

## 論文

# サブピクセル土地被覆特性解析による西シベリア 湿地性森林の火災地回復観測

竹内 渉<sup>\*1</sup>・中野智子<sup>\*2</sup>・越智士郎<sup>\*3</sup>・安岡善文<sup>\*1</sup>

Monitoring of Re-generation Condition for Burnt Forested Wetland  
in Western Siberia with Sub-pixel Land Cover Characterization

Wataru TAKEUCHI<sup>\*1</sup>, Tomoko NAKANO<sup>\*2</sup>, Shiro OCHI<sup>\*3</sup> and Yoshifumi YASUOKA<sup>\*1</sup>

## Abstract

Recently, the number of forest fires in West Siberian Lowland (WSL) is increasing and they are considered as one of the main driving factors influencing carbon cycling in whole earth. Since many forest fires take place in large and hardly accessible areas, remote sensing seems to be the most appropriate tool for creating forest fire recovering history. In this paper, SPOT HRV and Landsat ETM images were used to highlight the damaged area by fire that occurred in the summer of 1998. The damaged area was extracted by using principal component analysis supplemented by ground truth data. The total burnt area was calculated to be 13.8 (km<sup>2</sup>). Then re-generation condition in burnt area from 1995 to 2002 was investigated using NOAA AVHRR data with sub-pixel land cover characterization. We demonstrate that the phenomena observed by remote sensing data is consistent with climatic data including daily precipitation and temperature. The method proposed in this study can be an effective way for forest recovering monitoring.

*Keywords : forested wetland, burnt scar, sub-pixel analysis, NOAA AVHRR*

## 1. はじめに

### 1.1 本研究の背景

世界最大の西シベリア平原は、面積にして約80%が森林と湿原で覆われている。湿地は最終氷期以降に形成され、地表付近には泥炭が厚く堆積している。森林は、大部分が針葉樹であるが、南部へ移るにつれて広葉樹が混ざりあっており、非常に多種多様である。西シベリアの湿地と森林は、メタンや二酸化炭素といった温室効果ガスの地球規模の収支に関して重要な寄与をしていると考えられている<sup>1)</sup>。

シベリアの森林は、カナダや北欧といった北部地域の森林に比べて、比較的原生のまま残っている森林が多いという点でも重要である。これらは「フロンティアフォレスト」と呼ばれ、比較的かく乱されていない、すべての生物多様性を十分養えるだけの大きな森林のことを指す<sup>2)</sup>。しかし、近年

これらの森林が失われつつあり、その主要因として火災があげられている<sup>3)</sup>。特に1998年は極東をはじめシベリア全域で大規模な火災が発生した年であり、西シベリアでもいくつかの火災が確認されている<sup>4)</sup>。筆者らが1999年から2001年にかけて現地調査を実施した西シベリア湿原の南方位に位置するPlotnikovo周辺においても、1998年8月13日に大火災が発生し、広大な面積のシラカバ林が消失した<sup>4)</sup>。

森林火災は、植生回復過程において土壤栄養の補給源として機能する働きがあるなど、生態系の中では基本的かつ自然な外乱要因のひとつである。同時に、人間活動が原因で起こる火災の数も急激に増加しており、自然火災をしぐ勢いであるとの報告がなされている<sup>2)</sup>。森林の状態や動態を把握することは、地球の炭素循環や気候システムに対する知見を深める上でも重要である。周期性・均一性・安全性などの観点から、広域にわたって森林を観測するためには、NOAA AVHRRをはじめとした可視赤外の衛星リ

(2006. 8. 3 受付, 2006. 12. 11 改訂受理)

\*<sup>1</sup> 東京大学生産技術研究所

〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

\*<sup>2</sup> 首都大学東京 都市環境学部 地理環境コース

〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1

\*<sup>3</sup> 近畿大学農学部

〒631-8505 奈良県奈良市中町3327-204

\*<sup>1</sup> Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8505, Japan

\*<sup>2</sup> Department of Geography, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

\*<sup>3</sup> Department of Agriculture, Kinki University, 3327-204 Nakamachi, Nara, Nara 631-8505, Japan

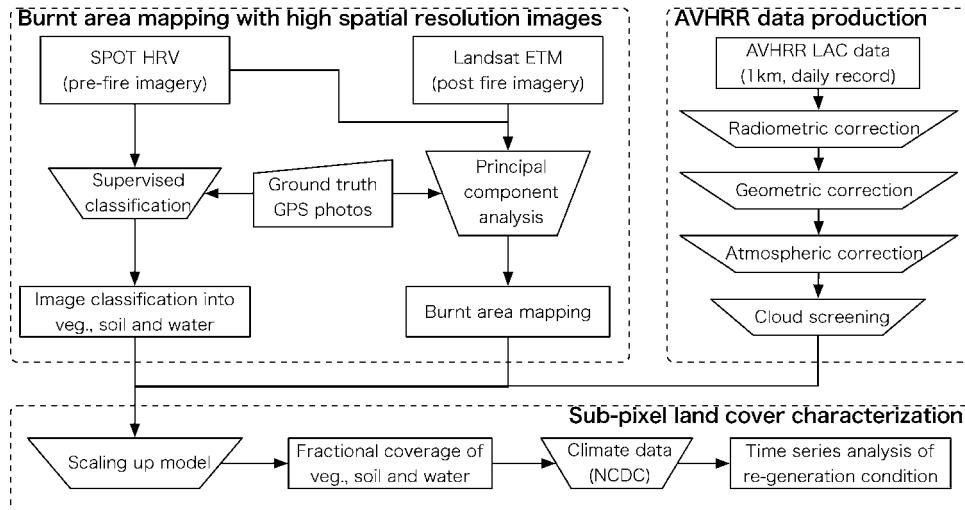


Fig. 1 Flowchart of monitoring of re-generation condition for burnt forested wetland with sub-pixel land cover characterization.

モートセンシングが非常に有効な手段である。しかし、研究対象地域である Plotnikovo 周辺は、森林と湿原が複雑に入り混ざりあっているため、AVHRR が持つ 1 km の空間分解能ではミクセルの存在を無視することができない。長期的環境変化の監視あるいは観測においては、Landsat ETM などの中空問分解能センサのデータを複合的に用いることにより、AVHRR の高い時間分解能を保持しつつ、空間分解能を改善する手法の利用が現実的に最も有効な解決策のひとつである<sup>5)</sup>。

## 1.2 本研究の目的

本研究では、1998 年 8 月に Plotnikovo で起きた湿地性森林火災を対象に、多時期衛星データを用いて回復観測を行うことを目的とする。まず始めに、現地調査から得られた知見を基に、火災前後の 2 時期に撮影された SPOT HRV および Landsat ETM データを用いてシラカバ林の火災消失地域を抽出する。次に、HRV データと NOAA AVHRR データとの間にスケーリングを適用し、植生・土壤・水の画素内面積比率分布図を作成する。最後に、火災跡における植生・土壤・水の画素内面積比率の季節変動および年々変動を解析し、1995 年から 2002 年までの火災前後 8 年間の回復状況を気象データを併用しながら論じる。

