

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

(3) 森林火災による炭素蓄積量・炭素固定速度への影響

北海道大学低温科学研究所

串田圭司

平成17～19年度合計予算額	9,887千円
(うち、平成19年度予算額	2,515千円)
※上記の合計予算額には、間接経費	2,282千円を含む

[要旨] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) 第4次報告書によると、世界の原野・森林火災は、人為起源の二酸化炭素放出量(化石燃料の燃焼とセメント生産: $7.2 \pm 0.3 \text{ Gt C yr}^{-1}$)の20～60%の二酸化炭素を燃焼時に放出している。東シベリアの森林火災による炭素蓄積量・炭素固定速度への影響を評価するために、火災の前の二酸化炭素収支と火災の重度の地理的分布を、リモートセンシングにより評価した。シベリアのカラマツ林で、生物測定と二酸化炭素収支のパラメータに基づいて考察し、葉面積指数(LAI)と林床植被率(FVC)が純一次生産(NPP)の指標となることを示した。さらに、Landsat ETM+画像を用いて、これらの指標とそれに対応したNPPの地理的分布を得た。この見積りはカラマツ個葉と林床の分光測定と放射伝達モデル研究による。その結果、LAIとFVCは実測値と合っており、見積もったNPP ($222 \pm 24 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)は、2000年から2006年の気象タワー観測と土壌呼吸観測によるNPP ($130 \sim 280 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)と整合していた。本研究では、LAI、FVC、年NPPの地理的分布を二酸化炭素収支と分光特性のパラメータと対応した形で示した。火災の重度については、「森林火災の延焼により枯死した林分」(延焼枯死林分)と「地表火のみの延焼で枯死していない林分」(地表火延焼林分)との2つに分ける。これらが、火災直後に、火災を受けていないカラマツやその他の植生から分離できるかどうかを調べた。その結果、30m地上分解能のLandsat ETM+の可視から短波長赤外のセンサーを用いた教師付き分類で区分できた。MODISの500mの地上分解能のセンサーの分光ミクセル解析により、1画素の面積率を3%～10%程度の変動係数で見積れた。ただし、広域の各カテゴリーの面積率の算出では誤差が蓄積される傾向がある。広域での2つの重度の火災地の面積率をより正確に算出するには、Landsat ETM+などのMODISより地上分解能の高い画像を参照画像として用いるべきことを示唆した。

[キーワード] 森林火災、延焼枯死林分、地表火延焼林分、ヤクーツク、カラマツ林

1. はじめに

シベリアの森林火災(原野火災も含む)は地域および地球環境に対し、燃焼中のエアロゾル¹⁾および温室効果ガス²⁾の放出、土壌呼吸の増加³⁾、植生回復に伴う水熱収支構造の変化⁴⁾を通じて影響を及ぼす。さらに、火災の年代解析と中央シベリアの気候データを合わせた解析⁵⁾は、火災の頻度が今世紀に予想されている温度上昇に伴い増加することを示唆する。

1988-1992年のロシアにおける、北方森林と湿地、ツンドラ、火災跡地、伐採地、疎林、草地

の火災を受けた面積は、年間1.5～2.0百万haと見積もられる⁶⁾。一方でロシアの北方森林の面積は、760百万haである⁷⁾、こうした調査データは広域での詳細な調査に基づく。しかし、迅速に客観的に広域把握を行うためには、リモートセンシングデータとの結合や相互比較が必要である。ロシアの火災地面積^{8)~10)}は、NOAA衛星のAVHRRセンサーの熱バンドを用いたホットスポット抽出アルゴリズム^{11), 12)}によって見積もられた。しかし、これらの見積もりは調査データやロシアの統計データと一致しなかった。例えば、ロシアの統計データは、年輪から見た火災の頻度データによる見積もりを過小評価した¹³⁾（カラマツ：90-130年、ヨーロッパアカマツ：25-50年）。衛星データによる見積もりは、センサーの地上分解能と関係する。AVHRRの1画素（1.1km×1.1km）内の火災面積は、ホットスポット抽出アルゴリズムによって正確には見積もられない。これらのアルゴリズムでは、低温で広い範囲の火災と高温で狭い範囲の火災とを混同してしまう¹⁴⁾。このように、火災面積の見積もりには、さらなる研究が必要である。

地上分解能30-mのセンサーについては、Landsatの可視-短波長赤外のセンサー、地上観測による複合火災指数（CBI）により、米国本土で火災地と火災の重度の地理的分布を評価した^{15), 16)}。Epting et al. (2005)¹⁷⁾はこの方法をアラスカの火災に適用した。

東シベリアでは、火災面積と火災重度のこうした30-m地上分解能センサーによる評価はほとんど行われてこなかった。東シベリアの森林は落葉針葉樹であるカラマツ（*Larix cajanderi* Mayr.）が優占する。シベリアに代表されるロシアのタイガでは、林床のみが燃える地表火が50～80%を占める¹⁸⁾。地表火と樹冠火の燃焼中の二酸化炭素放出量はそれぞれ2.3tC/ha、23tC/haと10倍の開きがある¹³⁾。雲の影響を軽減するためには、取得頻度が高い低解像度衛星による必要がある。分光ミクセル解析（SMA）は1画素における土地被覆の面積率を見積もるのに用いられてきた^{19)~21)}。

2. 研究目的

本研究の目的は以下の2点である。

- (1) 衛星から検知できる植物理量を介して、森林火災前の東シベリアのカラマツ林の二酸化炭素収支の地理的分布を見積もる。
- (2) 東シベリア森林火災後の「森林火災の延焼により枯死した林分」（延焼枯死林分）と「地表火のみの延焼で枯死していない林分」（地表火延焼林分）の火災重度の地理的分布を30-m地上分解能のLandsat ETM+によって見積もることと、500-mと1-km解像度センサーによりこれら2つの重度タイプの面積率見積もりを考察する。

3. 研究方法

(1) サイトの特徴

調査サイトは東シベリアタイガのヤクーツクの北西35kmに位置する。本地域を含むロシア連邦サハ共和国の森林の9割はカラマツ（*Larix*; larch）が占める。シベリアのカラマツの面積は世界の森林面積の6.8%を占める。本研究ではカラマツ（*Larix cajanderi* Mayr.）の地上観測サイトとして、170年生の0.5km×1kmの林分を設定した。樹高は20mに達し、立木密度は0.2 trees/m²である。林床は常緑のツツジ科灌木であるコケモモ（*Vaccinium vitis-idaea* L.）が優占する。林床のおよそ半分はカラマツの落葉で覆われた無植生部分である²²⁾。2002年の春に地表火を受け、林床のみ燃焼した。2000年夏の衛星画像により火災前の二酸化炭素収支の地理的分布を見積もり、

2002年の火災後の夏の画像により、火災の重度の地理的分布を見積もる。

(2) 森林火災前のシベリアカラマツ林の二酸化炭素収支の地理的分布

火災前のシベリアカラマツ林の二酸化炭素収支の地理的分布では、2000年8月13日に取得されたLandsat ETM+ 画像 (30-m 地上分解能、path: 122 and row: 16) を用いた。30m×30mの地上観測サイトでの気象タワーによる二酸化炭素収支観測、土壌呼吸観測、葉面積指数観測、および既往の現存量測定データベース、既往の文献を基にして、生物測定と二酸化炭素収支のパラメータを考察し、葉面積指数 (LAI) と林床植被率 (FVC) が純一次生産 (NPP) の指標となることを示す。また、400-2500nmにおいてスペクトロメータ (米国GER社製GER-2600) による個葉および林床植生被覆部分、林床無植生部分の分光測定に基づいて、森林の放射伝達モデルから、LAIとFVCをLandsat ETM+の分光データから見積もる。地上観測サイトの観測地と見積もり値を比較する。

