

Terra/ASTERマルチスペクトル (VNIR, SWIR & TIR) データを用いた湿原環境評価に関する基礎的研究 (サロベツ湿原を例として)

布和敖斯尔 高田 雅之

要 約

ASTERは可視から熱赤外までの14バンドを有する高性能の光学センサであり、産業、環境、資源など様々分野で利用されている。本研究は北海道のサロベツ湿原を対象に、ASTERデータを用いて、主成分分析、最適指数(OIF)、各種の定量化指数 (NDVI, NDSI, NDWI, OWI) などの手法を用いてそれぞれに空間分布を図化し、各結果を比較及び相互連関して考察することにより、湿原環境 (植生環境及び水文・土壌・熱などの物理環境) について空間的視点からの特徴を明らかにし、ASTERを用いた湿原環境評価への実用可能性を示すことができた。さらに、湿原植生を脅かすおそれのあるササ草原の分布及び動態についてASTERを用いて評価できる可能性が得られたとともに、今後の湿原環境評価のための統合的手法の確立に向けた基礎的知見を得た。

Key Words: Remote sensing, ASTER, Sarobetsu mire, wetland, PCA, OIF, NDVI, NDWI, OWI, NDSI

1 はじめに

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) とは、可視域・近赤外域 (VNIR) から、中間赤外域 (SWIR)、熱赤外域 (TIR) までの波長帯域をカバーする14バンドを有する高性能光学センサであり、NASA (米国航空宇宙局) が1999年12月18日に打ち上げたTerra衛星に搭載されている。地上分解能は最大で15mであり、農林水産業、環境、資源探査などの分野で主に利用されている。

北海道における、衛星を利用した環境モニタリング技術の研究において、ASTERのもつバンド数の多さ、解像度の高さ、及び入手コストの低さは、応用可能性及び実用性ともに高いと考えられることから、本研究ではASTERを用いた環境モニタリング技術研究の一環として、近年乾燥化による植生変化が懸念されるとともに、周辺の土地利用との共生を目指した自然再生に取り組まれているサロベツ湿原を対象に、湿原環境 (植生環境及び水文・土壌・熱などの物理環境) の空間分布及び特性に関する評価を試みた。

その結果をもとに、ササ草原の動態に関わる定量的・定性的知見が衛星から得られるかについて考察し、今後の湿原環境評価手法の確立に向けたASTERの応用可能性について基礎的な検討を行った。

2 サロベツ湿原の概要

サロベツ湿原は北海道北部に位置し (Fig. 1)、豊富町及び幌延町にまたがって南北約27km、東西5～8kmにわたって広がる湿原で、面積約23,000ha (うち泥炭地約14,600ha) を有し、釧路湿原と並んで日本を代表する湿原のひとつである¹⁾。ミズゴケ湿原の発達が著しいのが本湿原の特徴のひとつである一方、近年、耕地への土地改変による面積減少や、乾燥化の進行によるササ侵入などの植生変化が指摘されている²⁾。天塩川の支流であるサロベツ川が湿原を取り囲むように流れており、湿原内にはペンケ沼、パンケ沼などの湖沼が点在している。

植生は大きく湿原域の北部、中部、南部の3つに区分でき、国立公園ビジターセンターを中心とした北部は主にツルコケモモ・ミズゴケ群落及びササ草原、ペンケ沼周辺の中部は主にヤナギ等の湿地林及びヨシ・イワノガリヤス群集等、パンケ沼から天塩川にかけての南部は主にヨシ群落、ヌマガヤ群落及びササ草原となっている^{2) 3)}。このうち北部において、湿原植生へのササの侵入が特に問題視されている状況にある。