## 2. 解析手法

### 2.1 解析手法の概要

Figure 1 は、サブピクセル土地被覆特性解析による火災地回復観測の概要を示している。提案手法による火災地回復観測方法は、高空間分解能データによる火災消失域の抽出、AVHRR データセット Figure の作成、サブピクセル土地被覆特性解析、の大きく 3 部から構成されている。以下では、まず、研究対象地の概要を述べた後、各部での処理について具体的に述べる。

### 2.2 研究対象地の概要

Figure 2 は、研究対象地である西シベリア平原南部の Plotnikovo 近郊に位置するシラカバ林 (56.87N, 83.28E) の地図である。西シベリア平原では、20 世紀になって旧ソビエト時代の農地化政策により、周辺の湿地に人為的な排水路が掘られ、湿地は徐々に乾燥化した。しかし、農地への転用は結果的には失敗し、乾燥化した土地にはシラカバを中心とする落葉広葉樹林やヨーロッパアカマツを主とする針葉樹林が成立した。

筆者らは、1999 年 8 月から 2001 年 8 月にわたって 3 回の現地調査を行い、湿原と森林からのメタン ( $CH_4$ ) および二酸化炭素 ( $CO_2$ ) のフラックス測定、森林内でのバイオマス測定、土壤測定などを行った<sup>6)</sup>。周辺の森林は、主にシラカバ (*Betula pubescens*) で構成され、ヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris*) やシベリアモミ (*Abies sibirica*) も混在していた。Figure 3-(a) は、火災から 3 年後の 2001 年 8 月に撮影された火災跡の写真である。道路を境にして向って左側が火災によって消失した地域、右側が火災を免れた地域である。Plotnikovo 村民への聞き取り調査から、1998 年夏に大規模な火災が起ったことが判明している。火災跡の地表面は 1999 年 8 月にはほとんど裸地であったが、最初にゼニゴケが地表面に生育を始め、火災から 3 年後の 2001 年 8 月には、ヤナギラン (*Epilobium angustifolium*) やガマ (*Typha latifolia*) などの植生が 1.5–2.0 m 程度の草丈にまでほぼ全域にわたって回復していた (Figure 3-(b))。この地域のシラカバ林の土壤は、かつて長期にわたって泥炭が堆積したため、有機炭素に富んだ H 層が、おもにシルトからなる B 層の上に厚く分布していた。火災跡にも、火災時に焼失したと考えられるが、約 30 cm 程度の泥炭層が分布していた (Figure 3-(c))。

### 2.3 高空間分解能データによる火災消失域の抽出

対象地点の火災跡を特定し、AVHRR とスケーリングを

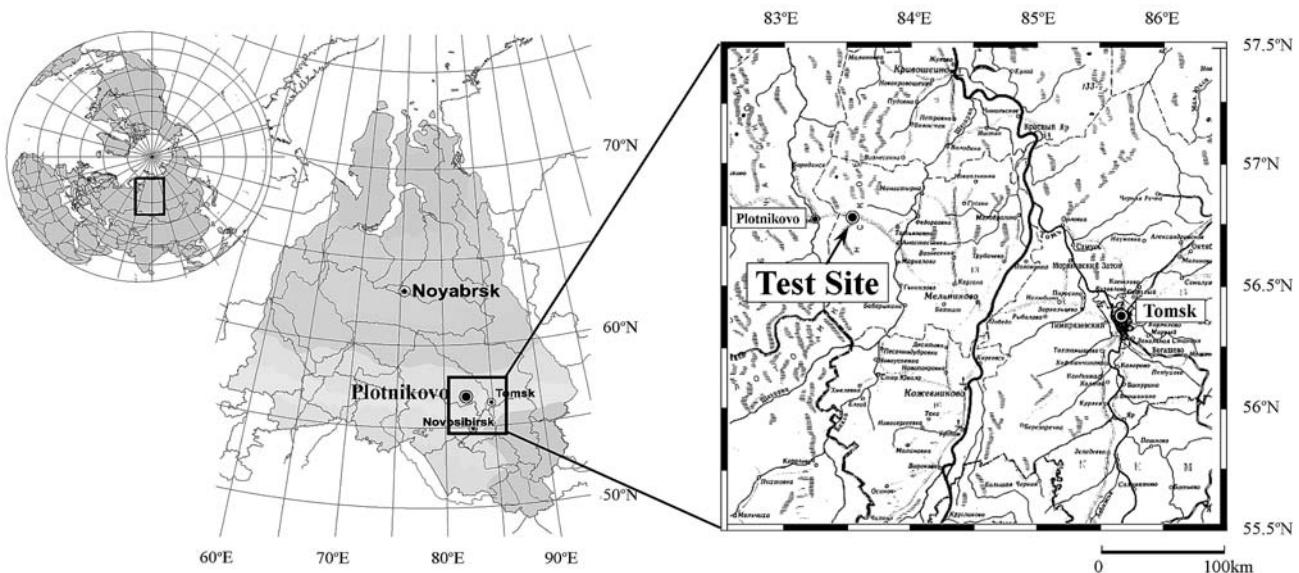


Fig. 2 Map of area of interest located in the south of west Siberian lowland.

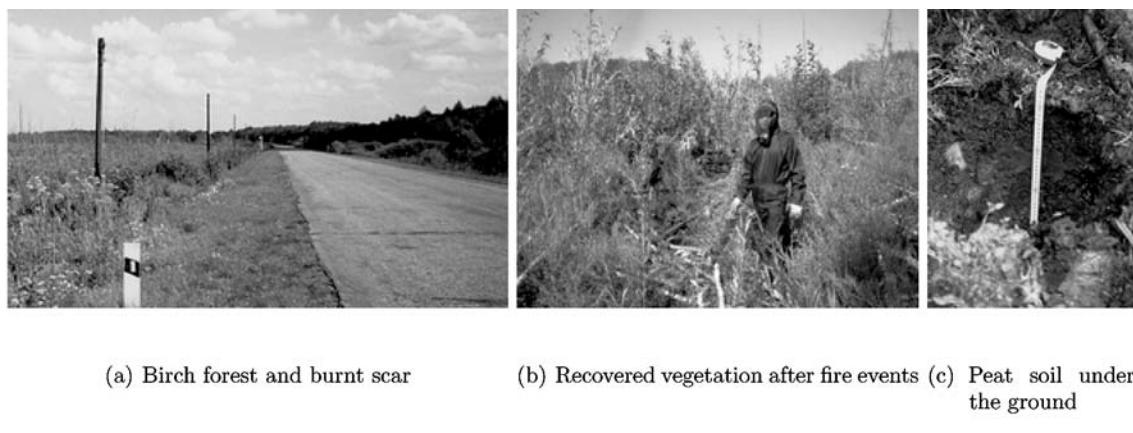


Fig. 3 Ground truth pictures three years after fire events in 2001 August.

