

論説

中国タリム盆地北部における土壌環境変化の特徴抽出 －衛星データによる塩類集積土壌の時空間変化の解析－

阿依仙姑 瓦依提*・小池 克明*・石山 隆**

Characterization of Soil Environmental Changes in Northern Tarim Basin in China － Spatio-Temporal Variation Analyses of Salinized Soils Derived from Satellite Data －

Ayshamgul WAYIT*, Katsuaki KOIKE* and Takashi ISHIYAMA**

Abstract : Leakages from the soil waterway, improper irrigation, and incomplete drain system have raised the groundwater levels in arid areas and caused salinization, i.e. accumulation of salts in the top soils. Vulnerability of salinization is also controlled by topographic properties and soil conditions. This study focuses on a desert area in the northern Tarim Basin, northwest China, because the rapid progress of salinization has been reported. One main factor for the salinization in the study area is the excessive water supply in the agriculture lands. For clarifying the salinization process, 40 scenes of satellite imagery in total by Landsat TM/ETM+ (acquisition years: 1990 and 2000) and Terra/ASTER (acquisition years: 2003, 2004, and 2006) were selected. Three normalized difference indices on vegetation, soil, and water and a color composition of the indices were adopted to detect surface changes in the period from 1990 to 2006. As a result, the salinized soils were found to have extended in the downstream, and their area increased monotonously with the time while the area of fixed dunes decreased largely. We proposed a Salinity Index to extract correctly the salinized areas from the images by refereeing to the reflectance spectra of the soil samples. This Salinity Index clarified that the salinized soils have high salt concentrations over 30 ppt and the concentrations of the moving sands are also high. In addition, the high salinity accumulation in the downstream of farmlands was identified, which implied a strong effect of agricultural development on the salinization.

Key words : Desertification, Oasis, Salinization, ASTER image, Normalized difference indices

1. はじめに

地球の陸地面積の約3分の1が乾燥地域であり、これらは地球規模で雨の降りにくい中緯度高圧帯付近に主に分布する。その代表が世界で最も広いサハラ沙漠（アフリカ北部）である。沙漠は人為的な影響でも拡大し、植生に覆われた土地が沙漠へと変化する現象は沙漠化（desertification）と呼ばれる。この沙漠化現象はサハラ沙漠南部をはじめとして各地で生じており、土壌浸食や農業資源減少などの深刻な環境問題を引き起こしている（例えば市川, 1988）。

沙漠化による被害が世界的に最も大きい地域の1つとして、新疆ウイグル自治区南部のタクラマカン沙漠周辺（中国北西部）があげられ、広く注目されている（Qong and

Igarashi, 1999）。この地域での急速な沙漠化は、家畜の過放牧、樹木の過剰伐採、農地への不適切な灌漑による塩類集積などの人為的要因、および気候変動という自然的要因の重ね合わせによるが、主となる要因は場所によって異なる（Zhu and Wang, 1996）。沙漠化の要因や進行メカニズムを解明するためには、広範囲を同時に、かつ周期的に観測できる衛星リモートセンシングが最も有効な手段となる。その一例として、タクラマカン沙漠北部にあるオアシス周辺、およびタリム盆地下流域での長期にわたる植生変動を明らかにした石山ほか（2007）があげられる。これらの地域に対して、米国の偵察衛星CORONAによる1960年代の白黒画像、および代表的な地球観測衛星である Terra/ASTER

2009年11月30日受付, 2010年1月8日受理

* 熊本大学大学院自然科学研究科複合新領域科学専攻 New Frontier Sciences, Graduate School of Science & Technology, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto 860-8555, Japan. e-mail: koike@gpo.kumamoto-u.ac.jp

** 千葉大学環境リモートセンシング研究センター Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Inage, Chiba 263-8522, Japan. e-mail: berg@faculty.chiba-u.jp

や Landsat MSS・TM による約 30 年にわたる光学センサ画像を解析した結果、石山ほか (2007) は塩類集積が土地を荒廃させ、沙漠化を加速させていることを見出した。ゆえに、沙漠化という土壌環境の変化に対する最も支配的な要因は塩類集積であるといえる。

そこで、本研究では衛星リモートセンシングを用いて、塩類集積プロセスの地域性やメカニズムを明らかにすることを目的とし、塩類集積域の特定に適した衛星画像解析法を見出すとともに、その適用によって塩類集積域の経年変化の抽出を試みた。1990 年から 2006 年までを対象とし、タリム盆地周辺で農業生産高が最も高い地域であるタリム盆地北部を解析地域に選んだ (第 1 図)。また、土壌サンプルデータの反射スペクトル測定を行い、これをグラウンド・トゥールズデータとすることで画像解析による塩類集積域の推定精度の向上を図った。

石山ほか (2007) と同様に、本研究は ASTER, Landsat TM とその後継機である ETM+ による光学センサ画像を解析に用いた。Landsat TM は 1984 年、ASTER は 1999 年に観測を開始し、それ以降全球にわたって多時期の画像データが蓄積されており、塩類集積の経年変化の抽出に適している。また、これらのセンサは可視域から短波長赤外域の波長範囲に複数のバンド (観測波長帯: パンクロマチックモードを除いて Landsat 系は 6 つ、ASTER は 9 つのバンド) を有し、空間分解能も 30 m (ASTER のバンド 1, 2, 3 は 15 m) と高いので、反射スペクトルの形状から土壌の塩類集積の程度を推定するのに有効であると考えられる。塩類鉱物の反射スペクトル特性を考慮し、バンド間演算、主成

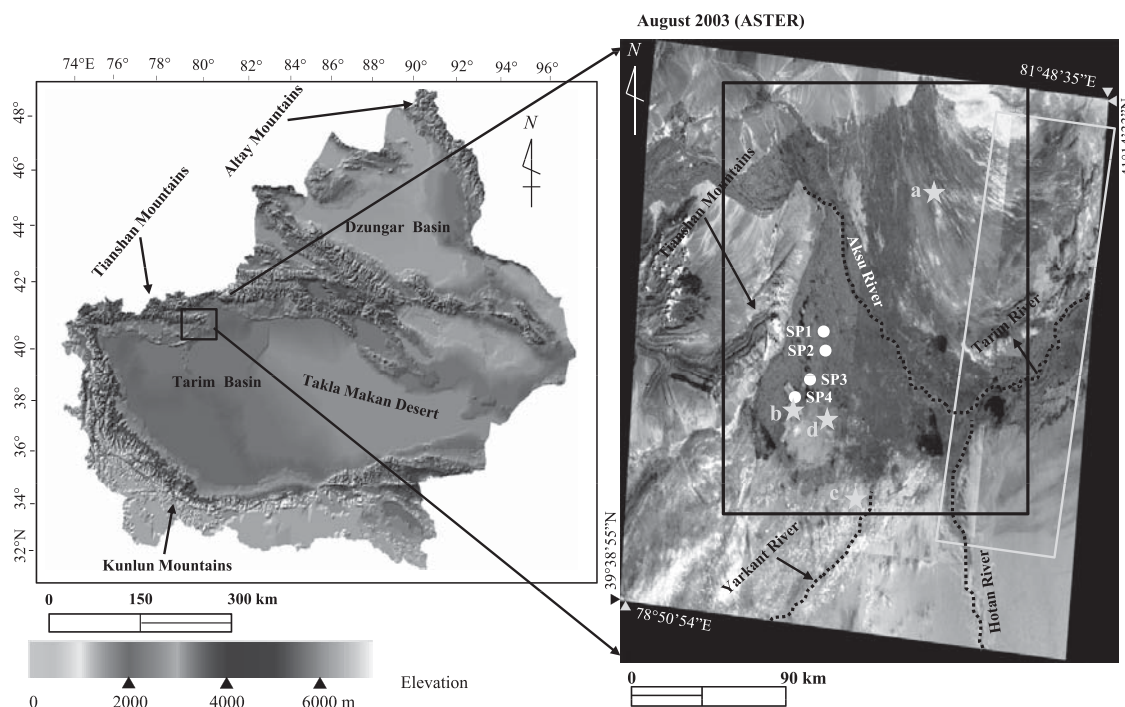
分分析、画像分類などの画像処理法によって Landsat や ASTER 画像から塩類集積域を抽出した例として、Dwivedi and Sreenivas (1998), Farifteh *et al.* (2006), Masoud and Koike (2006), Gao and Liu (2008) があげられる。