(3) 火災の重度分布

火災の重度の区分を含む土地被覆解析は、10 km × 10 km (62° 15- 20' N, 129° 30- 37' E、標高220 m) の地域を解析対象とした。2002年8月12日に取得されたLandsat ETM+ 画像 (30-m地上分解能、path: 122 and row: 16) と、2001年7月11日と2002年7月 31日に取得された2つの IKONOS 画像 (1-m 地上分解能) を解析に用いた。樹冠と林床はIKONOS 画像によって認識できた。新しい火災跡は 2001年7月 11日のIKONOS画像には見られなかったが、2002年7月31日のIKONOS画像では見られた。ふたつのIKONOS画像と聞き取り調査によると、解析対象地域のカラマツの一部が2002年の春から夏に燃えたことが分かった。8つの土地被覆カテゴリーに属する8つの参照地域を選んだ。すなわち、「カラマツ、樹冠かもしくは地表火により樹木が枯死したカラマツ」(延焼枯死林分)、「地表火により林床のみ燃焼したカラマツ」(地表火延焼林分)、シラカバ (*Betula papyrifera* Marsh.; Birch)、ヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris* L.; Pine)、草地 (密)、草地 (疎)、水体の8つでグランドトランスを行った。

Landsat ETM+ 画像の大气補正はErdas Imagine 8.7 (Leica Geosystems Corp., Heerbrugg, Switzerland) のATCOR2により、標準的なパラメータ (mid-latitude summer, rural, 100-km scene visibility) を与えて行った。画像は 17 × 17 and 34 × 34 画素の領域で平均化し、510-mと1.02-kmの解像度の画像を作成した (これ以降、それぞれ 500-m-IMGおよび 1-km-IMGと呼ぶ)。これらの画像はTerra衛星のMODIS画像をシミュレートするのに用いた。表1はLandsat ETM+とMODISのバンドを示す。MODISのバンド1と2は250-mの解像度であり、bands 3、4、6と7は500-mの解像度である。8つの参照地域の分光データは30-m地上分解能のLandsat画像から抽出し、30-m画像、500-m-IMG, and 1-km-IMGの最尤法分類のトレーニングデータとして用いた。

SMA と線型重回帰分析 (MLRA) により、500-m-IMG と 1-km-IMGの 1画素中の7つの土地被覆カテゴリーの面積率見積もりを試験した。SMAでは、7つの土地被覆カテゴリーの線形結合が1画素の分光特性を形成すると仮定した。7つの土地被覆カテゴリーの面積率 (x_i ($i = 1, 2, \dots, 7$)) は0.025間隔で0から1の値を与えた。6つの Landsat ETM+ のバンドを (表1) を示す。水体は解析対象地域の0.1%であるため、解析から除いた。水体は、事前情報として、衛星画像とは別に与えることができると考えた。

MLRAにおいては、7つの土地被覆カテゴリーの面積率は30m地上分解能画像の最尤法分類結果に

より与え、被説明変数とした。1-km-IMGの6つのバンドは説明変数とした。F値を2.0とした変数減少法により説明変数選択を行った。面積率の合計を100%にするために、算出された各カテゴリーの面積率は、面積率の合計によって除した。

表1. Landsat ETM+ と MODISのバンドの波長帯

Landsat ETM+		MODIS	
バンド	波長 (nm)	バンド	波長 (nm)
1	450～520	3	459～479
2	530～610	4	545～565
3	630～690	1	620～670
4	750～900	2	841～876
5	1550～1750	6	1628～1652
7	2090～2350	7	2105～2155

4. 結果・考察

(1) 森林火災前のシベリアカラマツ林の二酸化炭素収支の地理的分布

図1に樹齢ごとのカラマツの純一次生産量 (NPP) の構成要素および単位土地面積あたりに存在するカラマツの葉の面積 (林冠葉面積指数、 LAI_1) の変化を示す。樹齢や生育に応じた器官別の現存量測定と炭素の回転率データとを基にして解析した結果、シベリアのカラマツ林の林冠の純一次生産は、 LAI_1 と相関が高かった (図2)。カラマツは落葉針葉樹であるため、1年に付ける葉の量はその年の炭酸ガス吸収と相関が高いためである。気象タワーや土壌呼吸量の測定結果の考察によると、林冠と林床を含めたカラマツ林の全体の純一次生産 (NPP) 地理的分布の見積もりには、 LAI_1 だけでなく、林床の植被率 (FVC) を考慮しなければならない。また、これらを見積もるために最適な分光指標を、地上での構成要素の分光測定と放射伝達モデルによって提示した (図3)。林床の植被は主としてコケモモであるが、林床の植被部分と林床の無植被部分 (カラマツの落ち葉が覆う) とで、緑バンド (バンド2) の反射率が他のバンドに比べて近い値を示す。カラマツ葉の吸収率が80%と大きいため、 LAI_1 の増加に伴い、バンド2の反射は指数関数的に減少する。このため、図3に示したように LAI_1 の見積もりには緑バンドが適している。また1.55～1.75 μm のバンド5では林床の植被部分と無植被部分とで反射率が異なる。ただし LAI_1 の影響も受けるが、バンド2により算出した LAI_1 を入力値として使うことができる。

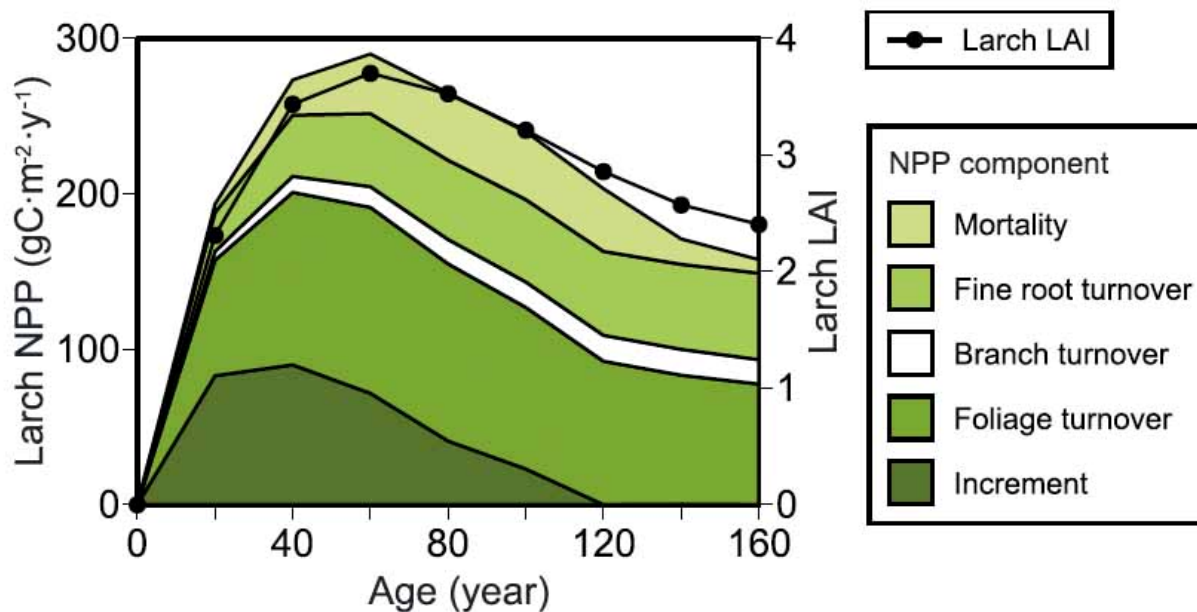


図1. 樹齢 (Age) ごとのカラマツの純一次生産量(NPP)の構成要素および単位土地面積あたりに存在するカラマツの葉の面積 (林冠葉面積指数、 LAI_1) の変化 (サハ共和国 *Vaccinium*タイプ、地位V)

