

B-4 シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究

(3) シベリアにおける温暖化検出手法に関する研究

② リモートセンシング情報の複合利用による地表面観測の高度化に関する研究

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	田村正行、山形与志樹
大気圏環境部	上席研究官	井上 元
地球環境研究センター (委託先)	総括研究管理官	安岡善文
	岩手大学工学部	飯倉善和

平成6-8年度合計予算額 24,294千円  
(平成8年度予算額 7,961千円)

[要旨] シベリアにおける温室効果ガスの動態と、植生・土壌の状態との関連性を明らかにするために、衛星リモートセンシングを用いてシベリアの植生と土壌を観測し、温室効果ガスの濃度分布およびフラックスの測定値との関係を調べた。観測域は西シベリアの湿原地帯に重点を置き、土地被覆分布とメタン発生量との関連性を主に調べた。衛星観測には、高分解能センサーと広域センサーを併用した。前者は特定のテストサイト（オビ川沿いのハンティマンシスクとプロトニコヴォ）での詳しい観測に使用し、後者は西シベリア全域の植生を高頻度かつ定期的に観測するために用いた。高分解能センサーとしては主にSPOT/HRVを使用し、テストサイトでの土地被覆分類を行った。ハンティマンシスクでは、土地被覆分類結果と航空機によるメタン濃度の測定値を比較し、両者の間に相関関係があることを確かめた。プロトニコヴォでは、衛星による土地被覆分類結果と地上でのメタンフラックス測定結果を組み合わせ、衛星画像全域からのメタンフラックスを推定し、同地域で行われた航空機による観測結果と比較した。広域センサーとしては主にNOAA/AVHRRを使用し、植生指数の季節変化パターンを利用して広域の土地被覆分類を行った。また熱赤外バンドのデータを用いて、AVHRRデータが地表面温度の空間分布パターンや時系列変化パターンを推定するのに有効であることを示した。湿原からのメタンの発生量は、植生や地温などによって影響を受けることが知られており、これらの季節変化が衛星データから観測できれば、メタン発生源モデルを用いて年間あたりの広域のメタン発生量が推定できるものと考えられる。

[キーワード] リモートセンシング、シベリア、湿原、植生、温室効果ガス、メタン

1. はじめに

シベリアの土壌と植生は、二酸化炭素やメタンなど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見られている。例えば、シベリアのタイガに代表される寒帯、亜寒帯林は二酸化炭素濃度の抑制に大きな役割を果たしているものと推定されている。また、湿原やツンド

ラの水苔なども一次生産量は小さいが分解が遅いため、差し引きの炭素蓄積量は大きいとの指摘もある。また、西シベリアの大低地などにある湿原からの夏期のメタン発生量は莫大な量に上ると考えられている。地球規模の炭素循環を研究する上で、シベリアの土壌と植生が果たしている役割を評価することは重要である。

シベリアにおける温室効果ガスの挙動に関しては、平成3年(1991年)から地球環境研究総合推進費の下で日露共同研究が開始され、季節変動、濃度分布、フラックスなどが次第に明らかにされつつある。これら温室効果ガスの動態は、気象条件など大気の状態によって影響されるとともに、発生・吸収源である地表面の状態(土壌と植生の状態)に大きく依存していると考えられる。従って温室効果ガスの発生・吸収量を推定するためには、大気中における濃度分布やフラックスの測定と気象条件の観測に加えて、土壌・植生など地表面の状態を把握しておくことが必要である。シベリアのように広大な領域において、これら土壌・植生の面的分布データを得るためには、航空機観測と地上での現地調査に加えて、衛星リモートセンシング画像の利用が不可欠である。また、衛星画像は、年間を通じて定期的に入手することができるので、土壌・植生の季節変動を捕らえるうえでも有効である。

本研究サブテーマは、衛星リモートセンシングを用いて植生と土壌の状態を推定する方法を開発するために、平成5年(1993年)にフィージビリティスタディとして開始され、平成6年(1994年)より第2期シベリア研究課題のサブテーマとして組み込まれた。本研究の目的は、各種の衛星センサーデータの解析と、航空機観測および地上での現地調査を組み合わせることにより、植生の種類、分布、および地表面の状態(地表面温度など)を推定する方法を開発することである。さらに、衛星画像データを用いて植生と土壌に関わるこれら諸量のシベリアにおける時間・空間的分布を推定し、植生と地表面の状態が温室効果ガスの動態にどのような影響を及ぼしているかを調べる。

## 2. 研究方法

現在シベリアにおいてデータを取得することができる衛星センサーとしては、SPOT/HRV(High Resolution Visible)、JERS-1/SAR(Synthetic Aperture Radar)、JERS-1/OPS (Optical Sensor)、

表1 利用可能な衛星センサー

分類	衛星センサー名	観測波長域	地上分解能 (m)	観測幅 (km)
高分解能センサー	SPOT/HRV	光学	20	60
	JERS1/OPS	光学	20	75
	JERS1/SAR	マイクロ波	20	75
	ADEOS/AVNIR	光学	16	80
広域センサー	NOAA/AVHRR	光学	1,100	2,700
	ADEOS/OCTS	光学	700	1,400

ADEOS/AVNIR (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer)、ADEOS/OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner)、NOAA/AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) などがあげられる。これらは、表1に示すように地上分解能の違いによって高分解能センサーと広域センサーに大別される。前者は地上分解能が20m程度であり、特定の土壌・植生タイプ（森林、湿原、草原、ツンドラなど）を代表するテストサイトにおいて、土壌・植生のより詳しい観測をするのに適している。後者は地上分解能が粗いが広範囲を高頻度にカバーすることができるので、主として広域の土壌・植生分布の概要とその季節変動を把握するのに適している。これらのセンサーの観測波長域は可視光から赤外光の光学波長を用いるものが殆どであるが、JERS-1/SARはマイク

