

F-2 アジア太平洋地域における湿地等の環境監視保全手法の開発に関する研究

(1) 人工衛星データを用いた湿地分布図の作成手法に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 社会環境システム部情報解析研究室 田村正行

環境庁国立環境研究所

社会環境システム部 情報解析研究室 山形与志樹

[要旨] 将来の気候変動を大気循環モデルによって正確に予測するためには、湿地生態系からの温室効果ガスの排出や吸収に関する正確かつ面的な推定が不可欠であり、リモートセンシング情報に基づいたグローバルな湿地分布の把握が急務となっている。一方、湿地はそれ自身、貴重な動植物の生息地として近年その重要性が認識されつつあり、脆弱な生態系である湿地の変動をモニタリングすることは自然保護の観点からも重要である。

そこで本研究では、湿地生態系を監視するためのリモートセンシング手法を確立することを目的として、人工衛星データを用いた湿地分布図の作成に関わるスペクトル指数、ミクセル分解、分類に関する研究を実施した。研究の結果、湿地における水・植生・土壌環境特性を同時に計測する新たなスペクトル指数(WTI, PVI, VSW)、スペクトル画像から複数の植生クラスの連続的な空間分布を把握する部分空間法によるミクセル分解手法、そして、複数センサー合成画像を高精度で分類する分類手法を開発し、これらの手法を用いて湿地域の監視および湿地分布図の作成が可能となった。

[キーワード] リモートセンシング、湿地、分類、季節変化、手法

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。

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。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を分類することが難しい。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、多時期に人工衛星や航空機センサーによって取得されたリモートセンシング画像を用いて、さらに正確な湿原植生分類図を作成することを目的として、湿地モニタリングに必要な各種リモートセンシング解析手法の開発を実施した。以下に、本プロジェクトで得られた主な3つの成果に関連する研究課題の概要を述べる。

第1に、植生、土壌、水の3成分を同時に計測することができるスペクトル指数、植生・土壌・水指数 VSWI (Vegetation-Soil-Water Index)を開発した。そして多時期 Landsat TM 画像を用いて、釧路湿原の年次変動、季節変動の把握にこの指数を用いた結果について述べる。VSWI を計算するには、湿地の構成要素である、植生、土壌、水に対応する代表スペクトル (End-member) 点を求める必要があるが、本研究ではさらに、これらの代表スペクトル点を画像のスペクトル散布図から自動的に決定するためのアルゴリズムを開発した。

第2に、部分空間法による新しいミクセル分解手法を開発して、航空機搭載スペクトルイメージャー (CASI) で取得した画像を用いて、湿原植生分解のミクセル分解を実施した。この部分空間法による新たなミクセル分解では、クラスごとに設定される部分空間への射影によってミクセル分解が定義され、超多波長画像のミクセル分解計算において高速性と安定性に優れた手法となっている。本手法によるミクセル分解の結果を、最小2乗法、2次最適化法、直交部分空間射影法によるミクセル分解の結果と比較した結果、スペクトル的に極めて近いクラスを除いて湿原植生を良好に分解できることがわかった。

第3に、多時期のリモートセンシング画像を用いた湿原植生分類手法を実施した。湿原では植生の季節変化が大きいので、1時期に取得された画像だけを用いて湿原植生を正確に判別することは困難である。そこで分類に最適な画像取得時期の組合せを決定するために、生育期間中の植生バイオマスのサンプリング調査とスペクトル計測を実施した。その結果、湿原植生の生育初期と中期に取得されたスペクトルの季節変動が湿原植生判別に有効であることがわかった。さらに実際に3時期に取得された Landsat TM 画像を用いて、正確な植生分類図を作成することができた。

以下の各章ではさらに、これらの3つの研究課題について、研究目的・手法、研究結果・考察、研究成果について、それぞれ報告する。

2. 研究目的・手法

2.1 植生・土壌・水指数の開発

植生現存量はリモートセンシングによって推定することができる最も重要なパラメータの一つである。中でも赤バンドと近赤外バンドの組み合わせを用いた比植生指数 (RVI)、正規化植生指数 (NDVI)、垂直植生指数 (PVI) 等の植生指数アルゴリズムが開発され、植生指数と葉面積指数やバイオマスとの相関について研究がなされてきた。

PVI (Perpendicular Vegetation Index) は Richardson と Wiegand によって提唱された植生指数で、PVI の計算に際してはソイルラインと呼ばれる直線が重要な役割を果たしている。赤バンドを横軸にとり、近赤外バンドを縦軸にとったスペクトル散布図に、土壌水分が異なる裸地スペクトルをプロットすると一つの直線に乗ることが知られている。この直線がソイルラインであり、ソイルライン上では、土壌が乾燥するに従ってスペクトルは右上に移動する。一方、植生量が増大すると、近赤外バンドでの反射が強くなり、また赤バンドの反射が弱くなるため、スペクトルはソイルラインから離れて散布図上を左上に移動する。植生量が少なく背景土壌が見えている場合、反射スペクトルは土壌水分含量の変動によってソイルラインとほぼ平行な方向に移動することが知られ、このスペクトルが移動する軌跡は等植生線 (Iso vegetation line) と呼ばれている。このような背景の土壌スペクトルの影響 (Soil noise) をできるだけ抑制して、植生量をスペクトルから推定するために、観測スペクトルへのソイルラインからの距離を計算して植生指数としたのが PVI である。

PVI を改良した指数がその後いくつか提案されている。まず、土壌と植生の反射率の非線形な混合特性を考慮して、PVI を非線形な指数に拡張した土壌調整植生指数 (Soil Adjusted Vegetation Index) が Huete らによって提案されている。さらに、この土壌調整植生指数を発展させた研究として、変換土壌調整植生指数 (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index) が Baret らによって、修正土壌調整植生指数 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) が Qi らによって提案されている。また、水田の水に含まれる土砂の量に対応する濁水直線を用いて、水稻の収量のモニタリングに PVI を応用した研究が山形らによってなされている。

これらの PVI が拡張された植生指数は主に農耕地や森林植生の現存量を推定することを目的としたものである。しかしながら自然生態系のモニタリングでは、植生に限らず様々な環境状態変数をリモートセンシングによって同時に把握する必要がある。特に湿原域等のモニタリングにおいては、構成要素である植生、水、土壌のそれぞれのモニタリングが必要である。

1. 混合スペクトル情報から各構成要素の状態を推定する手法としては、ミクセル分解が知られている。一般的なミクセル分解では、それぞれのミクセルが各構成要素の純粋スペクトルの線形結合で表されること (線形ミクセルモデル) を前提として、統計的な推定によって各構成要素の混合比が求められる。各画素内の構成要素がそれぞれ分離独立している場合には、各構成要素の面積構成比率がこのようなミクセル分解の手法によって推定されることが期待できる。しかしながら、一般的に自然植生域を観測したミクセルでは、土壌の上に植生があり、複数の植物種が重なり合うというような複雑な構造を持っていることが多く、線形ミクセルモデルの仮定は必ずしも成り立たない。はじめに

