LANDSAT/TM/ETM+多時期データによる戦場ヶ原湿原のモニタリング

Monitoring in Senjyogahara wetland using multitemporal
LANDSAT TM/ETM+ data

松英 恵吾*・佐藤 匠**・小谷 英司***・内藤 健司*
Keigo MATSUE, Takumi SATO,
Eiji KODANI and Kenji NAITO

Abstract : The purpose of this study is a monitor of Senjyogahara wetland by multitemporal LANDSAT TM/ETM+ data. Four indices of NDVI, MWCI, Cv, and Cw were used for the analysis. Cv, and Cw are indices calculated by the pattern decomposition method. The principal component analysis (PCA) and the change vector analysis (CVA) were used for the time series analysis. As a result of the PCA, the principal ingredient in which the change in the period was shown about four indices was able to be obtained. The change of 15 years in the marshland was clarified by the result of those principal ingredient and CVA. 1) Senjyogahara region is made dry. 2) Odashirogahara region is made moist. 3) Sakasagawa-river inflow part is made dry. 4) The water current dividing into parts with the national road has gone. The above-mentioned tendency was able to be confirmed.

1. はじめに

戦場ヶ原湿原は日光国立公園の特別保護地区であり、現在ラムサール条約の対象候補地となっている湿原であるが、乾燥化による森林化が進行しているといわれている。波田（1984）は具体的な乾燥化の要因として、中央を縦断する国道による水流の分断、太平洋戦争後の湿原周囲のカラマツ造林とそれに伴う排水溝の設置、湿原の水供給源である逆川の開拓農場による大量取水、男体山・太郎山の斜面崩壊で生じた土砂の逆川からの流入などをあげている。しかし、これらの要因について具体的な調査がほとんど行われていないためそれぞれが推測の域をでていない。対象地は小田代ヶ原を含めると約380haと面積が広大であり、そもそも湿原という現地調査が困難な環境であることに加え、特別保護地区であるために立ち入ることも自由に行えない状況である。Hukusima ら（1997）が逆川流

入域の6ha程度の区域を対象地に植生調査を行っているがこれは湿原全体からみるとごく一部を対象にしたものである。このような対象地についてモニタリングを行うには衛星リモートセンシングの広域性、継続性が有効となる。リモートセンシングによる湿原モニタリングの事例では、Pope ら（1992）が中央アメリカにおいて航空機 Radar により湿原を含む地域の評価指標を検討している。国内では、内藤ら（1990）が戦場ヶ原湿原を含む地域を対象に LANDSAT・TM による森林植生のスペクトル特性の季節変化を検討している。また、釧路湿原を対象に、小熊ら（1996, 1997a, 1997b）が観測に有効な観測波長帯の選定を、山形ら（1996）が LANDSAT・TM を使用した最尤分類による植生分類を行っている。しかし、これらはいずれも対象期間が短期間で、長期間にわたる事例はない。また、植生と水分状態の両面からモニタリングをした事例も存在していない。

本研究では中解像度衛星ながらこれまで長期の観測データを蓄積している LANDSAT・TM/ETM+ のデータを用いて、湿原の植生の状態、水環境の状態の両面からのモニタリング手法を検討した。解析に際しては季節・時期の異なるデータを利用するために輝度差調整を行い、特に湿原のモニタリングに適した指標

* 宇都宮大学農学部

〒321-8505 宇都宮市峰町350 Tel: 028-649-5532

** アクリーグ(株)

*** 森林総研四国支所

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 44, NO. 6, 2005

の検討，異なる季節が含まれる時系列データからの変化抽出手法の検討という2点に主点をおいて，戦場ヶ原湿原全域のモニタリングを行い，湿原全域の状態把握と時間的変化を明らかにすることを目的とした。

2. データと方法

2.1 対象地

本研究の対象地は栃木県北西部，およそ北緯36度46分・東経139度26分に位置する日光戦場ヶ原・小田代ヶ原，面積約380haである。戦場ヶ原湿原には高層湿原から低層湿原まで幅広く分布し，大半を中層湿原が占める。国道120号線が戦場ヶ原湿原の東部を縦断し，自家用車・バス等で簡単に訪れることのできる湿原として観光資源としての価値が高い。湿原の水分供給源としては逆川を主とする太郎山・男体山等の周囲山地からの伏流水がある。対象地の地図を図1に示す。なお，我々は対象区域内，周辺に11点の定点観測点（図1中P番号で示した点）を設定し1989年から2001年の間，毎月カメラで撮影することにより，土地被覆の経年変化，季節変化をモニタリングしている。

