多時期のランドサット TM 画像を用いた湿原植生分類

Wetland Vegetation Classification using Multitemporal LANDSAT TM images

山形与志樹*, 小 熊 宏 之**, 富士田裕子***

Yoshiki YAMAGATA, Hiroyuki OGUMA, Hiroko FUJITA

Abstract: Wetland monitoring and especially wetland vegetation classification are crucial for preserving valuable wetland ecosystems. The development of remote sensing technique for wetland monitoring is of urgent necessity. In order to improve the accuracy of vegetation classification, we have investigated the wetland vegetation classification using multi-temporal Landsat TM images. Because the growth pattern of a wetland vegetation changes according to the vegetation type, we can use this difference of temporal growth pattern which appear in the multitemporal images for classifying the vegetation types. In order to clarify this temporal growth pattern of wetland vegetation types, we have conducted sampling experiments to measure the biomass growth during the growing season. And also spectral reflectance measurements were conducted to see the spectral difference between the vegetation types as well. As the result of supervised classifications using the multitemporal Landsat TM image, an accurate wetland vegetation classification map has been produced.

1. はじめに

湿原域には湿原特有の稀少な動植物が多種生息しており、生物多様性保全の観点から、湿原は最も重要な自然生態系の一つとして認知されつつある。湿原生態系保全のためには、湿原状態の正確なモニタリング、特に湿原植生の分布の状況とその変動の把握が必要である。しかしながら、湿原内での植生調査は冠水状態に妨げられて非常に困難であり、湿原内の植生の状況把握が十分になされていないのが現状である。そのような中で、航空機や人工衛星から取得されたりリモートセンシング画像は、唯一の面的な湿原モニタリングの手段であり、特に湿原植生の分布状況を把握する手法を確立することが急務となっている。

釧路湿原については、これまでも、航空機写真を用いて湿原植生図を作成する試みがなされてきた²⁾。

しかしながら、以下のような問題点から、空中写真による正確な植生分類図の作成には限界が存在していた。1) 湿原植生タイプが示す特徴が可視域のカラー写真だけでは判別しきれない。2) 湿原植生の季節変動が激しく、一時期に取得された空中写真から詳細な湿原植生进行分类することが難しい。3) 空中写真の撮影条件が一定しないために、幾何学的な歪みや大気・日射状態の補正が大変難しく、広域にわたるモザイクと同一基準による判別が大変困難である。

そこで本研究では、多時期に取得されたランドサット TM 画像を用いて、さらに正確な湿原植生分類図を作成することを試みた。多時期のランドサット TM 画像を用いることによって、以下に記す利点を生かした分類が可能になる。1) 湿原植生の判別に有効である近赤外、中間赤外バンドの情報³⁾を活用することができる。2) 多時期のデータを重ね合わせて利用することで、湿原植生タイプごとの生育時期の違いを用いて分類を実現することができる¹⁾。3) 1 シーンの中に解析対象地域が完全に入るため、シーンをモザイクしたり、補正処理して解析する必要がない。

本論文では、釧路湿原を6, 8, 11月に撮影した多時期ランドサット TM 画像を用いた湿原植生分類を中

* 国立環境研究所 〒305 茨城県つくば市小野川16-2

** 宇宙開発事業団 〒106 東京都港区六本木1-9-9六本木ファーストビル13F

*** 北海道大学 〒060 札幌市中央区北3条西8丁目
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 35, NO. 4, 1996

心として、スペクトル放射計によって計測された主な湿原植生タイプのスペクトル特性と、主な湿原植生タイプのバイオマス調査について報告する。スペクトル計測とバイオマス調査は、多時期のスペクトル情報から湿原植生の分類が可能になる根拠を示すために実施したものである。

2. 解析地域

解析対象地域(Fig.1)は日本最大の湿原である釧路湿原で、総面積は約18000haあり、約4000年前からの泥炭堆積によって形成された湿原である。釧路湿原では春から夏にかけて霧がしばしば発生し、タンチョウヅルの飛来地として有名である。1987年には国立公園に指定され、国際的に重要な湿地の保全に関するラムサール条約の登録湿地となっている。

釧路湿原の大部分は、ヨシ、スゲ群落の分布する低層湿原で、高層湿原ではミズゴケをはじめとしてイソ

ツツジ、ワタスゲの分布が広く見られる。しかしながら、戦後の周辺部における農地開発や湿原内の堤防道路の建設によって、湿原内の植生に急速な変動が生じている。特に、河川による土壌流入、乾燥化や河川水の富栄養化にともなって、ハンノキ林の面積拡大が問題となっている。