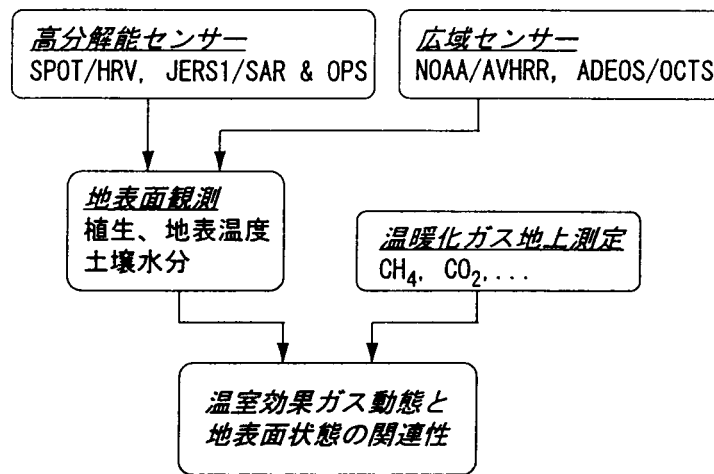


図1 研究のフレームワーク

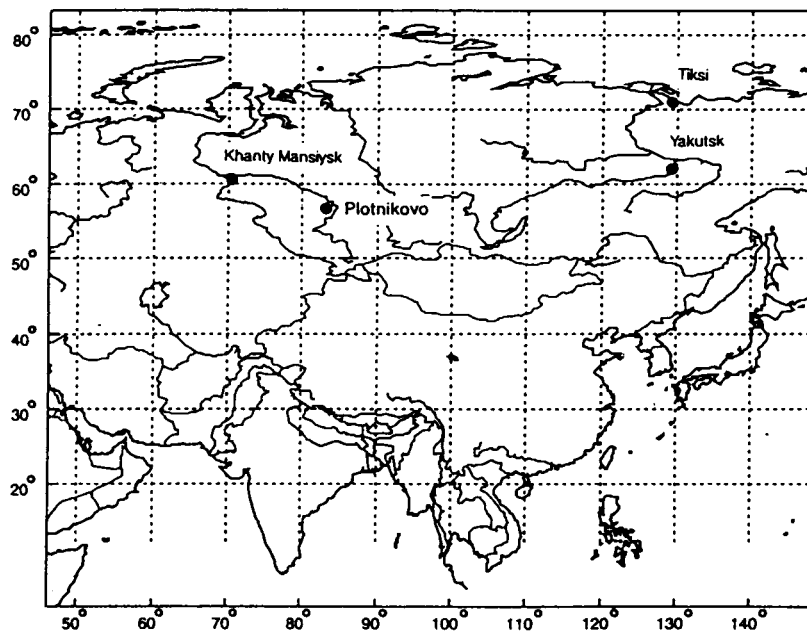


図2 シベリアにおけるテストサイトの位置

ロ波を用いて測定を行うので、土壌の水分量や凍結融解を検出できる可能性があるとともに、天候に関わりなく定期的な観測を行うことができるという特徴がある。

本研究では各種の衛星センサーを組み合わせて土壌・植生の状態を推定する方法を開発し、地表面の状態と温室効果ガスの動態との関連性を調べることを目的としている。図1は本研究のフレームワークを示している。高分解能センサーでいくつかの選定されたテストサイトでの測定を行う一方、広域センサーを用いて大陸レベルの測定を行い、地表面の植生、温度、水分などを観測する。衛星観測の結果と地上で行われる温室効果ガスの測定結果を組み合わせることにより、温室効果ガスの動態と地表面状態の関連性を調べ、最終的には大陸レベルでの温室効果ガスの収支の推定を行うことを目的とする。

シベリアにおけるテストサイトとしては、本研究では西シベリアの湿原域からのメタン発生量の推定に重点を置いたので、図2に示すようにオビ川沿いにハンティマンシスク（北緯61度、東経69度）、プロトニコヴォ（北緯57度、東経83度）の2地点を選んだ。これらのテストサイトは、世界最大級の湿原であり巨大なメタン発生源と考えられている西シベリア湿原のそれぞれ中央部と南部に位置している。本報告では、まずこれらのテストサイトにおける解析結果について報告し、さらに広域センサーによる西シベリア全域の観測結果について述べる。

### 3. 高分解能衛星センサーによる観測

#### 3. 1 ハンティマンシスクにおける観測結果

##### (1) SPOT/HRV画像と航空機搭載ビデオ画像の取得

ハンティマンシスクは、オビ川とイルティシュ川の分岐点近く、広大な西シベリア湿原のほぼ中央に位置する。同地での航空機による温室効果ガスの観測は平成5年（1993年）7月23日と24日の二日にわたって実施された。このフライトの間に、航空機に搭載したビデオカメラより地表の土壌・植生を撮影した。航空機から撮影したこのような映像は、地表の状態を詳しく知る上で有効であり、衛星データと組み合わせて用いることにより土壌・植生の正確な推定が可能になる。SPOT/HRVの画像は、7月23日の航空機観測に同期して得られた。図3にSPOT/HRV画像によってカバーされた領域（およそ60km四方）を示す。観測領域を通る直線は7月23日のおよそのフライトコースを示している。

SPOT/HRVセンサーの観測波長域は、可視光線から近赤外線にわたる3バンド（0.50-0.59, 0.61-0.68, 0.79-0.89 $\mu$ m）である。図4にハンティマンシスクのSPOT/HRV画像を示す。図中の白線は、観測機IL-18の飛行経路を示している。この図は白黒で表されているが、元のデータは3バンドのスペクトル情報を持っており、この情報を用いて土壌・植生の分類を行うことができる。教師付きの最尤分類法を用いて衛星画像域の土地被覆を分類した結果、森林、湿原、川、氾濫域、湖、都市、雲の7つのカテゴリーに分類することができた。なお分類結果の妥当性は航空機から撮影したビデオ画像により検証した。

##### (2) 地表面被覆とメタン濃度との関係

航空機観測中には種々の温室効果ガス成分の測定が行われたが、このうちメタンに関しては、国立環境研究所の大気観測チームがFID-GC（Flame Ionization Detector - Gas Chromatograph）を使用して連続測定を行った。このメタン連続測定データとSPOT/HRV画像による土地被覆分類の結果を比較したところ、メタンの濃度分布と土地被覆の間に相関関係が見られた。図5(a)のグラ

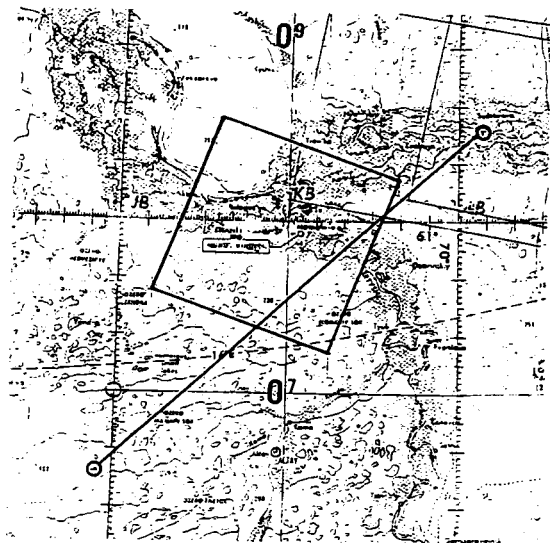


図3 ハンティマツスクにおけるSPOT/HRV画像の範囲.  
直線は観測機の飛行経路を示す.



図4 ハンティマツスクにおけるSPOT/HRV画像  
と観測機の航跡.

