

## G-2 砂漠化指標による砂漠化の評価とモニタリングに関する総合的研究

### (6) パキスタンにおける砂漠化プロセスの解明と指標化に関する研究

独立行政法人農業環境技術研究所

農業環境インベントリーセンター

(社) 国際環境研究協会

中井 信・大倉利明

松本 聡・角張嘉孝・星野 亨

深井善雄・安西孝雄・石川祐一

〈研究協力者〉独立行政法人国立環境研究所国際室

清水英幸

東京大学大学院農学生命科学研究科

恒川篤史

京都大学大学院地球環境学堂

小崎 隆

平成 13～15 年度合計予算額 24,738 千円

(うち、平成 15 年度予算額 3,802 千円)

上記の予算額には、間接経費 5,709 千円(878 千円)を含む

#### [要旨]

砂漠化のうち約 10%が塩性化などの化学的劣化に起因している。パキスタンは、全耕地面積の約 80%が灌漑農業地という、世界でも類を見ないほど灌漑設備を発達させ、灌漑農業を展開してきた国である。しかし、不適切な灌漑に伴う塩性化によって農作物の減収が顕在化してきている。そこで、塩性化地域における砂漠化の指標抽出のため、インダス川流域灌漑農業・放牧地域の、流域レベルでの砂漠化を進行させる歴史的・宗教的・社会的要因を含む諸要因を解明すると共に、集落レベル・農家レベルでの砂漠化評価のための生物生産力を算出するモデルとして提案された EPIC モデルの塩性化地域への適用性を検討した。

インダス川流域に沿って土壌・水資源などを調査した結果、塩性化プロセスは、土壌生成要因と灌漑水の水質に起因すると考えられた。歴史的、社会的には、インド・パキスタン独立が遠因となり以下のことが起こっている。灌漑システムが分断されたため、安定的な灌漑水の供給が難しくなってきた。その灌漑水の不足を補うために進められた汲み上げ地下水は、現在では水質が悪化して塩類集積の一因となった。シク教徒の移動に伴い、農業開発に必要な資本も移動し、パキスタン側では塩性化に対処するための十分な資本投資が行われなかった。

パキスタンの現地土壌データと EPIC プログラム同梱のデータベースからほぼ同等な土壌データを用いて、EPIC モデルによる生物生産力の推移を試算した。その結果、EPIC モデルの試算が塩性化地域における生物生産力低減を適切に反映していないことが推測された。そこで、モニタリング地区で最も塩性化の進んでいる地点の詳細土壌データと最近地の気象データを用いて、ソルガムの植物生産量と土壌の蒸発散量の変化をシミュレーションした。表層から 1 m 未満に現れる地下水面までの土壌データと気象データを用いても表層への塩集積による土壌劣化は、ソルガムの収量には反映されなかった。さらに、カザフスタンの塩性化地域のデータを EPIC モデルで解析した結果、同様に土壌塩性化が収量に反映されなかった。EPIC モデルでは、土壌 pH が 9.0 以下しか設定していないこと、塩性化土壌で重要な指標である  $\text{Na}^+$ 量や SAR などを属性として扱っていないことが原因で、これらの指標を考慮した EPIC モデルの改良が必要になった。

[キーワード] 塩類集積、砂漠化、パキスタン、モニタリング、  
EPIC (Environmental Policy Integrated Climate)

## 1. はじめに

1998年に砂漠化対処条約 (UNCCD) の締約国となった日本には、アジア地域のテーマ別プログラムネットワーク (TPN)、特に最初に立ち上がった TPN1「砂漠化のモニタリングと評価」という地域活動に関する積極的な研究支援・技術的貢献が期待されている。

砂漠化のうち約 10%が、塩性化などの化学的劣化に起因しているとされており、塩性化に起因する砂漠化進行は、特に農業地域では深刻な問題であり、その評価に関する研究は砂漠化問題において必要不可欠である。本研究グループの一部は平成 10～12 年度にかけて、地球環境総合推進費「G-1 砂漠化の評価と防止技術に関する総合的研究」のサブテーマ3「西オーストラリアにおける砂漠化防止・植生回復に関する要素技術の体系化に関する研究」によって、西オーストラリア・カルグーリーの塩類集積土壌を対象地域として研究を行ってきたが、この地域の砂漠化の原因は主に鉱業活動による表土の攪乱が、溶脱された塩類を地表に還元してしまうことと考えられた。

一方、パキスタンは、全耕地面積の約 80%が灌漑農業地という世界でも類を見ないほど灌漑設備を発達させ、灌漑農業を展開してきた国である。緑の革命ならびに SCARP プロジェクトと呼ばれる 1950 年代からの排水路整備計画により食糧自給率を維持してきたが、この間の不適切な灌漑に伴う塩性化によって農作物の減収が顕在化してきている。さらに、鈍化しない人口増加率 (年 2.5%) とも複合し、近い将来食糧不足を引き起こす可能性があり、早急な対応が求められている。このようにパキスタン、特にインダス川流域は、塩性化の要因を抽出し、塩性化による砂漠化のプロセスの解明を行うためには最適な対象地域である。

なお、サブテーマ 1 の村落レベルにおける生物生産力推定で使用した EPIC (Erosion Productivity-Impact Calculator または Environmental Policy Integrated Climate) モデルは、米国農務省農業研究局 (USDA-ARS) が開発した土壌侵食による土壌肥沃度の低下や作物収量の推移を予測する汎用性のあるモデルである。砂漠化の指標に使われる生物生産力を予測・推定するのに適当なモデルと考えられるが、塩性化地域における生物生産力の見積もりには、EPIC モデルに有効な塩性化の指標を組みこむ必要があることなどが指摘されている。

## 2. 研究目的

上記のような背景から、インダス川流域 (パキスタン、インド・パンジャブ州) 灌漑農業・放牧地域を対象として選抜し、以下の 3 点を目的として研究を進めた。

- ①流域レベル・村落レベルでの塩性化を中心とした自然科学的砂漠化指標を抽出・提示すること。
- ②流域レベルでの塩性化を中心とした砂漠化を進行させる歴史的・宗教的・社会的要因を含む諸要因を解明すること。
- ③村落レベル・農家レベルでの砂漠化評価のための生物生産力を算出するモデルとして提案された EPIC モデルの塩性化地域への適用性について検討すること。

### 3. 研究方法

#### (1) 流域レベル・圃場レベルでの塩性化を中心とした自然科学的砂漠化指標の抽出

インダス川流域に沿って上流～下流までモニタリング圃場を4ヶ所設置した。各圃場は、基本的に現地農民の私有地であり、カウンターパートである水資源研究センターによる指導のもと、現地農民により維持管理されている。モニタリング圃場の位置ならびにその概要を図1に示す。

