ランドサットデータによる内モンゴル半乾燥地帯における 土地被覆変化と砂漠化の解析

ANALYSIS OF LAND COVER CHANGE AND DESERTIFICATION IN INNER MONGOLIA SEMIARID REGION BY LANDSAT DATA

奥 倫^{*1}, 斉藤 郁雄^{*2}, 石原 修^{*3}
Lun AO, Ikuo SAITO and Osamu ISHIHARA

The purpose of the present study is to estimate land cover change and desertification in Inner Mongolia semiarid region using Landsat data and the survey data of land use condition, and the land cover classification maps of summer in 1986, 1994 and 2002 were created. The vegetation change tendency of the different vegetation regions were estimated by the spectrum analysis of the bands characteristic, and the texture analysis of the spatial feature change of land is applied to desertified land. Based on the results, the enforcement effect of land use plan advanced by Inner government was evaluated.

Keywords : Land Cover, Yellow River, Landsat, Desertification

土地被覆, 黄河, ランドサット, 砂漠化

1. はじめに

乾燥、半乾燥地帯は、気候の変動や人間活動により環境生態系が砂漠化・土地荒廃へ進展する危険性が極めて高い地域である。砂漠化のような半乾燥地帯特有の広大な環境変化を把握するためには、人工衛星データを解析することが有効であり、重要な研究課題となっている。衛星リモートセンシングデータによる中国内モンゴル自治区砂漠地帯における土地被覆変化、土地荒廃・砂漠化に関する調査研究も行われている。立入ら¹⁾は時系列衛星画像を用いた内モンゴル北東部のコルチン砂地における砂漠化実態を推定している。秋山ら²⁾はランドサット TM データの解析により内モンゴルシリンコル草原における草原退化や砂地の増加など生態環境悪化原因を分析している。また、時系列衛星データから砂漠地帯の植生量遷移や砂漠化の進展を解析した研究事例が数多くある³⁾⁴⁾。

現在、半乾燥、乾燥地帯における砂漠化対策の重要な課題として現行の農村地帯における土地利用計画を検討することが重要な課題となっている。内モンゴル西南部黄河流域では、現在、気候の変化や近代化に伴う開発により、土地被覆変化と砂漠化が生じている。農業生産の発展を果たしてきた一方で、砂漠化の進行にも悩まされている。

本研究では、内モンゴル黄河流域半乾燥地帯の土地被覆変化と砂

漠化状況を解析するとともに、内モンゴル政府によって進められている土地利用計画の実施状況と効果を評価する。まず1986年、1994年および2002年の夏のランドサット TM、ETM+データを用い、3時期の土地被覆分類図を作成し、砂漠化地域と植生域の土地被覆変動解析を行う。次に植生域から砂地に変動したエリアに対し、土地の空間的特徴変化のテクスチャ解析を行う。そして、エリアの各時期の土地被覆状況とテクスチャ情報との関係について比較し、砂漠化の実態を検討する。

また、砂漠化の進展は、地域の土地利用政策や人々の経済活動と密接に関連する。そこで、ランドサットデータから推定した結果と現地土地利用変化調査統計資料との対応を比較検討する。これらの検討によって、地域の耕地管理状況および草地の過開墾による土地荒廃の状況を明らかにし、砂漠化防止対策の効果について検証する。

2. 研究対象領域

本研究では、黄河の南に位置する内モンゴル地区の七つの郷(日本では郡と村の中間に相当する)を研究対象エリアとした(図1参照)。この地域は東経109° 05' から110°、北緯40° から40° 25' に位置し、面積は約2520 km²。黄河沿岸に分布している五つの郷では、水利施設が整備され、恵まれた黄河の水資源により豊かな灌漑農地

^{*1} 熊本大学工学部 外国人客員研究員

^{*2} 八代工業高等専門学校 教授・博士(工学)

^{*3} 熊本大学工学部環境システム工学科 教授・工博

Guest Scholar Visiting Research Fellow, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ.
Prof., Yatsushiro National College of Technology, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

が形成された。オルドス地区の最大な砂漠クブチ砂漠はこの地域の中南部を貫通し、砂漠の周辺には草地と天水農地が分布している。天水農地では灌漑手段がなく、雨水のみを利用している。ほとんどの草地は僅かな表土、表土が支える草の根によって維持されているが、この僅かな表土が開墾によって曝されるとその下部の砂が露出し、植生被覆のない砂地になってしまう。1980 年後半から、この地域では、草地の開墾により天水農地の面積が増加してきた。しかし、地力維持の努力がなされていないため、土地の荒廃が進んでいる⁶⁾。