そこで本研究では、植生、土壌、水が重層的な構造を持つ領域を指数によって定量的にモニタリングするアプローチの第一歩として、PVI をさらに一般化した植生、土壌、水の指数である VSW 指数を提案する。ここで VSW 指数は、PVI で計算される植生 (Vegetation) 軸に加えて、土壌 (Soil) 軸と水 (Water) 軸を同時に計算することからそれぞれの頭文字をとって VSW 指数と名付けたものである。VSW 指数は植生指数が植生量の指数として有効であるように、土壌、水分に関する指数と土壌、水分に関する物理量との関係を決定する手法として提案した指数である。

また、複合的土地被覆が関連するミクセル解析に当たっては、純粋な植生、土壌、水に対応するスペクトル空間上の点 (エンドメンバー点と呼ぶ) の選択が極めて重要であるにもかかわらず、これまでのミクセル分解の手法においてはエンドメンバー点とはじめから与えられるものとして扱われることが多かった。そこで本研究では、しばしば恣意的に選択されてきたエンドメンバー点に代わって、画像スペクトル情報から VSW のそれぞれに対応するエンドメンバー点を自動的に決定するアルゴリズムを考案した。

2.2 部分空間法による新たなミクセル分解

湿原域では、さまざまな湿原植生が相互に重なり合い、連続的に変化して分布している。このような領域を分光観測した画素の多くは、複数の土地被覆クラスのスペクトル特性が混合したミクセル (Mixed pixel) になっている。しかしながら、リモートセンシング画像解析において一般的に用いられてきた最尤法による教師付き分類手法は、各クラスのスペクトル特性が正規分布に従い、かつ各画素のスペクトルがどれかひとつの土地被覆クラスに対応していることを前提にしているため、ミクセルを多く含んだ画像解析には適していない。ミクセル画素の解析には、ミクセルのスペクトル情報から各構成要素についての情報を逆に推定するミクセル分解手法を用いる必要がある。

ミクセル分解に際して、最も一般的に用いられている、最小2乗法等による統計的ミクセル分解のアルゴリズムでは、構成要素の面積比率を係数として、ミクセルのスペクトルを構成要素スペクトルの線形結合で表す線形ミクセルモデルが用いられている。このモデルを解くことによって、あらかじめ知られている構成要素のスペクトルから、構成要素の面積比率を推定することができる。しかしながらこれらの手法では、画像のチャンネル数が大きくなるに従って、ミクセル分解の計算量が急増し、チャンネル間の相関により解が不安定になる等の問題が生じてしまう。そのため、ミクセルの中にどの構成要素のスペクトルが含まれているかの検定や、スペクトル次元の圧縮がミクセル分解の前処理として必要であった。

一方、近年のリモートセンシング技術の発展によって、さらに細かな波長幅で分光画像計測する超多波長のセンサーが開発され、各種の環境計測に活用されつつある。特に、植生のパラメータを推定するために、超多波長のリモートセンシング画像が有効であることが認識されている。このような発展にともない、何百チャンネルにもおよぶ超多波長のしかも大規模な画像を用いて、複数の植生が混在するミクセルを安定的かつ高速にミクセル分解する手法の確立が現在急務となっている。

本研究で新たに開発された部分空間法によるミクセル分解手法は、従来の統計的な特徴選択とは全く異なった原理によって、大規模な超多波長の画像を安定かつ高速に処理する手法である。部分空間法によるミクセル分解では、これまでの線形ミクセルモデルに基づいたアプローチに代わって、各クラスに部分空間が対応していると考えて、部分空間への射影によってミクセル分解するアプローチが用いられる。全クラスに共通した、一定チャンネル数のスペクトル空間の中でミクセルモデルを当てはめるのではなく、各クラス毎に異なるスペクトル部分空間を割り当てて、ミクセルの各クラス部分空間への射影の大きさによって分解を実現するのが部分空間法の特徴である。

2.3 多時期画像を用いた湿地分類

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。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。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ある。

本研究では、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。

3. 結果・考察

3.1 植生・土壌・水指数の開発

リモートセンシング画像の観測スペクトル（観測チャンネルのDN値のベクトル）の赤バンドを横軸に、近赤外バンドを縦軸にプロットすると、三角形の領域が現れる。この3角形の底辺は、ソイルラインに対応し、観測スペクトル点とソイルラインとの距離がPVIである。本研究ではこのPVIの考え方をさらに発展させて、植生と土壌と水の情報を同時に評価することができる植生・土壌・水（VSW）指数を考案した。

PVIが、観測スペクトル点とソイルラインの辺との距離を用いて、上述の三角形の中の植生方向の変動を評価する指数であるのに対して、VSW指数は観測スペクトル点と3辺からの距離を用いることによって、3角形を構成するエンドメンバーである植生・土壌・水の3情報を同時に抽出する指数である。

VSW指数の計算原理の概念を図1に示す。ここに描かれた3角形の頂点はそれぞれ植生（V）、土壌（S）、水（W）のエンドメンバー点を表し、Pは観測スペクトル点を、VはPからWS辺に垂直に下ろした点、SはPからVW辺に垂線に下ろした点、WはPからSV辺に垂直に下ろした点をそれぞれ示す。（各エンドメンバー点の決定手続きについては3節で述べる。）ここで、WS辺はソイルラインに対応しており、植生が無く土壌と水分が変動するラインである。同様に、乾燥した土壌に植生が繁茂するとVSW辺上を、水の上に植物が生育するとVW辺上をスペクトル点が移動することになる。（ただし厳密には、植生と水、特に植生と土壌の重層的な構造体からの反射スペクトルは、多重散乱などの影響によって線形的なスペクトル特性とはならないため、観測データはVS、VW辺上を移動せずに非線形な曲線上を移動する。）線分PVの長さがPVIとして定義されたように、VSW指数ではV、S、Wの指数をそれぞれ線分PV、PS、PWの長さとして定義する。ただし、観測スペクトル点が三角形の辺の外側にある場合については、対応する指数に負値を与えるものとする。

VSW指数を計算する際のエンドメンバー点は、理想的には、純粋なエンドメンバー対象のスペクトル計測によって事前に決定されることが好ましい。しかし実際には、日射量、大気、植生、水分状態などの影響を受けてスペクトルが季節変化しまうため、純粋なエンドメンバーのスペクトルと観測スペクトルとの対応をとることは困難である。そこで、エンドメンバーの決定に際しては、便宜的に散布図から目視でエンドメンバーを選択する方法がしばしば用いられてきた。しかしこの方法では、エンドメンバーの選択が主観に依存するため、多時期画像を用いた定量的な解析をはエンドメンバーの再現性に問題が残る。

そこで本研究では、解析画像中の各画素のスペクトルを赤—近赤外散布図上にプロットしたときに現れる三角形領域の分布に対して、三角形分布を当てはめるアルゴリズムを開発し、VSWそれぞれに対応するエンドメンバーを自動的に決定するアプローチを用いた。以下に、散布図からエンドメンバーを決定するアルゴリズムを示す。

観測画素の赤バンド、近赤外バンドの値をそれぞれ、 $r(x, y)$ 、 $n(x, y)$ とする。ただしここで、 x および y は、画像の座標とし、TM画像の量子化が8ビットであるので、 $r(x, y)$ 、 $n(x, y)$ は0から255の値を