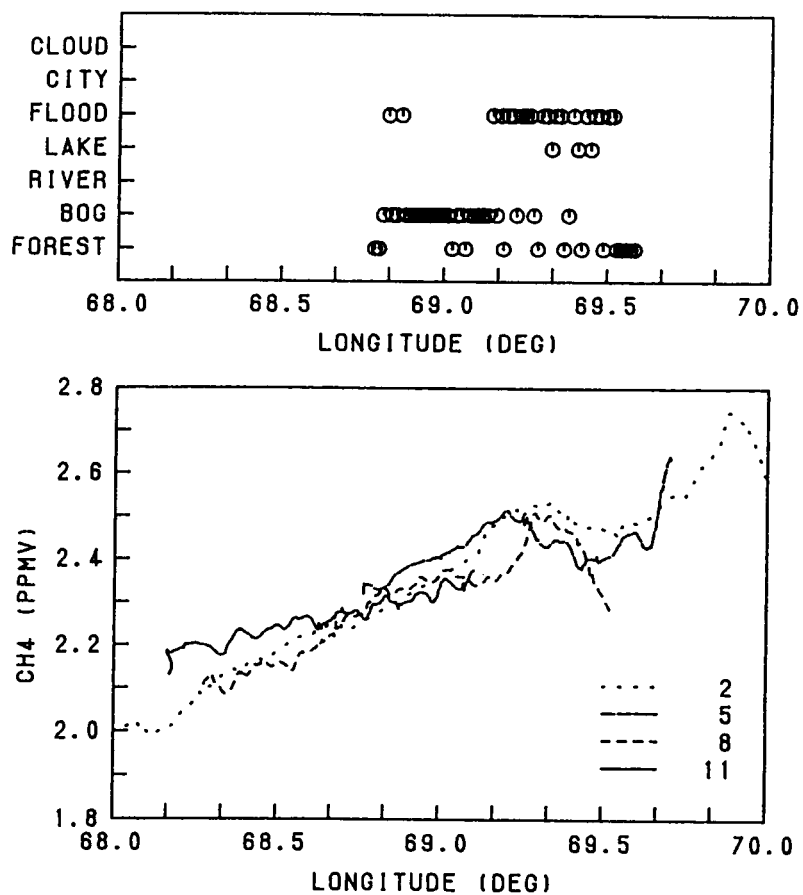


図5 土地被覆の分類結果とメタン濃度の関係.  
(a) 図3の航跡2直下の土地被覆を経度に対してプロット.  
(b) 高度300mで観測したメタン濃度分布を経度に対してプロット.  
(メタンデータは東大の遠島氏による測定値)

フは、図4に示した飛行経路のうち2番の飛行経路の直下における土地被覆を、経度を横軸として示したものである。図5(b)は、高度約300mで飛行（飛行経路2、5、8、11番）したときに測定されたメタン濃度を経度に対してプロットしたものである。図5より、河川の氾濫域の上空では高濃度のメタンが存在すること、湿地上空ではメタンの濃度が減少する傾向にあることが分かる。このような現象は、メタン発生源の空間分布と気象要因の両者が複合的に作用した結果生じていると考えられる。一般に大気中の平均的メタン濃度は1.7ppm程度であると言われているので、いずれにせよこの観測域近辺には大規模なメタン発生源があることが推定される。

### 3. 2 プロトニコヴォにおける観測結果

#### (1) SPOT/HRV画像の取得

プロトニコヴォ・テストサイトにおいてSPOT/HRV画像を1995年7月8日に取得した。プロトニコヴォ村は、東経85.05、北緯56.51でオビ川の集水域にあり、西シベリア湿原の南東部に位置する。このテストサイトでは、1993年以来モスクワ微生物学研究所と国立環境研究所により、植生の地上調査と大気微量ガス成分のフラックスの測定が行われている（Panikov, 1994）。また1994年の夏以来、航空機による温室効果ガスの測定が実施されてきた。

1994年と1995年に得られた空中写真と地上探査の結果に基づき、SPOT画像域の土地被覆を8つのタイプ（白樺樹林、針葉樹林、湿原1、湿原2、湿原3、水面、草地、裸地）に分類した。図6に土地被覆の分類結果を示す。森林の多くの部分は白樺樹林で、針葉樹林は川沿に生育してい

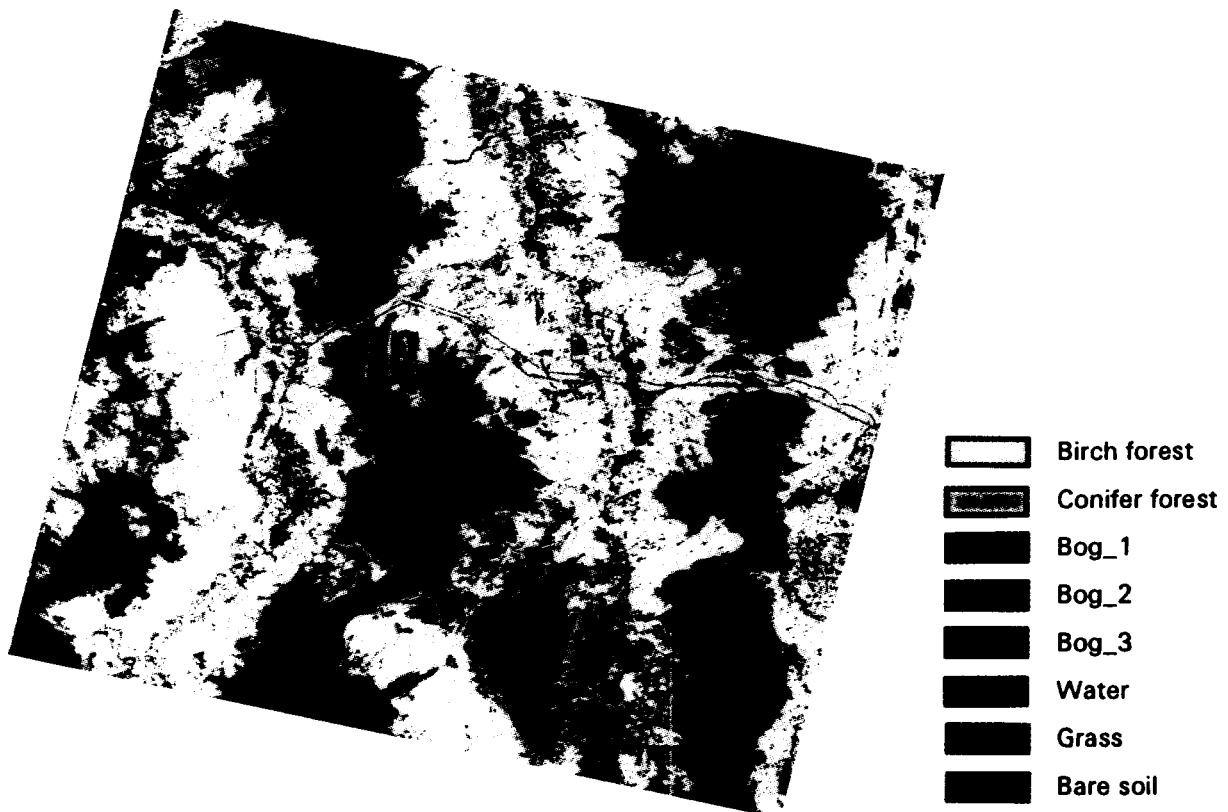


図6 SPOT/HRVによるプロトニコヴォ・テストサイトの土地被覆分類

る。これは川沿いの土地は栄養分が比較的多いためであると考えられる。湿原1は低い松と灌木の生えている水苔湿地、湿原2は低木がまばらに生える水苔湿地、湿原3は主にスゲや綿スゲのような草が生育している水苔湿地である。なお、図中の白丸はメタンフラックスの測定地点を示している。

