1	0.9	52.0
10	0- 5	115.6	3.31	1.11	22.2	221.8	10.2	78.0
	5-15	103.6	3.26	1.02	21.7	232.1	10.5	78.0
	15-30	16.0	0.63	0.53	25.2	54.6	4.4	76.0

a) 0-15 cm layer.

Table 5. Changes in the soil physical properties with peat application.

Peat apply ^{a)} (kg/m ²)	Hydraulic conductivity (10 ⁻⁵ cm/s)	Apparent- specific gravity (g/cm ³)	Water content (%)	Three phase distribution (%)		
				solid	liquid	gas
0	1.26	1.74	22.4	57.8	22.4	19.8
10	217	1.30	35.0	50.0	35.0	15.0

a) samples were taken from 0-15 cm layer.

Table 6. The effect of peat application to the alkaline sandy soil on maize yield and yield components.

Peat apply ^{a)} (kg/m ²)	Ear number (number/ha)	Average ear length (cm)	Average ear weight (g)	Thousand grain weight (g)	Grain yield (kg/ha)	Increase over control (%)
0	13,500	15.0	180	258	2,430	-
10	28,000	18.6	197	302	5,520	127

2) Physical properties of the soil

The physical properties of the soil are shown in Table 5. Although the saturated hydraulic conductivity of the control soil was very low with a value of 1.26×10^{-5} cm/s, that of the peat treated soil was improved to 2.17×10^{-3} cm/s. The apparent-specific gravity increased from 1.74 to 1.30 g/cm³. The water content increased from 22.4 to 35.0%. Considering the changes of the three phases distribution, the increase of the water holding capacity of the soil was remarkable due to mixing of the peat.

Alkali soils are used to have low water permeability and low water retentivity, because of the existence of a high concentration of sodium ion on to such small particles as clay and colloid (POLJAKOFF-MAYBER, 1975). The improvement of the physical properties by peat are considered to be caused by the reduction of sodium ion. Although the silt, clay and colloid portions of experimental soil are about 36%, the formation of granular structures might be promoted in the soil by the supplement of humic acid from peat into such clay and colloid containing soil.

3) The maize yield

The effects of peat amelioration are shown in Table 6. The yield of maize increased to 127% of the peat treated plot as compared to the control plot. The number of ears, average ear length, average ear weight, and thousand grain weight

also increased greatly.

The reason of these high yields is attributable to the removal of salt damage, the increase in available nutrient, and the improvement of the physical properties of soil. The removal of salt damage might be the most important among the above three factors. The pH value of the soil was lowered in connection with the lowering of sodium ion by the mixing of peat. The growth (especially roots) of crops would be enhanced through the improvement of the alkali soil by the above-mentioned factors.

4. Conclusion

The production of maize was successful in alkaline sandy soil with peat acting as a natural organic ameliorant. Through the experiment the foregoing effects on the soil became clear. The lowering of exchangeable sodium, pH and ESP were remarkable. The increase of CEC and supply of nutrients could be achieved with fertilizing effect. The water holding capacity and bulk density of the soil had been improved to maintain high water permeability. The application of the peat improved the chemical and physical properties of the soil, resulting in the high maize yield.

Acknowledgement

The authors are grateful to Professor T. SUN (Director Ecological Application Institute of Shenyang, Chinese

Academy of Sciences) for his support in the field works, also thankful to Shengli Farm in the Kangping county which provided a experimental site and Kangping Weather Office which provided weather data for performing this research, and moreover very deeply thankful to Dr. T. HUIJISAWA, and Professor Y. OHTA for giving us useful advices about this research.

Reference

- JAPANESE SOCIETY OF SOIL SCIENCE and PLANT NUTRITION (1985): *Method and Caption of Quality of Soil Test*. 43-48, 49-53, 116-124, 271-288.
- JIN, F. and YAMAGUCHI, T. (1995): The present situation of the technical amelioration of saline soil in Keerqin Desert, China. *J. Arid Land Studies*, 5: 1-5.
- JIN, F., YIN, H., BAI, H., ZHENG, Y., NISHIZAKI, Y. and YAMAGUCHI, T. (1995a): Research on the feasibility test of using peat to improve desert soil (1). *J. Liaoning Normal Univ. (Natural Science)*, 69: 66-70. (in Chinese)
- JIN, F., NISHIZAKI, Y., YAMAGUCHI, T., YIN, H., BAI, H. and ZHENG, Y. (1995b): Soil amelioration with peat for semi-arid zone. *Abstracts of the 6th Meeting of the Japanese Association for Arid Land Studies*, 19-20.
- JIN, F., NISHIZAKI, Y., YIN, H., BAI, H., ZHENG, Y. and YAMAGUCHI, T. (1996): Effects of the peat application on the physical and chemical properties of soil and growth of plants in sandy soil – Statistical analysis for pot cultivation of Chinese cabbage –. *J. Arid Land Studies*, 6: 15-23.
- NANJING INSTITUTE OF PEDOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES (1978a): *Analysis of the Soil Physical and Chemical Properties*. Shanghai Kexuejishuchubanshe, 62-66, 76-77, 97-100, 105-107, 113-114, 126-127, 132-141, 146-156, 199, 208-209, 211-212, 222-223, 227-229, 231. (in Chinese)
- NISHIZAKI, Y., YAMAGUCHI, T., JIN, F., WANG, Z. and MA, J. (1995): A fundamental study on the greening of desert using peat. *Abstracts of the 5th Meeting of the Japanese Association for Arid Land Studies*, 17-18.
- POLJAKOFF-MAYBER, A. (1975): *Plants in Saline Environments*. Springer-Verlag, N. Y.
- SU, J. (1988): *The Soil Agricultural Chemistry Analysis*. Nongye Jishuchubanshe, 347-349. (in Chinese)
- U. S. SOIL SURVEY STAFF (1951): *Estimation and Mapping of Salts and Alkali on the Soil. Soil Survey Manual*. U. S. Dept. Agr. Handbook 18, 425.
- WAN, H. (1985): A study on the exchangeable sodium and its damaging effect in alkali soil. *Progress of Soil Science*, 6: 10-17. (in Chinese)
- YAMAGUCHI, T., YAZAWA, Y., YAZAKI, F. and ONOE, K. (1997): Characteristics of humic acid extracted from weathered coal and tropical peat with aqueous ammonium solution. *J. Japan Institute of Energy*, 76 : 491-499.

ピートによるアルカリ土壌の改良効果 —中国カルチン沙漠におけるトウモロコシ露地栽培のケーススタディー—

金 鳳鶴*・西崎 泰*・尹 懷寧**・白 鴻祥**・鄭 応順**・
王 春裕***・山口達明*

中国カルチン沙漠の南東部のアルカリ土壌の畑（遼寧省瀋陽市康平県）で、近く（遼寧省撫順市北四平）に産出する天然腐植資材であるピートを用い、アルカリ土壌改良実験を行った。実験場の面積は10m×11.5mで、二つのピート処理区（ピートの処理量は土壌に対してそれぞれ0, 10kg/m²）を設けトウモロコシの栽培実験を行った。灌漑は行わなかった。

ピート処理によるアルカリ除去効果、保肥・肥料効果による土壌化学性の改良効果が認められた：すなわち、土壌のpH、アルカリ度、塩分含量はそれぞれ9.5から7.5まで、20.5から6.4%まで、0.45から0.41g/kgまで低下した。土壌の陽イオン交換容量、有機質含量、全窒素、全リン、有効態窒素および有効態リンはそれぞれ11.2から29.5cmol/kgまで、6.7から107.6g/kgまで、0.47から3.28g/kgまで、0.52から1.05g/kgまで、38.2から228.7mg/kgまで、1.7から10.4mg/kgまで増加した。

ピート処理による土壌の透水性・保水性の向上による土壌物理性の改善効果が認められた：土壌の透水係数は 1.26×10^{-5} から 2.17×10^{-3} cm/sまで増加し、含水比は22.4から35.0%まで増加した。

ピート処理による土壌理化学性の改良および肥料効果による増産が認められ、コーンの収穫量は2,430から5,520kg/haまで増加（127%増加）した。

*千葉工業大学

**遼寧師範大学

***中国科学院瀋陽応用生態研究所

（受付：1997年9月18日，受理：1998年5月29日）

小特集 沙漠工学分科会・バイオビレッジ分科会合同講演会 (第8回沙漠工学講演会) 講演要旨集

日本沙漠学会沙漠工学分科会*

概 要

本稿は、日本沙漠学会沙漠工学分科会の第8回講演会として、沙漠工学分科会とバイオビレッジ分科会の合同で行われた講演内容をプログラムとともにまとめたものである。本講演会は、1997年7月22日、成蹊大学学園史料館会議室においておよそ40名の出席者を得て開催された。講演会への参加者を増やすための一つの方法として二つの分科会の合同開催とし、内容のバリエーションを広げた結果、興味深い講演がなされたが、会員への趣旨の徹底という面から方法論に問題が残った。なお、丸井智敬氏等の講演は現在進行中の研究であり、とりまとめになおしばらくの時間が必要とのことで、完成原稿の提出がなかったので掲載しなかった。