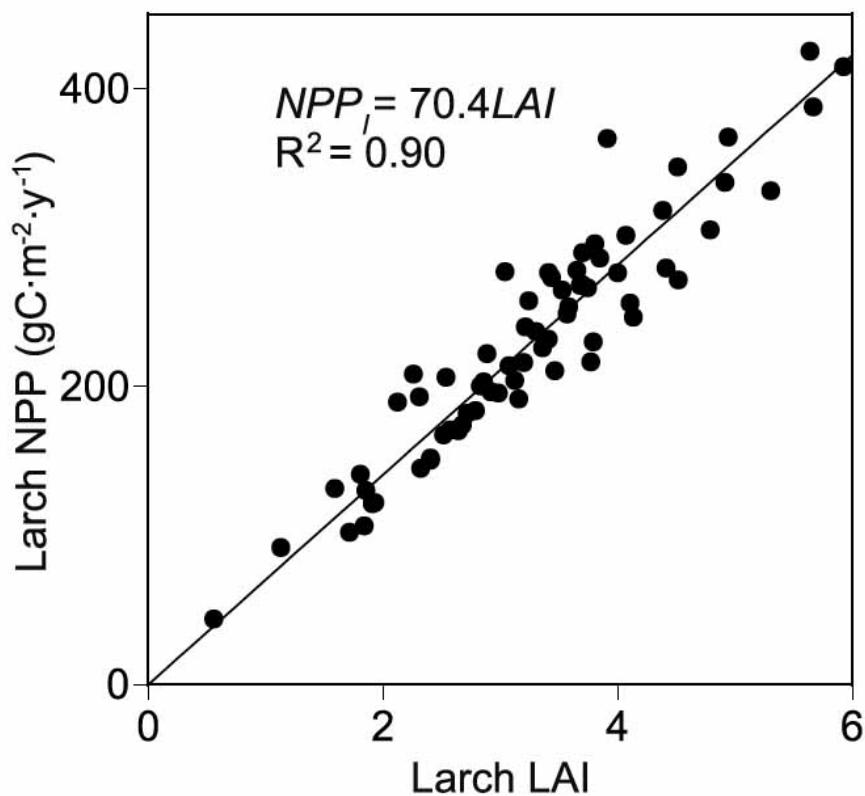


図2. シベリアのカラマツ林の林冠葉面積指数と林冠の純一次生産量との関係

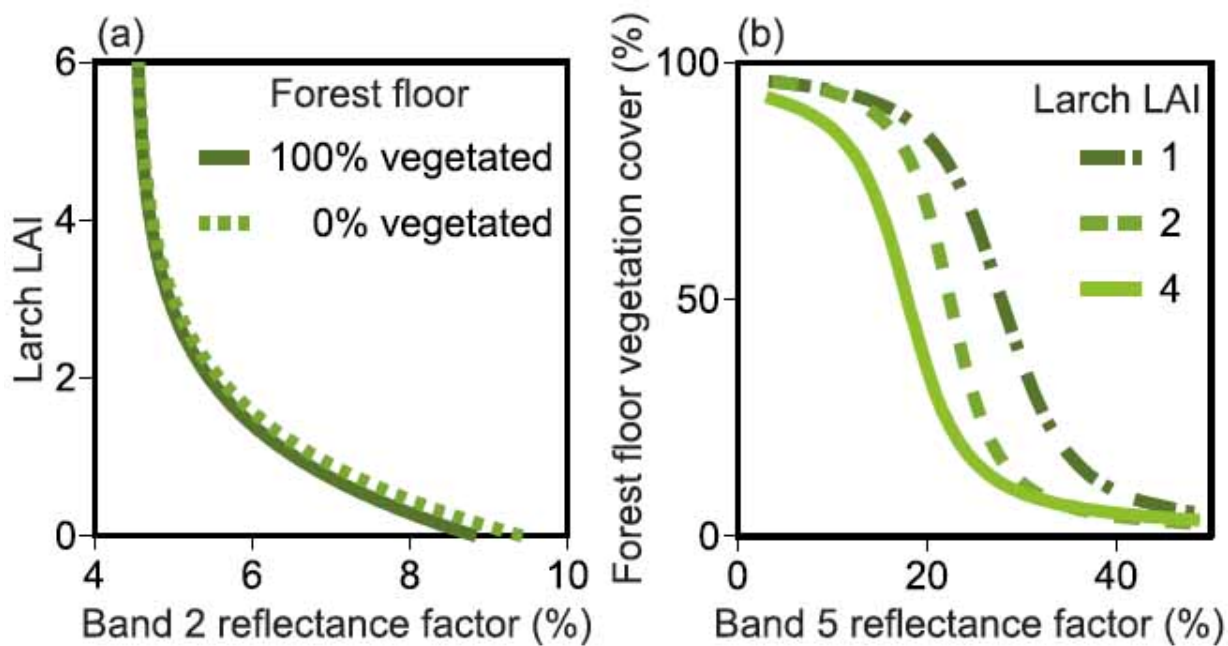


図3. カラマツ葉面積指数 (LAI_1)、林床植被率 (FVC) とランドサット分光指標との関係

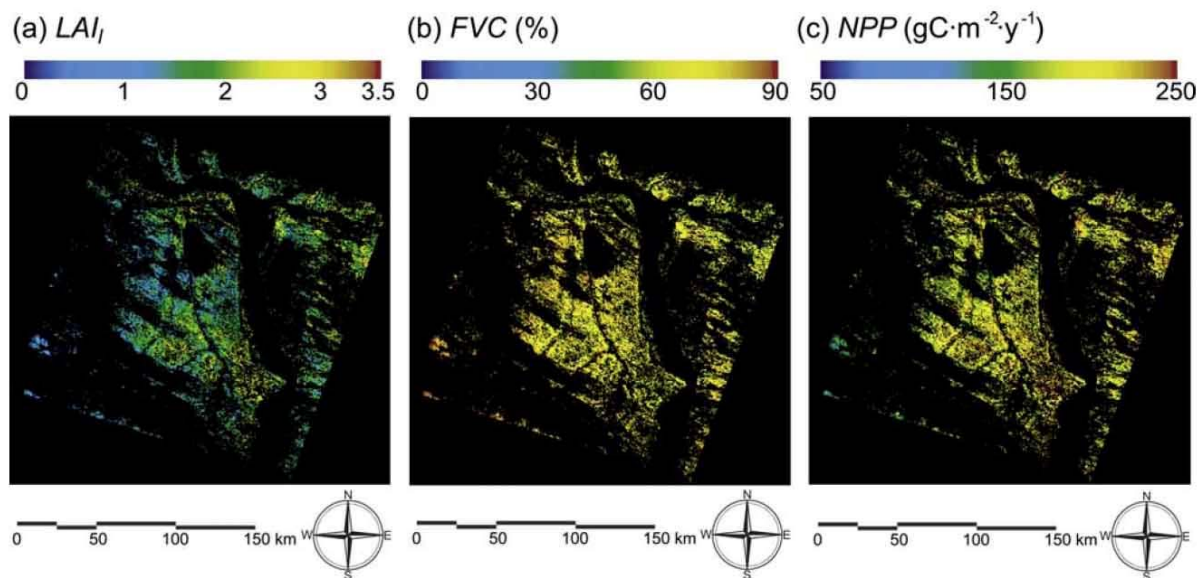


図4. ヤクーツク周辺のカラマツ林の LAI_1 、FVC、NPPの地理的分布見積もり
 (2000.8.13のランドサット画像による、300mグリッド、右下がヤクーツク市)