このような背景を基に内モンゴル自治区政府は、1990 年代から黄河流域の生態系悪化・砂漠化を背景に退耕還草・還林の計画を進めてきた。これは過度の開墾を防ぐため、表土が流出したり砂漠化したりした天水農地を草原や林に戻す政策である。研究対象とした七つの郷は黄河流域の退耕還草プロジェクトモデル郷であり、1996 年から、耕作地に適しない土地を退耕し、人工植草の土地利用調整による草地生態回復活動を進めている。このような施策によって、この地区では 1980 年代から土地被覆・土地利用が著しく変化してきた。

3. 使用したランドサットデータ

本研究では 1986 年 8 月 9 日と 1994 年 8 月 6 日に観測されたランドサット 5 号 TM データと 2002 年 8 月 20 日に観測されたランドサット 7 号 ETM+ データを使用している。TM と ETM+ データは内モンゴル測絵局で 1988 年に編集された《内蒙古自治区地図集》のオルドス地区地図(1:400,000)を用いて幾何補正を行った。幾何補正されたデ

1-中和西郷；2-ウラン郷；3-四村郷；4-ショジンフン郷；
5-解放タン郷；6-展旦召郷；7-ソホウト郷

図1 解析対象領域の地理的位置

ータは生データの画像座標から UTM 座標に変換したものである。幾何補正誤差(RMS)は1ピクセル以内であった。

4. 土地被覆状況について

(1) 土地被覆分類

土地被覆分類項目の設定については、オルドス地区土地管理局で 2000 年に編集された「オルドス地区土地資源調査・評価報告集」及び内モンゴル航空リモートセンシング院で 1991 年に作成された「オルドス地区土地利用現状報告」を参考にした⁵⁾。

本報の土地被覆分類では、まず教師なし分類の一つであるクラスター分析を行った。クラスター分析手法としては、非階層的クラスター分析法を用いた。さらに、クラスター分析において分類されたクラスを教師とし、最尤推定法による、土地被覆分類図を作成した。

教師なし分類の結果を基に最終的な分類項目は水域、灌漑農地、天水農地、草地、裸地、砂地の 6 種類の土地被覆タイプとして、土地被覆分類図を作成した。1986 年に黄河沿岸に分布していた塩害のための休耕地、1986 年と 2002 年に河川涸水により川床が露出する場所は裸地に分類した。

(2) 土地被覆の経年変化

図2に3時期のそれぞれの土地被覆分類図を示し、3時期の土地被覆状況を表1に示す。北部黄河南岸各郷では近年の大規模な水利施設の整備によって、灌漑農地が大幅に増加し、農業生産環境は著しく改善された。クブチ砂漠周辺地域では、1994 年までに、草地と裸地開墾の結果として天水農地の面積が大幅に拡大し、草地は減少している。一方、3 時期の土地被覆分類結果を比較すると、砂地は増加し、土地の砂漠化が進行しつつあることが見られる。特に 1986 年から 1994 年にかけて、砂漠が大幅に隣接地域の土地を侵食した状況が見られる。1994 年から 2002 年にかけて、退耕還草政策が進められ、砂漠の周辺地域では耕作に適しない天水農地を退耕し、退耕地に植草活動を行うことによって、草地生態環境の回復が実施された。2002 年には、草地の面積はある程度まで増加した。砂地では植生に回復しているところも見られ、1986 年の画像と 2002 年の画像を比較すると、中和西郷北西部にあるモブラガコンデ川下流周辺砂地の植生回復は顕著であることが判る。

表1 各土地被覆カテゴリの面積(k m²)

	1986 年	1994 年	2002 年
灌漑農地*	345.12	403.23	420.92
天水農地**	442.82	485.93	368.52
草地	735.89	599.06	675.79
砂地	906.33	961.35	969.05
裸地	62.45	26.11	56.12
水域	30.27	44.32	29.60

(注)

*灌漑農地：灌漑システムが整備されており、
農産物の生産量が高い畑地

**天水農地：灌漑用水がなく、雨水だけに依存している畑地

図2 研究対象エリアの時系列土地被覆分類図

(3) スペクトル解析

ここでは、TM と ETM+データにより、3 時期における植生変化状況を明らかにするため、異なる土地被覆クラスに対し、各バンドのスペクトル特性解析を行う。ランドサットデータを絶対値として比較する場合、Digital Number (DN) のままでは各時期のセンサー内部設定が異なるため問題になる。従って、DN から放射輝度 L を計算し、さらに反射率 (Reflectance) を計算して使用する必要がある。放射輝度は式(1)と(2)で得られる。

