

B-053 ロシア北方林における炭素蓄積量と炭素固定速度推定に関する研究

(4) 炭素蓄積量と炭素固定速度の広域評価

独立行政法人森林総合研究所 研究コーディネータ
国際連携拠点

沢田治雄
鷹尾元

平成17～19年度合計予算額	20,848千円
(うち、平成19年度予算額	6,838千円)
※ 上記の合計予算額には間接経費	4,811千円を含む

[要旨] ロシアの森林面積は、世界の森林面積の2割を占めている。しかも、中央シベリアと東シベリアには凍土地帯が広がり、広大なカラマツ林を形成している。温暖化の影響は高緯度地帯で顕著に現れると多くのシミュレーションが警告しており、限界的な環境下に生育しているロシアの森林では、その影響の大きさが懸念されている。しかし、ロシアの森林と温暖化との関係に関して、公開されている科学的な成果が乏しかった。本研究は、NOAA衛星から得られる植生指数 (NDVI) と表層温度 (LST) データ、地上での林分調査データを統合して、ロシア全域の森林炭素量の推定手法開発を行ったものである。主に用いた衛星データは20年分の10日間合成NOAAデータである。NOAAデータに関しては、森林総研の時系列モデルフィルタ (LMF-KF法) を作用させて、雲などの影響のほとんどない地上データセットを利用することで、森林域を同定する手法を開発し、その面積変化と環境変化を明らかにした。また、森林火災のようなイベントを効率的に発見する手法として、記号列処理手法を開発した。植生指数と表層温度データの組み合わせは生態学的にも意味のある様々な植生環境パラメータを生み出せることを示した。植生の生育因子である水分指数もそのひとつであるが、NDVIとLSTから、水分指数画像を生成する手法を開発した。また、この地域に特徴的な凍土地帯に関して、凍土深は推定できなかったものの、その分布密度を推定できることを示した。凍土地帯は土壌中炭素量が極めて多いことから、温暖化の影響に関しても特別な注意が必要な地域であり、自動判別を可能にした意義は大きい。炭素固定量に関しては、NOAAデータの10日間隔のNDVIとLSTを利用した純一次生産量 (NPP) の推定を行い、1980年代からの変化の様子がロシアで面的なパターンを持ち、広域環境の影響であることを示した。

[キーワード] 炭素固定、ロシア、凍土地帯、北方林、温暖化

1. はじめに

地球温暖化は、全球的に均一な温度上昇ではなく、偏在した変化を示し、高緯度地方では温度上昇が著しく大きいことがシミュレーションモデルなどで予測されている。その高緯度地帯に位置するロシアの森林面積は8億haにおよび、全世界の森林面積の約2割に相当すると推定されている。しかも、地温が低い森林では有機物の分解が遅く、地表や地下にも大量の有機物が蓄積され

ているため、温暖化による地温の上昇はそれらの分解を促進し、温室効果ガスの発生源として作用する可能性が高い。そのため、ロシアの森林地帯における二酸化炭素の蓄積や固定能力と地球温暖化との関係は、極めて大きな問題であるが、その実態は不明である。

ロシアは広大で経度方向に150度にわたる（およそ東経30°～180°）ため、そのようすを把握するには広域観測を行っている衛星観測データを利用することが効果的である。また、近年の地球温暖化等の影響を含めて、森林の生育・成長具合を把握する必要があり、温度観測も可能な高頻度観測衛星の利用が不可欠と考えられる。さらに、シベリアの森林は一般的には成長速度が遅いため、近年の観測データだけでは森林の蓄積量変化はほとんど見られない。これらの理由から、広域、高頻度、長期観測の特徴を持ち、20年以上の観測データがあるNOAA衛星データを利用することがロシア北方林の炭素固定解析には最適と判断した。

2. 研究目的

本研究は、サブ課題（1）、（2）および（3）で得られる地上観測データと、衛星の時系列観測データを融合させてロシア全域の炭素蓄積量と固定速度を推定する手法を開発することを目的としている。そのために、まずNOAAデータをはじめ、各種のフォーマットで提示されている既存のGISデータおよび地上調査データ等と同じソフトウェア上で総合的に処理可能にし、データセットを作成する。これらのデータのうち、衛星の時系列データにもとづく植生状況の把握手法の開発と、植生生育環境因子として温度などの環境を広域に把握する手法を開発して、広域・長期の炭素固定速度解析を可能にする。また、この地域に特徴的な凍土地帯の判定を可能にする手法を開発する。

3. 研究方法

NOAA衛星による植生指数（NDVI）は、植生監視によく利用されているが¹⁾、成長期間の変化は20年間で10日程度と言われるシベリアで、植生の季節変化を的確に把握するには少なくとも10日間隔での情報が必要となる。しかし、そのような質のデータは一般には提供されていない（米国海洋大気庁NOAAから提供されている10日間合成データは、画素ごとに10日間で最良のデータを選定するもので、各画素は10日間隔のデータではない）。また、温度データは森林火災の発見などに使われるものの、地表の温度データとしてはほとんど使われていない。それは、雲や大気の影響を強く受け、表層温度データとして使うのが困難なためである。

そのため本研究では、森林総研が開発した衛星データの時系列処理手法（LMF-KF）を利用して、雲や大気の影響、システムノイズなどを除去した10日間隔植生指数（LMF-NDVI）および表層温度（LMF-LST）のデータを利用した。この処理では、数ヶ月間の欠測データも補完でき、20年にわたる728シーンの画像がNDVIとLSTのそれぞれで再生されている。

同時に、ロシア全域の森林解析を行うためのデータ蓄積構造にかかわるシステム設計を行い、リモートセンシングデータをはじめ、GISデータおよび地上調査データ等を総合的に処理可能にした。このような衛星データと地上データ等に基づくモデル化が不可欠である²⁾。その上で、時系列データ処理（LMF-KF）を施した表層温度データ（LMF-LST）の特徴を明らかにするとともに、ロシアの環境変化の概要を把握し、森林の蓄積量および炭素固定量に係わるパラメータ情報をサブ課題（1）、（2）、（3）の研究との整合性を確認しながら集積した。さらに、衛星の時系列デー

タにもとづく植生状況の把握手法の開発と、生育環境因子として温度と共に重要な水分環境の把握法開発を行い、広域・長期の炭素固定速度解析を可能にした。

(1) ロシアの森林概況

衛星データの解析に当たって、ある程度信頼できる既存情報を整理し、参照データとする必要がある、そこで、国際食糧農業機構（FAO）の世界森林資源評価などのデータを確認して、基礎情報とした。

(2) 炭素蓄積にかかわるGISデータベースの構築

衛星データから地物の判定を行う精度は、既存情報に依存する面が多いことはよく知られている。またロシアの地理情報に関しては、国際的な活動をしているいくつかの機関が作成したものもある。しかし、フォーマットや地図投影法が異なるなど、一元的な利用は困難である。そこで、炭素集積に関連するそれらの資料を統一的に利用できるようにデータベースを構築し、他サブ課題でも利用可能にした。

(3) 新たな森林モニタリング手法の開発

1) 記号列処理を利用した高頻度観測衛星による地表分類

森林総研で開発した時系列モデルフィルタ¹⁾の有効性を確認し、20年間にわたる10日間隔の植生指数（LMF-NDVI）と温度情報（LMF-LST）のデータセットを作成した。これらによって炭素固定量を推定するには、同じ分解能データによる被覆分類情報が必要である。しかし、空間分解能と10日間隔という時間分解能を保持して被覆状況を把握・分類する手法はこれまでに報告がないため、新たな自動処理手法を開発することとした。

高頻度観測衛星データでは、雲やシステムノイズの影響が大きく、そのままでは地表面の様子が観測できない場合が多い。そのため、雲や大気、システムノイズの影響を極力軽減できる前処理手法を用いる必要がある。また、より詳細な土地被覆情報を得るためには多バンドデータを用いた解析を行うことが考えられるが、ランドサットETM+などの高解像度衛星画像で行われているような画素分解処理を行った上で、時系列解析を行おうとしても、雲やノイズの影響が大きく、時系列処理は困難である。植生指数や表層温度などの単一変量の時系列データについて、雲やヘイズ、システムノイズの影響を軽減する手法を開発したが、この方法も複数のバンドを同時に処理することはできず、バンド毎に独立に処理した場合には分光反射スペクトルの形が大きく変わってしまう可能性がある。このように、画素毎に多バンドデータで時系列処理を行ってノイズを軽減し、その結果を用いて分類図を作成する方法には解決すべき多くの問題がある。

そこで、最終プロダクトである土地被覆分類図の情報量に着目した。土地被覆分類図の情報量は3~7bit/pixel であると考えられるが、元となる衛星データはその数倍の情報量を持っている。つまり分類図の作成は「データ量の合理的削減」と解釈することができる。先に述べた、雲などの影響を取り除く前処理を行った上で分類する方法は、一連の処理の最後に情報量の削減を行うものである。しかしデータの削減方法が適切なものであると仮定すれば、前処理の段階でデータ量の削減を行っても不具合は生じないのではないかと考えられる。具体的には、まずKohonen²⁾の自己組織化マップ（SOM）を用いて画素のスペクトルデータの記号化を行う。さらに、雲やノイ

ズの影響を軽減するために、ここで得られた記号を時間の順に並べて記号列とし、SOM を用いて各画素のスペクトルの時系列的变化を分類した。

2) 水分環境の推定手法の開発

本研究で推定の目的としているロシア全域の炭素固定量は植生の生育によるものであるが、植生の生育因子として重要な因子は温度と水分である。温度情報に関しては昨年度作成した表層温度データ (LMF-LST) が利用できるが、水分データに関しては新たに作成する必要がある。NOAA衛星で直接的に観測できるデータは可視、近赤外と輝度温度情報のみであるが、植生の温度-水分環境を利用するためには、表層温度データ (LMF-LST) と空間分解能および時間分解能を同じくする水分環境データが必要である。水分環境情報として、その有効性が確認されている一般的なデータはNDII (Normalized Difference Infrared Index) データである。そこで、NOAAデータから植生地帯の水分情報NDIIを推定する手法を開発することとした。

(4) 時系列衛星データベースの構築

本研究のための、データ解析システムを設計して、ソフトウェアとデータベースを用意した。ロシア全域の高頻度・長期観測データとしてはNOAA衛星のPathfinderデータ (8km分解能、10日合成、1981年7月中旬から2001年9月下旬まで) から、森林総研のアルゴリズムで処理した植生指数 (NDVI) および表層温度 (CH4) のノイズ除去データ (それぞれ、LMF-NDVI、LMF-LST) を利用した。また、国際応用システム分析所 (IIASA) などの機関が作成したシベリアの環境調査データや、1km分解能のSPOT-VGTおよび250m分解能のMODISデータ集積し、基本処理を施して広域衛星データ解析のクロスチェックデータとして整備した。

1) 温度パラメータの検証

LMF-LSTに関しては、ロシアの測候所における気温計測データと比較して、その特徴を把握した。また、炭素蓄積量の変動に係わる自然要因としての気温の変化概況を測候所の温度データで確認した。

2) 20年間の環境変動指標データの作成

LMF-NDVIとLMF-LSTを利用して、シベリア全域の20年間の環境変動を示す各種の指数化データセットを作成した。LMF-NDVIからは植生分類と被覆率推定に有効な指標データを作成した。LMF-LSTデータからは、植生の成長にかかわる温度環境指標データを作成した。また、本研究の特徴的なプロダクトとして、LMF-LSTとLMF-NDVIの組み合わせ分析から植生の生育環境を示す指標データを作成した。

まず、LMF-LSTデータで摂氏1度以上のときの植生指数 (NDVI) の最小値と最大値から植生の成長開始期 (Onset) と成長終了期 (Offset) を特定し、成長期間を特定した。この成長期間における植生指数 (NDVI) の積分値を算出し、「成長期間内植生指数積分値画像データ (SumNDVI)」を年次ごとに作成した。このようにして作成した「成長期間内植生指数積分値画像データ (SumNDVI)」の1980年代前半の3年間 (1982、1983、1984年) と1990年代後半の3年間 (1997、1998、1999年) の平均値の差分を算出して画像化し、その概況を確認した。

(5) 凍土地帯に関する考察

凍土地帯は土壌中炭素量も温帯や熱帯の森林に比べて極めて多いため、凍土地帯の融解は極めて大きな温暖化への影響因子となる可能性が高い。温暖化の影響によって、メタンの発生が危惧される凍土地帯を衛星データで自動的に判別する手法を開発する。

(6) 森林の成長量・炭素固定量推定

広域の純一次生産量推定のためには、森林域の変化把握と共に、森林における生態系の炭素収支の把握が極めて重要である。植生指数 (NDVI) と表層温度指数 (LST) の時系列変動を利用して、森林生育域の判定や、純一次生産量の推定によって、森林における炭素の固定量と固定能の推定法を開発する。

4. 結果・考察

(1) ロシアの森林概況

1) FAOによる世界森林資源評価 (FRA) 2005におけるロシアの森林情報 (資料参照、p87~88)

FRA2005におけるロシアの森林資源情報は、基本的にはロシアからの情報をもとにまとめられている。2005年の森林情報とされているデータのソース情報は、2003年のリモセンデータである。これによると、ロシアの森林面積は約80億haで、炭素量188,658Mt、森林減少面積は年96,000haとされている。

2) 森林面積の変化

閉鎖林の増加、非閉鎖林の減少、変化の少ない人工林面積などが特徴である。ロシアが定義する森林フォンド (森林地帯の河川や草地を含む) は約11億1000万haで、1970年代は閉鎖林の増加が見られたが、1980年以降は閉鎖林面積の変化はほとんど無い (図1)。一方で非閉鎖林の面積が増加しているが、これは原野や農耕地が林地となっていることを示している。人工林の面積増加はほとんど見られない。

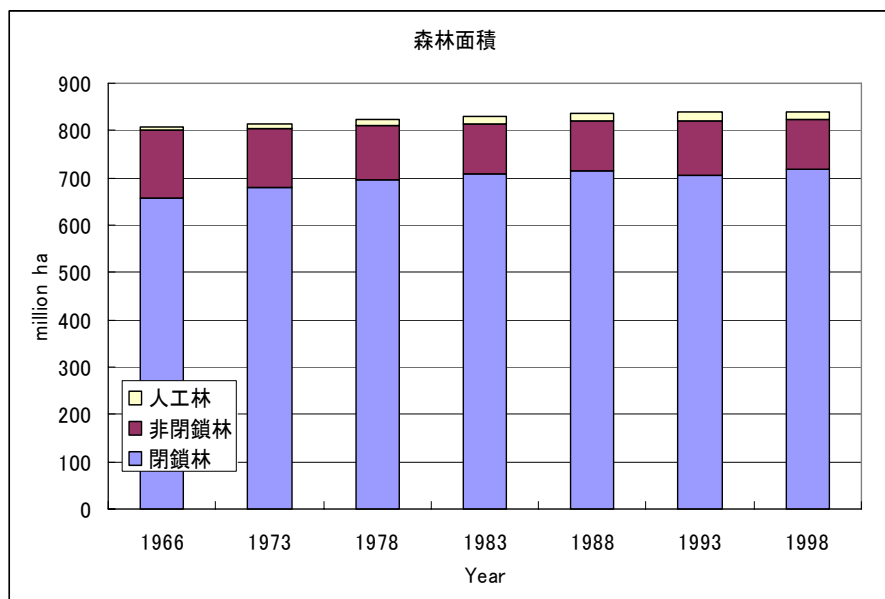


図1. ロシアの森林面積の変化

3) 蓄積量と成長量・伐採量の変化

ロシアの森林面積はあまり変化がないが、蓄積量は森林火災により1993年に一時的に減少した。また、森林伐採量は、経済的状況の影響で減少傾向にある。なお、年平均成長量は、火災の影響と考えられる変化を示しているが、大きな変化は見られない（図2、図3）。