プログラム

- 13:20-13:30 開会挨拶：沙漠工学分科会副会長
小島紀徳（成蹊大学工学部）
- 13:30-14:30 講演Ⅰ：
「沙漠地帯の新移動メカニズムの開発」
丸井智敬（千葉職業能力開発短期大学校）
浅間 一・遠藤 勲（理化学研究所生化学システム研究室）
- 14:30-15:30 講演Ⅱ：
「中国内蒙古ホルチン沙漠におけるバイオビレッジ建設構想―庫倫旗額勒順鎮における沙漠化防治モデル事業―」

長濱 直（日本沙漠学会事務局）

15:50-16:50 講演Ⅲ：

「中国の沙漠化・緑化と食料危機」

真木太一（農業環境技術研究所気象管理科）

16:50-17:00 閉会挨拶：沙漠工学分科会会長

安部征雄（筑波大学農林工学系）

本分科会の現況としては、まず、1997年7月に幹事が改選され、安部征雄分科会会長のもとでの正式な新体制が発足し、活動の活性化への模索がなされていることを報告します。学会および分科会を取り巻く社会情勢の変化は予想以上の組織としての対応適応性の検討を求めているようです。幹事会を中心に会員の皆様の意見、提案、アイデア等を生かしつつ、新たな活動を展開していこうと考えておりますので、よろしくご支援、ご協力の程お願いします。

つぎに、昨年9月オーストラリアのカルグーリーで開催された“Desert Technology IV”は当分科会関係者が20名近く参加し、成功裡に終了しました。その概略は「おあしす」21号に報告してありますし、会議で発表された論文は「沙漠研究」7巻特別号として1998年4月に発行されました。

また、乾燥地に関する教科書を目指した「沙漠工学」（森北出版）の刊行は予定が遅れていましたが、完成間近となっております。

（文責：安部征雄）

Special Reports
Proceedings of Joint Symposium of Research Groups for Arid Land
Technology and Bio-village
(Eighth Symposium on Arid Land Technology)

The Japanese Research Group for Arid Land Technology*

This special report is the proceedings of joint symposium of research groups for Arid Land Technology and Bio-village (The 8th Symposium of The Japanese Research Group for Arid Land Technology) held at Seikei University, Musashino-shi, Tokyo, on July 22, 1997.

The first lecture was a topic for new technical development given by Dr. Tomohiro MARUI, Poly-Tech-College Chiba, on "Development of a new transfer mechanism at desert areas" . Unfortunately, this manuscript was not contributed because of in the process of research and development.

The second lecture was a case study of desert development given by Mr. Tadashi NAGAHAMA, Japanese Association for Arid Land Studies, on "Biovillage concept in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China – A model project for prevention of desertification at Elesun Zhen (Sumu) in Khuriye Banner, Inner Mongolia – " .

The last lecture was given by Dr. Taichi MAKI, National Institute of Agro-Environmental Sciences, on "Desertification and greening in China and food crisis" .

*c/o Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba.
1-1-1Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8572, Japan.

中国内蒙古ホルチン沙漠におけるバイオビレッジ建設構想 —庫倫旗額勒順鎮における沙漠化防治モデル事業—

長 濱 直*

Biovillage Concept in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China — A Model Project for Prevention of Desertification at Elesun Zhen (Sumu) in Khuriye Banner, Inner Mongolia —

Tadashi NAGAHAMA*

1. バイオビレッジ建設構想の基本概念

バイオビレッジ建設構想は、沙漠化が進行している地域を対象としている。まず、生態系維持のバックボーンとなる防風・防砂林等を兼ねた環境林の育成を行い、自然生態系の蘇生化と同時に沙漠化の防止を目指している。さらに、沙漠化防治の概念(図1)のように永続的に治めていく意味を込めて、沙漠化防治を行うべく、その地域の自然生態系と調和がとれ持続可能で自立した緑豊かな村落社会、これをバイオビレッジを称しているが、この実証モデルを地域住民と共に学びながら創つていこうと言うものである。沙漠化防治を達成するためには、まず住民の生活を安定させ続けることが成功の鍵であり、地元住民自身で生活の安定を維持できるような総合的なシステムを確立することが必要である。

バイオビレッジの基本的な構成要素は、バイオビレッジの概念図(図2)に示したように、①簡易都市機能地区、②住宅地区、③農業地区、④畜産地区、⑤林業地区、⑥水産地区、⑦水源地区、⑧水処理地区、⑨エネルギー製造地区、⑩リサイクル処理地区、⑪簡易工場地区、⑫貯蔵施設地区、⑬レクリエーション地区、⑭その他インフラストラクチャの14区から構成される。これらの構成要素が全体としてうまく調和がとれた村落社会を目指すものである。いくつかの地区について基本的な機能、施設・技術、運営上の要点等について記述する。

①簡易樹能地区は、全体の運営のコントロールセンタ的な機能を果たす地区で、行政、教育、医療、衛生、

文化、通信、流通、などの必要最小限の簡素な施設からなる。さらに、沙漠に関する研究施設、外部からのボランティアや援助物資の受入施設も確保し、学問的交流や援助活動を受けやすくする。運営システムは簡素にして、祖既には先進国から各分野の専門家の派遣が必要だが、徐々に自立を目指す。生活の安定化、活性化と同時にバイオビレッジ内の緑化と周辺地域の植林を強力に進めるように運営する。

⑨エネルギー製造地区は、バイオビレッジ内で必要な電気、熱、燃料などを生産し供給する地区である。太陽光発電、風力発電、太陽熱温水製造、アルコール・メタン発酵、木炭・練炭製造など自然エネルギー、バイオマス変換技術を用いる中小規模、丈夫で簡易な構造、運転も容易で維持管理もしやすく、環境を悪化させない技術を用いた装置群から構成される。

⑪簡易工場地区は、バイオビレッジ内で必要な食品、医療、家具、機材、道具などの生活必需品を製造する地区である。先端ハイテク技術よりも、先進国では大量生

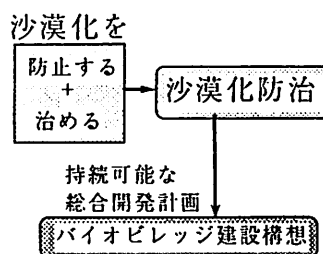


図1. 沙漠化防治の概念。

*日本沙漠学会バイオビレッジ分科会。(日本バイオビレッジ協会)

*Commission of Biovillage, The Japanese Association for Arid Land Studies. (Japan Biovillage Association)

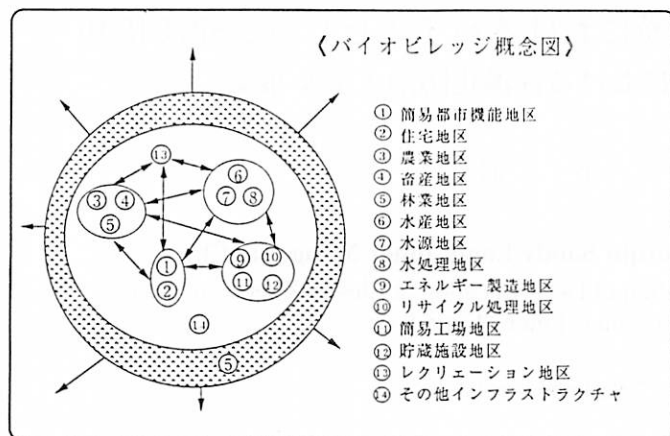


図2. バイオビレッジ概念図.

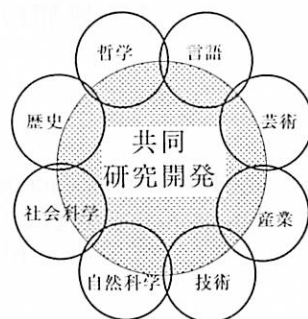


図3. 総合的アプローチ.

産に対応できない等の理由でほとんど使われていない中間技術も活用する。中小規模であり熟練を必要としない、高齢者でも操作できるような技術を中心とする。

各地区は相互に複雑に関連しているので、物質系・エネルギー系・生態系などの総合バランスを十分に検討しなければならない。種々のプランテーションのように、外貨を得るために大規模に製品をつくるための土地の利用ではなく、住民が自立生活するための農業・林業・畜産業・漁業・工業である。生産、加工、利用、処理などが永続的に自主管理され、リサイクル型の社会を構築していくものである。

今までに記述したことは主として技術面からのものであるが、持続的に自立生活が営まれるには、社会経済・文化倫理などが全体として融合し、調和されなければならない。「われわれの子孫にこの素晴らしい大地を残そう!」と言う共通理念のもとに、図3の総合的アプローチに示すように、哲学、歴史、社会科学、自然科学、技術、産業、芸術、言語等幅広い分野の研究者および、沙漠に強い関心がある者が協力して実施することが必要である。非常に困難で複雑な要因を含んでいる難題に対し、その要因の一つ一つについて個別に対処していくよりも、関係する者が同じ目的のもとに一致協力して、現状の技術・方法を基に総合的に検討し、全部まとめて一挙に解決していく方法をとるべきである。

2. 実施場所：中国内蒙古自治区哲里木盟庫倫旗額勒順鎮烏旦他拉（図4）

この地をバイオビレッジ建設構想の建設地として選定した理由は、沙漠化が進んでいるが、良質な水が得やす



写真1. 砂の移動で昨年まで見えていた電柱が埋まってしまった。

く、植林の活着率は平均80%と高い。さらに地元政府と住民の沙漠化防止への意欲が強く、住民は非常に勤勉、我が国から最も近い沙漠地帯でありバイオビレッジ建設の成功の確立が非常に高い地域と判断したためである。

