

R-04 -2013

YIES Research Report

# 山梨県環境科学研究所研究報告書

第32号

特定研究

「高解像度衛星画像データ活用による森林管理情報把握に関する研究」

平成24年度

山梨県環境科学研究所

## は じ め に

山梨県は全国有数の森林県であり、その森林は災害の防止、水源のかん養などの多様な公益的機能を有し、全ての県民に多くの恩恵をもたらしている。こうした機能に着眼し、山梨県は平成16年2月に「やまなし森林・林業基本計画」を策定し、望ましい森林の姿を示すとともに、長期的な展望に立った森林整備のあり方や林業振興の方向性を示した。その後、平成17年2月に京都議定書が発効する中で森林は温室効果ガスの吸収源として大きく注目されるなど、森林を取り巻く情勢は大きく変化してきた。平成23年3月に山梨県が策定した「山梨県産業振興ビジョン」では、今後の成長が期待される分野として「森林・林業・木材産業」を位置づけ、本県の豊富な森林資源の活用を目指している。しかし、林業の採算性悪化や担い手の減少などに起因して、森林の荒廃が進んでいる現状も確かであり、森林の持つ公益的機能の低下が懸念されることから、県民全体で森林の保全に向けた施策を実施するために、平成24年4月から森林及び環境の保全に係る県民税、いわゆる森林環境税が導入された。一方で、民有林の土地所有者に代わり森林整備を進めてきた林業公社は将来的に多額の債務超過が見込まれ、廃止に向けて抜本的な見直しがなされている状況である。森林の再生を図るためには、このような状況の変化を踏まえ、森林の現状や新たな課題に適切に対応し、荒廃した森林の再生と充実しつつある森林資源の循環利用を推進することが必要となっている。

森林整備を実施する上で、正確な森林情報の把握と情報共有が基礎となる。森林情報を県と市町村が連携して共有することにより、現地と森林簿および地図とのマッチングなどで森林GISデータの精度向上が図られ、施業履歴情報等の整備が進展する。今回報告する「高解像度衛星画像データ活用による森林管理情報把握に関する研究」は、山梨県森林環境部からの要請に基づき、高解像度衛星画像を用いたリモートセンシング技術による森林解析を通じて、森林情報の精度を上げつつ業務を効率化する取り組みを支援する目的で行われた。今回の研究によって、高解像度衛星画像からの林相判別に欠かせない森林区画把握に関する知見、森林の林相特徴量把握に関する知見について成果を得た。今後、高解像度衛星画像により把握された森林情報が、森林情報システムの活用による森林管理の推進につながり、森林計画や地域の環境づくりの取り組みに貢献することを期待したい。

山梨県環境科学研究所

所 長 荒 牧 重 雄



# 目 次

はじめに

概要編

## I 特定研究の概要

I - 1	研究テーマおよび研究期間	1
I - 2	研究体制	1
I - 3	研究目的	1
I - 4	研究成果の概要	3

本編

## II 研究成果報告

II - 1	研究目的	9
II - 2	研究成果	11
II - 2-1	対象範囲および使用衛星データ	11
II - 2-2	SPOT-5衛星データ位置精度の検証	13
II - 2-3	衛星画像分割のスケールパラメータの検討	14
II - 2-4	林相区分の検討	20
II - 3	まとめ	28

# 概要編

## I 特定研究の概要

### I-1 研究テーマおよび研究期間

#### 研究テーマ名：

高解像度衛星画像データ活用による森林管理情報把握に関する研究

#### 研究期間：

平成19年度～21年度（3か年）

#### 依頼元：

山梨県森林環境部森林整備課

### I-2 研究体制

山梨県環境科学研究所 研究員 杉田 幹夫

山梨県森林総合研究所 研究員 長池 卓男

### I-3 研究目的

本県のような森林県にとって、森林を健全な状態に維持するために不可欠な情報を効率的に収集・利用するための基盤技術を手に入れることは重要である。例えば地球温暖化の防止においては森林整備による森林吸収源対策を着実に進める必要があり、森

林の状況を正確に把握することはその大前提となる。

また、森林や環境に対する県民の意識が高まるとともに、都市住民を中心に森林ボランティアやNPOが組織され、都市上流地域の森林整備を行うといった動きもあり、行政の持つ森林情報に対するニーズが増えてきている。県が管理する森林簿や森林計画図は森林行政に関する基礎資料であるが、奥地を中心に現況との乖離が見られる箇所もあるため、精度向上は喫緊の課題である。

一方、公務員制度改革など行政の効率化が進められている中で、森林行政も今後は一層業務の効率化を進められることが予想されており、森林情報の精度を上げつつ業務を効率化する手段として、高解像度衛星画像を用いたリモートセンシング技術による森林解析が有効であると考えられる（図I-1）。