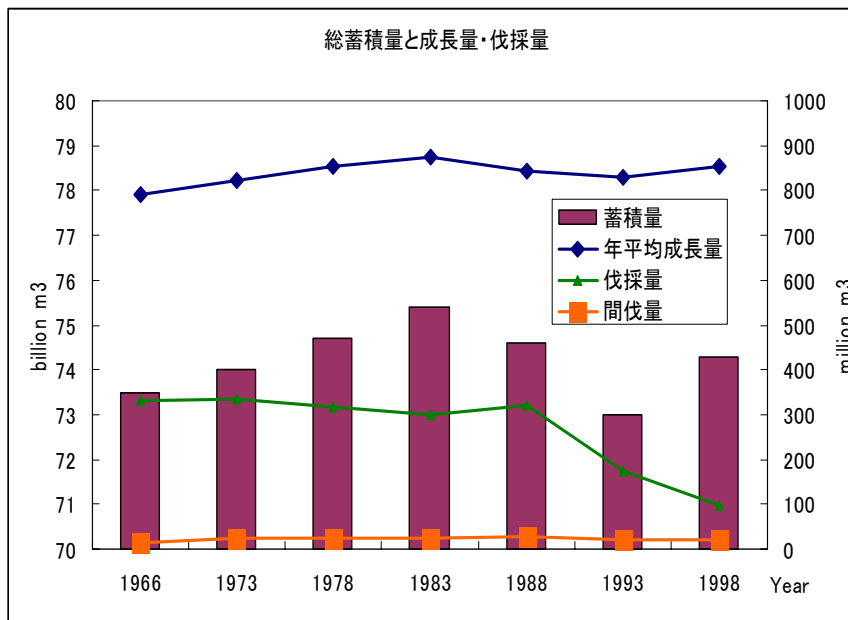


図2. ロシアの総蓄積量と生長量・伐採量の変化
(全ロシア森林資源研究情報センター資料より)

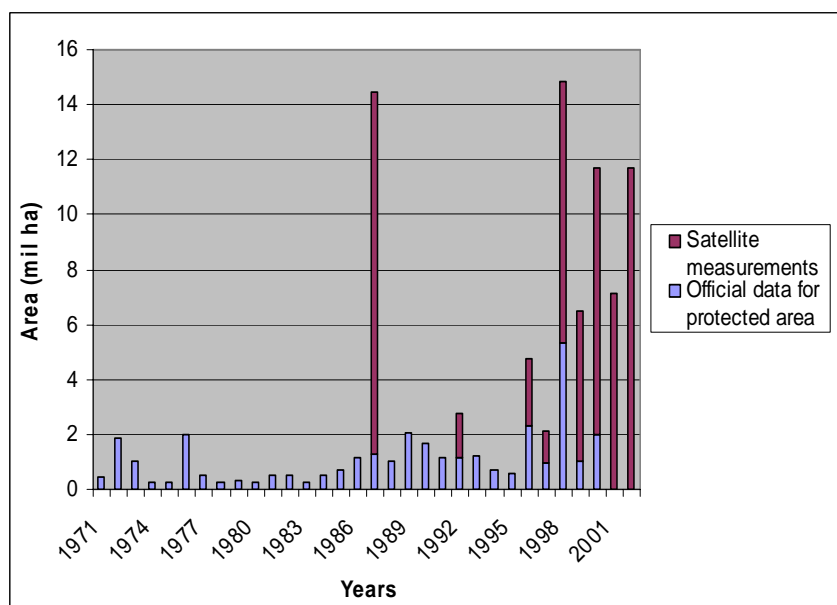


図3. ロシアにおける林野火災の傾向 (1971~2002年)

4) ランドサット衛星による森林蓄積量の推定法

森林地帯における蓄積量は冬季のランドサット衛星データから推定可能であることを明らかにしており（図4、図5、鷹尾 未発表データ）、NOAAなどの広域データの評価に利用できた。

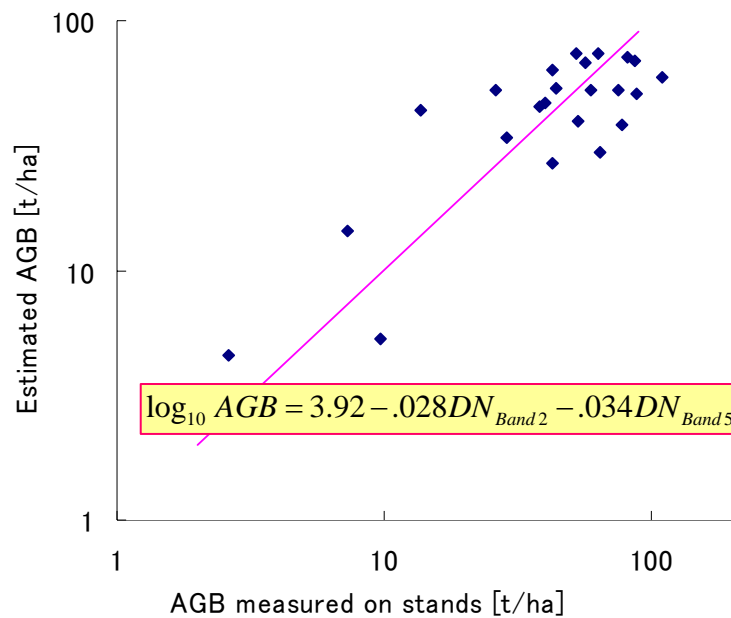


図4. 冬季のランドサットTMによる地上部バイオマス（AGB）の推定式

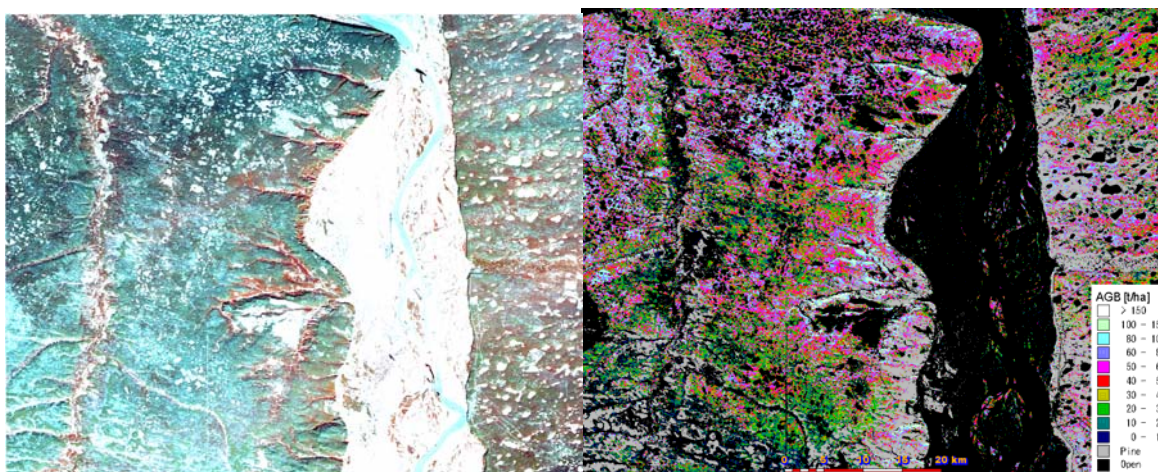


図5. 冬季のランドサットデータ(左)とランドサットで推定された地上部バイオマス量(右)

5) 森林の攪乱

衛星データによって、森林開発・攪乱の様子が確認できる。図では1980年代には主に山脈の西麓で伐採が行われていたが、徐々に山脈奥地へ開発が移ったようすがわかる。しかし、ハバロフスク全域での年間攪乱面積は急激に減少しており、ソ連崩壊後の経済の混乱による極東部の林業活動の低迷と軌を一にしている（図6）。

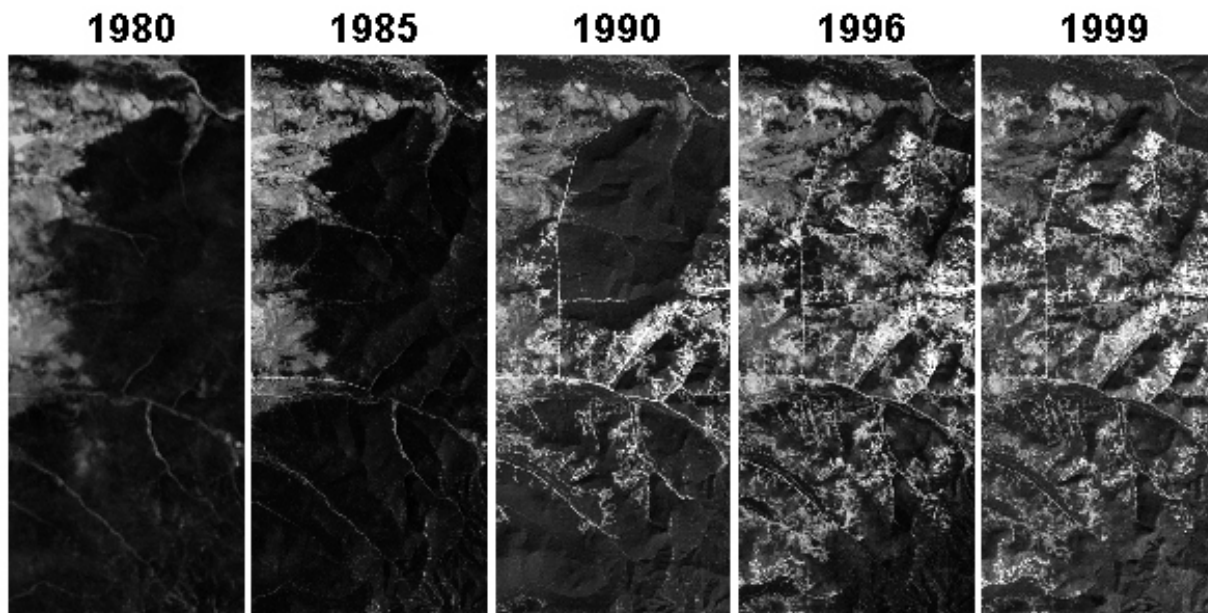


図6. 森林攪乱の進行

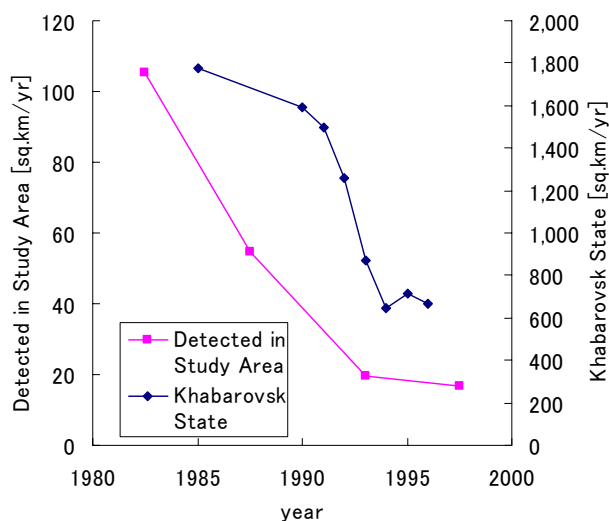


図7. 年間森林攪乱面積の推移

6) 森林火災

ロシアの森林火災、原野火災の面積の年々変動を図7に示す（A. Shvidenko et al., personal communication）。衛星データによると、1999年には我が国の国土面積（37万平方km²）の3分の1以上が消失したことを示している。最新の地球観測衛星による検知の研究成果と比べると、政府のデータはおろか、この衛星データ判別でも、実際の森林火災、原野火災面積を過小に見積もつ

ていると考えられている。

7) 森林変化の要因

ロシアにおいて森林変化を起こしている要因は、表1に示すように、虫害、森林火災、気象害、病気などである。

表1 森林変化の要因

Forest Destruction for Different Reasons

Federal District	Perished Stands (numerator area, ha; denominator: drying rate, %)	Area of stands perished for different reasons, ha						
		Destructive insects	Wild animals	Forest diseases	Unfavorable Weather conditions	Forest fires	Anthropogenic factors	Industrial emission
Northwestern	167294	149206	90	3024	2637	11036	1300	1
	2.07	89.2		1.8	1.6	6.6	0.8	
Central	13082	4088		3241	2957	2371	424	1
	0.89	31.3		24.8	22.6	18.1	3.2	
Volga	9054	391	93	2184	5210	910	263	3
	0.29	4.3	1	24.1	57.6	10.1	2.9	
Southern	1071	54		21	189	807		
	0.28	5		2	17.6	75.4		
Urals	74184	72		912	5596	67186	418	
	1.14	0.1		1.2	7.5	90.6	0.6	
Siberian	68240	32823	144	1038	4369	29795	71	
	0.26	48.1	0.2	1.5	6.4	43.7	0.1	
Far Eastern	70252	18184		5934	19657	26457	20	
	0.25	25.9		8.4	28	37.7		

Total	403177	204818	327	16354	40615	13856 2	2496	5
	0.55	50.8	0.1	4.1	10.1	34.3	0.6	

(2) 炭素蓄積にかかわるGISデータベースの構築

衛星データ、GISデータ、さらに地上観測データを相互にリンクさせることができるシステムをTNTmips (MicroImage Inc.) 上で構築した。データベース化した情報は、NOAA (8km) Pathfinderデータ、SPOT-VGT(1km)データ、ランドサットデータなどの衛星データをはじめ、IIASAの各種環境GISデータ、国連農業食糧機構 (FAO) の土壌図、森林図、測候所温度データなど、約150種のデータである。

炭素蓄積量の重要な資料である森林の林分調査データとしては、Usoltsev(2001)のデータのうち、位置座標が機知であるデータ5596プロットのデータをGISデータとした。樹種としては、マツ林 1632地点、トウヒ林678地点など、主要樹種のデータを含んでいる。