3. 額勒順鎮におけるバイオビレッジ建設構想

基本概念に基づき、額勒順鎮の地元にあつた内容のバイオビレッジ建設を、地元政府・住民と共に学びながら青写真を作成し、順次具体化する。実施の主体は現地の政府機関・地元農牧民・学校および日本沙漠学会会員を中心とし、学問的研究開発と現実的な沙漠化防治事業の両方の要素を併せ持つ活動を目指している。表1の素案はまだ素案の素案程度であり、今後現地基礎調査を行い、地元農牧民と協力しながらより現実に近づけていく。

4. 地域の状況

大陸性半乾燥気候、年間降雨量は約350mm、地元住民の話によると数十年前は森と草原の地で、野生動植物

の宝庫であったが、主として人間の経済活動による不合理な土地の利用（乱開墾、粗放管理、過密放牧等）により植物相が退化して沙漠化が進行している。土地の生態系は脆弱で、農・牧業の生産力は低く不安定となり、地域住民の生活水準は低く過疎化が進み、春先の強風による砂丘の移動で田畑が埋もれる等、沙漠化に拍車がかかっている（写真1）。

5. 1995年度の活動実績

6月と9月に現地調査を実施。地域の状況は、地元西風と住民の沙漠化防治への熱意等から、バイオレッジ建設の可能性が高いと判断した。10月に烏旦他拉村の共有地500haを25年間無償貸与された。



写真2. コンクリート柱に金網の牧柵、ロバが活躍する。



写真3. 強風の中での植林作業、人々の笑顔が嬉しい。



写真4. 牧柵施工後の初めての夏、草原が蘇生している。

6. 1996年度の活動実績

環境事業団地球環境基金の助成を得て、放牧家畜の侵入を防ぐために周囲に牧柵（12.5km）を築き、一部の防風・防砂林の植林を行った。また基礎調査として、気象（気温・湿度・風向・風速）観測、土壌・水質調査を実施した。地元政府関係者約20名の沙漠化防止に関する意識調査の結果では、沙漠化防止への意欲が非常に強いことがわかった（写真2）。

7. 1997年度の活動

環境事業団地球環境基金と（財）イオングループ環境財団の助成を得て以下の事業を実施している。

- (1) 縦横200m毎に4列の防風・防砂林として、1997年4月中に総計約25万本植林した。地下水位が低い地域には主にポプラを、高い地域には柳を植林し、牧柵の内側には沙棘や紫穗槐等の灌木も植えた（5月には農作業が始まるので、その前に千人近い住民が林業局の指導により約半月で25万本を植林。それともかなりの強風の中、この実行力に感動した）（写真3、4、5）。
- (2) 地元の中学校と共同で気象、土壌・水質の観測調査を行井植林後の変化を長期間継続的に観察する。

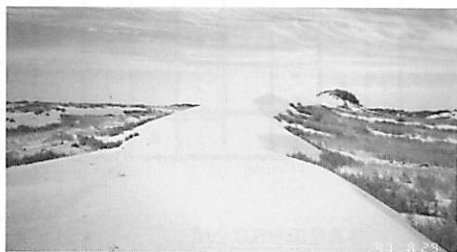


写真5. 移動砂丘に迫る草の勢い。

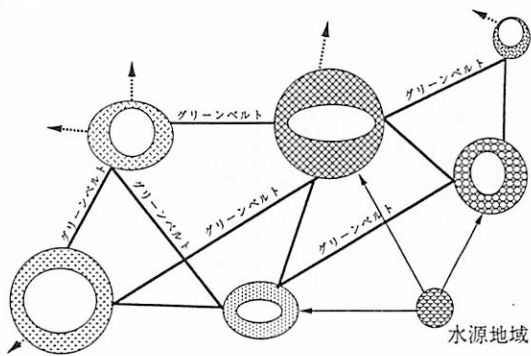


図5. バイオレッジネットワーク構想。

- (3) 地元農牧民の沙漠化防止に関する意識調査。
 (4) 地元に適した地場産業を興すべく基礎調査。

8. 将来構想

(1) 従来のバイオビレッジネットワーク構想

一つのバイオビレッジから十数km離れた所に、新たなバイオビレッジを建設する。この間はグリーンベルトで結び、道路の両側は幅数十mの防風・防砂林とする。更に遠方にも同様にバイオビレッジを建設しグリーンベルトで結ぶ。図5のようにバイオビレッジをネットワーク状に数多く建設することにより、広い地域の沙漠化を防止し、緑化を進めることにより、生活物質の相互流通、文化交流などが密接に行なわれ、健全な新しい文化圏を形成すると同時に広い地域の沙漠化を防止し、快適な居住空間の創造を目指すものである。

(2) バイオビレッジ建設構想と生物経済帯計画との組合せ

1997年4月に額勒順鎮政府首脳と協議の結果、バイオビレッジ建設構想と現地が進めている家庭生態経済圏計画／生物経済帯建設計画を組合せ、額勒順鎮全域の農牧林漁工業の進行と沙漠化防治を目指すことになった。

家庭生態経済圏計画とは庫倫旗政府が地域の農牧業進振興と沙漠化防治を目的に、1980年代から実施しているもので、図6のように、1家族に約6.7haの土地を提供

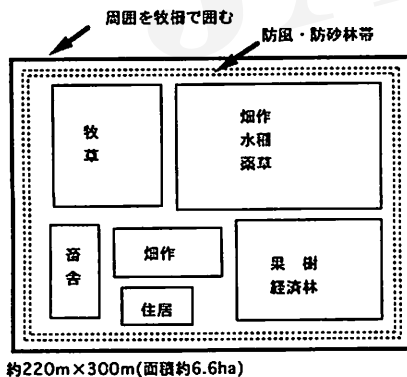


図6. 家庭生態經濟圏の概念図。

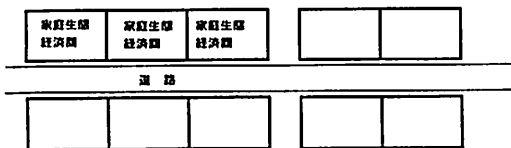


図7. 生物經濟帯建設計画。

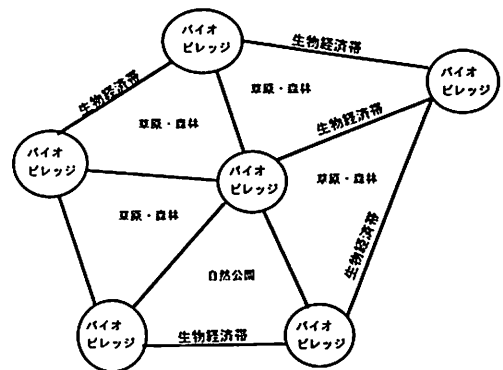
する。この面積は中国の単位では100ム (15ム=1ha) で、この地方の経験から決めたそうである。

周囲に牧柵、内側に防風・防砂林を植林しその中で畑作、果樹、牧草、家畜の飼育等持続可能な農牧業を営むという計画である。

生物經濟帯建設計画は、広範囲の地域の地域の農牧業振興と沙漠化防治を目的として1997年度から実施している事業で、図7のように主要道路の両側に家庭生態經濟圏を多数带状に並べるものである。1999年度までの3年間で総延長120km、800個の家庭生態經濟圏を設置する予定である。

この二つの計画は、地元の現状から考えて農業と畜産業の安定化が主目的となっている。バイオビレッジ建設構想では、基本概念の通り農・牧・林・漁・工業の総合的な開発を目指すもので、この二つの計画を組合せることによって地域の農業と牧畜業だけではなく、額勒順鎮全域の林業・漁業・諸工業の振興も含め総合的な沙漠化防治を目指すことになった (図8)。すなわち、生物經濟帯は原料生産基地、バイオビレッジは加工・消費・流通、また生物經濟帯に囲まれた地域は草原・森林とし、一部は自然公園としてレクリエーション、エコツアー等も考慮しようという構想である。

これらの考えを発展させて、図9に示す将来構想のように、生物經濟帯 (太線) とバイオビレッジ (丸印) による額勒順鎮全域の沙漠化防治が完成するわけである。



- ◆生物經濟帯・・・原料生産基地
- ◆バイオビレッジ・・・加工、消費、流通
- ◆生物經濟帯とバイオビレッジに囲まれた地域
草原・森林とし、ある区画には自然公園を造り
レクリエーション、エコツアー等も考慮する。
- ◆畜産:放牧→半放牧→飼育

図8. バイオビレッジ建設構想と生物經濟帯計画との組合せ図。

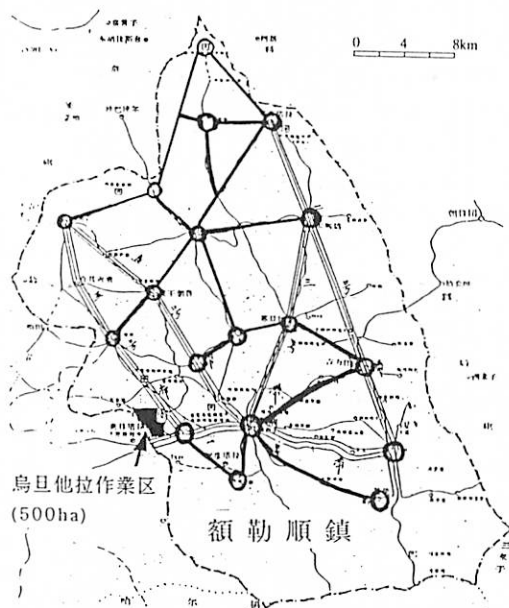


図9. 額勒順鎮における将来構想図。

ここで一番問題となるのは畜産である。いくら草原・森林化しようとしても、過放牧となれば元の本阿弥である。そこで、放牧—半放牧—飼育と段階を踏んでいくという計画を立てた。