2. 対象地域と衛星画像データ

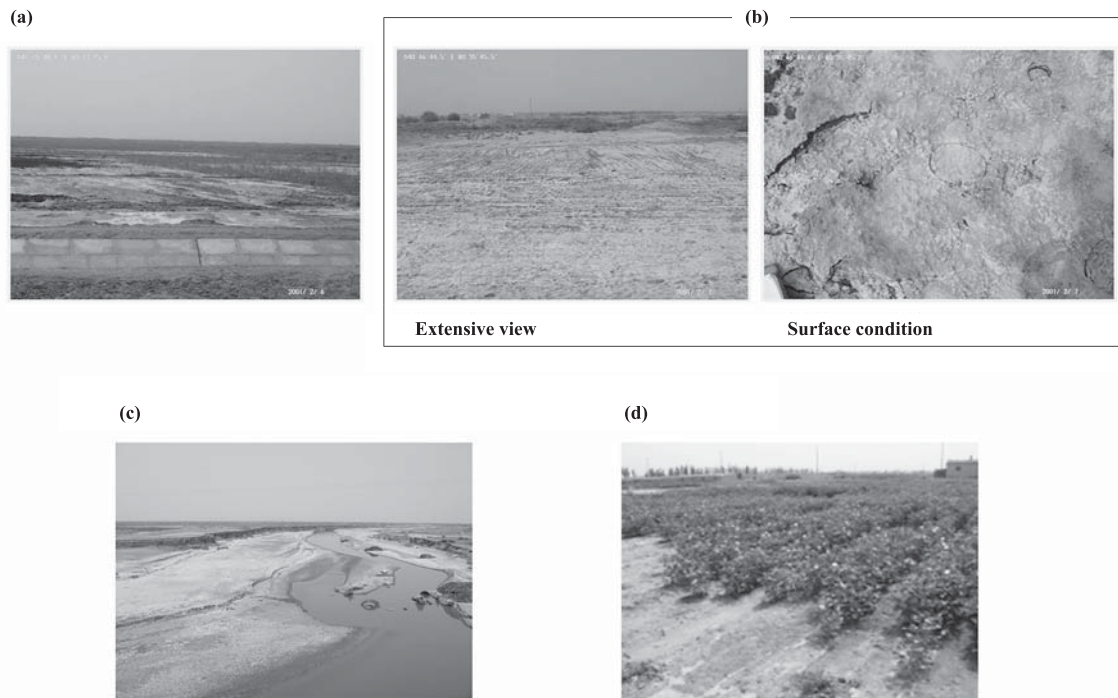
2.1 対象地域の地理概要

タリム盆地は中国最大の内陸盆地であり、中央には流動砂に分類される面積 33.76 万 km^2 のタクラマカン沙漠を含む (阿布都沙拉木・長澤, 2003)。解析対象地域は東経 $79^\circ 39' \sim 81^\circ 51'$ ・北緯 $40^\circ 6' \sim 41^\circ 33'$ の範囲に分布し、東西・南北方向ともに 200 km 程度の大きさである (第 1 図)。対象地域内にはタリム盆地での主流河川であるアクス川、ヤルカント川、ホタン川が流れ、これらは領域東端のタリム川付近で合流する。2007 年の時点で沙漠化した土地の面積は、新疆ウイグル自治区で 79.6 万 km^2 であり、これは自治区総面積の 48% にも相当し、中国全体での沙漠地面積の 30% も占める (Jiangli and Tiyp, 2007)。沙漠化と塩類集積などによる放棄耕地面積は、2006 年には 1.4 万 km^2 に達しており (Abudoureyimu *et al.*, 2008)、塩害化対策は緊急の課題となっている。

対象地域の北西には天山山脈が走り、アクス川、ホタン川、タリム川はそれを水源とする。天山山脈からの豊富な伏流水に恵まれ、アクス川の平均水量は年間 75 億 m^3 で、タリム盆地で最大の水量である (Wang, 1999)。また、アクス川周辺は最大のオアシスとなっており、灌漑面積は 3600 km^2 と広い。タリム川北部のオアシス周辺では大規模な



第 1 図 研究対象地域 (左) とモザイク処理した Terra/ASTER のフォールスカラー画像 (右: 第 1 表に示す 6 ~ 8 月の夏季の画像)。右図で中央の枠は第 6 図の Landsat 画像の範囲、その東部の枠は第 4 図の ASTER 画像の範囲、および SP1 ~ 4 は地表近くの土壌の採取地点を表す。また、a, b, c, d を付けた★は第 2 図に示す写真の撮影場所を表し、SP4 と d は同じ場所である。



第2図 (a) 塩類集積により放棄された農作地, (b) 典型的な塩類集積土壌, (c) 河川の下流域における二次的な塩類集積, および (d) 過剰な水供給により農地で生じる塩類集積の写真. 各写真の撮影場所は第1図参照.

農業開発に伴い, 土地の環境も急速に変化し, 特に塩類の上昇によって放棄された農地 (第2図(a), (b)参照) は200 km²に達している. このうち25%が過度の農地開墾, 8.3%が水資源の不適切な利用に起因する (黄, 2003).

対象地域は降雨量が極めて少ないため, 土壌中の塩類は容易には溶脱しない. 溶脱したとしても微量なので, 塩類が土壌中に大量に蓄積する. この塩類を河川水で溶解することにより, 例えばタリム川の塩分濃度が増加し, 第2図(c)のように河川周辺では特に塩害化が進行して植物が枯れ, 急速な土地荒廃を引き起こしている.

2.2 塩害化の一般的な原因

塩害化とは, 地下水中に溶解していた塩類が表土に集積する現象であり, 乾燥・半乾燥地域における灌漑農業によって引き起こされることが多い. UNEP (United Nations Environment Programme, 2002) によれば, 世界の乾燥地帯で灌漑耕地の面積は急増しており, 2002年の時点で255万 km²に達し, その4割が塩害化を被っている.

一般に塩類の起源は主に海成堆積岩にあり, その風化によって地表に塩類が晶出し, 雨水に溶解して低所に運ばれる. 灌漑農業では農作物が枯死しないように, 農作物が吸収する以上の水量を与える必要がある. この過剰な水は地下に浸透し, 徐々に地下水位が上昇する. さらに毛細管現象によって土壌水が地表面まで上昇し, 蒸発するので, 第2図(d)のように地表や表土層に塩類が集積して農作物に被害を与える. 特に, 不透水層に挟まれた被圧地下水には多量の塩類が含まれていることが多いため, 被圧地下水を使用した灌漑農業では短期間で塩類が蓄積する傾向にある

(伊東ほか, 2007).

タリム盆地北部における胡楊林を対象として, 塩害化した土壌中の塩分の垂直分布を調査した結果, 地表から30 cm程度まで塩類が濃集し, 胡楊林の根の深さとほぼ同じであることがわかった (山本ほか, 2007). 胡楊 (コトカケヤナギ: *Populus euphratica*) とはヤナギ科の落葉高木であり, 新疆ウイグル自治区を主要な自生地とし, 熱や大気の乾燥, 塩, 強風への耐性が強い (山中, 2005). また, 対象地域周辺の土壌塩類は塩化ナトリウム, 硫酸ナトリウム, 硫酸カルシウム, 硫酸マグネシウムを主な構成物質とする (Abudoureyimu *et al.*, 2008). これらの水への溶解度は異なるので, 塩類物質の構成割合に塩類集積の深度範囲が支配される (伊東ほか, 2009).

2.3 解析に用いた衛星データ

ASTER, Landsat TM/ETM+ の1シーンはそれぞれ60 × 60 km², 185 km × 185 km²である. 特に沙漠化が著しい領域 (第1図の東側の枠) には, Landsat よりも空間分解能が高いバンドを有する ASTER データを用いた. 解析に用いたシー数は ASTER が32, Landsat が8である (第1表). 対象地域全体に対しては, ASTER は (パス146・147, ロウ31・32・33) の9シーン (2003年) と11シーン (2006年), Landsat は (パス146・147, ロウ31・32) の4シーンをモザイク処理した. これらの画像は雲量が10%以下で, それぞれの観測日が近いという条件で選んだ. パス・ロウで定義されるシーンの位置は観測日によって多少変化する. ASTER のパス数×ロウ数と対象地域全体でのシー数が一致しないのは, 同一のパス・ロウで観測日が異なる

第1表 解析に用いた ASTER と Landsat TM/ETM+ 画像データの撮影日とパス・ロウ、およびモザイク画像の図番号。右端欄の数値は各モザイク画像に対する式(3)中の δ の値を表す。

Sensor	Observation date	Path/Row	δ
Landsat 5/TM	6 August 1990	146/31	0.5
	10 September 1990	147/31	
	5 October 1990	147/32	
	25 October 1990	146/32	
Landsat 7/ETM+	5 August 2000	146/31	0.6
	13 September 2000	147/31, 147/32	
	8 October 2000	146/32	
Terra/ASTER	8 July 2003	147/31, 147/32, 147/33	0.7
	28 June 2003	146/31, 146/32, 146/33	
	14 August 2003	147/31, 147/32, 147/33	
Terra/ASTER	26 April 2004	146/31, 146/32, 146/33	0.5
	13 June 2004	146/31, 146/32, 146/33	0.7
	31 July 2004	146/31, 146/32, 146/33	0.7
	1 September 2004	146/31, 146/32, 146/33	0.7
Terra/ASTER	5 July 2006	147/31, 147/32, 147/33	0.7
	29 August 2006	146/31, 146/32, 147/31, 147/32, 147/33	
	1 September 2006	146/31, 146/32, 146/33	

るシーンをモザイク処理したことによる。処理の結果によるモザイク画像(後述)の図番号を第1表で示す。

ASTER データは2003年、2004年、2006年の4月から9月にかけて、Landsat データは1990年と2000年の8月から10月にかけて観測されたものである。観測時期を暖候期に限定した理由は、地表面への塩類の集積、および降水量や気温などの気象の影響で、この時期に沙漠化が最も進行するためである。対象地域では120mm程度の年間降水量であるが、その多くは4月から9月にかけての降水であり、他の月の降水量はゼロに近い。そのため植生の状態の季節変化は大きい。ほぼ同じ時期の変化を観測年で比較することで、植生の季節変化の影響を軽減しながら、塩類集積の進行過程を明瞭にすることが期待できる。

3. データ解析法

衛星データから塩類集積土壌の分布域と表土の塩分濃度を推定するための解析の流れをフローチャートとして第3図に示す。

3.1 衛星データの前処理

光学センサでは、地球への入力電磁波に対する地表からの反射エネルギーと大気に起因した散乱放射エネルギー(パストラジアン)の合計が計測される。よって、衛星画像データから地表物質の反射率を正確に求めるためには、パストラジアンをデータから差し引くという大気補正が不可欠となる。これまで多くの大気補正法が提案されているが、その中でも中緯度の地域に対して補正精度が高いことが実証されている MODTRAN (MODerate resolution TRANsmittance : Berk *et al.*, 1999) を用いた。MODTRAN