本方法で見積もったLAI₁, FVC, NPPの地理的分布を図4に示す。シベリアで地表火が多いこと、地表火により林床植生が消失すること、林床植被率 (FVC) がNPPに影響を及ぼすことを考えると、火災後の林床植生の回復の評価が重要である。また生態系の炭酸ガス収支を考えるためには土壌中の有機物分解量を考慮しなければならない。この見積もりのためには、リモートセンシングと地上調査とを組み合わせることが有効である。

(2) 火災の重度分布

図5に、Landsat画像により得た8つの土地被覆カテゴリーの分光特性を示す。8つの土地被覆カテゴリーの分光反射率の標準偏差はバンド4が3.2%であるのを除いて、1.6%以下であった。標準偏差が小さいため、バンド数が少ないにもかかわらずこれら8つの土地被覆カテゴリーは、分光的に互いに分離された。延焼枯死林分と地表火延焼林分はバンド7で森林より高い反射係数を持っていた。草地（疎および密）もバンド7で高い反射係数を示すが、他のバンドの反射特性は他の土地被覆カテゴリーと異なる。

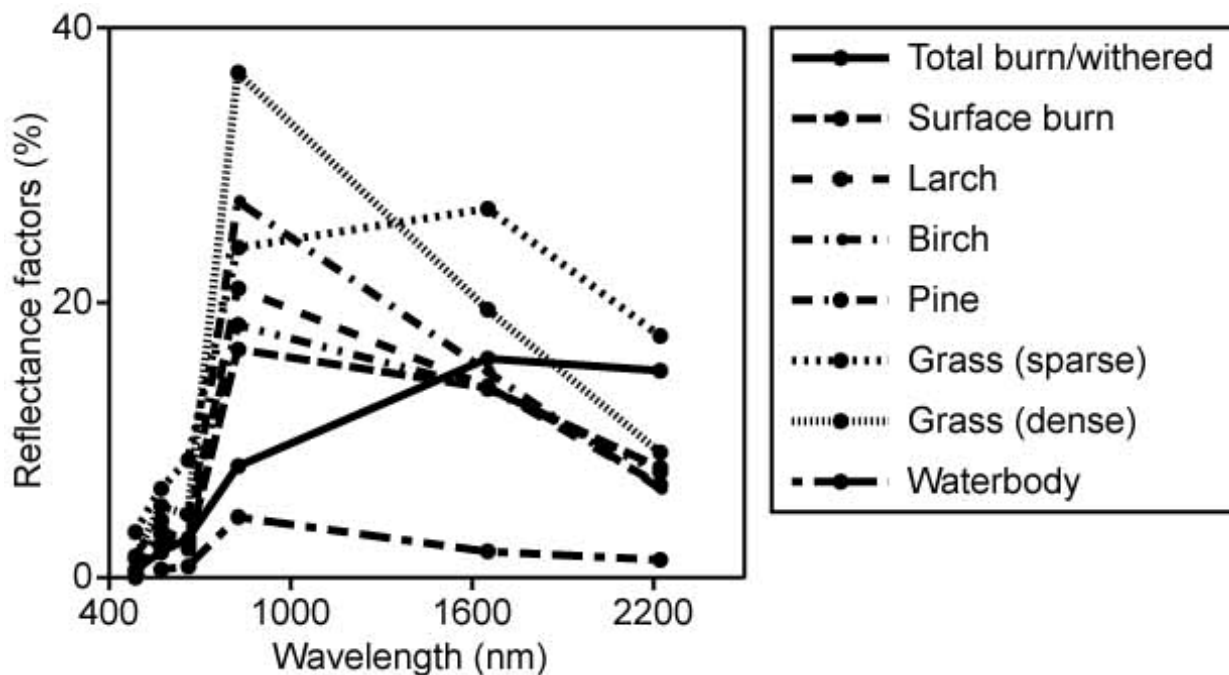


図5. Landsat画像により得た8つの土地被覆カテゴリーの分光特性

図6(a)は解析対象地域のLandsat ETM画像を示す。図6(b)は8つの参照地域のデータによる30-m地上分解能画像の最尤法分類結果を示す。2つのIKONOS画像の判読によると、この分類結果は土地被覆の境界の部分を除いて正しく分類されていた。ただし、疎と密の草地の区分は曖昧であった。土地被覆カテゴリーのパッチサイズは画像の地上分解能(30m)より概して大きく、境界の部分の影響は微少であった(図6(a))。このことは、30-m地上分解能画像は、500-m-IMGと1-km-IMGによる分類結果の評価に用いることができることを示す。

(2) 500-mと1-km 画像による土地被覆面積率の見積もり

500-m-IMGと1-km-IMGでは多くの画素は2以上の異なる土地被覆カテゴリーから成る。こうした画素はミクセルと呼ばれる。図6(c)と(d)はそれぞれ500-m-IMGと1-km-IMGによる最尤法分類結果を示す。画像中央の延焼枯死林分が過小評価され、右下のカラマツが過大評価されている。これは、ミクセルの分光特性に起因する。表2は、3つの地上分解能が異なる画像の最尤法分類による解析対象地域の面積率を示す。解析対象地域の10%以下の土地被覆カテゴリーの面積率は500-m-IMGと1-km-IMGの結果では、過小評価された。500-m-IMGと1-km-IMGでは、延焼枯死林分と地表火延焼林分はそれぞれ、67~75%と10~20%の過小評価であり、カラマツは90~110%の過大評価であった。