半放牧とは6月～10月は放牧、後の期間は飼育する。2005年までに全面的に飼育方式にして、放牧を禁止する方針を打ち出すことを検討することになった。以上はまだ空想の段階である。

図9の太い破線内が額勒順鎮で、東京都全域の約半分の面積である（概要は表2参照）。三本線が総延長120kmの生物経済帯で、これを今年から3年間で完成させる計画である。農牧民にとっては大事業であろうと思



写真6. 1日で幅10mの道路が数キロも完成した。

うが、毎日観察していると地域住民の活力と実演を目指す熱意が感じられる。例えば、毎日大型トラック便で牧欄用の松の木の杭が大量に政府官舎の構内敷地に持ち込まれ、山と積まれる。そして三々五々、生物経済帯に参加する住民がロバ車で来ては持ち帰り、いつの間になくなっていく。ポプラの苗も、金網も同じように持ち帰られている。そして今年度予定の道路のあちこちで家庭生態経済圏が作られている。男性も女性も子供も頑張っている。これならば完全にできるであろうと感じた（写真6）。

将来計画はひとまず置き、当面は、図4に示した烏旦他拉の500haの土地でバイオビレッジモデルを研究開発することに集中したい。図4の太線で囲まれた一区画約4haは東京ドームとほぼ同じ面積で合計百数十個あるが、ここでは表1に示したような、主に農業、林業などを農牧民と相互で検討しながら、できるだけ農牧民の主体性を重視し、各々の土地の状況にふさわしい利用を図っていく。揚水設備、排水工事等や、日本からの農業指導員の派遣、その他の援助も検討する。そして、バイオビレッジ分科会としては500ha敷地内の約30haで、地元に適した産業を興すべく小規模な各種研究開発を実施していくつもりである。

中国の沙漠化・緑化と食料危機

真 木 太 一*

Desertification and Greening in China and Food Crisis

Taichi MAKI*

1. はじめに

拙書「中国の沙漠化・緑化と食料危機」(信山社: 真木, 1996) について報告することになった。しかし、一回にして述べるにはあまりにも多量であるので、絞り込み、以下のような内容とした。ただし、本文については「沙漠研究」と重複しても、あまり好ましくないので、図と内容については、あえて幾分入れ替えることとした。詳しくは書籍を参照されたい。

2. 中国の沙漠化

1) 沙漠化の面積と速度

中国の沙漠化は歴史時代からあったが、最近のそれは極めて激しいものがある。中国では1858～1962年、1966～1973年の期間が最も過開墾、過放牧が激しかった期間とされている(成, 1985)。

1993年までの中国の沙漠化面積は約35万km²で、全国土の3.7%に相当する。沙漠は年間2,100km²づつ増加し、そして毎年10km²づつ北京に近づいているとも表現できる。中国林業省の統計によると、1994年より過去10年間では毎年2,100km²が沙漠化し、特に内モンゴル、新疆、甘粛など12自治区・省が深刻である。中国統計年鑑(1991)によると、砂・ゴビなど本来の沙漠面積と現在までの沙漠化面積の合計は全国で153.3万km²とされ、このまま放置すると毎年2,300km²のスピードで増加すると言われている。

また一方、蘭州沙漠研究所のWANG(1994)によると、中国北部の沙漠化(砂の沙漠化)地域は33.4万km²ある。その内、すでに沙漠化した面積は19.7万km²(今世紀に

7.0万km²)に達したと推定され、潜在的沙漠化面積は13.7万km²で、今後沙漠化の恐れがあるとしている。なお、前述の既沙漠化面積19.7万km²の内訳比率は、進行中沙漠化: 45.9%, 急速進行中沙漠化: 34.4%, 激甚沙漠化: 19.7%の割合である。

中国各地の潜在的沙漠化面積は15.8万km²である。ただし前述の沙漠化面積13.7万km²は、この面積15.8万km²から、すでに2.1万km²沙漠化し、数値は減少したことを意味する。

次に年代を追ってみると、1950年後期から1970年中期までの25年間に3.9万km²が沙漠化し、年間1,560km²の速度で沙漠化した。また、1975～1987年(1980年)頃の沙漠化スピードは上述と同様年間2,100km²とされており、それまでより35%増加した。そして、WANG(1994)によると林業省報告より加速し、沙漠化自体の進行速度は年間3,450km²となっており、1988～2000年にはさらに4.5万km²が沙漠化すると予測されている。

ただし一方では、例えば年間60万km²の緑化の見積もあるため、その数値が実際の沙漠化、土地劣化の速度ではない。今後は緑化と沙漠化の程度に左右されるが、仮に三つの平均をとっても年間2,600km²の速度であり、莫大な面積が沙漠化することになる。

2) 沙漠化の発展形態

この沙漠化には3段階の発展(進展)形態がある。

①最初の段階では、地表面に軽度の風食と砂の堆積・流動が始まり、周辺の耕地や牧草地が覆われて作物が砂で埋められ、局地的に砂で埋められる。

②次の段階では、強い風食と中程度の堆積と埋没が起こり、砂丘頂部と低い窪地にやや大きい風食穴が発生し、また流動砂丘も発生するようになる。固定砂丘は半固定

* 農業環境技術研究所気象管理科

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

砂丘に変化し、砂丘と砂丘の間（丘間）の低地では風食が激化し、飛砂は強度を増して頻発し、定常的に耕地、牧草地を襲い、農作物を枯死させたり、埋没させたりして大被害を起こす。

③最終段階での特色は流動砂丘の形成であり、その風下への前進移動に伴って砂の堆積と種々の埋没が発生する。またこの砂丘が飛砂の発生源となって広範囲の農地、牧草地、集落、道路、建物を襲い、砂に埋没する段階になる。

この沙漠化は、主として砂による最も典型的な、わかりやすい沙漠化であるが、砂による沙漠化は極乾燥地域から半潤潤地域まで、また海岸砂丘や河川砂丘の周辺では潤潤地域でさえ発生することがある。沙漠化にはこのようなものの以外に、水食による土壌侵食の沙漠化、さらには塩・アルカリによる塩性化・アルカリ化による沙漠化がある。また水の過剰消費による沙漠化もある。

3) 沙漠化の原因、主として人為的要因

①人口圧による過開墾と過放牧

人口の増加は土地資源利用への圧力を強め、草原を開墾し、草原放牧の負担を増大させ、また過伐採によって沙漠化を加速した。沙漠化の原因は過開墾、過放牧、過開墾と過放牧の複合、人口圧による水資源の過使用、燃料、交通などの人為的要因などがある。

② 沙漠化のフィードバック機構

過度の経済活動と沙漠化間にはフィードバック機構が働き、人口の増加による過開墾（開墾、放牧、伐採、水消費）によって土地の沙漠化が発生し土地生産力が低下するため、逆に人や家畜の要求量を満足できなくなり、再び開墾を拡大して、さらに大面積の沙漠化を招き、悪循環が始まる。

歴史時代では沙漠化土地は放棄して未開地へ移動できたが、現代では移動できず、フィードバックが正に作用して沙漠化が強化され、悪循環となる。

4) 沙漠化の複合的要因

人為的な沙漠化要因は、略奪的な開発活動や破壊的な戦争などが沙漠化に密接に関連し、過度の人為活動が沙漠化発生の誘発要因となる。従って、沙漠化地域の出現は最近百年間に限らず、人類文明の歴史時代まで関係する。流砂に埋没している古代遺跡や歴史上有名な草原から変化した現在の砂丘景観は歴史的沙漠化の証拠であり、脆弱な生態系の乾燥・半乾燥地区の資源開発利用に重要な教訓となる。なお、砂沙漠地帯、沙漠・荒漠地帯、乾草原・荒漠草原での複合的沙漠化の問題がある。

5) 沙漠化による環境変化

沙漠化による環境変化には、①地表形態の変化、②養分・塩分の変化、③地表植生の変化などがある。特に植生被覆率は、沙漠化するにつれて低下する、その植生被覆率の変化を示す（朱ほか、1989）。

①植被率50%以上：砂面に植物は固定し、潜在的沙漠化地域、②25～50%：半固定状態で沙漠化は進行中、現在進行中沙漠化地域、③10～25%：地表は半流動状態で沙漠化は急速に進行中、急速進行中沙漠化地域、④10%以下：流砂が大半を占め、激甚沙漠化地域である。潜在的沙漠化から激甚沙漠化への変化は植物群落構造・組成変化も顕著である。

次に、生態系の構造と機能の変化があげられる。沙漠化中の環境変化は、地表・地面物質組成・植生の変化以外に、乾燥・半乾燥生態系の構造・機能（4段階指標）も変化させる。沙漠化の進行につれて生態系の破壊度は増加し、生態系の構造と機能が悪化して生態系が破壊される。