では緯度や季節に応じた気象モデルとエアロゾルの種類が定義されており、幅広い波長にわたって放射伝達を計算することができる。

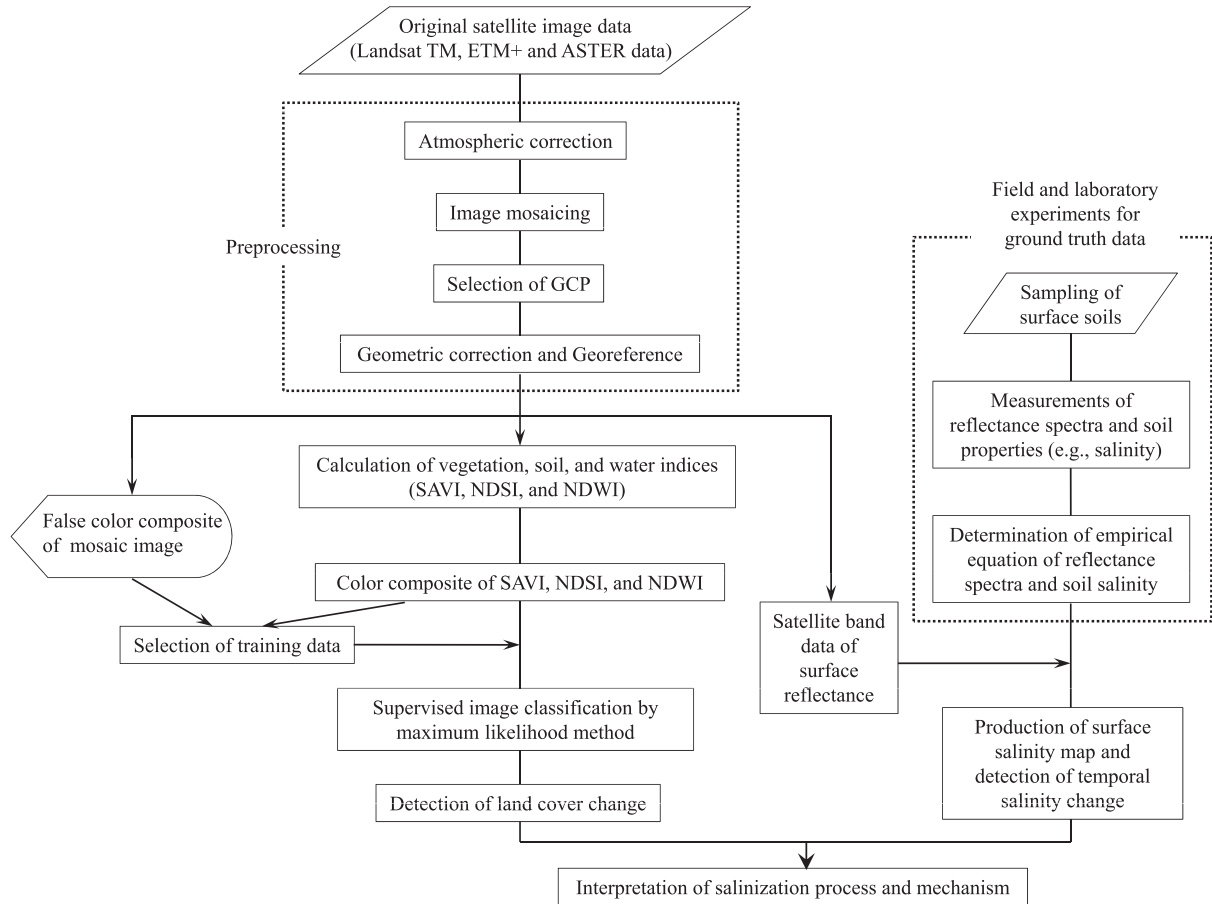
放射伝達モデルによれば、センサで観測される放射輝度 L (見掛けの単位面積から単位立体角、単位時間あたりに放射されるエネルギー、単位は $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)は次式で表される。

$$L = \frac{F_d T_v}{\pi(1 - \rho_e S)} \rho + L_a \quad (1)$$

ここで、 ρ : 表面反射率、 ρ_e : 対象画素近傍の平均表面反射率、 S : 大気の球面反射率、 L_a : 大気のパストラジアン、 F_d : 表面での放射照度、 T_v : 電磁波の大気透過率である。 S はMODTRANでの放射伝達モデルに、太陽天頂角、センサーの平均高度、鉛直積分した単位面積での水蒸気量(g/cm^2)、地表温度などの観測条件を当てはめることで決定される。

次に、ASTER データ、Landsat データのそれぞれに対するモザイク処理により、同じ大きさ($200\text{km} \times 200\text{km}$)の画像を作成した。観測日が異なるシーンをモザイク処理するとシーンの接合部が明瞭に現れてしまうので、接合部をぼやかすエッジフェザリング処理を行った。この処理は画像のエッジに沿って接合部をフェージョンする方法であり、エッジフェザリング距離として画像境界から25画素を指定した。この範囲で隣り合う2つの画像の表面反射率が同じになるように、エッジフェザリング距離の両端の反射率を線分で繋ぎ、その間の反射率を線形補間によって与えた。

処理の結果、ASTERは6つ、Landsatは2つの時期の異



第3図 衛星データ解析のフローチャート。

なるモザイク画像を得た。さらに、モザイク画像の座標を共通にするために、すなわち各画素の緯度・経度がすべてのモザイク画像で同じとなるように、GCP (Ground Control Point) を30点選んで幾何補正を行った。選定に当たってはGCPの位置の偏りが無いことに留意した。ここで1990年のLandsat TMモザイク画像を位置合わせの基準においた。この座標の共通化によって、後述する土地被覆状態と塩類集積域の季節変化・経年変化の抽出、および地表塩分濃度の分布の推定が可能になった。

3.2 衛星データによる植生、土壌、含水指数

対象地域内で植生に覆われる部分の面積は少なく、塩類が集積された裸地の面積は広い。裸地は含水の大きさによって固定沙漠と流動沙漠とに分類できる。すなわち、沙漠化の状態を明らかにするには、衛星画像データの反射スペクトル情報から、植生の活性度、表土の性質（塩類集積による表土の白色化、あるいは砂質、シルト質などの表土の種類）、および土壌の含水の程度という3つの指標を算定することが重要となる。以下にこれらの指標の算定法について述べる。

植生の活性度を表す指標としては正規化植生指数NDVI (Normalized Difference Vegetation Index: Rouse *et al.*, 1974) が最も基本的であり、広く適用されている。NDVIは植物

のクロロフィルが可視域赤の電磁波を選択的に吸収し、葉の細胞構造による電磁波の体積散乱が近赤外域で大きく、植物の生理活性状態が高いほどこれらの吸収と反射が大きいという原理に基づいている。電磁波の吸収が大きいほど反射率は小さくなる。すなわち、NDVIは次式により、近赤外域での反射率 ρ_{NIR} と可視域赤での反射率 ρ_{RED} との差を計算する。

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}} \quad (2)$$

以下 ρ_{RED} 、 ρ_{NIR} などの反射率の基準になる波長帯に対応するASTERとLandsatのバンドを第2表にまとめる。

植生が密な場合には1つの画素全体を植生が占めるのでNDVIは有効である。しかし、植生が疎な乾燥地域の場合には、画素単位の反射率は植生のみ起因するのではなく、表土からの反射の割合が多くなる。これを考慮するために、Huete (1988) はSAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) を提案した。

$$\text{SAVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}} + \delta} (1 + \delta) \quad (3)$$

ここで、 δ は植生の被覆割合に応じて決められる補正值であり、乾燥地域に対して δ は0.5が適切であると報告され

第2表 式(2)～(5)の指標に用いた ASTER と Landsat のバンドと波長域. ρ_{GRN} などは式中の反射率の記号を表す.

Electromagnetic spectrum	Visible green	Visible red	Near infrared	Shortwave infrared	
				about 1.4 μm	about 1.6 μm
Symbol of reflectance	ρ_{GRN}	ρ_{RED}	ρ_{NIR}	ρ_{IRH}	ρ_{IRS}
ASTER	Band 1 (0.52 - 0.60 μm)	Band 2 (0.63 - 0.69 μm)	Band 3 (0.76 - 0.86 μm)	Band 4 (1.60 - 1.70 μm)	Band 4 (1.60 - 1.70 μm)
Landsat TM, ETM+	Band 2 (0.52 - 0.60 μm)	Band 3 (0.63 - 0.69 μm)	Band 4 (0.75 - 0.90 μm)	Band 5 (1.55 - 1.75 μm)	Band 5 (1.55 - 1.75 μm)

ている (Ishiyama *et al.*, 1996). 本研究では, 観測時期の植生や表土からの反射率を考慮して, 0.5 ~ 0.7 の範囲で δ を与えた. 各モザイク画像に対する δ の値を第1表に示す. SAVI は, ρ_{RED} と ρ_{NIR} を2つの軸とする直交座標系において, ρ_{RED} 軸, ρ_{NIR} 軸ともに原点を $\delta/2$ だけ平行移動することで, 植生の背景となる表土からの反射率の影響を軽減させる手法である (ERSDAC, 2003). SAVI と基本形は同じであるが, 補正項を発展させた MSAVI (Modified SAVI : Qi *et al.*, 1994), TSAVI (Transformed SAVI : Baret and Guyot, 1991) などの植生指数も提案されている. しかし, 補正項のパラメータの設定にさらに仮定が必要となる. これに加えて, 乾燥地域では δ の値の影響は小さいことが報告されているので (Ishiyama *et al.*, 1996), 本研究では簡便な SAVI を用いた.

表土の性質に関する指標としては, Faraklioti *et al.* (2001) が考案した正規化土壌指数 (NDSI : Normalized Difference Soil Index) が利用できる. これは一般に, 土の反射率は可視域で最も低く, 近赤外域で増加し, 1.6 μm 付近の短波長赤外域で最大になるという性質に基づく. そこで, 1.6 μm 付近の短波長赤外域での反射率 ρ_{IRS} と近赤外域での反射率 ρ_{NIR} との差に注目すれば, この差が大きいほど地表物質は土 (すなわち裸地) の可能性が高いことになる. NDSI は次式で計算される.

$$\text{NDSI} = \frac{\rho_{\text{IRS}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{IRS}} + \rho_{\text{NIR}}} \quad (4)$$

さらに, 表土の含水の大小に関する指標としては, Gao (1996) による正規化水指数 (NDWI: Normalized Difference Water Index) を用いた. これは水や雪の反射率は可視域で最大値を持ち, それから近赤外域・短波長赤外域にかけて減少するという性質に基づく. 反射率の最大値と最小値の差を強調するために, 可視域緑での反射率 ρ_{GRN} , および水分子による電磁波の吸収帯が存在する 1.4 μm 付近の短波長赤外域での反射率 ρ_{IRH} との差を次式で計算する.

$$\text{NDWI} = \frac{\rho_{\text{GRN}} - \rho_{\text{IRH}}}{\rho_{\text{GRN}} + \rho_{\text{IRH}}} \quad (5)$$

ASTER と Landsat は, とともに 1.4 μm 付近のバンドはなく,

それに最も近いバンドでの反射率を ρ_{IRH} として用いた.

以上の3つの指標 SAVI, NDSI, NDWI をまとめて, 竹内・安岡 (2003) のように NDXI と称する. NDXI により多角的な視点から土地被覆状態の解釈が可能となる.