達成するために高空間分解能データを使用した。使用したデータは火災発生3年前の1995年7月8日に取得されたSPOT HRVデータと、火災発生1年後の1999年7月7日に取得されたLandsat ETMデータである。Figure 4は、火災跡周辺を撮影したLandsat ETMデータである。解析範囲の大部分は、紫色に見えている湿地と深緑色に見えている森林で占められており、白く輝いている領域が裸地である。

HRVデータの幾何補正は、ETMデータを基準として画素全体にわたって目視によって取得した36点のGCPによって行い、ETMと同じ30mになるように最近隣法によって画素の最配列を行った。幾何補正の二乗平均誤差は、ETMの画素サイズで0.61であり、その後の目視による判読でも良好な結果が得られた。これにHRVに対応するETMのバンド2, 3, 4を重ね合わせ、合計6バンドの多時期合成データを作成した。このうち、火災域全体のみならず相当量の錯乱を受けていない領域も含む、南北30km

四方を切り出して解析範囲とした。切り出し範囲の選択は重要で、第1主成分の軸の傾きは不变領域の分散によって決定されるため、不变領域も相当量含んでいる必要があることに留意した。

植生・土壤・水の分類図は、火災前のHRVデータに対する教師付き分類によって行った。ここで言う植生域は、解析範囲の大部分を占めているシラカバ林、土壤は、舗装していない道路や乾燥化した裸地、水は、湿地中の池や河川などの開水面にそれぞれ相当する。現地調査から得られたGPS写真情報をもとに目視で教師データを20画素程度選びだし、選択したトレーニングエリアの平均値からのマハラノビスの距離を求めて土地被覆分類を行った。

焼失地域の抽出は、重ね合わせデータに対する主成分変換を用いた変化成分抽出法によって行った<sup>7)</sup>。まず、HRVとETMから作成した2時期データセットに対して、6次元の变量を線形結合で表される6つの互いに無相関な变量

に変換する主成分分析を行った。次に、どの成分に火災跡に関する情報が強調されているかを調べ、必要な成分を用いてシラカバ林焼失域に対するトレーニングエリアを選択した。最後に、選択したトレーニングエリアの平均値からのマハラノビスの距離を求めて、レベルスライスにより焼失地域の抽出を行った。

#### 2.4 サブピクセル土地被覆特性解析

火災跡の時系列変化を解析するために、高頻度広域観測衛星である NOAA AVHRR を利用した。まず、森林火災の起こった 1998 年を含む、1995 年から 2002 年の 5 月から 8 月に撮影された NOAA AVHRR データ合計 762 枚を NOAA CLASS より入手した<sup>1</sup>。これら全データに対して PaNDA によって放射量補正、GCP マッチングによる精密幾何補正、大気補正の順序で前処理を行い、最終的にチャンネル 1, 2 の値を大気上端の反射率 (%) に、チャンネル 3, 4, 5 の値を大気上端の輝度温度値 (K) に変換した<sup>8</sup>。切り出した領域は火災範囲全域を含む 56–58 N, 81–85 E である。このうち雲の影響を受けておらず、走査角が 45 度以内で撮影されているデータのみを今後の解析に使用した<sup>2</sup>。Figure 5 は、1998 年 8 月 13 日 14 時 5 分（現地時間）に NOAA14 号によって撮影された Plotnikovo 周辺の森林火災を示している。図中右下に示された矩形領域が SPOT HRV ならびに Landsat ETM による解析範囲を表している。矩形領域に示された解析範囲のみならず、図中の左上の領域や中央から右上にかけて火災煙が風になびいている様子がよく判読できる。

AVHRR によって観測された火災跡の地表面時系列特性との比較を行うため、気象データとして日平均気温ならびに日降水量データを入手した。研究対象地の Plotnikovo で観測された気象データが存在しなかったため、最も地理的に近くに位置する Tomsk のデータ (Figure 2 を参照) を米国海洋気象庁 (NOAA) のデータセンターからダウンロードした<sup>3</sup>。

AVHRR は、1 日に 2 回同一地点を観測できるという利点を持つが、空間分解能が粗く、1 画素が 1 つの土地被覆のみで構成されていることは稀である。研究対象地域の火災跡の地表面は、ヤナギランやガマといった植生、林床に存在する有機土壌、雪解け水による湛水などが複雑に分布していたため、AVHRR によって捉えられている画素はミクセルであると考えてよい。本研究では、構成要素（エンドメンバー）として土地被覆の最小基本構成要素である植生・土壌・水の 3 要素に着目し、スペクトル分解を行うことにより各構成要素の画素内面積比率を算出する。ここで言う植生・土壌・水の定義は、HRV の土地被覆分類での定義と同じである。AVHRR の反射スペクトルは、各構成要素の面積比率の線形和で書けるという線形ミクセルモデルを用いることにより、次のように定式化できる。

$$AV_1 = a_{11}V + a_{12}S + a_{13}W \quad (1)$$

$$AV_2 = a_{21}V + a_{22}S + a_{23}W \quad (2)$$

$$0 \leq a_{ij} \leq 1 \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

ここで、 $AV_1, AV_2$  は AVHRR のチャンネル 1, 2 の反射スペクトルを、 $V, S, W$  は AVHRR の各画素における植生、土壌、水の面積比率をそれぞれ表している。 $a_{ij}$  は各構成要素のピュアピクセルの反射スペクトル（エンドメンバー）であり、条件式 (3) に表されるように、0 から 1 の値を持つ。

スペクトル分解を達成するにはエンドメンバーを決定する必要があるが、多くの研究で行われている目視による教師データ選定法は、主観に依存するため再現性に乏しい<sup>9</sup>。時系列データ処理を行うためには、なるべくロバストな決定法の採用が望ましい。そこで、山形ら (1997) が提案するように、衛星データから得られた可視および近赤外チャンネルの散布図をとると三角形分布をなすという幾何学的性質を利用し、その 3 頂点（エンドメンバー）を一意にかつ安定的に決定することができる手法を用いた。このアルゴリズムは、すべての散布点を含む凸閉包を考え、ノイズを含んだピクセルを排除するために全画素の 95% が三角形内に収まるように頂点を決定するものである。得られた頂点が植生・土壌・水のエンドメンバーとなる。これを HRV から得られた植生・土壌・水の分類図に適用し、AVHRR との間にスケーリングの関係式を導くことで空間的に高精度化を行った<sup>10</sup>。

エンドメンバー決定の後、各カテゴリの画素内面積比率に関する条件式 (4)

$$V + S + W = 1 \quad (4)$$

と式 (1) および (2) の 3 式を連立することにより、AVHRR のチャンネル 1, 2 の反射率の値から、未知数である各カテゴリの画素内面積比率  $V, S, W$  が一意に決定できる。本研究では、面積比率が正であるという条件式 (3) を達成するために、非線形最適化手法のひとつである二次計画法を用いた<sup>11</sup>。

### 3. 解析結果

#### 3.1 高空間分解能データによる火災消失域の抽出

HRV と ETM から作成した多時期合成データに対して主成分分析を行った結果、Figure 6 に示すような結果が得られた。Figure 6-(a) に示した第 1 主成分は、1995 年と 1999 年の近赤外チャンネルとの相関が高く、全分散の 79% を反映している。この成分は火災を受けていない森林を明るく強調し、乾燥化した湿地を暗く強調している。Figure 6-(b) に示した第 2 主成分は、1995 年と 1999 年の

<sup>1</sup> NOAA Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) <http://www.class.noaa.gov/>

<sup>2</sup> NOAA AVHRR 画像の西シベリア低地データセット <http://webpanda.iis.u-tokyo.ac.jp/Siberia/>