(2) SPOT衛星画像域からのメタン発生量の推定

SPOT衛星画像域からのメタン発生量を推定するため、モスクワ微生物学研究所と国立環境研究所がプロトニコヴォ周辺の湿原で測定したメタンフラックスデータを使用した。表2に、7月から8月にかけての夏期に測定されたメタンフラックスデータを示す。樹木のない湿原（湿原2および3）でのデータは、図6に示す白丸印の測定地点で1994年に得られたものである。樹木のある湿原（湿原1）でのデータは、同測定地点の近くのタイプ1の湿原で1995年に得られたものである。

表3は、SPOT衛星画像域内の各土地被覆タイプの面積、面積比率、メタン放出率および放出量を示している。メタン放出量は、それぞれの土地被覆ごとに（メタン放出率×面積）の式を用いて算出した。白樺樹林と針葉樹林のメタン放出率をゼロとしたのは、一般に森林からのメタン放出はごく微量であるか、もしくはごく低い割合ながらメタンを吸収する場合があることが報告さ

表2 Plotnikovo周辺の湿原で夏期に測定されたメタンフラックス。  
樹木のない湿原は1994、樹木のある湿原は1995年の測定値。

湿原の種類	測定点数	平均フラックス (mgCH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> /day)	標準偏差 (mgCH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> /day)
樹木のある湿原	1	118	-
樹木のない湿原	6	166	48

表3 SPOT衛星画像域からのメタン放出量の推定

土地被覆 タイプ	面積 (km <sup>2</sup> )	面積比率 (%)	放出率 (mgCH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> /day)	放出量 (10 <sup>6</sup> gCH <sub>4</sub> /day)
白樺樹林	1515	35.7	0	0
針葉樹林	789	18.6	0	0
湿原1	819	19.3	118	96.6
湿原2	417	9.8	166	69.2
湿原3	406	9.6	166	67.4
水面	29	0.7	60	1.7
草地	251	5.9	-	-
裸地	15	0.4	-	-
合計	4241	100.0	-	234.9

(SPOT衛星画像域からの平均メタンフラックス：55 mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/day)

れているからである (Bartlett et al., 1993)。 湿原1のメタン放出率は、樹木のある湿原のフラックス、 $118 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ とした。湿原2と湿原3のメタン放出率は同じであると仮定し、樹木のない湿原の平均フラックス、 $166 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ とした。水面からのメタン放出率 $60 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ は、ほぼ同緯度のカナダのハドソン湾低湿地において、湿原中の沼で夏期に測定された値を代用した (Bartlett et al., 1993)。草地、裸地からの寄与は考慮していない。これらの土地被覆からのメタンフラックスは測定されておらず、面積比率も合計で6.3%と小さいからである。このことは、メタン放出量を僅かながら少なめに見積もる結果になると思われる。このような仮定に基づく計算の結果、SPOT衛星画像域からのメタン発生量の合計は $234.9 \times 10^6 \text{ gCH}_4/\text{day}$ と推定され、この値を全体の面積で割ることにより、画像域における平均メタンフラックスは $55 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ と推定された。

### (3) 航空機によるメタン観測との比較

プロトニコヴォ・テストサイトでは1994年の8月3, 5, 6日に、国立環境研究所を中心とする大気観測チームにより、航空機 (IL-18) を使用して、メタン濃度の垂直プロファイルの測定が行われた。図7に、例として8月5日における航空機の飛行経路を示す。四角形で示したのはSPOTの画像エリアである。

Tohjima ら (Tohjima et al., 1995) は、メタン濃度の垂直プロファイルから、以下のような方法で広域のメタンフラックスを算定した。まず、メタン濃度の垂直プロファイルを積分することにより、垂直な大気コラム中のメタンの蓄積量を計算する。メタンの蓄積は、観測日前日の夜間に逆転層の発達とともに始まると考えられるので、蓄積に要した時間は、逆転層が発達し始めた時刻と観測時刻までの間の時間となる。Tohjima らは、現地で測定した垂直気温分布の変動か

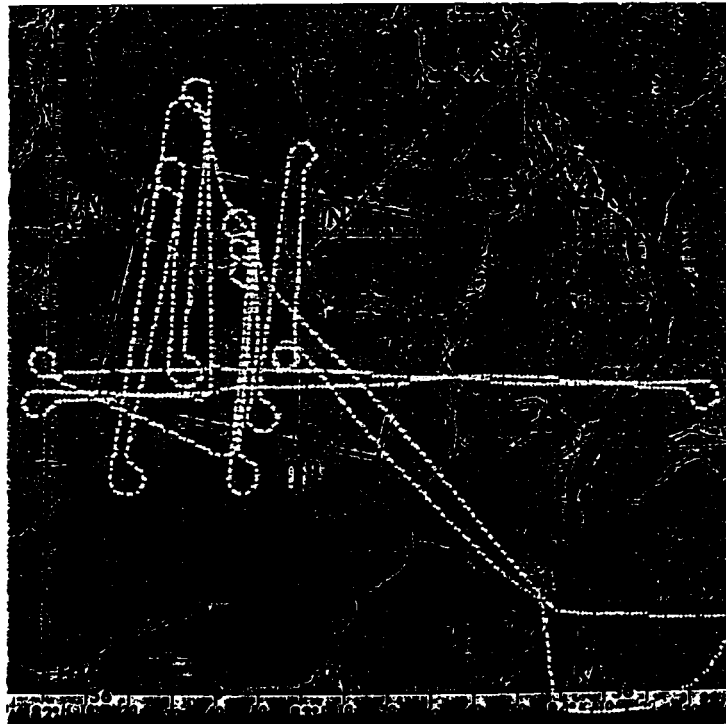


図7 メタン観測機の飛行経路とSPOT画像域 (四角形)



ら、逆転層の開始時刻を現地時間のおよそ21時と推定した。観測飛行が行われた範囲からの広域メタンフラックスは、蓄積したメタンの量を蓄積に要した時間で割ることにより得られる。表4に各観測日におけるメタンの蓄積量、蓄積時間、広域メタンフラックスの値を示す。得られたメタンフラックスの変動幅は、34から126mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dayにわたる。この大きな変動幅の主要な原因は、メタン濃度の空間的变化と時間的变化によるものと思われる。3日間の観測日におけるメタンフラックスの平均値は83mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dayであったが、これはSPOT衛星画像データと地上のメタン測定データより得られた55mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dayと比較すると、約1.5倍大きい値である。この差は、後者の推定を行う際に水面、草地および裸地からの寄与を無視したことにも一因となっていると思われる。しかし、これら双方の推定値を得た観測プロセス上の不確実性を考慮すれば、この差違は確率的な変動の範囲内にあるといえよう。推定値の不確実性を減少させるためには、地上での植生探査およびメタン測定を衛星データ等を用いてよりシステムチックに進める必要がある。