3.3 土壌サンプルデータ

衛星データから塩類集積地を特定するためのグラウンド・トゥールースデータとして, アクス川西部の4地点 (第1図参照) で土壌サンプリングを実施した. 採取地点は塩類集積が確認できた土壌であり, 地表から 1.2cm までの表土を採取した. 本研究で重視する夏季での沙漠化状況に合わせ, 採取日は2006年8月2日・3日である. 採取後はサンプルが乾燥しないことに留意して保存した. 採取地点 S4 は第2図(b)の写真に含まれ, S3 の地表状況も(b)と類似する. S1 と S2 の地表は第2図(d)に示す状況に対応している.

サンプルの可視域から短波長赤外域 (0.4 μm ~ 2.5 μm) における分光反射率は, 室内にて分光光度計 (Shimadzu SolidSpec-3700) を用いて測定した. ここで同一地点からのサンプルを4つに分け, それぞれを大きさ 4ml の石英セルに詰めて測定を行った. これはサンプルの選び方によって生じるバイアスが小さくし, より正確な分光反射率データを得るためである. 16回の測定結果の平均値を各地点での分光反射率として表す. 分光反射率の測定後, サンプル重量の4倍の水を加えて水溶液を作成し, 塩分濃度 (単位は ppt) と pH を測定した. 各サンプルの塩分濃度と pH の測定結果を第3表に示す.

4. 解析結果

4.1 NDXI による地表被覆物の状態の季節変化

対象地域の河川付近には植生が分布し, その分布域と植物の生理活性状態には季節的な周期変動が生じる. また, 農業生産に伴う土地利用形態や表土の性質 (含水比, 塩分濃度など) も季節的に変化する. 塩類集積・沙漠化の進行状況を明らかにするためには, 植生の季節変化の影響を考慮することが必要となる. そこで, 第1表に示す2004年4, 6, 7, 9月という4時期の ASTER 画像データを用いて, NDXI を算定した. 各時期のフォールスカラー合成画像と NDXI 画像を第4図に表す. カラー合成画像では3原色の

第3表 土壌サンプルデータの塩分濃度と pH の測定結果.

Site	Sampling date	Salinity (ppt)	pH
SP1	2 August 2006	13.6	9.1
SP2	2 August 2006	21.9	8.7
SP3	3 August 2006	29.9	8.8
SP4	3 August 2006	39.4	9.3

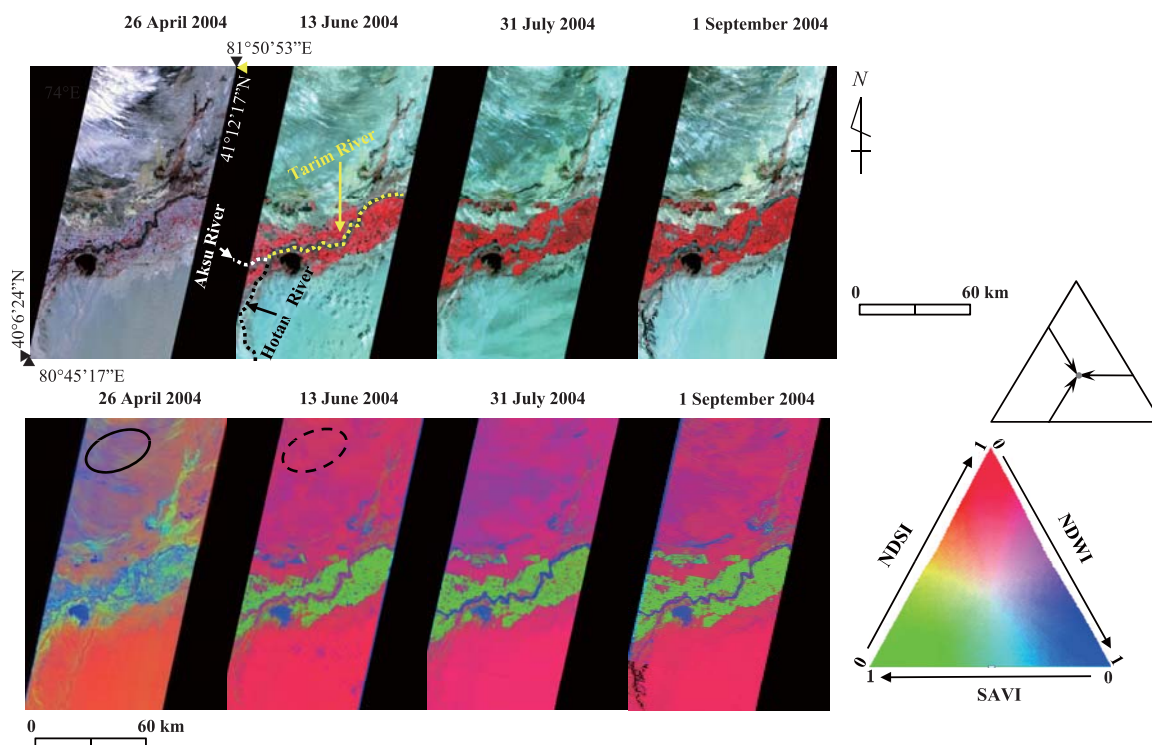
R, G, B にそれぞれバンド 3, 2, 1 を割り当てた. NDXI 画像とは本研究が提案するものであり, 前述の SAVI, NDSI, NDWI という 3 指標間の大小関係を同時に表すために, それぞれを G, R, B に割り当てた. これにより, 第4図中の 3 角ダイアグラムによるカラー凡例が示すように, 植生が密で植物の生理活性状態が高いほど緑色系, 乾燥した裸地ほど赤色系, 地表被覆物の含水が高いほど青色系の画像となる. すなわち, NDXI 画像では河川・湖沼の水域が青や水色, 植生域と農地が緑や黄色, 植生に乏しい砂質・礫質の砂丘が赤や赤紫色で表される. 塩類集積の土壌は, 地下水が地表面近くまで上昇しているの, 砂に比べれば含水比は高い. ここから対象地域では赤と青の混合色である紫色の箇所が塩類集積土壌を表していると考えられる.

フォールスカラー合成画像のみからでは地表被覆物の状態の変化を抽出することは困難であるが, NDXI 画像によれば以下のような重要な季節変化が見出せるようになる. 比較的降雨が多い4月はカラーコードのばらつきが大きく,

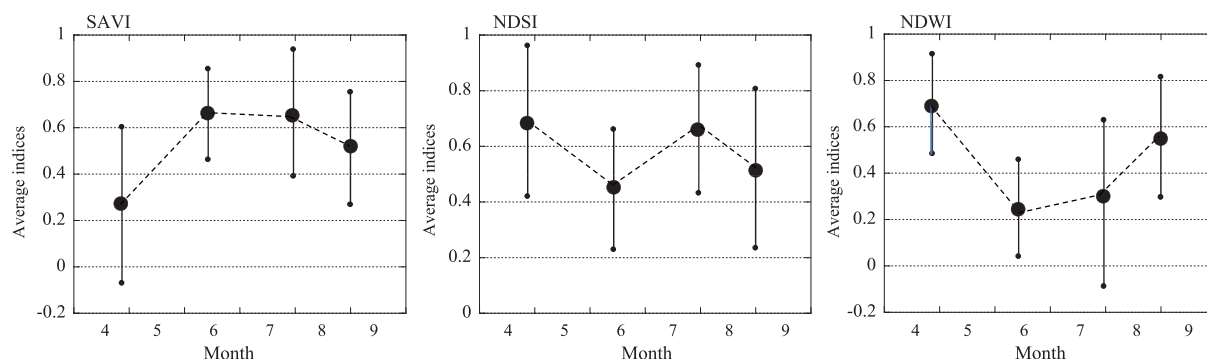
タリム川周辺の幅 30km にわたって所々が浸水している様子がわかる. 他の時期に比べて全体的に地表の含水比が高く, 言い換えれば相対的に NDWI が高いことが, 他の時期では赤紫色で表されて裸地とみなせる領域が橙色であり, アクス川東部で青色系が強いという特徴から推察できる (第4図のカラー凡例参照). 6月以降の NDXI 画像からは緑色の領域の変化が小さいことから, 植生域・農地の分布域, および植生の活性度がほぼ一定になる地域であると考えられる. 最も重要な特徴はタリム川北部で塩類集積土壌 (紫色) が現れることであり, 7月が最も顕著な分布を示し, 面積が広い. すなわち, 気温の増加によって地表まで地下水が上昇し, 塩類が集積されるプロセスが NDXI 画像から読み取れる. 7月よりも気温が低下する9月では, 紫色が弱くなるので塩類集積土壌の含水比も減少するようである. これは, 表層が乾燥して塩分が固結する現象を意味する.

画像全体での SAVI, NDSI, NDWI の平均値と標準偏差を表すと第5図のようになる. 標準偏差が示すように値のちらばりは大きい, 平均値に注目すれば6, 7月で植生の生理活性状態がほぼ等しく含水比が低いこと, および塩分の固結により9月で植生の生理活性状態が低下することがわかり, 上記の特徴が確かめられる.

以上をまとめると, 比較的降雨が多い時期では塩類集積土壌が雨水と混合するので塩類集積土壌の分布域は特定できないが, 乾期 (夏季) になれば植生の分布域・生理活性状態の時間的変化は小さくなり, 塩類集積土壌の分布が顕



第4図 2004年における4時期のASTERのフォールスカラー画像 (上段) と NDXI 画像 (下段). フォールスカラー画像での色とバンドとの対応は, R : 3, G : 2, B : 1 である. NDXI 画像とは3角ダイアグラムが示すように SAVI, NDSI, NDWI の3指標のカラー合成であり, それぞれを G, R, B に割り当てている. 4月と6月の NDXI 画像において相対的に土壌水分が多い, 少ないと推定される区域をそれぞれ実線, 破線で囲んでいる.