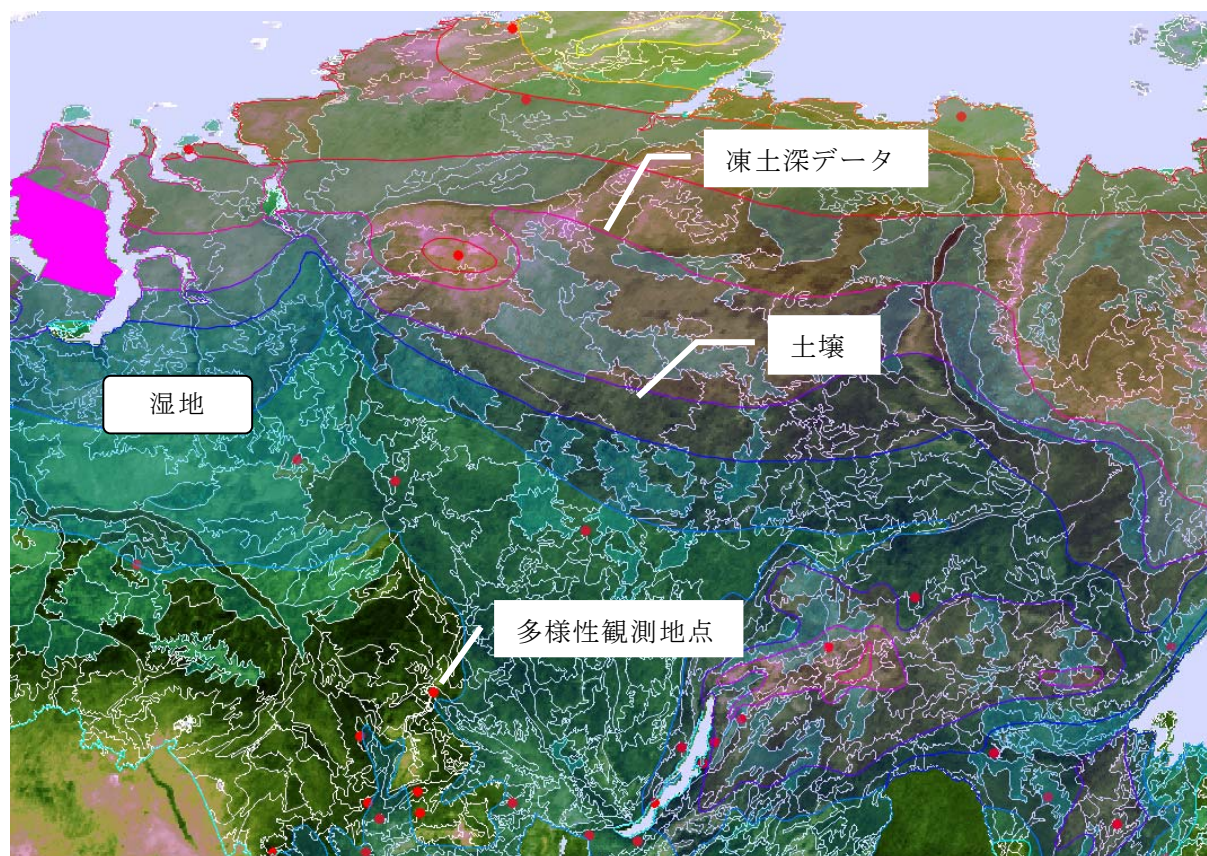
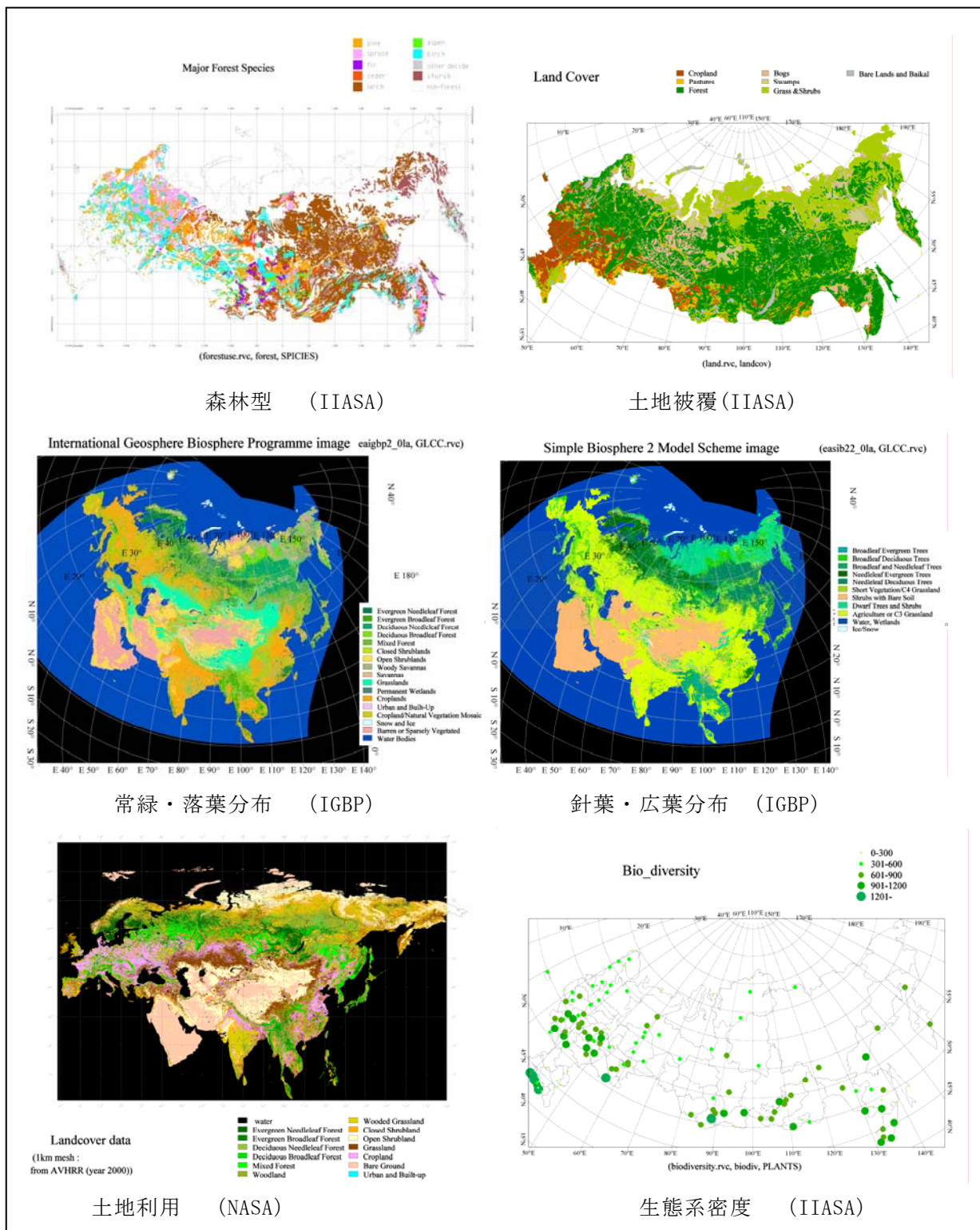


図8 NOAA衛星とIIASAデータの併用例 (土壌、湿地、凍土深、多様性観測地点などを統合)



森林型 (IIASA)

土地被覆 (IIASA)

常緑・落葉分布 (IGBP)

針葉・広葉分布 (IGBP)

土地利用 (NASA)

生態系密度 (IIASA)

図9 収集して統合化した様々な地理情報の例-1

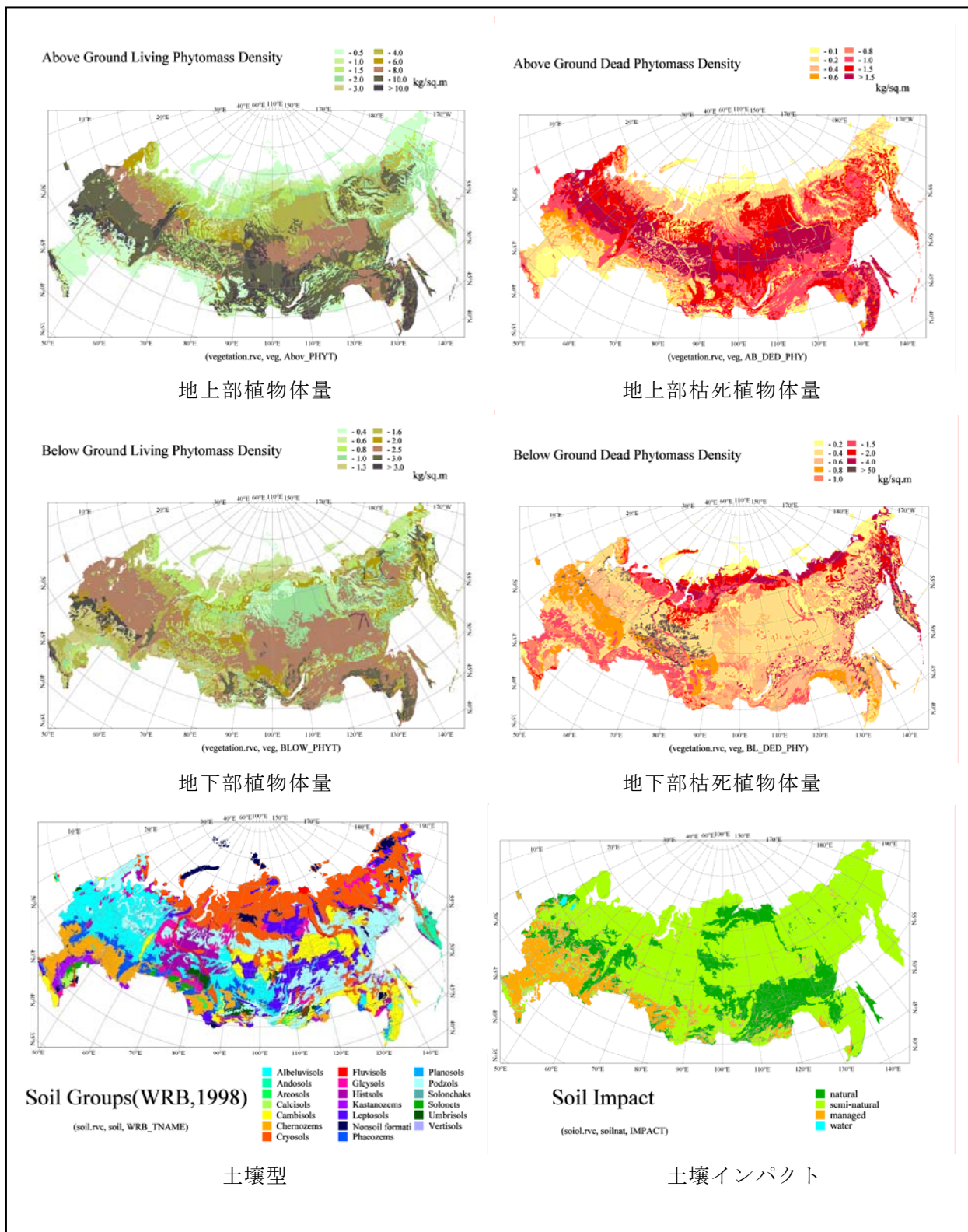


図10 収集して統合化した炭素量関連情報の例ー 2

3) 新たな森林モニタリング手法の開発

1) 記号列処理を利用した高頻度観測衛星による地表分類手法の開発

高頻度観測衛星データを用いて、植生などの季節変化をモニタリングするには、雲などのノイズ処理を行い、10日間隔のデータを分析することが不可欠である。一方、火災や伐採による被覆物の変化は、被覆分類カテゴリーの変化として把握する必要がある。しかし、10日間合成データで被覆物分類を継続的に行い、変化地抽出を実用的化するには、自動処理手法を開発する必要がある。また、ロシア全域を対象とするような場合は、きわめて多量なデータ処理が必要であり、効率的な処理手法が求められる。そこで、高次元のデータを記号列処理化して高速に処理する手法を開発した。ソフトウェアの開発・検証に利用した対象地は図11のエリアである。

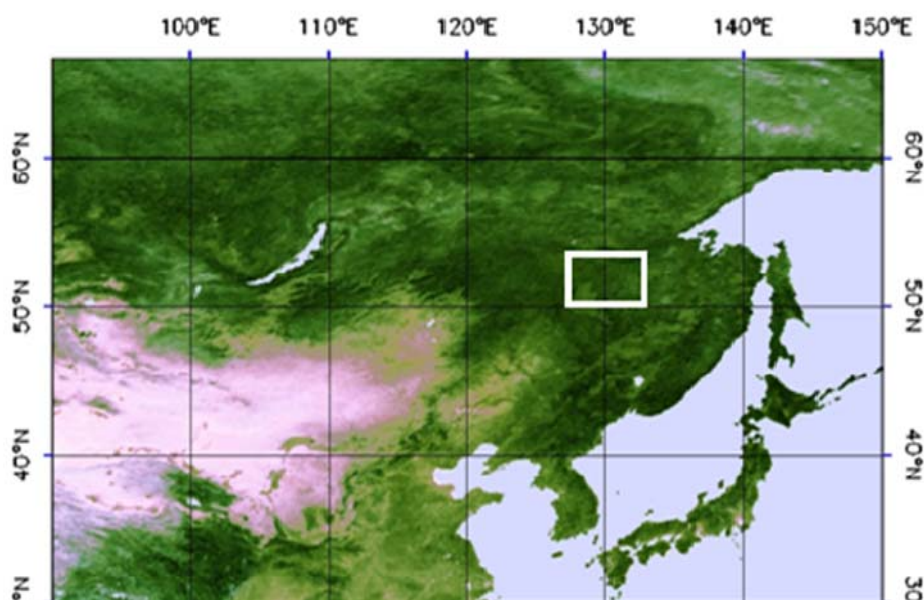


図11 記号列処理法の評価エリア

実際のデータ処理に際しては、自己組織化マップ (SOM) の再現性を確実にするため、初期値は NDVI と NDII の 2 次元ヒストグラムに基づいて発生させ、バッチ学習型 SOM アルゴリズムを用いた。予備実験を行い学習の繰り返し回数を 1000 回とした。まず、OPA (Orthogonal Projection Approach)³⁾ によって、すべての時期の全画素のスペクトルのスクリーニングを行った。次に 20×20 の SOM を作成した結果、図 12 に示すように、土地被覆あるいは雲に対応したマップを得ることができた。テストデータは降雪域のものであるので、主に「植生」⇔「土壌」⇔「雪」と「植生」⇔「雪」の時系列変化の経路がスペクトル SOM 上で確認できた。

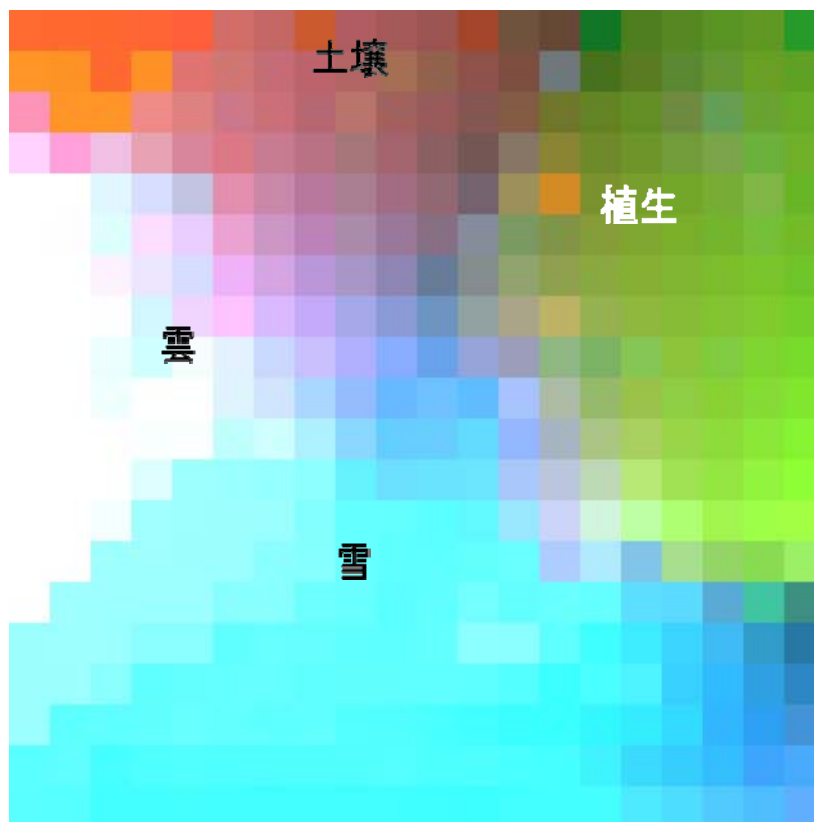


図12 4バンドスペクトルSOM(20×20)

スペクトルSOMのノード番号をそのまま記号として用いる方法も考えられる。しかし、隣接するノードで対応するコードベクトルの差が小さいものもあり、このままノード番号を用いると記号が冗長になることが予想された。そこで、SOMノードをクラスタリングする方法によって記号の集約を行い、400ノードを32のクラスタとした。ここでのクラスタ番号をスペクトルの記号として用いた。雲に相当するSOMノードをマスクした上で、各画素についてスペクトルの時系列変化を記号列に変換した。これらの記号列を位置特異的スコア行列（PSSM: Position Specific Scoring Matrix）による類似度を使って10×10のSOMに射影した。記号列SOMのコードベクトルを解析したところ、雲の影響を受けていないスペクトルの時系列変化を表していることが確認できた。これによって、火災等の突発的な変動による被覆変化も捕らえられた（図13、図14）。

このようにして10日間合成の衛星データから、10日ごとに自動分類結果を得ることが可能であることが確かめられた。この手法によって被覆状況の変動が明確になることが期待できる。

