

## G-1. 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する研究

## (1) 乾燥・半乾燥地域における砂漠化に及ぼす人間活動の影響評価に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 宮崎忠国

環境庁 国立環境研究所

地球環境研究グループ	森林減少・砂漠化研究チーム	宮崎忠国
生物圏環境部	上席研究官	古川昭雄
社会環境システム部	情報解析研究室	安岡善文
水圏環境部	土壌環境研究室	恒川篤史
	地下環境研究室	木村 強
地球環境研究センター	研究管理官	大坪國順
(委託先)	(財) 自然環境研究センター	市河三英
	(株) 環境研究センター	一条美和子

平成4-6年度合計予算額 69,242千円)

(平成6年度予算額 23,872千円)

[要旨] インド西部のタール砂漠の極乾燥地、乾燥地および半乾燥地の砂漠化地域において、人間活動が砂漠化進行にどのような影響を及ぼしているか、とくに、植生、土壌および社会経済システムの面から明らかにするための調査研究を行った。乾燥地(チャンダン)、半乾燥地(パリ)に設定した試験地において、放牧の影響を受けない保護区と非保護区を作成し、各区において、植生調査を行い、環境容量や放牧圧の算定を試みた。人工衛星リモートセンシングによる植生、土壌、土地利用分類およびその変化等を定量的に調査するための手法の開発を行った。またLANDSATとNOAA衛星データを用いて、ジョドプール地域およびタール砂漠の砂漠地域図の作成を行った。さらに、オシアン郡カブラカラン村において、砂漠化進行による人間活動への影響、農業形態の変化、エネルギー使用量等の調査を行い、砂漠化進行要因の抽出を行った。

[キーワード] 砂漠化、タール砂漠、人間活動、環境容量、リモートセンシング

## 1. 序

砂漠化は、乾燥、半乾燥、半湿潤地帯において気候変化、人間活動等、様々な要因に起因して起こる土地劣化と定義されている。砂漠化は全乾燥地域の70%にあたる3600万km<sup>2</sup>で生じており、世界人口の約六分の1に影響を与えている。砂漠化の最も顕著な影響は、貧困の拡大に加え3300万km<sup>2</sup>の放牧地(全体の73%)の劣化、乾燥地域の降雨依存農地のうち47%の土地生産性、土壌構造の劣化、乾燥地域の灌漑農地のうち30%の劣化などである。このような砂漠の拡大に対して、人為的な要因による砂漠化現象を制御し、砂漠化にともなう環境への影響を予測するためには、これらの地域の生態系の現状とそその変化、土壌、水文特性等の環境容量を算出する手法の開発を行い、砂漠化進行機構を解明し砂漠化危険地域を予測、抽出することが急務である。

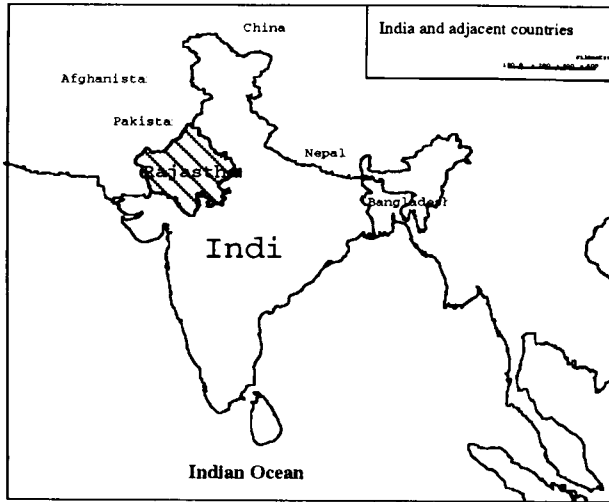


図1 インド・ラジャスタン州の位置

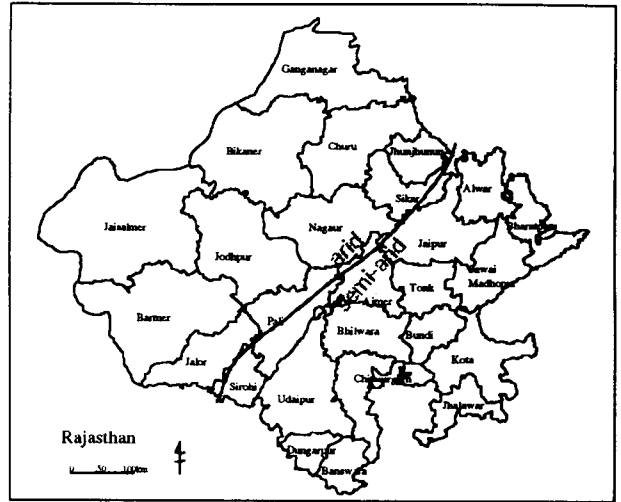


図2 ラジャスタン州の各ディストリクトと乾燥・半乾燥境界

## 2. 研究の目的と方法

本研究の目的は、インド西部タール砂漠の極乾燥地、乾燥地および半乾燥地域（図1～2）において、人間活動が砂漠化進行に及ぼす影響を、とくに、植生、土壌および社会経済システムの面から明らかにすることである。研究の課題と方法は以下の通りである。

### (1) 乾燥・半乾燥地における植生回復手法の解明に関する研究

#### 1) 目的

インド北西部に位置するタール砂漠には190万人もの人が住んでおり、世界の砂漠地域のなかで最も人口密度の高い砂漠だといわれている。1983年のセンサスによると、ラジャスタン州西部の砂漠地帯だけでも233万頭の家畜が飼われており、1977年のセンサスから42万頭増加している。そこで草地を適切に管理するため、また、砂漠化の機構自体を解明するためにも家畜による被食が植生に及ぼす影響を明らかにすることは重要である。

本調査の目的は、放牧が植生に与える影響を量的に評価するとともに、異なった物理環境下にある種構成の異なる植物群集が、同程度の放牧に対し、どのように影響を被るかを調べることにあり、そこでわれわれは、インドのタール砂漠において、種構成が異なる半乾燥地と乾燥地の2カ所に調査地