第5図 ASTER データによる4時期（第4図）のSAVI, NDSI, NDWIの平均値（●で表示）と標準偏差（細線）。

著になる。そのため、6～9月の夏季の衛星画像を用いれば、塩類集積の経年変化、広義的には沙漠化の進行を適切に把握できることが明らかになった。

4.2 塩類集積域の経年変化抽出

対象地域全体の Landsat (1990 年と 2000 年) と ASTER (2003 年と 2006 年) のモザイク処理・フォールスカラー合成画像（第6図）、および NDXI 画像（第7図）を用いて、16 年間にわたる塩類集積土壌の分布域の変化を明らかにした。ASTER 画像データのカラー合成に対するバンドと色の組み合わせは第4図と同じである。ASTER 画像と色調を合わせるために、Landsat 合成画像では R, G, B にそれぞれバンド 4, 3, 2 の反射率データを割り当てた。

前述のように塩類集積土壌は NDXI 画像では紫色で表現される。赤色系で表示される対象地域の砂丘は、含水の程度に応じて固定砂丘と流動砂丘とに分類される（伊東ほか, 2007）。固定砂丘は植被率が 35～40% の砂丘と定義され、相対的に植生が生長しているので、飛砂が少なく、砂の移動は生じない。一方、流動砂での植被率は 20% 以下と低く、植物は疎らであり、強風により砂丘が風下側へ移動する（相馬, 1996）。そのため、流動砂の方が沙漠化を急速に拡大させる因子である。しかしながら、これらの砂丘の反射スペクトルは類似しているので、NDXI 画像からでは区別できない。

そこで、NDXI 画像から塩類集積土壌、固定砂丘、流動砂の分布域を抽出するために、代表的な教師付き画像分類法である最尤法を適用した。これらの分布域に植生域・農地と水域を加え、5つの土地被覆物カテゴリーを分類対象とした。各カテゴリーに対するトレーニングデータは、伊東ほか（2009）による現地調査結果とフォールスカラー合成画像を参照して設定した。2000 年 Landsat ETM+ データを例に取り、トレーニングデータの位置を第6図に重ねる。ASTER のバンド 1～9 ($0.52 \sim 2.43 \mu\text{m}$ の可視域から短波長赤外域にかけての波長範囲) におけるトレーニングデータの平均反射率を第8図に示す。これから、固定砂丘はほぼ平坦な反射率パターンを示すが、流動砂は可視域よりも赤外域の方が反射率が高いこと、および砂丘と塩類集積土壌の反射率はバンド 1～3 の可視・近赤外域で異なること

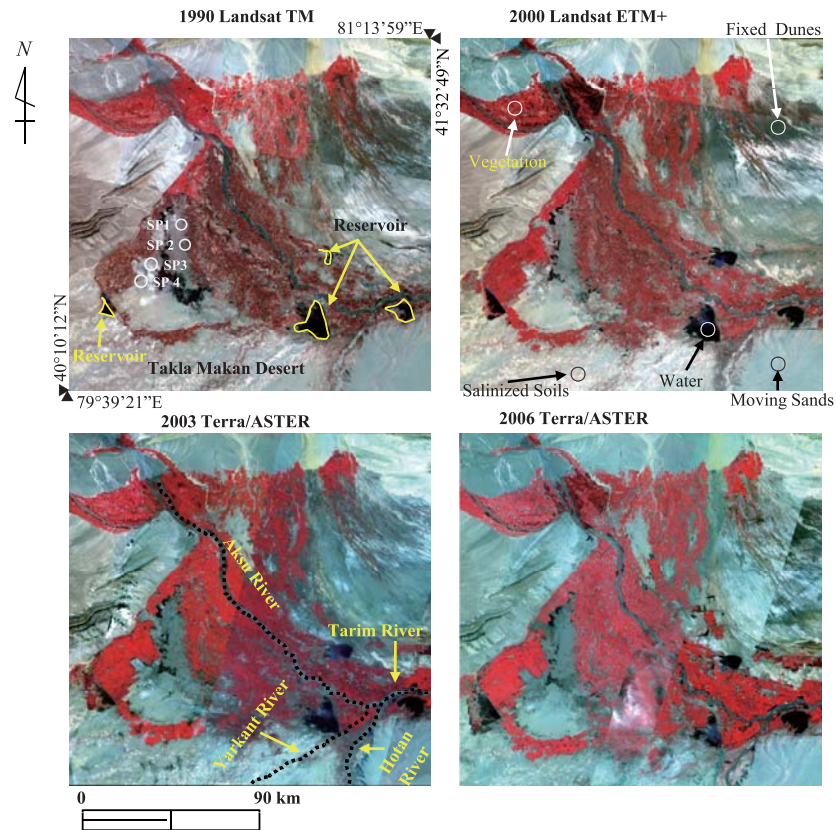
がわかる。このような反射率パターンの相違があるので、5つのカテゴリーの分布域が ASTER 画像から分類できるといえる。

次に画像分類結果を第9図に表す。農業開発に伴ってアクス川の北西部が農地に転用され、植生域・農地が増加していることがわかる。その傾向が顕著な部分を図中に楕円で囲む。一方、ダム建設や過剰な用水の影響で下流域では断流が発生し、2003 年と 2006 年ではホタン川とヤルカント川の水量が極端に減少している（Abudoureyimu *et al.*, 2008）。この水量減少は河川周辺の生態系に悪影響を及ぼし、2003 年と 2006 年では塩類集積域が拡大していることが見出せる。図中の四角は特に拡大した部分を示す。5つのカテゴリーの中では、流動砂の分布域の変化は比較的小さい。

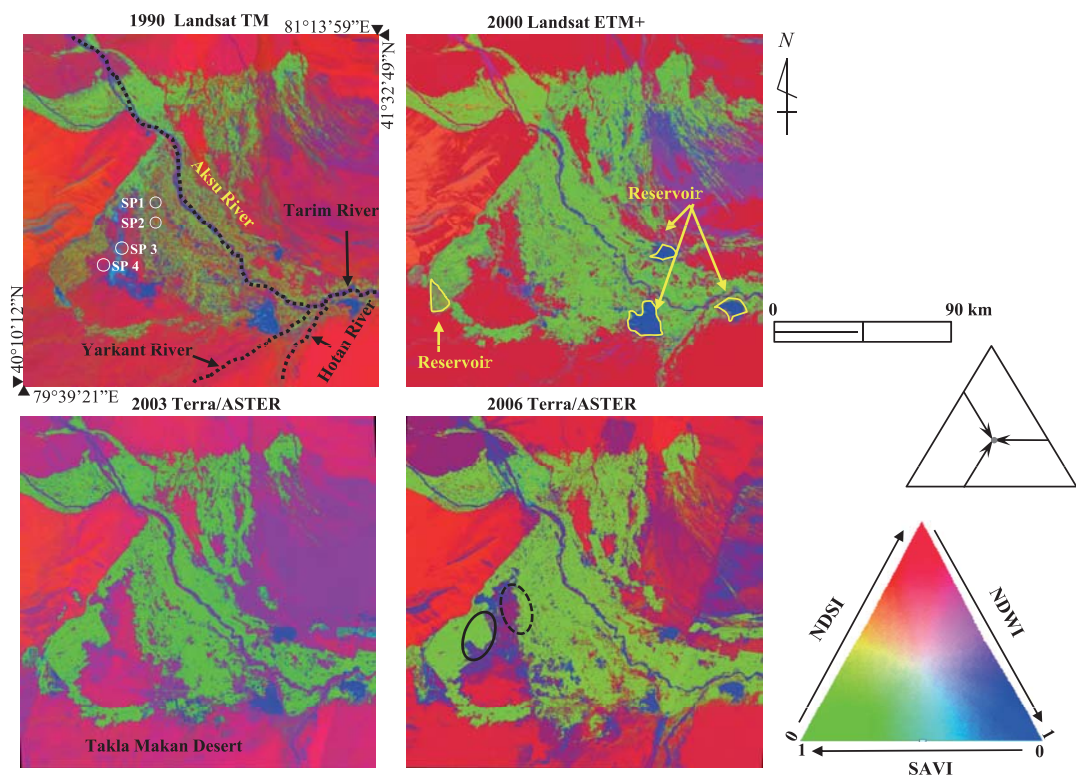
さらに、分類結果から5つのカテゴリーの分布面積を求め、第10図のように経年変化を表した。最も変化が大きいのは固定砂丘であり、面積が半減していることがわかる。植生域・農地は単調に増加し、流動砂は 30% ほど減少している。塩類集積土壌は植生域とほぼ同様の増加傾向にあり、これらの面積に大差ないことも特徴的である。図より塩類集積土壌は 16 年間で最大 1.6 倍になったことが明らかである。

4.3 表土の塩分濃度の推定

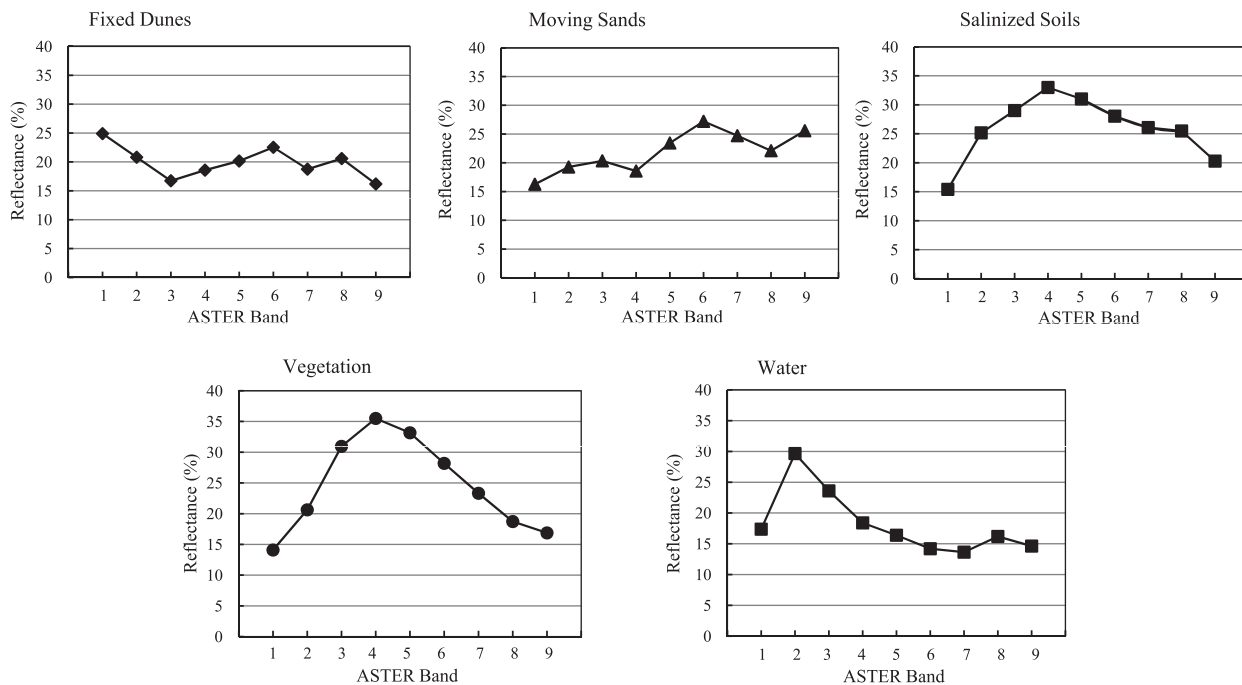
4 地点からの土壌サンプルに対して得られた反射スペクトルの平均を第11図に示す。SP1 以外は $1.9 \mu\text{m}$ で反射率の急減が現れているが、これは水分子の 1 つの酸素原子を共有する 2 つの水酸基 (O-H) の非対称伸縮と曲げに起因した吸収である。吸収の程度は、含水比、あるいは土壌の構成鉱物に関連すると考えられる。すなわち、含水比が高いほど、およびモンモリロナイトなどの水分子を有する粘土鉱物の含有量が多いほど $1.9 \mu\text{m}$ での反射率は低下する。これらの反射スペクトルデータをグラウンド・トゥールズデータとし、衛星画像データによる反射率と組み合わせることで、塩分濃度の空間分布とその経年変化の把握を試みた。検討には、サンプル地点を含み、サンプル日と画像取得日が最も近い ASTER データ（取得日 2006 年 7 月 5 日：第1表参照）を用いた。なお、同一地点からのサンプルデ