3 方法

3.1 ASTERデータのリサンプリング

今回使用した衛星データは2002年6月30日AM10:00に撮影したASTERの可視域から熱赤外域までの14バンドのデー

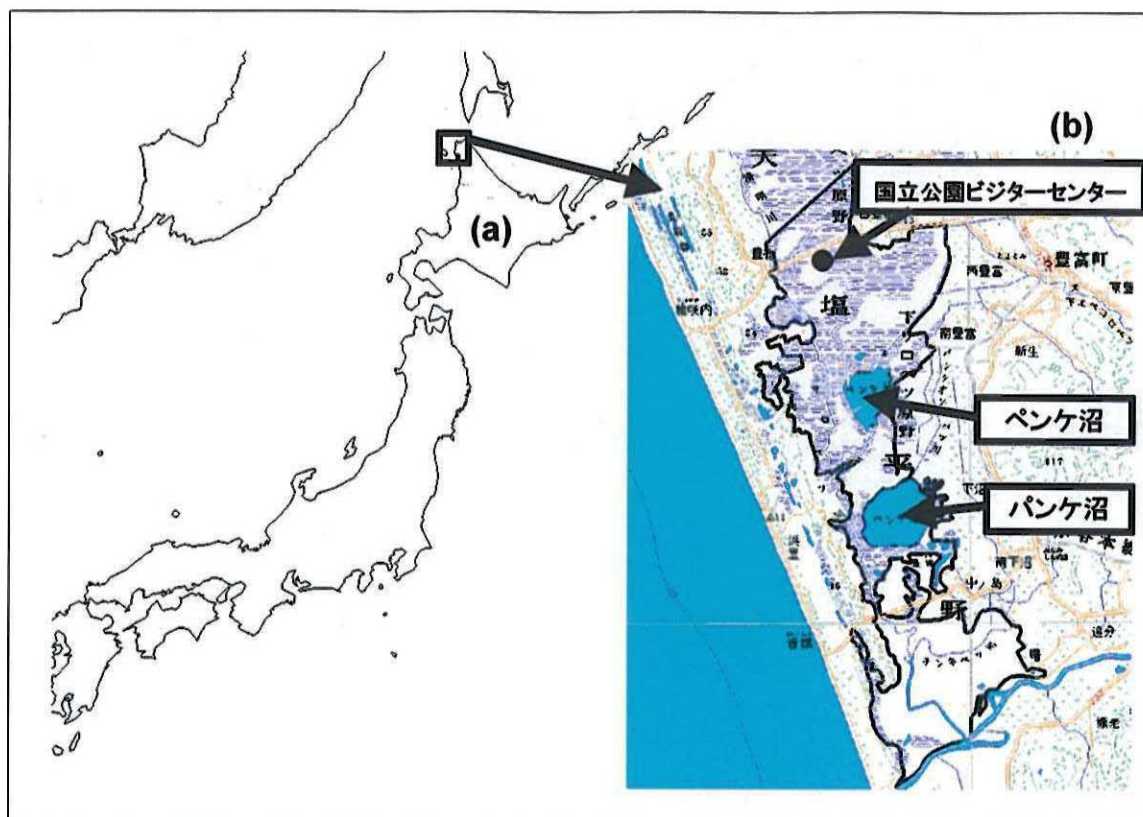


Fig. 1 調査地の位置 (a)北海道, (b)サロベツ湿原

タで、大気モデルを使って大気上層 (TOA) の輝度値 (radiance) と地表面の輝度値からエアロゾル及び水蒸気等の影響を取り除いた大気補正処理済の標準プロダクト (地表面反射率 (surface reflectance)) に精密幾何補正を施して使用した。

次にバンド間の相関計算や主成分分析などを行うためには、全てのバンドの空間解像度を同じ値にする必要があることから、リサンプリングを行った。リサンプリングは、オリジナルASTERデータのスペクトルを変化させずにレイヤースタッキング (layer stacking) を行い、ASTERオリジナルのVNIR (15m×15m)、SWIR (30m×30m) 及びTIR (90m×90m) データを全て同じピクセルサイズ (15m×15m) に変換して行った (Fig. 2)。これによってバンド間の計算が可能となった⁴⁾。

3.2 主成分分析

マルチスペクトル衛星画像データの主成分分析 (Principal component analysis, PCA) は画像の圧縮以外に画像分類、データフュージョンなどにも幅広く使われている^{5) 6)}。主成分分析は、各ピクセルのスペクトル値が、線形式を使用して再計算され、n 次元のスペクトル空間の軸を楕円の軸に対してシフトし回転させて求めるものであり、n バンド画像データの i-主成分に対する値は次の式から求められ