表4 メタンの垂直プロファイルから求めた広域のメタンフラックス  
(Tohjima et al., 1994)

日付	メタン蓄積量 (mg/m <sup>2</sup> )	蓄積時間 (時間)	メタンフラックス (mgCH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> /day)
1994年8月3日	55	15	88
1994年8月5日	20	14	34
1994年8月6日	79	15	126
平均	-	-	83

#### 4. 広域センサーによる西シベリア低地全域の観測

本研究ではNOAA/AVHRRセンサーを用いて西シベリア全域の植生と土壌の季節変化を観測した。AVHRR(改良型高分解能放射計)は、地上分解能が粗い(直下で1.1km)が、観測頻度が高く定期的で(通常1日2回)広い観測領域を持ち、しかも高精度に地球表面の温度や植生・土壌を計測することのできるセンサーである。AVHRRの観測波長帯は、可視、近赤外、中間赤外に各1バンド、熱赤外に2バンドの合計5バンドである。センサーを通して得られるデータは地上対象物の放射輝度値だけでなく較正用放射源のデータも含まれる。較正用のデータが各ライン毎に加えられた出力データは、地上に転送され受信局において記録される(HRPT)。また、受信局のない地域をカバーするために、出力データは必要に応じてデータレコーダに記録され、アメリカ海洋大気局の受信設備(NOAA/NESDIS)に一括して転送される(LAC)。

NOAA衛星のデータを受信することのできる受信局は世界各地にあり、それぞれ周辺の地域をカバーしている。日本の場合、東京(気象庁、東大生産技術研究所)、つくば(国立環境研究所)仙台(東北大学理学部)などで受信を行っている。また、世界的には受信したデータを米国地質調査所(USGS)のEDC(EROS Data Center)が中心となっており、とりまとめ、全球陸域1km-AVHRRデータセットを作る計画が進行している。EDCでは衛星画像の検索システム(GLIS)がネットワークを通して利用可能である。このシステムでは衛星画像の属性情報だけでなく、クイックルック画像を見ることができ、オンラインでの注文も可能である。

シベリア地域では、1994年11月よりクラスノヤルスクの森林研究所でNOAAデータの受信を開始している。また、近年NASAの協力でヤクーツクとモンゴルにも受信局が設立された。それ以前のデータは米国地質調査所や欧州宇宙機構（ESA）で受信されているデータを使わざるを得ないが、利用できるデータは限られている。これらのデータはIGBPのグローバルデータセットによる1 kmの全球モザイク画像作成プロジェクトのためEDCにも送られている。しかし、EDCにはシベリア地域の1990年以前のデータは少なく、また検索システムに登録されていないものも多い。

（1）入手した衛星画像とそのデータベース化

入手したシベリアの衛星画像はその有効利用を図るため、画像属性情報とクイックルック画像を作成し、データベース化してある。これを用いて、解析の対象となる画像を迅速に選択することができる。図8に画像データベースによる検索例を示す。図上部の地図中で対象とする地点をクリックすることにより、その点を含む画像のリスト（画像番号、取得日、緯経度等を含む）を左下の表のように表示することができる。さらに表中で興味のある画像を選択してそのクイックルックを表示し雲量などの概要を知ることができる。これらのデータはインターネットを通して公開中である（<http://kurikoma.cis.iwate-u.ac.jp/SIBERIA/>）。

一般にNOAA/AVHRR画像は高密度テープ（HDDT）に蓄積されるが、必要に応じて計算機で読みとり可能な磁気テープ（CCT）にコピーされ、配布される。このときのデータ量は1シーンで約100メガバイトになり、6250bpiの磁気テープ1巻に相当する。HDDTやCCTでの保存にはスペースが必要であり、しかも劣化に注意しなければならない。さらに必要になった場合にすぐにデータを取り出せないという欠点もある。これに対して、光ディスクやCD-ROMなど新しい媒体が開発されて

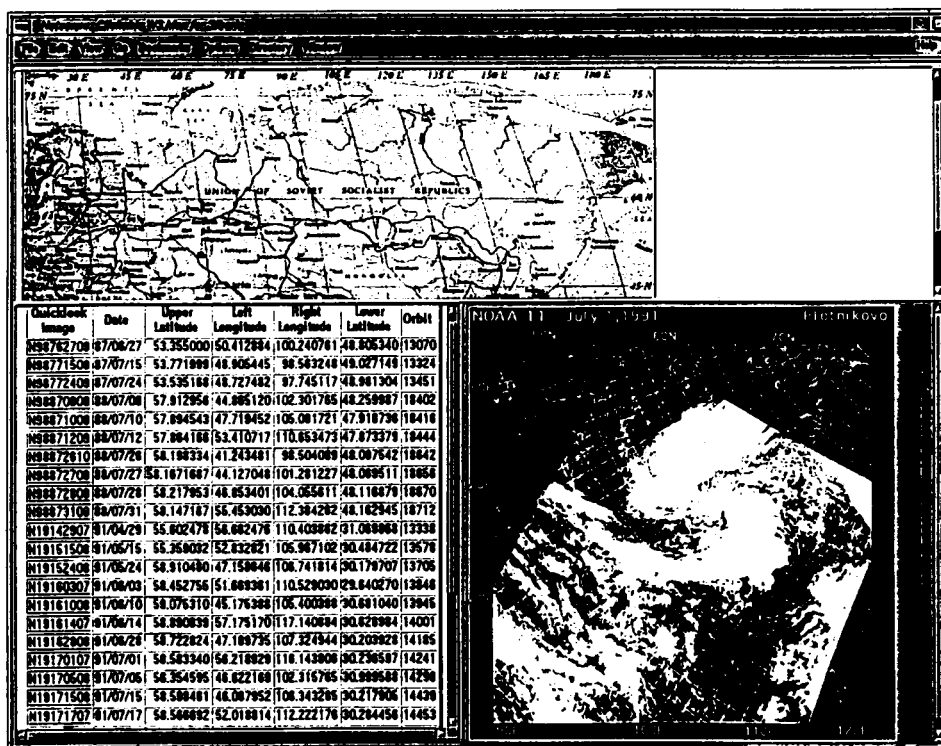


図8 シベリアNOAA/AVHRR画像データベース

きており、これらの欠点のかなりの部分が克服できる状況になってきた。しかし、衛星画像の量自体も指数的に増大してきており、データ圧縮の必要性がなくなるということはない。

オリジナルの衛星画像に対するデータ圧縮は、解析処理のことを考慮して、可逆方式を用いることが望ましい。また付加的情報と画像情報を分離することができることから高い圧縮率も期待できる。AVHRR画像の場合、実質的な有効ビット数は12バイト中の10ビットであり、バンド内での空間的な相関やバンド間の相関も比較的高いものが多い。特に海域や雲の領域では一様なデータも多く見られる。これらの条件を利用した高度な方法（基本的には予測符号化と算術符号化の組み合わせ）によれば、7倍から8倍の圧縮が可能との報告がある（飯倉ら、1995）。衛星画像に含まれる雑音成分の大きさから考えて、この数字は平均的にも十分可能であると考えられる。岩手大学で検討している簡便な方法（先頭移動法）でも5-6倍の圧縮が実現できている。ただし、中間赤外バンドの変動（雑音？）が大きくそれが圧縮率の向上を妨げる大きな要因になっている。