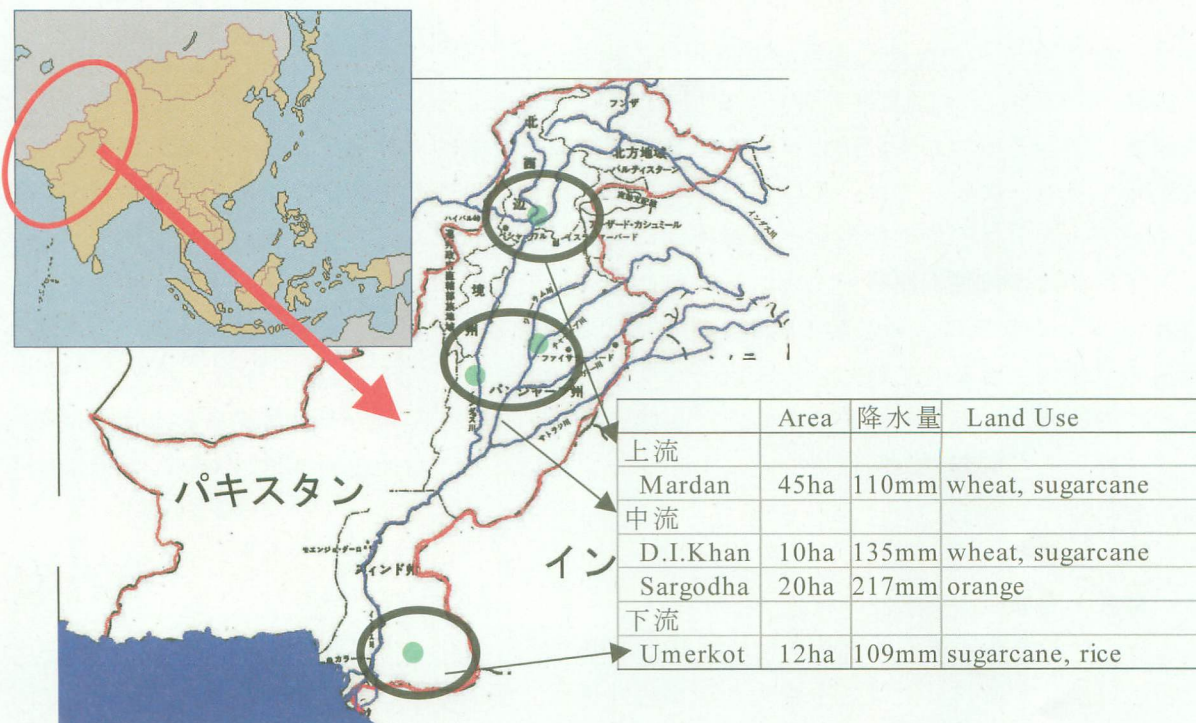


図1 パキスタンにおけるモニタリング圃場の位置と概要

気象データは、各圃場に設置した簡易気象ステーションにより、最高・最低温度、風速、降雨量、蒸発量を測定した。土壌については、各圃場内のもっとも塩性化の進んだ1～3箇所から、深さ別に2～3点(0cm～30cm、30cm～60cm、60cm～)の試料を採取し、塩性化に関連すると思われる項目(土性、pH、EC、交換性Na)について現地カウンターパートと協力して、現地で分析・測定を行った。水資源に関し、土地所有農民に対して聞き取り調査を行い、Mardanを除く3圃場において試料を採取し、土壌と同様に分析に供した。

さらに、2003年12月に、Sargodha地区において収量の異なる4圃場で土壌断面調査と土壌層位に基づいた理化学的性質の分析を行った。塩類集積程度の違いによって土地利用状況は以下の4つに区分された。すなわち、1. 放棄地(以下、Bhawal 1とする)、2. 耐塩性の高い牧草(現地名:Kallar Grass)、グアバ、レモンを導入し塩害化改良試験を施して2年が経過した放棄地(以下、Bhawal 2とする)、3. 稲作地(以下、Fathiabadnun 1とする)、4. トウモロコシ-小麦二期作地(以下、Fathiabadnun 2とする)である。Bhawal 1の圃場全面、ならびにBhawal 2の圃場の一部は塩類が集積しているのが観察された。各圃場で土壌層位ごとに試料を採取し、現地で風乾後、日本へ持ち帰り、粒径分布、pH、電気伝導度(飽和土壌溶液)、炭酸塩濃度、有機態リン、窒素、交換態カリウム等各理化学的性質の分析に供した。

## (2) 歴史的・宗教的・社会的要因を含む砂漠化要因の解明

インダス川流域の自然条件、社会経済条件、土地利用・水利用等に関して、主に既存の文献の収集と現地調査を行った。また、平成13年度は現地の政情を鑑み、インド・パンジャブ州で現地調査を行った。それらの情報から歴史的・宗教的・社会的要因を含む、塩類集積を主とした現地の砂漠化の要因について考察を行った。

## (3) EPIC モデルの塩性化地域への適用性の検討

EPIC モデルは、米国農務省農業研究局(USDA-ARS)によって、風食や水食による土壌損失、土壌侵食に関わる研究および防止策による費用対効果を定量的に評価することを目的に開発されたモデルである。本研究では、集落レベル・農家レベルでの砂漠化評価のための生物生産力を算出するモデルとして、塩性化地域への適用性について検討した。まず、研究対象地であるパキスタン・インダス川流域の農耕地において、塩性化進行程度の異なるモニタリングサイトを設定し、EPIC モデルの利用に必要な圃場データの収集を行った。次に、そのデータを用いてモデルを適用して作物生産量の変動をシミュレーションし、塩性化が予測に反映されるかどうかを検討し、モデルの改良に必要な指標を考察した。また、サブテーマ5からカザフスタンの塩性化地域のデータを提供してもらい、同様にシミュレーションを行って、塩性化地域でのモデルの適用性を検討・考察した。

## 4. 結果・考察

### (1) 塩性化を中心とした自然科学的砂漠化指標の抽出 (モニタリング圃場における塩性化)

モニタリング圃場における土壌の理化学的性質は、表1に示した。現地設備によっては、一部測定不可能であった項目があった。土性に関しては、Mardan 圃場が壤土、Sardgodha 圃場が壤土から埴壤土であるのに対して、D.I.Khan 圃場、Umerkot 圃場はシルト質壤土～シルト質埴壤土であり、下流ほど細粒質であった。pH は、Umerkot 圃場がやや低いものの(pH 7~8)、それ以外のいずれのサイトでも非常に高く、9.0以上を示した。また、電気伝導度(EC)は、インダス川上流域にあたるMardan や中流域のD.I.Khan よりも、同じ中流域のSargodha(No.2)や下流域のUmerkot で高い値が見られた。さらに、Umerkot 圃場では交換性Naも高く、表には示していないがナトリウム土壌の基準であるSARが13以上となった。これらのことから、特にMardan 圃場などでは化学的な土壌荒廃として、塩性化よりもむしろ高pHの影響が大きいと予想される。塩害は、下流の圃場ほど影響が大きくなり、塩害に加えて、ナトリウム害が大きくなると考えられた。

塩類土壌は現地では「thur」と呼ばれ、10月から3月には白いクラストが表面に現れるが、土壌の構造そのものには影響が現れない。土壌の透水性および排水性は良好のまま保たれている。交換性ナトリウム含量が高く、極端に高いときには土壌中の溶解有機物は融解し、暗茶色もしくは黒色を呈する。このようなナトリウム土壌は「bara」と呼ばれている。

表2に、D.I.Khan、Sargodha、Umerkotの3圃場で用いられている灌漑水の理化学的性質を示した(Mardan 圃場については試料が採取できなかったため、欠損)。掘抜井戸を水源とする灌漑水は、D.I.Khan 圃場を除いて、いずれも電気伝導度(EC)や全可溶性塩類濃度(TDS)は高かった。後述するように、一般にパキスタン全土において灌漑用水路の水質は掘抜井戸の水質と比較して良好であるが、今回の圃場においても全く同様の傾向が見られた。ただし、D.I.Khan 圃場において、

掘抜井戸を用いたにも拘わらず、比較的良好な水質を示した理由としては、この掘抜井戸は用水路に近接しており、用水路から浸潤した比較的水質の良好な水がこの掘抜井戸に混入していると考えられる。そのため、掘抜井戸にも拘わらず、比較的良好な水質が保たれていると推定された。