とる整数である。

横軸に赤バンドの値 $r(x, y)$ 、縦軸に近赤外バンドの値 $n(x, y)$ を割り当てて、全画素のスペクトル散布図を作成すると、0 から 255 の整数値に対応する格子状の分布となる。この頻度分布を $H(p, q)$ で表すことにする。ただし、 p は赤、 q は近赤外の観測スペクトルである。

頻度分布の中には例外的なスペクトルやノイズによって、中心の分布から著しく離れた点が存在する。これらの例外点を除去するために、閾値を設定して一定値以上の頻度を示す点のみを解析に用いる。本解析ではこの閾値を、閾値以上の頻度の画素数が全画素の 95% となるように設定した。

$H(p, q)$ を閾値を用いて二値化した分布を $B(p, q)$ とする。また、 $H(p, q)$ の凸閉包(convex hull)を作成し、凸閉包の内側では 1、外側では 0 を値とする二値分布を $C(p, q)$ とする。 $C(p, q)$ は、三角形状の分布を示す。ただしここで、 $B(p, q)$ の凸閉包とは $B(p, q)$ の内点をすべて内包し、かつ最小周囲長を持つ多角形のことである。

植生 (V)、土壌 (S)、水 (W) の赤-近赤外反射特性を考慮すると、それぞれのエンドメンバー点 E_v 、 E_s 、 E_w は、以下の性質を有する。

- (a) 植生のエンドメンバー E_v は、 E_s 、 E_w が作る直線(soil line)の左上最遠点に存在する。
- (b) 土壌のエンドメンバー E_s は、赤バンド(p)の最大値を示す。
- (c) 水域のエンドメンバー E_w は、近赤外バンド(q)の最小値を示す。

$C(p, q)$ の分布から、上記の 3 つの性質を基に、エンドメンバー点 E_v 、 E_s 、 E_w の初期推定値を決定することができる。

初期エンドメンバー点 E_v 、 E_s 、 E_w が作る三角形の内側では 1、外側では 0 の値を持つ二値の三角形分布を $T(p, q)$ とする。凸閉包 $C(p, q)$ を近似する三角形分布 $T(p, q)$ を決定するために、それぞれの分布の差を計算する 2 つの面積 S_1 , S_2 を

$$S_1 = \{\text{area of } C(p, q) = 1 \text{ and } T(p, q) = 0\}$$

$$S_2 = \{\text{area of } C(p, q) = 0 \text{ and } T(p, q) = 1\}$$

と定義する。 S_1 は分布の内側で三角形の外側の面積、 S_2 は分布の外側で三角形の内側となる面積に対応している。 $T(p, q)$ が $C(p, q)$ と一致するとき、 S_1 および S_2 はいずれも 0 となり、ずれがある場合、正の値をとり、 $T(p, q)$ の $C(p, q)$ に対するマッチングの尺度となっている。両方のずれの程度を統合して表す評価関数 F

$$F = S_1^2 + S_2^2$$

を定義すると、関数 F は 3 つのエンドメンバー値 E_v 、 E_s 、 E_w をパラメータとする 6 変数の関数であり、その最小値を与えるパラメータの組として最適なエンドメンバー値を決めることができる。本研究では、非線形関数の直接探索による最適化手法である simplex 法を用い、上記の初期推定値をエンドメンバー値の初期値として、関数 F を最適化することにより、エンドメンバー値を決定した。

3.2 部分空間法による新たなミクセル分解

3.2.1 統計的ミクセル分解

従来の統計的ミクセル分解においては、ミクセルのスペクトルは、ミクセル中に存在する各地表面構成要素のスペクトルを、それぞれの面積比率で重み付き平均で表すことができる(線形ミクセルモデル)と仮定されてきた。この線形ミクセルモデルとは、 n チャンネルのリモートセンシング画像が取得され、画像中 K 個の土地被覆クラスが存在し、ミクセル画素中のクラス $\omega^{(i)}$ の面積比率を f_i とするとき、各画素

の観測ベクトル r が次式で表せるとするモデルである。

$$r = Mf + n = \sum_{i=1}^K f_i m_i + n \quad (1)$$

ここで M はクラス i の代表ベクトル m_i を列にもつ行列で、 f は画素中に各クラスの面積比 f_i を要素にもつベクトル、 n はノイズを表すベクトルである。

統計的ミクセル分解の手法は、(1)式の観測スペクトル r とクラススペクトル行列 M が与えられた時に、各クラスの面積比ベクトル f を計算するアルゴリズムである。統計的ミクセル分解の手法としては、最小2乗法、因子分析、特異値分解等を用いたもの知られている。

一方、本報告で提案するミクセル分解の手法は、部分空間法を用いて今回新たに開発された手法であり、統計的な手法と異なり、線形ミクセルモデルを前提とせず、各クラスにスペクトル部分空間を割り当てて、部分空間への射影の大きさによってミクセル分解を実現する手法である。

3.2.2 部分空間法の考え方

部分空間法の基本は、それぞれのクラスのスペクトルベクトルが、スペクトルの全次元の空間の中にまんべんなく存在するのではなく、そのクラスに特徴的な部分空間の中に入っているという考えにある。そこで部分空間法ではまず、クラス毎のトレーニングサンプルから、あらかじめ各クラスの特徴的な部分空間が決定される。

従来の分類やミクセル分解手法においては、まずスペクトル空間を定めて（場合によっては特徴軸に変換した上で）、その中で判別の領域を設定したり、代表ベクトルを求めて混合比率の推定が行われていた。部分空間法においては、クラス毎に決定される部分空間によって各クラスのスペクトル特性を特徴づけている点が、これまでの手法とは根本的に異なっている。

部分空間法を計算するアルゴリズムには、部分空間を決定する際の計算方法の違いに応じて、代数的部分空間法、統計的部分空間法、学習部分空間法などがある。以下本論文では、ミクセル分解のようなトレーニングデータが比較的少ない場合に、高速に部分空間を計算することができる統計的部分空間法の一つである CLAFIC (CLAss-Featuring Information Compression) 法によるアプローチを用いる。

3.2.3 改良 CLAFIC 法による部分空間の決定

部分空間法では、クラス部分空間がそのクラスに属するベクトルをできるだけ多く含むように、すなわちクラスベクトルの射影全体が大きくなるように部分空間が決定される。CLAFIC 法は、各クラスベクトルの対応する部分空間への射影の期待値を最大化する部分空間の決定手法である。しかしながら、すべてのクラス部分空間毎に独立して射影が最大になるように部分空間を決定しようとする、類似したクラス間の分離が劣化してしまう欠点がある。そこで、当該クラスへの射影を大きくし、同時に他クラスへの射影を小さくする改良型 CLAFIC 法が開発された。本研究ではこの改良型 CLAFIC を用いてミクセル分解手法を提案する。以下に、改良型 CLAFIC 法による部分空間の決定の手続きについて述べる。