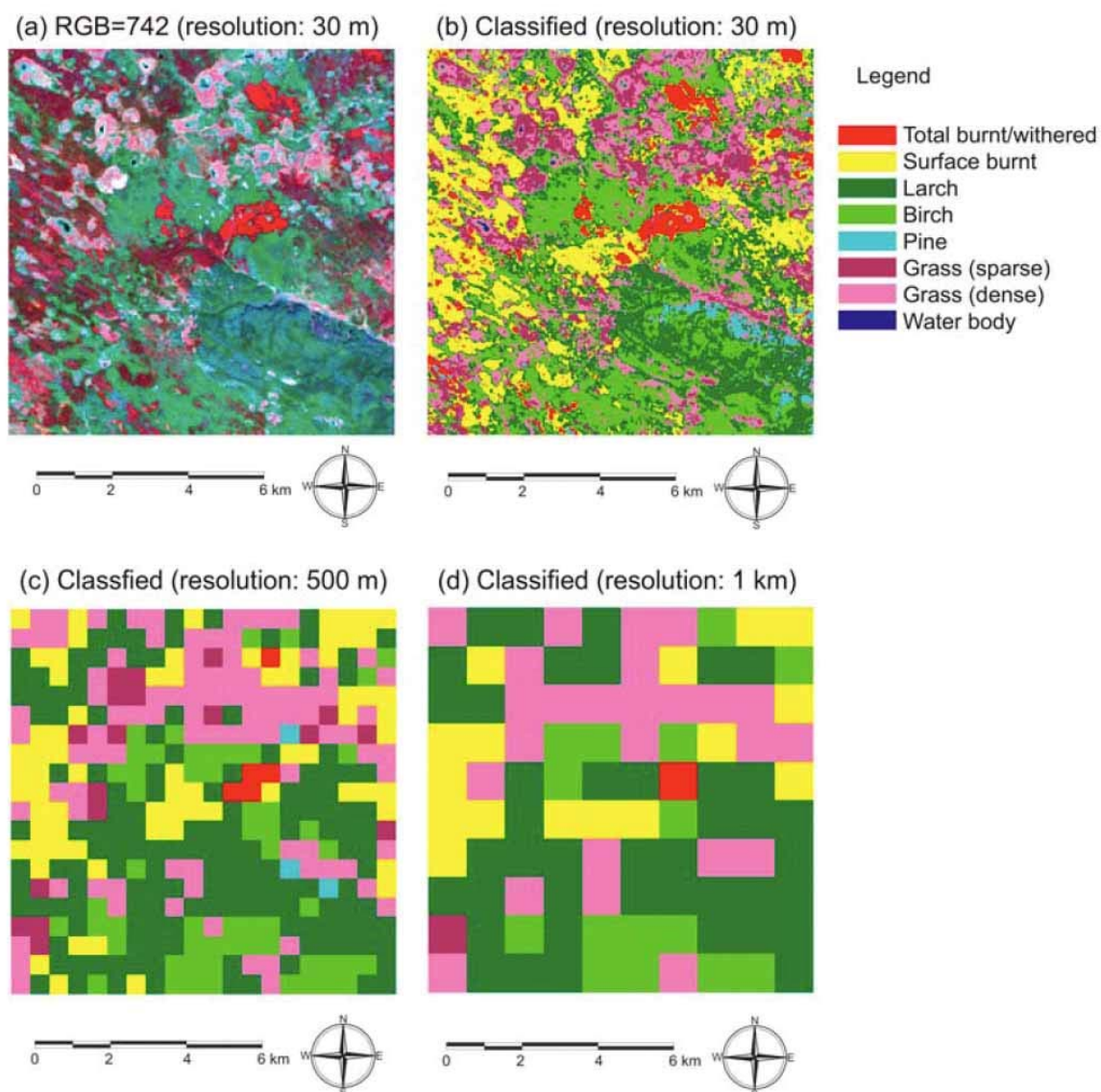


図6. (a) 解析対象地域のLandsat ETM画像；(b) 8つの参照地域のデータによる(a)の30-m地上分解能画像Landsat ETM画像の最尤法分類結果；(c) 500-m地上分解能画像による最尤法分類結果；(d) 1-km地上分解能画像による最尤法分類結果

表2. 最尤法分類により見積もられた土地被覆カテゴリーの面積率 (%)

	地上分解能		
	30 m	500 m	1 km
延焼枯死林分	3.9	1.3	1.0
地表火延焼林分	20.8	18.0	16.0
カラマツ	20.2	38.3	42.0
シラカバ	20.7	14.0	15.0
ヨーロッパアカマツ	2.1	0.8	0.0
草地 (密)	7.1	4.5	1.0
草地 (疎)	25.2	23.3	25.0
水体	0.1	0.0	0.0

SMAによって、ミクセル内の土地被覆カテゴリーの面積率を算出した。図7と図8は7つの土地被覆カテゴリーについてのSMAによる500-m-IMGと1-km-IMGの面積率 (estimated) と30-m画像の分類結果 (observed) との関係を示す。表のc. v. は変動係数である。それぞれの土地被覆カテゴリーについて、500-m-IMGを用いた見積もりは、1-km-IMGの見積もりより小さな変動係数を示した。表3はSMAによる解析対象地域の算出された面積率を示す。500-m-IMGでは、延焼枯死林分と「シラカバと草地 (密) の合計」はそれぞれ3% と 19%の過小評価であった。一方で、地表火延焼林分とカラマツはそれぞれ38%と25%の過大評価であった。

表3. 分光ミクセル解析により見積もられた土地被覆カテゴリーの面積率 (%)

	観測	分光ミクセル解析		
	30 m	500 m	1 km	10 km
延焼枯死林分	3.9	3.8	2.5	0
地表火延焼林分	20.8	28.6	31.2	35.0
カラマツ	20.2	14.0	15.1	15.0
シラカバ	20.7	31.9	30.0	32.5
ヨーロッパアカマツ	2.1	4.0	3.0	0
草地 (密)	7.1	15.1	15.5	17.5
草地 (疎)	25.2	2.7	2.8	0
水体	0.1	-	-	-

図9と図10は7つの土地被覆カテゴリーについてのMLRAによる500-m-IMGと1-km-IMGの面積率 (estimated) と30-m画像の分類結果 (observed) との関係を示す。重回帰式は、1-km-IMGを用いて構築されたのであるが、それぞれの土地被覆カテゴリーについて、500-m-IMGを用いた見積もりは、1-km-IMGの見積もりより小さな変動係数を示した。延焼枯死林分とヨーロッパアカマツはMLRAの方がSMAによるより高い変動係数を示した。その他の土地被覆カテゴリーではMLRAの方がSMAによるより低い変動係数を示した。1画素の算出された面積率は89~141% (最小値と最大値) の範囲であり、平均値は104%であった。標準偏差は500-m-IMGでは7%で、1-km-IMGでは3%であった。表4はMLRAにより算出された解析対象地域の面積率を示す。それぞれの土地被覆カテゴリーの面積率は、MLRAによる算出と30m画像の分類とでほとんど同じであった。ただし、延焼枯死林分は23~31%の過大評価であった。表5は土地被覆カテゴリーの面積率 (%) 見積もりのための重回帰式を示す。延焼枯死林分は3つの近赤外から短波長赤外のバンドによって見積もられ、地表火延焼林分は3つの近赤外から短波長赤外のバンドと赤バンドによって見積もられた。