クイックルック画像に対しては、画像の表示ということが主要な目的であるので、非可逆なデータ圧縮を行うことができる。一般に可視、近赤外データを縦横1/4に間引いて作成したカラー画像を標準化された非可逆圧縮法であるJPEG法により、約1/20に圧縮する。データ量はこれで約50kバイトになり画像の概要を知るといった目的から見て十分実用的となる。

## （2）植生の季節変化の観測

植生の季節変化を観測するために、AVHRRデータから算出した植生指数を用いる。植生指数の計算のためには、まずAVHRRのチャンネル1（可視光域：580~680nm）とチャンネル2（近赤外域：725~1100nm）のデータ（デジタルカウント値C）を次の式を用いて反射率Rに変換する。

$$R = (d * d / z) * (a + b * C)$$

ただし、d：地球～太陽間平均距離、z：太陽高度角の余弦、a、b：NOAAから与えられている変換係数である。次に植生指標（NDVI：Normalized Difference Vegetation Index）を次の式を用いて計算する。

$$NDVI = (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1)$$

植生指数の値は、植生の活性度や葉面積指数と高い相関があり、植生のある地表は一般に植生のない裸地、水面、雪、雲などに比べて高い植生指数の値を持つことが知られている（Justice et al., 1985）。

西シベリアをカバーする植生指数データは、EDCによって作成された全球陸域1km-AVHRRデータセットの、10日ごとの最大NDVI値（10-day maximum NDVI composites）から取得した。これは世界各地の受信局からAVHRRデータを集め、1kmの分解能で10日ごとに植生指数の最大値を抽出し、AVHRRの各バンドのデータとともにデータベース化したものである。ただし、10日ごとの最大値では雲の影響を除ききれないため、これらからさらに1ヶ月ごとの最大値を求めてモザイク図にした。図9は、1993年の4月（左上）から9月（右下）までの各月における、西シベリア地域（北緯50-75度、東経65-87度）の植生指数の季節変化を示したものである。図中の色調は、紫、青、緑、黄、赤の順に植生指数の増加を表している。春から夏にかけての植生の増加と北上、夏から秋にかけての減少が明瞭に表されている。図10はプロトニコヴォ近辺のいくつかの地点における植生指数の季節変化を、4種類の土地被覆別（針葉樹林、白樺樹林、湿原、水面）に示したものである。水面の植生指数は零に近い値で殆ど変化しないが、植生のある地点ではその種類に