農地生態系のエネルギー転換効率（産出／投入比率、E）は農産物の生産に際し、産出のエネルギーと投入の付加エネルギーとの比率で示す。面積当たりの食糧生産量から実エネルギーへの換算値（P）および年間食糧生産のために投入した農地への有機エネルギー（労力、畜力、種子、有機肥料）と無機エネルギー（化学肥料、農薬、農業用電気、燃料）の合計値（R）から効率 $E = P/R$ を算出する。 $E = 1$ は、エネルギー投入量と産出量が等しく、生産が持続する限界値を意味する。

ウランツァブ草原、ツアハル草原、ホルチン草原南部では、①農地の沙漠化土地10%以下： E は1.5以上、②10～30%：1.0～1.5、沙漠化が中程度で沙漠化進行が始まる段階、③30～50%：1.0以下、急速進行中から激甚沙漠化に入る段階である。商都では1959年には進行中沙漠化： E は1.9、1969年に急速進行中沙漠化：0.76、1972年には激甚沙漠化：0.54の事例がある（朱ほか、1989）。

最後に沙漠化による環境変化のまとめを示す。沙漠化による環境変化の指標として、沙漠化が進行すると環境の退化が始まり、まず量が変化する。すなわち生物数・量が減少し、生産量が低下する。一定の段階に達すると、次に質が変化し、新たな段階になる。そして再び種々の量的指標から質的指標への変化を経る。

変化の過程で指標の臨界値があるが、進行中の沙漠化地域から急速進行中の沙漠化地域への変化は一つの転換点であり、エネルギー転換効率1がその重要臨界値である。これが人間の開発・利用活動の許容限度であり、ま

たは環境との関係では調和・協調か、不調和・協調かの境界である。この臨界値を「沙漠化による生態系の変化過程と開発程度を判断する指標」とする必要がある。従って、沙漠化地域の改造・管理の重点を半乾燥地帯の農牧業混在地域に置くことは科学的意義が大きい。

3. 緑化と環境改良

1) 防風林による気象改良・緩和効果

中国西北部のトルファンは中国国内はもとより、世界的に見ても後述するように地形的、気候的に特異である。このような特徴的な条件下でカレーズの地下集水・導水方式によって灌漑が行われ、作物が栽培され、人々が生活している。しかし灌漑を行わなければ作物栽培は不可能であり、十分灌漑を行えばワタ、コウリヤン、ブドウなどがよく生育する。しかし、沙漠で農業を行うには防風林が必要であり、防風林がなければ品質のよい作物の多収は望むべくもない。

2) 春季のタマリスク2列林による気象改良

(1) 2列のタマリスク防風林と堆砂状況 (図1, 2)

観測線上の林帯幅は第1防風林 (1列目、広幅林) で広く19m、第2防風林 (2列目、狭幅林) では狭く13mである。広幅・狭幅防風林帯の全体の高さは、それぞれ10.0m、5.5mであり、平均樹高は2.5m、4.0mである。



図1. タマリスク防風林と堆砂状況の写真。

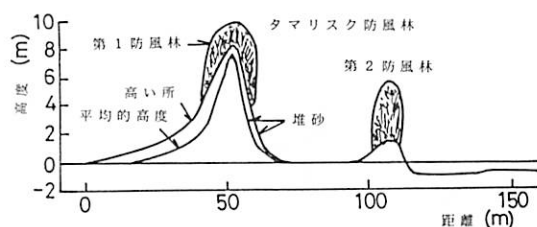


図2. 2列のタマリスク防風林と堆砂状況。

密閉度は両方とも上層部で50%, 中・下層部で100%である。1992年4月24~25日の防風林による観測結果 (測定高度: 風速1.5m, 気温・湿度1.0m) を図3-A, B (真木ほか, 1994) に示す。

①4月25日15時半 (図3-A): やや強風で減風が明瞭であり、防風林による減風の増加が認められる。地表温は林内は日陰のため低いが、ただ頂上部は日射のため高い。湿度は非常に低く、風下林で加湿がある。気温は昇温が認められる。

②4月25日18時半 (図3-B): 強風で砂塵が激しい。典型的な防風効果があり、風速は風上側の7~8m/sが林内で約1m/s (頂上部では最強) に、林間では3~4m/sに回復して再び風下林で減風した後、6~7m/sに回復する。この風速の回復は非常に早い。強風のため地表温は林間で少し保温され、湿度は風下側で約0.5%高

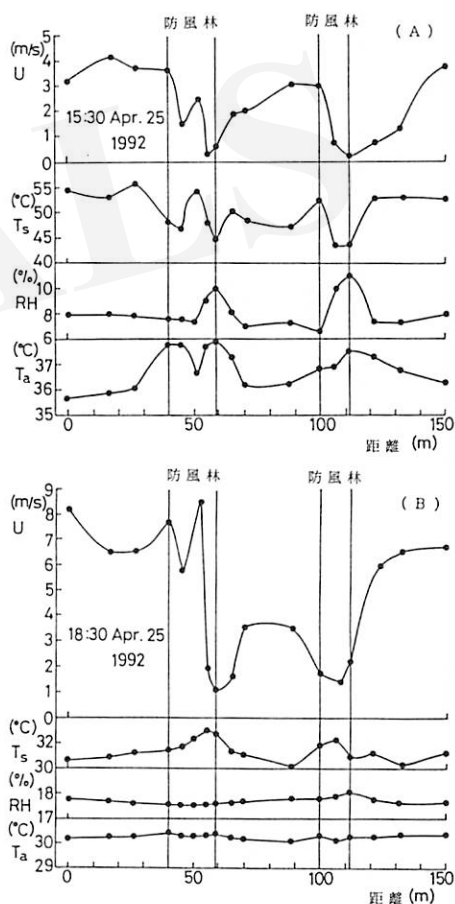


図3. 2列のタマリスク防風林による (A) 昼間: やや強風時, (B) 夕方: 強風時の気象変化。

U: 相対風速, Ts: 地表温, RH: 相対湿度, Ta: 気温

く、気温はほとんど一定である。

(2) 防風林による気象改良効果のまとめ

①タマリスク防風林の減風による気象改良・緩和効果は大きい。②防風林による春・秋季の昇温や夏季と夜間の降温は好適である。③タマリスク防風林は密閉度が高いため減風が大きく、しかも細かい枝葉による整流作用のため減風効果範囲が広い。④葉からの蒸散によって加湿効果が大きく、乾燥地では有効である。⑤夏季、日中の気温、地温の防風林による過剰昇温は防風ネットの場合より小さく、冬季、夜間の保温効果も大きい特徴がある。⑥複数列の防風林（50m間隔）では風上側の防風林の影響を受ける。特に湿度の場合には加湿効果が大きい。

3) 2列の白楡・沙塵・胡楊防風林による微気象変化

(1) 最高気温出現時（15日15時，図4-A）：基準風速は7.5m/s（100%）でかなりの強風である。相対風速

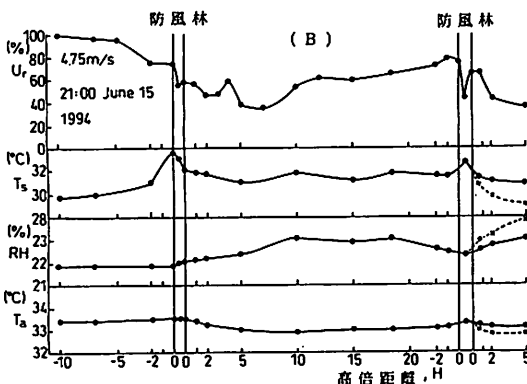
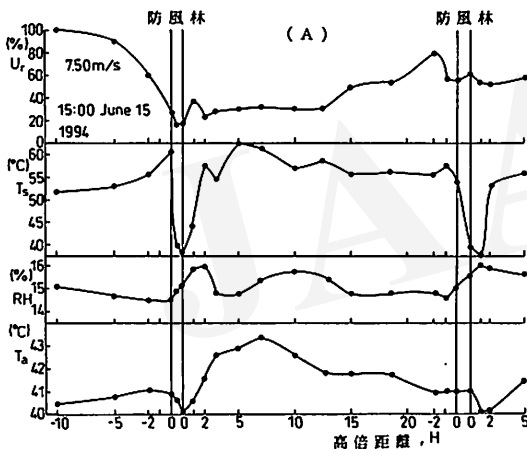


図4. 白楡・沙塵・胡楊防風林による (A) 昼間、(B) 夜間の気象変化。

Ur：相対風速，Ts：地表温，RH：相対湿度，Ta：気温

(Ur, %) は第1（1列目）防風林内（樹幹の後方）で急減して15%になり、その後12Hまで30%前後で、減風の効果範囲は広い。22～23Hで80%まで回復して再び第2林で48%になっているが、第2林による減風は大きくない。地表温（Ts, °C）は減風による乱流輸送量の減少作用と日射の影響で防風林直前で昇温するが、林内では日陰のため低く、最高温度との差は25℃に達している。防風林通過後は日射による昇温と乱流輸送の減少によって高くなり、第2林内で急減して再び回復する。相対湿度（RH, %）は一般に気温とほぼ逆の変化を示すことが多いが、3～10Hでは昇温による乾燥化の影響が大きい。植物からの蒸散による加湿効果は乾燥地における防風林の重要な気象改良効果である。気温（Ta, °C）は林内および林直後での減少程度が小さい割に防風林の風下での昇温が大きく、マイナスの効果が出ている。蒸発散量が多いと蒸発潜熱の使用によって昇温は小さい。