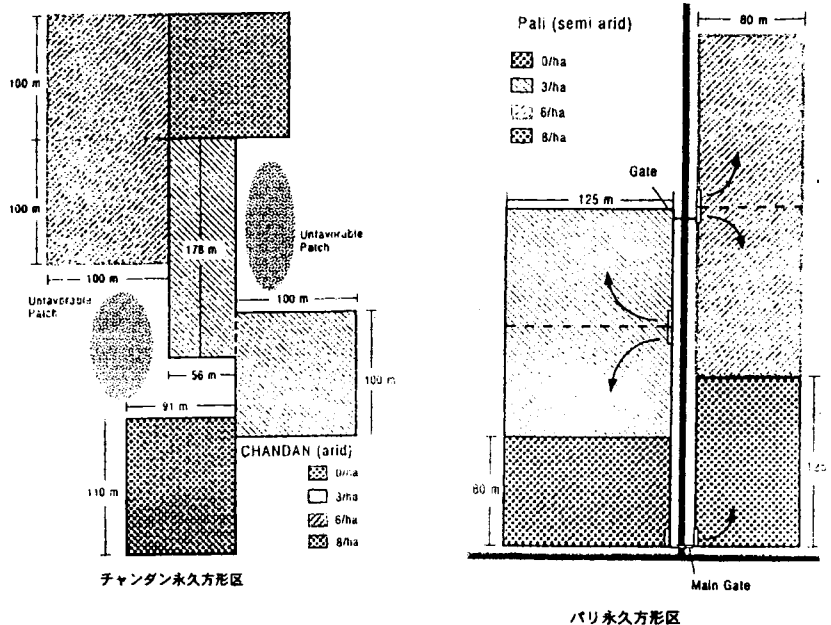


図3 チャンダンおよびパリにおける永久方形区

を設置し、放牧圧の異なる四つのプロットを用いて、植生の変化を観察、比較した。

## 2) 調査地の概要

タール沙漠の半乾燥地と乾燥地から一カ所ずつ調査地を設定した。パリ調査地は乾燥気候から湿润気候への移行帯にあたる半乾燥地に位置し、CAZRI研究所が、20年間保護管理をしてきた調査地で、1900年からの80年間の年平均降水量は450mm、土壌は礫をふくむ埴壤土、地形は平坦な沖積平地である。

一方、チャンダン調査地は乾燥地域に位置し、年平均降水量は150mm、起伏に富む堆積砂丘地にあり、砂質土壌を有する。調査地は30年以上保護管理されており、放牧等の影響は受けていない。降雨は7月から9月までのモンスーンの期間に集中して起こり、植物の生育はこの期間に制限されている。パリ調査地の草本植生はイネ科多年生草本の *Cenchrus setigerus* が優占しており、この種の地上部被度はおよそ10%、地上部生体量は350g/m<sup>2</sup>である。一方、乾燥地にあるチャンダン調査地はイネ科多年生草本の *Lesiurus indicas* が優占種で、被度は5%程度、地上部現存量はパリと同様、350g/m<sup>2</sup>程度である。両種ともタソック状に生育し、個体の分布は集中分布を示す。

## 3) 調査の方法

チャンダンとパリの調査地に1ヘクタール区と2ヘクタール区をふたつずつ、合計四つの実験区を1993年の9月に設置し、外部からの大型草食獣を排除するためにバラ線により周囲を取りかこんだ(図3)。1994年3月にヒツジを導入したが、被食圧を変えるためにヒツジの単位面積当たり頭数を変え、1ヘクタールあたり3、6、8頭の実験区を設定した。また1実験区はヒツジを入れないコントロールプロットとした。植生調査はラインインターセプト法により以下のように行った。同じ方向に延ばした10mの永久調査ラインを1ヘクタールあたり10本格子状に設置し、このラインに接した植物個体がラインを覆う長さをもってその植物の被度とした。この方法によりライン毎に各個体の%被度と個体数が得られ、これらの値から個体群ならびに群集の季節動態を分析した。また、得られた個体数のデータをもとにShannon-Weaver指数を用いて群集の多様性を評価した。第一回目の調査は1994年の1月に行い、雨季の間の7月から10月の間1ヶ月おきに測定した。

## (2) 砂漠化進行状況の広域的モニタリングに関する研究

州レベルの砂漠化モニタリングとしてNOAA/AVHRR LACデータを、郡レベルのモニタリングとしてLANDSAT/MSSデータ・TMデータを用いて解析を行った。

またジョドプールのオシアン郡において、地表の代表的地物を対象にスペクトル調査およびグランドトゥルス調査を行った。スペクトル調査では阿部設計製2703型ポータブルフォトメータを使用した。地表の対象物質としては、植生、土壌、水域、人工物等を試験地周辺から選出し、それぞれの反射スペクトルと対象物質の状況、植生の種組成、植被率、土壌の物理性、化学性、土地利用等の調査を行った。

さらに、収集あるいは測定した種々の情報、データを効率よく処理するための砂漠化地理情報システム(GIS)の構築を行った。

## (3) 砂漠化の人為的要因に関する研究

砂漠化の人為的要因を明らかにするために、ラジャスタン州ジョドプール県オシアン郡カブラカラン村において砂漠化と人間活動に関する調査を実施した。調査の方法としては、被験者の属性、水や燃料の使用量、農業形態、砂漠化の実態および影響、砂漠化の防止対策に関する住民の意見

などを把握するための住民アンケート、過耕作やトラクタ耕起が土地生産力の低下に及ぼす影響を  
 解明するための土壌調査、砂丘上の農業活動が砂丘再活動に及ぼす影響を解明するためのGPSによる砂丘の精密測量を行った。

このカブラカラン村では天水農業を主体に、十数頭の家畜を飼うというインド北西部の典型的な農業形態がみられる。またこの一帯は、夏の強い風による風食の激しい地域としても知られている。

### 3. 結果および考察

#### (1) 乾燥・半乾燥地における植生回復手法の解明に関する研究

##### 1) 種組成

バリ調査地とチャンダン調査地の出現植物種数を比較するとそれぞれ64種と34種であり、およそ2倍近くバリ調査地が豊かであった(表1)。その内訳を生活史から見ると両地域ともに一年生