これまでの湿原植生分類では、1つのシーン内のスペクトル特性の違いから植生が判別されてきた。しかしながら、湿原植生の季節変動が早く、また種ごとの生育時期も異なっているために、植生タイプ間よりも季節間でより大きなスペクトル特性の変動が見られる。そこでわれわれは、次節以降で詳述する湿原植生のフェノロジーの違いとスペクトルの季節変化を用いて湿原植生の分類を行うアプローチをとることにした。

Fig.1 解析対象地域(北海道釧路湿原)

3. 湿原植生の季節性

湿原の各植生タイプの優占種がどのように季節変化しているかを調べることによって、どの時期に取得された画像を用いれば湿原植生の分類を精度よく達成できるかを明らかにすることができる。われわれは、釧路湿原の代表的な植生であり、これまでの植生図の作成においても正確な分類が困難であったスゲ群落とヨシ群落について、現存量の季節変化を調査した。ヨシとスゲがそれぞれ優占する調査区を赤沼周辺の堤防道路北側に設置し、生育期間の5月から9月までの間に合計8回のサンプリングを実施し、調査区内に分布する植物の現存量(地上部バイオマス)を測定した。

サンプリングは、ヨシ区、スゲ区の各調査地点について、それぞれ2つの1mx1mの方形区を設けて、地上部の刈り取りを実施した。サンプリング点は毎回少しずつずれているので厳密には同一地点の調査ではないものの、2点の平均値を計算することによって、各調査区の連続的なサンプリングになるものとみなした。

ヨシ、スゲ区の全現存量(地上部バイオマス)サンプリング結果を Fig.2に示す。スゲの現存量は5月下旬から増大し始め、8月上旬に最大となり、9月上旬には減少する。一方、ヨシ区の現存量は、6月下旬から7月上旬にかけて増大し始め、8月下旬から、9月上旬にかけて最大値に到達する。このような現存量の変

化を、両区の成長の変化と見なせば、両区には明確な生長開始時期のずれと成長パターンの違いが見られることが明らかになった。

両調査区(C:スゲ区, P:ヨシ区)には、ヨシ、ヤラメスゲをはじめとしてさらに、イワノガリヤスツルスゲなどが混在している、各区内に出現する主な種ごとの現存量の推移を Fig.3に示した。ヤラメスゲを除いて、各種は両区に出現している。ヨシについては8月の時点まで両区とも同程度の現存量を示しているが、その後スゲ区では減少に転じていたが、湿原の植生は一般的に様々な種の混合となっており、どの種が優占するかで植生区分が行なわれている。従って湿原の植生分類に際しては、優占種のフェノロジーに注意して分類カテゴリーを決定する必要がある。

以上の現存量の季節変化の調査結果から、ヨシ、スゲの判別に有効な画像取得時期について、以下のことがわかった。1) 6月下旬、スゲが成長して緑になっていて、ヨシがまだ生育開始直後で緑になっていない状況を捉えることができる。この時期の画像だけからでも両群落の区別が可能である。2) ヨシ、スゲがともに最大の現存量を示す8月の画像だけから両者を区別することは困難であるが、ヨシの現存量が低い6月の画像と組み合わせることによって、ヨシとスゲの明確な分離が可能である。3) 現存量の推移に現れたような、種の生育の季節性の違いを種ごとのスペクトル特性の違いと組み合わせることによって、高精度の湿原植生

全現存量の推移

Fig. 2 ヨシ、スゲ区の全現存量(地上部バイオマス)の推移

の分類が可能となる。特にヨシ、スゲ群落の分類に有効なのは、5月下旬から6月下旬にかけての画像と、7月下旬から9月中旬にかけての画像の組み合わせである。

4. 湿原植生スペクトルの季節性

多時期に取得されたりモートセンシング画像を組み合わせることで湿原植生を分類する際には、同一の時期での各植生タイプ間のスペクトルパターンと、各植生タイプスペクトルの季節変動パターンの両方が判別に用いられる。実際に、湿原植生のスペクトル特性がどのように変化しているのかを調べるために、釧路湿原の代表的植生タイプであるミズゴケ群落、ヨシ群落及びワタスゲ群落について、スペクトロラジオメータによるスペクトル測定を測定した。測定は湿原植物の生育初期である1992年6月23日と、生育後期の1993年8月31日の2回にかけて行った。