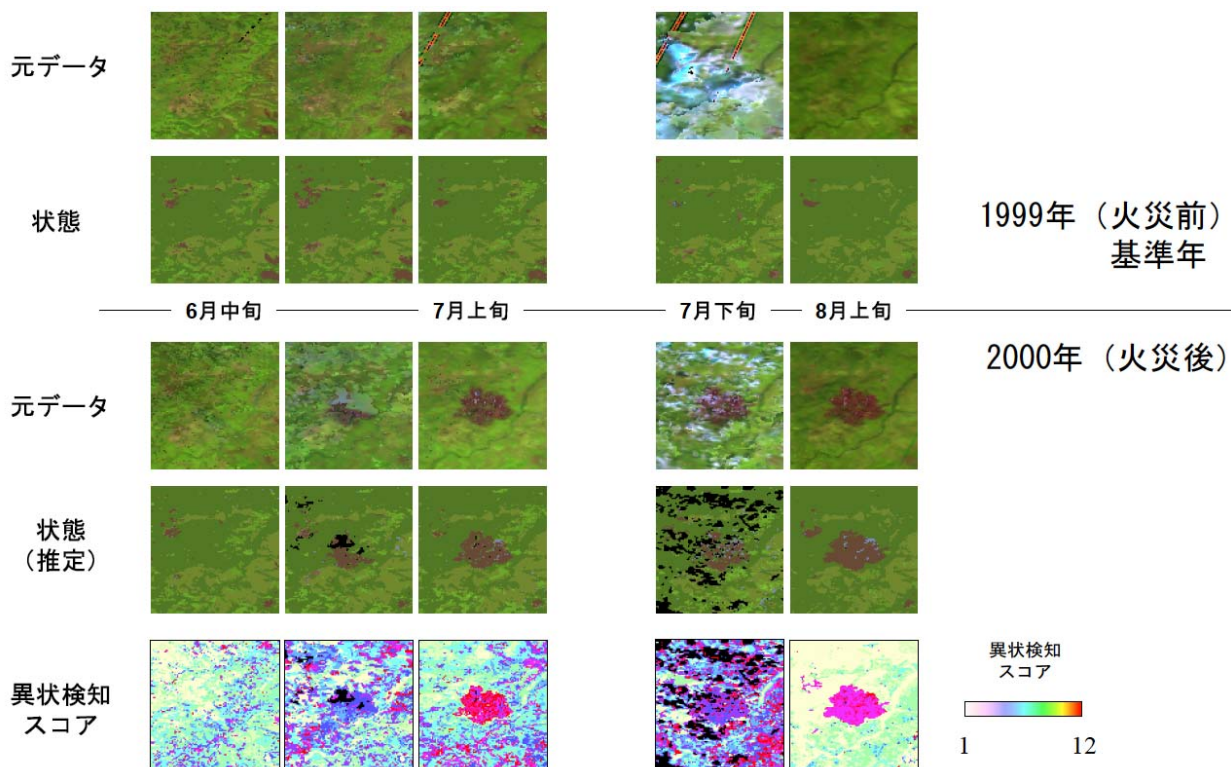


図13 SOMによる分類手法を用いた突発的な変化（火災被害）把握

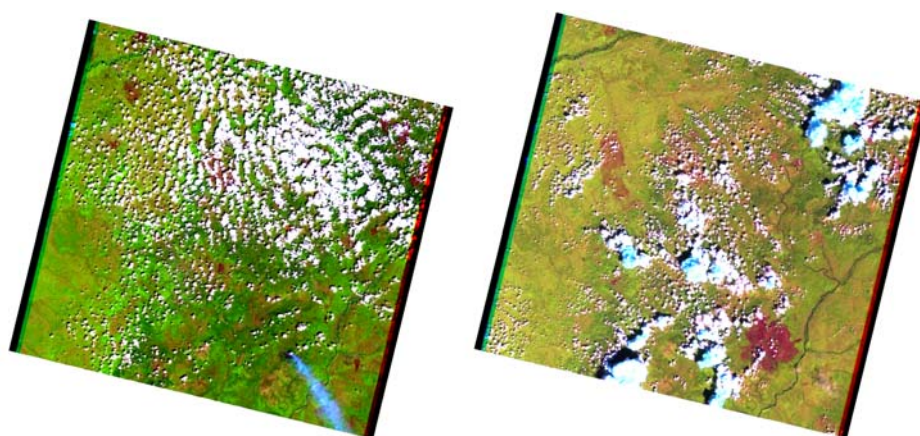


図14 火災地点のランドサットデータ画像(左：2000年6月16日、右：2000年8月3日)

2) 水分環境の推定手法の開発

葉の水分含有指数 (LWCI) とリモートセンシングデータによるNDIIデータ ($(IR-MIR)/(IR+MIR)$) の相関は極めて高く、植生の水分環境はNDIIで代表できると報告されている。そこで、NOAAデータ LMF-LSTと LMF-NDVIからNDIIを推定する手法を考案することにした。

提案された重回帰式としては下記のような式 (1) があるが、実際にこれらのパラメータを常緑林と落葉林で共通に使えるものではなかった。

$$NDII = a + b \cdot NDVI + c \cdot T_{ch4} + d \cdot \frac{NDVI}{T_{ch4}} \quad (式 1)$$

そこで、0次近似として、関係性を学習する「自己組織化関連マップ」を作成した。これは同一時期、同一地点の (NDVI、ch4、NDII) をひとつのベクトルデータとみなし、自己組織化マップを作成するものである。

$$Z_i(NDVI, ch4) = p(i) \cdot \exp \left\{ - \frac{(NDVI - w_i^{NDVI})^2 + (ch4 - w_i^{ch4})^2}{2\gamma^2} \right\}$$

$$NDII_e = c_1 \cdot \frac{\sum_i Z_i(NDVI, ch4) \cdot w_i^{NDII}}{\sum_i Z_i(NDVI, ch4)} + c_0 \quad (式 2)$$

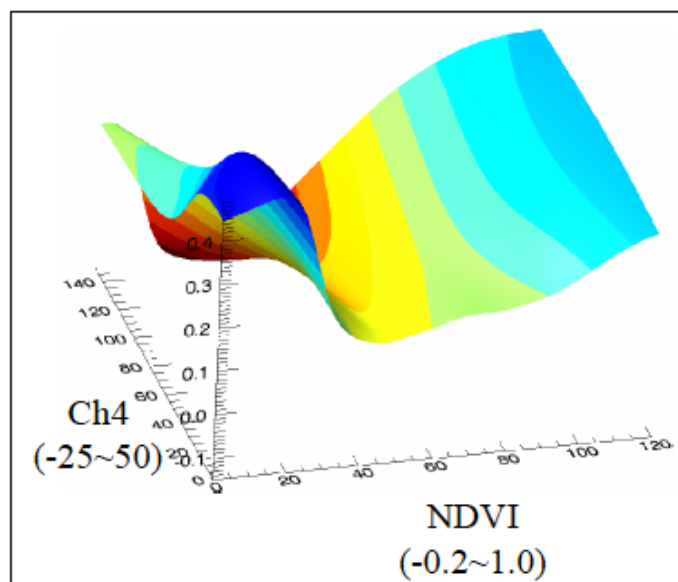


図15 植生指数 (NDVI) と表層温度 (Ch4) によるNDIIの推定

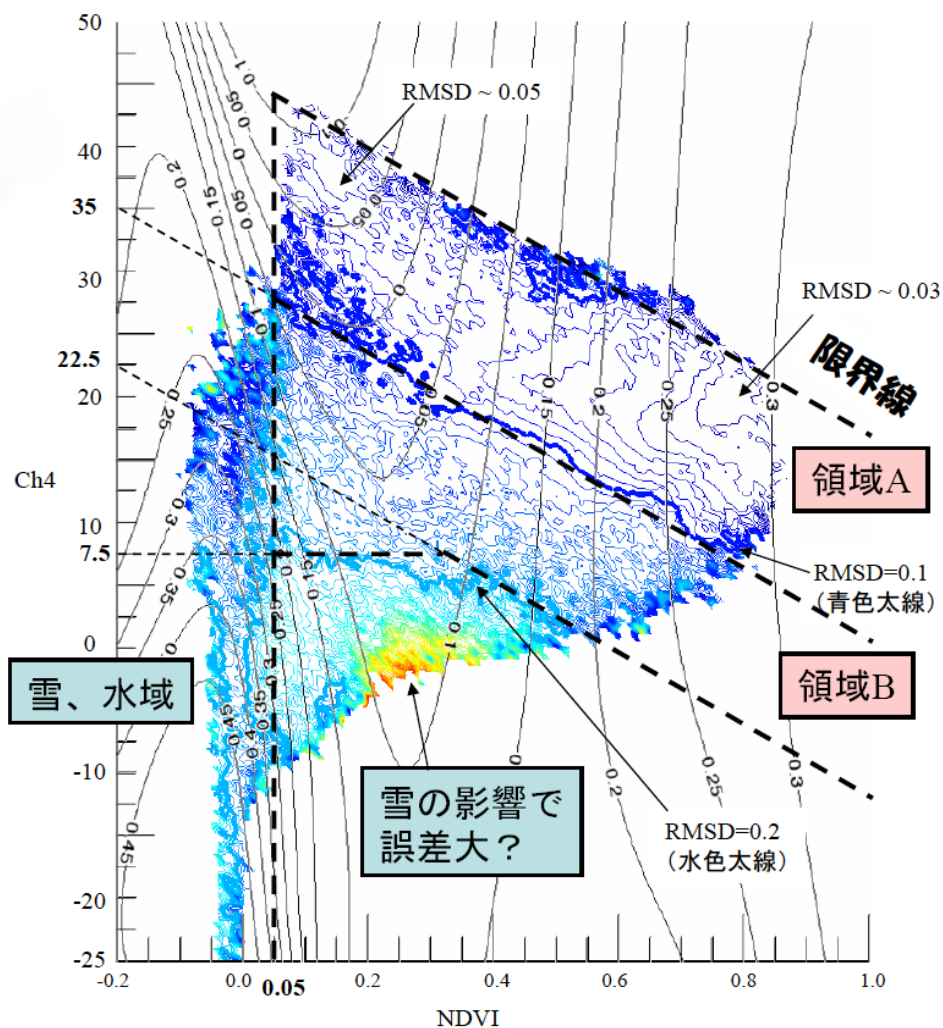


図16 NDVIとCh4によるNDII推定における推定誤差

式(2)によって推定されるNDIIは、図15のようにNDVIとch4に対してして線形な関係にあるわけではない。実際描写すると推定誤差は図16のようになった。この図の領域Aは領域BよりもRMSDが低い。水域や積雪時の大きな値をとるNDIIの特性が、推定誤差にも大きく反映していると考えられる。画素値を確認したところ、水域とのバッファーや降雪地点でNDIIを過小に推定している。またNDVIが0.2~0.4かつCh4<5°Cの領域では、降雪地点と非降雪地点のNDIIの値が平均化されてしまった結果、誤差を大きくしていることが推測される。これらのことは、NOAA衛星のNDVIと表層温度データから植生の水分状況を推定するには、まず積雪域の判定を行い、積雪地以外を対象にする必要があることを示している。植生が炭素蓄積(成長)に回せる余剰分を光合成から得られる期間を温度が5度以上の時と仮定できるため、開発した手法は本プロジェクトの目的には十分の水分情報が得られると考えられる。つまり植生の成長期における温度-水分環境がこれで把握できることになった。

(4) 時系列衛星データベースの構築

1) 植生指数と表層温度の時系列データセット

大気の影響の少ないNOAA衛星10日間合成表層温度データが、LMF-KF処理によって利用できるようになったため、植生指数 (NDVI) と温度の両データを対にして同時に利用できるようになった。これによって、NOAAデータからロシア全域の環境パラメータを算出した。

表層温度データだけであっても、生態系の成長にかかわる温量指数に相当する環境パラメータなどを求めることができるが、植生指数との併用でさらに興味深い環境情報が得られることがわかった。その主なものを表2に示す。

表2 植生指数と表層温度データによる主な環境指数

指数名	型	内容
NST5	float	Σ NDVI when LST>5C
NMNV1	byte	Minimum NDVI when LST>1
NMXV1	byte	Maximum NDVI when LST>1
NOND	byte	Onset day:NMNV1 to NMXV1
TOND	byte	Temperature on onset day
NOFD	byte	Offset day: NMXV1 to NMNV1
TOFD	int	Temperature on offset day
NOOD	byte	Growing period: days NOND to NOFD
NOOS	float	Σ NDVI in growing period NOOD

① 環境指数による植生分布域判定

生育期間における植生指数 (NDVI) の積算量では、指数が4以上に相当する地域が、IIASAが作成した森林分布域 (図9) を含むことがわかった。そこで、その条件を満たす地域をNOAAによる植生分布域とした (図17)。約40シーンのランドサットTMデータによる判読でもこの植生分布域に関しては、矛盾点はみつからなかった。