<sup>3</sup> NOAA National Climate Data Center (NCDC) <http://www.ncdc.noaa.gov/>

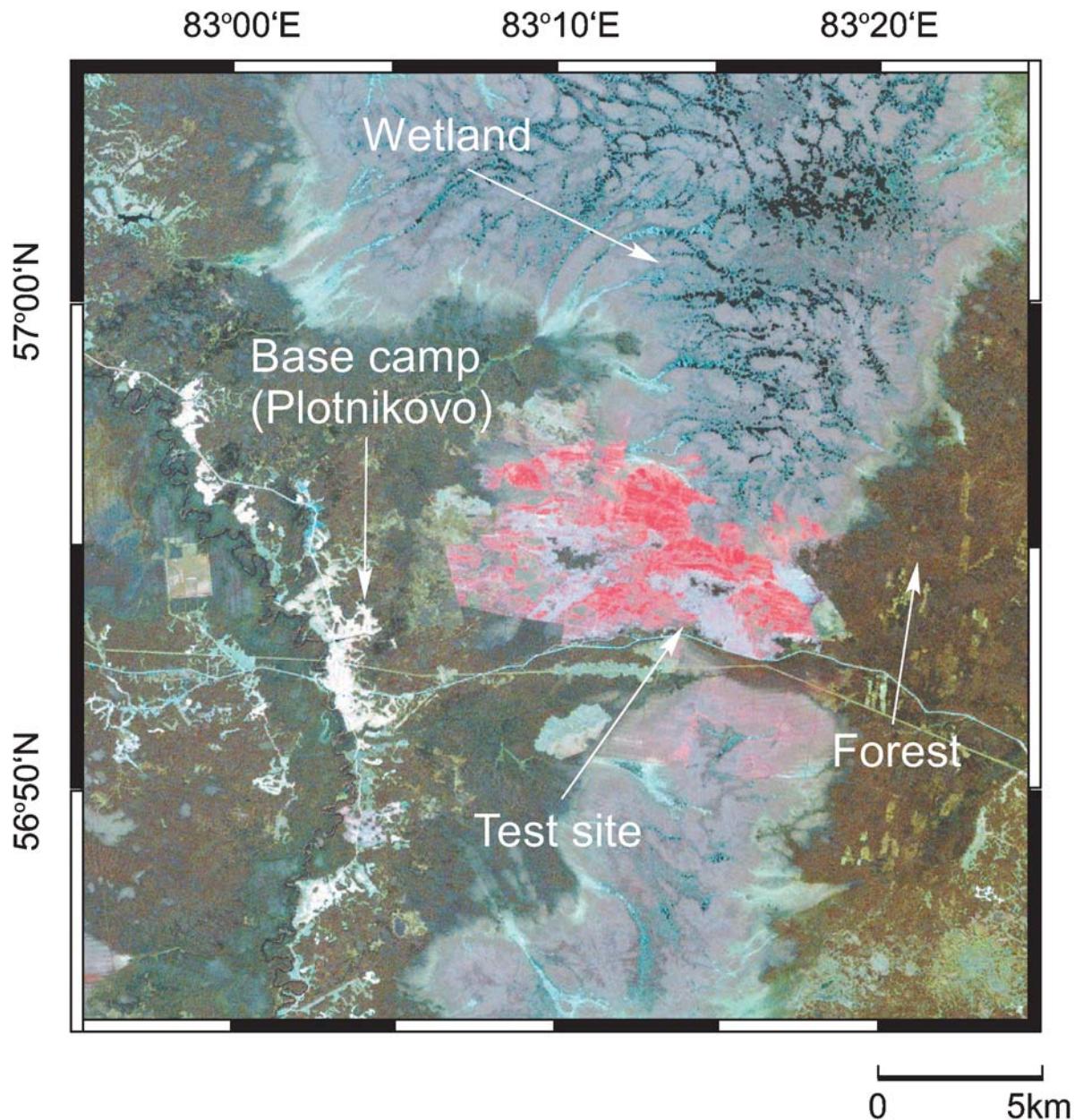


Fig. 4 Burnt scar observed by Landsat ETM on 1999 July 7.

赤チャンネルとの相関が高く、残りの分散の10%を反映している。この成分では湿原が明るく浮き上がって見える。Figure 6-(c)に示した第3主成分では、火災のあったシラカバ林と乾燥化した湿地がともに明るく強調されているが、乾燥した湿地と現存の湿地との境界が特にはっきり現れている。Figure 6-(d)に示した第4主成分では、火災のあったシラカバ林と乾燥化した湿地がともに明るく強調されているが、火災のあったシラカバ林と現存のシラカバ林との境界が特にはっきり現れている。

以上を簡潔にまとめると、土地被覆が変わらない領域の画素は灰色であるが、何らかの変化を受けた画素（植生→焼け跡、焼け跡→植生の回復、湛水→乾燥）は、因子負荷量の違いによって灰色から黒または白に見えることがわか

る。この結果は、主成分分析を用いて火災跡の分類を行った他の研究と同様の傾向を示している<sup>12)~14)</sup>。以上の考察から火災による錯乱を何らかの形で受けていると判定された第1, 3, 4主成分をR, G, Bにもつデータを作成し、これを用いてシラカバ林焼失域に対するトレーニングエリアを選択した。選択したトレーニングエリアの平均値からのマハラノビスの距離を求めて、レベルスライスにより焼失地域の抽出を行った。その結果、火災による消失地域の面積は13.8 (km<sup>2</sup>)と推定された。