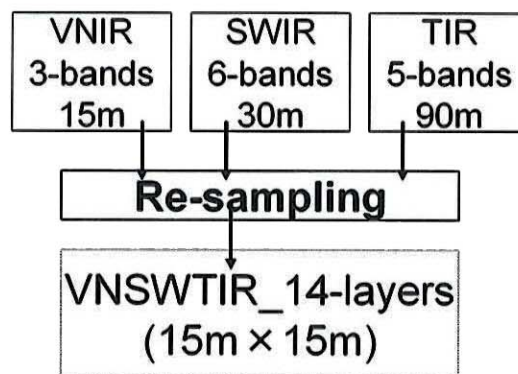


Fig. 2 ASTERデータのリサンプリング

る⁷⁾。

$$PC_i = \sum_{b=1}^n x_b a_{bi} \quad (1)$$

ここで、 PC_i は主成分バンド i の主成分の値、b は特定の入力バンドで、 x_b は入力バンド b のピクセル値、 a_{bi} は固有ベクトル要素である。主成分分析によって、マルチスペクトル衛星のすべてのバンドから、対象物に対する情報の90%以上を占める新たな成分を求めることができ、これを利用して対象物の特徴を顕著にするRGBカラー画像を作成することが可能となる。

3.3 最適指数 (OIF)

最適指数 (Optimum Index Factor ; OIF) は、マルチバンド衛星画像のカラー合成に際して、できるだけ互いに独立した3バンドを選定する手法で、対象物が有する反射または放射に関する特徴を最大に保有した形でRGBカラー画像の作成を可能にする技術である。ASTERの場合、14のバンドからRGBに当てはまる最適な3つのバンドを選択することが可能となる。OIFは次式のように定義され、バンド間の相関係数が低い (独立性が高い) ほど大きい値となる。すなわち、OIFが最も大きいバンドの組み合わせが、最も互いに独立であり、保有する情報が大きいことを示していると言える^{7) 8)}。

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^3 \sigma_i}{\sum_{i,j=1}^3 ABS(r_{ij})} \quad (2)$$

ここで、 σ_i はバンド i の標準偏差であり、 r_{ij} は選ばれた3バンドの各バンド間の相関係数の和である。例えば、RGBにバンド2, 3, 4を選んだ場合、バンド2, 3, 4に対するOIFは次のとおり計算される。

$$OIF_{band2,3,4} = \frac{(\sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4)}{|r(2,3)| + |r(2,4)| + |r(3,4)|} \quad (3)$$

3.4 植生指数ほか各種の定量化指数

衛星データのマルチバンドの情報を用いて、これまで対象物の特徴を引き出す多くの指数が提起され利用されている。今回は湿原環境の特徴を有効に引き出す可能性が高いものとして、植生指数、水指数、開放水域指数、土壌指数の4つの指数を用いた。

植生指数NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) は植生の被覆率、バイオマス、植生の違いを表す指数として広く用いられており、次の式から求めることができる^{9)~11)}。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

水指数NDWI は (Normalized Difference Water Index) は植物体特に葉内の水分含有量あるいは湿度を表す指数として、次の式から求めることができる^{12) 13)}。

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (5)$$

開放水域指数OWI (Open Water Index) は植生の被覆のない開放水面を表すものとして、次の式から求めることができる。

$$OWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad (6)$$

土壌指数NDSI (Normalized Difference Soil Index) は土壌からの反射を定量化する指数として、次の式から求めることができる¹³⁾。

$$NDSI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (7)$$

以上の式中で、GREEN、RED、NIR、SWIRはそれぞれ緑域、赤域、近赤外域、中間赤外域の反射率である。なお、SWIRバンドについて、本研究ではバンド4を用いて計算した。

3.5 表面温度

ASTERのTIR (90m×90m) データから作成された地表面温度プロダクトを用いて表面温度を計算し、熱環境に関する評価のための表面温度分布画像を作成した。

4 結果と考察

Table 1 にVNIR及びSWIRの各バンド間の反射率の相関係数を示した。これを見るとSWIRのバンド4～9の相関は非常に高く、各バンドとも湿原の中間赤外反射を同様に表しているといえる。最も相関係数が低かったのはバンド3とバンド2であった。これは、バンド3 (近赤外域) はクロロフィルによる太陽光の反射を示すのに対して、バンド2 (赤域) は吸収を示しているためと考えられる。

Table 2 に前記9バンドに係る反射率の最大値、最小値、中央値及び標準偏差を示した。中央値が最も高いのはバンド3であり、次いでバンド4であった。一方中央値が最も低いのはバンド2であり、これらは植生に対する一般的な分光特性の分布パターンと一致している。