2.2 使用したデータと前処理

使用したデータは Landsat・TM/ETM+データで，

対象地に雲，積雪がないデータを選定した。結果，1984年から2000年までの計15シーン（パス・ロー：107-35）が選定された。シーンの一覧を表1に示す。データの処理レベルは TM データがバルク補正済み，ETM+データがレベル1Gで，リサンプリング法はCC法である。なお以降，各シーンについて述べるときは表1に記してあるシーン番号を使用する。各データについてそれぞれ RMS 誤差が0.5ピクセル以内になるように幾何補正を行った。ところで，使用したデータは15

表1 使用したシーン一覧

シーン番号	衛星センサ	観測日	通算日 (DOY)
TM8407	L5-TM	1984/ 7 /31	212
TM8508	L5-TM	1985/ 8 / 3	214
TM8704	L5-TM	1987/ 4 /19	108
TM8705	L5-TM	1987/ 5 /21	140
TM9004	L5-TM	1990/ 4 /11	100
TM9012	L5-TM	1990/12/ 7	340
TM9206	L5-TM	1992/ 6 / 3	154
TM9304	L5-TM	1993/ 4 /19	108
TM9305	L5-TM	1993/ 5 /21	140
TM9310	L5-TM	1993/10/28	300
TM9511	L5-TM	1995/11/19	322
TM9812	L5-TM	1998/12/13	346
TM9911	L5-TM	1999/11/14	317
TM0007	L5-TM	2000/ 7 /11	192
TM0011	L7-ETM+	2000/11/24	328

図1 解析対象地と現地定点撮影地点

年間にわたっており観測されたもので季節も様々であるため、センサのゲインの経時変化等の影響を受けており、このデータをそのまま使用して時系列解析することには問題がある。そのため加えて、栗屋ら(1999)の方法に準じ、植生を含まず期間内のスペクトルの年変化、季節変化が小さいと思われる地表物を抽出し、それを基に基準画像(TM8407)と各シーンを回帰分析し、DN マッチングを行った。

2.3 使用した指標

湿原のモニタリングを行う上で、湿原における土地被覆の変化を考えると、乾燥化すると植生が繁茂し、湿潤化すると水が覆う面が増えるということがいえる。このことから、植生と水に関する指標を用いてモニタリングを行うことが妥当である。本研究では、1) 植生の指標として NDVI、2) 植物の水ストレスによるスペクトル変動を表す指標として穴沢ら(2000)による MWCI、3) 植生と水を指標として扱うため、藤原ら(1996)によるパターン展開法による植生の展開係数(Cv)、水の展開係数(Cw)を算出して解析に用いた。

NDVI は、最もよく用いられている植生指標で以下の式によって求められる。

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \quad (1)$$

ここで、TM4：TM のバンド 4 データ、TM3：TM のバンド 3 データである。

MWCI は穴沢ら(2000)が提案した指標で、TM4 と TM5 の関係から植物中の含有水分を指標化したもので、式(2)によって求められる。

$$MWCI = \frac{-\log\left[1 - \left(\alpha \frac{TM4}{A} - \beta \frac{TM5}{B}\right)\right]}{-\log\left[1 - \left(\alpha \frac{TM4ft}{A} - \beta \frac{TM5ft}{B}\right)\right]} \quad (2)$$

ここで、A：全シーン・全ピクセル中の TM4 の最大値、B：全シーン・全ピクセル中の TM5 の最大値、 α ：反射率係数(1)、 β ：反射率補正係数(TM4 と TM5 のスペクトルバンドにおける理論上の太陽放射の比(0.2))、TM4ft：全シーンにおけるピクセル毎の TM4 最大値合成データ、TM5ft：全シーンにおけるピクセル毎の TM5 最大値合成データである。この指標は値が大きいほど植物の水分ストレスが小さく(湿潤)、小さいほど水分ストレスが大きい(乾燥)であることを示している。