### 3.2 土地被覆特性の空間分布特性解析

HRVデータから作成した植生・土壤・水の分類図とAVHRRデータとの間にスケーリングを適用しエンドメンバーを算出した。得られたエンドメンバーより線形

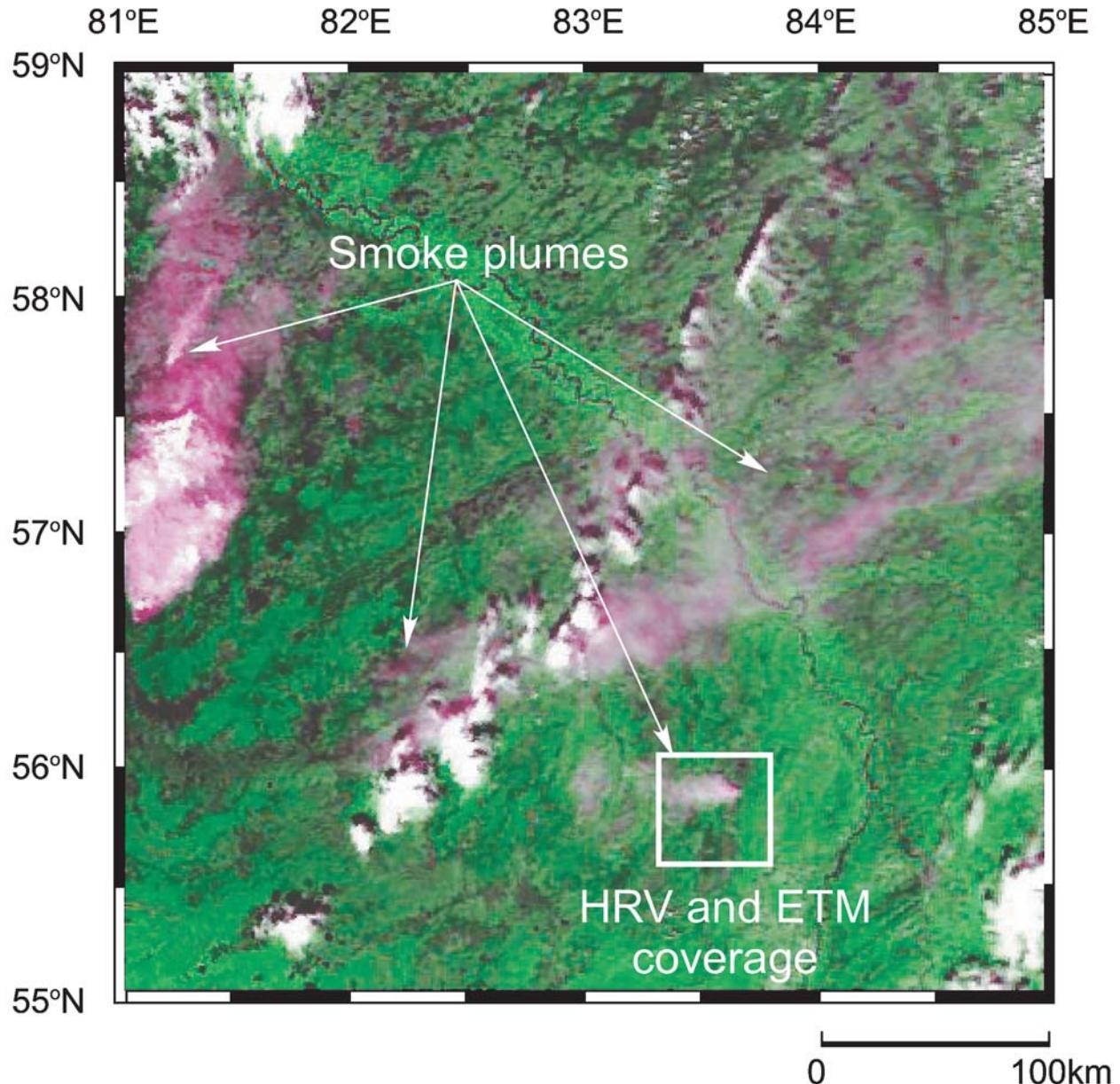


Fig. 5 Fire plumes observed by NOAA-14 AVHRR on 1998 August 13.

ミクセルモデルの関係式を解くことにより、AVHRR のチャンネル 1, 2 の反射率から植生・土壤・水の面積比率分布図を作成した。Figure 7 は、火災翌年の 1999 年 7 月 6 日に NOAA14 号によって撮影された AVHRR データから求めた植生・土壤・水の画素内面積分布図である。図中の白く強調されているところが面積比率が高いところを表している。

NDVI と植生の面積比率分布図とを比較してみると、NDVI では湿原がデータ中央に縦長に黒っぽく浮き出て見えるが、その周辺は平坦に明るく強調されている。一方で、植生比率図では湿原の周りにも複雑に植生が入り組んでいる様子がよくわかる。どちらのデータにおいても中央部にくっきりと火災跡が黒く強調されて見える。土壤の面積比率分布図では、植生面積比率分布図とは逆に湿地が白く浮

かび上がって見え、森林が周辺に黒く強調されている。水の面積比率分布図では、データ右側に南北に流れるオビ川が白く浮きあがって見ると同時に、河川に沿って自生する森林が黒く強調されて見える。植生・土壤・水に分解して考えることで、この地域を占有している森林と湿地について詳しく知ることができる。すなわち、森林の画素は、植生の比率が高く、土壤・水の比率は低い。また、湿地の画素は植生・土壤・水が複雑な割合で混在している。作成した分布図は、同地域において線形ミクセルモデルを森林と湿原のタイプ別に適用した研究結果と近い値を示していた<sup>1)</sup>。

### 3.3 土地被覆特性の時系列変動

Figure 8 は、1995 年と 1998 年の植生・土壤・水の面積比率の季節変動を示している。火災の起こった 1999 年と

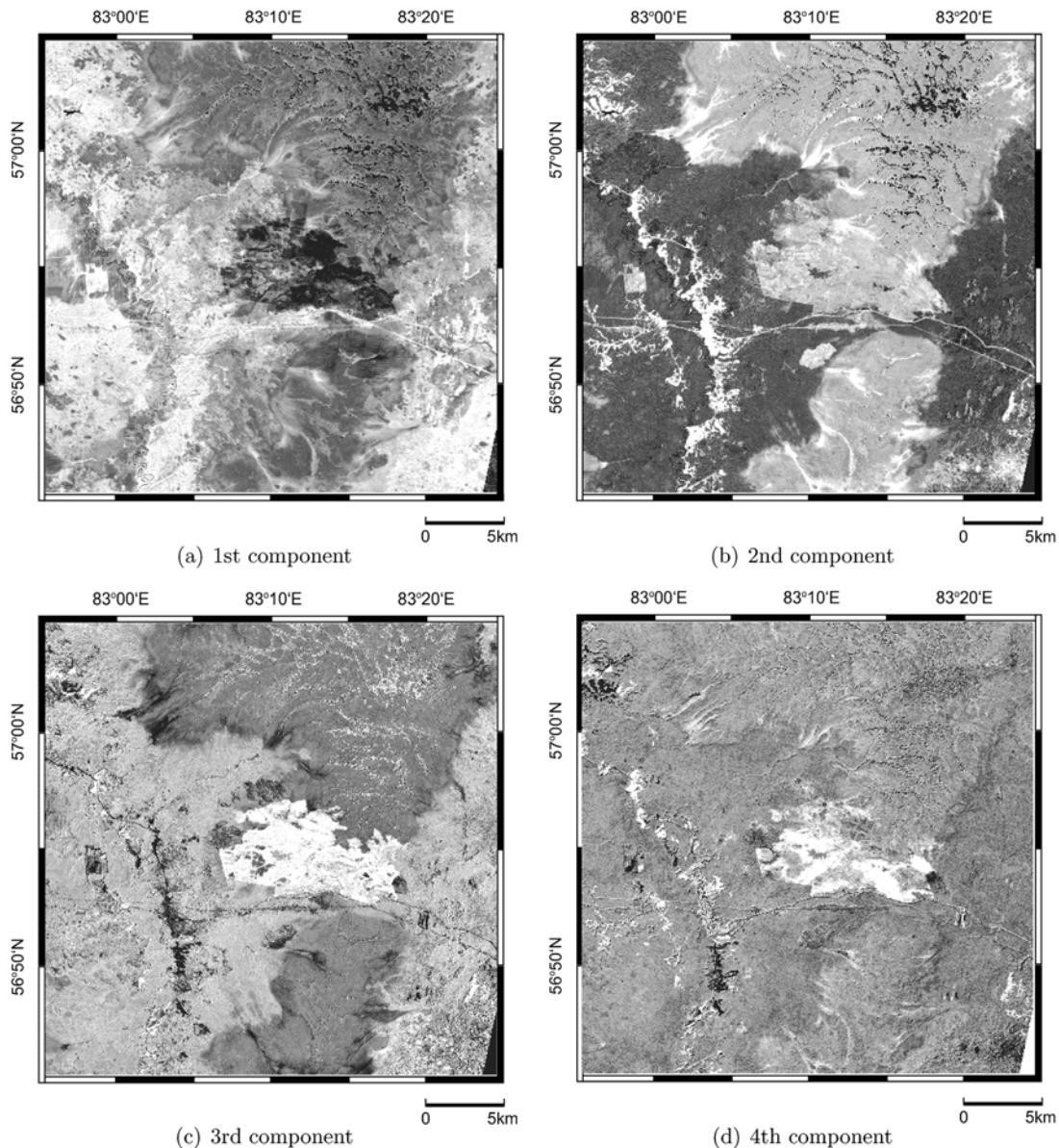


Fig. 6 Results of principal component analysis derived from HRV and ETM.