本研究に関連する過去の研究成果は、次のようにまとめられる。

これまでの研究成果として、基盤研究「環境変動把握手法と環境変動モデリングに関する研究」（平成9～14年度）、基盤研究「広域環境調査手法と環境の指数化に関する基礎的研究」（平成9～18年度）で

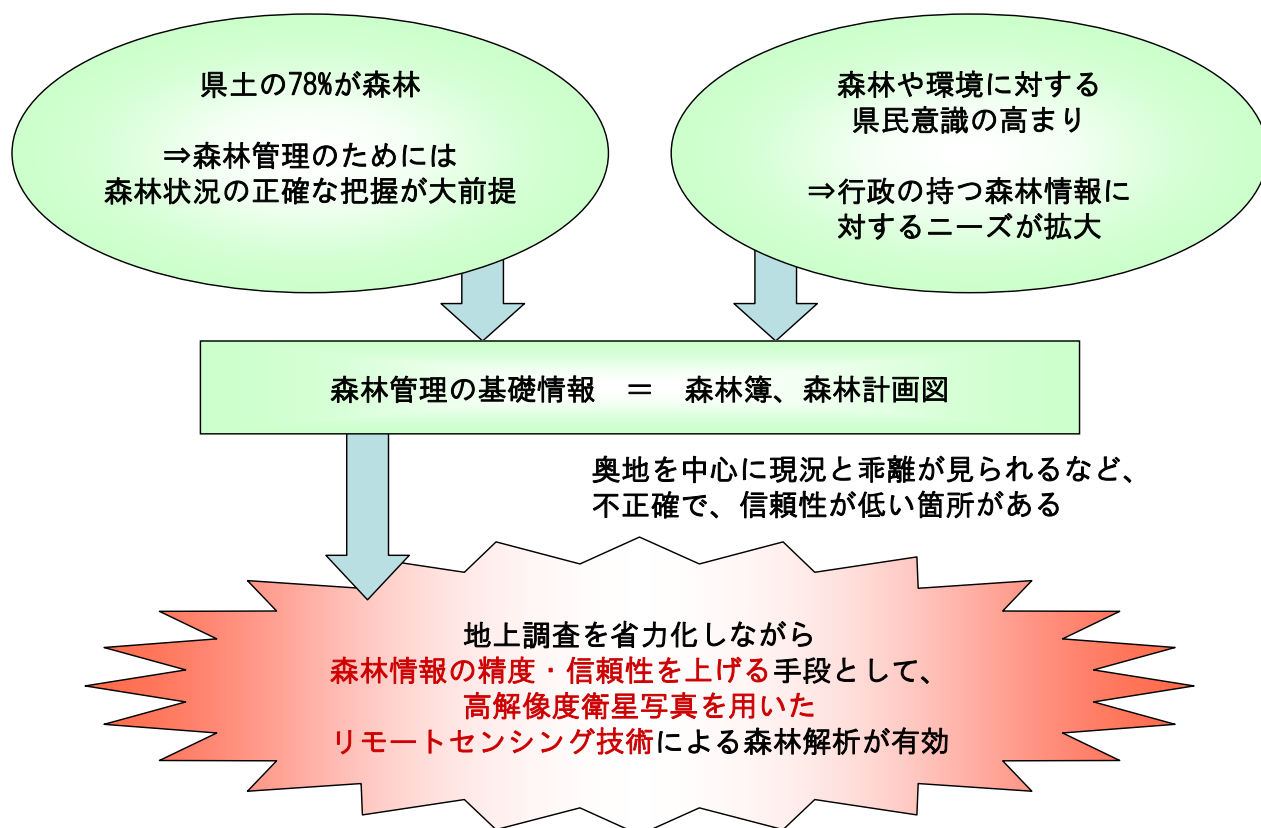


図 I-1 研究の背景

は、中分解能（数十メートル分解能）の衛星データの解析手法の開発・整備に取り組み、山梨県全域といった数十キロメートル～100キロメートル四方程度の広範囲の自然環境を人工衛星観測データによりモニタリングする場合、山梨県の険しい地形起伏による衛星データの歪みを取り除き、地形図などに対して正確に精密に位置合わせする手法（衛星画像の高精度オルソ画像化手法）を確立するとともに、地形起伏による陰影の補正に取り組み、実用に足る手法を確立した。このことは、山梨県全域を対象とした衛星データ解析の基盤技術となっている。このほか、プロジェクト研究「富士山周辺における自然特性に関する研究」（平成9～13年度）およびプロジェクト研究「森林による地球温暖化ガスの吸収効率に関する研究」（平成14～17年度）では、ランドサット衛星（30m分解能）およびスポット衛星（10m分解

能のプロダクト）の観測データを使用して、主に富士山北麓地域の樹種分類などを行い、森林の分布把握の手法について関連する知見を得るとともに、10mの地上分解能は森林の林相判別には不十分であることが確認されている。