表1 各モニタリング圃場の土壌の理化学的性質

Site	No.	深度 (cm)	土性	pH	EC (dS/m)	Ex. Na (cmol/k g)
Mardan	1	0-15	L	9.15	1.04	-
		15-30	L	9.62	1.32	-
		30-60	L	9.68	1.49	-
	2	0-15	L	9.24	1.56	-
		15-30	L	9.3	1.75	-
		30-60	L	9.33	1.85	-
D.I.Khan	1	0-15	SiL	9.4	2.71*	1.8
	2	0-15	SiCL	9.3	4.33*	3.9
	3	0-15	SiCL	10	0.62*	5.7
Sargodha	1	0-15	CL	8.4	1.3	15.6
		15-30	CL	8.4	1.1	12.6
	2	0-15	L	9.9	46.7	-
		15-30	L	9.1	3	-
Umerkot	1	0-15	SiL	7.5	18.28	120.76
		15-30	SiCL	7.5	24.8	194.46
		30-60	SiL	7.7	17.47	120.65
		60-90	SiL	7.5	34.3	264.46
	2	0-15	SiL	7.2	35.1	269
		15-30	SiL	7.5	17.84	119.85
		30-60	SiCL	7.5	13.38	98.78
		60-90	SiL	7.4	16.86	121.28
	3	0-15	SiL	7.5	18.24	104.88
		15-30	SiCL	7.2	31	228.47
		30-60	SiL	7.1	31.3	205.48
		60-90	SiL	7.5	24.4	159.47
	4	0-15	SiL	7.4	22.1	136.98
		15-30	SiL	7.4	23.3	130.97
		30-60	SiL	7.4	18.52	120.18
		60-90	SiL	8	6.18	31.78

L:壤土、CL:埴壤土、SiL:シルト質壤土、SiCL:シルト質埴壤土。

\*ECの測定は飽和溶液抽出法ではなく、1:2.5水抽出法を用いた。

表2 各圃場における灌漑水の理化学的性質

Site	water resource	pH	EC(dS/m)	TDS(ppm)	Ca+Mg (meq/L)	Na (meq/L)	SAR
D.I.Khan	Groundwater	8.2	0.7	440	9.0	1	0.47
Sargodha	Groundwater	8	1.74	1,114	4.6	12.8	8.42
	Groundwater	8.5	2.94	1,882	-	-	-
Umerkot	Canal water	7.6	0.26	150	2.0	0.59	0.59
	Groundwater	7.6	1.95	1,170	11.3	8.18	3.45
	Groundwater	7.8	3.74	2,240	26.3	11.12	3.07

土壌・灌漑水の理化学的性質から、塩性化の発生要因は灌漑水の水質による影響が大きいと考えられる。灌漑水の水質は、掘抜井戸なのかインダス川支流の用水路なのかという水源の違いに依存することが大きい。Mardan 圃場の灌漑水に関しては試料が採取できなかったが、現地での聞き取り調査からインダス川支流の水路を水源としていることが推定されている。

Sargodha 地区の土壌の理化学的性質を表 3 に示した。A 層は 10~13cm であり、機械あるいは牛馬による浅耕が行われていると推測された。耕作放棄後数十年経過した Bhawal 1 でも、A 層は明瞭に残っており、耕作放棄後に大規模な土壌攪乱は行われていない。土層密度については、収量が低下している Bhawal 1、2 圃場では A~BC 層までほぼ均一の土層密度を示したが、耕作が続けられている Fathiabdnun 1、2 圃場では、A 層に比較して、B~BC 層で高い土層密度が見られた。硬盤が B 層表層に見られたため、農作機械による圧密が生じたと推定された。しかしながら、この土層密度と粒径分布に影響されると考えられる飽和透水係数については、土層密度と粒径分布との間に明瞭な関係は見られなかった。飽和透水係数については、透水性が最も良好な Fathiabdnun 1 A 層においても  $10^{-6}$ m/s であり、透水性は低かった。pH、EC が示すようにこの地域はアルカリ塩類土壌であり、粘土の分散が生じ、そのために透水性が低下したと考えられる。pH についてはすべての圃場・土層において 8 以上とアルカリ性を示し、とくに塩類化の進行が甚大な Bhawal 1、2 表層においては、pH は 10 以上を示した。また、表層土壌の飽和溶液の電気伝導度は、A 層がもっとも高い傾向を示し、0.75~39.60 dS/m と、塩類化の進行に伴い急速に上昇した。一般に、飽和溶液の電気伝導度 4.0 dS/m が塩類集積による作物の生育障害が生じる指標とされるが、収穫の期待できない Bhawal 1、2 圃場ではこの基準値を大きく上回る塩類集積が生じていることが明らかになった。また、炭酸塩濃度は、pH の上昇に伴い蓄積されるため、Bhawal 1、2 圃場でとくに高い値を示した。

一方で、窒素、有機リン、交換性カリウム、有機炭素などの土壌肥沃度は、収量の増大に比例して増加した。この理由としては二つの可能性が考えられる。一つは、耕作放棄され裸地化されたまま長期間放置されることで、水食の被害を受けやすくなり、肥沃な土壌表層が失われた。もう一つの可能性としては、塩害が生じ、耕作放棄された土地では、肥料・植物残渣の圃場への投入が停止されたのに対して、生物生産が維持されている圃場では、肥料・植物残渣が継続的に圃場へ投入されることで肥沃度の低下が防止され、さらに肥沃度の上昇に寄与している。いずれが正しいのか現時点でははっきりしないが、施肥の状況、水食の有無について聞き取り調査を進めることで、明らかにできると思われる。いずれにしろ耕作放棄された塩類集積圃場では、肥沃度が非常に低いことは以上の結果からはっきりしている。このような圃場の修復のためには、除塩を行い、土壌表層の塩濃度を下げると同時に、栄養塩を投入し肥沃度の改善を図る必要があることが示唆された。

また、いずれの土地でも地下水位は非常に高く、地表 80~90cm に位置していた。このことは、現在収量が安定している Fathiabdnun 2 圃場においても、近い将来塩類集積を起こす可能性は非常に高い。すでに塩類集積してしまった土壌の修復も重要であるが、予防的な観点ならびに修復にかかる費用対効果から見れば、このような将来的に容易に塩類集積を起こしうる土地を的確に見だし、塩類集積を予防するための現地技術を農民に普及できるかどうか今後の課題である。以上の考察から、塩性化には、灌漑水の水質、さらに灌漑水の水源がもっとも影響すると考えられた。

表 3-1 Sargodha 地区における土壌の理化学的性質

地名	層	土層厚さ (cm)	土層密度 (t/m <sup>3</sup> )	飽和透水		シルト 含量(%)	pH
				係 数 (m/s)	砂 含 量 (%)		
Bhawal 1	Ap	12	1.64	7.3E-08	41.7	35.1	10.0
	Bw	23	1.67	8.9E-08	53.2	25.2	9.8
	Bt1	30	1.64	2.5E-07	50.4	25.7	9.6
	Bt2	15	1.55	2.4E-07	49.8	27.0	9.6
	Bt3	40	1.52	4.1E-07	46.7	27.8	9.7
Bhawal 2	Ap	10	1.63	1.3E-07	55.5	28.2	10.3
	Bw1	25	1.59	6.5E-08	40.0	37.2	10.2
	Bw2	32	1.55	1.0E-08	33.1	41.2	9.9
	Bw3	34	1.52	6.7E-08	26.2	48.2	9.9
Fathiabadnun 1	Ap	13	1.54	2.7E-06	51.1	26.4	8.7
	Bw	19	1.89	3.8E-07	52.9	23.8	8.9
	BC1	18	1.82	3.6E-08	60.0	20.6	8.8
	BC2	20	1.70	5.9E-06	50.9	26.4	8.8
Fathibadnun 2	Ap	10	1.68	1.9E-08	46.6	31.5	8.8
	Bw1	21	2.73	2.0E-07	42.7	30.9	8.8
	Bw2	24	2.76	1.9E-07	48.0	28.6	8.8
	BC	35	2.71	5.4E-08	29.9	48.8	8.7