の比較のために、火災の影響を受けていない1995年のデータを通常年の代表値として表示した。1995年のデータに着目すると、5月中旬から植生の面積比率が上昇し、6月中旬から8月中旬にかけては、ほぼ横ばいの一定値を示した。土壤の比率は5月中旬から下旬にかけて一旦上昇するが、6月上旬から9月上旬までは単調減少の傾向を示した。水の面積比率は、5月上旬は雪解け水がもたらされているため大きな値を示すが、6月上旬にかけて急激に減少し、その後は8月中旬から9月上旬にかけて漸増した。一方で、1998年に着目すると、火災の発生日である1998年の8月13日以前の植生・土壤・水の面積比率は、1995年とほぼ同様の傾向を示している。火災が起きた直後に撮影された8月26日のデータは、1995年に撮影された同時期のデータと大きく異なる挙動が観測された。土壤の面積比率は、ほとんど変化しなかったが、植生の面積比率は、60%

から20%に大きく落ち込み、水の面積比率は、30%から70%に大きく上昇した。これは、地表面が降雨によって湛水したこと、火災によって消失したシラカバ林が炭化した物質が地表面を覆っていたことの2点が理由として考えられる。

次に、植生の活動が1年のうちで最も高くなる7月に撮影されたデータを用いて回復状態を評価した。Figure 9は、1995年から2002年の植生・土壤・水の面積比率の年々変動を示している。火災が起きた前の1995年から1998年までの4年間は、植生・土壤・水の面積比率は、ほぼ横ばいの値を示しており、安定的に植生が活動を行っている状況を反映した妥当な結果が得られている。現地調査の結果から、火災後約1年経った1999年8月には植生はまだそれほど回復しておらずほとんど裸地であったことが確認されている<sup>6)</sup>。1999年から2002年にかけて植生は急

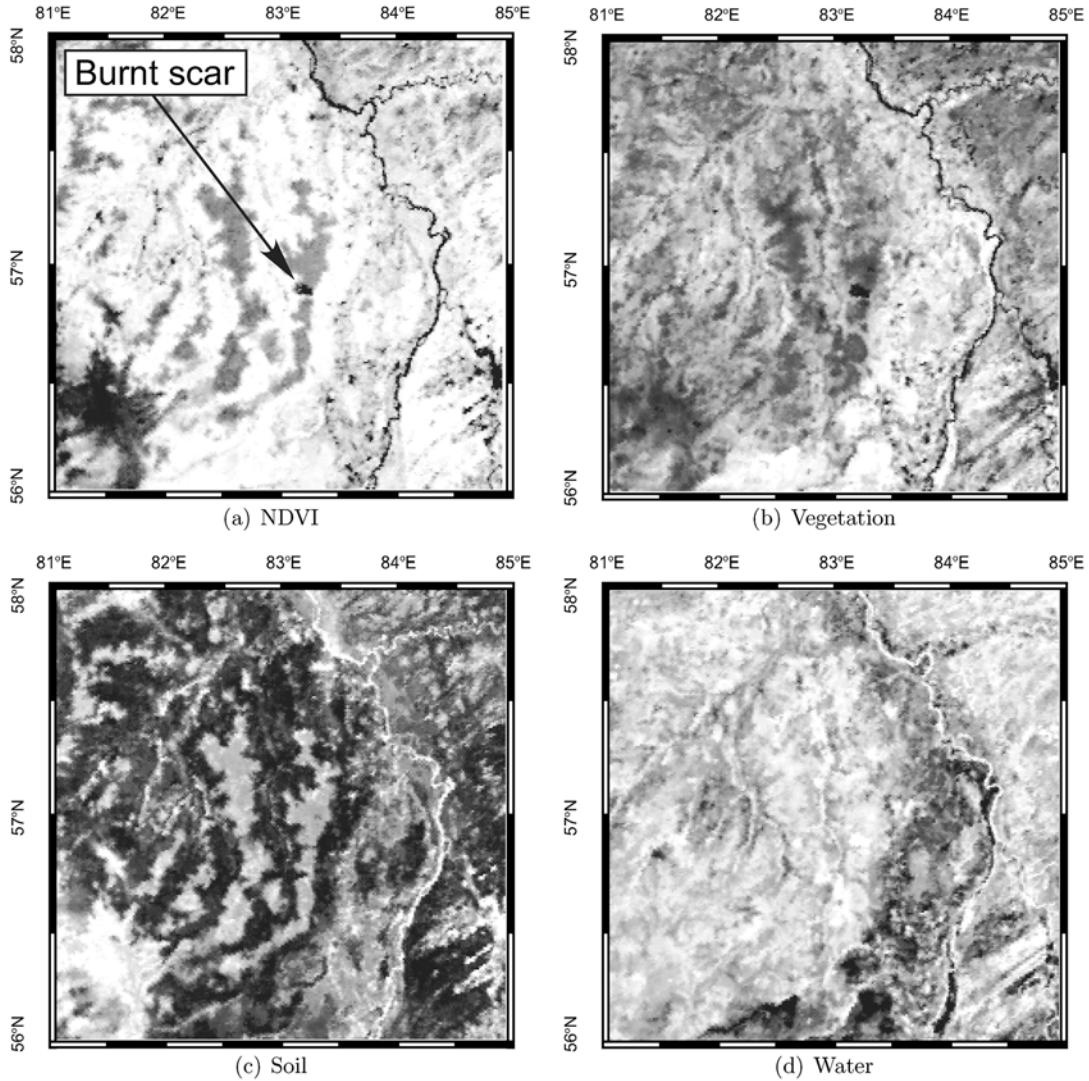


Fig. 7 Fractional coverage maps of vegetation, soil and water derived from unmixing between HRV and AVHRR.