これによって、毎年の植生分布域がNOAAからモニタリングできることになり、20年間の環境変化を植生分布域の変化としてとらえることが可能になった。

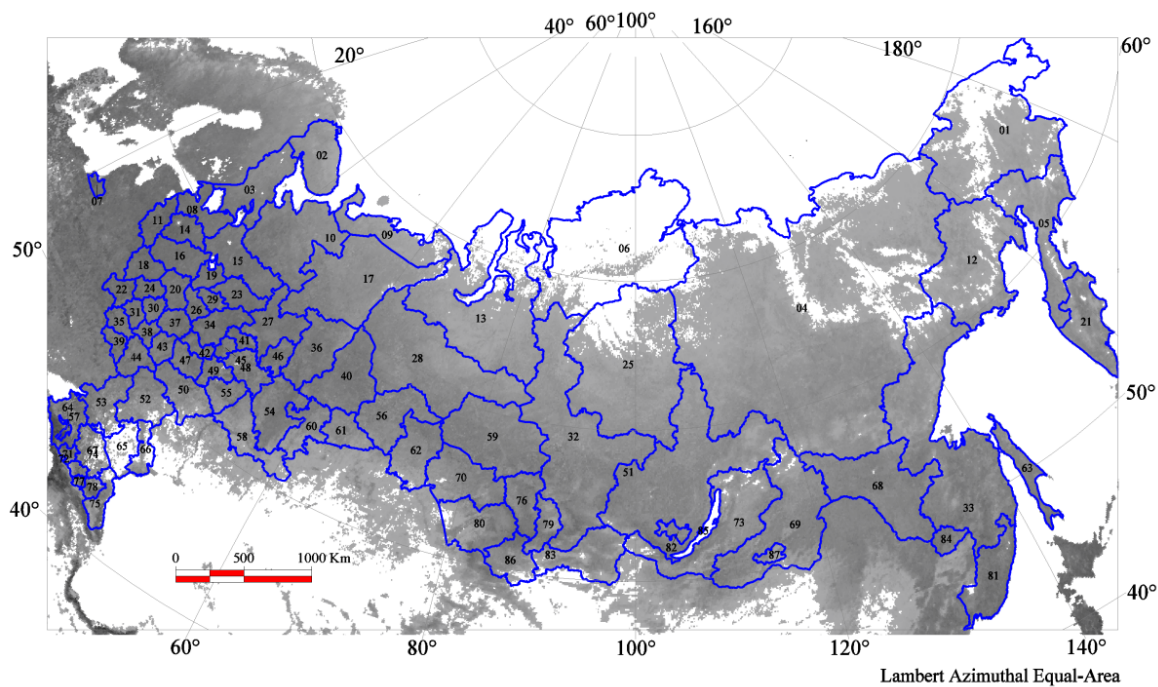


図17 NOOSを利用した植生域 (NOOS > 4)。灰色部分

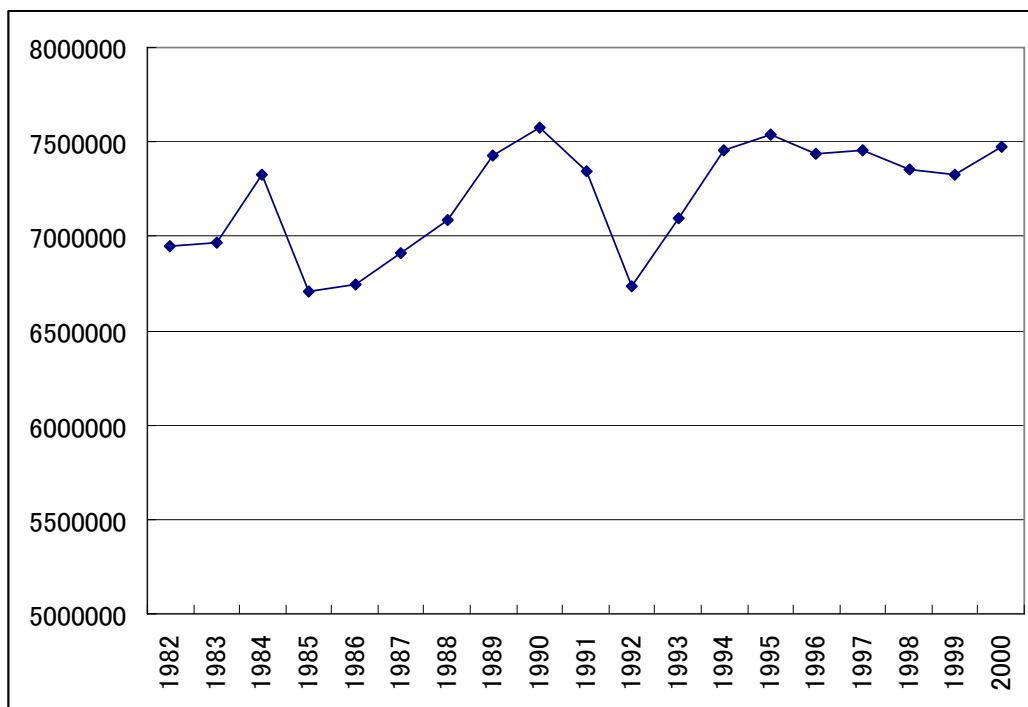


図18 NOOSによるロシアの植生分布域 (単位:1000ha) の年次変動

このようにして作成したNOOS情報から得られた植生分布域によれば、ロシア全域の植生域面積は約75億haである（図18）。公表されている森林フォンド（森林と河川、森林地帯の草地などを含む）の面積は約80億haであるため、その差は約5億haあるが、ランドサットETMデータとの照合では、矛盾点は見つけられなかった。また得られた植生域の面積は1980年代初頭では約70億haであったが、やや増加傾向が見られる。1992年の一時的な減少は森林火災の影響でNOOSの値が減少した地域が多かったためであろう。これらの傾向はロシアの公表データである総成長量と整合性が見られる。

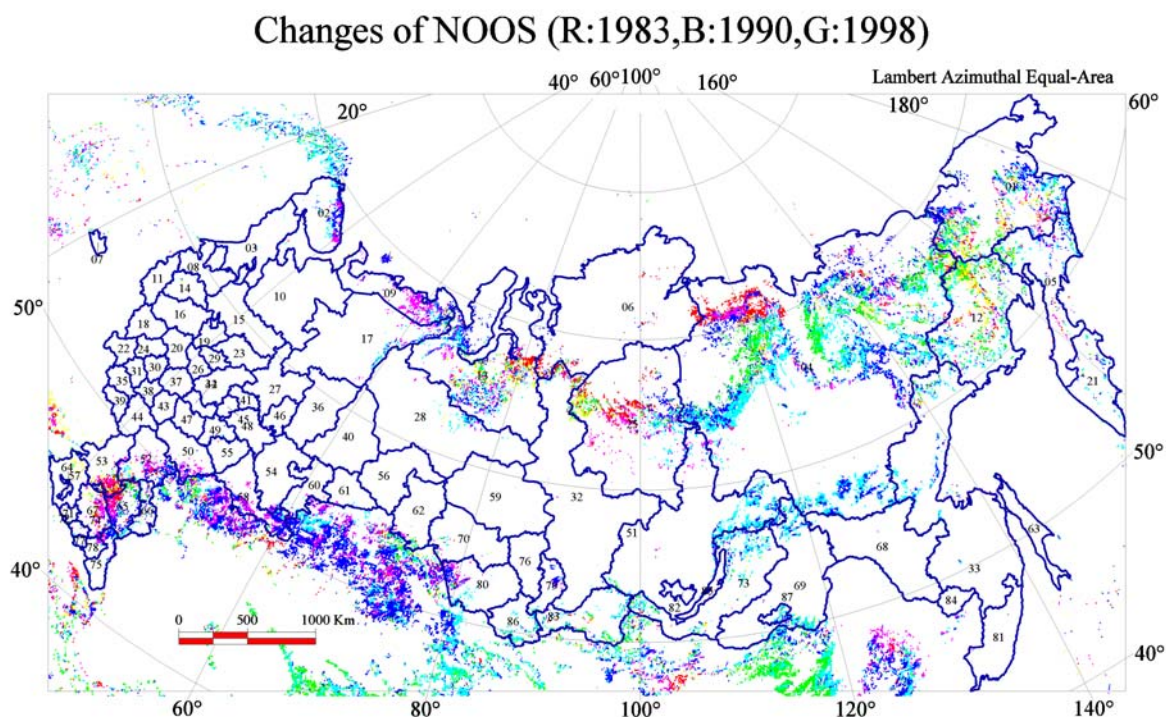


図19 NOOSによる植生分布域の20年間の変動
（1983年をRed、1990年をBlue、1998年をGreenとした合成）

図19はNOOSによる植生地域の変化を示している。植生の生存にかかわる大きな変化を示している地域があることがわかる。北東ユーラシアの北緯65度付近（北の植生境界）と中央アジアに接する北緯50度付近（南の植生境界）、バイカル湖東方の北緯60度付近に変動が多く見られる。北東ユーラシアの北緯65度付近は永久凍土地帯であり、植生域の増減が複雑に入り組み、面的に広がっているのが特徴である。中央アジアに接する北緯50度付近では、植生の減少傾向を示している。バイカル湖東部は植生の回復が見られる。

② ランドサットデータを利用した森林域の変化確認

植生および森林域の変化を確認するために、農林水産省研究計算センターのランドサットデータアーカイブを利用した。これは、1990年および2000年頃の、全世界のランドサットデータが利用できるものである。本プロジェクトでは、図20に示す地域（四角の濃い部分）のランドサットデータを2時期ずつ利用して、その変化を確認した（図21）。

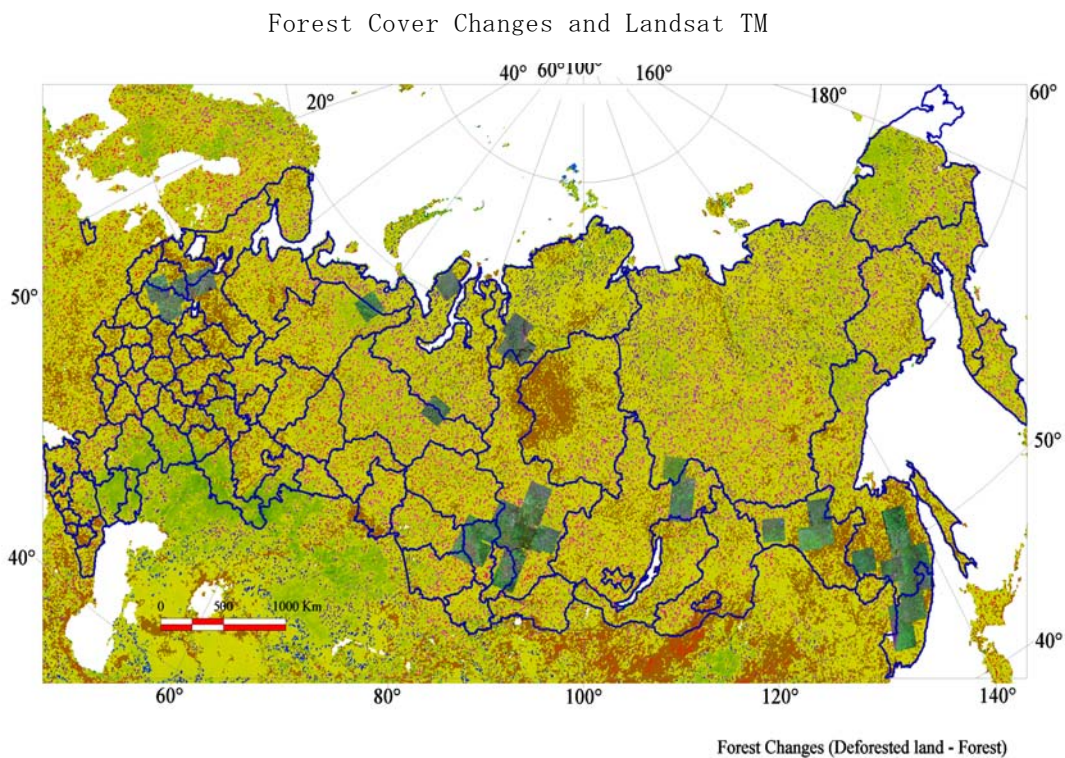


図20 NOAA衛星による森林分布域の変化抽出画像と選択したランドサットデータ

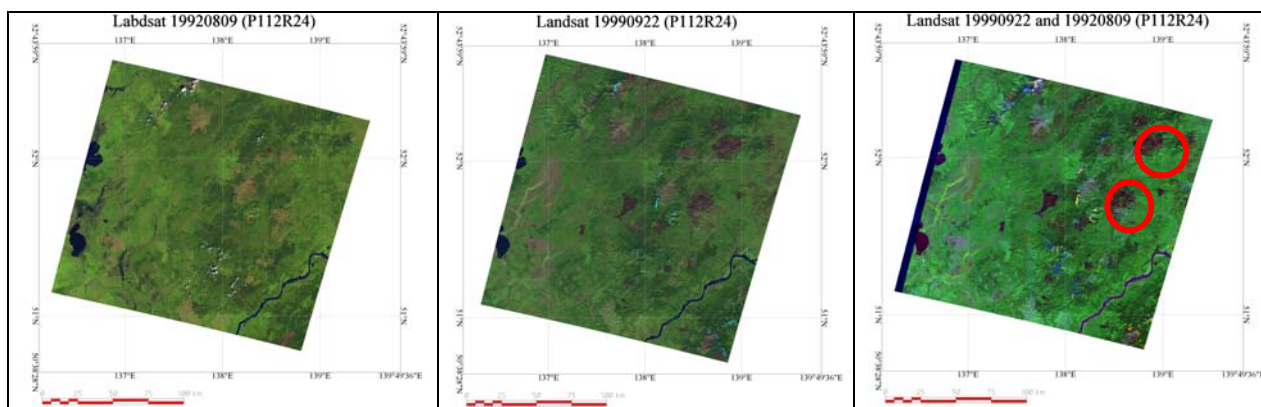


図21 ランドサットで見られる火災跡地の例（画像位置112-24：1992年, 1999年, 及び両者の合成画像）赤い部分（丸の部分）は火災跡地

2) 温度環境の概況把握

ロシア内の気象観測所の50年間のデータを分析してみると、各地の最高気温はほとんど上がっていないが、最低気温と平均気温が高くなる傾向が確認できた（図22）。

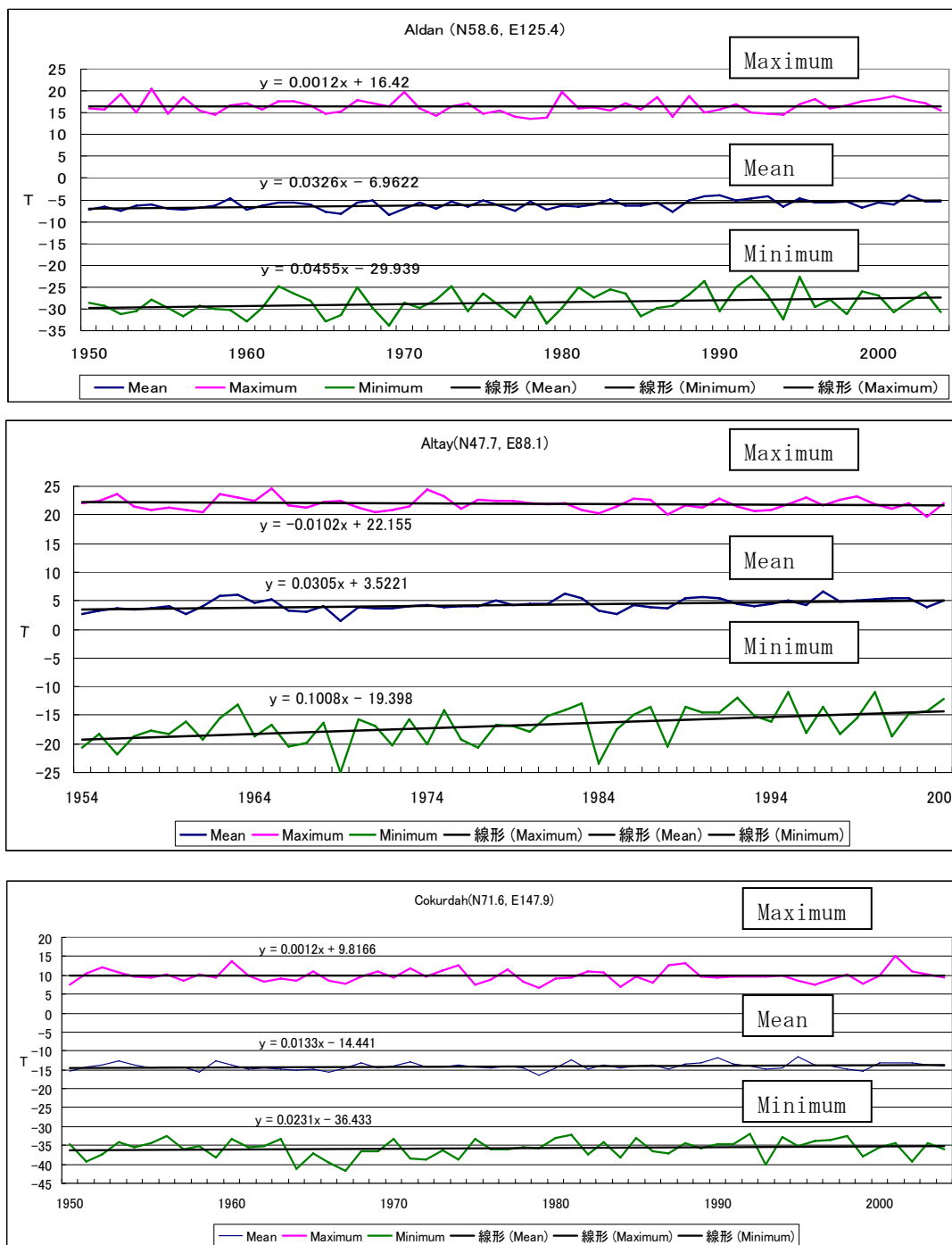


図22 測候所における50年間の年変動気温データ

(年間の最高温度は変わらないが、最低温度は上昇傾向が見られる。それによって平均気温も、50年で1.5度ほど上昇している)

平均気温の温度上昇率は10年間で0.3℃程度であるが、最低気温の上昇率は10年間で0.4℃程度である。これらの緯度—経度位置との関係は、北緯70度以北の高緯度の観測所で温度上昇傾向が低いなど、各観測点での傾向が確認されているが、一般的な傾向を確認することは困難である。そのため、気象観測点のデータと衛星データとを関連付けて分析を進めた。

ロシアの気象観測所における気温と衛星観測データによる表層温度との関係を分析したところ、図23のような結果を得た。衛星表層温度は測候所のデータと比べて、夏に高い値、冬に低い値を示す傾向があることがわかる。また、地表被覆物によってこれらの関係が異なり、20年間の地表の変動を反映していることがうかがえる。森林の成長等に関係する温度パラメータとしては、これまで多くの場合気温をパラメータとしているが、気温と表層温度との関係が必ずしも線形ではないことを考慮すると、表層温度をパラメータとして成長を推定する手法の有効性がうかがえる。