改良型 CLAFIC 法では、 K 個の土地被覆構成要素クラス $\omega^{(i)}$ に対応する部分空間 $L^{(i)}$ を、クラス $\omega^{(i)}$ に属するベクトル x の部分空間 $L^{(i)}$ への射影が大きくなり、それ以外のクラス $\omega^{(j)}$ ($j \neq i$) に属するベクトルの部分空間 $L^{(i)}$ への射影が小さくなるように決定する。この条件を満たすように部分空間 $L^{(i)}$ を決定する問題は、部分空間への射影の大きさの期待値の差を計算する次式を最小とする最適化問題となる。

$$\sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^K E(x' P^{(i)} x | x \in \omega^{(j)}) - E(x' P^{(i)} x | x \in \omega^{(i)}) \quad (2)$$

ただしここで、 $P^{(i)}$ は $L^{(i)}$ への射影行列である。

(2)式第一項は、クラス $\omega^{(i)}$ に属さないベクトルの射影であり、第二項はクラス $\omega^{(i)}$ に属するベクトルの射影である。この差を最小とすることで、第一項を小さく、第二項を大きくすること、すなわちクラス $\omega^{(i)}$ に属するベクトル x の部分空間 $L^{(i)}$ への射影が大きくなり、それ以外のクラス $\omega^{(j)}$ ($j \neq i$) に属するベクトルの部分空間 $L^{(i)}$ への射影が小さくなるように部分空間 $L^{(i)}$ を決定することが可能になる。

射影行列 $P^{(i)}$ は部分空間 $L^{(i)}$ の $p^{(i)}$ 個の正規直交基底 $\{u_1^{(i)}, \dots, u_{p^{(i)}}^{(i)}\}$ を用いて次式で表わされる行列である。

$$P^{(i)} = \sum_{k=1}^{p^{(i)}} u_k^{(i)} u_k^{(i)'} \quad (3)$$

(3)式を(2)式に代入して、(2)式を基底ベクトル $u_k^{(i)}$ ($k=1, \dots, p^{(i)}$) を用いて表わし直すと次式が得られる。

$$\sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^K \sum_{k=1}^{p^{(i)}} E((x' u_k^{(i)})^2 | x \in \omega^{(j)}) - \sum_{k=1}^{p^{(i)}} E((x' u_k^{(i)})^2 | x \in \omega^{(i)}) \quad (4)$$

ここで各クラス毎の期待値を先に計算すると(4)式は次のようになる。

$$\sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^K \sum_{k=1}^{p^{(i)}} u_k^{(i)} Q^{(j)} u_k^{(i)} - \sum_{k=1}^{p^{(i)}} u_k^{(i)} Q^{(i)} u_k^{(i)} \quad (5)$$

ただしここで、 $Q^{(i)}$ は次式で定義されるクラス $\omega^{(i)}$ の相関行列である。

$$Q^{(i)} = E(xx' | x \in \omega^{(i)}) \quad (6)$$

(5)式と、正規直交基底 $\{u_1^{(i)}, \dots, u_{p^{(i)}}^{(i)}\}$ の正規条件

$$u_k^{(i)'} u_k^{(i)} = 1, \quad k = 1, \dots, p^{(i)} \quad (7)$$

とを合わせると、(2)式の最適化問題は、ラグランジュの未定乗数法によって、次式を最小化する問題に変形される。

$$\sum_{k=1}^{p^{(i)}} u_k^{(i)'} \left(\sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^K Q^{(j)} - Q^{(i)} \right) u_k^{(i)} - \sum_{k=1}^{p^{(i)}} (\lambda_k^{(i)} u_k^{(i)'} u_k^{(i)} - 1) \quad (8)$$

この式の各基底ベクトル $u_k^{(i)}$ ($k=1, \dots, p^{(i)}$) に対する変分をとると、次の方程式系が求まる。

$$\left(\sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^K Q^{(j)} - Q^{(i)} \right) u_k^{(i)} = \lambda_k^{(i)} u_k^{(i)}, \quad k = 1, \dots, p^{(i)} \quad (9)$$

これより、各類部分空間 $L^{(i)}$ の基底ベクトル $u_k^{(i)}$ ($k=1, \dots, p^{(i)}$) は、次式で表される行列の固有ベクトルでなければならないことがわかる。

$$Q = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K Q^{(j)} - Q^{(i)} \quad (10)$$

さらに、 Q の第 i 固有値を $\lambda_k^{(i)}$ とすれば、(8)式は

$$\sum_{k=1}^{p^{(i)}} u_k^{(i)'} Q u_k^{(i)} = \sum_{k=1}^{p^{(i)}} \lambda_k^{(i)} u_k^{(i)'} u_k^{(i)} = \sum_{k=1}^{p^{(i)}} \lambda_k^{(i)} \quad (11)$$

となるので、(8)式を最小にするためには、正規直交基底として $p^{(i)}$ 個の最小固有値に対応する固有ベクトルを選べば良いことがわかる。

部分空間 L_i は基底ベクトル $u_k^{(i)}$ ($k=1, \dots, p^{(i)}$) によって一意に決定されるので、すなわち以上の手続きによって、(2)式を最小化するように部分空間を決定することができた。

3.2.4 部分空間法によるミクセル分解

各クラスの基底ベクトル $u_k^{(i)}$ ($k=1, \dots, p^{(i)}$) が、相関行列の最小固有値に対応する固有ベクトルとして決定されれば、(3)式により射影行列 $P^{(i)}$ を計算することができる。このとき、未知スペクトル x に対する、各クラス部分空間 $L^{(i)}$ への射影の大きさは次式で計算することができる。

$$x' P^{(i)} x = \sum_{k=1}^{p^{(i)}} (x' u_k^{(i)})^2 \quad (12)$$

このクラス部分空間 $L^{(i)}$ への射影の大きさは、スペクトル x のクラス $\omega^{(i)}$ への帰属度を表している。そこでこの帰属度の自然な拡張として、スペクトル x に含まれているクラス $\omega^{(i)}$ のミクセル成分の抽出がこの部分空間への射影に対応していると考えて、各クラスへのミクセル分解をクラス部分空間への射影の大きさにより定義した。

3.3 多時期画像を用いた湿地分類

3.3.1 多時期画像の利用

解析対象地域は日本最大の湿原である釧路湿原で、総面積は約 18000 ha 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。

3.3.2 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1 m x 1 m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図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、イワノガリヤスや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。

3.3.3 湿原植生スペクトルの季節性

多時期に取得されたリ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図 3 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。

4 成果

4.1 植生・土壌・水指数の開発

4.1.1 解析地域と解析画像

解析対象地域は日本最大の湿原である釧路湿原で、総面積は約 18000ha ある。湿原の大部分は、ヨシ、スゲ群落の分布する低層湿原で、湿原中央部に赤沼周辺に存在する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。

解析に用いた画像は、1986年6月28日、9月9日、10月27日、および1991年6月26日、8月29日、11月1日に観測されたランドサットTM画像である。これらの画像を、近赤外バンドを赤、中間赤外バンドを緑、赤バンドを青に割り当てカラー合成して表示すると、画像中、赤く見える所に植物が存在し、青く見える所が裸地あるいは市街地で、黒く見える所が水域となる。6月は釧路湿原の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にあるヨシが混在して見られ、ハンノキ林でも葉の生育がすでに始まっている。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く見られる。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が残って他の植生タイプと明確に分離することができる。