図3 各植生域の分光特性の変化

$$\text{ETM+の場合: } L = \text{gain} \times \text{DN} + \text{bias} \quad (1)$$

$$\text{TM の場合: } L = \text{DN}(\text{Lmax} + \text{Lmin}) + \text{Lmin} \quad (2)$$

ここで、Gain、bias、Lmax 及び Lmin はランドサット画像のヘッダファイルから得ることができる。また、反射率 R は式(3)から求められる。

$$R = \frac{\pi \cdot L \cdot d^2}{E_0 \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

L : 放射輝度, d : 太陽-地球の距離(天文単位)

E_0 : 太陽の放射照度, θ : 太陽天頂角

ここでは3時期の各植生項目について各バンドの反射率を算出し、その平均から、スペクトルのバンド特性を解析することによって、灌漑農地、天水農地及び草地の植生変化傾向を推定する。

図3に、各植生項目の反射特性の経年変化を示す。ここで、ランドサットのバンド3(赤色)とバンド4(近赤外)の波長帯に注目すると、植物では、バンド4はバンド3に比べて反射率が大幅に増加する傾向があり、灌漑農地では植物の量及び活性度が高いため、バンド3とバンド4の反射率の差は大きくなっている。灌漑農地は1994年から農地管理が改善され、2002年まで農産物のバイオマスは高くなりつつあると判断できる。

草地に関しては1994年まで一度衰退したが、2002年に成長状況がよくなっていたことが分かった。逆に、天水農地の場合には、1994年の農産物の生産量は増加したと見られるが、2002年まで地力の衰退につれて生産量は低くなる傾向が見られた。これは、内モンゴルオルドス土地管理局の土地利用調査結果を裏付けている。即ち土地利用調査報告では、七郷の天水農地特に新開墾地は土壌表土が30cm以下で、灌漑措置がなく、生産量が低下しており、農業生産に適していないと判断されている⁹⁾。

5. 退耕還草地の状況

(1) 各郷の退耕還草地の状況と調査統計資料との比較

オルドス地域では、1992年から土地荒廃・砂漠化を防止するために、クブチ砂漠周辺の農業・牧業地域にある耕作条件の悪い天水農地に対して、退耕還草土地利用政策が実施されつつある。耕作の適否を判断する基準と評価指標を表2にまとめる。これらの基準と指標は、中国国土資源部「西部大開発土地資源調査評価実施方案」に基づいて、オルドス土地管理局により制定されたものである⁹⁾。

内モンゴルとオルドスの土地管理機関は土地利用現状、土壌条件および社会経済条件などを考慮して、退耕還草評価指標による退耕還草地域の区分を行った。中和西郷、ウラン郷、四村郷、ショジンフン郷、解放タン郷の北部は黄河「南岸平原農業発展区」として、五郷の南部、展旦召郷およびホストウ郷は「風食砂漠化退耕区」として区分した。本報では、ランドサットデータによる七郷の土地被覆分類結果から、郷界別に土地被覆情報を抽出し、2002年までの各郷の退耕還草の実態を調査する。さらに、各郷の天水農地の変化を

定量的に解析するとともに、現地の退耕還草計画実施状況の調査報告との対応を比較検討する。上記の調査報告は2000年8月にオルドス土地管理局に行われた土地資源調査に基づいて編集されたものである。本報で利用した行政界地理情報は、内モンゴル航空リモートセンシング院から入手したオルドス地区のベクトル地図から抽出された。

調査統計資料との対応は郷毎に検討し、その結果を表3に示す。ランドサットデータによる天水農地の変遷の推定には1994年と2002年のデータを使用している。ランドサットデータから推定した天水農地から草地への変化地すなわち退耕還草地は各郷ともやや大きめではあるが調査統計資料と同様の傾向を示している。大きめに推定されているのは、調査統計値が2000年のデータであり、その後、さらに退耕還草が進んでいるためであると考えられる。

表2 耕地の評価指標

土地類型 評価指標	耕作に適	退耕地
砂の侵食程度	<20%	>20%
表土厚さ	>30cm	<30cm
土壌有機質	>0.6%	<0.6%
土壌品質	石ころ含量<15%	石ころ含量>15%
温度条件	凍害脅威無	凍害脅威有
生産量	中産—低産	低産以下

図4 推定した退耕還草地の分布状況

表3 ランドサットデータから推定した郷別の土地被覆変化と統計値 (k m²)