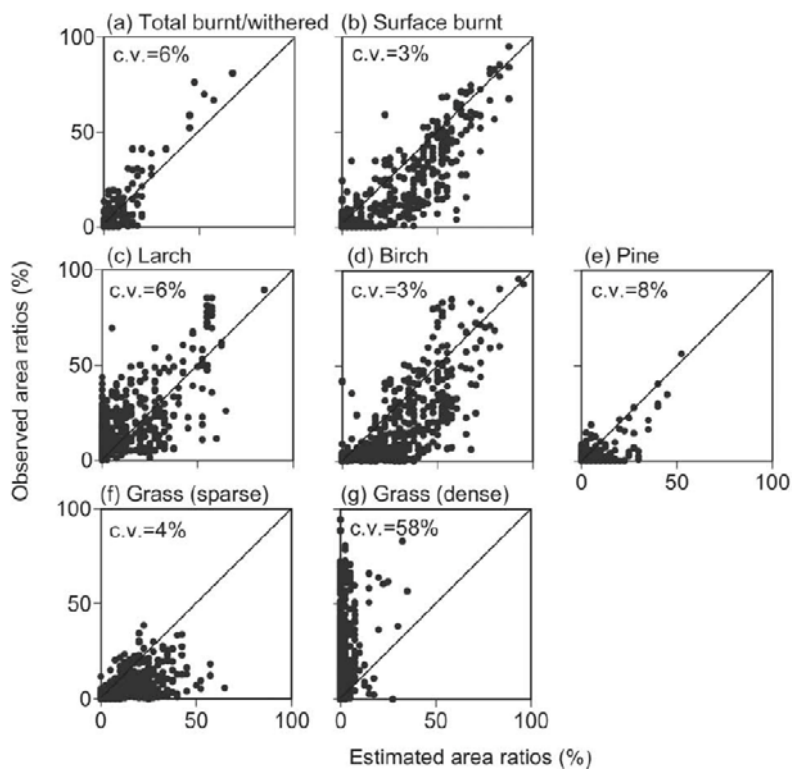


図7. 7つの土地被覆カテゴリーについての分光ミクセル解析による500-m地上分解能画像の面積率 (estimated) と30-m画像の分類結果 (observed) との関係

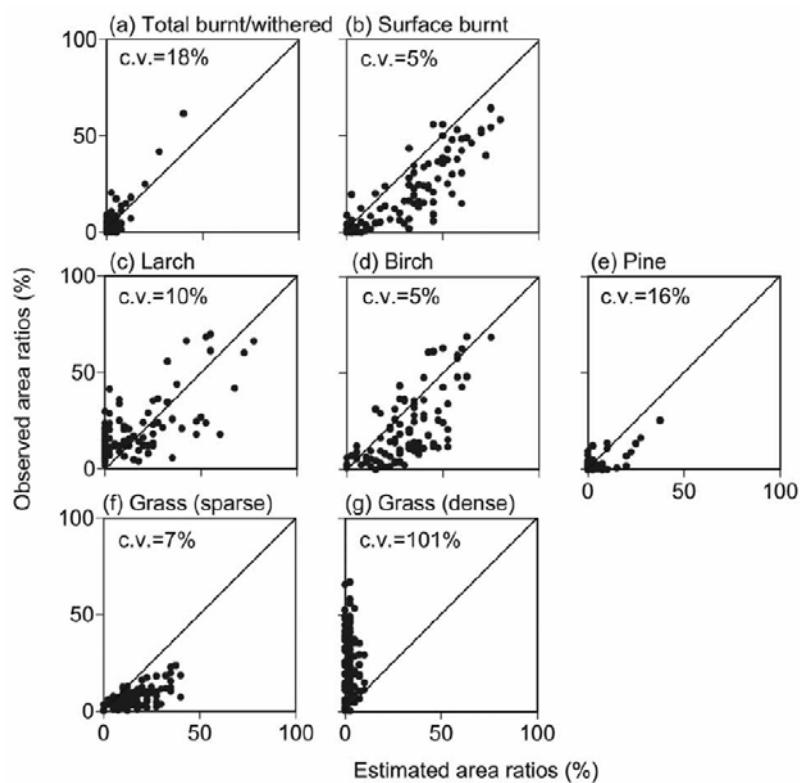


図 8. 7つの土地被覆カテゴリーについての分光ミクセル解析による1-km地上分解能画像の面積率 (estimated) と30-m画像の分類結果 (observed) との関係

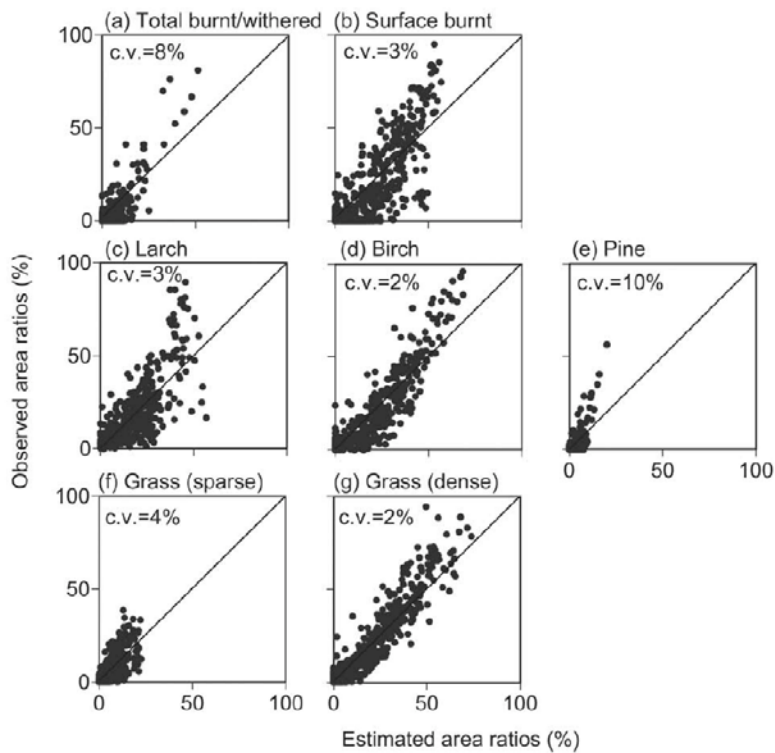


図 9. 7つの土地被覆カテゴリーについての線型重回帰分析による500-m地上分解能画像の面積率 (estimated) と30-m画像の分類結果 (observed) との関係

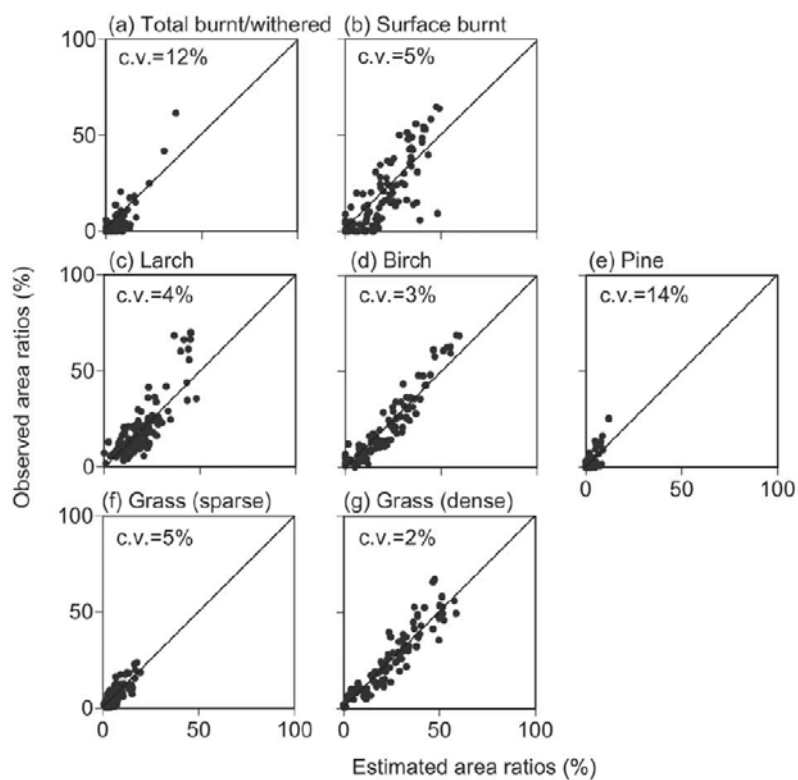


図10. 7つの土地被覆カテゴリーについての線型重回帰分析による1-km地上分解能画像の面積率 (estimated) と30-m画像の分類結果 (observed) との関係

表4. 線型重回帰分析により見積もられた土地被覆カテゴリーの面積率 (%)

	線型重回帰分析		
	観測 30 m	500 m	1 km
延焼枯死林分	3.9	5.1	4.8
地表火延焼林分	20.8	21.9	21.1
カラマツ	20.2	20.0	19.8
シラカバ	20.7	21.8	21.0
ヨーロッパアカマツ	2.1	2.5	2.3
草地 (密)	7.1	7.1	7.0
草地 (疎)	25.2	25.5	25.3
水体	0.1	-	-

表5. 土地被覆カテゴリーの面積率(%)見積もりのための重回帰式.