スペクトロラジオメータはオプトリサーチ社製のMSR-7000を用い、測定中MSR-7000が不調となった6月のワタスゲ以外は400-2500nmの可視から短波長赤外までの領域を測定した。MSR-7000の諸元をTable.1に示す。測定はそれぞれの群落の同一地点において、MSR-7000の受光部を群落上約1.5mから鉛直下向きに向けて対象からのスペクトル反射量を、直後に硫酸バリウムをアルミニウム板に塗布した標準白色板のスペクトル反射量をそれぞれ測定し、両者の比に

よりスペクトル反射率を算出した。得られたスペクトル反射率はH₂Oの吸収帯である1400nm付近と、1800nm以上の部分について非常にノイズ成分が多かったため除去し、更に15nm幅でのメディアンフィルタによりスペックル状のノイズを除去した。

観測の結果得られたスペクトル特性をFig.4に示す。6月の時点では、ヨシ群落は大半が前年の枯れた個体が被覆している状態であり、最も平坦なスペクトル特性となっている。8月は生育のピークを迎えている状態であり、クロロフィルの吸収帯である赤領域の強い吸収と、バイオマスに関係する近赤外領域の反射が最大となっている。ワタスゲ群落は6月では前年の枯れた個体が混合しているものの、既に生育中であり、8月と大差は無かったため近赤外領域の変動はヨシ群落と比較すると少ない。赤領域の吸収の差は、枯れた個体の混入によるものである。ミズゴケ群落は6月で

Table.1 MSR-7000の諸元

測定範囲	280-2500nm
波長分解能	5nm
サンプリング間隔	1nm
測定時間	2分30秒
有効視野角	22°（オプティカルファイバー先端）
ディテクタ	
280-760nm	PM
760-1000nm	Si
1000-2500nm	PbS

現存量の推移

Fig.3 ヨシ、スゲ区の種別現存量の推移

既に生育しており、目視上は8月も全く変化がなかった。そのため可視-近赤外領域の反射率の変動は殆ど無い。また、他の群落に比して1080nm 付近の反射率極大と、970nm, 1180nm 付近の吸収が極めて特徴的なスペクトル反射特性を持つことが判明した。

なお、ハンノキ林についてはスペクトル計測を実施することができなかった。しかしながら、ハンノキ林は近赤外バンドの反射が6月、8月ともに強く、赤バンドの反射が6、8月ともに顕著に低い特徴がある。このため、ハンノキ林を他の湿原植生から判別することは容易である。

5. 多時期画像による湿原植生分類

湿原植物のフェノロジーの違いから生ずるスペクトル季節変化パターンの湿原植生ごとの違いを判別する原理を応用して、多時期に取得されたランドサット TM 画像を用いた釧路湿原の植生分類を実施した。

5.1 解析画像

解析に用いた画像は、釧路湿原を1991年6月26日、

8月29日および11月1日に撮影したランドサット TM の画像である。6月は植物の生育初期にあたり、まずはじめに生育を開始するスゲとまだ枯れた状態のヨシの判別に有効な時期である。8月は湿原植生全体のバイオマス量が最大になる時期であり、特にヨシの生育が著しい。そして、11月は湿原植物のほとんどが枯れて、ミズゴケのある高層湿原のみに緑の植物が残って他の植生タイプと明確に分離される時期となっている。

ランドサット TM 画像の特性を Table.2に示す。TM センサーの地上分解能は約30メートルで、釧路湿原のほぼ全域が1024x1024画素の画像の中に入り、ヨシ、スゲ、ミズゴケ、ハンノキ、またその他の周辺土地利用の空間的な分布をとられるのに十分な分解能である。また、TM センサーは7つのバンドを持ち、特にその中の近赤外(バンド4)、中間赤外バンド(バンド5)は湿原植生判別に有効なバンドである²⁾。