	ランドサットデータからの推定値(1994年—2002年)					調査統計値(2000年まで)	
	天水農地 →砂地	天水農地 →裸地	天水農地 →灌漑農地	天水農地→草地 (退耕還草地)	未変化天水農地	退耕還草地	未変化天水農地
ホソウト郷	3.7	3.3	2.2	29.9	103.4	24.8	100.7
展旦召郷	3.1	3.0	1.4	28.4	135.7	25.3	138.4
四村郷	1.0	1.6	1.6	3.1	39.2	2.5	36.9
解放テン郷	0.6	1.9	3.1	2.6	24.0	2.4	22.2
昭君フン郷	0.0	1.0	1.5	3.0	20.2	2.1	21.3
中和西郷	1.0	2.0	1.7	3.3	30.6	3.0	30.3
ウラン郷	0.6	0.8	2.5	4.1	34.1	3.7	31.1

1994 年と 2002 年のデータから抽出した退耕還草地の分布状況を図 4 に示す。ほとんどの退耕還草地は黄河沿岸五郷南部、展旦召郷およびホソトウ郷に分布している。このうちホソトウ郷と展旦召郷の退耕還草地は天水農地の 16%以上を占めており、他の郷は 7%~9%程度である。3 時期の土地被覆変化の推定結果を見れば、1994 年まで砂漠化の進行は激しく、1994 年と 2002 年の間に砂地の増加は顕著には見られない。このことから現地での退耕還草事業などの砂漠化対策の成果が表れていると思われる。

(2) 植生指標 (NDVI) による退耕還草地の植生状況の評価

退耕還草事業の効果を検証するため、退耕還草地の植物生育状況の評価を行う。ここでは、植物の量と活性度を反映する植生指数 NDVI を導入した。図 4 に示している退耕還草地区域の 3 時期の NDVI を式 (4) で算出した。

$$NDVI = \frac{Band\ 4 - Band\ 3}{Band\ 4 + Band\ 3} \times 100 + 100 \quad (4)$$

NDVI の分布状況を図 5 に示す。各時期による植生の生育状況の違いが NDVI の分布傾向に現れている。2002 年は退耕還草地の植物の生育がよく、NDVI 値が高い傾向を示している。退耕還草地における土地管理の改善と植草活動による植生の回復が良い状況になっていると思われる。NDVI を比較する方法は植生変化状況を把握するための一つ方法であると考えられる。しかし、NDVI は地域降水量の影響を受けやすく、過大あるいは過小評価されることもある。内モンゴル南西部半乾燥地域では、降水の大部分は 7 月~9 月に集中する。そこで、内モンゴル気象局によって観測された七郷の所属県—ダラト県の 1986 年、1994 年及び 2002 年夏期の降水量情報を参考にした (表 4 参照)。ダラト県の年平均が 350mm 程度であることを考えると、1994 年夏期は降水量が大きく、2002 年は平年並みの降雨であった。

図 5 退耕還草地の NDVI の分布状況

表 4 ダラト県降水データ (mm)

	7 月	8 月
1986 年	41.2	43.9
1994 年	159.7	167.9
2002 年	50.0	63.0

よって、2002 年の NDVI が大きかったのは降水量の影響ではなく、人工植草活動により退耕還草地の植生が回復していると判断できる。

6. 砂漠化地域のテクスチャ解析

砂漠化の進行状況を図 6 に示す。この地域では南部及び中部で砂漠化の進行が著しく、北部の黄河沿岸地区では変化がほとんど見られない。図 6 に示している S1、S2 は、開墾農地から砂地に变化したエリアと推定される。また、S はクブチ砂漠奥部の旧来からの砂地である。ここでは、砂漠化した土地の空間的特徴変化に着目し、TM、ETM+画像のテクスチャを抽出し、3 時期の土地被覆状況や土地形態との関係について検討する。

リモートセンシング画像判読においては、画像に表れる模様すなわちテクスチャ (texture) の認識によって多くの情報を得られることが知られている。ここでは、統計的なテクスチャ特徴の一つの計算法として、濃度共起行列 (grey level co-occurrence matrix) を用いる。濃度共起行列とは、画像内の濃度 i をもつ画素から一定の変位 $d=(r, \theta)$ だけ離れた画素の濃度値が j である確率 $P_s(i, j)$ を求めたものである⁷⁾。ここでは濃度共起行列から得られる 12 種類の特徴量のなかで、経験的に最も有効であった angular second moment (ASM, 角度別 2 次モーメント) の特徴量を選択し用いる。ASM はテクスチャの均一性を表す特徴であり、その値が大きいほど、テクスチャの均質性は高くなる。ASM 値は次の式から算出する。

$$ASM = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} \{P_s(i, j)\}^2 \quad (5)$$