なお、ここで絶対湿度（AH, g/m³）の変化は相対湿度の変化と類似しているが、特に第1林の風下側2～5Hの昇温による相対湿度の低下は小さくなり、全般に加湿効果が評価できる。

(2) 夜間（15日21時，図4-B）：相対風速は第1林によって34%に減少し、第2林の風上で80%程度まで回復し、第2林で再び減少する。地表温は防風林の風上側と林内で夕日による昇温条件が保持されて3℃程度高温である。相対湿度は第1林で1%余り加湿し、第2林付近で少し減少し、再び上昇する。また、絶対湿度は気温降下が反映して上昇程度がやや小さい。気温と湿度はほぼ逆の変化を示し、変化は小さいが乾燥地での気象改良に寄与している。なお、第2林の風下側の点線は小雨が降り始めた直後の気象であり、地表温・気温は低下、湿度は上昇する変化が顕著に出ている。

4) 防風ネットによる気象改良・緩和効果

(1) 防風ネットによる気象改良と加算効果

防風ネットにほぼ直角に風が吹く場合には1列目の影響が2列目に作用して風速、気温、湿度に影響が及ぶ。特に風速では1列目と2列目を合わせた複合防風ネット（障害物）を越える風となり、2列目では風速の回復は早くなる。これはまた夜間、弱風時に1・2列間に空気が停滞して気温、湿度への影響が大きくなる。

ネットの中央の高さでは、ネットの直接の影響は少なくとも風上側に-5H、風下側に25Hの合わせて30Hまでであり、わずかの影響も考慮すると-10H～-5H（-7H）から30～35H（33H）までの40Hに影響が及ぶと予



図5. タクラマカン沙漠での防風ネット、アシ防風垣、草方格。

想される。従って、間隔が30Hでは気象的に相互作用があり、40Hではほぼ独立した状態になるが、飛砂と堆砂については地表面近くの現象であり、ネット間に堆砂するようになると影響が加算され、さらに長距離まで影響が及ぶことになる。従って、40H間隔程度でネットを設定すれば、ネット数に対して効果が最大限に得られるものと推測される。なお、タクラマカン沙漠での防風ネット、アシ防風垣、草方格を図5に示す。

(2) 防風ネットの気象改良効果のまとめ

①防風ネットの減風による気象改良・緩和効果はかなり大きい。②防風ネットによる減風、春・秋季の昇温や夏季、夜間の降温の各効果は好適である。③日陰による昇温抑制が小さいため夏季、昼間は過昇温となる。④防風林のような加湿効果は小さいが、減風に伴う風食防止、飛砂防止効果が期待できる。⑤防風林の生育は長年月かかるが、防風ネットは短期間に効果を発揮でき、また防風林自体の生育保護にも利用できる。⑥複数列の防風ネットでは風上側のネットの影響が2列目以降の風下側のネットに及ぶが、2列のみの場合（27H、高倍距離の間隔）には2列目の風下の減風範囲は狭くなる。

5) 防風林による作物への効果

乾燥地のトルファンにおいて、オアシスを作る種々の防風林による作物の草丈への効果を明らかにするために、夏季の生育初期の草丈と秋季に作物の生長が止まった最高の草丈について、防風林からの距離によるワタの草丈の変化を測定して防風林の効果を評価した（真木ほか、1994）。

(1) 2列の防風林にいるワタの草丈変化

①ワタの草丈：胡楊・榆・沙枣防風林によるワタ草丈（1994年6月）の変化を見ると、風下直後では低く、2～9Hで高く、3Hで最高である。また、2列目防風林の前方-2H付近でかなり高く、-1Hでは養・水分の競合、

日陰などの影響によって低い。また10～13H（風上側-3H）付近で低く、その付近での防風林の減風効果の低下と灌漑水の減少が作物への効果を低下させている。なお、気候的に厳しい乾燥地では防風林の効果範囲はそれほど広くなく10H程度であるが、防風林のない同程度の灌水量の畑の場合には作物の生育状況は大きく悪化する。

②ワタの草丈：沙枣・胡楊防風林（高さ6m、幅11m、密閉度70%）によるワタの生育状況（1991年11月）を見ると、草丈への効果は4～5Hで高く、10Hでは比較的低い。また2列目の沙枣・ポプラ防風林のために16H（2列目の風上側-1H）付近で草丈が高い。防風林がなければワタの草丈は50～80cmである。乾燥条件下では環境が厳しいために防風林による作物への効果範囲は狭くなる。また、コウリヤン（モロコシ、ソルガム）の草丈の変化もワタと類似している。

③ワタの収量：防風林によるワタ収量への影響程度は草丈の場合より顕著であり、乾燥地のように気候の厳しい地域では効果範囲はあまり広がらないが、気象改良による作物の収量への影響程度が明らかに評価できる。

(2) 2列の防風林によるワタの草丈変化（図6-A）

ワタの草丈変化は防風林の風下直後から10Hまでは高いが、12～17Hではやや低い。また19～24H（風上側-1～-5H）で高く、2列目の防風林の効果がよく出ている。ただし厳しい乾燥気候では防風林の効果範囲はあまり広くなく、10H程度までであるが、いずれにしても作物の生育促進は乾燥地での作物栽培にとって重要な効果である。また付近にあるコウリヤンの草丈は同様な傾向が認められたが、その他の詳しい調査は行っていない。

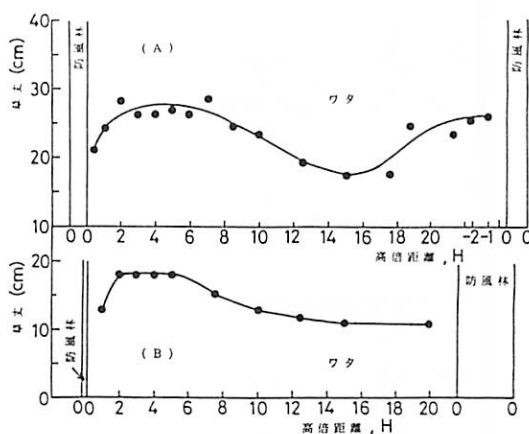


図6. 白榆・沙枣・胡楊防風林と若いポプラ防風林によるワタの草丈変化。

(3) ポプラ防風林によるワタの草丈変化 (図6-B)

作物の草丈変化によると、ワタの草丈は2~5Hで18cmと高く、効果はかなり認められる。6H以降では次第に効果が小さくなり、15~20Hは11cmである。対照区(10cm)との比較では最高8cmの差となり、前述の大型防風林内圃場の例よりも生育ステージが初期ではあるが、効果は比較的認められる。

6) 防風林・ネットによる飛砂防止への効果

①1列防風林：1列のタマリスク防風林による1991年8月の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ある。堆砂範囲は防風林の前後-6H~6H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：1994年4月の2列のタマリスク防風林による堆砂は、2列防風林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帯の堆砂は6.5~8.5mで、平均的には7.5mである。林帯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帯の堆砂は1.5mである。なお、堆砂上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。

③1列防風ネット：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、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風食が発生する。なお、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、結果的にはかなり堆積した。

7) オアシス内外の水消費と作物生育

乾燥地の植物は限界ぎりぎりまで蒸散量を抑えている。一方、植物体温が上昇し過ぎないように蒸散の潜熱によって35℃程度以下に体温を保持している。言い換えれば乾燥地の植物にとっては、ぎりぎりまで節水はするが、必要最小限の水の消費は不可欠である。

乾燥地の作物栽培はほとんどの場合、灌漑せざるを得ない。そこで防風林を造成すればその消費分だけ多く灌漑水が必要となるように考えられる。また、作物と防風林間で水の競合も発生する。ところが、同面積の地域全体からの水消費量について、防風林で囲まれたオアシス(緑州)内の防風林と作物の水消費と、防風林のない作

物の水消費量を比較すると、前者の水の消費量はオアシスが作り出す気象改良・緩和作用によって減少することが経験的にわかっている。

広範囲に防風林で囲まれたオアシスでは事実、品質のよい作物(果樹)ができ収量も多いのに対して、防風林で囲まれていない地域ではたとえ水が十分あっても高品質作物の収量は減少し、逆に水の消費量が増加し、しかも水が有効利用されない結果となることが多い。しかしながら、それに関する科学的な調査報告例は見当たらないが、経験的にはそのような事実は確かである。今後、防風林と水消費に関する具体的データが出せる研究が必要である。

4. おわりに

中国では、近年1950年前後から沙漠の境界地域や沙漠の奥地を開発して、多くの固定、半固定砂丘を農地として造成し、大豆、綿花、麻類、糖類、ヒマワリ、タバコ、ゴマなどを栽培して作物生産を高めている。また、沙漠の開発にはダム(水庫)を建設している。例えば石河子では8カ所のダムを完成させ、綿花、小麦、テンサイなど、多くの作物が栽培されている。これらを中国では「人進沙退」と呼んでおり、いわゆる緑化、オアシス化である。緑化・オアシス化として代表的な地域には、河西回廊(甘粛省)、新疆の瑪納斯(マナス)河流域、タリム河流域、トルファン盆地、内モンゴルの河套平原(包頭付近、黄河が北に突き当たる地域)、寧夏の中衛(黄河が北に曲がり始めた地域)などがあげられる。

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り、それらを造成しないと作物栽培も難しい。しかも組織的な環境・気象改良を行わないと広範囲なオアシスはできない。しかしながら、過剰に開発したのでは「沙進人退」になりかねない。人口増加条件下でも「人進沙退」を期待したい。

引用文献

- 成 松林(1985): 沙漠と沙漠化。「百科知識」11:23.
- 真木太一(1996): 「中国の砂漠化・緑化と食料危機」信山社、東京、191pp.
- 真木太一(1987): 「風害と防風施設」文永堂出版、301pp.
- 真木太一・真木みどり(1992): 「砂漠の中のシルクロード」新日本出版社、206pp.