表1 チャンダンおよびバリ永久方形区における出現植物種

Flora in Chandan			Flora in Pali		
SPECIES			SPECIES		
<i>Lasiurus indicus</i>	grass	p	<i>Cenchrus setigerus</i>	grass	p
<i>Cymbopogon jawarncusa</i>	grass	p	<i>Dichanthium annulatum</i>	grass	p
<i>Cenchrus setigerus</i>	grass	p	<i>Eleusine compressa</i>	grass	p
<i>Aristida funiculata</i>	grass	a	<i>Eremopogon foveoratus</i>	grass	p
<i>Brachiaria ramosa</i>	grass	a	<i>Aristida spp</i>	grass	a
<i>Cenchrus biflorus</i>	grass	a	<i>Brachiaria ramosa</i>	grass	a
<i>Cenchrus ciliaris</i>	grass	a	<i>Brachiaria sp.</i>	grass	a
<i>Cenchrus prieurii</i>	grass	a	<i>Cenchrus biflorus</i>	grass	a
<i>Dactyloctenium indicum</i>	grass	a	<i>Dactyloctenium aegyptim</i>	grass	a
<i>Eragrostis poaeoides</i>	grass	a	<i>Digitaria sp.</i>	grass	a
<i>Latipes senegalensis</i>	grass	a	<i>Eragrostis ciliaris</i>	grass	a
<i>Tragus roxburghii</i>	grass	a	<i>Eragrostis poaeoides</i>	grass	a
<i>Boerhavia diffusa</i>	forb	p	<i>Eragrostis tremula</i>	grass	a
<i>Cassia italica</i>	forb	p	<i>Tetrapogon sp.</i>	grass	a
<i>Cassia pumila</i>	forb	p	<i>Tragus roxburghii</i>	grass	a
<i>Citrullus colocynthis</i>	forb	p	<i>Aerva persica</i>	forb	p
<i>Corchorus tridens</i>	forb	p	<i>Boerhavia diffusa</i>	forb	p
<i>Blepharis indica</i>	forb	a	<i>Bouchea marrubifolia</i>	forb	p
<i>Cleome viscosa</i>	forb	a	<i>Cassia pumila</i>	forb	p
<i>Dicoma tomentosa</i>	forb	a	<i>Convolvulus rotterianus</i>	forb	p
<i>Farsetia hamiltonii</i>	forb	a	<i>Corchorus depressus</i>	forb	p
<i>Gysekia pharnacoides</i>	forb	a	<i>Crotalaria medicagenia</i>	forb	p
<i>Mollugo cerviana</i>	forb	a	<i>Evolvulus sp.</i>	forb	p
<i>Tribulus terrestris</i>	forb	a	<i>Heliotropium marifolium</i>	forb	p
<i>Cucumis sp.</i>	forb		<i>Ipomoea sp.</i>	forb	p
<i>Indigofera anabaptesta</i>	legume	a	<i>Phaseolus trilobus</i>	forb	p
<i>Indigofera cordifolia</i>	legume	a	<i>Sehima nervosum</i>	forb	p
<i>Indigofera hochstetteri</i>	legume	a	<i>Ageyratum sp.</i>	forb	a
<i>Indigofera linifolia</i>	legume	a	<i>Anticharis sp.</i>	forb	a
<i>Tephrosia strigosa</i>	legume	a	<i>Celosia argentia</i>	forb	a
<i>Aerva persica</i>	shrub	p	<i>Cleome viscosa</i>	forb	a
<i>Crotalaria burhia</i>	shrub	p	<i>Corchorus tridens</i>	forb	a
<i>Dipterygium glaucum</i>	shrub	p	<i>Dactyliandra welwitschii</i>	forb	a
<i>Polygala erioptera</i>	shrub	a	<i>Dicoma tomentosa</i>	forb	a
<i>Acacia nilotica</i>	tree	p	<i>Digera sp.</i>	forb	a
<i>Prosopis cineraria</i>	tree	p	<i>Echinops echinatus</i>	forb	a
			<i>Euphorbia granulata</i>	forb	a
			<i>Gracilia sp.</i>	forb	a
			<i>Leucas sp.</i>	forb	a
			<i>Polygala sp.</i>	forb	a
			<i>Sesamum indicum</i>	forb	a
			<i>Tribulus terrestris</i>	forb	a
			<i>Trichodesma ampelxicaule</i>	forb	a
			<i>Vernonia cinerea</i>	forb	a
			<i>Vicoa sp.</i>	forb	a
			<i>Cucumis sp.</i>	forb	
			<i>Peristrophe sp.</i>	forb	
			<i>Pulicaria sp.</i>	forb	
			<i>Alysicarpus sp.</i>	legume	
			<i>Heylandia sp.</i>	legume	a
			<i>Indigofera anabaptesta</i>	legume	a
			<i>Indigofera cordifolia</i>	legume	a
			<i>Rhynchosia minima</i>	legume	a
			<i>Tephrosia strigosa</i>	legume	a
			<i>Calotropis procera</i>	shrub	p
			<i>Cappari desidua</i>	shrub	p
			<i>Lepidagethis trinevis</i>	shrub	p
			<i>Mimosa hamata</i>	shrub	p
			<i>Pergularia daemia</i>	shrub	p
			<i>Solanum albicaule</i>	shrub	p
			<i>Zizypus sp.</i>	shrub	p
			<i>Prosopis cineraria</i>	tree	p
			<i>Prosopis juliflora</i>	tree	p

grass:イネ科草本 legume:マメ科草本 forb:マメ科以外の広葉草本 shrub:低木 tree:高木 a:一年生 p:多年生

草本が50%以上を占めていることには変わりがないが、生活型から見ると広葉草本がチャンダンで50%に対し、パリでは62%と多い傾向にあった。また、イネ科草本がチャンダンで多かった。また、低木、高木はチャンダンで6種、パリで9種であるが被度は0.1%以下であり、両地域とも草本主体の植生を有していることがわかる。優占種は両地域ともにイネ科多年生草本でチャンダンには *Lesiurus sindicus*、パリでは *Cenchrus setigerus* がタソック状に生育し季節を通して優占する。

## 2) 季節変化

両地域の草本植生の被度は、乾季から雨季さらに雨季後と季節が移行するにしたがい顕著に変化するが、とくにチャンダンでその変化が著しかった。コントロールプロットでの10本のラインの平均値の結果を比較してみるとチャンダンでは乾季の1月から雨季の始まる7月までは変化がないが、降雨の集中する8月から9月にかけて全被度が5%から35%へと急激に増加し、雨季の終わった10月にまた急激に減少する。パリでは同様な分析の結果、被度の季節変化は緩やかであることがわかった。

これら両地域の草本植生の季節変化の違いの要因をはっきりさせるために生活史によって草本群集の被度を分けて比較してみると、おもに一年生草本の動態が両地域で異なることがわかった。チャンダンでは多年生草本の被度は7%前後で一定しているのに対し、一年生草本は7月の降雨に反応して急激に増加し9月にピークを迎えてその後また急激に減少する。このようにチャンダンでは降雨をスイッチとする発芽とそれに引き続く急速な成長、短期間での繁殖、枯死という乾燥地に特有な生活史戦略が見られた。

一方パリでも一年生草本の発芽が7月に見られるもののチャンダンで見られたような著しい増加は見られず、緩やかに増加しその後一定の被度を維持している。これは降雨による種子の休眠解除機構を有する種がチャンダン同様にあるものの、その後は環境の違いを反映して成長、繁殖、枯死がゆっくり進行する種が多いためと思われる。

次に生活型によって分類した被度の変化を追ってみると、チャンダンの大きな季節変動は広葉草本の動態によっていることがわかった。イネ科草本は一年を通してほぼ一定の被度を示すのに対し、とくにマメ科草本の被度は8月のピーク時には29%にも及びこれは全被度のおよそ89%を占める。一方のパリではイネ科草本の被度はより変動が大きく雨季の7月から9月にかけて低く1月と10月に高い。広葉草本を見ると7月に発芽した後に9月まで緩やかに増加し雨季の終わった10月に減少するといったチャンダンのマメ科草本と同様な変動を示したが、チャンダンと異なりパリではマメ科の被度は数%にしかみなかった。

次に群落の多様性を評価するために各種の個体数をもとにShannon-Weaverの指数を用いて分析をおこなった。パリの方が出現種数が多いためにやや高い値を示したが、多様度は両地域ともに雨季の始まりに増加しそれ以降はあまり変化がないという傾向を示した。