パターン展開法は、藤原ら(1996)によって開発された解析手法で、衛星データに含まれる情報をスペクトルパターン情報と輝度情報に分離することで、季節や地域などによる影響を取り除き、多次元データを 3 次元データに集約するものである。この手法では、任意のピクセルのデータを水・植生・土壌の 3 つの基本スペクトルパターンにより、それぞれの寄与率であるパターン展開係数に変換する方法である。この手法で得られるパターン展開係数は、それぞれ植生、水、土壌の成分のスペクトル情報に基づいた指標で、各ピクセルが 3 つにミクセル分解された形で表現される。そのため、ピクセルに含まれる他の成分の影響を取り除いて各指標を扱うことができる。任意のピクセルのデータは、以下の式で表される。

$$V_i = P_{iw}A_w + P_{iv}A_v + P_{is}A_s \quad (3)$$

ここで、 V_i ：バンド i における各ピクセルの規格化された値、 P_{iw} 、 P_{iv} 、 P_{is} ：バンド i における水・植生・土壌のパターン基準値、 A_w 、 A_v 、 A_s ：水、植生、土壌のパターン成分の展開係数である。本研究では、展開に使用した基本スペクトルパターンについては、DN マッチングした同一シーン内において水のサンプルを海域の浅瀬・沖・河口・陸域の河川・ダム湖から、植生のサンプルをスギ・ヒノキ・クヌギの人工林・広葉樹林・モミ・ツガ林から、土壌のサンプルを植栽前の皆伐地・グラウンド・裸地からそれぞれ DN 値を抽出し、水、植生、土壌毎に平均値を算出し使用した。各シーンについて、TM6(熱赤外)を除く 6 バンドのデータを使用し、基本スペクトルパターン、各バンドのデータを正規化し、最小自乗法によりパターン展開係数を算出した。

2.4 時系列解析

衛星データによるモニタリングに関してはこれまでに多くの報告があり様々な手法が提案されている。栗屋(1990)、栗屋ら(2003)は時系列解析として季節が同等の異なる 2 時期のデータを主成分分析すると、第 1 主成分と直行する第 2 主成分にその期間の変化が示されるとしている。一方で異なる季節データを用いた事例として、李(1991)は NOAA・AVHRR データの各月データを主成分分析し各主成分に含まれる変動パターンを検討している。Eastman ら(1993)は 36 シーンのアフリカ大陸の NDVI データを使用し主成分分

析によって時系列解析を行っている。本研究では異なる季節の多時点データに対して主成分分析による時系列解析を行った。

また、一方でパターン展開法により得られた Cv, Cw を用い、2次元の CVA による時系列解析も行った。CVA は多次元・多時期のデータについて、データ間の差をベクトルとして捉え、その方向と大きさにより変化の種類と程度を把握する手法である(沢田ら(1984), 小谷ら(1992), Allen ら(2000))。Cv, Cw 次元上でのベクトルの方向と大きさにより、湿原の乾燥・湿潤化の傾向について時系列解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 主成分分析

15シーン全てについて NDVI, MDCl, Cv, Cw の4つの指標を算出し、指標毎に主成分分析を行った。結果、得られた各主成分の固有ベクトルと各主成分のスコア画像をもとに指標毎に各主成分についての解釈を行い、期間内の変動を示す主成分の探索を行った。各主成分のスコア画像については主成分スコアの平均値±σ, 2σ, 3σを閾値に7つのクラスに区分し、そのクラス毎に各指標の平均値の期間内変動を検討した。さらにシーンを季節毎にグルーピングして、固有ベクトル、スコア値を参照することで各主成分の解釈を行った。表2に指標毎の主成分の解釈結果を示す。各指標とも第1主成分(PC1)では指標の大きさ、つまり期間内における指標の平均値の大きさを示していた。画像としては各指標とも各ピクセルの土地被覆状態に対応している。第2主成分(PC2)以降、第4主成分(PC4)までの主成分はそれぞれ、期間内における指標値の最大、最小値のレンジの大きさ、季節変動、変動の大きい特定時期(開葉期, 夏期(多水期)), 期間内の変動を示していた。第5主成分以降の高次の主成分については目的である期間内変動を示す主成分が確

認できたため解釈は行わなかった。結果的に MWCI は PC2, NDVI, Cv, Cw は PC4が期間内の変動を示す主成分であった。

図2に各指標の期間内変動を示す主成分のスコアを7つのスコアクラス毎にシェードカラー表示した画像を示す。また、図3に期間内変動を示す主成分のスコアクラス別の各指標の平均値の変動を示す。