本報では、まず水域、砂地、灌漑農地、草地、天水農地の代表的な五つのエリアに対し、ランドサット画像のテクスチャを抽出し、それぞれのエリアの土地被覆状況について比較検討を行う。図 7 に水域、砂地、灌漑農地、草地、天水農地の ASM の変化傾向を示す。水域、砂地は各植生域に比べて、高い均質性を持っており、水域と砂地の形態とよく対応している。植生域については、植物の分布密

図 6 1986 年~2002 年における砂地の変化

度によって、地表面のテクスチャ特徴すなわち均質性が違う。本研究の対象エリアにある天水農地はテクスチャの均一性が最も低いと見られる。これは内モンゴルの半乾燥地帯にある天水農地では農作物の密度が低く、植物と大きく露出している土壌が混在している状況に一致している。

図6に示すエリアS1, S2の土地被覆は、草地(1986年)→開墾地(天水農地, 1994年)→砂地(2002年)の段階で変化している。また、エリアSは旧来からの砂漠で、1986年から2002年の間も砂地のままである。式(5)によりエリアS, S1, S2のバンド毎のASM値を算出した。

図7 各土地被覆タイプのテクスチャ特徴

図8 砂漠化地域の各時期のテクスチャ特徴

図8に示すように各土地被覆カテゴリのASM値を比較すると、砂地エリアSのテクスチャの均質性が最もよいことは明確である。2002年のS1, S2のASM値は1986年、1994年に比べて大きくなり、砂漠奥部エリアSのテクスチャ特徴によく似ている傾向がみられる。即ちこの二箇所の土地状況は砂地になっていると考えられる。1994年の天水農地のASM値は最も小さいことから、砂漠周辺のほとんどの開墾地が管理不良と栽植密度の低さのため、植物と大きく露出している土壌が混在しており、いわゆる地表面被覆が不均一になっていることが分かった。

7. まとめ

本報では、ランドサットデータを用い、1986年、1994年及び2002年夏期の土地被覆図を作成した。また、現地の土地利用現状調査報告を参考にして内モンゴル黄河流域七郷の土地被覆変化と砂漠化の状況を解析した。その結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 灌漑農地が増加する一方で、砂漠化も進行していることが確かめられた。
- (2) スペクトルのバンド特性を解析することによって、植生域の植生変化傾向を推定した。2002年まで灌漑農地の生産量は高くなりつつあるが、天水農地の農作物の生育状況は悪くなってきていることが分かった。
- (3) ランドサットデータにより1994年～2002年における郷界別の天水農地の変遷情報を抽出するとともに、これと既存統計による退耕還草地データとの対応について検討し、砂漠化対策としての退耕還草活動の効果を検証した。さらに、植生指標NDVIを用いて2002年までの退耕還草地の植物の生育状況を調べ、植生が回復している状況を示した。
- (4) 砂漠化地域に推定したエリアに対し、ランドサット画像のテクスチャ指標を抽出し、それらのエリアにおける3時期の土地被覆形態が大きく変わったことを明らかにした。2002年の地表面のテクスチャ特徴は砂漠奥部エリアの特徴に似てきたことが分かり、砂漠周辺の開墾農地の砂漠化の実態を検証した。

参考文献

- 1) 立入 郁, 衣笠聡史: 偵察衛星CORONAのデータを用いた中国内蒙古自治区奈曼旗の砂漠化のモニタリング, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 39(5), pp4-13.
- 2) 秋山 侃, 川村健介: 内蒙古草原植生変化・土地劣化, システム農学 (J, JASS), 19(3), 2003 12
- 3) 国友淳子, 森本幸裕: リモートセンシングによる中国毛烏素沙地における植生量の定量評価と季節変動の解析, 第13回環境情報科学論文集, pp115-120, 1999
- 4) 巖 網林, 森本淳子, 吉田浩之: 中国内蒙古自治区コルチン砂地における砂漠化進行土地の景観生態的分析, 2002年度森基金助成報告書
- 5) オルドス土地管理局: 「オルドス地区土地資源調査・評価報告集」, P55-67, 2000
- 6) 内モンゴル航空リモートセンシング院: 「オルドス地区土地利用現状調査報告」, 1991
- 7) 高木幹雄ら: 「画像解析ハンドブック」, pp517-520, 東京大学出版会, 1991

(2004年10月10日原稿受理, 2005年2月4日採用決定)