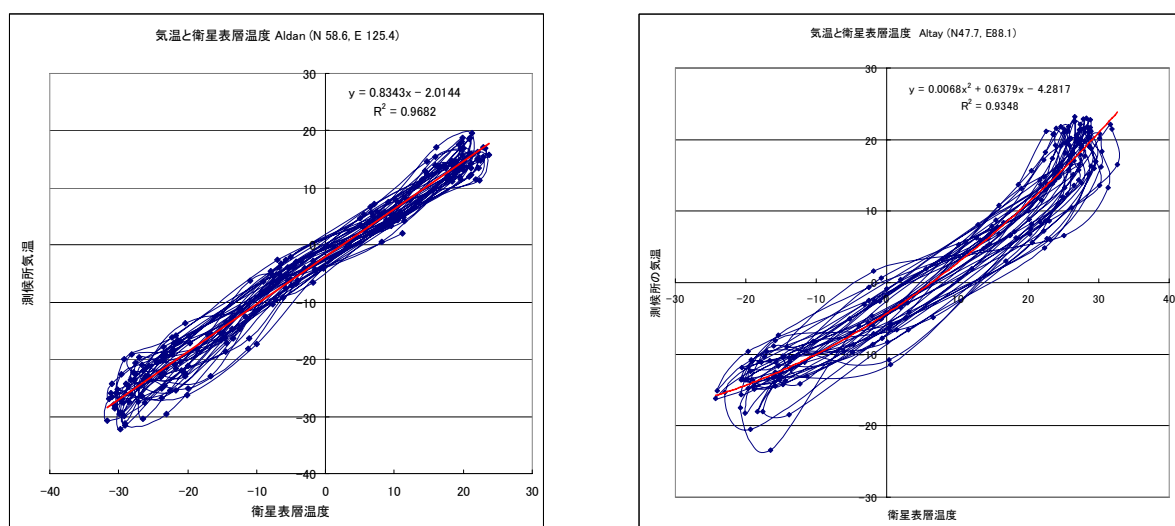


図23 測候所の気温と衛星による表層温度との関係
(表層温度の方が夏に高く、冬に低い)

3) 20年間の環境変動指標データの作成

LMF-NDVIからは、各年の最大値、最小値、NDVIが0以上の時の年間積分値、0.7以上の時の年間積分値、生長期間での植生指数の積分値画像などの処理画像を作成した。LMF-LSTからは、表層温度の各年の最大値、最小値、摂氏0℃以上のときの年間積分値、植生が活性となる摂氏5度以上の時の積分値(衛星温量指数)などの画像を作成した。さらにLMF-NDVIとLMF-LSTの両者を併用して、表層温度が摂氏0度以上の時の植生指数の年間積分図なども作成した。

このように衛星画像を判読して、画像と地表の森林状態との関連分析を行い、いくつかの特徴的な画像を明らかにした。例えば、表層温度が1℃以上の時の植生指数(NDVI)が常緑林の判定に適していることが確認できた。また、NDVIの年間最小値の経年差分は森林植生の減少を示していた(図24)。

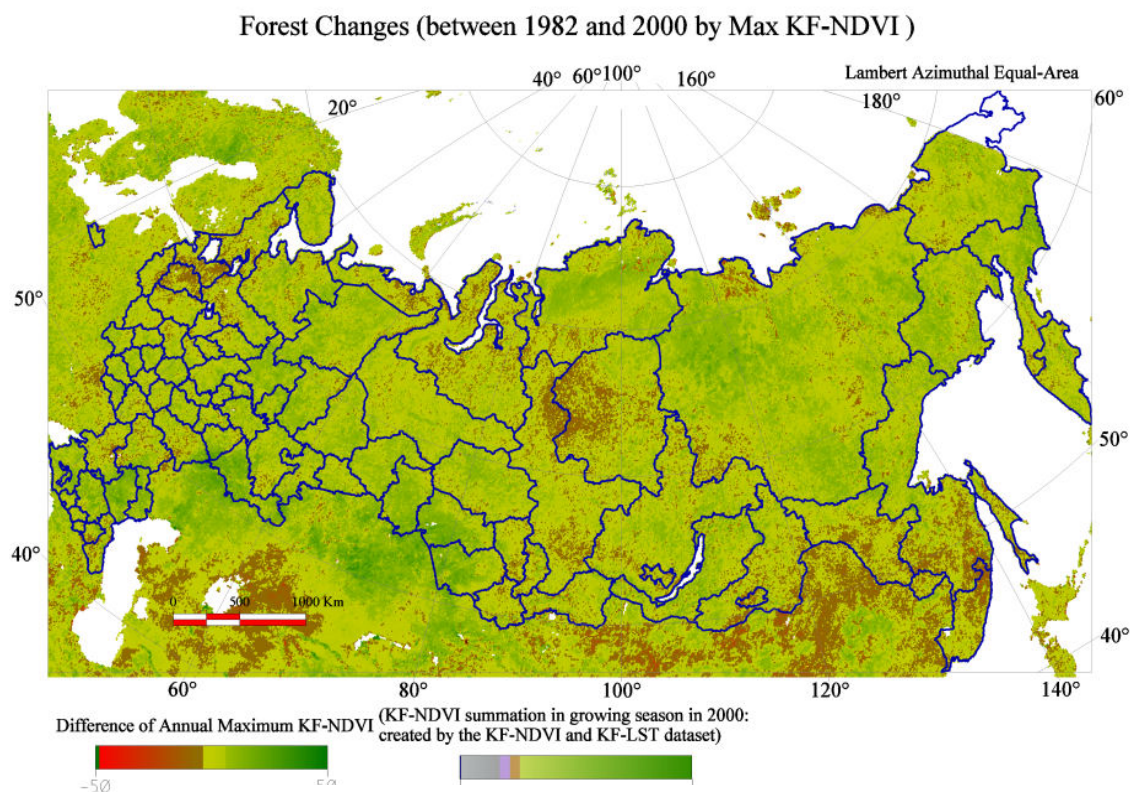


図24 植生変化域（最小値NDVIの差分：濃い部分）

（5）凍土地帯に関する考察

シベリアは永久凍土地帯が発達しており、カラマツ林が形成されている。そのカラマツ林は地下部のバイオマス量が多いことと、土壌中の炭素量が多いことが現地データで分かってきている。また、温暖化には脆弱な地域であり、凍土の融解などによるメタンの発生増加も危惧されている。そのような凍土地帯の把握は地上ではボーリングする以外になく、極めて多大の労力が必要である。そこで、NOAA衛星データの表層温度データを利用して、凍土地帯を把握することを試みた。

1) 凍土指数

凍土指数としてはAFI (Accumulated Freezing Index) が知られている。そこで、LMF処理を施したNOAA衛星の表層温度データ (LMF-LST) を利用して、まずその画像を作成した。また、IIASAが提供している凍土深図等との関係を調べた。その結果、永久凍土が浅い地点の方がより分散が大きいことが示された。このことは、温暖化の影響が永久凍土の浅い地域で顕著であることを示

峻している。

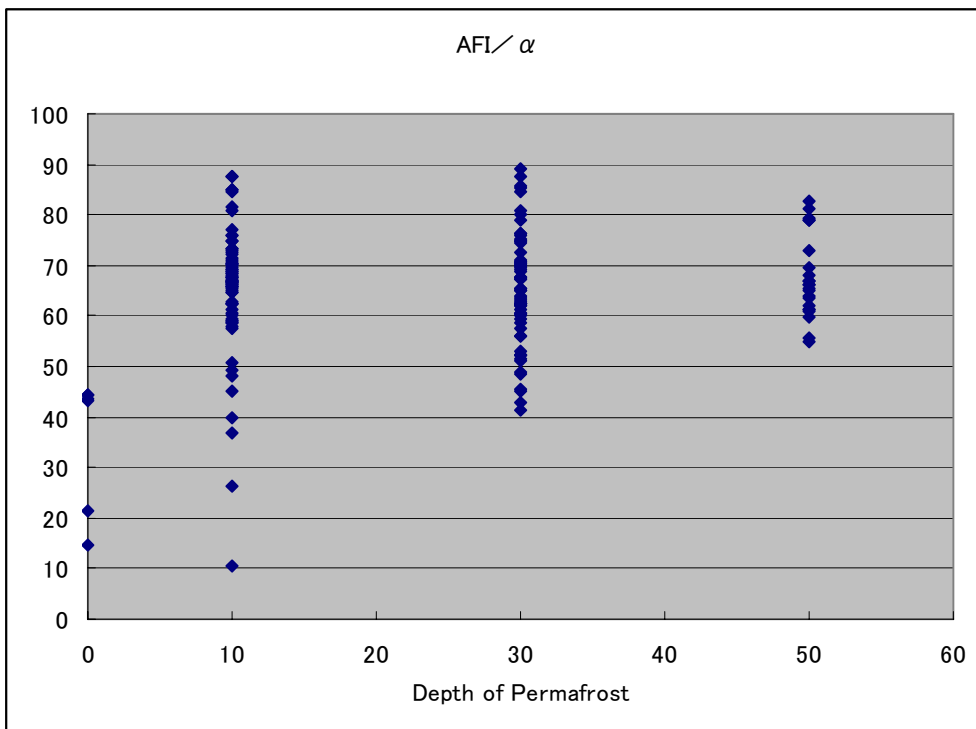


図25 AFI(Accumulated Freezing Index)と凍土深との関係

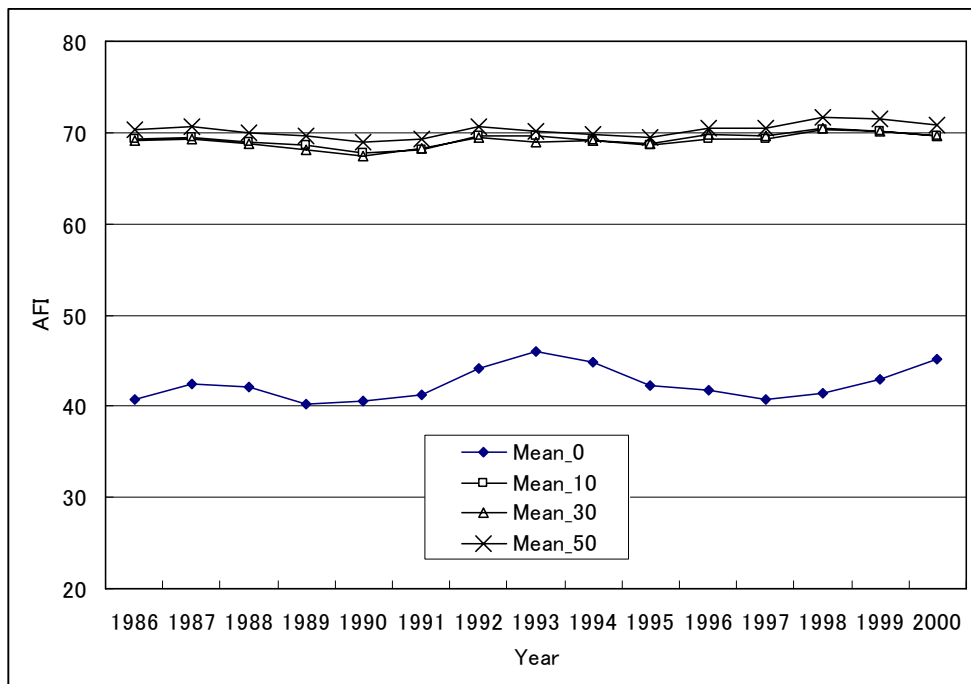


図26 AFIの経年変化：凍土の深さが20 c m以下，20～40cm，および40cm以上の地域での積算凍土指数に差は無い。また経年変化の傾向もほとんどない。

これらのことから、AFIでは凍土の深さに関する情報は得られないと考えられる。また、凍土はAFIが40以上のところに発達すると考えることが妥当であることがわかった。なお、凍土分布の密度との関係は、下記のようになった。

AFI 60以上: High dense permafrost (HDP)

AFI 60～50: Dense permafrost (DP)

AFI 50～40: Permafrost (P)

AFI 40～10: Seasonal permafrost (SP)

2) 凍土に関する既存情報

IIASAでは、凍土密度の分布図、凍土地帯の温度、凍土深などのデータを提供している(図27)。しかし、いつの調査データに基づいているかなど、ソースデータに関する詳細は不明である。

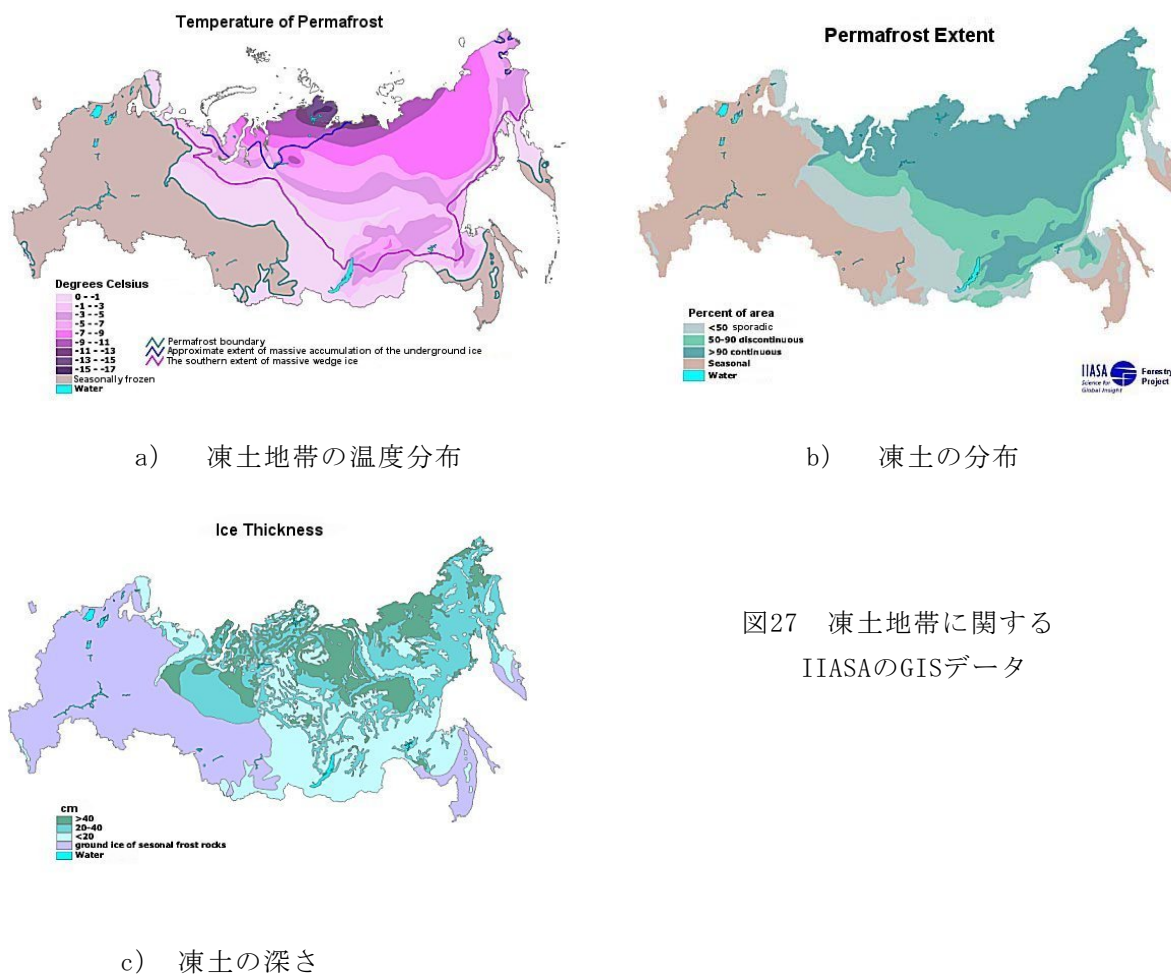


図27 凍土地帯に関する
IIASAのGISデータ

3) 衛星による凍土地帯マップの作成

IIASAが作成した凍土地帯の分布図は、何年のデータに基づくものか不明であり、更新されていない。そこで、NOAA衛星の表層温度データを利用してAFI指数を算出し、IIASAのデータと比較した。その結果、IIASAの凍土地帯分布図および凍土の温度パターンと類似した分布パターンが得られた。また、年変動が顕著であった（図28）。しかし、観測時の地上データなど、この成果の評価情報は不足しており、情報の詳細な評価にはいたらなかった。