ランドサットTMセンサーの地上分解能はバンド6を除いて約30メートルで、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捉えるのに十分な分解能となっている。解析に用いた画像は 1024 ピクセル 1024 ラインの大きさで、釧路湿原のほぼ全域が解析画像中に含まれる。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であることが知られている。

4.1.2 VSW指数の計算結果

それぞれの解析画像の画素を赤（バンド 3）—近赤外（バンド 4）軸にプロットした図を図 4 に示す。左列には 1986 年、右列には 1991 年の、それぞれ 3 季節の VSW 指数の散布図を示す。なお、散布図は同じ座標軸のスケールを持ち、頻度の濃度値は対数スケールで頻度が高いほど濃い色で表示されている。

また、上述したアルゴリズムによって自動決定された VSW のエンドメンバー点を頂点とする三角形が図中に表示してある。この図から、植生が枯れてしまう時期のエンドメンバーは大きく異なるものの、湿原内における年変化および季節変化にも関わらず、夏期のエンドメンバーはかなり類似したスペクトル散布図の 3 つの頂点として安定して抽出されることがわかる。

次に、エンドメンバー三角形の各辺に対応する直線の方程式を求めて、点と直線の距離から、V、S、W のそれぞれに対応する VSW 指数を計算した。すなわち、V 指数はスペクトル点と SW 直線の距離、S 指数はスペクトル点と VW 直線の距離、W 指数はスペクトル点と SV 直線の距離としてそれぞれ指数を求めた。

4.1.3 VSW指数の有効性の検討

VSW 指数の有効性としては、観測画像のデジタル値を直接に用いて土地被覆判読を行う場合に比べて、構成要素についての独立した情報が得られ、判別基準の作成が容易となる点があげられよう。実際、VSW のそれぞれの指数に色を割り当てたカラー合成画像から釧路湿原の年次・季節間にまたがる植生、水、土壌の分布特性の変動を読みとることができた。

しかしながら、PVI をはじめとする各種植生指数と同様、VSW 指数はあくまでもスペクトルから計算される値であり、観測対象の物理的状态に直接的に対応しているパラメータではない。今後、植生、土壌、水に関する物理的に計測されたパラメータと VSW それぞれの指数との関係が、実験的な研究によって明らかにされることによってはじめて、VSW 指数は定量的な指数として活用することができる。

また、ランドサット TM をはじめとする衛星画像の観測値は、画像取得時の大気状態によって影響され、またセンサーも時間経過とともに特性が劣化している。このため多時期の、特に数年間の時間差のある画像を比較して解析する際には、シーン間の大気補正やラジオメトリック補正が不可欠である。しかしながら、補正のための大気測定データ等が利用できることは極めて稀であり、多時期の画像を比較することは困難な課題である。

しかし VSW 指数では、シーン全体のスペクトル散布特性に基づいて指数が計算されているため、VSW 指数のエンドメンバー決定過程が一種の観測値の標準化処理として機能する。もちろん、対象領域内に植生のような季節変化が大きい対象が存在する場合については、エンドメンバー点の変動して VSW 指数を比較することができないが、図 4 における同一季節の VSW 三角形の安定性は、5 年の年次差を持つシーンに対しても、同じエンドメンバーを抽出することができることを示しており、VSW 指数の年次間変化抽出手法としての有効性を示している。

本研究で示された VSW 指数の地表面被覆モニタリングにおける有効性と計算処理自動化アルゴリズムによって、今後、VSW 指数の計算は各種衛星データの定常処理アルゴリズムの一つとしても用いることができるものと考えられる。

4.2 部分空間法による新たなミクセル分解

4.2.1 スペクトル画像を用いた部分空間法によるミクセル分解の実験

部分空間法を用いたミクセル分解の手法が、超多波長のスペクトル画像に対して有効に動作するかどうかを確認するために、casi (compact airborne spectral imager) の 288 チャンネルのスペクトル画像を用いてミクセル分解の実験を実施し、従来の統計的なミクセル分解の手法による結果と比較し精度を検討した。

4.2.2 解析画像

解析に用いた超多波長のスペクトル画像は、1993 年に 8 月に釧路湿原の赤沼周辺の高層湿原域を中心として取得した casi(compact airborne spectral imager)の画像である。casi は 1.8nm 幅で 470nm から 920nm までスペクトル計測できるセンサーを持ち、全部で 288 チャンネルのバンドの観測画像を取得することができる。casi の各種諸元と画像取得条件を表 1 に示す。撮影は高度 3000m 上空からセスナ 404 によって実施され、飛行高度とデータレコーダーの転送速度の制約から地上分解能は進行方向に長く 3.7x12.6m となった。画像中の各画素はこの分解能の中にある地上対象物の平均的なスペクトル特性を捉えている。尚、解析に先だって casi 画像に対して、航空機のローリングによる歪の補正とキャリブレーションデータに基づく各バンドデータの放射輝度補正を実施した。

4.2.3 ミクセル分解クラス

ミクセル分解に用いた 7 つの土地被覆クラスのスペクトル特性を調べると、植生クラス間のスペクトル特性の違いは大変微妙で、バンド数が少ないランドサット画像等では判別が困難である。また、これらの植生クラスは相互に重なり合いつつ連続的に変化しているため、既存の分類手法による解析には適さず、ミクセル分解により分布を抽出する必要がある。

4.2.4 ミクセル分解アルゴリズム

部分空間法によってミクセル分解を実現する具体的処理手順について以下に記す。

- 1) ミクセル分解する 7 つのクラスについて、現地調査によって確認されたそのクラスに対応するピュアピクセル (エンドメンバー) をそれぞれ 9 ピクセルずつ選択してトレーニングベクトルとする。
- 2) 各クラスのトレーニングベクトルを用いてクラス相関行列 Q_i を (6) 式によって計算する。
- 3) それぞれのクラスの部分空間をクラス相関行列を用いた (9) 式の固有値問題を解いて決定する。
(ただし各クラスの部分空間の次元は共通して 3 次元とした。)
- 4) casi 画像の各ピクセルについて各クラスの部分空間への射影を (12) 式を用いて計算する。
- 5) 射影 (ミクセル分解の成分) を規格化 (最大値が 1 に、最小値が 0 になるように) して画像化する。

4.2.5 ミクセル分解の各種手法

部分空間法と比較するために用いた既存のミクセル分解の手法は以下の 3 つである。

- 1) 最小 2 乗法 : 線形ミクセルモデルを仮定して、トレーニングベクトルを用いた最小 2 乗法によって各クラスの面積率を求める方法。

- 2) 2 次計画法 : 線形ミクセルモデルに、各クラスの面積率の総和が 1 になるという条件を加えて、最小 2 乗解を制約条件付きの 2 次計画法によって求める方法。
- 3) 直交部分空間射影法 : 他クラスの平均ベクトルが張る部分空間の直交補空間へのミクセルベクトルの射影を求めて、さらにクラス平均ベクトルとの内積を計算して各クラスのミクセル分解とする方法。