	重回帰式	R ²
延焼枯死林分	$6.11B4 - 21.9B5 + 26.7B7 - 8.2$	0.69
地表火延焼林分	$- 21.2B3 - 12.0B4 + 27.0B5 - 20.0B7 + 90.4$	0.60
カラマツ	$- 14.0B2 + 32.2B3 - 3.47B4 - 20.3B7 + 221.9$	0.69
シラカバ	$- 22.8B1 + 16.8B4 - 31.8B5 + 32.2B7 - 97.8$	0.87
ヨーロッパアカマツ	$10.4B1 + 4.62B3 - 1.82B4 - 4.86B7 + 62.5$	0.45
草地(密)	$21.7B1 - 9.46B2 + 1.50B4 - 7.2$	0.62
草地(疎)	$9.62B2 - 10.6B3 - 6.28B4 + 26.3B5 - 14.7B7 - 137.2$	0.87

B1、B2、B3、B4、B5、B7は Landsat ETM+ のバンド1、2、3、4、5、7をそれぞれ示す。

(3) 考察

東シベリアの原野・森林火災直後の延焼枯死林分と地表火延焼林分を含む7つの土地被覆カテゴリーの分類を30m地上分解能画像のLandsat ETM+により行い、500-m-IMGと1-km-IMGとを用いたSMAとMLRAによる各カテゴリーの面積率算出の評価に用いた。30m地上分解能画像による分類は、火災前後のIKONOS画像判読結果と整合性がとれていた。

500-m-IMGは1-km-IMGと比べて、SMA、MLRAともに、変動係数の評価から、1画素の土地被覆カテゴリーの面積率見積もりが良好であった。また解析対象地域全体の面積率算出でも優れていた。より高い解像度の画像は火災前の現存量や炭素収支構造との重ね合わせに重要である。また、葉面積指数と林床植被率が東シベリアのカラマツ林の純一次生産の指標となることを示し、これら指標の地理的分布をLandsat ETM+によって見積もった。こうした情報と火災の重度(延焼枯死林分または地表火延焼林分)は火災とさらなる環境変化の評価に役立つ。

土地被覆カテゴリーの平均分光特性はSMAをMODIS画像に適用するのに必要であり、MLRAをMODIS画像に適用するにはLandsat ETM+のような地上分解能の高い画像が必要である。

延焼枯死林分とヨーロッパアカマツはMLRAの方が、SMAによるより高い変動係数を示したが、その他の土地被覆カテゴリーではMLRAの方が、SMAによるより低い変動係数を示した。SMAによる面積率の過大評価と過小評価の一つの理由は、参照と実際の分光特性の不一致によると考えられる。MLRAでは、土地被覆カテゴリーの平均分光特性と実際の平均分光特性は等しく置かれる。しかし、MLRAでは、1画素の面積率の合計はそれぞれの土地被覆カテゴリーの面積率の算出の後で調整される。このことが、延焼枯死林分とヨーロッパアカマツはMLRAの方が、SMAによるより高い変動係数を示すのにつながったと考えられる。500-m-IMGを用いたSMAでは、延焼枯死林分と地表火延焼林分の解析対象地域の面積率は、それぞれ3.8%と20.8%と見積もられた。30-m解像度の画像では3.9%と28.6%であった。

MLRAによる延焼枯死林分のバンド選択はGeorge et al. (2006)²²⁾によるものと同じであった。この整合性は、近赤外から短波長赤外がシベリアの火災跡地の抽出に適していることを示唆する。MLRAによる7つの土地被覆カテゴリーの面積率算出では、バンド4が7つ全てで使われており、バンド7は6つのカテゴリーで使われた。バンド4と7は、アラスカや米国本土において、複合燃焼指数を算出するのに使われている。(例えば、Epting et al., 2005¹⁷⁾).

東シベリアの原野・森林火災直後の延焼枯死林分と地表火延焼林分を含む7つの土地被覆カテゴリーの分類を30m地上分解能画像のLandsat ETM+により行い、さらにその結果を500m解像度の画像と1km解像度の画像とを用いた、分光ミクセル解析 (SMA) と線型重回帰分析 (MLRA) による各カテゴリーの面積率算出の評価に用いた。500m解像度の画像と1km解像度の画像はMODIS画像の6つの可視-短波長赤外のバンドのシミュレーションと考えられる。500m解像度の画像は1-km-IMGと比べて、SMA、MLRAともに、変動係数の評価から、1画素の土地被覆カテゴリーの面積率見積もりが良好であった。また解析対象地域全体の面積率算出でも優れていた。延焼枯死林分と地表火延焼林分の面積率は500m解像度の画像を用いてSMAによりそれぞれ6%と3%の誤差で見積もられた。500m解像度の画像を用いたSMAにより、解析対象地域の延焼枯死林分は3.8%、地表火延焼林分は28.6%の面積率であった。それらはそれぞれ、3%の過小評価と38%の過大評価であった。地表火延焼林分の見積もりはMLRAによって改善された。ただし、広域の30m解像度の参照画像が必要である。

本研究では、火災直後の画像を用い、数年前に火災を受けた火災跡地は含んでいなかった。東シベリアの、延焼枯死林分と地表火延焼林分の見積もりのためには、こうした様々な年数の火災跡地を含む画像についても研究する必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで、MODIS画像により火災面積の評価が行われてきたが、見積もり法の評価は十分になされていなく、詳細な火災地の地図化などに基づく統計データと食い違うこともあった。また、東シベリアでは延焼枯死林分と地表火延焼林分では、燃焼中の二酸化炭素放出量はそれぞれ2.3 t C ha⁻¹、23 t C ha⁻¹と10倍の開きがある¹³⁾。それにも関わらず、これまでの火災影響評価ではこれらを区別してこなかった。本研究成果をシベリアの他地域にも適用することにより、より信頼性の高い火災の影響評価が期待できる。

(2) 地球環境政策への貢献

分光ミクセル解析と線型重回帰分析による火災の重度の地理的分布は、燃焼中のエアロゾルおよび温室効果ガスの放出、土壌呼吸の増加、植生回復に伴う水熱収支構造の変化の評価につながると考えられる。各国あるいは各地域ごとの放出量推定と監視プログラムに活かせる。また、火災前の二酸化炭素収支の地理的分布と火災が起こった地点とを重ね合わせることで、火災の影響、炭素蓄積量の変化、炭素固定速度の変化の評価に用いることができる。