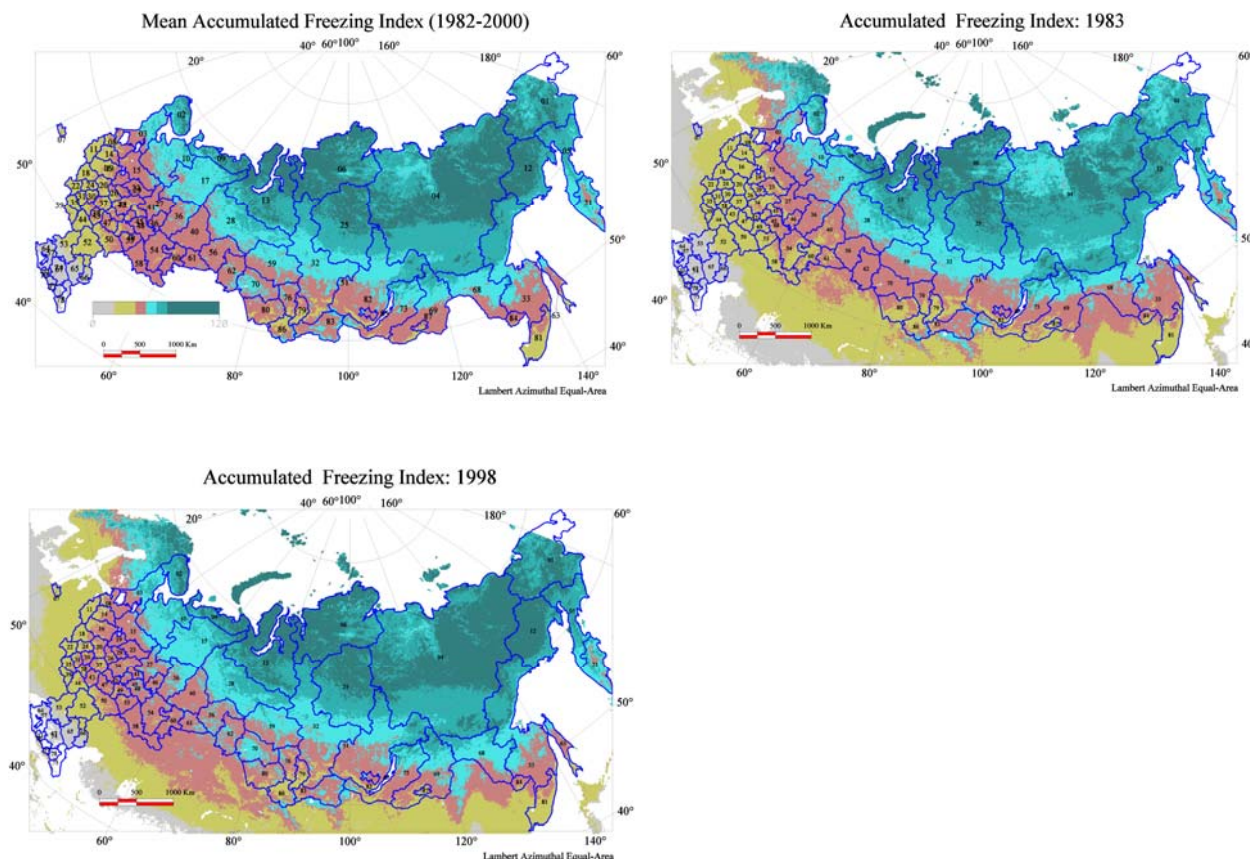


図28 NOAA衛星データによる凍土分布把握

AFIの値は、0以下、0～20、20～40、40～50、50～60、60～70、71以上の7区分である。IIASAの凍土地帯分布図および凍土の温度パターンと類似しているが、年変動が見られる。

(6) 森林の成長量・炭素固定量推定

1) 成長期間内植生指数の15年間の変化分析

各年の「成長期間内植生指数積分値画像データ (SumNDVI)」から1980年代前半の3年間（1982、1983、1984年）と1990年代後半の3年間（1997、1998、1999年）の平均値の差分を算出し、図29を得た。これはほぼ15年間の変化を示していると考えられる。図中、緑色の部分は生育期間内植生指

数値分値が増加したところであり、植生成長が増加傾向にあるところと考えられる。赤味の強い部分は、その植生成長が減少あるいはほとんど変化していないところである。この図から植生の生育状況の変化はロシアでは一様ではないことがわかる。

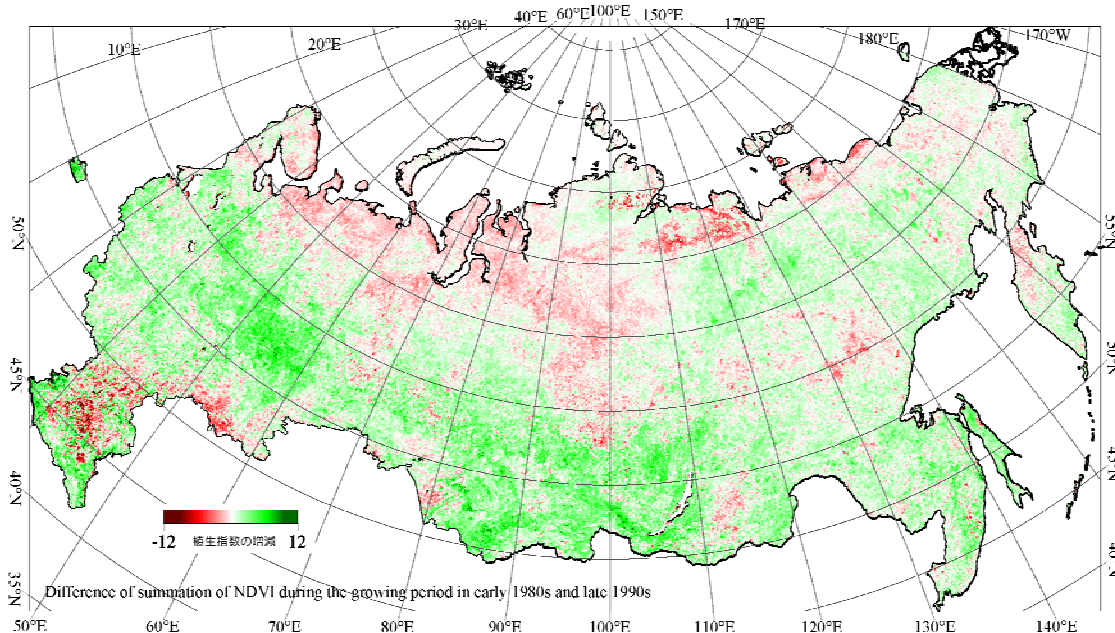


図29 植生指数の変化分析の結果
(1980年代前半3年間と1990年代後半3年間の差分を算出した結果)

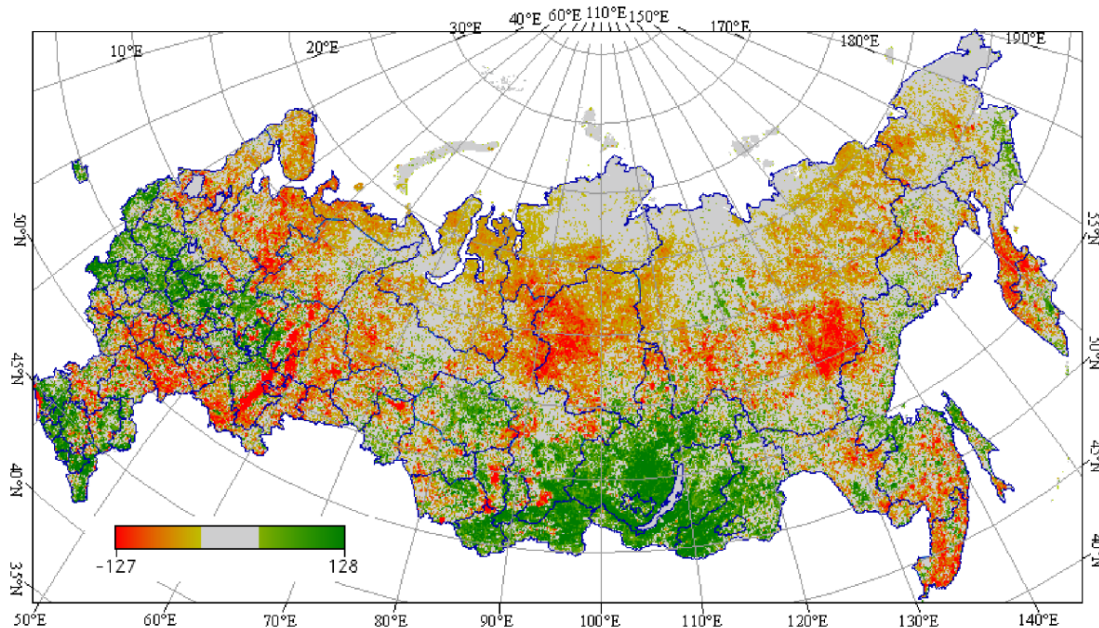


図30 1980年代前期と1990年代後期の年間成長量指数 $\Sigma\text{LAI} * (\text{温度} - 5)$ の差分

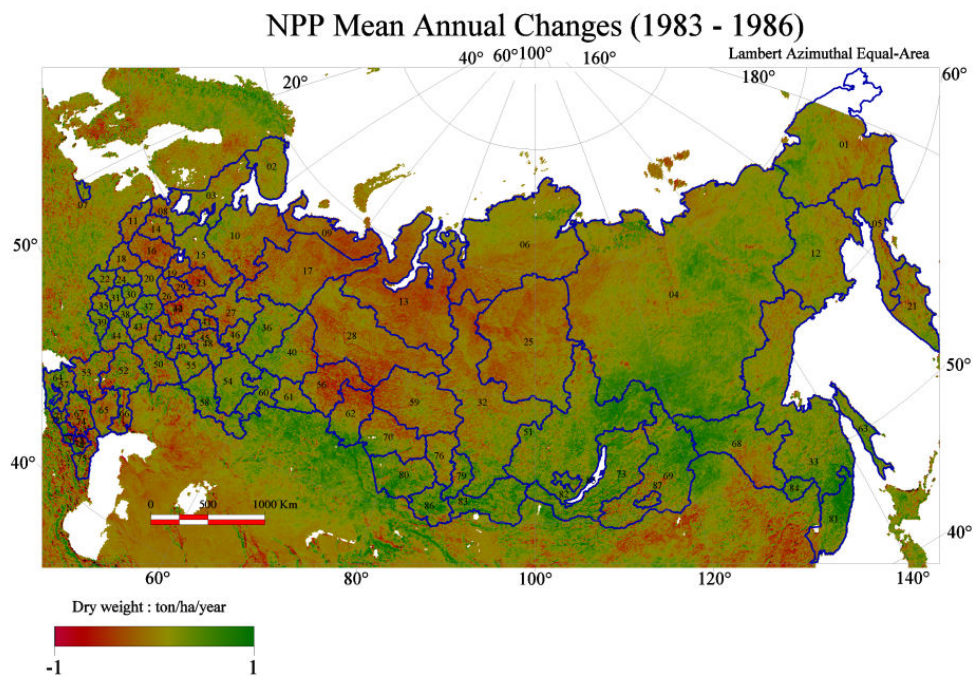


図31 1983-1986年のNPP平均

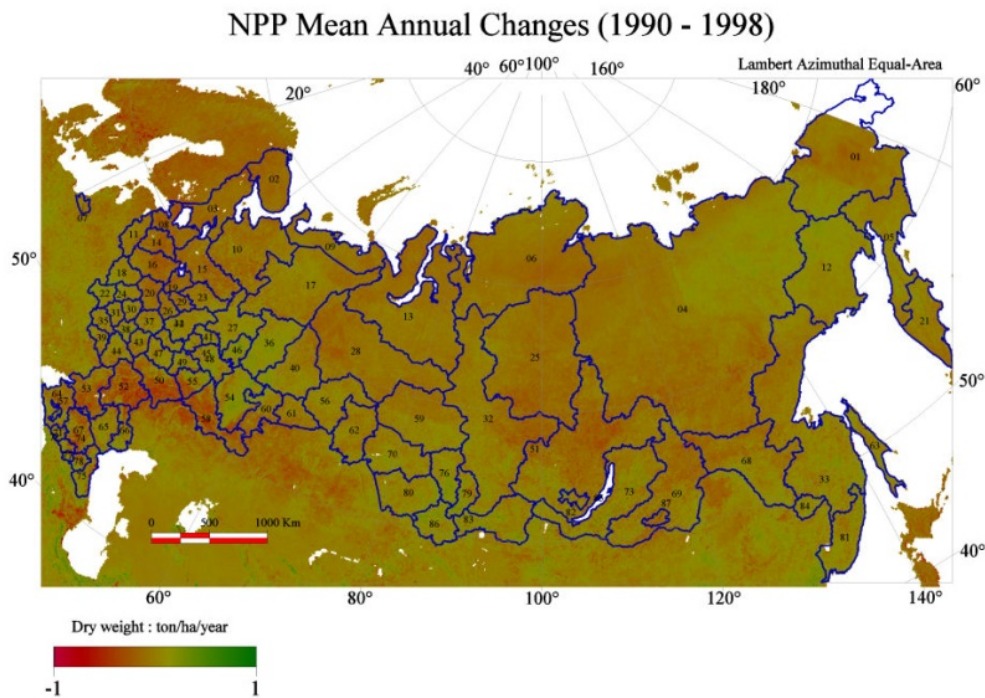


図32 1990-1998年のNPP平均

図30のカラーバーで示すように、増加は緑系統、減少は赤系統の色で示している。ウラル山脈以西のヨーロッパ・ロシアでは、増加地帯と減少地帯が帯状にみられる。中央シベリアでは南部バイカル湖周辺では増加している。この地域は2000年代に入ると春先の乾燥傾向が著しくなり、大規模な森林火災がほぼ毎年発生している地域である。今回開発できたデータ処理を最新のデータに施すことができれば、ドラスティックな北方林の炭素変動が浮かび上がるであろう。

中央シベリア北部やヤクーツク地域では著しい減少がみられるのは、1990年代に多発した森林火災を反映していると考えられる。総じて東シベリアと極東や沿海州地方では、減少が著しい部分が多く、増加している部分は少ない。このように、減少と増加に地域的な特徴が地域ごとに顕著に見られる。

2) 純一次生産量 (NPP) の推定

課題担当者らが開発した時系列モデルフィルタ (LMF-KF) を施した20年間のPALのNDVIと熱データ、およびNCEP/NCARのReanalysis-2データの気温、全天日射量と土壌水分の全球10日間データ、さらに植生の生育期間を考慮して推定した純一次生産量NPPデータを利用して、ロシア全域での変動を分析した (図31、図32)。その結果、1980年代前期におけるNPPの変化は1990年代後期における変化よりも大きかったことが示された。特に中央シベリアではNPPの減少が著しく、北緯50度付近とシベリア東部ではNPPの増加が見られた。1990年代後半では、北緯50度付近でのNPP増加傾向がある程度見られるものの1980年代ほど顕著ではない。しかし、いずれも広域に面的なパターンを示しており、画素ごとにランダムな変化ではないので、広域環境に関係するなんらかの要因があることが伺える。本研究では、このような様々な現象が見つかっているがその原因を特定するにはいたらなかった。