4.2.6 ミクセル分解の結果

部分空間法を用いて釧路湿原の casi 画像をミクセル分解した結果を図 5 に示す。また、既存の手法である最小 2 乗法、制約条件付き二次計画法、直交部分空間射影法よりミクセル分解した結果をそれぞれ、この結果と比較した。ただし図中の濃度は、それぞれのクラスのミクセル分解パターンが比較できるように、メンバーシップ値の最大値、及び最小値が 255.0 にそれぞれ対応するように表示されている。

部分空間法によるミクセル分解の精度を他の手法と比較して、現地調査によって知られている実際の植生分布の対応を調べたところ、ミクセル分解の精度について以下のような結果が得られた。

- 1) ヨシについては最小 2 乗法が最も現実に近いパターンを示した。
- 2) スゲについては部分空間法が 2 次計画法と並んで最も現実に近いパターンを示した。
- 3) スペクトルパターンが極めて類似しているミズゴケとイソツツジについては、2 次計画法のみが正確に判別した。これは 2 次計画法では制約条件式によって、ミクセルをクラス間の微妙な違いをとられてどちらかにどのクラスかに属するようにミクセル分解が作用するためと考えられる。
- 4) ハンノキについては、各手法ともほぼ正確な結果を示したが、部分空間法では、ハンノキに近いスペクトル特徴を持つヨシとの混同が見られた。
- 5) 水については、部分空間法のみが水域を明確に分離した。他手法では、水の分布が湿原域全体に広がる結果が得られた。ただし、これは湿原植生の下やミズゴケに含まれる水分が抽出されたためとも考えられる。
- 6) 道路については各手法とも良好な結果を示した。

4.2.7 ミクセル分解手法の評価

以上のミクセル分解の実験結果を基にしつつ、各手法に関する評価をまとめると以下の通りである。

- 1) 道路、水、スゲなどの他クラスとのスペクトル特性の違いが明確なクラスのミクセル分解については、部分空間法によるミクセル分解は正確な結果を示す。
- 2) スペクトル特性が類似しているイソツツジとミズゴケなど、分離が困難なクラスについては、2 次計画法が最良の結果を示し、部分空間法では分離できなかった。
- 3) 直交部分空間射影 (OSP) 法による結果は、最小 2 乗法による結果と完全に一致した。
- 4) 総合的に判断して、2 次計画法が最も現実に近いミクセル分解の値を示したが、2 次計画法問題を解くために必要な制約条件付きの探索を行う計算時間に比べて、部分空間法は解法に必要とする時間が少ない利点がある。特にミクセル分解が内積演算により計算されるため並列処理に適している。
- 5) 最小 2 乗法や 2 次計画法では、チャンネル間の多重線形性が一般逆行列等の行列計算の際の不安定性を引き起こす可能性があるが、部分空間法では相関行列の固有値が用いられ、固有値問題の解法には反復法などの数値的に安定なアルゴリズムを用いることができる。また、サンプル数が少ない場合についても、クラス部分空間の次元を調整することで対応できるため、サンプル数にとらわれ

ずに正確なエンドメンバーのみを用いることができる利点がある。

4.3 多時期画像を用いた湿地分類

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。

4.3.1 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1024 x 1024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。

4.3.2 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。）

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。

4.3.3 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。

4.3.4 最尤法分類

多時期の合成画像を用いて最尤法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図6に示す。

4.3.5 分類結果の評価

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、冠水地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、池とうやヤ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。

5. まとめ

5.1 植生・土壌・水指数の開発

垂直植生指数 (PVI) は植生量を定量するために、スペクトル空間におけるソイルラインからの距離を測って指数としている。本研究では、この考え方を土壌、水の場合について発展させ、植生 (V)、土壌 (S)、水 (W) のそれぞれを同時にモニタリングする VSW 指数を開発した。またこれまでのミクセル分解等の研究ではエンドメンバー点は画像から目視で決定されていたが、本研究では、赤一近赤外スペクトル散布図上の頻度分布に三角形分布を最適化によって当てはめることによって、自動的に V、S、W のエンドメンバー点を決定するアルゴリズムを開発した。開発された VSW 指数の計算方法を釧路湿原の多時期ランドサット TM 画像に応用したところ、湿原内での植生、土壌、水の分布と時間変化の様子が良好に抽出された。また本手法では、衛星画像からの V、S、W のエンドメンバー点の決定と VSW 指数の計算が自動化されているため、スペクトルデータを標準化して年次間変動を解析するために活用することができる。

5.2 部分空間法による新たなミクセル分解

部分空間法を用いたミクセル分解の新技术を提案し、超多波長のスペクトル画像を用いた湿原植生ミクセル分解に応用した。部分空間法によるミクセル分解の手法は、既存のミクセル分解の手法に比較して、学習過程や分解過程に計算の高速性や超多波長画像に対する数値的安定性において優れている。また、c a s i 画像を用いた湿原植生のミクセル分解の実験を実施したところ、非常にスペクトル特性が類似している 2 つのクラスを除いて、他手法に劣らぬミクセル分解の結果が得られた。近い将来、リモートセンシング画像のチャンネル数が急速に増加し、また分解能が向上してますます解析画像が大規模化する中で、計算の高速性・安定性に特徴を持つ部分空間法は有力なミクセル分解手法となることが期待できる。今後はさらに、極めてスペクトル特徴が近いクラス間の分離処理を、部分空間の決定のアルゴリズムに取り入れてゆく手法を開発する予定である。

5.3 多時期画像を用いた湿地分類

本研究では、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。また、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。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。

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。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。

6. 参考文献

- 1) 山形与志樹、杉田 幹夫、安岡 善文 「植生・土壌・水 (VSW) 指数アルゴリズムの開発とその応用」 日本リモートセンシング学会誌 17 巻 1 号 54～64 頁 1997
- 2) 山形与志樹 「部分空間法によるミクセル分解と超多波長画像への応用」 写真測量とリモートセンシング 35 巻 3 号 34～42 頁 1996
- 3) 山形与志樹、小熊 宏之、富士田 裕子 「多時期のランドサット TM 画像を用いた湿原植生分類」 写真測量とリモートセンシング 35 巻 4 号 9～17 頁 1996

「国際共同研究の状況」

オーストラリア国立大学地理学科と多時期リモートセンシング画像を用いた湿地分類手法の開発に関する共同研究を実施した。各種分類手法を用いて、多時期のOPS画像を用いたワレゴ、ダーウィン、マックワイアリー地域における湿地分類図を作成した。

「研究成果の発表状況」

(1) 口頭発表

- ① 山形与志樹、安岡善文：日本リモートセンシング学会第 19 回学術講演会(1995)「部分空間法によるミクセル分解」
- ② 山形与志樹、岩熊敏夫、安岡善文：日本リモートセンシング学会第 20 回学術講演会(1996)「CASI 画像と微細標高データの重ね合わせ解析によるモニタリング」
- ③ Yoshiki Yamagata, Yoshifumi Yasuoka：国際写真測量とリモートセンシング学会 (1996) “Unmixing Wetland Vegetation Types by Subspace Method using Hyperspectral CASI Image
- ④ Yoshiki Yamagata, Hiroyuki Oguma：国際地球科学とリモートセンシング学会 (1997) “Bayesian Feature Selection for Classifying Muti-temporal SAR and TM Data”
- ⑤ 山形与志樹：日本リモートセンシング学会第 22 回学術講演会(1997)「ガウシアンプロセスを用いたリモートセンシング画像分類」