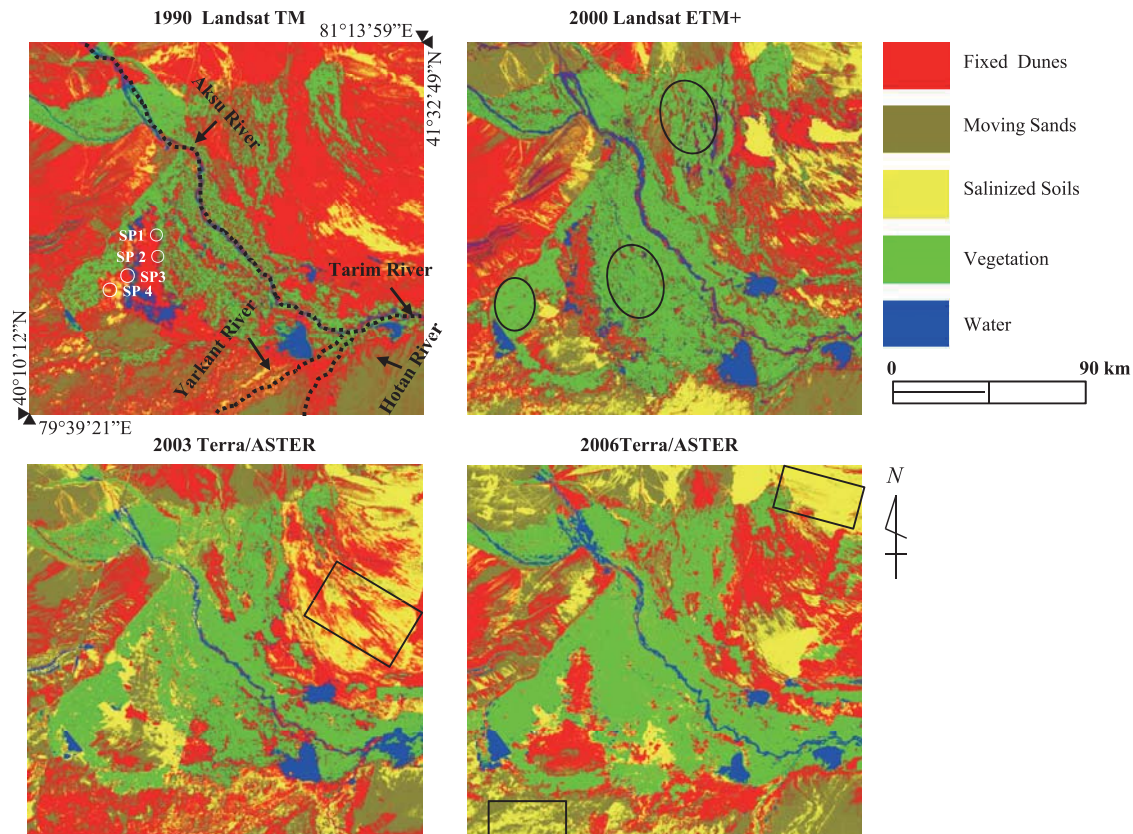
第6図 モザイク処理したLandsat TM/ETM+（1990年と2000年）とASTER（2003年と2006年）によるフォールスカラー画像。Landsat フォールスカラー画像での色とバンドとの対応は、R：4，G：3，B：2である。Landsat ETM+画像上の○は、NDXI画像の分類処理において5つのカテゴリーに対するトレーニングデータの位置を表す。



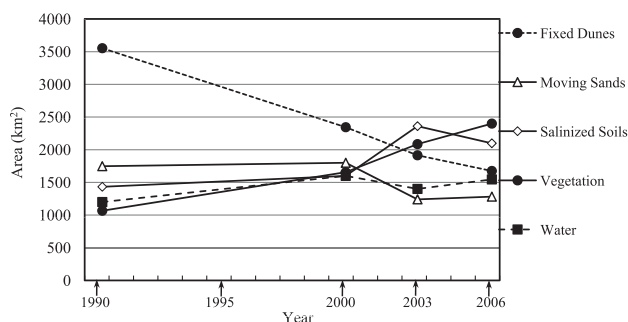
第7図 Landsat TM/ETM+とASTERのモザイク画像（第6図）から得られたNDVI画像。これらの衛星画像に共通して紫色の箇所が塩類集積土壌に対応する。4つの貯水池の位置を矢印で示す。相対的に土壌水分が多い、少ないと推定される区域をそれぞれ実線、破線で囲んでいる。



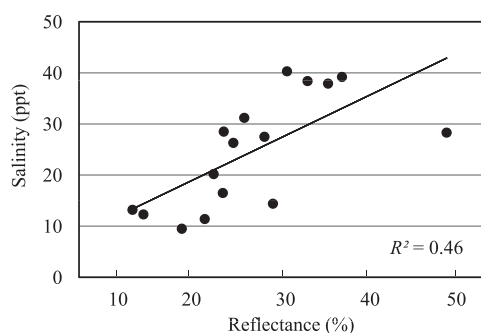
第8図 NDXI 画像（第7図）の最尤法による分類処理において、各カテゴリで選んだトレーニングデータの平均反射スペクトル、ASTER 画像を対象とし、バンド1～9での平均反射率の分布を表す。地表被覆物のカテゴリとして固定砂丘、流動砂、塩類集積土壌、農地を含む植生域、水域の5つを設定した。



第9図 Landsat TM/ETM+とASTERに基づくNDXI画像（第7図）の最尤法による分類結果。カテゴリは固定砂丘、流動砂、塩類集積土壌、農地以外の植生域と農地、水域の5つである。植生域・農地の増加が著しい部分を楕円で、塩類集積域が特に拡大した部分を四角で囲っている。



第10図 Landsat TM/ETM+ と ASTER 画像の分類処理結果（第9図）に基づく固定砂丘、流動砂、塩類集積土壌、植生域・農地、水域の分布面積の経年変化。



第12図 ASTERのバンド1～5に相当する波長帯での反射率の平均と塩分濃度との関係。反射率データは土壌サンプルの測定結果に基づく。図中の線分は1次回帰式を表し、これを塩分指標と定義した。

ータでも、サンプルの部分によって塩分濃度は異なる。また、サンプル地点数が少ないので、画像データとの相関性の判定精度を高めるために、平均化する前の反射スペクトルの原データをすべて用いた。

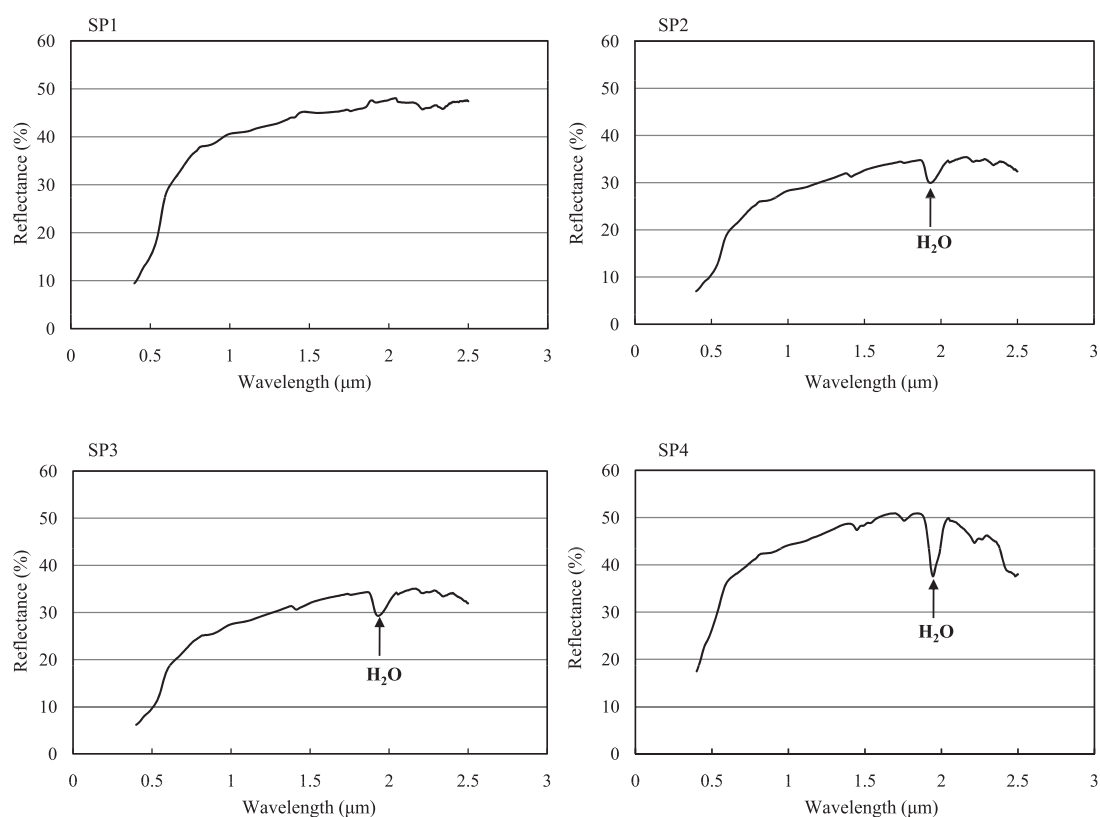
まず、ASTERの各バンドの中心波長を考慮し、それから±0.1μm以内の波長域における分光反射率データを平均した。種々の組み合わせの結果、バンド1～5（バンド5は2.145～2.185μm）に相当する反射率の平均と塩分濃度との相関係数が最も高いことがわかった。これらの関係を第12図に表す。データ数