表 3-2 Sargodha 地区における土壌の理化学的性質

地名	EC(dS/m)	総炭酸塩 濃度(%)	全窒素(%)	有機リン酸 濃度(g/t)	交換性 カリウム (cmol/kg)	有機態 炭素含量 (%)
Bhawal 1	39.60	2.71	0.0191	25	0.35	0.31
	5.09	0.70	0.0158	50	0.19	0.28
	5.10	0.56	0.0161	69	0.16	0.27
	3.20	0.58	0.0146	20	0.15	0.23
	2.79	0.83	0.0135	26	0.14	0.22
Bhawal 2	22.00	1.41	0.0116	11	0.22	0.17
	13.05	0.93	0.0099	31	0.17	0.13
	6.86	1.25	0.0113	23	0.11	0.12
	4.43	1.36	0.0109	19	0.09	0.11
Fathiabadnun 1	1.02	0.57	0.0719	69	0.26	1.20
	0.74	0.44	0.0222	84	0.19	0.41
	0.67	0.29	0.0175	89	0.17	0.31
	0.67	0.47	0.0181	86	0.19	0.30
Fathibadnun 2	0.75	0.32	0.0678	103	0.29	1.06
	0.83	0.61	0.0307	76	0.17	0.49
	0.97	0.42	0.0223	26	0.14	0.36
	0.91	0.32	0.0196	85	0.14	0.34

## (2) 歴史的・宗教的・社会的要因を含む砂漠化要因の解明

既存の文献の収集<sup>1)~6)</sup>と、現地聞き取り調査の結果、以下の点が明らかになった。

### ① 歴史的要因：

インダス川流域レベルにおける砂漠化進行要因を解明する上で、もっとも主要な遠因はインド、パキスタン独立(1947年)である。独立と同時に、それまで単一の行政区域であったパンジャブ州の中央部に国境が引かれ、同州は分断されたが、単なる国境の線引きに留まらなかった。両国分裂と同時に灌漑システムは分断され、インドーパキスタン間の水利協定により5つの河のうち東側3本(Ravi、Beas、Sutlej)の水利権はインド側に属することとなり、パキスタン側では残された2本の支流(Jhelum、Chenab)により全灌漑網をまかなわざるを得なくなった。そのため、新たな水路(link canal)や多目的ダムの建設により灌漑網内の水量の再分配を試みたが、インド側での水需要が増大するにつれて、灌漑水が不足し、安定的な灌漑水の供給が難しくなった。その結果として、パキスタン農民が計画的な灌水を行わず、水がある時にあるだけ灌水する「不適切な」灌漑が行われるようになったと考えられる。

### ② 汲み上げ井戸の影響：

①で述べた水資源の不足を補うために、汲み上げによる地下水の確保が進んでいる。現在では、全灌漑水量の33%が地下水から供給されている。河川水の水質は、上流で150-200 mg/L TDS (Total Dissolved Solids)、下流で300-420 mg/L TDSと、下流に進むに連れて水質は悪化していくが比較的良好である。それに対して地下水の水質は悪化している。とくにインダス川下流域に位置するシンド州では、3,000 mg/L TDSを超える地下水が全体の75%に達する(表4)。

表4 灌漑農地における州別塩害発生状況 (1977-79)  
(Ahmad and Chaudhry (1988)<sup>7)</sup>より改変)

州名	総灌漑面積 (Mha)	非塩害	軽度	中度	強度	非耕作地
Baluchistan	0.35	0.26	0.06	0.02	0.01	-
NWFP	0.62	0.48	0.06	0.01	0.01	0.06
Punjab	10.17	8.54	0.71	0.41	0.31	0.20
Sind	5.58	2.79	1.06	0.56	1.00	0.17
Total	16.72	12.07	1.89	1.00	1.33	0.43

### ③ 社会的・経済的・宗教的要因：

インダス川上流域であるインド・パンジャブ州において調査を行った結果、社会性とくに宗教的な観点からは、インド・パキスタン独立に際して次のような変化が見られた。

宗教的には主にイスラム教徒がパキスタン側に移り、シク教徒がインド側に居住するようにな



った。シク教はインド国内ではマイナーな宗教ではあるが、インド・パンジャブ州内では最大派閥であった。シク教の大きな特徴の一つにヒンズー教とは異なるカースト制度が挙げられる。シク教の最上階層は富裕農民であり、同時に彼らはイギリスとの関わりが非常に深い背景を持っている。そのため、同州内の農業に非常に熱心であり、農地開発に投入する資本も持ち、イギリスの先端農業技術と接する機会も多かったのである。そのため、インド・パンジャブ州においては塩害は比較的小規模であり、緑の革命がスムーズに行われたと考えられる。一方で、パキスタン側に移住したイスラム教徒は農地開発に投入する資本が少なく、先端農業技術を自らの農地で展開する機会も乏しかったと考えられる。

以上のように、インド・パキスタン独立(1947年)に伴い、①灌漑システムは分断され安定的な灌漑水の供給が難しくなり、②灌漑水の不足を補うために進められた汲み上げ地下水の水質が悪化して塩類集積の一因となり、③ヒンズー教の一派であるシク教徒とイスラム教徒の移動に伴い、農業開発に必要な資本も移動し、パキスタン側では塩性化に対処するための十分な資本投資が行われなかった、ということが土壌塩性化の社会経済的な背景として浮かび上がる。

### (3) EPIC モデルの塩性化地域への適用性の検討

公表当初の EPIC モデルは、「Erosion Productivity-Impact Calculator」と命名されたが、その汎用性が注目され、現在では「Environmental Policy Integrated Climate」Model と呼ばれている。EPIC モデルは、天候、水文、侵食、栄養塩サイクル、農薬動態、土壌温度、耕作の状況、作物生育、栽培および土壌管理、経済の 10 項目のサブコンポーネントからなる。それぞれのサブコンポーネントの、入力項目、データ入力フォームに関する解説はオンラインマニュアルに記載されている (<http://www.brc.tamus.edu/epic/index.html>)。

EPIC モデルは、作付体系に基づいた圃場単位における土壌侵食の作物生産に及ぼす影響を推定することを前提に開発されているため、要求されるデータ項目・数ともに非常に多い包括的シミュレーションプログラムである。つまり、大縮尺の土壌図上で、土壌統レベルで認識される範囲(数 ha~数十 ha)の圃場の土壌生産力と作物収量を精密に評価する事を目的としている。より広範囲の流域レベルでも、図示単位のポイントデータが相当数得られる場合は、個々の単位の信頼性は低下しないであろうし、それらの集合体の面積に基本的に制限はない。しかし、図示単位の精度(つまり解像度)に呼応して、全図の信頼性の大小が決定されることも念頭にすべきと考えられる。一般に土壌図は、大縮尺では下位の分類レベルまで図示されているが、小縮尺土壌図ではより上位の分類単位で表示される。このような性質を持ったプログラムであることから、評価対象を圃場レベルとしている研究が多い。

一方、EPIC プログラムに同梱されている約 800 個の米国土壌統のデータセットは、評価対象への代替値として利用できるようにされており、欠損データを初期値(デフォルト)としておく柔軟性もプログラムにはある。追加・更新されたデータは USDA-NRCS の web サイトからダウンロード可能である (<http://ssldata.nrcs.usda.gov/querypage.asp>)。また、EPIC は、数十~数百年単位での作付け体系のシミュレーションが可能であり、さまざまな環境因子を包括的に属性データとして扱い、土壌侵食によって、ある土壌型の農地で、作付体系や土壌管理によって、作物収量がどのように変化するかを予測することができる。モデル開発の背景には、1980 年代に米国の中西部穀倉地帯が風食による表土流亡が深刻化し、土壌保全による農家への補助金算出の科学的根拠を行政