5.2 多時期合成画像の作成

3 時期のランドサット TM 画像を、まず、1 次アフィン変換を用いた幾何補正によって誤差が1 ピクセ

Fig. 4

ル以下なるように正確に相互に重ね合わせた。次に、各時期に取得された画像から、湿原植生の判別に有効である、赤(バンド3)、近赤外(バンド4)、中間赤外(バンド5)を選択して、合計9チャンネルの多時期画像に合成した。(赤バンドはクロロフィルの吸収波長帯にあたり、光合成の活性が高い植生ほど反射が低くなる特徴がある。近赤外バンドは植物の葉によって強く反射されるため、植物のバイオマスや葉との相関が知られている。中間赤外バンドは水の吸収波長帯にあたり地表面が乾燥しているほど高い値を示す。)バンド4を赤色に、バンド5を緑色に、バンド3を緑色に発色させた6、8、11月のカラー合成画像をそれぞれ Fig.5(a), (b), (c)に示す。

各時期の画像から3チャンネルを選択したのは、合計バンド数を少なくして計算時間を節約するためと、バンド間の相関から生じる最尤法計算の不安定化と、分類精度の低下を避けるためである。また、取得時の気象条件の影響を受け、分類精度への寄与の再現性が乏しく空間分解能も異なる熱赤外バンドは解析に利用しなかった。

5.3 分類トレーニングデータの設定

分類に用いた湿原植生クラスは、高層湿原に一樣に分布しているミズゴケ、主に湿原の中心部で河川氾濫域に生育し釧路湿原の低層湿原の主な植生であるスゲ、そしてもう一つの低層湿原の主な植生であるヨシ、湿原周辺部における開発の影響を受け、過去50年間の間に急速に湿原内で面積を拡大しているハンノキである。分類クラスとしては他に、水域、森林、農耕地、市街地を用いた。分類に際しては、それぞれのクラスに設定したサブクラスについて、25から100ピクセル程度の大きさの複数のトレーニングエリアを設定して解析に用いた。

Table.2 ランドサット TM 画像の特性及び取得条件			
バンド	(μm)		分解能
1	0.45-0.52	青	30×30m
2	0.52-0.60	緑	30×30
3	0.63-0.69	赤	30×30
4	0.76-0.90	近赤外	30×30
5	1.55-1.75	中間赤外	30×30
7	2.08-2.35	中間赤外	30×30
6	10.4-12.5	熱赤外	120×120

5.4 最尤法分類

多時期の合成画像を用いて最尤法⁴⁾による湿原植生の分類を実施した。以下に分類処理の手順について述べる。まず、トレーニングデータを用いて各クラスの多時期スペクトルベクトルが従う分布関数のパラメータを推定した。ただしこれらの分布関数は各カテゴリーに一つではなく、さらに細かく分かれたサブクラスごとに設定した。サブクラスとしては、農地クラスには牧草地、裸地、畑サブクラスを、森林クラスには日向、日陰、針葉樹、広葉樹、植林地サブクラスを、各湿原植生クラスには、生育程度の違いと水分状態の違いによってサブクラスを設定した。

次に、推定されたサブクラスの分布関数を用いて最尤法分類を実施した。サブクラスに分類された画素は対応するクラスに集計して、最終的に7カテゴリーの分類として整理した。尚、分類にサブクラスを用いたのは、各クラスに複数の土地被覆クラスが対応していることと、植生の生育程度などによって各クラス分布の正規性が失われていることを考慮したためである。

また、トレーニングエリアの選択に当たっては、空間的なばらつきができるだけ大きくなるように注意するとともに、相互干渉により誤分類が生じているクラスについては、さらにトレーニングエリアの追加や削除の後に再分類を実施した。この分類の反復は、現地調査等により正確なクラスがわかっている領域において、改善が見られなくなるまで繰り返した。

最終的な最尤法分類の結果得られた釧路湿原の植生分類画像を Fig. 6 に示す。

5.5 分離結果の評価

作成された植生分類図の精度を、テストデータ分類精度、現地調査、航空機画像などを用いて検討した結果、以下のような評価が得られた。

1) 既存の釧路湿原植生分類図²⁾では、一時期に取得された空中写真を基に作成されたために、赤沼の北のスゲがヨシに、堤防道路の南側のヨシがスゲに、冠水域がミズゴケにそれぞれ誤分類されるなどの問題点があったが、本解析で得られた分類図ではこれらの領域についても正確に判別することができた。本解析によって得られた分類図においても、湿原内の若干の冠水領域において日陰の林地に誤分類される画素があるものの、本分類画像は衛星画像から作成されたものと

Fig.5(a) 6月のランドサット TM 画像(R,G,B = TM4,5,3)

Fig.5(b) 8月のランドサット TM 画像(R,G,B = TM4,5,3)

Fig.5(c) 11月のランドサット TM 画像(R,G,B=TM4,5,3)

ランドサットTM画像による
釧路湿原植生分類図

Vegetation Classification
Map of the Kushiro Mire
Using LANDSAT TM Image

ミズゴケ	(Sphagnum)
スゲ	(Sedge)
ヨシ	(Reed)
ハンノキ	(Alder)
水域	(Water)
森林	(Forest)
その他	(Others)

Fig.6 多時期 TM 画像から作成された釧路湿原植生分類図

しては、実用に耐えうる最初の釧路湿原の植生分類図であるとの評価が湿原関連研究者から得られた。

2) 8月に見られた主にスゲ群落が分布する中心部での冠水状態によって、この部分の直接的な観測に基づく植生分類ができなかった。7月から8月にかけての時期、釧路湿原ではしばしば霧が発生する。この時期に衛星画像が取得できる確率は低く、ランドサット TM 画像が取得できるのは、低気圧や台風が通り過ぎた直後の快晴日になっていることが多い。このような観測画像中の湿原はしばしば冠水状態を示し、水状態の変動が植生分類へ与える影響に注意する必要がある。

3) ミズゴケ群落(高層湿原)、スゲ群落、ヨシ群落、ハンノキ林の判別にはランドサット TM の性能で十分であることがわかったが、反射輝度がともに低い湿原中心部の水域の一部が、森林の日陰部分の暗い場所と誤判別された。また、池とうややチヤナギ群落等の高層湿原内におけるさらに詳細な分布の把握や様々な種類のスゲの分布を抽出するためには、ランドサット TM では不十分で、さらに細かな地上分解能とスペクトル分解を持ったセンサー(航空機 MSS 等)による観測が必要である。

6. ま と め

1) ヨシ、スゲなどの湿原植生の季節的な成長変化を、生育期間中の現存量のサンプリング調査によって明らかにした。

2) 湿原植生のスペクトル特性とまたその季節変動を、スペクトル計によるスペクトル反射率計測により明らかにした。

3) 湿原植生の季節変動にともなうスペクトル変化情報を活用することによって、湿原植生の正確な分類が可能であることが示された。釧路湿原を6, 8, 11月に撮影した多時期ランドサット画像を用いて、スゲ群落、ヨシ群落、ハンノキ林、ミズゴケ群落等の湿原植生の分類を実施し、湿原植生分類図を作成した。

4) 本研究で作成された釧路湿原植生図は、これまでにない高い精度の湿原植生分類が達成されているとの

評価を、釧路湿原の研究に携わる複数の研究者からも得ることができた。リモートセンシングによる湿原植生分類は、多時期衛星画像を用いることによって実用段階に入ったといえることができる。

5) 今後、さらに湿原植生分類の精度を向上させるためには、植生の詳細な季節変化の情報を活用することができる時系列画像の取得や、湿原植生の季節変化を捉えるために有効な波長帯の選択などが必要である。また分類手法に関しても、湿原植生の判別に有効な最尤法に代わる分類手法の検討、トレーニングエリア設定プロセスの効率化、面的な分類精度評価法の確立などが必要である。

謝辞

本解析に関わる現地調査を実施するにあたっては、北海道教育大学の西尾文彦先生、中山雅茂さん、釧路市博物館の新庄久志さんの多大なご協力をいただきました。また、本研究は、宇宙開発事業団との共同研究「気候遷移地域における環境変化解析手法の研究」において取得されたデータを用いて、環境庁地球環境研究総合推進費「人工衛星データ等の利用による湿地植生分布の調査に関する研究」の一環として実施されたものです。関係各位に感謝の意を表します。
(受付日1996. 3. 6, 受理日1996. 7. 2)

参考文献

- 1) 小熊, 山形, 2 時期航空機 MSS データを用いた湿原植生分類に有効な波長帯の研究, 日本写真測量学会, Vol.35, No.1, pp.36-45, 1996
- 2) 環境庁自然保護局: 湿原生態系保全のためのモニタリング手法の確立に関する研究, 1993
- 3) 山形, 安岡, 宮崎, 小熊, 森山, 中谷: 航空機 MSS 実験による湿原植生判別に有効な波長帯の選定と植生分類画像の作成, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.15, No.3, pp.222-231, 1995
- 4) Richards, J. A. : Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer-Verlag, 1986