速に回復し、植生の面積比率は、15%, 60%, 70%, 80%と変化した。火災から3年後の2001年8月には、ほぼ全域にヤナギランやガマなどの植生が回復していたが、衛星による解析結果からも矛盾しない結果が得られた。土壤の面積比率は、火災2年後の2000年には乾燥が進行して20%まで上昇したが、2002年には火災前と同程度の5%まで減少した。水の面積比率は、1999年から2000年にかけて急速に減少し、80%, 30%, 20%, 20%と変化した。1999年の水の面積比率が高かった理由は、データが取得された7月はまだ乾燥が進行しておらず地表面の泥炭層が湛水していたこと、火災によって消失したシラカバ林が炭化した物質が地表面に残っていたことを反映している。本解析結果からは、植生が回復した様子は把握できるものの、元々自生していたシラカバ林にもどりつつあるのか、それともほかの植生に取って代わられてしまったのかという遷移状況を把握するには至らなかった。

### 3.4 気象データによる火災発生原因の考察

Figure 10は、Tomsk (56.50 N, 84.91 E) で1983年から2002年の間に観測された日平均気温と日降水量、ならびに火災のあった1998年のそれらを示している。西シベリア低地においては、例年4月から5月は雪解けの季節であり、オビ川を始めとした河川は氾濫を起こし、それに伴って周辺の湿原の水位も上昇する。その後、太陽高度の上昇とともに植生の活動は活発化し、6月初めから9月初めにかけての3ヶ月間程度の短い夏季を迎える。火災の起こった1998年の日平均気温を20年間の平均値と比べると、5°C以上も高い日が5月下旬から6月上旬にかけて20日程度続いたことがわかる。また、火災が起こった8月13日から45日前にあたる7月1日から8月12日までの積算降水量を比較すると、20年間の平均値は98 mmであるのに対して、1998年にはその約20%に相当する20 mmしか観測されていない。以上のように、気象データからは、夏季の高温と少雨によって地表面が乾燥していたことが推測

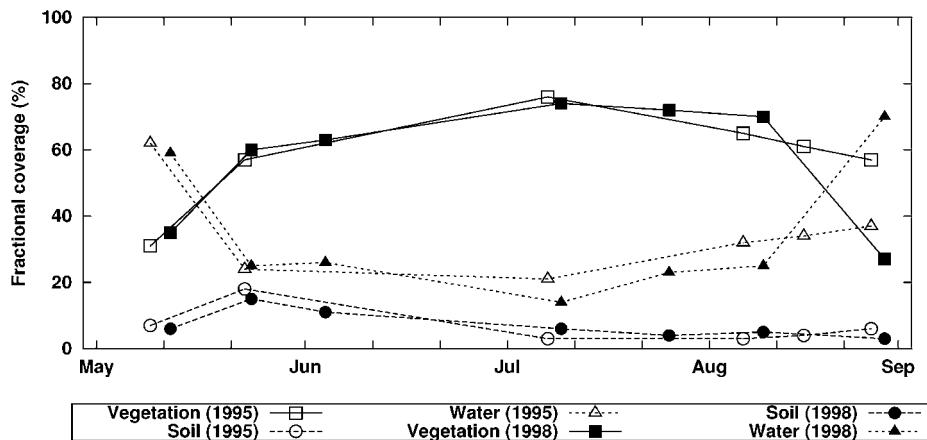


Fig. 8 Seasonal changes of vegetation, soil and water fractional coverages in 1995 and 1998.

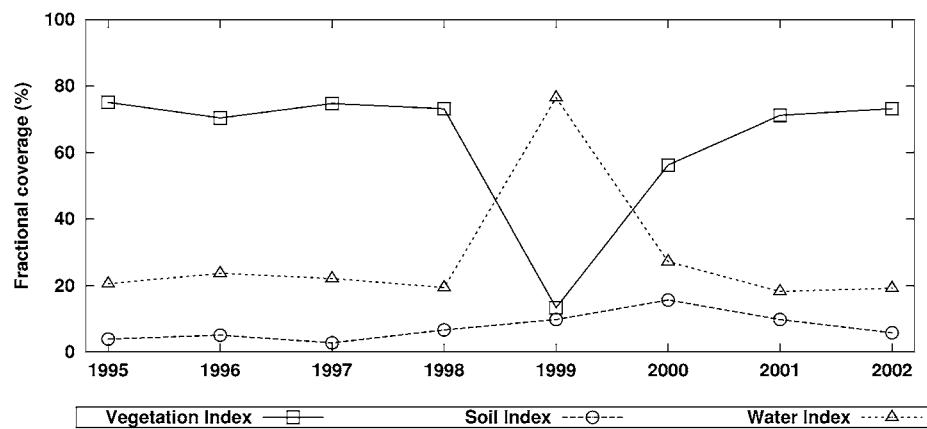


Fig. 9 Inter-annual changes of vegetation, soil and water fractional coverages from 1995 to 2002.

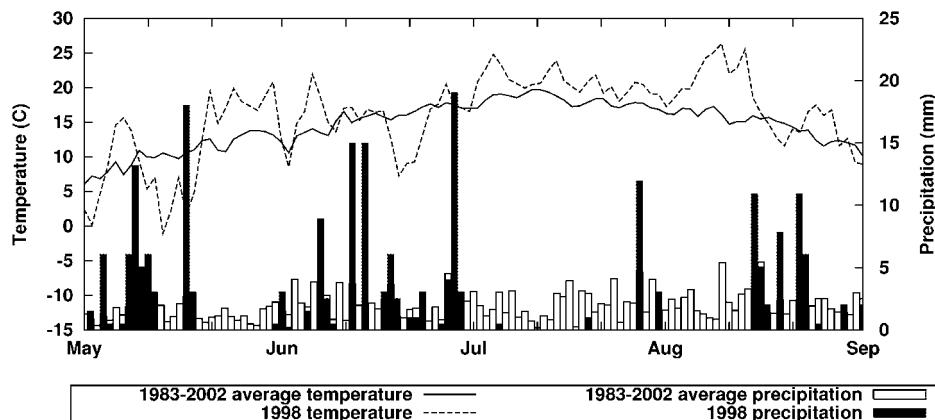


Fig. 10 Daily average temperature and precipitation measured from 1983 to 2002 at Tomsk(56.50 N, 84.91 E) ground weather station.

される。一方、Figure 8 に示した衛星データによる解析結果からは、1998年7月1日から8月12日にかけての水の面積比率は、火災がなかった1995年と比べるとおよそ10%程度低い値で推移しており、相対的に乾燥していた状態にあったと考えられる。従って、気象データと衛星データ

による解析からは、互いに矛盾することなく整合性がとれた結果が導かれた。

#### 4. まとめ

本研究では、1998年8月にPlotnikovoで起きた湿地性森林火災を対象に、多時期衛星データを用いて回復観測を行った。まず、現地調査からの知見を元に火災前後のHRVおよびETMデータに主成分分析を適用し、トレーニングエリアの平均値からのマハラノビスの距離を求めて、レベルスライスにより焼失地域の抽出を行った。その結果、火災による消失地域の面積は $13.8\text{ km}^2$ と推定された。

次に、HRVデータとAVHRRデータとの間にスケーリングを適用し、植生・土壤・水の画素内面積比率分布図を求めた。植生・土壤・水の混合割合を定量的に求めることにより、この地域を占有しているシラカバ林は、1) 5月の半ばから植生の面積比率が上昇し、6月の半ばから8月の半ばにかけては、ほぼ横ばいの一定値を示す、2) 土壤の比率は5月の半ばから終わりにかけて一旦上昇するが、6月の初めから9月の初めまでは単調減少の傾向を示す、3) 水の面積比率は、5月の初めは雪解け水がもたらされているため大きな値を示すが、6月のはじめにかけて急激に減少し、その後は8月の半ばから9月のはじめにかけて漸増する、という結果が得られた。