ロシア全域でのNPPは、1983年に689万トン、1986年に724万トン、1990年には807万トン、1998年には781万トンと推定された。世界森林資源評価 (FRA2005) では、生長量が2,3075m³とされているため、平均比重0.5として、約1150万トンに相当する。この差 (約3割) に関しては本研究では原因を特定できていないが、ロシア全域の森林蓄積推定は、実測ではなく材積表での推定とされているため、従来の方法では自然環境の変動や伐採に関する情報などが加味されていないために過大推定となっていることも考えられる。

行政単位ごとに集計したNPPを、1983年と1998年で比較すると、1983年次にNPPが小さい地域は1998年次にも小さく、1983年次に高い地域は1998年にも高いNPPを記録していた (図33)。この原因は特定できていないが、衛星データに算出パラメータ設定のエラーも否めない。今後さらに、詳細な分析が必要である。

NPPの絶対量に関しては検討の余地は残るが、今回のデータ解析結果から、地域的な特徴はある程度把握できると考えられる。ロシア全域の自治体単位でNPP和を算出し、比較したところ、シベリアではNPPは増加する傾向にあり、ヨーロッパ・ロシア地域では減少傾向にあることが示された (図34)。イルクーツクを中心とするバイカル湖地方では1990年代のNPPが高い値を示す一方で、中央シベリア北部のエベンキ民族管区やウラル地方ではNPPが1990年代後半には減少している。森林火災などの自然攪乱の影響に加えて、森林伐採が加速した地域とそれほど伐採が進まなかった地域の差と見ることもできる。特に輸送インフラ等の社会経済的な問題から、モスクワから遠い

地域では森林開発が進まず、モスクワ周辺では森林開発が進んでいるためと考えられる。温暖化の影響よりは、土地利用の進行の影響が大きいと言えよう。

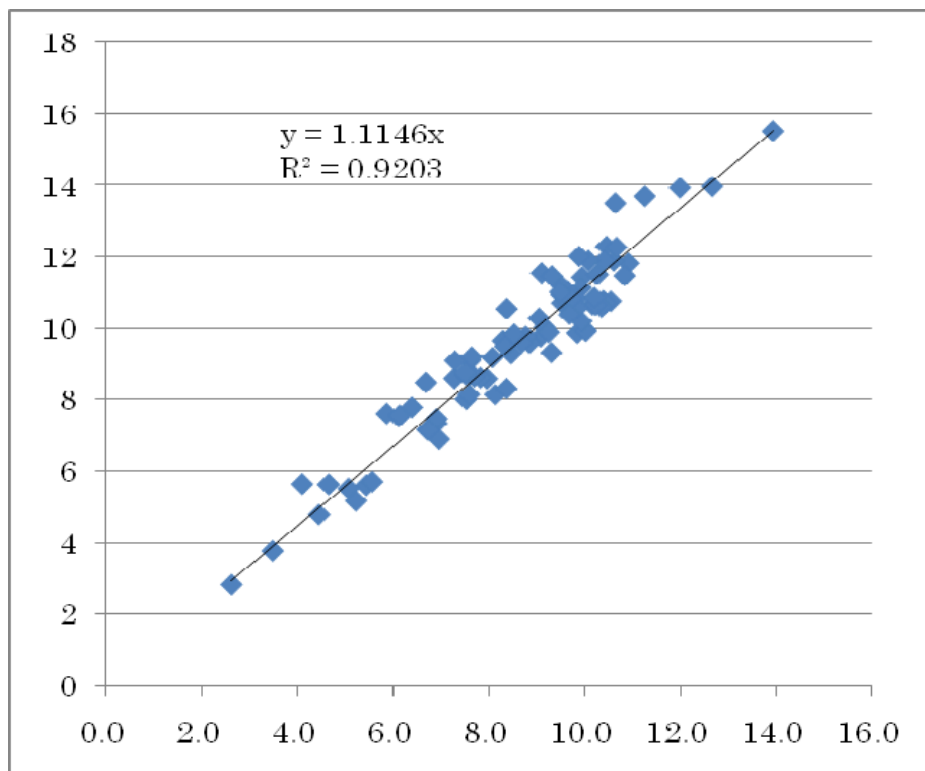


図33 行政単位でのNPP平均値の比較（1983年と1998年）
NPPは年による気象の違いを反映している。

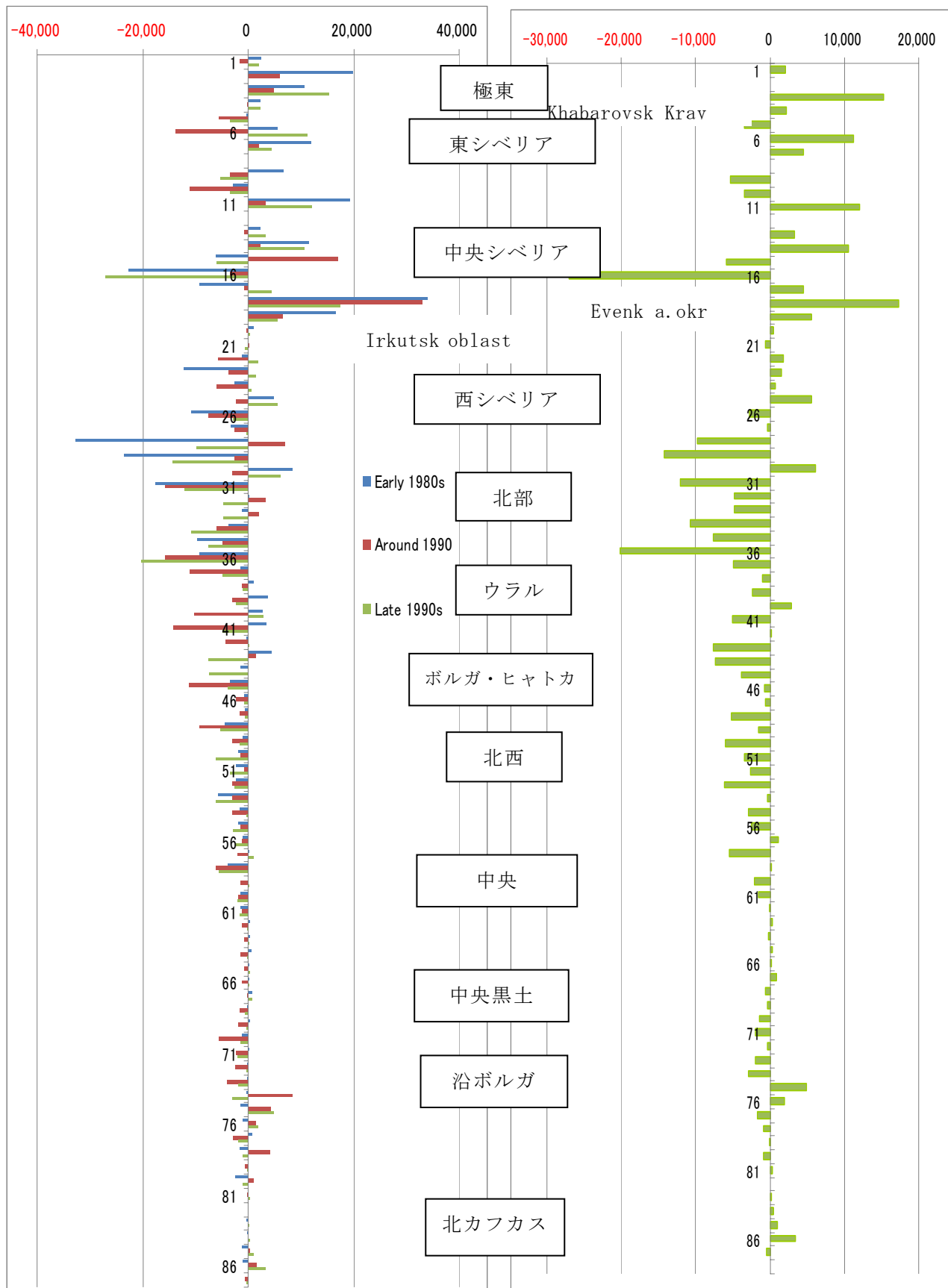


図34 自治体ごとの純一次生産量の年変化量(1980年代初頭、1990年頃、1990年代後期)

資料 ロシアの森林に関する基本情報 (FAO, 世界森林評価2005より編集)

基礎情報	陸域面積		(1000 ha)		1,688,850
	人口 2004	総人口	(1000)		142,814
		密度	(人/km ²)		8.5
		年増加率	(%)		-0.4
		地方人口	(全人口割合%)		26.7
	国民総生産 GDP 2004	一人当たり	(US\$)		2,302
		年増加率	(%)		7.2
情報ソース	最近の森林 面積情報		地上調査/図化		2003
			リモートセンシングデータ		2003
			推定		2005
	森林面積の変化				多時期データ
	森林面積推定				線形回帰
	蓄積量変化				多時期データ
	バイオマス推定				国別研究
林野面積 2005	陸域	森林		1000 ha	808,790
		陸域率%			47.9
		その他の林地		1000 ha	74,185
	その他	全面積		1000 ha	805,875
		樹木のある場所		1000 ha	4,698
	水域				1000 ha
全面積				1000 ha	1,707,540
林野面積の変化 1990-2005	森林	面積	1990	1000 ha	808,950
			2000	1000 ha	809,268
			2005	1000 ha	808,790
		年変化	1990-2000	1000 ha/y	32
			2000-2005	1000 ha/y	-96
	その他の林地	面積	1990	1000 ha	75,144
			2000	1000 ha	72,706
2005			1000 ha	74,185	
原生林面積変化 1990-2005	原生林面積	1990	1000 ha	241,726	
		2000	1000 ha	258,131	
		2005	1000 ha	255,470	
	全森林面積 での割合	1990	%	29.9	
		2000	%	31.9	
		2005	%	31.6	
	年変化	1990-2000	ha/yr	1,640,510	
2000-2005		ha/yr	-532,200		
植林地面積変化 1990-2005	植林地面積	1990	1000 ha	12,651	
		2000	1000 ha	15,360	
		2005	1000 ha	16,962	
	全森林面積 での割合	1990	%	1.6	
		2000	%	1.9	
		2005	%	2.1	
	年変化	1990-2000	ha/yr	270,920	
2000-2005		ha/yr	320,420		
林野蓄積量 2005	森林	面積		1000 ha	808,790
		蓄積量	面積あたり	m ³ /ha	100

			総計	M m ³	80,479	
			商用割合	%	49.2	
	その他の林地	面積		1000 ha		74,185
総蓄積量		M m ³		1,651		
蓄積量の年変化 1990-2005	蓄積量	(1000 m ³ /yr)	1990-2000		23,075	
			2000-2005		41,732	
	ha当たり蓄積量	(m ³ /ha/yr)	1990-2000		0.02	
			2000-2005		0.06	
林野バイオマス 2005	森林	地上部バイオマス		M t	51,574	
		地下部バイオマス		M t	12,846	
		枯損		M t	24,396	
		合計		M t	88,815	
	その他の林地	地上部バイオマス		M t	450	
		地下部バイオマス		M t	300	
		枯損		M t	750	
		合計		M t	1,500	
林野炭素量 2005	森林	地上部バイオマスの炭素量		M t	25,787	
		地下部バイオマスの炭素量		M t	6,423	
		枯損の炭素量		M t	12,198	
		リターの炭素量		M t	4,500	
		土壌の炭素量		M t	137,000	
	その他林地	地上部バイオマスの炭素量		M t	225	
		地下部バイオマスの炭素量		M t	150	
		枯損の炭素量		M t	375	
		土壌の炭素量		M t	2,000	
林野被害 2000	森林	全面積		1000 ha	809,268	
		年被害地	火災		1000 ha	1,268
			虫害		1000 ha	4,953
			病害		1000 ha	957
			その他		1000 ha	508
	その他林地	全面積		1000 ha	72,706	
木質資源の採取 1990-2005	1990	全量	1000 m ³ o. b.		336,527	
	2000	全量	1000 m ³ o. b.		152,316	
	2005	全量	1000 m ³ o. b.		180,000	
		商用丸太	1000 m ³ o. b.		129,400	
		燃料材	1000 m ³ o. b.		50,600	
			蓄積量割合		0.2	
林産物採取の価値 2005	商用丸太	1000 USD			1,811,600	
	燃料材	1000 USD			166,980	
	林産物特用	1000 USD			4,820	
	合計	1000 USD			1,983,400	
			USD/ha			2
林業従事者 1990 と 2000	1990	合計	1000 人・年		187	
	2000	合計	1000 人・年		196	
		生産	1000 人・年		155	
		諸サービスの提供	1000 人・年		42	

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

NOAA衛星の時系列モデルフィルタLMF-KF処理が植生指数、表層温度に対して実用上有効であることがロシアの森林で確認できた。北方林の特徴である凍土地帯の識別が衛星データで可能であることが示せ、年々変動を明らかにした。また、ロシア全域の森林状況を衛星の植生状況からモニタリングする手法を開発し、その年々変動を示すことができた。また、年間の炭素固定情報として純一次生産量を衛星データを主に利用することで、推定できることを示し、その年々変動を示した。これらによって、広大なロシアの森林地帯における成長状況のモニタリングを可能にした。

(2) 地球環境政策への貢献

平成19年度に、極東シベリア森林保全作業部会が、日露間で発足したが、その際に重要な成果として位置づけられ、相互協力のベースとしての役割をはたした。19年度の特設課題は、極東・シベリアの森林火災問題であり、担当者が出席してロシアを対象とする研究などを紹介したが、近年の温暖化問題に絡み、大きな関心が払われた。20年度も引き続き同作業部会の活動が推進され、ロシアで会合がもたれる予定である。本研究の成果が日露での会合に活用されることが見込まれている。

また、ポスト京都議定書でも、森林問題が取り扱われることになっており、ロシアの森林減少問題も表面化する可能性は高いと思われる。

6. 引用文献

- (1) Malysheva N., Shvidenko A., Nilsson S., Petelina S., Oskong A. (2000) An Overview of remote sensing in Russian forestry, IIASA Interim Report IR-00-034, 83 pp, IIASA.
- (2) Raupach M. R., Rayner P. J., Barrett D. J., Defries R. S., Heimann M., Ojima D. S., Quegan S., and Schimmler C. C. (2005) Model-data synthesis in terrestrial carbon observation, *Global Change Biology*, 11: 378-397.
- (3) Sánchez, F. Cuesta J. Toft, B. van den Bogaert, and D. L. Massart (1996) Orthogonal Projection Approach Applied to Peak Purity Assessment, *Anal. Chem.*, Vol. 68, pp.79-85,

7. 国際共同研究等の状況

サブテーマ(1)、(2)、(3)は直接的に国際共同研究として実行し、本サブテーマではその情報を利用したが、直接的には海外共同体制を組まなかった。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Sawada, H., and Y. Sawada: Monitoring Design of Forest Ecosystem using Remote Sensing,

The Role of Forests for Coming Generation, Japan Society of Forest Planning Press, 139-150, (2005).

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 沢田治雄：森林総合研究所における国際研究、国際連携推進ワークショップ（1）森林総研、6-7、(2007).
- 2) 沢田治雄（編）：世界の森林環境の保全・再生をめざして、森林総合研究所、ISBN 978-4-902606-28-7、43p. (2007)

(2) 口頭発表（学会）

- 1) Sawada, H., Y. Sawada and Y. Matsuura: Seasonal and Annual Dynamics of the Siberian Forest. Proc. ForestSat 2007 Conference (in CD-ROM), 4pages, (2007).
- 2) 沢田治雄、澤田義人：NOAA 衛星による水分環境の長期変動観測、日本写測学会年次講演論文集、29-30、(2006).

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし