

宇宙から観た中国東部の砂漠化

今川 俊明

Desertification in Eastern China viewed from Space

Toshiaki IMAGAWA

National Institute of Agro-Environmental Sciences

Abstract

The purpose of this study is to clarify the characteristics of desertification areas and to understand how desertification has progressed over the last 10-20 years in some model areas of different types of desertification using Landsat data.

1) Desertification in eastern China was characterized by reactivation of fixed sand dunes at Naiman, surface erosion of the topsoil at Lanxi, and severe gully erosion resulting in badlands at Yuanmou.

2) Three indices were developed to extract desertified area using Landsat data.

Vegetation Index for extracting non-vegetated area ; $(TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$

Structure Index for excluding man-made structure ; $(TM5 - TM1)/(TM5 + TM1)$

Soil Color Index for extracting specific soil area ; $(TM3 - TM1)/(TM3 + TM1)$

These equations were applied to three areas we studied. And yearly changes of desertified areas were obtained through superimposing those areas of different years.

3) No significant changes in areal extent of desertification were seen in any of the analyzed regions of Naiman, Lanxi, and Yuanmou. Land management around major settlements, roads, railway lines, etc., in all these regions was relatively meticulous and desert land was being reclaimed. However, in outlying regions new desert land was appearing, making it difficult to say that suitable land management was being practiced.

4) We evaluated the processes of desertification in Yuanmou Province, where gully erosion is prominent.

Key words : Desertification, Remote Sensing, Eastern China, Active Dune, Budlands

1. はじめに

1995年6月17日に国連で砂漠化防止条約が採択された。ここでの「砂漠化」は「乾燥、半乾燥及び乾性半湿润地域における種々の要素（気候変動及び人間活動を含む）に起因する土地の劣化をいう」（外務省、1994）と定義されている。

世界で最も人口が密集する東アジアにおいては、ここの乾燥～乾性半乾燥地域は限られているものの、同様な土地の劣化現象が問題となっている。Zhu *et al.*

(1992) は中国東部地域は国土の約半分の面積と90%を越える人口を含み、人間インパクトの強い地域であり、気候条件が北部の半乾燥地域から南西部の亜熱帯半湿润地域まで変化に富んでいることから、さまざまな過程で「砂漠化」が進んでいると指摘している。このため、この論文では上記の「砂漠化」の定義をやや広く捉え、中国東部の半湿润地域を含めて議論する。

さて、砂漠化、森林破壊といった環境問題をとらえようとする場合、それらの空間的な広がりや動態をとらえることが必要不可欠と考える。しかし、これまでの砂漠

化研究においては、この観点での研究がほとんど見あたらない。これは、砂漠化、森林破壊といった現象は地上調査で観察できる範囲が限られているばかりか、それを地図上に再現することが難しいためと考えられる。

この課題に対して、空中から撮影された写真や観測されたデータが砂漠化や森林破壊等の現象をとらえることを容易にしてくれる。しかし、1950年以降使用され始めた空中写真は一度に撮影される範囲が数キロ平方であるため、地域スケール以上の現象をとらえるために膨大な時間が必要である。これに対して、1970年代半ばから観測を始めた人工衛星の観測範囲は数十～数千キロ平方と広く地域-大陸レベルの現象を同時かつ周期的にとらえることを可能にした。

ここでは、最初に中国東部地域の代表的砂漠化地域の特徴を述べ、それらの地域を対象に、観測範囲180キロ平方、観測周期16日、可視・赤外の7つの波長帯をもつランドサットセマティックセンサ（以下、ランドサットTMと略述）データを主に利用した砂漠化域の抽出手法とその年次変化の把握、砂漠化進行程度の評価等について述べる。

2. 中国東部の砂漠化の特徴

中国東部地域とは、中国の自然地域区分にしたがって、大興安嶺とチベット高原東縁を結ぶ線を境に国土を二分した東側を指す（図1）。地形的には海岸低地から山地までが含まれ、気候的にも北部の亜寒帯半乾燥地域から南西部の亜熱帯半湿潤地域まで含まれている。

「砂漠化」の具体的プロセスとして、水食、風食、これらの作用による堆積、自然植生の量と多様性の長期にわたる減少、塩性化、アルカリ化があげられる。多様な気

候、地形、地質条件をもつ中国東部地域ではこれらのほとんどのプロセスが出現している。すなわち、自然植生の減少は薪炭材の採取、農用地の造成等で全域で広く発生している。風食は、内モンゴル自治区を中心とした地域で顕著であり、かつての乾燥期に形成された古砂丘の砂や黄河、長江等の河川によって運搬堆積された砂を覆う植生や土壌が破壊されることを契機に発生している。水食は、中南部の半湿潤～湿潤地域で広くみられる。ここでは取り上げていないが黄河中流域の黄土地帯のガリ侵食は特に激しく、下流域での堆積による土地荒廃も問題となっている。このほか、塩性化が黄河の下流域や北部の半乾燥地域の低地で顕著に発生している。

ここでは、風食ないしは水食による以下の三つの地域の砂漠化の現状を述べる。

- 1) 風食により固定砂丘が再活動する内モンゴル自治区奈曼地域
- 2) 水食により紅色土が露出した“紅漠”景観が形成されている浙江省蘭溪地域
- 3) ガリ侵食によるバッドランド景観が形成されている雲南省元謀地域

1) 奈曼（内モンゴル自治区）

奈曼は北京の北東400kmに位置する（図1）。年平均降水量は372mm、年平均気温は6.4℃の半乾燥地域である。この地域の子な表層堆積物は第四紀の湖底堆積物であり、かつての乾燥期に形成された砂丘が土壌や植生で覆われた固定砂丘となり広く分布している。固定砂丘上や砂丘間低地では、トウモロコシ、コウリヤンを中心とした畑作物が栽培されている。また、奈曼北西部は草地が広く展開されている。

砂漠化は固定砂丘の植生と表層1～2mの土壌が破壊されることにより、未固結の砂が流動することによって始まる。この地域では、砂が舞い上がるとされる5m/s以上の強い風が春にしばしば吹く。したがって、ランドサット画像には西から東へ延びる砂丘が広く分布しているのが撮し出されている（図3-左）。砂の動きは砂丘の規模が小さいものほど大きく、年間5m/yrに達したことが観測されている。

2) 蘭溪（浙江省）

蘭溪は上海の西約300km、東西に長い盆地の東部に位置する（図1）。気候は亜熱帯モンスーン気候であり、年降水量は1360mmで4～6月にその50%が集中する。これに対して、秋は乾燥しており、年蒸発量は1493mmと降水量をやや上回る。この盆地内の地形は沖積地と丘陵地に大きく分かれる。砂漠化はほとんどの丘陵部で進行している。丘陵の土壌は第四紀の紅色土である。本来、表層を2～3m程の紅色土が覆い、その下に2層の礫

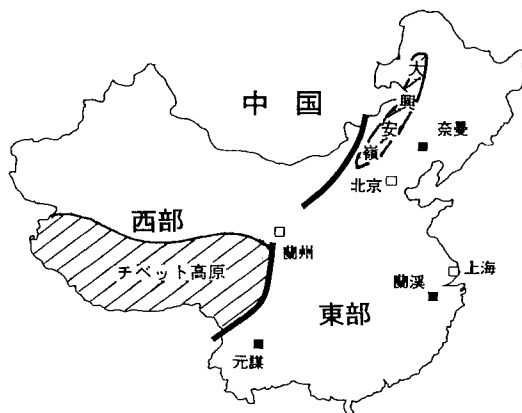


図-1 研究対象地域

Fig. 1 The study area

層を含みトラ班をもつ粘土質層が7~8m堆積している。そして、丘陵部の樹木の伐採とその後の耕作等起因して裸地化した後、降雨による表面侵食を受け、紅色土が削割されている。このため、砂漠化した丘陵のリルやガリの密度は比較的小さく、凸型斜面が保存されている。このような景観は、200km程西の南昌付近ではさらに大規模に広がっており、「紅色砂漠（紅漠）」と名付けられている（写真1）。ランドサット画像では紅色の裸地が特徴的にとらえられる。荒廃の歴史は過去にも何度かあり、200~300年前にも遡ることができるというが、砂漠化が激化したのは最近30年間と考えられている。

3) 元謀（雲南省）

元謀は昆明の北西約200km、南北に細長い盆地底に位置する（図1）。標高1250~1330mである。西の横断山脈を越えてくるフェーンの影響で年降水量は613mm、年間蒸発量は3847.8mmと乾燥している。この盆地をとりまく山地は現在でも隆起し続けており、盆地底も必ずしも平坦ではなく、段丘状の丘陵とそれを開析する谷が入り交じっている。砂漠化はこの丘陵で進行している。この丘陵の土壌は、多孔質の燥紅土で一度に大量の水が浸透すると脆く、崩れ易い性質である。また、植被率は20%以下と低く、乾季直後の豪雨によって大規模なガリ侵食が進行し、バッドランドの景観が形成されている（写真2）。ランドサット画像でもこの丘陵をガリが網目状に侵入しているのが判読される。盆地を限る東側の山地の灌木林~森林や西側の山地の放牧地とは対照的である。

平坦な面を残す丘陵は、灌漑によるさとうきび畑が広がっているが周辺はガリ侵食が進行しており、最近30年間で7~8mの深さまで侵食が進行しているという。また、場所によってはガリの後退速度が6m/yrに達するところもあり、さとうきび畑が蝕まれている。激しい



写真-1 蘭溪の砂漠化景観

Photo 1 Landscape of desertification in Lanxi, Zhejiang Province



写真-2 元謀の砂漠化景観

Photo 2 Landscape of desertification in Yuanmou, Yunnan Province

侵食は最近も継続しており、30年前には3年1回程度起こっていた洪水が、最近では3年に2~3回に増加しているという。

3. 砂漠化域の抽出手法

1) 土地利用/土地被覆区分による抽出手法

ランドサットデータを利用して砂漠化域を抽出する際には、既存の地図や現地調査を基に砂漠化域及びその他の土地利用/土地被覆の区分が可能であれば、砂漠化域の抽出をより正確に行うことができる。

そこで、奈曼のモデル地区を対象に作成された「奈曼旗砂漠化類型及土地整治区分図」（朱・邸，1984）で分類された土地利用区分単位をもとに流動砂丘（日本では通常「活動砂丘」）、草地、耕地、林地、湿地、集落、水体の7つをランドサットデータで区分することを検討した。

まず、モデル地区内に流動砂丘、草地、耕地、林地、湿地、集落、水体の各区分ごとに、ランドサット合成写真をもとに地図作成後も変化していないと思われる場所を5カ所前後設定し、1992年に観測された5月から9月の5時期（5月20日、6月5日、7月23日、8月24日、9月25日）のランドサットデータについて、それぞれの反射特性を調べた。その結果の一部を図2に示す。流動砂丘は他の区分単位と比較して、いずれのバンドとも常に高い輝度値を示し、反対に水体はTM4, 5の両近赤外バンドが常に低い輝度値を示す。このことから、両者はどの時期のデータを用いても他の区分単位と区分できることがわかった。また、他の区分単位についても5月下旬と7月下旬の二時期のデータを用いることによって区分が可能であることがわかった。すなわち、耕地、林地と草地は植物が繁茂するという点では共通なので1枚の

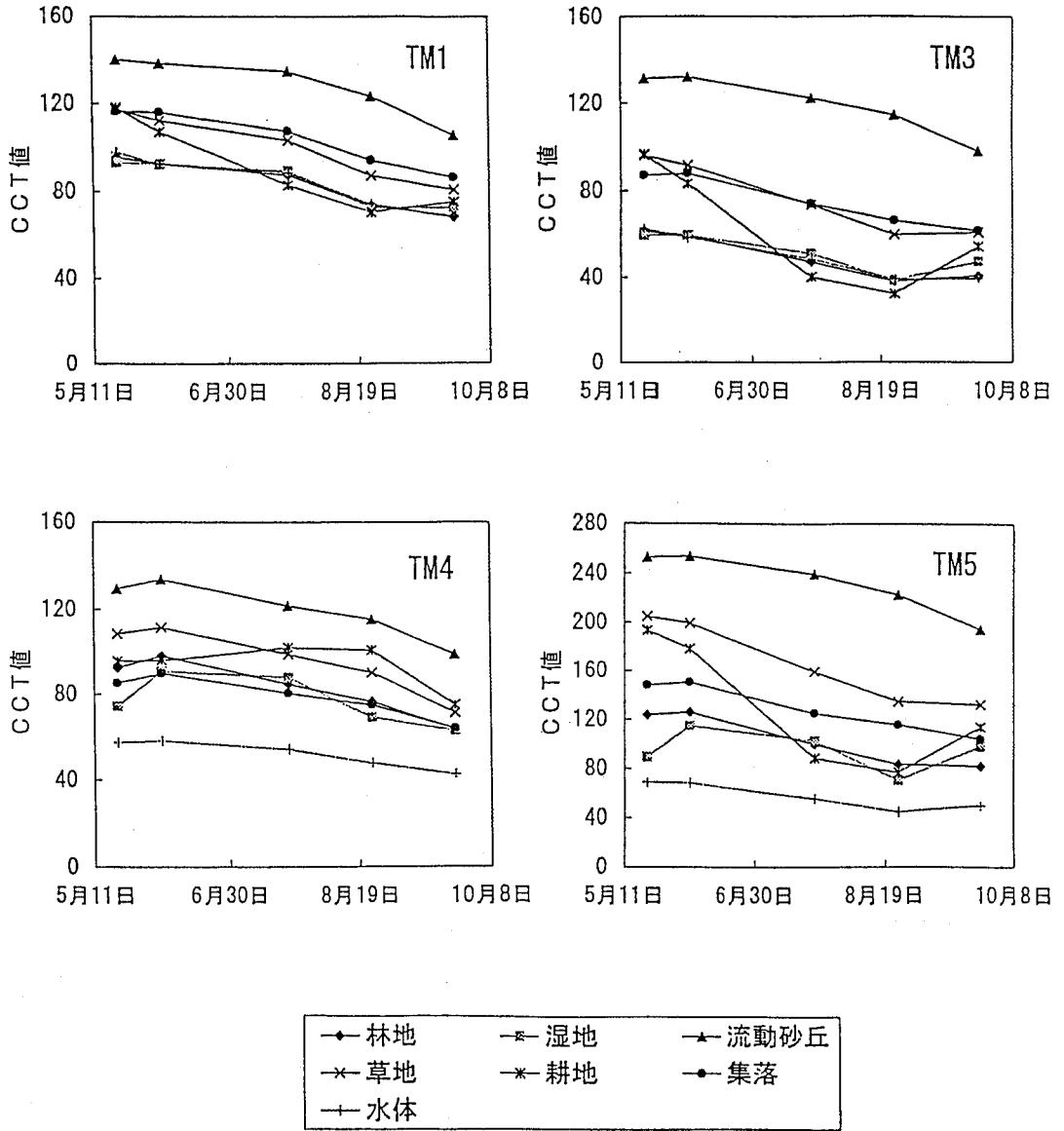


図-2 土地被覆/土地利用タイプ毎の分光反射率の季節変化
 Fig. 2 Seasonal changes in spectral reflectance of each land cover/land use type

画像から区別するのは困難である。しかし、5月下旬は耕地及び草地はまだ植物の葉の展開が少なく裸地に近い状態であるのに対して、林地ではすでに多くの葉が展開している。また、7月下旬から8月下旬にかけては耕地の植被密度は作物の生長により草地よりはるかに大きくなる。こうした違いは、植物中の葉緑素の光吸収の大きな波長に相当する TM3 バンドの輝度値の差となって現れる。したがって、5月と7月の TM3 バンドといずれかの時期の他のバンドを組み合わせることによって、上

記の7つを判別することが可能となることが明らかとなった。

そこで、5月20日の TM バンド3と7月23日の TM バンド1, 3, 4, 5を用いて、各区分単位の反射特性を調べた場所を教師とした最ゆう法分類による土地利用区分図を作成した。そして、区分後の教師領域の再現性を調べたところ、表1の結果を得た。各区分単位の判別率は林地、湿地、集落がいずれも80%台であったが、他の4つの区分単位は90%以上で、耕地、草地とも95%の精

表-1 最ゆう法による土地被覆/土地利用区分の判別率

Table 1 Verification of land cover/land use classification with maximum likelihood method

		最ゆう法分類によって区分された土地被覆/土地利用区分の割合							
		流動砂丘	草地	耕地	林地	湿地	集落	水体	未分類
地図上の区分	流動砂丘	96.87	1.25	0	0	0	0	0	1.88
	草地	0.29	94.71	0.29	1.14	0.86	1.29	0	1.43
	耕地	0	2.82	94.86	0.91	0	0	0	1.41
	林地	0	4.51	0	80.56	12.85	1.04	0	1.04
	湿地	0	2.50	0	6.75	81.25	2.50	5.75	1.25
	集落	0	0.54	0.18	2.06	8.04	86.03	0	3.14
	水体	0	0	0	0.61	2.74	0	95.43	1.22

度で判別が可能であった。以上のことから、ここで用いた方法が土地利用図作成に有効であることが示され、この方法で土地利用区分図を作成して経年的に比較すれば、砂漠化の進行状況や人間による耕地の開拓や放棄の様子、あるいは林地の伐採や防風林の植林を調べることが可能なことが明らかとなった。

2) 3つの指数を用いた抽出手法

上記の手法に関しては、現地調査あるいは地図データが必要となるが、どこでも必要な資料が収集されたり、調査ができるわけではない。そこで、現地のデータがない場合の砂漠化域の抽出手法について検討した。ここでは、ランドサットデータを用いて植生が無いか極めて貧弱な部分から集落を含む人工構造物を除き、その中でそれぞれの地域の砂漠景観を形成している土壌の色（奈曼は白、蘭溪、元謀は赤）を反映している部分を砂漠化域として抽出することとした。その手法は以下の通りである。

最初に、正規化植生指数 $(TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$ を用いて植生がないところを抽出する。

この値の低い部分が植生のない部分であり、合成写真と比較して閾値を求め、無植生部分を抽出する。ただし、植被状態の季節の変動を考慮するために、できるだけ連続した秋と春のデータを用いて、その共通部分を抽出する。次に、この植生のない部分から水域及び密集した人工構造物すなわち集落の除去を試みる。これにはバンド比 $(TM5 - TM1)/(TM5 + TM1)$ を用い、無植生域が水域や人工構造物と比較してのバンド比が高いことから、両者を分離することができる。この比で得られる指数をここでは構造物指数とする。

最後に土壌中に含まれる酸化鉄の量を反映する赤色度指数 $(TM3 - TM1)/(TM3 + TM1)$ を用い、各地域の

砂漠域を特定することとした。

そして、この方法から得られる砂漠化域について観測時期の異なる画像の解析結果を重ね合わせることにより、砂漠化域の年次変化がとらえられ、砂漠化進行状況が把握が可能となる。

この砂漠化域抽出手法の妥当性を確かめるために、奈曼で得られた1982年～1991年の砂漠化進行状況（図3-右）をグランドトゥールズにより確認した。以下、主要な地点について記述する。この10年間で砂漠化が進行した地域に含まれるA地点では、過放牧により砂の移動が始まり、ヤナギの疎林に移動砂丘が侵入しているのが確認された。また、ヤナギは薪炭採取のため枝が刈り払われているため樹形が歪むとともに、さらに砂を移動させている強風のために一定方向に傾いているのが観察された（写真3）。一方、B地点ではヤナギの疎林を伐採して乳牛を放牧したため、砂が移動をはじめ、まさに荒漠たる景観が形成されていた。そうした土地でもなお耕作を試みる農民がいたが、この2～3年の収量はゼロであったらしい。これに対して、荒廃から回復した地域と判定されたD地点では、砂が移動していた場所で最近5年間放牧を禁止した結果、砂丘表面に草本が定着し、場所によっては耕作が可能になっていた。このような例を始めとして、実際の状態とよく対応していることが確認された（写真4）。

以上のことから、既存データを用いて土地被覆/土地利用図を作成しなくとも、上記の三つの指数を用いて砂漠化域の抽出が可能であることが明らかとなった。

4. 画像解析からみた最近の砂漠化進行状況

次に、蘭溪、元謀地域についてもモデル地区を設定し、三つの指数を用いて最近10～20年間の砂漠化進行状況

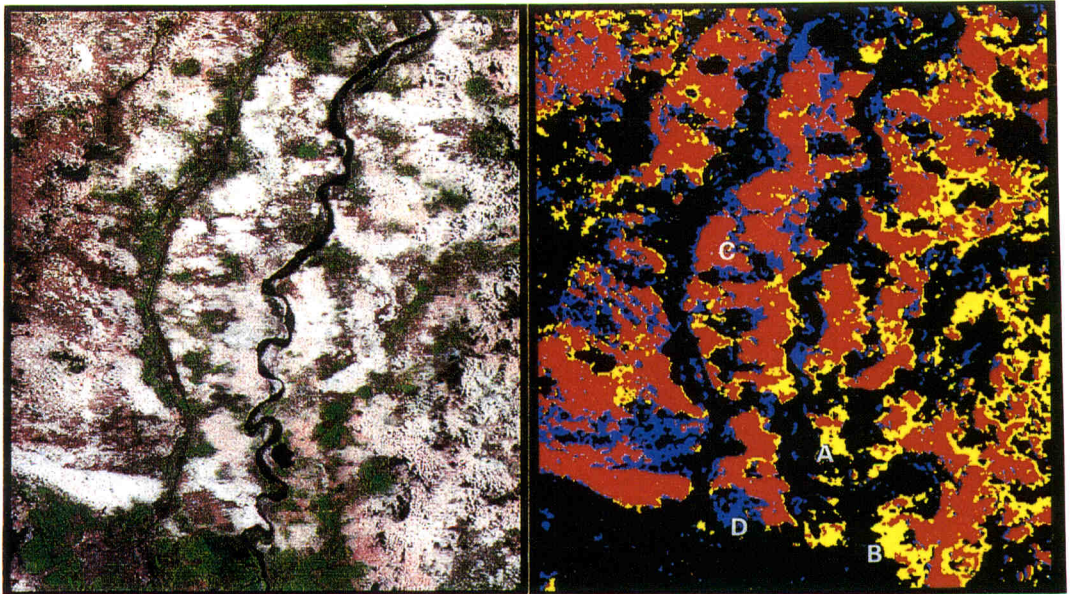
を解析した (表2)。

各モデル地区で、砂漠化が進行している範囲は奈曼約40%、蘭溪約3%、元謀約15%と異なっている。しかし、回復している面積と新たに砂漠化している面積はいずれの地域ともほぼ同じで、各地域の砂漠化面積にはほとんど変化がないのが特徴である。

奈曼では、街の東側を南北に平行して走る道路と鉄道

や集落の周辺では82年~91年に回復傾向にあるのに対し、その外側では砂漠化が進行していた (図3-右)。この傾向は、他の二つの地域でも同じであった。すなわち、元謀でも76年~92年の街の周辺の回復傾向とその外側の砂漠化傾向がはっきり現れていた。また、蘭溪でも73年~92年で同様の結果が得られた。

以上のことは、砂漠化はその荒廃形態に関わらず一



奈曼 (内モンゴル自治区) 1991. 8. 22
112, 338 ha

	砂漠域		回復域		砂漠化域
8 2 → 9 1	29. 2%	12. 3%	12. 0%		

図-3 奈曼 (内モンゴル自治区) のランドサット TM 合成写真 (左) と砂漠化進行状況 (右)

Fig. 3 Composite photo of Landsat TM (left) and recent trend of desertification in Naiman, Inner Mongolian Autonomous Region

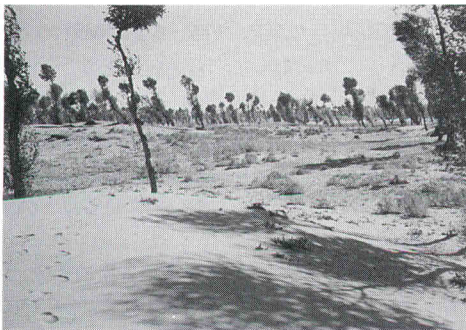


写真-3 奈曼における砂漠化進行地域の例 (図3のA点)

Photo 3 An example of deserified area in Naiman (A in Fig. 3)



写真-4 奈曼における砂漠化回復地域の例 (図3のD点)

Photo 4 An example of recoverd area in Naiman (D in Fig. 3)

表-2 各研究対象地域のモデル地区における砂漠化進行状況

Table 2 Recent trends of desertification in three model districts of the study area

奈曼 (h a)

9 1 8 2	砂漠地 (活動砂丘)	非砂漠地
砂漠地 活動砂丘	32,808 (29.2 %)	13,526 (12.3 %)
非砂漠地	13,442 (12.0 %)	52,562 (46.8 %)

(総面積：112,338 ha)

蘭溪 (h a)

9 2 7 3	砂漠地 (紅漠)	非砂漠地
砂漠地 (紅漠)	2,109 (1.7 %)	1,518 (1.2 %)
非砂漠地	1,186 (0.9 %)	121,567 (96.2 %)

(総面積：126,380 ha)

元謀 (h a)

9 2 7 6	砂漠地 (悪地)	非砂漠地
砂漠地 (悪地)	7,982 (8.4 %)	5,538 (5.8 %)
非砂漠地	6,339 (6.7 %)	75,003 (79.1 %)

(総面積：94,862 ha)

的に進行しているのではないこと、比較的人手の入りやすいところは、何らかの対策が講じられ、砂漠化の進行が抑えられていることがわかった。

5. ガリ侵食による砂漠化進行程度の評価

次に、ガリ侵食によるバッドランド景観で特徴づけられる元謀を対象として砂漠化進行程度の評価を試みた。

ガリは急傾斜の壁をもつ溝であり、ランドサット衛星観測時には太陽光によって陰がしやすい。そこで、この陰を利用してガリの抽出を試みた。

ランドサット衛星の観測時間は午前9時30分ころである。したがって、太陽光は南東の方向から来ている。そこで、東と南から光が当たった時の陰を抽出するためのフィルタ処理を行った。次に、この結果を二値化した後、さらにフィルタ処理を行い、どの様な方向でも最低3ピクセル(90m)連続する陰だけを残した(図4-左)。

ここで得られた二値化画像をマッキントッシュコンピュータのキャンパスソフトを使って細線化処理を行った。

しかし、ここで得られたリニアメントは必ずしもガリ底のみをあらわしているとは限らず、街路樹や建築物の影も含まれる。そこで、土地被覆区分結果をもとに森林、

灌木、耕地等をマスクし、裸地と草地の部分のみについてリニアメントを残し、ガリ密度図とした。

そして、最後に評価点を取り囲む3×3ピクセルを対象として、そこに含まれるリニアメントの画素数に基づいて荒廃化程度をと評価した(図4-右)。その評価は現地調査と既存の地形図から得られた結果とよく対応していた。

6. まとめ

本報告では、中国東部地域の代表的な砂漠化過程の特徴、砂漠化地域の抽出及び砂漠化進行状況の把握手法を述べ、対象とした三つの地域のモデル地区について最近10～20年間の砂漠化進行状況を明らかにした。また、ガリ侵食によって砂漠化が進行している地域において、ガリの密度をもとに砂漠化進行程度を評価できることを示した。

これまでの研究で、砂漠化域の動態を把握することはできるようになった。しかし、ガリ侵食域以外の砂漠化程度を評価するまでには至らなかった。このためには、現地調査での土壌や植生に関する情報の収集に努める必要がある。たとえば、土壌に関しては、砂漠化域の中でも砂漠化程度の違いによって土壌の物理性、化学性がど

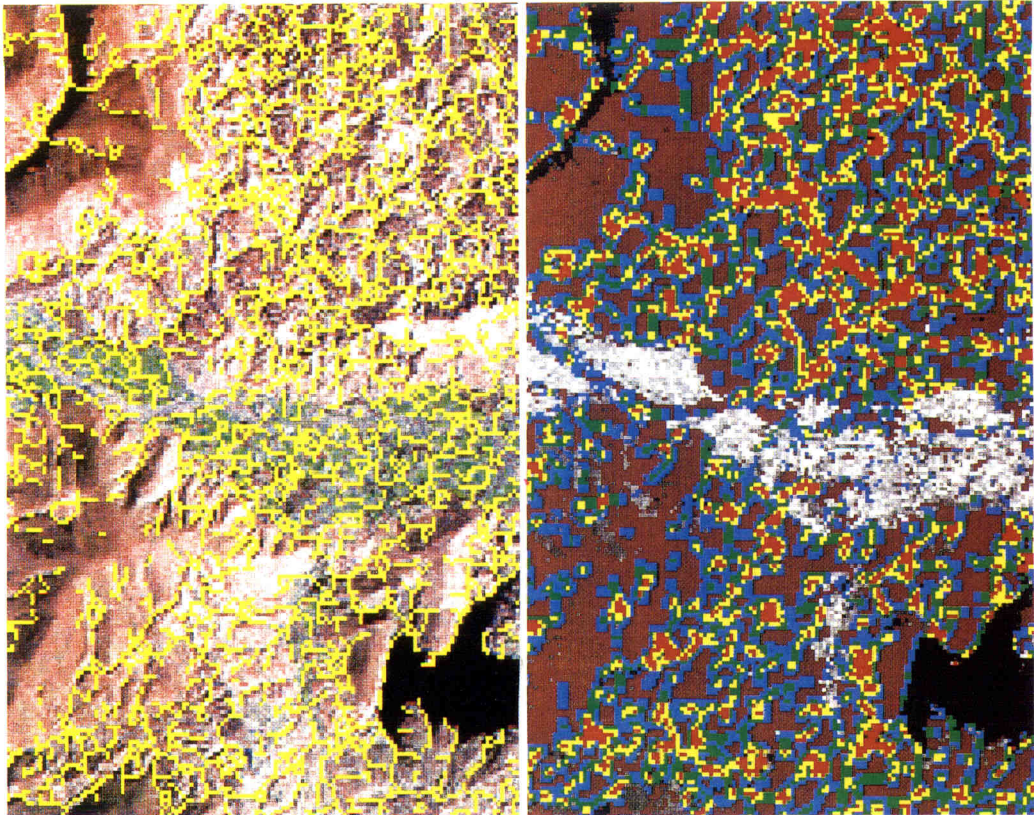


図-4 元謀（雲南省）におけるテクスチャ解析で抽出されたガリ（黄線；左）とガリ出現頻度による砂漠化程度（右）の例

50%以上：赤，40～50%：黄，30～40%：緑，10～30%：青，10%以下：茶

Fig. 4 An examples of gully (yellow line) extracted by texture analysis (left) and degree of desertification estimated by gully density in Yuanmou, Yunnan Province.
more than 50% : red, 40-50% : yellow, 30-40% : green, 10-30% : blue, less than 10% : brown

のように変化しているかを明らかにする必要がある。そして、土壌の性質と衛星データとの関係を見いだすことができるならば、砂漠化程度の評価に大いに有効となるであろう。また、砂漠化の主要因と考えられている放牧との関係の評価するためには衛星データと植被量の関係を植生指数や赤色光（TM3）の反射率を使って推定し（Yasuda, 1995）、さらに放牧圧との関係を明らかにする必要がある。このためには現地での植被量や放牧圧のデータが必要となる。

以上述べてきたように、衛星データを用いる最大の利点は、地上調査で得られた地点情報を基に、空間分布を把握できることである。また、衛星データの解析結果は地上調査地点の設定等に有効であり、野外調査が中心となる分野においても、衛星データが大いに活用されることを期待する。

謝 辞

現地調査にあたっては、中国科学院蘭州沙漠研究所、地理研究所、成都山地災害及環境研究所、浙江省水利庁、雲南省遙感中心にお世話になった。

本研究で使用したランドサット TM データは米国政府が所有し、EOSAT/宇宙開発事業団によって提供されたものである。また、データの購入に際しては財団法人リモートセンシング技術センターの協力を得た。ここに記して感謝申し上げる。

引用文献

外務省 (1994) : 深刻な干ばつ又は砂漠化に直面している国（特にアフリカの国）における砂漠化の防止のための国際連合条約（仮訳）、日本砂漠学会誌 4～1 :

39～64.

朱 震達・邱 醒民主編 (1984) : 奈曼旗沙漠化類型及
土地整治区分図, 中国科学院蘭州沙漠研究所.

Yasuda Yoshizumi (1995) : Using Remote Sensing to
Detect and Monitor Land-Cover and Vegetation
Changes. International Workshop on Land Use
System for Combating Land Degradation in East
Asia, Abstract. Tsukuba, 19～20.

Zhu Zhenda, Wand Xizhang, Wu Wiei, Kang Guod-
ing, Zhu Che, Yao Fafeng and Wang Tao (1992) :
China : Desertification Mapping and Desert Rec-
lamation. In "World Atlas of Desertification",
UNEP : 46～49.

受稿日 : 平成 8 年 2 月 9 日

受理日 : 平成 8 年 3 月 6 日