(2) 論文発表

- ① 山形与志樹、安岡 善文、宮崎 忠国、小熊 宏之、森山 隆、中谷 幸弘「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 15 巻 3 号 22～35 頁 1995
- ② 山形与志樹：「部分空間法によるミクセル分解と超多波長画像への応用」 写真測量とリモートセンシング 35 巻 3 号 34～42 頁 1996
- ③ 山形与志樹、小熊 宏之、富士田 裕子 「多時期のランドサット TM 画像を用いた湿原植生分類」 写真測量とリモートセンシング 35 巻 4 号 9～17 頁 1996
- ④ 山形与志樹、安岡 善文、岩熊 敏夫：「casi 画像と微細標高データの重ねあわせ解析による湿原モニタリング」 日本リモートセンシング学会誌 16 巻 4 号 33～40 頁 1996
- ⑤ 山形与志樹、杉田 幹夫、安岡 善文：「植生・土壌・水 (VSW) 指数アルゴリズムの開発とその応用」 日本リモートセンシング学会誌 17 巻 1 号 54～64 頁 1997

(3) 受賞等

- ① 1996 年度 日本リモートセンシング学会論文奨励賞： 山形与志樹「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」

② 1998 年度 第一回尾瀬賞： 山形与志樹「リモートセンシング画像を用いた湿地環境監視について」

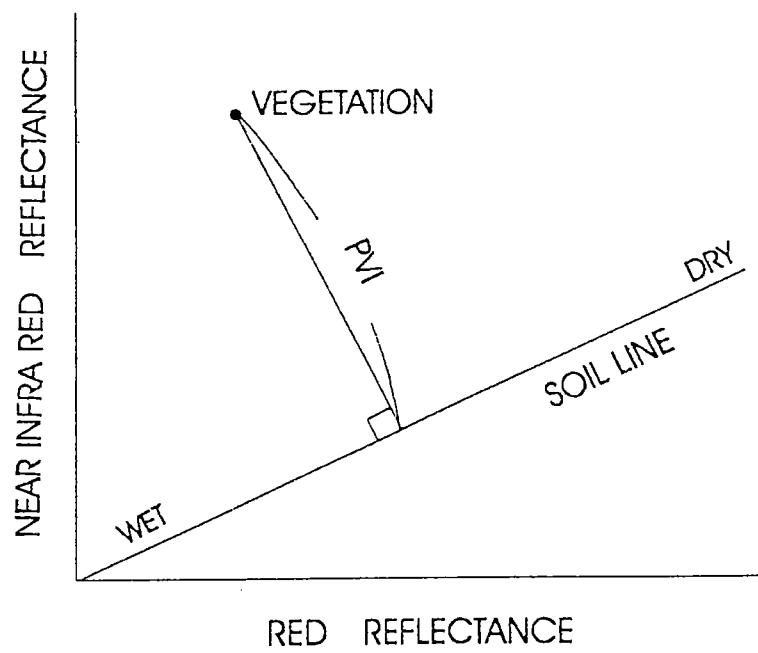


図1 VSW 指数の計算原理

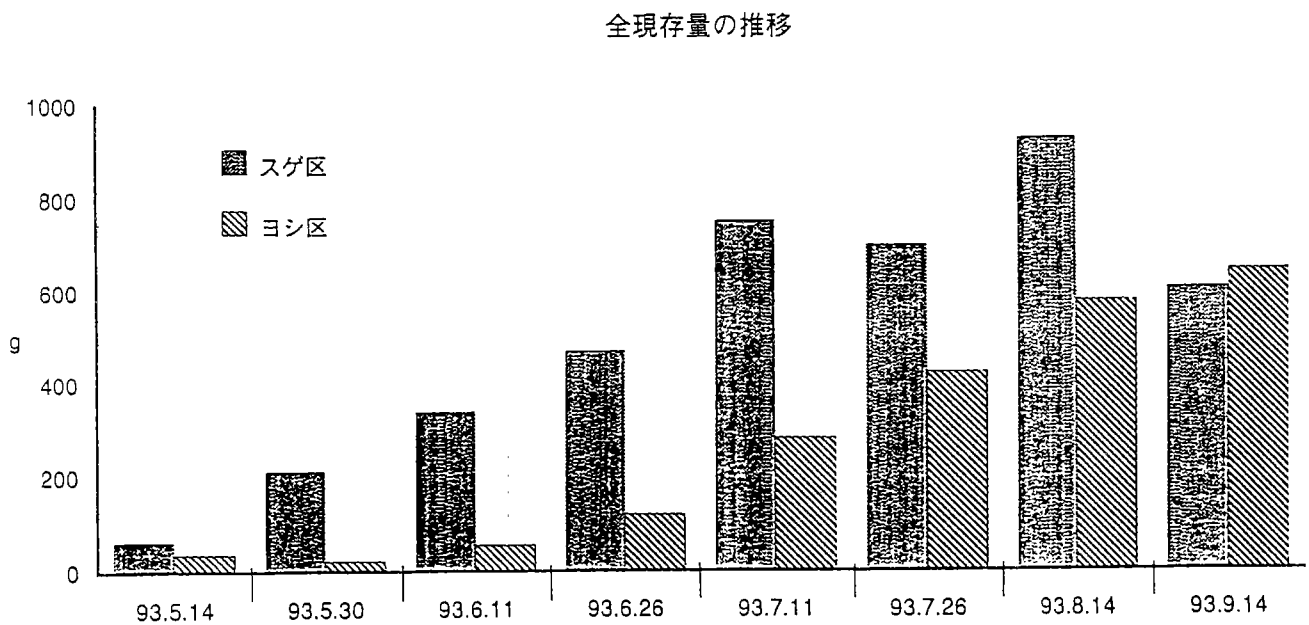


図2 ヨシ、スゲ区の地上部バイオマス量のサンプリング結果

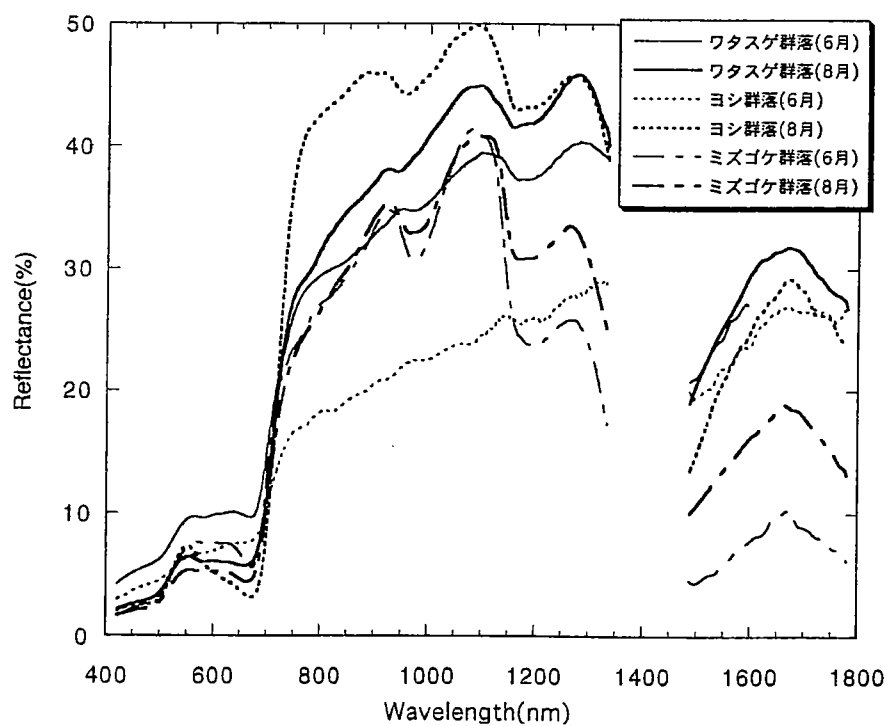


図3 湿原植生スペクトルの季節変動

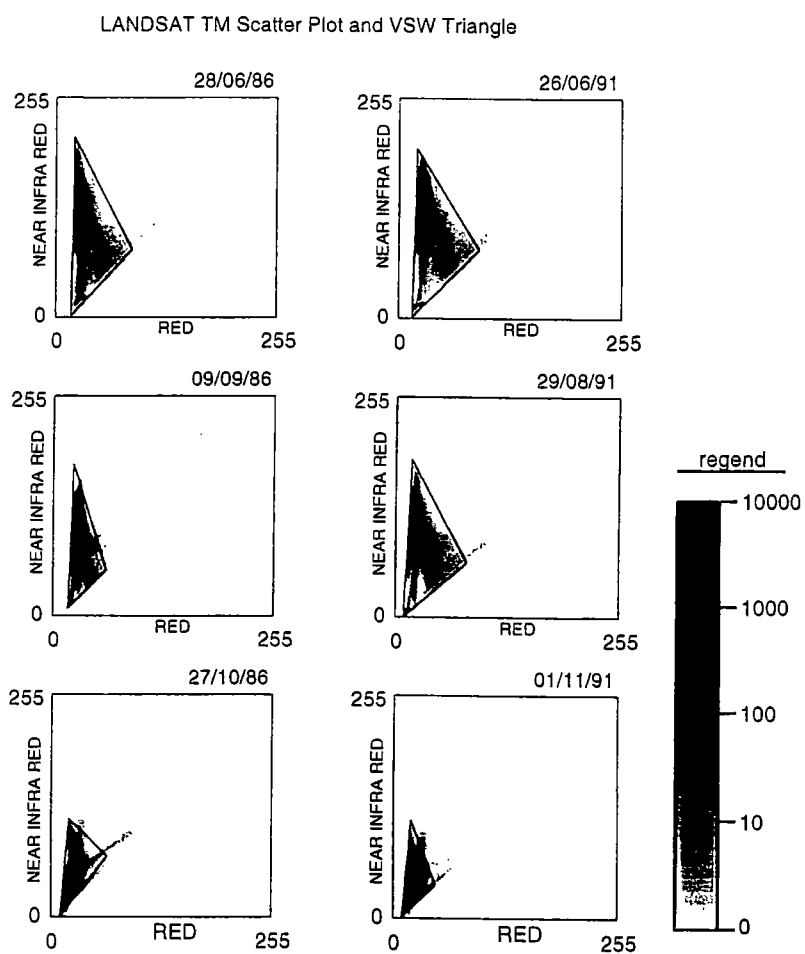


図4 TM画像の赤-近赤外散布図とVSWエンドメンバーの三角形

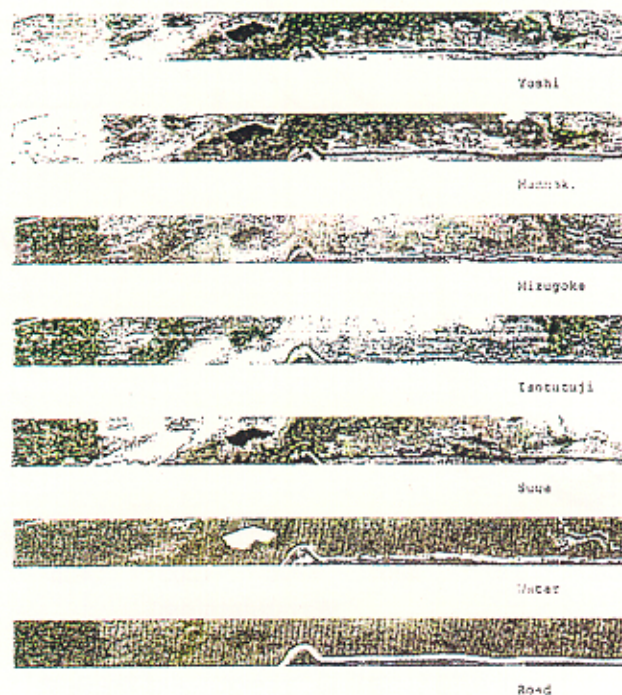
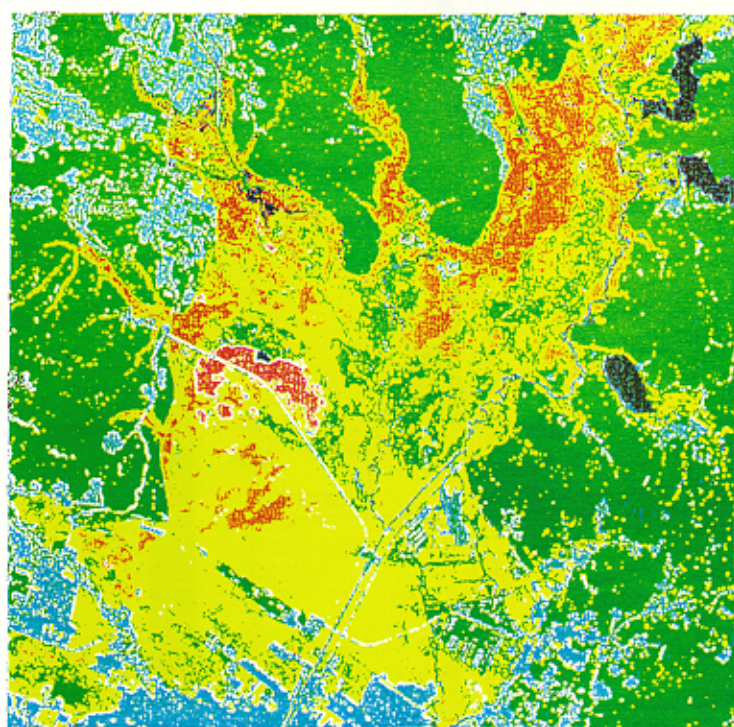


図5 部分空間法による CASI 画像のミクセル分解結果



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) |

図6 多時期ランドサット TM 画像を用いた釧路湿原植生分類図