真木太一・中井 信・高畑 滋・北村義信・遠山柁雄 (1993):
『砂漠緑化の最前線』新日本出版社, 214pp.
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.
朱 震達・陳 広庭 (1994): 『中国土地沙質荒漠化』科学出版社,

250 pp.

WANG, T. (1994): Preliminary assessment on development of
desertification in North China. *Proceedings of the Japan-China
International Symposium on the Study of the Mechanism of
Desertification, Science and Technology Agency*, 394-371.

J A A L S

日本沙漠学会誌「沙漠研究」投稿規定

(1995年5月12日改訂, 10月23日一部追加, 1998年5月16日一部改訂)

1. 日本沙漠学会誌「沙漠研究」は、沙漠ならびに乾燥・半乾燥地に関する広範な分野の研究成果を掲載し、内外の研究交流を図ることを目的とする。
2. 投稿の資格 投稿原稿の著者（連名の場合は1名以上）は日本沙漠学会の正会員でなければならない。ただし編集委員会が認めた場合はその限りではない。
3. 原稿の種類と長さ 原稿の種類と標準となる長さ（図表を含めた刷り上がりページ数）は次のとおりとする。なお標準を上回る長さの原稿の掲載が認められた場合、超過ページ分の経費は著者の負担とする。邦文原稿を原則とするが、原著論文・論説、短報については英文原稿も認める。
 - (1) 原著論文・論説 (Original Article) : 著者のオリジナルな研究の成果で、他の著書、学術雑誌に未発表のもの。10ページ以内。
 - (2) 短報 (Research Note) : 速報的・中間報告的、あるいは補遺的ではあるが、オリジナルな研究の成果で他誌に未発表なもの。4ページ以内。
 - (3) 総説・展望 : 特定の問題について、従来の研究成果・資料に基づき総合的に論じ、あるいは将来への展望を述べたもの。10ページ以内。
 - (4) 資料 : 研究あるいは実用面で価値が高い事項について関連する資料をまとめたもの。4ページ以内。
 - (5) 講座・解説 : すでに学問大系が確立された事項について客観的に取りまとめ、専門外の会員にも理解できるように平易に記述したもの。10ページ以内。
- (6) 抄録・書評 : すでに出版されている書籍などの内容を紹介したもの。1ページ以内。
- (7) その他 : 編集委員会が必要と認めたもの。
4. 原稿の書き方 別に定める執筆要領および *Instructions to Contributors* による。
5. 原稿の採否 原稿は編集委員会で審査し、採否を決定する。編集委員会は査読結果より原稿の一部変更を求めることがある。
6. 原稿の送付先 コピー4部を日本沙漠学会編集委員会宛に簡易書留で送付する。
7. 原稿の返却 受理された原稿は返却しない。ただし、図・表・写真については希望があれば返却する。
8. 校正 著者校正は初校のみとし、以降の校正は原則として編集委員会が著者の初校に従って行うが、初校ミスは著者の責任とする。著者校正は誤植によるもののみとし、新たな加除訂正は認めない。
9. 別刷 著者の負担とし、負担額は別に定める。
10. 著作権 すべて日本沙漠学会に属する。
11. 投稿料 3. で定めた標準の長さ以内のものは無料。ただし、カラー印刷を含む場合は著者の実費負担。

※原稿送付先 : 日本沙漠学会編集委員会 宛
〒180-8633 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
電話 : 0422-37-3750
Fax : 0422-37-3871

(投稿規定内規)

別刷料金表 (50部単位) 1998年5月現在

注文部数	刷り上がり	金額 (〔 〕 内は表紙付きの場合)
50～150部	8ページまで	6,400円 [10,000]
	12ページまで	9,600円 [11,000]
200～300部	8ページまで	8,000円 [12,000]
	12ページまで	12,000円 [15,000]

※この表に該当しない場合は印刷所に問い合わせして下さい。

※カラー印刷を含む場合は実費負担。

※印刷所 : 佐藤印刷 (株)

〒305-0051 つくば市二の宮4-4-21

電話 : 0298-55-7622 Fax : 0298-55-7490

日本沙漠学会誌「沙漠研究」執筆要領

(1995年10月23日改訂、1998年5月16日一部改訂)

1. 用紙・様式 邦文・英文原稿（英文要旨を含む）ともにA4サイズの用紙を用い、天地・左右のマージンを十分とって、ワードプロセッサにより次の要領で書くことを原則とする。

a) 邦文原稿は、1ページあたり25字×30行（750字）のフォーマットで書く。

b) 英文原稿は、12ポイントの字体を用いて、ダブルスペースで書く。

c) 使用ソフトは特定しないが、完成した原稿をテキスト形式のファイルに変換してフロッピーディスクに併せて保存する。

d) フロッピーディスクは原稿が受理となった後に、その表面に使用機種・ソフト等を明記して提出する。

2. 英文原稿は、本執筆要領とともに別に定める *Instructions to Contributors* の規定に従って書き、著者の責任でネイティブスピーカーなど、しかるべき人の校閲を予め受けるものとする。編集委員会が校閲を必要と判断し、校閲者を斡旋した場合には、校閲に要する経費は著者の負担とする。

3. 邦文原稿は次の順に整える。英文原稿の場合は邦文原稿に準じて整えるが、下記の（2）に相当する邦文要旨は編集委員会の了承の上で省略することができる。

（1）表紙：原稿の種類、題名（抄録・書評の場合は書名等）、著者氏名（会員資格）、所属機関名および所在地、連絡先住所・電話番号・Fax番号・e-mailアドレス（お持ちの場合）を書く。題名、著者氏名、所属機関名・所在地には英訳を併記する。英文原稿の場合は、それぞれに邦文を併記する。

（2）英文要旨：原著論文・論説、総説・展望には500語内外、短報・資料には100語内外の英文要旨を記載し、5語以内のキーワードを添える。英文要旨から図一覧表までをととしてページを付ける。

（3）本文

（4）引用文献

（5）表

（6）図一覧：図番号、タイトル（必要に応じて凡例、説明文を付ける）をまとめる。

（7）図：図番号と著者名を、鉛筆にて右下に記載する。

4. 図表 表は別紙に書き、縦罫は用いない。図は14×19cm以内にそのまま縮小印刷されることを考慮

して書き、A4版サイズの用紙上にまとめる。写真も図扱いとし、図とともに一連番号を付ける。図表の挿入位置は本文原稿の右端に明示する。図表中およびタイトルで用いる言語は邦文、英文のいずれかとし、一つの論文で統一する。原図は、原稿が受理となった後に提出する。

5. 本文

（1）抄録・書評は次例の見出しから書き始め、文の末尾に筆者の氏名を記す。

小川 亨：「サヘルに暮らす一西アフリカ・フルベ民族誌」NHKブックス540、日本放送出版協会、1987、222p., B6版、750円。

ROGNON, Pierre: *Bopgraphie d'un désert: Le Sahara*. L'Harmattan, Paris, 1994, 347p., A5版。

（2）他の原稿種類については、本文形式を特に限定しないが、論旨を明確に簡潔に記載する。

（3）脚注は使用しない。注が必要な場合には本文末尾にまとめる。

（4）単位はSI（The System Internationale）を用い、略記・略号の使用はスタンダードなものに限る。

6. 引用文献 本文中では市川（1988）、小川（1987）、ROGNON（1994）、または、……である（TUCKER *et al.*, 1981, 1985; GROVE, 1986a, b; LEAN and WARRILOW, 1989; 天谷ほか, 1984; 田中・長, 1987）。のように書く。成書などからページを指定して引用するときは、小堀（1972: 15-17）のように、年号の後ろにページを記載する。本文の後ろに引用文献をまとめる。邦文の文献について欧文の文献を、それぞれ著者名のアルファベット順に並べる。雑誌の場合、巻（号）：ページを記載するが、通しページの場合は号は省略してもよい。そのほか詳細は下記の例および慣例に従う。