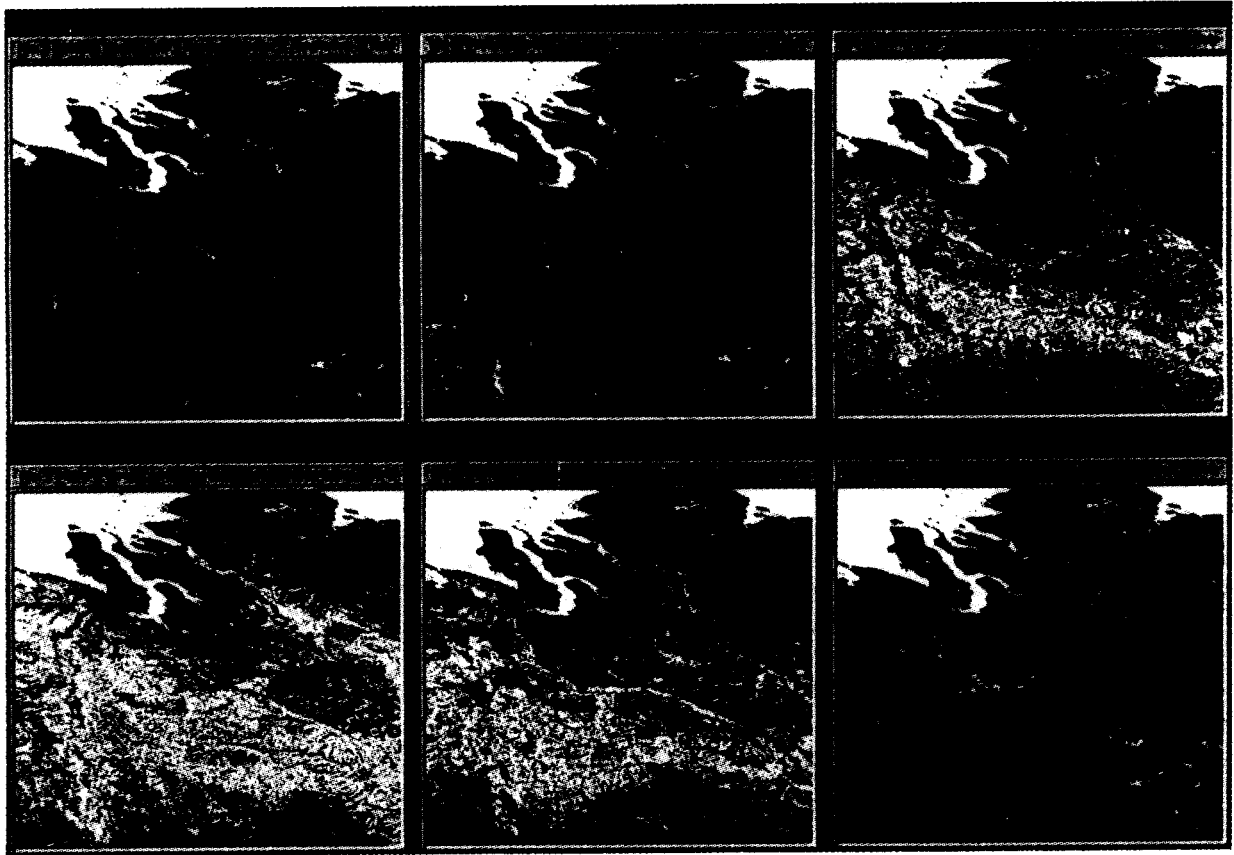


図9 西シベリアにおける植生指数の季節変化（4 - 9月）  
 （データソース：USGS EROS Data Center）



図11 植生の季節変化パターンによる土地被覆分類

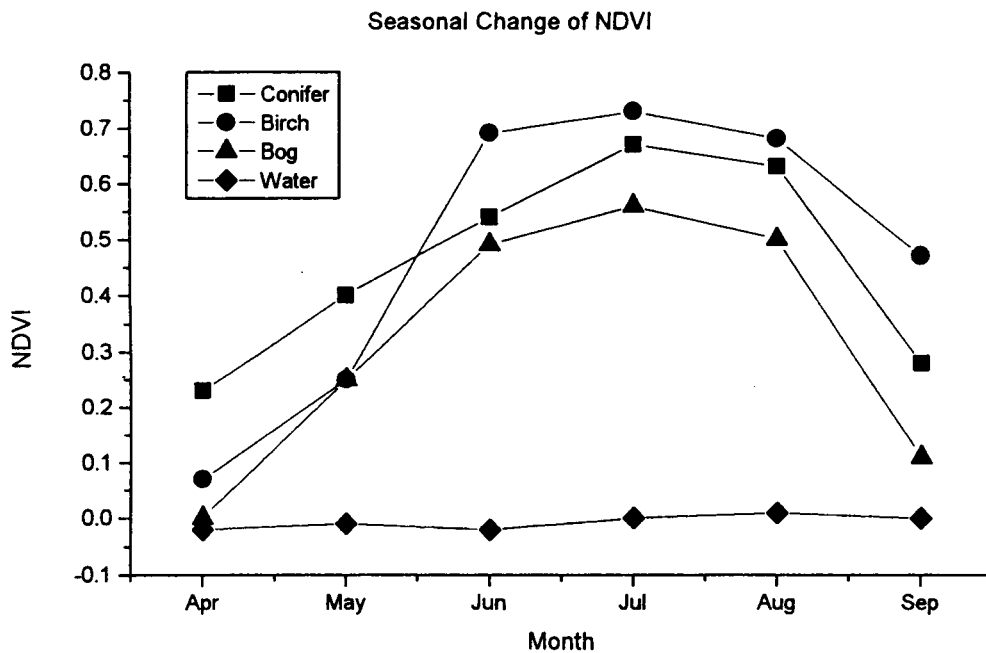


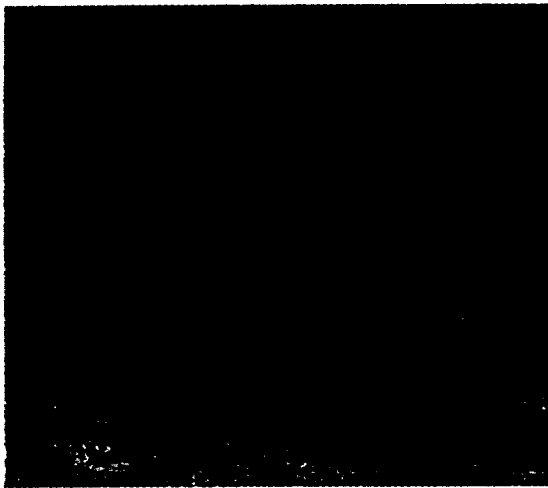
図10 土地被覆別の植生指数の季節変化パターン

よって異なる季節変化パターンを示す。

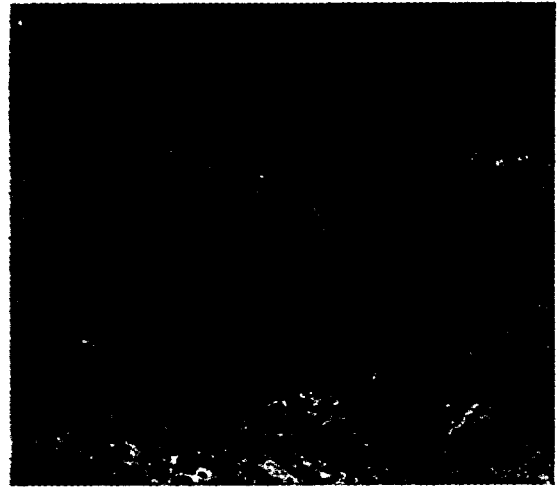
このような植生指数の季節変化パターンを利用して、土地被覆分類を行うことができる。図11は4月から9月までの植生指数データに、教師無し分類法の一つであるISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) を適用して、8種類の土地被覆に分類した結果である。北から南に向かって、山岳ツンドラ、ツンドラ、湿原と森林の混在地帯、森林、草地、ステップなどに分類されている。このような土地被覆分類図を用いることにより、西シベリア全域の湿原面積を算定し、メタン発生総量を推定するための基礎データとして用いることができる。

### (3) 地表面温度の季節変化の観測

NOAA/AVHRRセンサーは2つの熱赤外チャンネル(10.3-11.3 $\mu\text{m}$ 、11.5-12.5 $\mu\text{m}$ )を持っており、地表面の温度を推定するために用いることができる。西シベリアをカバーする熱赤外データは、植生指数データと同様に、EDCの全球AVHRRデータセットから取得した。これらの熱赤外データは、10日間の観測データのうち、植生指数が最大になる日、すなわち雲に覆われている可能性が最も小さい日のデータを選択したものである。図12は、オビ川とその支流であるイルティシュ川の流域(北緯54-63度、東経76-84度)におけるチャンネル4の画像を示したものである。明るい色ほど輝度温度が高いことを表している。図13は、流域中のカレサヴォイ(北緯63度23分、東経78度20分)とプロトニコヴォ(北緯56度51分、東経83度05分)におけるチャンネル4の輝度温度の季節変化を示したものである。これらの結果は、10日ごとのAVHRRデータから導かれたものであるため、雲の影響がかなり残っていると考えられる。グラフ中で輝度温度が急激に低下している部分は、雲を除去しきれなかったために生じた可能性が大きい。また、地表面については放射率の影響があるため温度の推定は誤差を含むことが知られている。森林などの植生については放射率が約0.97であり、温度に変換する際に0.5度程度の偏りが低めにでると考えられる。放射率のより低い草地や裸地については1-2度の誤差を含むため、より詳細な検討が必要である。例えば、



1993/4/11-20



1993/7/11-20

図12 西シベリアにおけるAVHRR熱赤外画像（チャンネル4）

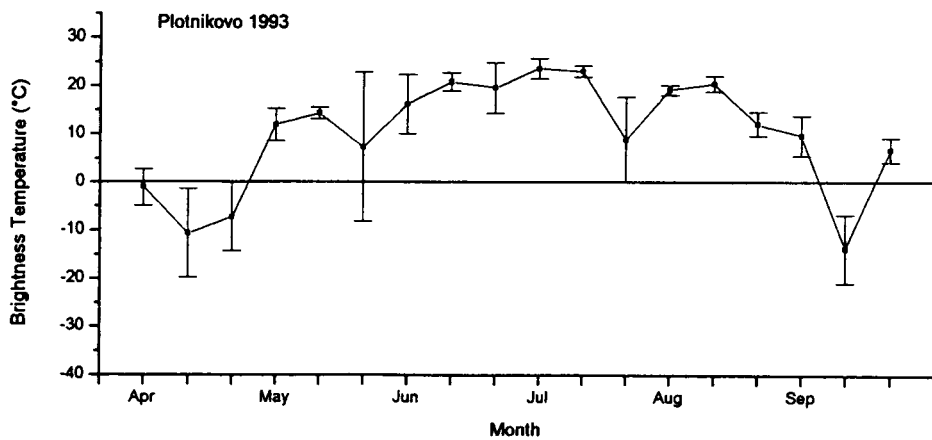
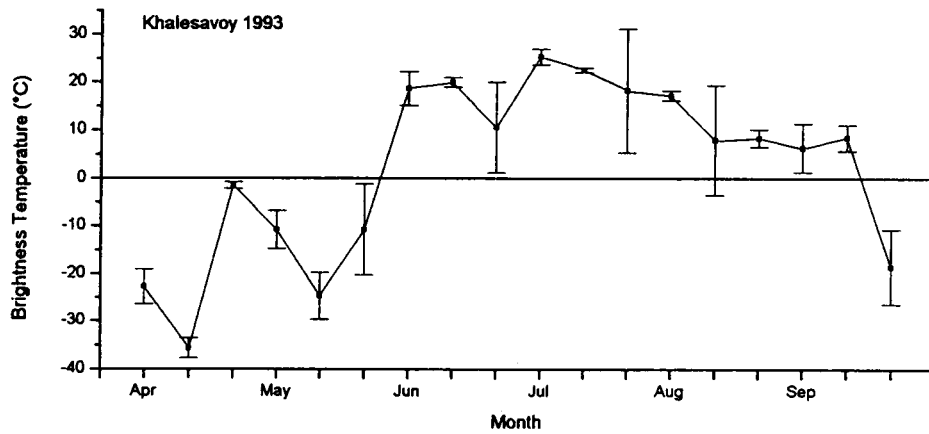