6. 引用文献

- (1) Spichtinger, N., Damoah, R., Eckhardt, S., Forster, C., James, P., Beirle, S., Marbach, T., Wagner, T., Novelli, P.C. and Stohl, A. (2004) Boreal forest fires in 1997 and 1998: a seasonal comparison using transport model simulations and measurement data. *Atmos. Chem. Phys.*, 4: 1857-1868.
- (2) Kajii, Y., Kato, S., Streets, D.G., Tsai, N.Y., Shvidenko, A., Nilsson, S., McCallum, I., Minko, N.P., Abushenko, N., Altyntsev, D. and Khodzer, T.V. (2002) Boreal forest

- fires in Siberia in 1998: Estimation of area burned and emissions of pollutants by advanced very high resolution radiometer satellite data. *J. Geophys. Res.*, 107(D24): 4745, doi:4710.1029/2001JD001078.
- (3) Machimura, T., Kobayashi, Y., Iwahana, G., Hirano, T., Lopez, L., Fukuda, M. and Fedorov, A.N. (2005) Change of carbon dioxide budget during three years after deforestation in eastern Siberian larch forest. *J. Agric. Meteorol.*, 60, 653-656.
- (4) Iwahana, G., Machimura, T., Kobayashi, Y., Fedorov, A.N., Konstantinov, P.Y. and Fukuda, M. (2005) Influence of forest clear-cutting on the thermal and hydrological regime of the active layer near Yakutsk, eastern Siberia. *J. Geophys. Res.*, 110(G02004): doi:10.1029/2005JG000039.
- (5) Kharuk, V.I., Dvinskaya, M.L. and Ranson, K.J. (2005) The spatiotemporal pattern of fires in northern Taiga larch forests of central Siberia. *Russian J. Ecol.*, 36(5): 302-311.
- (6) Shvidenko, A. and Nilsson, S., (2000) Extent, distribution, and ecological role of fire in Russian forests, In:Kasischke, E.S., Stocks, B.J. (Eds.), *Fire, climate change, and carbon cycling in the boreal forest*, Springer-Verlag, New York, USA, pp. 132-150.
- (7) Shvidenko, A. and Nilsson, S., (2002) Dynamics of Russian forests and the carbon budget in 1961-1998: An assessment based on long-term forest inventory data, *Clim. Change*, 55(1-2): 5-37.
- (8) Conard, S.G., Sukhinin, A.I., Stocks, B.J., Cahoon, D.R., Davidenko, E.P. and Ivanova, G.A. (2002) Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Clim. Change*, 55(1-2): 197-211.
- (9) Sukhinin, A.I., French, N.H.F., Kasischke, E.S., Hewson, J.H., Soja, A.J., Csiszar, I.A., Hyer, E.J., Loboda, T., Conrad, S.G., Romasko, V.I., Pavlichenko, E.A., Miskiv, S.I. and Slinkina, O.A. (2004) AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies. *Remote Sens. Environ.*, 93(4): 546-564.
- (10) Soja, A.J., Sukhinin, A.I., Cahoon, D.R., Shugart, H.H. and Stackhouse, P.W. (2004) AVHRR-derived fire frequency, distribution and area burned in Siberia. *Int. J. Remote Sens.*, 25(10): 1939-1960.
- (11) Kaufman, Y.J., Justice, C.O., Flynn, L.P., Kendall, J.D., Prins, E.M., Giglio, L., Ward, D.E., Menzel, W.P. and Setzer, A.W. (1998) Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *J. Geophys. Res.*, 103(D24): 32215-32238.
- (12) Fraser, R.H., Li, Z. and Cihlar, J. (2000) Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): A new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sens. Environ.*, 74(3): 362-376.
- (13) Conard, S.G. and Ivanova, G.A. (1997) Wildfire in Russian boreal forests - Potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates. *Environ. Pollut.*, 98(3): 305-313.
- (14) Pozo, D., Olmo, F.J. and AladosArboledas, L. (1997) Fire detection and growth monitoring

- using a multitemporal technique on AVHRR mid-infrared and thermal channels. *Remote Sens. Environ.*, 60(2): 111-120.
- (15) White, J.D., Ryan, K.C., Key, C.C. and Running, S.W. (1996) Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *Int. J. Wildland Fire*, 6(3): 125-136.
- (16) van Wagtendonk, J.W., Root, R.R. and Key, C.H. (2004) Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sens. Environ.*, 92(3): 397-408.
- (17) Epting, J., Verbyla, D. and Sorbel, B. (2005) Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sens. Environ.*, 96(3-4): 328-339.
- (18) Furyaev, V.V. (1996), Pyrological regimes and dynamics of the southern taiga forests in Siberia. In: Goldammer, J.G. and Furyaev, V.V. (eds.) *Fire in ecosystems of boreal Eurasia*. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, the Netherlands, 168-185.
- (19) Defries, R.S., Hansen, M.C. and Townshend, J.R.G. (2000) Global continuous fields of vegetation characteristics: a linear mixture model applied to multi-year 8 km AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 21(6-7): 1389-1414.
- (20) Dennison, P.E. and Roberts, D.A. (2003) Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE. *Remote Sens. Environ.*, 87(2-3): 123-135.
- (21) Rogge, D.M., Rivard, B., Zhang, J. and Feng, J. (2006) Iterative spectral unmixing for optimizing per-pixel endmember sets. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44(12): 3725-3736.
- (22) George, C., Rowland, C., Gerard, F. and Balzter, H. (2006) Retrospective mapping of burnt areas in Central Siberia using a modification of the normalized difference water index. *Remote Sens. Environ.*, 104(3): 346-359.

7. 国際共同研究等の状況

カウンターパート：ISAEV, Alexander P.

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Russian Academy of Science,
Lenin Avenue 41, Yakutsk 677891, Russia

共同研究内容：東シベリア森林火災後の植生変化と炭素収支変化の共同調査

カウンターパート：MAXIMOV Trofim C.

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Russian Academy of Science,
Lenin Avenue 41, Yakutsk 677891, Russia

共同研究内容：東シベリア森林火災後の植生変化と炭素収支変化の共同調査

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Kushida, K., Isaev, A.P., Maximov, T.C., Takao, G., & Fukuda, M.: Remote sensing of upper canopy leaf area index and forest floor vegetation cover as indicators of net primary productivity in a Siberian larch forest. *J. Geophys. Res.* 112, G02003, doi:10.1029/2006JG000269 (2007)
- 2) Kushida, K., Isaev, A.P., Takao, G., Maximov, T.C., & Fukuda, M.: Remote sensing of total and surface burn ratios following a wildfire in East Siberia using 30 m - 1 km resolution images. *Eurasian J. For. Res.* 10(1), 105-114 (2007)
- 3) 串田圭司、原田鋤一郎、森淳子、岩花剛、澤田結基、片村文崇、福田正己：永久凍土と活動層のリモートセンシング、雪氷（日本雪氷学会論文集）、69(2)、221-228 (2007)

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Kushida, K., Isaev, A.P., Maximov, T.C., Takao, G., & Fukuda, M.: Remote sensing of wildfire severity in Siberia - Before fire and crown/surface fire -. Proceedings of 3rd International Workshop on C/CH₂O/Energy balance and climate over boreal regions with special emphasis on eastern Eurasia, 29 January - 1 February 2007, Nagoya University, Nagoya, 87-88 (2007)

(2) 口頭発表（学会）

なし

(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