次にTable 1 及び2より、最適指数 (OIF) を計算した結

果、最大となったのはバンド4、3、6の組み合わせであり、OIFは0.1107となった。これをそれぞれRGBに当てはめてカラー合成した結果をFig. 3(a)に示した。

Table 3に主成分分析の固有ベクトル (Eigenvectors (EV))を示した。これを見ると、EV-1はバンド全体の状況を表

し、EV-2は植生の反射(バンド3)及び吸収(バンド2)を示し、EV-3は中間赤外(バンド4～9)に特徴づけられる土壌の反射を示していると考えられる。これをもとに、第1～第3主成分(PC1, 2, 3)をそれぞれRGBに当てはめてカラー合成した結果をFig. 3(b)に示した。なお、第1～

Table 1 VNIR及びSWIRの各バンド間の反射率の相関係数

	ASTER VNIR			ASTER SWIR					
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
Green	1.000	0.929	0.930	0.978	0.969	0.964	0.968	0.951	0.964
Red	0.929	1.000	0.743	0.896	0.932	0.934	0.935	0.946	0.937
NIR	0.930	0.743	1.000	0.933	0.880	0.870	0.875	0.836	0.865
Band 4	0.978	0.896	0.933	1.000	0.987	0.985	0.985	0.968	0.977
Band 5	0.969	0.932	0.880	0.987	1.000	0.998	0.998	0.992	0.994
Band 6	0.964	0.934	0.870	0.985	0.998	1.000	0.998	0.994	0.994
Band 7	0.968	0.935	0.875	0.985	0.998	0.998	1.000	0.994	0.995
Band 8	0.951	0.946	0.836	0.968	0.992	0.994	0.994	1.000	0.994
Band 9	0.964	0.937	0.865	0.977	0.994	0.994	0.995	0.994	1.000

Table 2 VNIR及びSWIRの各バンドの反射率に係る統計量

Bands	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Max	0.404	0.462	0.848	0.567	0.613	0.618	0.783	0.769	0.999
Mean	0.050	0.026	0.189	0.112	0.055	0.058	0.054	0.044	0.056
Stdev	0.047	0.031	0.174	0.106	0.055	0.058	0.054	0.046	0.057

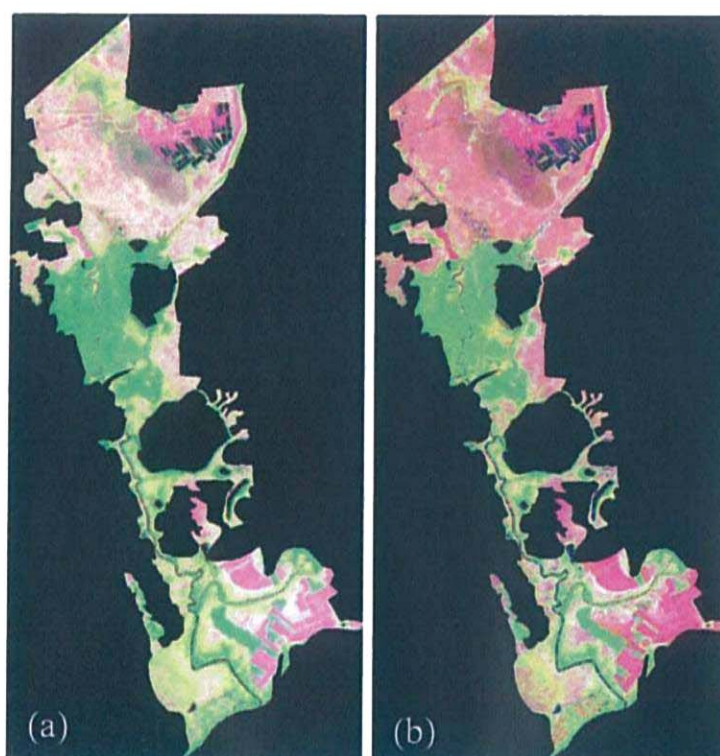


Fig. 3 サロベツ湿原のRGBカラー画像 ■ OIF画像 (RGB=Band4:3:6), ■ PCA画像 (RGB=PC123)

Table 3 VNIR及びSWIRの9バンドを用いた主成分分析の固有ベクトル (EV)

EV	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	0.336	0.321	0.308	0.338	0.340	0.339	0.340	0.337	0.339
2	0.155	-0.500	0.780	0.186	-0.059	-0.096	-0.081	-0.222	-0.117
3	-0.471	-0.675	-0.196	0.135	0.214	0.250	0.218	0.261	0.205
4	-0.118	0.117	-0.164	0.609	0.138	0.297	-0.012	-0.235	-0.642
5	0.627	-0.330	-0.458	0.220	0.092	-0.044	-0.077	-0.375	0.289
6	0.462	-0.254	-0.126	-0.162	-0.111	-0.073	0.184	0.590	-0.529
7	-0.073	0.040	-0.063	0.560	-0.708	-0.189	-0.079	0.286	0.226
8	-0.089	-0.046	-0.030	0.072	-0.008	-0.498	0.815	-0.261	-0.051
9	-0.086	0.039	-0.019	0.261	0.542	-0.659	-0.345	0.275	-0.006

第3主成分の累積寄与率は99.8%となった。

Fig. 3(a)及び(b)に示したOIF画像とPCA画像を比べると、ほぼ同様の空間分布傾向が見られた。すなわち、紫色となっている北部のミズゴケ湿原及びササ草原、緑色となっている中部の湿地林及びヨシ湿原、そしてその中間的な色となっている南部のヌマガヤ湿原及びヨシ湿原である。これらは、西川ほか²⁾及び宮脇ほか³⁾で作成されているサロベツ湿原の植生図における区分と概ね一致するものであり、地表面の植生を反映しているものと考えられる。植生分布をよりわかりやすく表示するために、一例としてOIF画像を用いた教師付き画像分類結果をFig. 4に示した。

なお、PCA画像の方がOIF画像に比べて色調がより強調されているが、これは、累積寄与率の高いPCA画像で、より多くのバンド情報が反映され、OIF画像に比べて植生や土壌の違いが顕著に表現されているものと解釈される。

Fig. 5にサロベツ湿原におけるNDVI、NDWI、OWI、NDSIを、またFig. 6に表面温度分布を示した。これをもとに、湿原の北部、中部、南部ごとに指数の大小の傾向を判別し、Table 4にまとめた。これを見ると、北部のミズゴケ湿原及びササ草原、中部の湿地林及びヨシ湿原、南部のヌマガヤ湿原及びヨシ湿原の区分が明瞭に示された。すなわち、北部は貧栄養植生で、表流水の影響を受けにくく、植物からの蒸散が低い傾向を反映した可能性が示されたのに対して、中部は富栄養植生で、表流水の影響を受け、植物からの蒸散が高い可能性が読みとれ、また南部は両者の中間的なレベルを示した。

これらはそれぞれに、いわゆる従来の湿原区分における高層湿原、低層湿原及び中間湿原の水文気象特性及び植物社会学的な群落特性をよく反映しているものと推察され、ASTERを通じて広域的にそれらの特性と空間的傾向を定量化する手法を確立する可能性を示唆したものであると言える。

このうち、ササ草原の広がり問題視されている北部のミズゴケ群落とササ草原 (Fig. 4 参照) に着目すると、

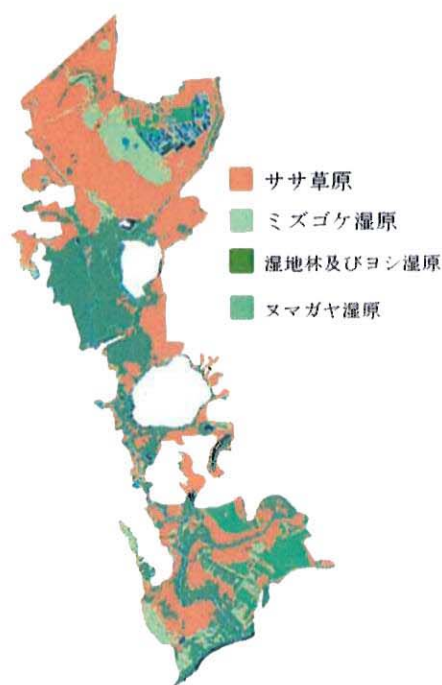


Fig. 4 サロベツ湿原の植生分類 (例)

NDWI 及び OWI に関して、全体としてはササ草原に比べてミズゴケ湿原で水分環境 (植物体内及び土壌内) が高い傾向が読みとれた。しかしながら、Fig. 4 でミズゴケ湿原と区分された区域の南半分 (泥炭採取跡地南側) に着目すると、NDWI 及び OWI とともにササ草原と同様のレベルを示しており、今後ササが侵入しやすい環境の存在が示唆された。今後現地調査等でこれを検証することにより、ASTERを用いてササ草原の分布及び動態特性の把握と侵入ポテンシャルの高い地域を広域的に予測する手法につながり得るものと考えられる。

また、NDVI、NDWI、OWI、NDSI 及び表面温度の5つの指標を統合的に組み合わせることにより、より有効で実用的な湿原環境評価手法の確立に向けた可能性が示唆され、そのための基礎的知見が得られたものと考えられる。

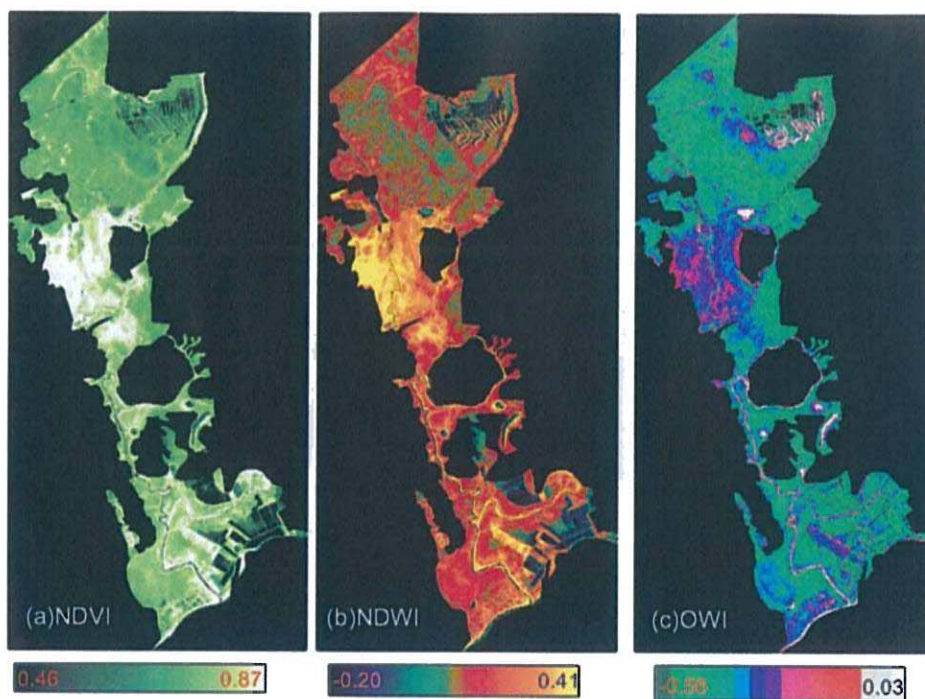


Fig. 5 サロベツ湿原における定量化指数 ■ NDVI 画像, ■ NDWI 画像, ■ OWI 画像,

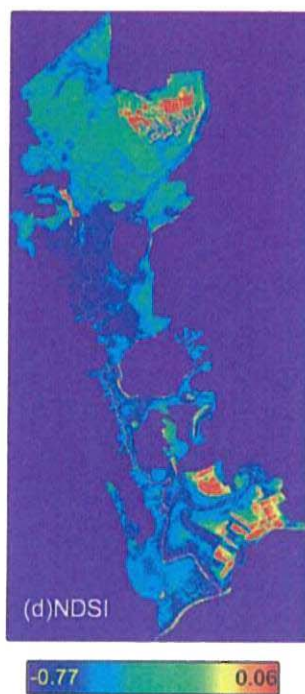


Fig. 5 ■ NDSI 画像

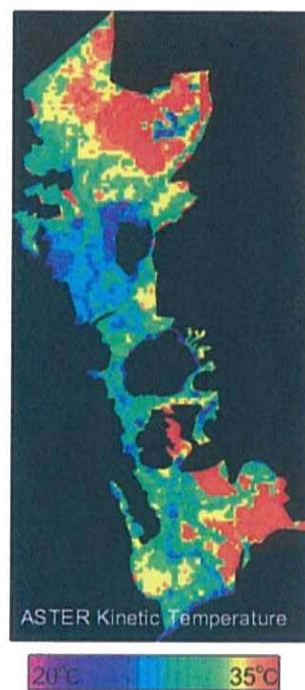


Fig. 6 サロベツ湿原の表面温度分布

Table 4 サロベツ湿原におけるNDVI, NDWI, OWI, NDSI 及び地表面温度の分布特性

	NDVI	NDWI	OWI	NDSI	地表面温度
北部	low	low	low	high	high
中部	high	high	high	low	low
南部	medium	medium	medium	medium	medium

なお、衛星画像はある日のある時刻における状況を反映したものであり、植生や物理環境の時間的変動スケールに留意しながら、今後解析を進めていく必要がある。

5. おわりに

ASTERは、水や植生からの反射特性を反映する可視域～近赤外域 (VNIR)、土壌の反射特性を反映する中間赤外域 (SWIR) 及び表面の熱環境を反映する熱赤外域 (TIR) のあわせて14のスペクトルバンドを持ち、地表面被覆のみならず、水文環境や蒸発散などの微気象環境を含む物理環境についても検知できるものと期待される。本研究の対象とした湿原は生物環境と物理環境がミックスされた生態系であり、これらが環境傾度をもって連続する空間でもある。

今回はサロベツ湿原全域を対象に、広域的な評価を試みたが、これらを裏付けるためには、現地観測データ等による検証が必要であることから、今後これらを含めて検討を行い、ササの侵入に関わる環境条件の解明や、湿原保全のためのより有効な湿原環境モニタリング手法の確立に向けて引き続き研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 羽山早織, 中津川誠: サロベツ湿原の研究経過について, 北海道開発土木研究所月報, 589, pp.32-43, 2002.
- 2) 西川洋子, 宮木雅美, 堀繁久: 25年間におけるサロベツ湿原の変化と保全対策, 北海道環境科学研究センター所報, 23, pp.58-65, 1996.
- 3) 宮脇昭, 奥田重俊, 藤原一絵, 井上香世子: サロベツ原野の植生, 財団法人観光資源保護財団, 1976.
- 4) Buhe Aosier, K. Tsuchiya, M. Kaneko and S. J. Sung: Comparison of image data acquired with AVHRR, MODIS, ETM + and ASTER over Hokkaido Japan, *Advances in Space Research*, 32(11), pp.2211-2216, 2003.
- 5) Jansen, J. R.: *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2d ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- 6) Faust, N. L.: *Image Enhancement*. Vol.20, Supplement 5 of *Encyclopedia of Computer Sciences and Technology*. Ed. A. Kent and J. G. Williams. New York: Marcel Dekker, Inc, 1989.
- 7) Buhe Aosier, K. Tsuchiya and M. Kaneko: Oases and Forest in Xinjiang, China Retrieved From ASTER Data, *Advances in Space Research*. (accepted; 2004)
- 8) Chavez G. L.: Statistical method for selecting LANDSAT MSS ratios, *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8(1), pp.23-30, 1982.
- 9) Huete, A. R.: A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*. 25, pp.295-309, 1988.
- 10) Tsuchiya, K. and Y. Suga: Development of a method for assessing the variation of desert and development of data base, *Studies for Production of Fundamental Datasets for Earth Science and Technology Res.*, pp.82-97, NASDA, Japan, 1998.
- 11) Tsuchiya, K.: Vegetation indices derived from remotely sensed data from satellites, *J. Arid Land Studies*, 10(2), pp.137-145, 2000.
- 12) Gao, X., Huete, A. R., NiW. and Miura, T.: Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination, *Remote Sensing of Environment*. 74(3), pp.609-620, 2000.
- 13) 布和敖斯尔, 金子正美, 高田雅之, 土屋清, 福間博史: 湿原植生分類のためのリモートセンシング手法の研究—北海道釧路湿原の場合—, 北海道環境科学研究センター所報, pp.55-58, 2003.

The basic research on wetlands environmental evaluation using Terra/ASTER satellite data BUHE Aosier, Masayuki TAKADA

Abstract

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) aboard NASA's satellite Terra is a high resolution multispectral radiometer of 14 bands. In this study, ASTER multi-spectral data are used to analyze the spatial characteristics of the wetland environment (vegetation, hydrology, micrometeorology and so forth) of the Sarobetsu mire, with such techniques as principal component analysis, Optimum Index Factor (OIF), NDVI, NDSI, NDWI and OWI. Furthermore, the distribution and dynamics of the bamboo grass (sasa) invading the wetland vegetation are considered, which has led to acquisition of fundamental knowledge for integrated techniques for wetland environmental evaluation using ASTER.