サイドが必要としていた、ということがある。

本研究ではまず、EPIC モデルが使用する土壌の属性(パラメータ)のレビューを行った。EPIC は、元来、小縮尺の範囲で土壌侵食の作物生産に及ぼす影響を推定することを前提に開発されているため、要求されるデータ項目・数ともに非常に多い包括的システムである。しかしながら、実利性を成り立たせるために、欠損データの項目によっては、ダミー値(0または空白)を挿入することで、計算結果が得られるよう配慮されており、モデルを使用すること自体は柔軟性に富んでいると思われた(表5)。

表5 EPIC モデルで使用する土壌属性

1. Soil albedo
2. Max. number of soil layers*
3. Min. thickness of max. layer*
4. Initial layer splitting thickness*
5. Min. soil profile thickness*
6. Initial soil water content-fraction of field capacity*
7. Min. depth of water table*
8. Max. depth of water table*
9. Initial depth to water table*
10. Soil weathering code*
11. Time for subsurface flow travel time
12. Depth from surface to the bottom of the soil layer
13. Bulk density of the soil layer
14. Wilting point (1.5Mpa)*
15. Field capacity (0.033Mpa)*
16. Sand content
17. Silt content
18. Organic N concentration*
19. Soil pH
20. Sum of bases*
21. Organic C
22. Calcium carbonate
23. Cation exchange capacity*
24. Coarse fragment content*
25. Initial nitrate content*
26. Labile P concentration*
27. Crop residue*
28. Bulk density*
29. Phosphorus sorption ratio*
30. Saturated conductivity*
31. Fraction of storage interacting with NO <sub>3</sub> leaching
32. Organic P concentration*

\* データ欠損の場合ダミー値(0または空白)を入力する項目

表5より、EPIC モデルで実測データの入力を求められる項目は以下の10項目であることが分かった。Soil albedo、Time for subsurface flow travel time、Depth from surface to the bottom of the soil layer、Bulk density of the soil layer、Sand content、Silt content、Soil pH、Organic C、Calcium Carbonate、Fraction of storage interacting with NO<sub>3</sub> leaching。本研究で得られた圃場データ<sup>8)</sup>(前記(1)参照)を、オリジナルEPICモデル(EPIC5300、MS-DOSバージョン)に入力して得られた結果と考察を以下に述べる。

まず、現地モニタリングサイトの土壌データセットの欠落を補うため、EPICモデルに同梱されていた米国の約800断面に及ぶ代表的土壌統(soil series)を参照し、本プロジェクトのモニタリン

グサイトの一つである Punjab 州 Sargodha 地区に近似の土壌・気象条件を探し、シミュレーションを試行した。EPIC モデルから得られるシミュレーションのアウトプットは 80 項目にのぼる。本報告では塩性化による砂漠化指標として、それらのアウトプットから生物生産量(バイオマス)、蒸発散量、全窒素、作物に吸収された硝酸態窒素量などを評価対象として選定した。

EPIC モデルに使用する土壌データは、本プロジェクトで実施した詳細土壌調査によって取得できた。また、圃場の気象データに関しては、米国の気象データセンター(NCDC)の提供するデータセットを参照した( <ftp://ncdc.noaa.gov> )。そのデータセットから、詳細土壌データセットの取得地域である Sargodha(32°04' N、72°13' E)が欠落していたため、もっとも近接する Lahore(31°33' N、74°24' E)の気象データを用いた(WMO の観測所 No. 416400)。気象データは主に 2003 年分を使用した。月別平均最高最低気温/降水量のグラフを図 2 に示す。

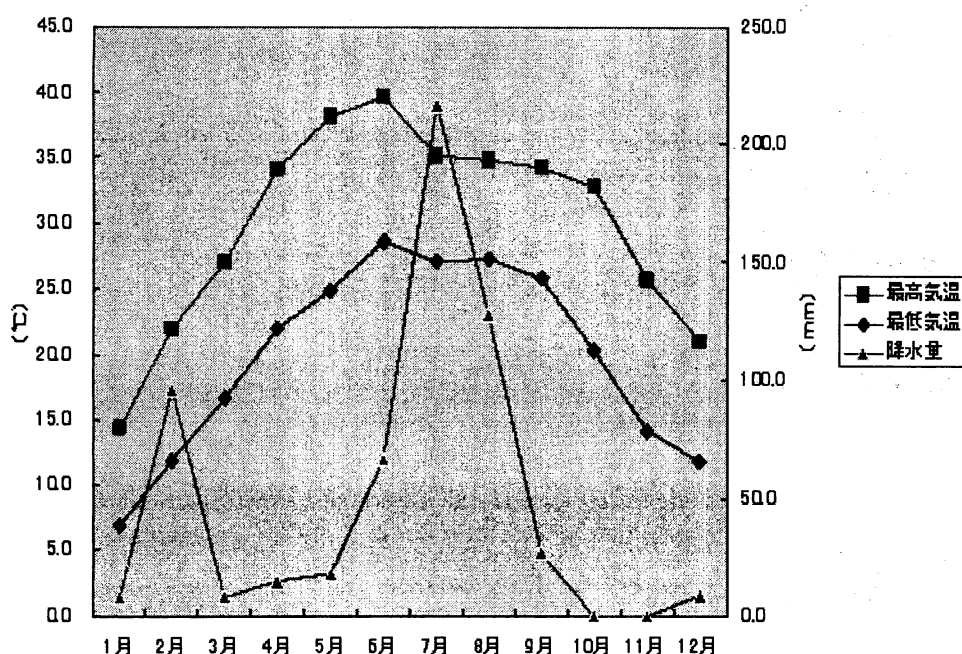


図 2 Lahore の気象データ (2003 年分)

EPIC モデルのデータ入力フォームのうち、Sargodha 地区の現地調査、理化学的性質の分析結果による土壌データおよび最近地の Lahore の気象データを新たなファイルとして作成した。

EPIC モデルは農耕地の土壌環境変化に伴う作物収量の推移を予測することを第一義としているモデルであり、特定の作物を選定することによって、生物生産量(バイオマス)の推移を予測することが出来る。そこで、サトウキビを栽培作物として選定し、Bhawal2 の土壌条件で作付けを行った場合のシミュレーションを行った。結果を以下に示す(図 3、4)。

土壌中の全窒素(硝酸態として算出)は、経年とともに集積する結果となった(図 3 左)。一方、サトウキビに吸収された窒素(図 3 右)は、サトウキビの収量(図 4 左)と連動しており、年次変動は大きい。長期的に収量、窒素吸収量の低下傾向が認められた。蒸発散量は、年次間の変動はあるものの、長期的にはほぼ一定していた。土壌中での窒素の集積(図 3 左)は、降水量実測(図 2)と蒸発散量のシミュレーション結果(図 4 右)より、年間を通じて蒸発散量が降水量を上回ること

から、土壌断面中での上方への物質移動が顕著であることを示唆している。EPIC モデルのパラメータでは、灌漑水の塩濃度も入力する。定義された範囲の濃度を変えてシミュレーション結果に反映されるかどうか比較したが、収量に変化は認められなかった。このことは、灌漑水の塩濃度が現在のモデルでは実際には機能していないことを示す。

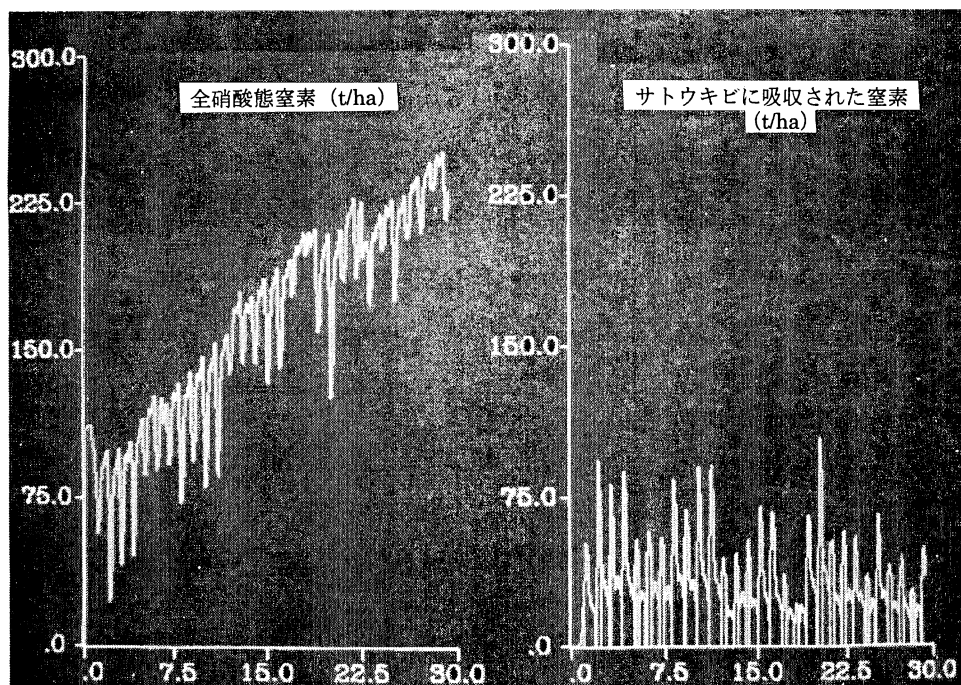


図3 Sargodha 地区 Bhawal2 土壌条件における窒素の集積と作物による吸収 (30年間の栽培)

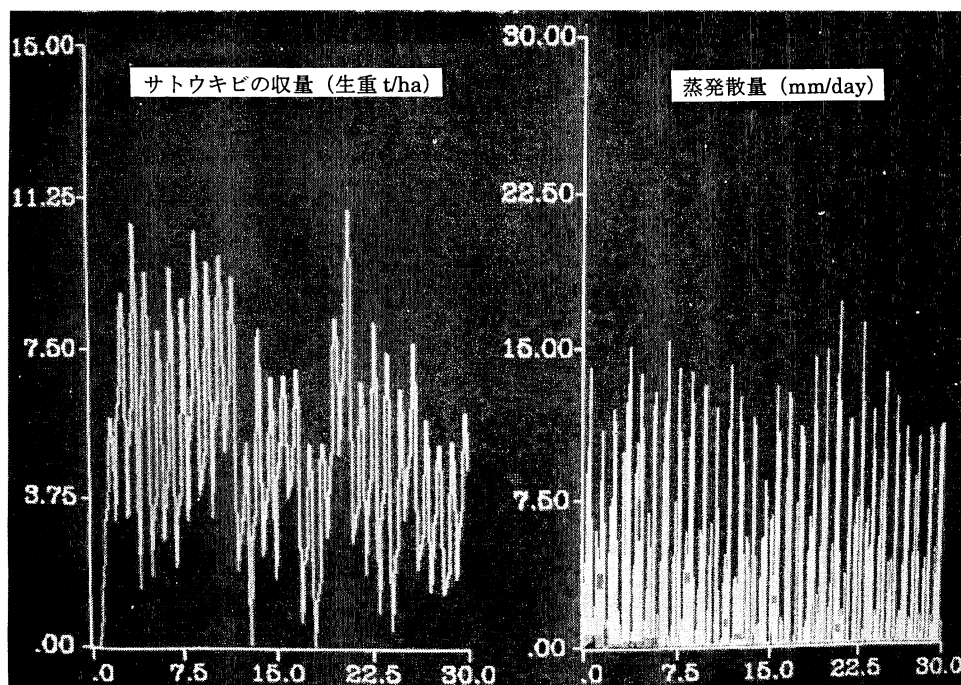


図4 Sargodha 地区 Bhalwal2 土壌条件によるサトウキビの収量と蒸発散量 (30年間の栽培)

地下水面まで連続して層位別に採取した試料の分析データを用いても、サトウキビを栽培した場合の植物生産量には長期的な遞減傾向が認められたが、土壌からの蒸発散量の変化は明瞭ではなかった。また、シミュレーションのアウトプットに、土壌中の塩濃度は含まれていないことから、砂漠化指標としての塩性を現在の EPIC モデルによって直接評価することは難しいと思われる。

塩性化指標の構成要素である土壌属性として、土壌 pH、EC、Na イオン、SAR (Sodium Adsorption Ratio) が挙げられるが、EPIC モデルでは土壌 pH の入力範囲が高 pH 側は 9.0 までしか設定されていないこと、Na イオンの量や SAR などを属性として扱っていないことなどのため、生物生産力を正確に予測できなかったと思われる。土壌が塩性化すると pH が高くなり、Na イオンが多くなって SAR が高くなることなどが分かっており、EPIC モデルにこれらの指標を組込んで、再評価することが必要であることが示された。

さらに、サブテーマ 5 から提供されたカザフスタンの圃場データについても EPIC モデルによる生物生産力のシミュレーションを行った。カザフスタンはパキスタンと異なる気象・土壌条件であり、栽培作物も異なることから、塩性化指標の適用範囲拡大に資すると考えられる。提供されたデータのうち、気象データは日最高最低気温が記載されていなかったため、米国の気象データセンター (<http://www.ncdc.noaa.gov/cgi-bin/res40.pl#F>) より、Kazalinsk のデータを取得し、EPIC モデルが必要とする月別平均最高・最低気温、それらの標準偏差、降水量などを 2003 年について求めた。土壌データは、Kazalinsk の灌漑耕地 (IR8) を使い、栽培作物を小麦として EPIC モデルの適用を行い、Sargodha 地区で得たシミュレーション項目に準じた。結果を図 5、6 に示す。

Kazalinsk のデータセットから得られたシミュレーション結果も、Sargodha 地区と同様の傾向を示した。すなわち、塩類の集積が現実として認められるのにも拘わらず、作物の収量に塩害による遞減が見られない。窒素の集積を塩類の集積と読み替えることで、塩性を表現することは可能である。しかしながら、土壌劣化の現れとするためには、塩類集積を示すパラメータにおいて、値がある閾値を超えた時点で作物収量が減少するようなアウトプットを導き出す必要がある。

また、蒸発散量が降水量を上回る、乾燥地・半乾燥地の気象条件では、溶解している塩類の土壌中での移動は、上方への集積であると考えられることから、窒素の集積(図 3 左、図 5 左)と類似の挙動が Na、Mg、Ca などの塩類にも認められるのではないかと考えられた。現在の EPIC モデルでは、それらの塩類の集積による作物生産量への影響をパラメータとして組み込んでいないので、先述の pH の定義範囲拡大や SAR などとともに生物生産力の計算式に組み込むことが必要である。

EPIC モデルは開発言語として Fortran を使用しており、現在の Windows 画面に慣れているユーザーには使いにくい感があるのは否めない。また、Fortran によるプログラム開発を行える技術者も減ってきている現状では、EPIC モデルを最新の Windows 環境に移植する作業が必要であると思われる。そのことは、開発元の USDA-ARS だけでなく、欧米の大学や研究機関でも認識されており、操作環境の改良に向けた取り組みが始まっている。

本プロジェクトで取り組んだ砂漠化指標の一つとしての塩性化指標を確立することは、現行の EPIC モデルそのままでは難しいことが判明したが、窒素の集積現象を塩集積と重ね合わせて考察することにより、塩性化指標を得られる可能性が示唆された。これは、インターフェースが古くとも、EPIC モデルの包括性が大きいことを示している。また、プロジェクト期間を通じ、USDA-ARS

の EPIC 開発チームとの情報交換によって、彼らが EPIC モデルを中核とした Windows 版プログラムの開発を合衆国対象に始めたこと、塩性化影響のシミュレーションには現状の EPIC モデルでは不備があることを認め、アジアのフィールドを有する日本の研究者との共同研究推進を提案してきたことは、本プロジェクトの実施によって得られた波及効果である。彼らとのより緊密な交流・協働は、今後の塩性化地域における有効な生物生産力推定に関する研究を推進する上で有益であり、本研究の礎の上に、新たな展望が開来つつある。

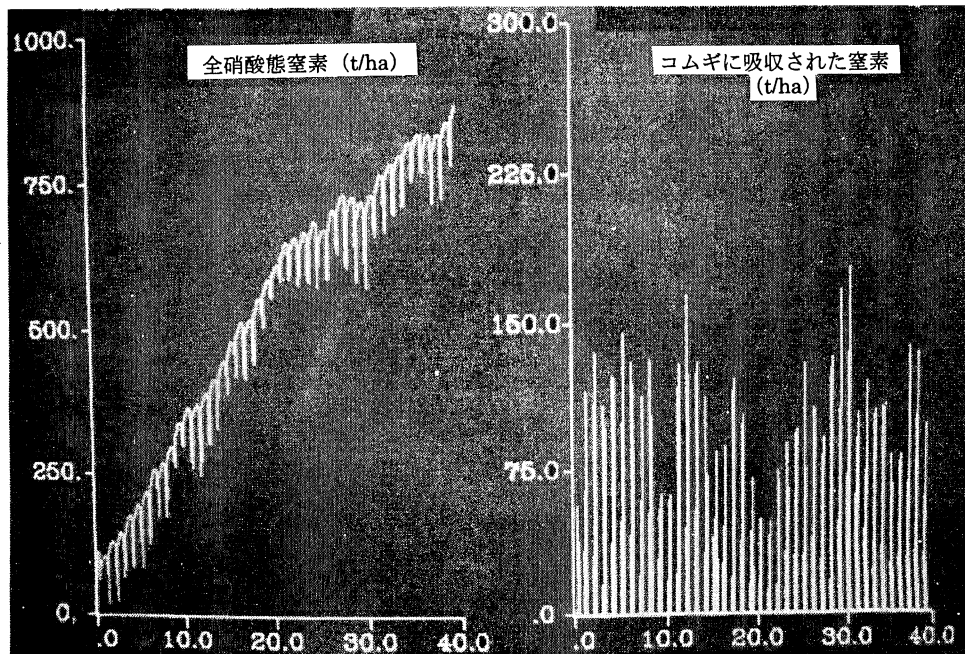


図5 Kazalinsk 土壌条件における窒素の集積と作物による吸収 (40年間の栽培)

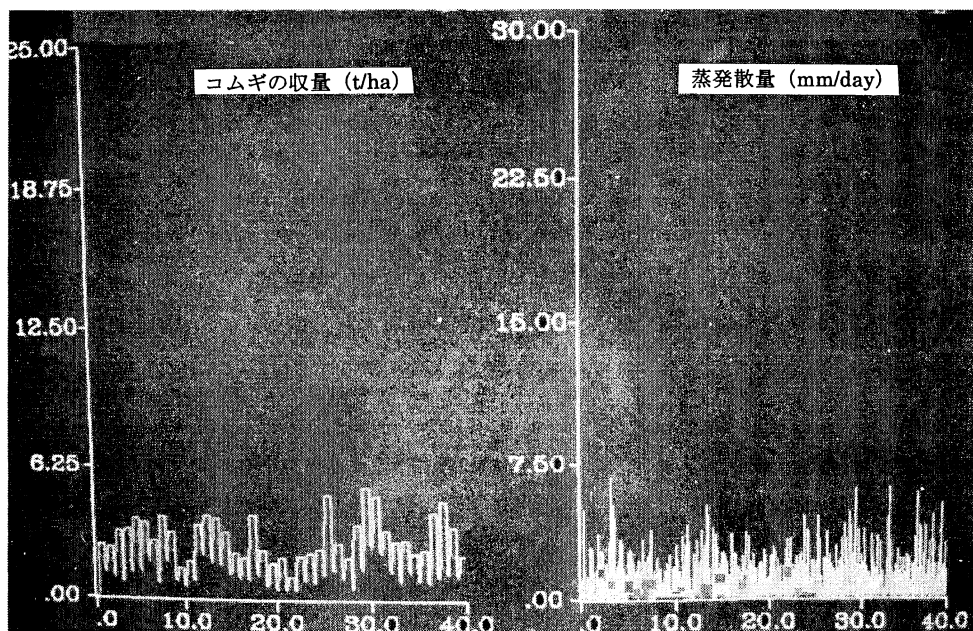


図6 Kazalinsk 土壌条件におけるコムギの収量と蒸発散量 (40年間の栽培)

## 5. 本研究により得られた成果

全耕地面積の約 80%が灌漑農業地というパキスタンにおいて進行している塩害による砂漠化に関して、以下の成果が得られた。①インダス川流域に沿って土壌・水資源などを調査した結果、塩性化プロセスは、土壌生成要因と灌漑水の水質に起因すると考えられた。②また、歴史的、社会的には、インド・パキスタン独立が遠因となり、灌漑システムが分断されたため、安定的な灌漑水の供給が難しくなり、その灌漑水の不足を補うために進められた汲み上げ地下水の水質悪化が塩類集積の一因となった。③シク教徒の移動に伴い、農業開発に必要な資本も移動し、パキスタン側では塩性化に対処するための十分な資本投資が行われなかったことが、現在の塩性化問題を引き起こしていることが示唆された。

④なお、パキスタンの塩性化地域の現地土壌データなどの基礎データを収集・整理したことは、今後の現地における環境変動の予測ならびに、塩性化回避のための方策提言にとって非常に有用であった。⑤また、塩性化発生要因が今回の調査から推定され、とくに塩害を発生しやすい地域・圃場をあらかじめ予測し、集中して労力を配置することが可能になった。⑥さらに、塩性化による砂漠化地域における生物生産力の推定・評価には、現状の EPIC モデルでは不備があることを示し、新たに塩性化による生物生産力低減を考慮したモデル開発が必要であることを明らかにした。

## 6. 引用文献

- 1) 国際農林業協力協会. パキスタンの農業－現状と開発の課題. 1981. AICAF, 東京, 87pp. 13-43.
- 2) 国際農林業協力協会. パキスタンの農業－現状と開発の課題－改訂版. 1990. AICAF, 東京, 107pp. 14-34.
- 3) Z. Hussain, P.A. Hollington, M.J. Siddiqi, R. Roohi and A. Ashraf. 2002a. Salinisation of Land and Water Resources of Pakistan and Their Sustainability Issues, *Water Resource Research Institute Report*, 31.
- 4) Z. Hussain, M.M. Ahmad, M. Yasin. 2002b. Salinization of Land and Water Resources: Issues and Option. *Water Resource Research Institute Report*. 26
- 5) 黒崎卓. 1996. パキスタン：用水路・地下水灌漑の経済分析、堀井健三・多田博一・篠田隆編『アジアの灌漑制度：水利用の効率化に向けて』新評論社、東京、357-388
- 6) Water and Power Development Authority Pakistan. 1988. WAPDA, 94 Ferozepur Road, Lahore (personal communication)
- 7) N. Ahmed and G.R. Chaudhry. Irrigated Agriculture of Pakistan. 1988. Lahore: Shahzad Nazir, 61-&'2, Gulberg-3. (Various pagings, about 810 pp)
- 8) 国際環境研究協会・砂漠研究委員会. 2002. パキスタン及びインド・パンジャブ地域における土壌塩類化に関する調査研究. pp.46.

## 7. 国際共同研究等の状況

本研究は、パキスタン農業研究センター水資源研究所など、現地パキスタンの研究機関との共同研究「Impact assessment of plants for rehabilitation of salt affected lands in Pakistan」として実施した。特に既存データの収集やモニタリングサイトの維持管理、定期的な現地調査などに当たっては、パキスタン側研究者に実質的な作業の協力を得た。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

#### <学術誌 (査読あり)>

- ① K. Saeki, T. Kunito, H. Oyaizu and S. Matsumoto: *J. Environmental Quality*, 31, 1570-1575 (2002)  
“Relationships between bacterial tolerance levels and forms of copper and zinc in soils.”
- ② Y. Sakai, S. Matsumoto, Y. Nitta and M. Sadakata: *J. Global Environment Engineering*, 8, 55-66 (2002)  
“Alkali soil reclamation in China using gypsum produced in flue gas desulfurization process; A case study.”
- ③ Y. Sakai, S. Matsumoto and M. Sadakata: *Soil Sediment Contamination*, 5, 124-130 (2002)  
“Alkali soil reclamation with flue gas desulfurization gypsum in China and assessment of metal content in corn grains.”
- ④ N. Harada, M. Nishiyama and S. Matsumoto: *FEMS Microbiol Ecol.*, 35, 231-238 (2002)  
“Inhibition of methanogens increases photo-dependent nitrogenase activities in anoxic paddy soil amended with rice straw.”
- ⑤ N. Harada, M. Nishiyama and S. Matsumoto: *Current Microbiol.*, 42, 393-397 (2002)  
“Phototrophic N<sub>2</sub> fixation suppressed by activated sulfate reduction in anoxic rice soil slurries.”
- ⑥ N. Harada, S. Otsuka, M. Nishiyama and S. Matsumoto: *Biol. Fertl. Soils*, 33, 401-412 (2002)  
“Influences of indigenous phototrophs on methane emissions from a straw-amended rice paddy.”
- ⑦ 松本 聡: *国際農林業協力*, 25, 9-16 (2002) 「中近東乾燥地域の水利開発戦略」

#### <学術誌 (査読なし)>

- ① Y. Ishikawa, M. Nishiyama, T. Aoki, S. Matsumoto, M. Kubota, Y. Hiraga, R. Nakata, M. Ishikawa, and Y. Yamaguchi: *Integration and Regional Researches to Combat Desertification -Present Status and Future Prospect- The 16th Global Environment Tsukuba*, (H. Shimizu, ed.) Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, p. 225-230 (2002)  
“Integration of prevention and rehabilitation technology for desertification application and evaluation of the rehabilitation technology on low-Fertile and salt-affected area.”
- ② S. Matsumoto: *Proceedings of the UAE University annual scientific conference, E-FORCE, UAE University*, 28-48 (2002)  
“Using sulfur wastes from gas production plants for increasing crop productivity in calcareous sandy soils.”
- ③ S. Matsumoto, S. Sato, J. S. Caldwell and A. Sato: *Agricultural Innovation for Sustainability, Akita Prefectural University International Symposium 2001*, 農林統計協会, 14-27 (2002)  
“Directions for Sustainable Agriculture in Akita based on Recycling of Natural Resources.”
- ④ S. Matsumoto: *Bio-oriented Technology Research Advanced Institution, Japan*, 1-4 (2002)  
“Deterioration of terrestrial environments, Proceedings of international workshop on Microbial function in revegetation process of degraded terrestrial environments: From gene through to ecosystem.”



- ⑤ 松本聰：再生と利用, 26, 6-10 (2003) 「地球環境保全における我が国の農業から見たリサイクル推進の今日的意義。」
- ⑥ 松本聰、石川祐一：「新政策」特集号-土壌・地下水汚染対策への技術開発(平成 15 年度版), 50-53 (2003) 「要素技術を用いた土壌荒廃修復の試み。」

<書籍>

- ① 大倉克巳、毛建華、王正祥、松本 聰：石炭燃焼技術の改善と普及ワーキンググループ編、慶應義塾大学出版会：111-121 (2002) 「脱硫石膏が中国天津市土壌の作物生産に及ぼす影響。」
- ② 松本聰：地球環境ハンドブック, (不破敬一郎、森田昌敏編著) 朝倉書店, 732-749 (2002) 「砂漠化の防止対策。」
- ③ 松本聰：地球環境調査計測事典・第 1 巻 陸域編, (竹内均監修) フジテクノシステム, 905-921 (2002) 「第 1 章 土壌と地球環境のかかわり。」

<報告書類等>

- ① (社)国際環境研究協会、平成 13 年度パキスタン及びインド・パンジャブ地域における土壌塩類化に関する調査研究報告書 (2002)
- ② (社)国際環境研究協会、平成 14 年度パキスタン及びインド・パンジャブ地域における土壌塩類化に関する調査研究報告書 (2003)

(2) 口頭発表

- ① S. Matsumoto, Y. Ishikawa, A. Williams and K. Eguchi: 日本農芸化学会東北支部第 135 回例会 (2002) “Amelioration of Salt-affected Soils by Phytoremediation.”
- ② 原田直樹、西山雅也、大塚重人、松本 聰：日本土壌肥料学会 (2002) 「光合成細菌の接種が水田土壌からのメタン発生に与える影響。」
- ③ 石川祐一、佐藤 孝、近藤 正、中村勝則、松本 聰：日本土壌肥料学会 (2002) 「砂質土壌農業地帯における地下水硝酸汚染に関する基礎的研究。」
- ④ 松本聰：国際シンポジウム「土地利用・被覆変化 (LUCC) と植生回復」(2002) 「土地利用・被覆変化 (LUCC) と植生回復の関連性。」
- ⑤ Y. Ishikawa and S. Matsumoto: 2nd Workshop on Vegetation Recovery in Degraded Land Areas, Kobe, Japan (2002) “Land degradation and its rehabilitation in saline soil area – How do we transfer technologies from Western Australia to Pakistan or other country?”
- ⑥ 大倉利明、中井 信：日本ペドロロジー学会 2002 年度大会 (2002) 「土壌生産力評価手法の検討。—EPIC モデルと SPCC—」
- ⑦ 石川祐一、角張嘉孝、中井信、星野亨、深井善雄、松本聰：日本砂漠学会第 14 回大会 (2003) 「パキスタンにおける塩類集積の現状と現地対応技術。」
- ⑧ M. Nakai, Y. Ishikawa, T. Ohkura, S. Matsumoto, Y. Kakubari and T. Hoshino: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Soil Salinization and Plant Production for the Development of Desertification Indicators.”

- ⑨ Y. Ishikawa, T. Ohkura, S. Matsumoto, Y. Kakubari, T. Hoshino and M. Nakai: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Study on the elucidation of the desertification process and the development of desertification indicators in Pakistan.”
- ⑩ Y. Kakubari, A. Iio, M. Naramoto, M. Kubota, H. Fukasawa, Y. Nose and K. Yamada: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Assessment of Greenhouse Gas Sequestration by Natural Regeneration of Eucalyptus Vegetation in Arid Regions of Western Australia.”
- ⑪ T. Ohkura, Y. Ishikawa, M. Nakai, S. Matsumoto: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Soil salinization analysis using EPIC model.”
- ⑫ 大倉利明、石川佑一、中井信、松本 聰：日本ペドロロジー学会 (2004) 「パキスタン中部の塩類集積土壌」
- ⑬ 石川祐一、大倉利明、中井信、角張嘉孝、松本聰：日本砂漠学会第15回学術大会 (2004) 「パキスタン畑作地における塩類化の進行と EPIC モデルによる生物生産量評価」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後も本研究の成果である塩性化の指標等について、国連砂漠化対処条約(UNCCD)の科学技術委員会(CST)および砂漠化対処条約アジア地域テーマ別プログラムネットワーク 1 (TPN1)の活動に貢献する。また、パキスタンのカウンターパート等を通じ、塩害予測など本共同研究の成果の広報・普及に務める。さらに、米国農務省農業研究局(USDA-ARS)等と協力し、塩性化地域でも適用可能な、生物生産力推定モデル(EPICモデルの改良)を開発し、世界の塩性化による砂漠化地域での活用を諮る。