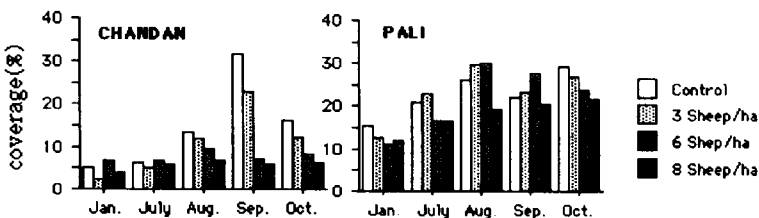


図4 全被度の季節変化と放牧圧の影響

## 3) 草本群集に対する被食圧の影響

ヒツジによる被食は両地域の植生の動態に有為な影響を与えた(図4、表2)。被食圧(家畜密度)を0から3、6、8頭/haのように勾配を付けた四つの処理区での植生を1カ月おきに調査した結果、各月で被食圧

表2 放牧圧と季節変化が被度に及ぼす効果に関する分散分析

CHANDAN					
	自由度	平方和	平均平方	F値	P値
Treat	3	.208	.069	4.850	.0048
対象(群)誤差	52	.744	.014		
カテゴリー Season	4	.531	.133	52.910	<.0001
カテゴリー Season * Treat	12	.411	.034	13.658	<.0001
カテゴリー Season * 対象(群) ...	208	.522	2.507E-3		

PALI					
	自由度	平方和	平均平方	F値	P値
Treat	3	.085	.028	3.750	.0162
対象(群)誤差	53	.399	7.528E-3		
カテゴリー Season	4	.928	.232	54.537	<.0001
カテゴリー Season * Treat	12	.144	.012	2.821	.0013
カテゴリー Season * 対象(群) ...	212	.902	4.254E-3		

を示したが、このような変化は被食圧の増加にともない減少し、高被食圧区(8頭/ha)では被度の変化はほとんど見られず、5%前後の被度で推移していた。最も高い被度を示した9月の植生被度をコントロール区と高被食圧区で比較するとおよそ6倍にもなった。

これらのことより動物による被食は乾燥地で強く植生の動態に影響を与えることが推察される。一方、半乾燥地であるパリ調査地でも処理間で有意に変化が現れたがそれほど明瞭ではなかった。10月には家畜密度の勾配に沿って被度も減少するといった直線的な関係も見られたが、雨季の始まった7月から9月まではチャンダンでのように被食傾度に沿って被度が直線的に減少するといった影響は見られず、逆に対照区よりも低密度または中密度処理区の方が高い被度を示していた。

一年生と多年生草本といった生活史により群集を分けてそれぞれに対する放牧の影響を比較すると、チャンダンでは多年草群集には放牧による影響は見られず、群集影響は一年生草本への影響に一致していた。パリでは両生活史に対し明瞭な影響が見られなかったが、高密度区の多年草本群集の被度が他の処理区より低く推移していた。次に生活形から分析すると、両地域でイネ科草本の被度は被食に対してあまり影響を受けず、チャンダンのマメ科草本が最も影響が大きいことがわかった。

つぎに多様性指数から植生に与える家畜の影響を評価した。対照区で見られたように、両地域とも乾季と雨季を比較すると有意差は見られたが、雨季を通して種多様性はあまり変化しなかった。すべての処理区において同様な季節変化を示し、処理間にも有意な差は見られなかった。

#### 4) 植物個体群の動態

植物群集を個体群レベルで分析すると、放牧による影響は同じ生活形または生活史グループに属する種に対してもふたつの地域で異なることがわかった。さらに同じ種でも属している群集の違いによって家畜の被食に対する反応が異なっていた。チャンダンで優占するイネ科多年生草本の *Lesiurus sindicus* は、季節変動が少なく、放牧によって影響を受けなかったが、パリで同じように優占する *Cenchrus setigerus* は雨季の始まりから次第に減少し、乾季にまた被度が増加するといった変化を示し、また放牧圧が増すと被度が減少するといった関係を示した。

ふたつの一年草、*Indigofera cordifolia* および *I. linifolia* は、チャンダンではもっともひどく被食されたが、パリでは、*I. cordifolia* は被食に対して反対の反応を示した。*Lepidagathis trinevis* は被食に対してネガティブな反応を示した。一年生非マメ科広葉種、*Tribulus terrestris* は、チャンダンでは、放牧強度が増加するに連れて、被度が増加し、パリでは放牧が増加すると減少した。

が強くなるにしたがい植生の被度が減少するという結果を得た。とくにチャンダンではその傾向が著しく、雨季の前期からこのような傾向が現れている。前節で示したとおりチャンダンでの大型動物による被食がない場合(コントロール区)、植生被度は雨季初期から急激に上昇し、9月にピークを迎えた後に急激に減少するという季節変化

(2) 砂漠化進行状況の広域的モニタリングに関する研究

1) NOAA / AVHRR LAC データによる州レベルの観測

ラジャスタン州の土地被覆分類をおこない、砂漠地図を作成するため、NOAA / AVHRR LAC モードのポスト・モンスーンシーズンとドライシーズンの2時期のデータを用いて解析をおこなった(図5)。

得られたマップは、おもに農業活動に依存する土地被覆状況によって説明することができた。砂

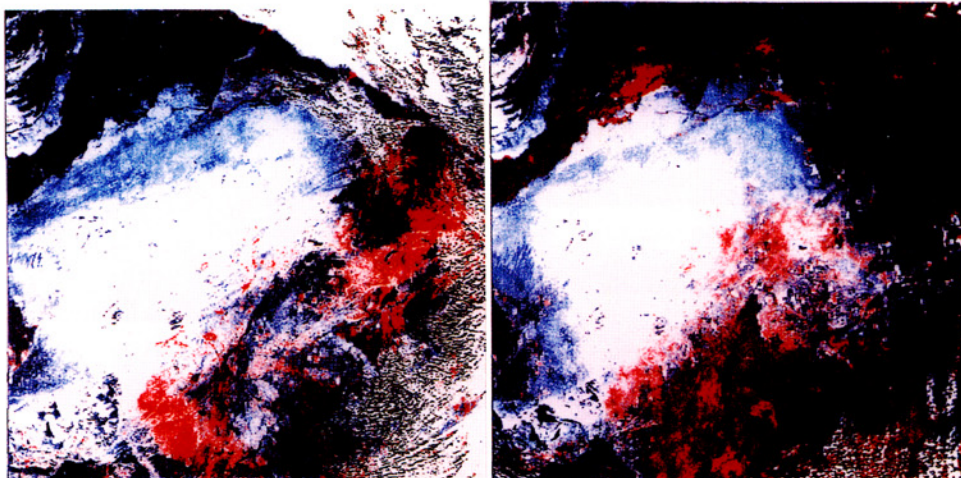
表3 各ディストリクトの土地被覆分類面積

(上段は面積 (km<sup>2</sup>) 下段は各ディストリクトにおける百分率)