図13 カレサヴォイとプロトニコヴォにおける地表面の輝度温度の季節変化

土地被覆分類の結果により放射率を変えて補正係数を計算する方法が考えられる。

湿原からのメタンフラックスは地温との相関があるという報告があり (Inoue et al., 1997)、メタンの発生源モデルには、植生の種類、水位などととも地温を取り入れる必要があると考えられる。地表面温度の季節変化を衛星で観測し、メタン発生源モデルに入力することにより、大陸レベルのメタン発生量を推定することが可能になると考えられる。

#### 4. まとめ

衛星リモートセンシング、航空機観測および地上調査を組み合わせシベリアの植生と土壌を観測し、温室効果ガスの動態との関連性を調べた。観測域は西シベリアの湿原地帯に重点を置き、土地被覆分布とメタン発生量との関連性を主に調べた。衛星観測には、高分解能センサーと広域センサーを両者の長所が生かせるように併用した。前者は特定のテストサイト (オビ川沿いのハンティマンシスクとプロトニコヴォ) での詳しい観測に使用し、後者は西シベリア全域を高頻度かつ定期的に観測するために用いた。

高分解能センサーとしては主にSPOT/HRVを使用し、テストサイトでの土地被覆分類を行った。ハンティマンシスクでは、土地被覆分類結果と航空機によるメタン濃度の測定値を比較し、両者の間に相関関係があることを確かめた。プロトニコヴォでは、衛星による土地被覆分類結果と地上でのメタンフラックス測定結果を組み合わせ、衛星画像域からのメタンフラックスを推定し、航空機観測による結果と比較した。

広域センサーとしては主にNOAA/AVHRRを使用し、植生指数の季節変化パターンから広域の土地被覆分類を行った。また熱赤外バンドのデータを用いて、衛星データが地表面温度の空間分布パターンや時系列変化パターンを推定するのに有効であることを示した。湿原からのメタンの発生量は、植生や地温などによって影響を受けることが知られており、これらの季節変化が分かればメタン発生源モデルを用いて広域のメタン発生量が推定できるものと考えられる。

#### 5. 参考文献

- Bartlett, K.B. and R.C. Harriss, Review and assessment of methane emissions from wetlands, *Chemosphere* 26, 261-320, 1993.
- Inoue, G., Y. Takahashi, S. Maksyutov, M. Sorokin and N. Panikov, Methane emission rate from the wetlands in west Siberia and its controlling factors, *Proc. 5th Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia*, 34-39, 1997.
- Justice, C.O., J.R.G. Townshend, B.N. Holben and C.J. Tucker, Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, *The International Journal of Remote Sensing* 6, 1271-1318, 1985.
- Panikov, N.S., CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission from norther wetlands of Russia: Source strength and controlling mechanisms, *Proc. Int. Symp. on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases*, 100-112, 1994.
- Tohjima, Y., S. Maksyutov, T. Machida and G. Inoue, *Proc. 3rd Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia*, 50-57, 1995.

飯倉善和, 吉田功, 相馬孝志, 田村正行, NOAA/AVHRR画像の圧縮について, 第10回流水シンポジウム論文集, 5-8, 1995.

[研究発表]

- Y. Yasuoka, M. Tamura and Y. Yamagata, Investigation of soils and vegetation in Siberia by remote sensing techniques, Proc. 1st Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia, 45, 1993.
- M. Tamura, Y. Yasuoka, Y. Yamagata and K. Tokumura, Investigation of soils and vegetation in Siberia by satellite remote sensing, Proc. 2nd Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia, 94-98, 1994.
- Y. Yasuoka, M. Tamura and Y. Yamagata, Application of remote sensing to environmental monitoring: Global wetland monitoring, Opt. Method. Biomed. & Environ. Sci., 269-272, 1994.
- M. Tamura, Y. Tohjima and Y. Yasuoka, Analysis of a SPOT satellite image at Plotnikovo in western Siberian wetlands, Proc. 3rd Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia, 125-128, 1995.
- Y. Iikura, H. Taofik, M. Tamura and Y. Yasuoka, On the development of NOAA/AVHRR database, Proc. 3rd Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia, 129-113, 1995.
- M. Tamura, Y. Yasuoka and Y. Yamagata, "Estimation of methane emission from western Siberian wetlands by using satellite remote sensing techniques," International Symposium on Vegetation Monitoring, 95-98, 1995.
- Y. Yasuoka, M. Sugita, Y. Yamagata, M. Tamura and T. Suhama, Scaling between NOAA AVHRR data and LANDSAT TM data for monitoring and mapping of wetlands, International Symposium on Vegetation Monitoring, 131-136, 1995.
- M. Tamura and Y. Yasuoka, "Observation of western Siberian wetlands by using remote sensing techniques: Estimation of methane emission," Proceedings of the 16th Asian Conference of Remote Sensing, D31-35, 1995.
- Y. Yasuoka, Y. Yamagata, M. Tamura, M. Sugita, Monitoring of wetland vegetation distribution and its change by using microwave sensor data, Proceedings of the 16th Asian Conference of Remote Sensing, A11-A16, 1995.
- 飯倉善和, 吉田功, 相馬孝志, 田村正行, NOAA/AVHRR画像の圧縮について, 第10回流水シンポジウム論文集, 5-8, 1995.
- タフィック・ヒタヤット, 飯倉善和, 横山隆三, 田村正行, 西シベリア湿地帯のNOAA/AVHRRデータセットの構築, 日本リモートセンシング学会第21回学術講演会論文集, 171-174, 1996.
- M. Tamura and Y. Yasuoka, Observation of vegetation and surface temperature in west Siberian wetlands by NOAA/AVHRR data, Proc. 2nd Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia, 92-94, 1997.