次に、植生の活動が1年のうちで最も高くなる7月に撮影されたデータを用いて1995年から2002年の植生・土壤・水の面積比率の年々変動を解析した。火災後の1999年から2002年にかけて植生の面積比率は、15%, 60%, 70%, 80%と変化し、火災後3年間で火災前の水準にまで植生が回復したことが明らかとなった。植生が回復した様子は把握できるものの、元々自生していたシラカバ林にもどりつあるのか、それともほかの植生に取って代わられてしまったのかという遷移状況を把握するには至らなかった。

最後に、1983年から2002年までに現地観測された日平均気温と日降水量を解析した結果、火災の起こった1998年には、日平均気温が通常年よりも $5^\circ\text{C}$ 以上も高い日が5月下旬から6月上旬にかけて20日程度続いたことが明らかとなった。また、火災が起こった8月13日から45日前にあたる7月1日から8月12日までの積算降水量を比較すると、通常年の約20%に相当する20mmしか観測されなかっただ。衛星データによる解析結果からは、水の面積比率が通常年よりもおよそ10%程度低い値で推移することがわかり、相対的に乾燥していた状態にあったと考えられる。従って、気象データと衛星データによる解析からは、互いに矛盾することなく整合性がとれた結果が導かれた。

**謝辞：**本研究は、科学技術振興機構（JST）の「衛星観測・モデル統合によるアジア環境・災害評価システムの構築」プロジェクト（研究代表者 安岡善文）の一環として行われたものである。また、西シベリアの現地調査を行うにあ

たりお世話になった、ロシア科学アカデミーの研究者の方々とPlotnikovoの村民の方々に深く感謝の意を表する。

#### 引用文献

- 1) Takeuchi, W., Tamura, M. and Yasuoka, Y., 2003. Estimation of the methane emission from west Siberian wetland by Scaling between NOAA/AVHRR and SPOT/HRV data. *Remote Sens. Environ.*, 85 (1), 1–12.
- 2) UNDP, UNEP, World Bank and WRI, 2001. *World Resources 2000–2001. Elsevier Science*, 87–102.
- 3) Kasischke, E. S. and Stocks, B. J. (Eds.), 2001. *Ecological Studies 138 : Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Springer Publisher*.
- 4) Nakano, T., Asahi, C., Inoue, G. and Fukuda, M., 2001. Measurements of Methane and Carbon Dioxide Fluxes in a Birch Forest in West Siberia after Burning. *In proceed : Ninth symposium on the joint Siberian permafrost studies between Japan and Russia in 2000*, 145–149.
- 5) 山形与志樹, 杉田幹夫, 安岡善文, 1997. 植生・土壤・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 (1), 543.
- 6) Nakano, T., Takeuchi, W., Inoue, G., Fukuda, M. and Yasuoka, Y., 2006. Temporal variations in soil-atmosphere methane exchange after fire in a peat swamp forest in West Siberia. *Soil science and plant nutrition*, 52, 29–40.
- 7) 山形与志樹, 安岡善文, 宮崎忠国, 小熊宏之, 森山 隆, 中谷幸広, 1992. ランドサットTM画像を用いた火災による釧路湿原の焼失面積の推定. 日本リモートセンシング学会誌, 12 (4), 71–76.
- 8) Shimoda, H., Fukue, K., Cho, K., Matsuoka, R., Hashimoto, T., Nemoto, T., Tokunaga, M., Tanba, S. and Takagi, M., 1998. Development of a Software Package for ADEOS and NOAA Data Analysis. *In proceed : IGARSS 1998*, 2 (3).
- 9) Bateson, C. A., Asner, B. P. and Wessman, C. A., 2000. Endmember Bundles : A New Approach to Incorporating Endmember Variability into Spectral Mixture Analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38, 1083–1094.
- 10) 杉田幹夫, 安岡善文, 2000. NOAA/AVHRRデータとLANDSAT/TMデータのスケーリングによる土地被覆の画素内面積比率推定. 日本リモートセンシング学会誌, 17 (1), 54–63.
- 11) Floudas, C. A. and Visweswaran, V. (Eds.), 1995. *Quadratic optimization. Kluwer Academic Publishers*, 217–269.
- 12) Dwivedi, R. S. and Sankar, T. R., 1992. Principal component analysis of Landsat MSS data for delineation of terrain features. *Int. J. Remote Sens.*, 13 (12), 2309–2318.
- 13) Garcia-Haro, F. J., Gilabert, M. A. and Melia, J., 2001. Monitoring fire-affected areas using Thematic Mapper data. *Int. J. Remote Sens.*, 22 (4), 533–549.
- 14) Ribed, P. S. and Lopez, A. M., 1995. Monitoring burnt areas by principal components analysis of multi-temporal TM data. *Int. J. Remote Sens.*, 16 (9), 1577–1587.

## 〔著者略歴〕

## ●竹内 渉（タケウチ ワタル）



1975年生。1999年東京大学工学部土木工学科卒業。2004年東京大学大学院博士課程修了（社会基盤工学専攻、博士（工学））。同年東京大学生産技術研究所入所、特任研究員、特任助手を経て2007年より講師として環境・災害衛星リモートセンシングの研究に従事する。2001年計測自動制御学会より論文奨励賞を、2001年、2002年日本写真測量学会より学術講演会論文賞を、2005年日本写真測量学会より学会奨励賞を受賞。日本リモートセンシング学会、日本写真測量学会、米国写真測量学会、米国物理学連合の各会員。

E-mail : wataru@iis.u-tokyo.ac.jp

## ●中野 智子（ナカノ トモコ）



1990年北海道大学理学部地球物理学卒業。1995年北海道大学大学院博士課程修了（地球物理学専攻、博士（理学））。1997年より東京都立大学理学部地理学科（現・首都大学東京 都市環境学部 地理環境コース）に助手として着任、現在に至る。シベリア・モンゴルの自然生態系における炭素循環の研究を行っている。日本気象学会、日本農業気象学会、日本雪氷学会、日本土壤肥料学会、米国地球物理学連合の各会員。

## ●越智 士郎（オチ シロウ）



1987年東京大学農学部林学科卒業。2000年東京大学より博士号取得（社会基盤工学専攻、博士（工学））。宇都宮大学、東京大学生産技術研究所などを経て、2003年より近畿大学助教授、現在に至る。日本写真測量学会の会員。

## ●安岡 善文（ヤスオカ ヨシフミ）



1947年生。1969年東京大学工学部計数工学科卒業、1974年東京大学大学院博士課程修了（計数工学専攻、工学博士）。同年環境庁国立公害研究所（現国立環境研究所）入所、環境情報部、総合解析部等を経て、1996年より地球環境研究センター総括研究管理官。1998年より東京大学生産技術研究所教授、現在に至る。2001-2004年地球フロンティア研究システム、生態系変動研究領域長を併任。日本写真測量学会、計測自動制御学会、環境科学会、米国電気電子工学会（IEEE）等の会員。2002-2004年日本リモートセンシング学会会長。