Cluster Class	Type I 5,6,7	Type II 8-9,11,15	Type III 3,4	Type IV 10,12	Type V 13-14, 17-18	Type VI 19-22	Type VII 24	Type VIII 1,2	Type IX 16,23, 25-30	Total
Ganganagar	452	518	238	265	6781	12342	1	22	15	20634
Bikaner	2	3	1	1	33	60	0	0	0	100
Churu	0	5	4	1	647	25003	1536	2	46	27244
Jhunjhunun	0	0	0	0	2	92	6	0	0	100
Alwar	0	4	3	0	7380	9443	0	0	0	16830
Bharatpur	0	0	0	0	44	56	0	0	0	100
Sawai Madhopur	19	459	85	20	4659	679	0	0	7	5928
Jaipur	0	8	1	0	79	11	0	0	0	100
Sikar	1359	5003	195	65	1756	1	0	0	2	8380
Ajmer	16	60	2	1	21	0	0	0	0	100
Tonk	48	5641	93	45	1786	16	0	3	469	8100
Jaisalmer	1	70	1	1	22	0	0	0	6	100
Banwar	287	5835	39	137	3429	159	0	6	635	10527
Jodhpur	3	55	0	1	33	2	0	0	6	100
Nagaur	231	4657	53	154	8746	209	0	10	8	14068
Pali	2	33	0	1	62	1	0	0	0	100
Bikaner	29	817	7	6	6435	438	0	0	0	7732
Banwar	0	11	0	0	83	6	0	0	0	100
Banwar	720	1368	13	811	5545	17	0	7	0	8481
Tonk	8	16	0	10	65	0	0	0	0	100
Jaisalmer	51	2778	19	340	3927	64	0	10	7	7194
Jodhpur	1	39	0	5	55	1	0	0	0	100
Nagaur	0	2	1	0	715	30225	7437	0	22	38401
Pali	0	0	0	0	2	79	19	0	0	100
Banwar	0	718	2	16	6146	13989	1969	2	8	22850
Banwar	0	3	0	0	27	61	9	0	0	100
Banwar	6	2546	14	742	11809	2442	31	41	88	17718
Banwar	0	14	0	4	67	14	0	0	0	100
Banwar	955	3135	41	3938	4166	126	0	20	6	12387
Banwar	8	25	0	32	34	1	0	0	0	100
Banwar	19	126	89	10	4931	22458	703	1	50	28387
Banwar	0	0	0	0	17	79	2	0	0	100
Banwar	39	1978	21	152	6555	1716	15	0	165	10640
Banwar	0	19	0	1	62	16	0	0	2	100
Banwar	1040	1147	13	2189	707	1	0	13	26	5136
Banwar	20	22	0	43	14	0	0	0	0	100
Banwar	719	3051	40	4205	2370	2	0	51	17	10455
Banwar	7	29	0	40	23	0	0	0	0	100
Banwar	4108	2145	15	10805	124	0	0	73	9	17279
Banwar	24	12	0	63	1	0	0	0	0	100
Banwar	2756	2652	37	4879	188	0	0	328	17	10856
Banwar	25	24	0	45	2	0	0	3	0	100
Banwar	404	282	55	2858	14	3	0	120	33	3770
Banwar	11	7	1	76	0	0	0	3	1	100
Banwar	1955	997	98	1736	87	0	0	139	26	5037
Banwar	39	20	2	34	2	0	0	3	1	100
Banwar	1037	1305	51	932	2103	93	0	29	2	5550
Banwar	19	24	1	17	38	2	0	1	0	100
Banwar	2322	2835	175	3261	1429	18	2	54	2340	12436
Banwar	19	23	1	26	11	0	0	0	19	100
Banwar	1507	991	205	1042	449	23	8	13	1981	6219
Banwar	24	16	3	17	7	0	0	0	32	100
Total	20062	50993	1606	38608	92884	119465	11701	940	5979	342239
	6	15	0	11	27	35	3	0	2	100

表4 抽出された変化部の面積

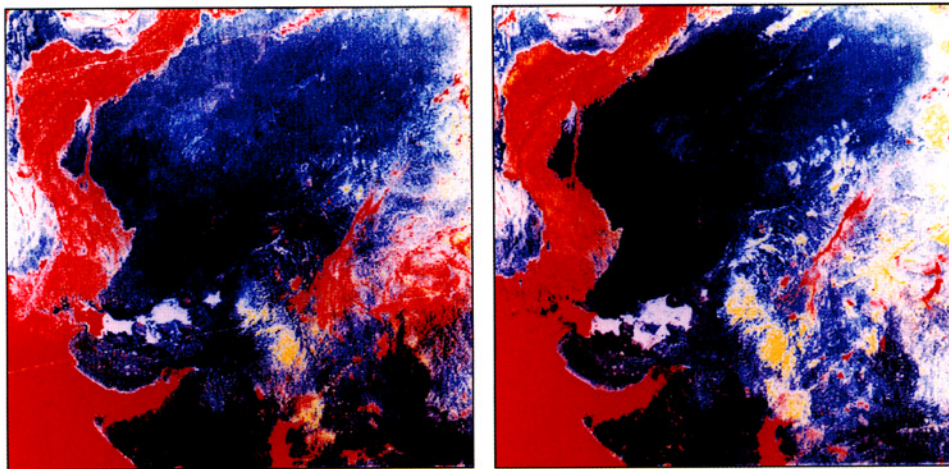
	Principal component analysis	Spectral signature similarity analysis
Total area (km <sup>2</sup> )	922,291.92	922,291.92
Detected changed area (km <sup>2</sup> )	376,940.71	188,700.93
Rate of the changed area (%)	40.87	20.46



(a)

(b)

図5 NOAA/AVHRR フォルスカラー合成画像 (a)1989年1月8日 (b)1989年10月7日観測



(a)

(b)

図6 NOAA/AVHRR フォルスカラー合成画像 (a)1986年1月7日 (b)1992年2月4日観測

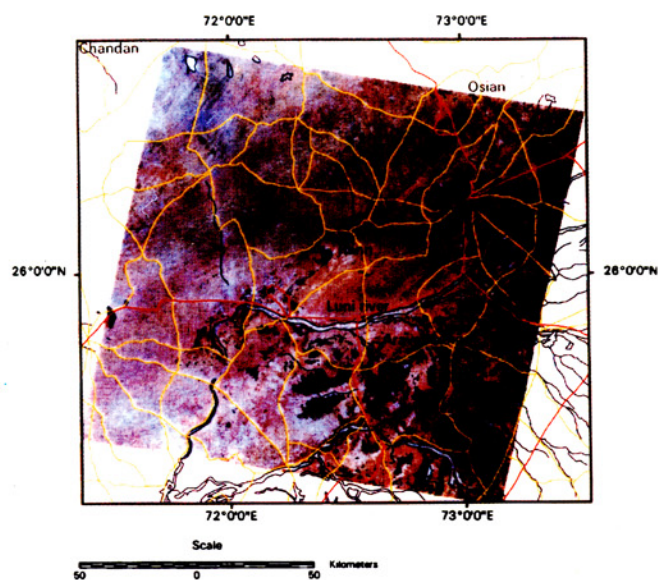


図7 LANDSAT-TM フォルスカラー合成画像(1990年11月11日観測) DCMデータとの重ね合わせ  
 ジョドプール・ディストリクト南部



漠の核心部に相当する TypeVII の面積はジャイサルメールで 7,437km<sup>2</sup>、ジョドプールで 19,69km<sup>2</sup>、ピカネールで 1,536km<sup>2</sup> の順で大きかった (表 3)。