図3では各指標とも、期間内でスコアクラスの順位が反転している。NDVI, Cv, Cw では期間の当初はスコアクラスが高い順に平均値が高くなっているが、期間の最後ではスコアクラスが高い順に平均値が低くなっている。これはスコアの高いクラスの指標値が期間内に減少傾向、低いクラスの指標値が期間内に増加傾向にあることを示している。MWCI では逆に、期間の当初はスコアクラスが低い順に平均値が高くなっており、期間の最後ではスコアクラスが低い順により平均値が低くなっている。これはスコアの高いクラスの指標値が期間内に増加傾向、低いクラスの指標値が期間内に減少傾向にあることを示している。NDVI, Cv では夏期(シーン8407, 8508, 0007)には多くのスコアクラスで平均値が上昇し、開葉期(シーン8705, 9206, 9305)には一部のスコアクラスのみで平均値が上昇する傾向が確認できる。また、MWCI では夏期(シーン8407, 8508, 0007)に一部のスコアクラスの平均値が上昇し、Cw では逆に一部のスコアクラスの平均値が低下している。この平均値の変動はスコアクラス毎の土地被覆に対応した季節変化を示すものであるが、期間内でその季節変化の傾向を示すスコアクラスが入れ替わっており、これはそのスコアクラスにおいて土地被覆が変化していることを表している。このことからこれらの主成分が季節変動によらずそれぞれの指標の期間内変動を示していることが確認できる。

NDVI(図2a), Cv(図2b)では、特に湿原への土砂流入源であり上流で開拓農地への取水が行われている逆川流入部の扇状地部分(図中黒丸1, 6)が

表2 各指標の主成分の解釈結果

主成分	NDVI		MWCI		Cv		Cw	
	解釈結果	寄与率(%)	解釈結果	寄与率(%)	解釈結果	寄与率(%)	解釈結果	寄与率(%)
PC1	指標の大きさ	60.0	指標の大きさ	65.3	指標の大きさ	59.8	指標の大きさ	44.0
PC2	レンジの大きさ	13.9	期間内変動	10.5	レンジの大きさ	16.2	夏季の変動	31.9
PC3	季節変動	9.0	季節変動	6.9	開葉期の変動	10.0	開葉期の変動	5.6
PC4	期間内変動	4.0	開葉期の変動	5.4	期間内変動	4.3	期間内変動	4.6

図2 各指標の期間内変動を示す主成分のスコアクラス・シェード画像

図3 期間内変動を示す主成分のスコアクラス別の各指標の平均値の変動

図6 Cv, Cw のCVA ベクトル合成画像

a) 図2 黒丸1, 2, 6, 8 区域の航空写真(1994年10月23日 日林野庁撮影)

b) 定点 P6, 1989年 7月24日撮影写真

c) 定点 P6, 1999年 7月19日撮影写真

図4 乾燥化の傾向が認められる区域の航空写真と現地定点撮影写真

NDVI, Cvとも共通して増加傾向にあり、植生の活性化もしくは量が増加していると考えられる。図4は逆川流入部の扇状地部分の航空写真と定点P6(図1)で撮影された写真である。1989年には湿原と森林の境界域であった場所(図4b)が1999年にはズミ、イヌコリヤナギ、シラカンバ等が繁茂して森林化しており(図4c)、10年間に明らかに植生が増えていることが確認できる。Cv(図2b)で小田代ヶ原北部に極端に減少傾

向にある区域(図中矢印7)が見受けられるが、これは過去に人為的に湿原の乾燥化を促進するために植えられたカラマツ植林地で立地の悪さから不成績造林地化している林分である。

MWCI(図2c)では逆川流入部の扇状地部分(図中黒丸2)で増加しており、これは指標の意味から解釈すると植物の水分ストレスが減少(葉内含水率の増加)していることを示している。一方Cwで同じ逆川流入部の扇状地部分(図中黒丸8)は減少しており、これは水分の減少によるものであると考えられる。NDVI, Cvの変動傾向とあわせて考えると、この場所では、水分の減少→植生の増加つまり乾燥化が起きていることを示唆している。

MWCIでは指標値の減少傾向が、Cwには指標値の増加傾向が認められる南戦場ヶ原中央部(図中白丸3, 9)では、逆に湿潤化の傾向にあると考えられるが、NDVI, Cv画像では特に大きな変化は見られない。これは、湿原植生が変化したわけではなく水位の変化などの影響であると考えられる。図5にMWCI, Cwで変化の見られた場所の航空写真と定点観測写真を示す。南戦場ヶ原中央部は航空写真(図5a 白丸内)でも冠水している様子が確認できる。また、定点P10(図1)から撮影した写真(図5b)では谷地坊主が発達した中層湿原であることが確認でき、水位変化があることを示唆している。

NDVIとCvは比較的類似した傾向を示しているが、MWCIとCwについては前述した2カ所については同様の傾向となっているものの、MWCIだけに国道120号線東側(図中白丸4)、小田代ヶ原(図中白丸5)に植物に対する水ストレスの増加(葉内含水率の減少)傾向が認められる。この区域を航空写真(図5c, e)、定点観測写真(図5d, f)で確認すると、降雨後など水位が高くなった時に冠水状態になる場所と一致している。MWCIのPC2のスコアクラスで抽出された変化箇所はどれも現地観測による結果と矛盾しないものであるが、この指標は植物の葉内含水率と分光反射の関係から導き出された指数であり(穴沢, 2000)、水域や土壌域などを考慮した指標ではない。TM4に比べてTM5の波長帯では水の吸収が大きいため、冠水域では植物の葉内含水率ではなく、水の吸収特性が影響して結果的に指標値が小さくなってしまっていることが考えられる。このことから、MWCIによる結果を本来この指標の意味する植物の水分ストレスのみと結びつけ

a) 図2 白丸3, 9区域の航空写真(1994年10月23日林野庁撮影)

b) 定点 P10, 2002年7月12日撮影写真

c) 図2 白丸4区域の航空写真(1994年10月23日林野庁撮影)

d) 定点 P10, 2001年10月18日撮影写真

e) 図2 白丸5区域の航空写真(1994年10月23日林野庁撮影)

f) 定点 P8, 1999年10月18日撮影写真

図5 湿潤化の傾向が認められる区域の航空写真と現地定点撮影写真

て解釈することには問題があると考えられる。MWCIと植生以外の土地被覆との関係については、分光反射を測定してより深く検証することが必要である。そこでCVAではCvとCwを軸に採用して解析を行った。

3.2 CVA

CvとCwをそれぞれx, y軸に取り、期間内の時点毎の変化を合成したベクトルの方向と大きさを算出しCVAによる時系列解析を行った。図6は各ピクセルのベクトルの象限毎に色を割り当て、ベクトルの大きさに応じて色の濃度を変えてCVAの結果を画像化したものである。第2象限への変化はCvが減少、Cwが増加した区域で湿潤化傾向にある。また、第4象限への変化はCvが増加、Cwが減少した区域で乾燥化(森林化)傾向にある。CVAの結果においても各指標の主成分分析の結果と同様に、逆川の扇状地先端部(図中白丸)に顕著な乾燥化傾向が認められた。この地域についてはHukusimaら(1997)により行われた現地調査の結果でズミの繁茂など植生変化が見られるとされる区域で、本研究で得られた変化区域は場所、形状ともほぼ一致する。また、図4b, cの写真からもこの場所で森林化が進んでいることは明らかである。このことから本研究の解析結果の有効性が確認できた。また、南戦場ヶ原中央部、東戦場と小田代ヶ原(図中矢印)で多少ではあるが湿潤化の傾向が認められた。これはMWCI, Cwの主成分分析結果と一致する。特に、Cwの主成分分析結果(図2d)のみでは東戦場と小田代ヶ原の湿潤化傾向は確認できなかったが、CvとCwを組み合わせてCVAを行うことでMWCIの主成分分析結果と同様の傾向が確認できたことは興味深い結果である。東戦場で湿潤化が見られる区域は湿原を横断する国道(図中橙色線)に沿った形で現れており、波田(1984)が指摘したように国道により水の移動が妨げられていることを示すものである。図5dは定点P10(図1)付近の国道東側を撮影した写真であるが、国道脇で地下から湧水し、冠水している様子が確認できる。戦場ヶ原湿原では河川としては逆川が直接の流入源であるが、地下水を含めた湿原全体の大きな水の流れとしては、北東から南西へ向かっていると考えられる。これを横切るように設置されている国道の影響が視覚的に確認できたことは大きな成果である。南戦場ヶ原中央部、小田代ヶ原については地下水の湧き出し等が

原因として考えられるが、その原因は水分環境について詳しい現地調査、モニタリングを行わないと断言はできない。

湿原全域でみると、戦場ヶ原は前述したように局所で特徴的な変動は認められるものの、全ピクセル中の80%近くが第4象限方向の変化となっており、全体的にはやや乾燥化の傾向であった。一方、小田代ヶ原では対照的に第2象限方向の変化が大半を占め湿潤化の傾向にあった。小田代ヶ原は降雨後に度々冠水し、その状態が長いときには数ヶ月続くことが定点観測によって確認されている(図5f)。今回の解析結果で小田代ヶ原において湿潤化の傾向が示された原因の一つとして、湿原植生の変化よりも冠水による影響の方が大きかったことが考えられる。

CVAの解析結果の問題点としては以下のことがあげられる。図6は象限毎にクラス分けして画像化しており、限りなく他の象限に近いベクトルの向きを持つピクセルと、典型的にその象限への変化を示すピクセルが同一に扱われており、ベクトルの持つ方向の意味が十分に表現できていない。また、ごく一部であるが、第1象限、第3象限方向への変化を示すピクセルも存在するが(第1象限が全ピクセル中4.3%、第3象限が同じく3.2%)、この変化の解釈と現地の対応は明らかになっていない。今回は時点毎の変化ベクトルを合成しているため、栗屋ら(2003)が指摘しているように、質の異なる変化が結果的に同じようなベクトルで示れてしまっていることが考えられる。

以上のような問題点はあるものの、CVAと各指標の主成分分析それぞれの解析結果を比較すると、特にMWCIのPC2(図2b)とCv, CwのCVA(図6)で乾燥化、湿潤化が認められる場所に共通性が認められ、その場所の変化傾向は現地観測結果と矛盾しない。NDVI, Cv, Cwの主成分分析の結果では一部の変化傾向は抽出できるものの、CVAの解析結果と傾向が一致しない場所も認められる。現地観測結果との整合性のみだけでそれぞれの解析結果を断定的に評価することはできないが、本研究の結果ではMWCIの主成分分析、Cv, CwのCVAが戦場ヶ原湿原のモニタリング手法として有効であることが示唆された。

4. おわりに

本研究では、Landsat・TM/ETM+の多時期多季節

データを用いた時系列解析による湿原のモニタリングを行った。

本研究では4つの指標を使用し2通りの時系列解析を行った。その結果、MWCIの主成分分析、Cv、CwのCVAで現地観測と矛盾しない解析結果が得られた。この結果から湿原という対象をモニタリングするには植生と水分環境の両面から検討することが、有効であることが確認できた。具体的なモニタリングの成果としては、これまで推測で語られてきた戦場ヶ原全体の乾燥化の傾向や、国道の水流分断を裏付け、さらに逆川流入部の乾燥化傾向を検証できる結果を示すことができた。

また、中解像度ながら、過去の観測結果が多く蓄積されていることがLANDSAT・TM/ETM+データの長所であるが、目的とする時期、季節のデータが必ずしも存在するとは限らない。しかし、本研究の結果、主成分分析により異なる季節が含まれる時系列データから期間内の変動を示している主成分を得ることができると明らかとなった。また、CVAの解析結果でも主成分分析と同じ傾向の解析結果が得られた。これまで時系列解析では比較する時点の季節をできるだけ揃え解析を行ってきたが、先に述べたように目的とする季節のデータが存在しないことが多く、運良くデータが存在したとしてもその時点毎の気候差の影響など、たとえDNマッチングを行っても変化を抽出するには避けることができない問題が生じる。本研究でも解析の過程では、季節毎に分類した時系列解析を試みたが、開葉期(4~6月)は植生の変動が不安定であったり、夏期(7~8月)には降水直後かどうかなどの気象条件が湿原の水位に影響し、それが植生や水分環境の変化として抽出されてしまったり、秋期、冬期(10~12月)では湿原の水位は安定しており水分環境の変化が抽出できるものの、湿原植生が消失しており植生の変化を抽出することができなかった。また、組み合わせによっては変化抽出期間が短くなるといった問題もあった。本研究では期間内変動に注目して解析を行ったが、表2に示すように、季節変動、変動の大きい特定時期の変化を示す主成分も抽出できており、これらの主成分の変化をあわせて解析することで、より多角的に湿原をモニタリングすることができると考えられる。ただし、本研究では偶然、時期・季節の組み合わせが良かったことも考えられ、他の場所、期間で同様の解析結果が得られるか断言できるものでない

が、LANDSAT・TM/ETM+データによる季節が異なり、時点間隔も一定でないデータでの時系列解析の可能性を示すことができたといえる。

問題点としては、MWCIと植生以外の土地被覆との関係について検証が不十分であること、CVAの解析結果の解釈が不十分であること、モニタリング結果の検証が写真撮影による現地定点観測との対応のみであり不十分であることの3点があげられる。今後もデータを追加しながら戦場ヶ原湿原のモニタリングを継続し、問題点を解消するためにできれば特徴ある変動を見せている区域を中心に現地調査し、本研究による結果の検証を継続して行いたい。

謝 辞

本研究で使用したLANDSAT・TM/ETM+データは、所有権：米国政府、データ提供：EOSAT/JAXA、データ配布：リモートセンシング技術センター(RESTEC)によるもので、研究者配布していただいた。また、現地定点撮影は宇都宮大学日光演習林技官・佐藤幸次郎氏にご協力していただいた。ここに深謝の意を示す。

(受付日2005.6.10, 受理日2005.11.18)

引用文献

- 栗屋善雄, 1990. 森林資源調査—リモートセンシングによる伐採地解析. 日本リモートセンシング学会誌 10(3), pp.65-75
- 栗屋善雄・田中伸彦, 1999. 冷温帯森林の反射スペクトルの季節変化の特徴: ランドサット TM データを利用した解析. 写真測量とリモートセンシング 38 (4), pp.35-46
- 栗屋善雄・田中邦宏, 2003. ランドサット TM データを用いた森林変化モニタリング指標の検討: スギ林の伐採と成長のモニタリング. 写真測量とリモートセンシング 42(5), pp.60-70
- 小熊宏之・山形与志樹, 1996. 二時期航空機 MSS データを用いた湿原植生分類に有効な観測波長帯の研究. 写真測量とリモートセンシング 35(1), pp.36-45
- 小熊宏之・山形与志樹, 1997a. 湿原植生分類図に有効となる GLI 観測バンドの選定. 写真測量とリモートセンシング 36(1), pp.27-38
- 小熊宏之・山形与志樹, 1997b. 湿原植生分類図作成に

- 有効となる観測時期の選択, 写真測量とリモートセンシング 36(4), pp. 5-16
- 小谷英司・露木 聡, 1992. LANDSAT・TM データによる森林衰退減少の把握, 103回日林論, pp.129-130
- 沢田治雄・露木 聡, 1984. デジタル処理による流域環境の把握(II)－CVAによる森林のモニタリング－, 95回日林論, pp.135-136
- 下野地学会, 1982. 日光国立公園戦場ヶ原湿原の乾燥化の実態と対策調査報告書, 48pp.
- 内藤健司・青木 均, 1990. 森林植生のランドサット TM データ反射分光特性の季節変化, 日本リモートセンシング学会誌 10(3), pp.47-53
- 波田善夫, 1984. 日光・戦場ヶ原の現状と保護－戦場ヶ原は森林になってしまうのか－, 植物と自然 18(6), pp. 9-13
- 藤原 昇・村松加奈子・阿波 忍・羽澄妙子・落合史生, 1996. 衛星データ解析のためのパターン展開法の開発, 日本リモートセンシング学会誌 16(3), pp. 17-34
- 山形与志樹・小熊宏之・富士田裕子, 1996. 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(4), pp. 9-17
- 李 雲慶・大沼一彦・安田嘉純, 1991. 主成分分析による時系列植生指数データの総合特性値の解析, 写真測量とリモートセンシング 30(5), pp.21-28
- Allen, T.R. and Kupfer, J.A., 2000. Application of Spherical Statistics to Change Vector Analysis of Landsat Data : Southern Appalachian Spruce-Fir Forests. Remote Sensing of Environment 74(3), pp. 482-493.
- Eastman, J.R. and Fulk, M.A., 1993. Long sequence time series evaluation using standardized principal components. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 59(8), pp.1307-1312
- Hukusima, T. and Yoshikawa, M., 1997. The impact of extreme run-off events from the Sakasagawa river on the Senjogahara ecosystem, Nikko national park. IV. Changes in tree and understory vegetation distribution patterns from 1982 to 1992. Ecological Research 12, pp.27-38
- Pope, K.O., Rey-Benayas, J.M., and Paris, J.F., 1994. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. Remote Sensing of Environment 48(2), pp.205-219
- Townshend, J.R.G., Goff, T.E., Tucker, C.J., 1985. Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing 23(6), pp.888-895