は限られており、線形関係が強いとはいえないが（相関係数0.67、決定係数0.46）、概ね平均反射率が増加するにつれて塩分濃度も増加する傾向にある。平均反射率 $\bar{\rho}$ （0～100%）と塩分濃度 σ （ppt）との回帰式は、

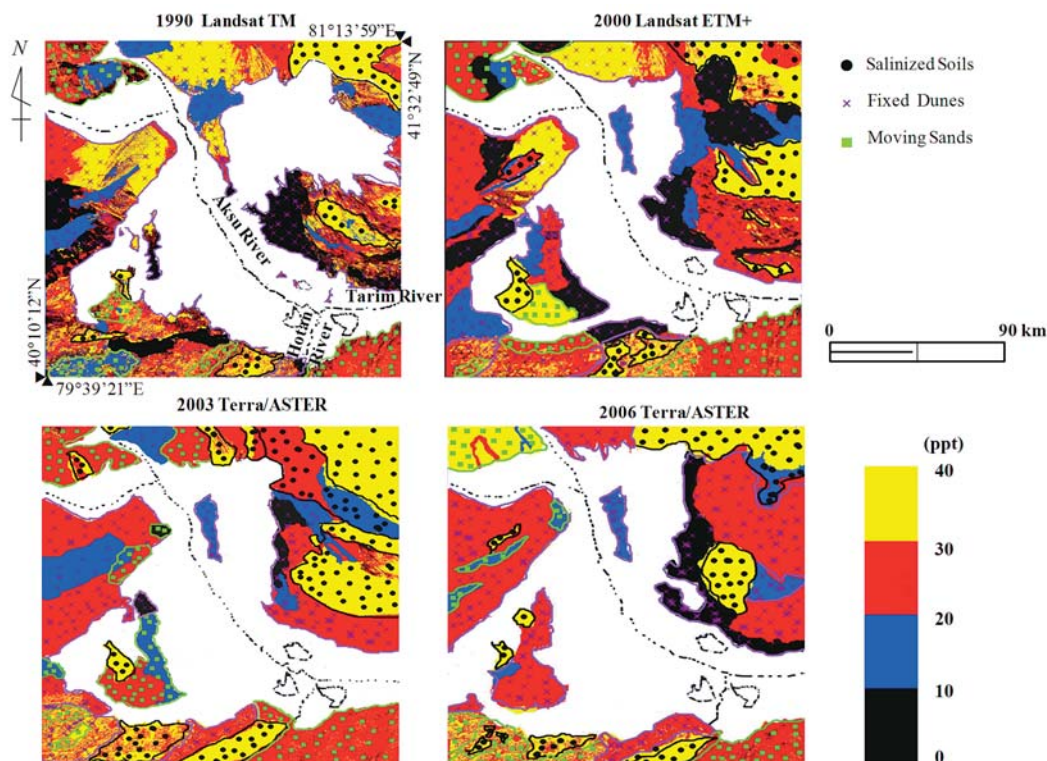
$$\sigma = 0.963 \bar{\rho} - 1.288 \quad (6)$$

と求められた。式(6)を以下では塩分指標（Salinity Index：SI）と称する。

最尤法の画像分類処理によって抽出された塩類集積土壌、固定砂丘、流動砂域にSIを適用した結果を第13図に示す。



第11図 4地点（第1図参照）における土壌サンプルデータの反射スペクトル（各地点での全サンプルの測定結果を平均した反射スペクトル）。



第13図 塩分指標（第12図参照）による固定砂丘，流動砂，塩類集積土壌の塩分濃度の推定分布，およびその経年変化。これらの地表被覆物の分布域は，第9図のLandsat TM/ETM+とASTER画像の最尤法による分類結果に基づく。3種類の分布域を凡例のパターンで表し，推定塩分濃度と重ね合わせている。

これらの分布域と推定塩分濃度とを図では重ね合わせている。ここから1990年と2000年では塩分濃度分布の傾向に大差はないが，領域東部で濃度20ppt以上の面積が1700km²（20%）から3150km²（33%）へと増加している。括弧内は塩類集積土壌，固定砂丘，流動砂の分布域の合計に対する面積の割合を表す。さらに2003年になると塩分濃度が全体的に増加し，領域の50%程度で20ppt以上の濃度が推定される。2006年では領域東部での濃度は減少し，20ppt以上の面積は890km²となる。特に植生域・農地と接する箇所では10ppt以下の濃度が細長く分布するのが特徴である。一方，領域西部は逆に塩分濃度が増加しており，10ppt以下の箇所はごく僅か（面積は290km²で割合は3%）になる。特に，北西部では30pptの分布域が広がり，その面積は2740km²で領域の31%を占める。

16年間にわたって塩分濃度が高い箇所は領域南東端，北西端に位置するが，第9図の画像分類結果と比較するとこの部分は主に流動砂域である。流動砂域では地表からの蒸発量が大いこと，および固定砂丘周辺での農地の放棄，植生の枯死などによって地表に集積された塩類が風によって流動砂域に移動することなどで，土壌の塩分濃度が定常的に高くなると考えられる。また，画像分類による塩類集積土壌域の大部分は30ppt以上の高濃度となっていることも確かめられた。

5. 考察

本研究により明らかになった重要な知見の一つは，可視域から2μm程度までの短波長赤外域の平均反射率を考慮することで，広範囲にわたり，衛星データから表土の塩分濃度の推定が可能になった点である。これはリモートセンシング技術の新しい応用といえる。前述のDwivedi and Sreenivas (1998), Farifteh *et al.* (2006), Masoud and Koike (2006), Gao and Liu (2008), および Metternicht and Zinck (2003), 神武ほか (2007) などは画像処理によって塩類集積土壌を抽出し，その分布域の拡大を明らかにすることを主な目的としており，塩分濃度の定量的評価までには至っていない。

NDXI画像（第4・7図）の植生が乏しい領域において，相対的に土壌水分が多い表土と乾燥した表土（砂丘）は，それぞれ紫と赤の色でカラーコード化された。その分布域は明確に分離される。含水の高い表土は河川周辺，農地の下流域側，および貯水池（第7図参照）の周辺に分布するのに対して，それらの周囲やさらなる下流域に含水の低い表土が見出される。第4・7図で相対的に土壌水分が多い，少ないと推定される区域の例をそれぞれ実線，破線で表す。土壌水分量によって，下記のように塩類集積のメカニズムが異なる。

アクス川周辺では天山山脈からの豊富な伏流水を農業に利用している。平坦，あるいは緩傾斜の圃場において帯状の区画の上流端から水を流入させ，薄層流で全面積に浸透させるというボーダー灌漑が行われている（山本ほか，

2008). これには多量の水が必要となるため、地表近くの堆積層中で地下水に溶解した塩類は毛細管現象によって地下水とともに上昇し、地表に析出する(第2図参照). また、貯水池の周辺では地下水位が高く、ボーダー灌漑と同様に塩類が地表に集積しやすい条件となっている. 土壤サンプル地点(第1図)の周辺がその代表的な例であり、第2図(b)の状況のようである. これらが含水比が高い表土での塩類集積の主要なメカニズムである.

塩類が集積した土壌では、その対策として多量の水を引き込んで塩類を洗脱している. しかし、この対策は集積域よりもさらに深部や下流域において、第2図(c)のように二次的な塩類集積を引き起こしている. この現象は第4図に示す4月のNDXI画像で確認できる. すなわち、アクス川上流で植生(緑色で表示)が密であるほど、下流域では塩類集積が進行し、塩類の固結として紫色でカラーコード化されている. 含水比が低い表土で塩類集積が進行すると農地は放棄され、これが沙漠化を強く誘発する. このような土壌では耐塩性のあるタマリスクが僅かに生育できるのみである(小黑ほか, 1998).

アクス川周辺では農地の開拓が急増し、豊富な水資源のもとに大資本の投下が行われて、商品価値の高い綿花栽培が盛んになっている(石山, 2003). 第10図に示した地表被覆物の面積変化からわかるように、農地開拓によって植生域が増加してはいるが、大規模な灌漑農業の反動として上記のように農地に塩類集積が生じている(第2図(d)参照). リーチングにより集積した塩類の除去を行っているが、オアシス全体としての水資源管理が適切に行われていないために効果は小さい(吉野, 2003). このようにアクス川周辺での過剰な灌漑農業が、タリム川周辺や下流域の沙漠化を引き起こす危険性が高いので、下流域にも配慮した農地開発と水資源管理が不可欠である. 本研究の成果は乾燥地域での適切な農地開発と環境保全の策定に貢献できると考えられる.

6. まとめ

本研究ではASTERとLandsatによる計40シーンの多時期の衛星画像データを用い、塩類集積土壌域の空間分布とその時間変化を詳細に抽出できる手法について検討し、これをタリム盆地北部のオアシス周辺に適用した. 得られた主な結果を以下にまとめる.

- (1) 衛星画像データの反射スペクトル情報から、植生の生理活性状態、表土の性質、および土壌の含水の程度に対する正規化指標SAVI, NDSI, NDWIを計算し、これらの関係を同時に表せるNDXI画像を提案した. これによりフォールスカラー画像よりも塩類集積域を正確に特定できるようになった.
- (2) 2004年4, 6, 7, 9月という4時期のASTERデータからNDXI画像を作成した結果、雨期では塩類集積土壌が雨水と混合するので塩類集積土壌の分布域は特定できないが、乾期(夏季)になれば植生の分布域・活性度の時間

的变化は小さくなり、塩類集積土壌の分布が顕著になる. ゆえに、対象地域に対しては6~9月の夏季の衛星画像を用いれば、塩類集積の経年変化、広義的には沙漠化の進行を適切に把握できることが明らかになった.