2 時期の比較の結果、NDVI = 0.05 のラインが雨季には南東へ、乾季には北西へシフトするという動きに、アラバリ山脈の落葉樹林の季節変化や灌漑農地における季節変化がモザイク上に入り込んでいることがわかった。

また年次間の植生の変化を把握するために、1986 年 1 月 7 日および 1992 年 2 月 4 日の LAC データを用いて、変化部の抽出をおこなった (図 6、表 4)。

## 2) LANDSAT MSS / TM による

### 郡レベルの観測

図 7 に約 160 万分の 1 の画像を示した。これらの図からも示されるように、山地、河川、湖、ナジ、干上がった塩湖、パラボラ砂丘、市街地、灌漑農地などは明瞭に判別することができる。しかしバルハン砂丘やオープンパステャ、天水農地などは判別がむずかしい。これは十分な空間解像度および

スペクトル分解能が得られていないことに起因すると思われる。

## 3) フィールドスペクトルの計測とグランドトゥース

ジョドプールのオシアン郡において、スペクトル調査およびグランドトゥース調査を行った。スペクトル調査では阿部設計製 2703 型ポータブルフォトメータを使用した。地表の対象物質としては、天水農地、灌漑農地、オープンパステャ、裸地土壌、水域、人工物等を試験地周辺から選出し、それぞれの反射スペクトルを計測した。同時に対象物質の状況、植生の種組成、植被率、土壌の物理性、化学性、土地利用等の調査を行った。

図 8 にスペクトル特性を示したが、灌漑農地であるチリ畑では 700nm 付近に光合成色素の反射による急激な立ち上がりがあり、典型的な植生の特徴を示している。しかしオープンパステャについてはほとんど裸地土壌と同じような反射パターンを示している。したがって、赤と近赤外の輝度値の比を用いる通常の植生指数をこの地域のオープンパステャの植生に適用するには限界があることが示された。

## (3) 砂漠化の人為的要因に関する研究

### 1) 社会調査

ラジャスタン州ジョドプール県オシアン郡カブラカラン村において平成 5 年 12 月および平成 7 年 3 月に砂漠化と人間活動に関する住民アンケートを実施した。調査は、インド人研究者が村人と 1 対 1 で面接し、聞き取り調査を行った。調査の内容は、被験者の属性、水や燃料の使用量、農業形

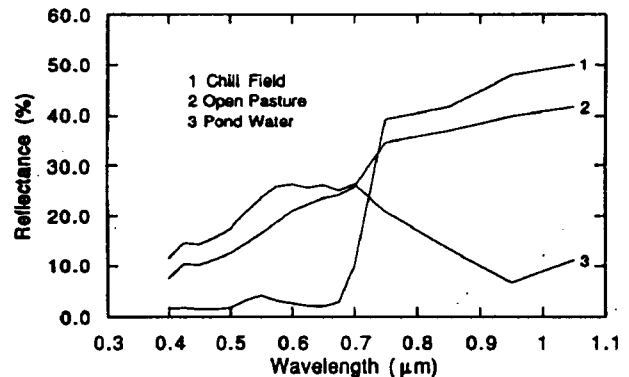
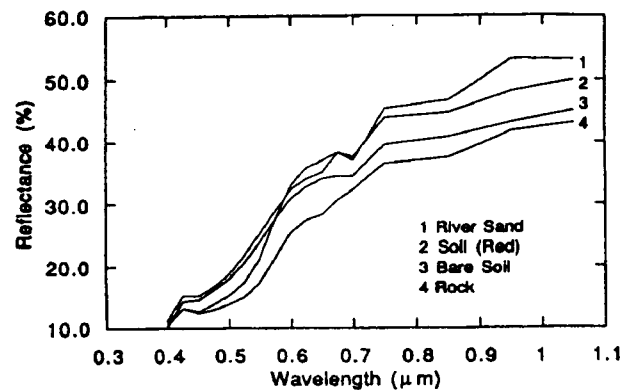


図 8 砂漠の代表的土地被覆構成物のスペクトル特性

態、砂漠化の実態および影響、砂漠化の防止対策に関する住民の意見などである。得られたサンプル数は64件である。

調査結果から農法の変化についてまとめると(図9)、この地域の伝統的な天水農業は、a)ラクダを用いた土地の丁寧な耕起、b)十分な休閑期間(通常3年)、c)いくつかの作物を混ぜて植える混作、d)収穫後の根株の保持(畑に根株を残す)を特徴としており、このことによって潜在的には強い風食の脅威にさらされながらも、長いこと持続的な土地利用を可能としてきた。しかし、この調査の結果によると、混作および根株の保持については、過半数の農家で実践されているものの、最近では畑を耕すのにほとんどの農家がラクダの代わりにトラクタを使い始めている。このため、土壌が地中深くまで細かく碎かれ、風により吹き飛ばされやすくなっている。また、休閑期間については平均して1.8年に減少していることがわかった。

このような農法の変化の背景としては、急激な人口増加による影響があると思われる。人口センサスによると(図10)、カブラカラン村の人口は401人(1951年)、527人(1961年)、687人(1971年)、922人(1981年)、1253人(1991年)となっており、およそ10年間で約3割、年増加率にして3.1%(1981~1991年)の割合で増加している。またこの調査によると(図11)、1戸あたり平均土地所有面積は祖父の代44.0ha、父の代17.8ha、現在10.1haと、1世代ごとに約半分に減っている。このため単位面積当たりの収量需要が増大し、過耕作や不適切地の利用などの問題を引き起こしていると考えられる。

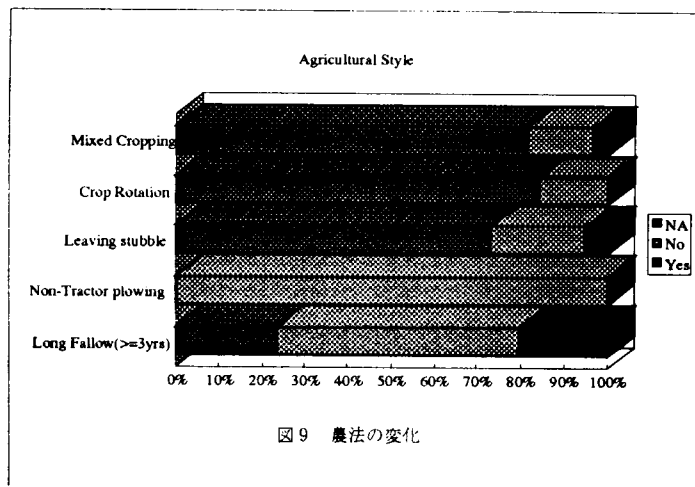


図9 農法の変化

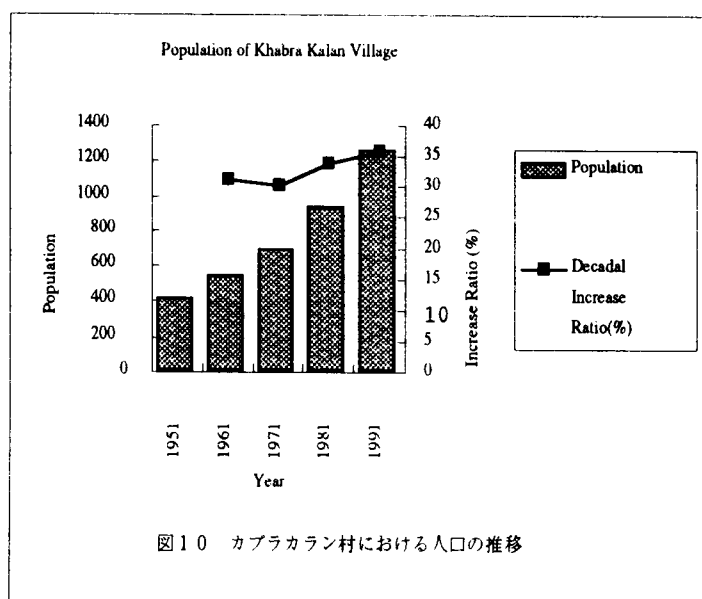


図10 カブラカラン村における人口の推移

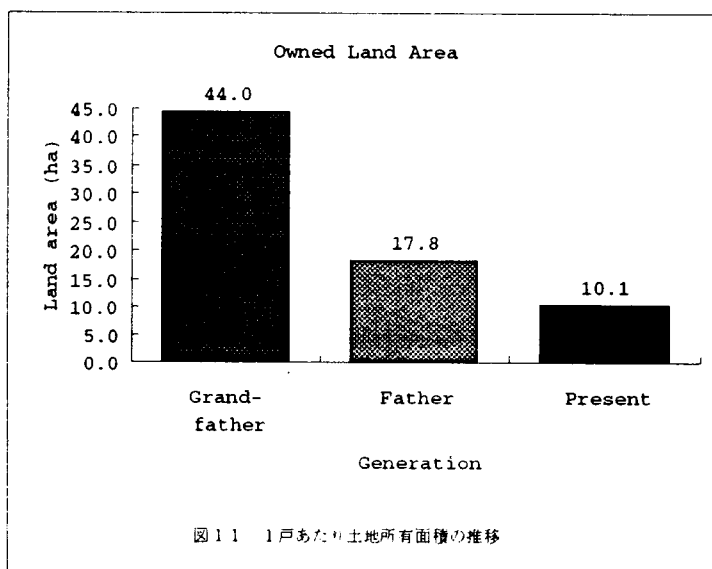


図11 1戸あたり土地所有面積の推移

## 2) 過耕作による影響

過耕作による土地生産力低下のメカニズムとしては、土壌中の栄養素の減少、土壌線虫などの病虫害の増加、アレロパシーの発生などが考えられる。村人からのヒアリングによると、土地生産力の低下は Bajra (パールミレット) の連作によって生じ、休閒または Guar (マメ科作物) などとの混作によって対処するという。

1994年9月に休閒の効果に関する現地調査をおこなった。表5～6に土壌の物理性および化学性に関する分析結果を示した。物理性については、水分保持能および透水性については差異がみられなかったが、土壌硬度は耕作地に比べて休閒地で高く、三相分布についても固相の割合は休閒地において高かった。化学性については、EC、交換性塩基(とくにCa)、全炭素は耕作地の方が高い値を示した。全窒素についてはど

ちらについても非常に低い値だった。

表7に休閒地における植生調査の結果を示した。傾斜地では *Tephrosia purpurea*、*Cenchrus biflorus*、*Crotalaria burhia* が、平坦地では *Indigofera cordifolia*、*Tephrosia Purpurea*、*Crotalaria burhia* がそれぞれ優占していた。両者に共通して *Tephrosia*、*Crotalaria*、*Indigofera* などのマメ科植物が多くみられた。

表7 カブラカラン村における植生分析結果

	Plot1-2	Plot3-4
Number of plots	5	5
Total species	22	24
Average total cover	48.7	51.1
Average highest height	77.7	65.2

## 3) トラクタ耕起による影響

現地ではもともと風食による被害の激しい地域であるが、近年、省力化のためにトラクタが導入され、それが風食の被害に拍車をかけているといわれている。1994年9月の現地調査において、トラクタによる耕起地とラクダによる耕起地において土壌サンプルを収集し、土壌の物理性・化学性を分析した(表5～6)。物理性については、土壌硬度、三相分布、水分保持能、透水性ともに差異がみられなかった。化学性については、pH、EC、可給態リン酸、全リン酸で差異がみられなかった。交換性塩基(とくにCa)、全炭素はトラクタ耕起地の方が高い値を示した。

## 4) 砂丘上の農業活動が砂丘再活動に及ぼす影響

カブラカラン村においてみられるバラボラ砂丘は、今から1万年から1万8千年前の乾燥期に形成された古砂丘だと言われている。村人からのヒアリングによれば、砂丘上の耕作はもともとおこなわれていたが、近年トラクタが導入されたことにより、飛砂量が飛躍的に増え、それが砂丘再活動をうながしているという。そこで、条件によっては数十cmの精度で位置計測が可能なディファレンシャルGPS(Global Positioning System)を用いて、砂丘全体の精密計測をおこなった。得られたデータをGIS(Geographic Information System:地理情報システム)を用いてDTM(Digital Terrain Model、数値標高データ)に変換し、砂丘の三次元形状を解析した(図12)。

表5 カブラカラン村における土壌調査地点一覧

Plot number	Land use	Relief	Soil Hardness
1	Two year old fallow	Hammock-Upper	1.7-1.9kg/cm <sup>2</sup>
2	Two year old fallow	Hammock-Lower	1.2-1.4kg/cm <sup>2</sup>
3	Two year old fallow	Flat	3.0-4.0kg/cm <sup>2</sup>
4	Two year old fallow	Flat	2.6-3.2kg/cm <sup>2</sup>
5	Tractor plowed Bajra field	Flat	
6	Tractor plowed Bajra field	Hammock	
7	Tractor plowed Bajra field	Flat	1.4-2.0kg/cm <sup>2</sup>
8	Camel plowed Bajra field	Flat	1.2-1.9kg/cm <sup>2</sup>
9	Camel plowed Bajra field	Flat	