天谷孝夫・長堀金造・三野 徹（1984）：当面する物質移動の課題。「土壌の物理性」49: 3-8。

市川正巳（1988）：世界における沙漠化とその研究の現状。「地理学評論」61A: 89-103。

小堀 巖（1972）：「沙漠」日本放送出版協会。

小川 了（1987）：「サヘルに暮らす一西アフリカ・フルベ民族誌」NHKブックス540、日本放送出版協会。

田中 明・長 智男（1987）：土壌の保水性及び透水性と作物根への水分供給力。「九大農芸学誌」41-1/2: 63-70。

- GROVE, A.T. (1986a): The scale factor in relation to the processes involved in "desertification" in Europe. In FANTECHI, R. and MARGARIS, N.S. eds., *Desertification in Europe*, D. Reidel, Dordrecht, 9-14.
- GROVE, A.T. (1986b): The state of Africa in the 1980s. *Geogr. J.*, 152: 193-203.
- LEAN, J. and WARRILOW, D.A. (1989): Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, 342: 411-413.
- ROGNON, P. (1989): *Biographie d'un Désert: Le Sahara*. L'Harmattan, Paris.
- TUCKER, C.J., HOLBEN, B.N., ELGIN, J.H and McMORTREY, J.E. (1981): Remote sensing of total drymatter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 11: 171-189.
- TUCKER, C.J., TOWNSHEND, J.R. and GOFF, T.E. (1985): African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227: 369-375.
- YOUNG, J.A. and YOUNG, C.G. (1992): *Seeds of Woody Plants in North America*. Dioscorides Press, Portland.
7. 最終原稿の提出 原稿が審査を経て受理となった後、編集委員会からの指示にしたがって最終原稿と原図をフロッピーディスクとともに提出する。論文の最終的な調整とレイアウトは編集委員会の責任で行なう。

Instructions to Contributors

Journal of Arid Land Studies is a broad-based archival journal for the publication of significant research results in all areas concerning deserts, arid and semi-arid lands. Papers will be published only when they are judged by the Editor to be characterized by some general significant conclusions or by experimental and field data having probable lasting value. It is understood that a paper submitted to this Journal has not been previously published, accepted for publication or submitted for review elsewhere.

Four copies of manuscripts in English should be submitted to (hold original figures, photos, and diskette until acceptance):

The Editorial Office, The Japanese Association for Arid Land Studies

c/o Prof. T. KOJIMA Dept. Ind. Chem., Fac. Eng., Seikei Univ., 3-3-1 Kichijyoji-Kitamachi Musashino-shi, Tokyo 180-8633, Japan

Phone: +81-422-37-3750, Fax: +81-422-37-3871

e-mail: kojima@chgw.ch.seikei.ac.jp

Submitted manuscripts will not be returned whether they are published or not. Original figures, tables and photos may be returned if authors desired.

Paper Categories

1. **Full-length Original Articles**- Formal presentation of significant and completed research projects. Enough originality is required. Standard length is around ten printed pages (about 7000 words).
2. **Research Notes**- Brief reports with originality. Supplemental or intermediate reports. Reports which require prompt publication is also submitted. Standard length is three to four printed pages (about 2800 words).
3. **Others.**

Proofs and Charges

The authors are requested to correct only first proofs carefully. Publication and reprint charges may be imposed within actual cost. Color photos may be reproduced at an extra expense to the author's.

Copyright Transfer

Upon acceptance of an article by the Journal, the copyright of the article is transferred to The Japanese Association for Arid Land Studies.

Manuscript Preparation

All manuscript should be prepared on A4 (or 8.5 by 11 in.) paper in the order. The text has to be prepared on a diskette, using Word, WordPerfect or similarly well known word precessing system, in double-spacing with 12 point or similar size typeface.

A) Title Page with the following items in this order.

- a) **Category** of paper.
- b) A descriptive and concise title of the paper.
- c) **Authors' names, affiliation(s), and address(es):** first names, middle initials, if any, and surnames followed by their affiliation(s) and address(es). The author to whom **correspondence** should be addressed is to be identified using superscript (*) with phone and fax numbers, and e-mail address (if available).
- d) Five or less **Key words**.

B) Abstract is to be clear and concise. The **length** is around 400 words for full-length Original Articles and 200 words for Research Notes.

C) Main Body should be prepared clearly and concisely. The precise arrangement of the text are left to the authors' discretion. (Each author may choose the format best suited to the paper.) **Figures and Tables** should not be included but be cited in the body. The **placement** of the Tables and Figures appearing first should be clearly identified by noting their numbers in the right hand margin. **Footnote** may not be used. Notes should appear at the end of the body, if necessary. SI (The System Internationale) unit should be used wherever possible. Standard abbreviation may be used.

Literature is to be cited in the text as ROGNON (1994), or (TUCKER *et al.*, 1981, 1985; GROVE, 1986 a, b; LEAN and

WARRILOW, 1989). The words “*et al.*” should be used for three or more authors. Lowercase letters following year may be used if necessary to identify. Cited pages from books should be identified as YOUNG and YOUNG (1992: 15-17).

D) Literature cited should appear at the end of each text in an alphabetical order. Give complete information as in following examples:

GROVE, A.T. (1986 a): The scale factor in relation to the processes involved in “desertification” in Europe. In FANTENCI, R. and MARGARIS, N.S. eds., *Desertification in Europe*, D. Reidel, Dordrecht, 9-14.

GROVE, A.T. (1986 b): The state of Africa in the 1980s. *Geogr. J.*, 152: 193-203.

LEAN, J. and WARRILOW, D.A. (1989): Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, 342: 411-413.

ROGNON, P. (1994): *Biographie d'un désert: Le Sahara*. L'Harmattan, Paris.

TUCKER, C.J., HOLBEN, B.N. ELGIN, J.H. and McMORTREY, J.E. (1981): Remote sensing of total drymatter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 11: 171-189.

TUCKER, C.J., TOWNSHEND, J.R.G. and GOFF, T.E. (1985): African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227: 369-375.

YOUNG, J.A. and YOUNG, C.G. (1992): *Seeds of Woody Plants in North America*. Dioscorides Press, Oregon.

E) Tables should be typed on separate sheets and be prepared in order.

F) Figure captions should be typed on a separate sheet.

G) Figures should be drawn in black ink on a white background. The size of the lettering should be proportional to that of the drawing; it must be a minimum of 3 mm high when the illustration is reduced to 67 mm wide or 140 mm wide. First author's name and figure number should be written in pencil on the right corner of the sheet. Photos may be included as Figures. Preferably printed photos, or high quality reproductions, pasted on A4 paper should be submitted for reviewing process.

H) After the manuscript has been reviewed and accepted for publication, the author should not carry out any corrections that are requested. The final version of the text is then submitted to the Editorial Board together with original figures, photos, and a diskette including an additional text converted into an MS-DOS text file (ASCII file). The Editorial Board is responsible for the final arrangement and Layout of the articles.

For domestic contributors

One or more of the author(s) should belong to The Japanese Association for Arid Land Studies. The authors are requested to prepare Japanese translations of the following items on a separate page; A) Title Page with the following items in this paper. a) Category of paper. b) A descriptive and concise title of the paper. c) Author's names, affiliation(s) and address(es): first names, middle initials, if any, and surnames followed by their affiliation (s) and address (es). The author to whom correspondence should be addressed is to identified using suprescript, with phone and fax numbers, and e-mail address (if available). B) abstract.

編集委員 小島紀徳（委員長：成蹊大学） 嶋田義仁（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 聡（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6月25日

印刷：佐藤印刷（株）

JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

CONTENTS

Frontispiece

- Satoru TAKAHASHI, Fumio WATANABE Tabarek M. ISMAEL, Hisamitsu TAKAHASHI and Kenji FUKUNAGA: Estimation of Water Surface Evaporation and Greening in the Republic of Djibouti

Original Articles

- Hiroshi YOKOTA and Yoshikazu KIRIWA: Agriculture Development and Afforestation in Desert Region — Case study in the United Arab Emirates —1 - 12
- Bing ZHANG, Qingxi TONG, Lanfen ZHENG, Jinnian WANG and Xiangjun WANG: Study on the Land Cover Change in the Loess Plateau of China13 - 18
- Tetsuo OGAWA and Yukuo ABE: Effects of Amount of Evaporation for Varied Properties and Forms of Evaporation Accelerators on the Evaporation Drainage Method19 - 25
- Satoru TAKAHASHI, Fumio WATANABE Tabarek M. ISMAEL, Hisamitsu TAKAHASHI and Kenji FUKUNAGA: Estimation of Water Surface Evaporation and Greening in the Republic of Djibouti.....27 - 35
- Melkamu REGEA, Yoshinobu KITAMURA and Tomohisa YANO: Assessment of Surge Flow Irrigation and Evaluation of Furrow Infiltration Estimation Methods37 - 46
- Ariyoshi KUSUMI and Toyoaki MORISHITA: Construction of Water and Salt Balance Simulation Model to Forecast Long Term Effect of Irrigation Agriculture47 - 60

Research Note

- Fenghe JIN, Yasushi NISHIZAKI, Huaining YIN, Hongxiang BAI, Yingshun ZHENG, Chunyu WANG and Tatsuaki YAMAGUCHI: Effects of the Peat Application on the Improvement of Alkali Soil—A Case Study of Maize Cultivation in the Field of Keerqin Desert, China—61 - 68

Special Reports

- "Proceedings of Joint Symposium of Research Groups for Arid Land Technology and Bio-village (Eighth Symposium on Arid Land Technology)" Summary69 - 70
- Tadashi NAGAHAMA: Biovillage Concept in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China—Model Project for Prevention of Desertification at Elesun Zhen (Sumu) in Khuriye Banner, Inner Mongolia—71 - 76
- Taichi MAKI: Desertification and Greening in China and Food Crisis77 - 83