- (3) NDXI画像からは、土壤水分が多い貯水池周辺で塩類集積が生じやすく、土壤水分が少ない砂丘域でも、上流側における塩類集積土壌の多量の水を用いた洗脱に起因する二次的な塩類集積が判読でき、土壤水分量の大小によって塩類集積のメカニズムが異なることが示された.
- (4) Landsat (1990年と2000年)とASTER (2003年と2006年)のNDXI画像に最尤法を適用し、画像を分類したところ、植生域・農地以外、1990年は領域の多くが固定砂丘であったが、これが流動砂、塩類集積土壌と変化する過程を明らかにできた. すなわち、16年間で固定砂丘の変化が最も大きく、面積が半減し、この多くが農地を含む植生域と塩類集積土壌の面積の単調増加に寄与していることがわかった.
- (5) 土壤サンプルに対して測定された反射スペクトルと塩分濃度から、ASTERのバンド1~5までの反射率の平均と塩分濃度との相関性が高いことがわかり、これらの1次回帰式を塩分指標(SI)と定義した. SIの適用結果、2003年になると塩分濃度が全体的に増加し、領域の大部分で20 ppt以上の濃度、特に塩類集積土壌の大部分は30 ppt以上の高濃度であることがわかった. さらに、流動砂域も塩分濃度が高い状態にあることなどが推定できた.

謝辞: 宇宙技術開発株式会社の伊東明彦氏からは土壤サンプルをご提供いただき、熊本大学客員研究員のAlaa Masoud博士、同大学院自然科学研究科博士後期課程のAsep Saepuloh氏には画像解析法に関して種々ご教示いただいた. また、査読者からは論文全体にわたり詳細的確な査読意見をいただき、これらは論文の改善に大いに役立った. ここに記して深甚の謝意を表したい.

文 献

- 阿都沙拉木加拉力丁・長澤徹明 (2003) 新疆ウイグル自治区タリム川流域の水土保持に関する研究. 第3回新疆ウイグル研究会論文集, pp.3-10.
- Abudoureyimu, B., Kido, Y. and Nakakita, E. (2008) Groundwater analysis of Tarim River Basin in Xinjinag — 2 dimensional saturate groundwater flow model analysis. *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, no.51B, pp.581-590.
- Baret, F. and Guyot, G. (1991) Potentials and limit of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, vol.35, nos.2-3, pp.161-173.
- Berk, A., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Chetwybd, J.H., Bernstein, L.S., Shettle, E.P., Matthew, M.W. and Adler-Golden, S.M. (1999) *MODTRAN Version 4.0 User's Manual*.

- AirForce Research Laboratory, Hanscom AFB, MA, 99p.
- Dwivedi, R. S. and Sreenivas, K. (1998) Image transforms as a tool for the study of soil salinity and alkalinity dynamics. *International Journal of Remote Sensing*, vol.19, no.4, pp.605-619.
- ERSDAC ((財)資源・環境観測解析センター) (2003) 資源・環境リモートセンシング実用シリーズ③地球観測データからの情報抽出. ERSDAC, 306p.: pp.84-92.
- Farifteh, J., Farshad, A. and George, R.J. (2006) Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics. *Geoderma*, vol.130, nos.3-4, pp.191-206.
- Faraklioti, M. and Petrou, M. (2001) Illumination invariant unmixing of sets of mixed pixel. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, vol.39, no.10, pp.2227-2234.
- Gao, B.C. (1996) NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, vol.58, no.3, pp.257-266.
- Gao, J. and Liu, Y. (2008) Mapping of land degradation from space: a comparative study of Landsat ETM+ and ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, vol.29, no.14, pp.4029-4043.
- 黄盛璋 (2003) 緑洲研究. 科学出版社, 北京, 205p.
- Huete, A.R. (1988) A Soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol.25, no.3, pp.295-309.
- 市川正巳 (1988) 世界における砂漠化とその研究の現状. 地理学評論, vol.61 (Ser.A), no.2, pp.89-103.
- Ishiyama, T., Nakajima, Y. and Kajiura, K. (1996) Vegetation index algorithm for vegetation monitoring in arid and semi arid land. *Journal of Arid Land Studies*, vol.6, no.2, pp.35-47.
- 石山隆 (2003) 衛星データによるタリム盆地の扇状地のオアシス周辺の地表状態の調査. 第3回新疆ウイグル研究会論文集, pp.15-18.
- 石山隆・斎藤尚広・伊東明彦・阿布都沙拉木加拉力丁 (2007) 衛星データによるタクラマカン砂漠北縁のオアシスの土地被覆変動. 沙漠研究, vol.17, no.2, pp.93-97.
- 伊東明彦・石山隆・斎藤尚広・阿布都沙拉木加拉力丁 (2007) 衛星データを利用したタクラマカン砂漠北部の土壌の塩類集積の推定. 第6回新疆ウイグルの環境変動に関するシンポジウム論文集, pp.17-23.
- 伊東明彦・石山隆・西尾文彦・阿布都沙拉木加拉力丁 (2009) タクラマカン砂漠北縁の塩類集積土壌の分布. 沙漠研究, vol.18, no.4, pp.144-156.
- Jiangli, D. and Tiyyip, T. (2007) 新疆的防砂治砂有关研究. 中国风沙区造林工程管理研究, vol.7, no.6, pp.12-15.
- 神武寛典・伊東明彦・石山隆・アブドサラムジャラリデン・西尾文彦 (2007) 衛星データによる近年のタリム河下流における植生・土壌変動. 日本沙漠学会第18回学術大会発表論文集, pp.9-11.
- Masoud, A.A. and Koike, K. (2006) Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt. *Journal of Arid Environments*, vol.66, no.1, pp.151-167.
- Metternicht, G.I. and Zinck, J.A. (2003) Remote sensing of soil salinity, potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, vol.85, no.1, pp.1-20.
- 小黒剛成・山田研・菅雄三・竹内章司・土屋清 (1998) 衛星データによるタクラマカン沙漠の土壌水分解析. 沙漠研究, vol.8, no.2, pp.199-201.
- Qi, J., Chehbouni, A., Heuvelink, A.E. and Kerr, Y.H. (1994) Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol.48, no.2, pp.119-126.
- Qong, M. and Igarashi, T. (1999) 衛星データから見た乾燥地域における環境変化. 沙漠研究, vol.9, no.2, pp.154-166.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Scell, J.A., Deering, D.W. and Harlan J.C. (1974) *Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation*. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 371p.
- 相馬秀廣 (1996) タクリマカン沙漠における沙漠化: 塩類集積, 砂の被覆, 風食. 沙漠研究, vol.5, no.2, pp.117-127.
- 竹内渉・安岡善文 (2003) 衛星データを用いた正規化植生・土壌・水指数の開発. 平成15年写真測量学会学術講演会発表論文集, pp.27-39.
- UNEP (2002) *Global Environment Outlook 3—Past, Present and Future Perspectives*. UNEP, 398p.: pp.45-57.
- Wang, S. (1999) Natural condition in Aksu River-Tarim River system and its agricultural significance. *Arid Land Geography*, vol.14, no.1, pp.11-15.
- 山本忠男・阿布都沙拉木加拉力丁・長澤徹明 (2007) 農業水利が塩類集積によぼす影響—新疆ウイグル自治区シャヤ県における事例. 第6回新疆ウイグルの環境変動に関するシンポジウム論文集, pp.27-34.
- 山本忠男・鶴木啓二・阿布都沙拉木加拉力丁 (2008) タリム盆地北縁地域における塩類集積の発生要因に関する考察: 新疆ウイグル自治区シャヤ県における事例. 第7回新疆ウイグルの環境変動に関するシンポジウム論文集, pp.23-31.
- 山中典和 (2005) コトカケヤナギ. 日本緑化工学会誌, vol.30, no.4, pp.664-665.
- 吉野正敏 (2003) タクラマカン沙漠のオアシスにおける農民の水利用, 土地利用および洪水災害について. 第3回新疆ウイグル研究会論文集, pp.1-3.
- Zhu, Z. and Wang, T. (1996) The problem of desertification in the marginal regions of the Taklimakan Desert. *Journal of Arid Land Studies*, vol.5, no.2, pp.131-136.

要 旨

中国タリム盆地北部における土壤環境変化の特徴抽出
－衛星データによる塩類集積土壌の時空間変化の解析－

：阿依仙姑 瓦依提・小池 克明・石山 隆

ASTER と Landsat による計 40 シーンの衛星画像データを用い、塩類集積土壌域の空間分布とその時間変化を詳細に抽出できる手法について検討し、これをタリム盆地北部のオアシス周辺に適用した。まず、衛星画像データの反射スペクトル情報から、植生の活性度、表土の性質、および土壌の含水の程度に対する正規化指標 SAVI, NDSI, NDWI を計算し、これらの大小関係を同時に表せる NDXI 画像を提案した。2004 年の ASTER データから NDXI 画像を作成した結果、雨期では塩類集積土壌が雨水と混合するので塩類集積土壌の分布域は特定できないが、乾期（夏季）になれば植生の分布域・活性度の時間的変化は小さくなり、塩類集積土壌の分布が顕著になることがわかった。この NDXI 画像によれば土壌水分量の大小によって塩類集積のメカニズムが異なることが示された。次に、Landsat と ASTER の NDXI 画像を最尤法によって分類した結果、固定砂丘の変化が最も大きく、面積が半減し、この多くが農地を含む植生域と塩類集積土壌の面積の単調増加に寄与していることがわかった。さらに、土壌サンプルに対して測定された反射スペクトルと塩分濃度から、反射率と塩分濃度との相関性に対する 1 次回帰式を求め、これを塩分指標 (SI) と定義した。衛星画像に SI を適用した結果、2003 年になると塩分濃度が全体的に増加し、塩類集積土壌の大部分は 30 ppt 以上の高濃度であり、流動砂域も塩分濃度が高い状態にあることが明らかになった。

キーワード：沙漠化、オアシス、塩類集積、ASTER 画像、正規化指標