表6 カブラカラン村における土壌分析結果

## Physical properties

	Three phase distribution (%)			Water content (%)			Permeability (cm/S)
	A	L	S	pF1.5	pF2.0	pF3.0	
1	30.99	11.93	57.08	21.72	12.19	5.21	3.8*0.001
2	31.94	11.89	56.17	22.54	13.00	4.77	3.3*0.001
3	32.12	11.42	56.46	22.05	14.80	6.76	2.2*0.001
4	32.74	11.06	56.20	22.14	12.93	5.24	3.0*0.001
5	34.60	12.37	53.03	25.21	14.44	6.62	4.6*0.001
6	40.49	14.75	44.76	23.94	14.08	9.57	1.9*0.001
7	37.31	12.27	50.42	23.84	14.12	8.17	3.4*0.001
8	33.64	13.45	52.91	23.87	10.93	5.99	4.5*0.001
9	35.83	12.70	51.47	24.19	14.50	6.17	5.2*0.001

## Chemical properties

	pH (*)		EC (microS/cm)	Exchangeable base			
	H <sub>2</sub> O	KCl		Ca	Mg	Na	K
1	9.04	8.13	39.90	7.09	0.58	0.13	0.26
2	9.03	8.19	50.20	7.38	0.61	0.10	0.26
3	8.92	7.92	53.80	9.26	0.65	0.12	0.21
4	9.16	8.05	50.00	15.52	0.60	0.12	0.19
5	9.07	8.13	62.10	22.50	0.65	0.15	0.23
6	9.00	8.08	60.20	17.76	0.68	0.14	0.25
7	8.97	8.01	59.00	15.83	0.68	0.14	0.17
8	9.02	8.11	52.30	4.84	0.57	0.08	0.24
9	8.84	8.14	61.20	5.25	0.61	0.09	0.22

(\*) soil:water=1:5

	Phosphate			Total-C* (T-C %)	Total-N (T-N %)	C** (C %)	C/N ratio C***/N
	Available Truog	Olsen (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /100g)	Total				
1	0.592	0.341	2.729	0.114	0.007	0.012	14.6
2	0.877	0.534	4.004	0.160	0.008	0.011	18.6
3	0.199	0.222	1.432	0.215	0.012	0.010	17.1
4	0.203	0.194	1.283	0.233	0.009	0.006	25.2
5	0.196	0.240	1.576	0.224	0.010	0.003	22.1
6	0.227	0.268	1.271	0.363	0.012	0.010	29.4
7	0.192	0.194	1.128	0.280	0.013	0.007	21.0
8	0.154	0.249	1.120	0.127	0.009	0.010	13.0
9	0.205	0.249	0.988	0.174	0.010	0.011	16.1

Total-C\*:有機物中の炭素と遊離炭酸塩中の炭素の含量 (NC7ナリイザ-による乾式燃焼法)

C\*\*:遊離炭酸塩中の炭素 (塩酸添加による減量から)

C\*\*\*:有機炭素(C\*-C\*\*)

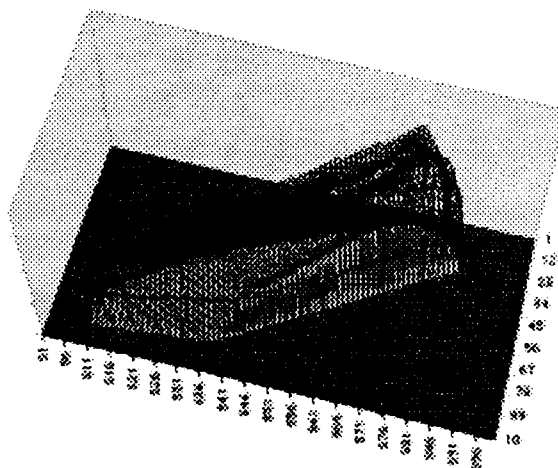


図 1 2 GPSにより把握された砂丘の三次元形態

#### 4. 国際共同研究等の状況

1993年8月にCAZRI (Central Arid Zone Research Institute、中央乾燥地研究所) の上位機関であるICAR (Indian Council of Agricultural Research、インド農業研究会議) と国立環境研究所とのあいだで、"Memorandum of Understanding between Indian Council of Agricultural Research and National Institute for Environmental Studies for Collaborative Research on Desertification" が締結され、これに則って研究協力がおこなわれた。

国際共同研究名： 乾燥・半乾燥地における砂漠化に及ぼす人間活動の影響評価に関する研究  
Evaluation of interaction between biotic activities and desertification  
in arid and semi-arid areas

カウンターパート： Dr. V. Venkateswarlu, Director, Central Arid Zone Research Institute  
(中央乾燥地研究所所長)

参加・連携状況： 〈日本側〉  
環境庁 国立環境研究所、(財) 自然環境研究センター  
〈インド側〉  
Indian Council of Agricultural Research, Central Arid Zone Research  
Institute (インド農業研究会議、中央乾燥地研究所)

研究発表の状況

- Kar, A. and T. Miyazaki : Desertification Processes in the Arid Western India, The 2nd. International Symposium on Desertification, Tsukuba, (1994.3)
- Miyazaki, T. and A. Tsunekawa : Remote Sensing of Desertification and Social Investigation in Indian Desert, The 2nd. International Symposium on Desertification, Tsukuba, (1994.3)
- Miyazaki, T. and Yasuoka, Y., Vegetation mapping and change analysis in Thar desert of Western India from NOAA AVHRR LAC imageries, Towards solving the global desertification problem (2) , 47-55, 1994.
- Narita, K., Review of Ecological study on desertification in Indian desert, Towards solving the global desertification problem (2) , 56-70, (in printing) .Saha, D. K. and A. Tsunekawa : Desertification in Western Rajasthan -A Sociological View Point-, The 2nd. International Symposium on Desertification, Tsukuba, (1994.3)
- Saha, D. K. and A. Tsunekawa : Desertification in Western Rajasthan -A Sociological View Point-, The 2nd. International Symposium on Desertification, Tsukuba, (1994.3) Tsunekawa, A. Desertification monitoring using remote sensing techniques, Towards solving the global desertification problem (2) , 71-80, 1994.
- Tsunekawa, A., Miyazaki, T. and Kar, A. : Desert mapping using NOAA/AVHRR in Rajasthan, India, International Seminar on Disaster, Environment and Development (Delhi, Dec 9-12, 1994) , (in printing) .
- Yasuoka, Y. et. al. : Vegetation mapping and change analysis in south-east Asia from NOAA AVHRR LAC imageries, 1993 Int. Geosci. & Remote Sensing Symp., Tokyo, (1993.8) Wada, N., Narita, K., Kumar, S. and Furukawa, A. ; Impact of overgrazing on seed predation by rodents in the Thar Desert, northwestern India, Ecological Research, 1994.

- 大坪國順 (1994) : 砂漠化の影響、「地球環境ハンドブック」、朝倉書店、423-425
- 恒川篤史 (1994) : 砂漠化の影響、「地球環境ハンドブック」、朝倉書店、414-418
- 宮崎忠国 (1994) : 砂漠化の影響、「地球環境ハンドブック」、朝倉書店、418-423