そこで本研究では、森林の基礎情報となる森林簿、森林計画図の精度向上を目指し、森林の林相、分布、資源量等といった森林の現況を高解像度衛星画像（数メートル分解能）から把握する手法を確立し、GISデータ化することを目的とする（図 I-2）。具体的には、高解像度衛星画像データを用いた森林の林相判別手法の確立、森林の分布と資源量把握手法の確立、県内の代表的林相の森林を対象とした森林の現況把握とその評価、森林情報のGISデータ化と既存の森林管理情報との比較を研究目標としている。

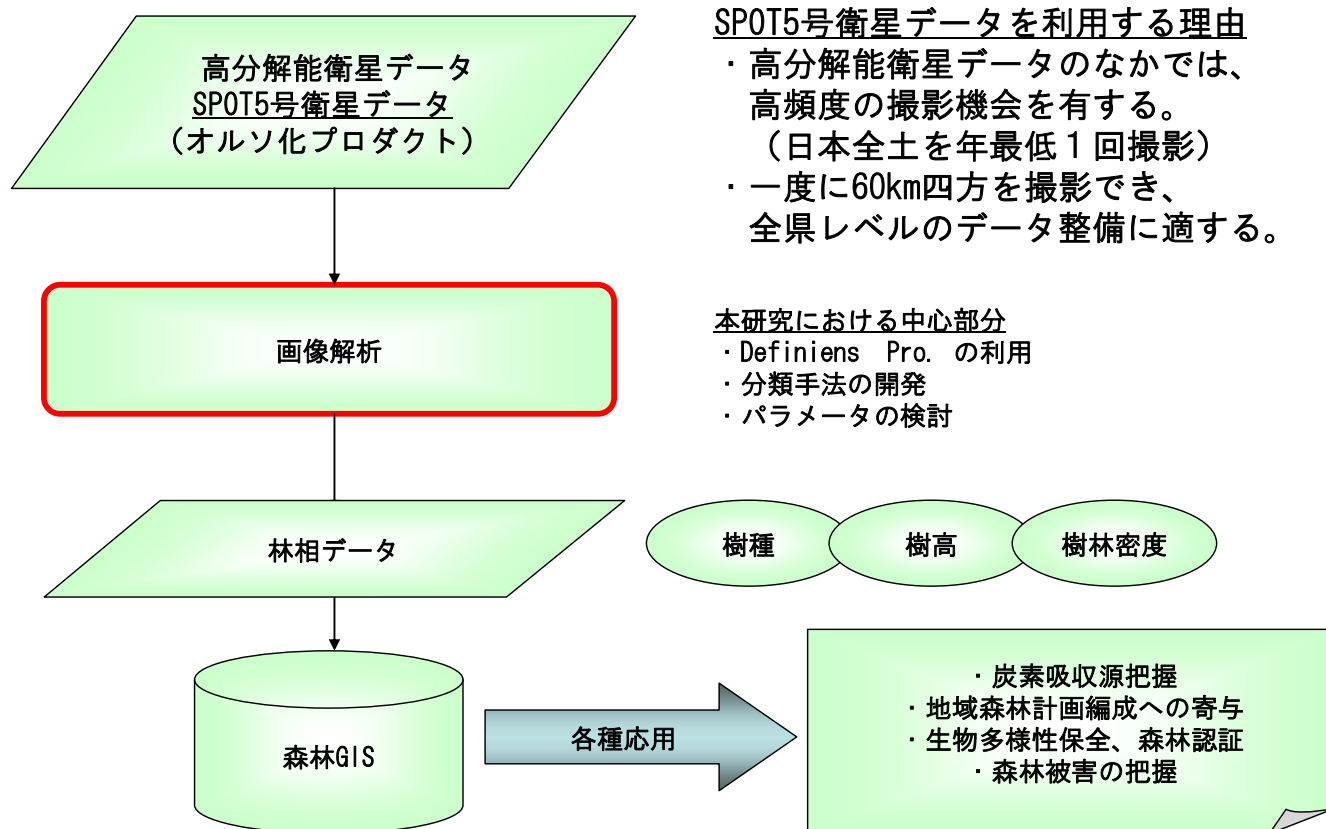


図 I-2 衛星データから森林情報

## I-4 研究成果の概要

本研究では高解像度衛星データとして地上分解能5メートル相当に加工されたスポット5号衛星のカラー画像データで、あらかじめオルソ幾何補正処理が施されたプロダクトを用いた。使用した3時期の衛星画像の観測日と観測範囲は表 I-1の通りである（図 I-3）。

解析に先だって、衛星画像の水平面内での位置精度評価を次の通り行った（図 I-4）。

表 I-1 解析に使用した衛星画像

観測日	観測範囲
2007年4月7日	峡北地域を含む
2007年11月22日	峡南地域を含む
2008年5月7日	東部地域を含む

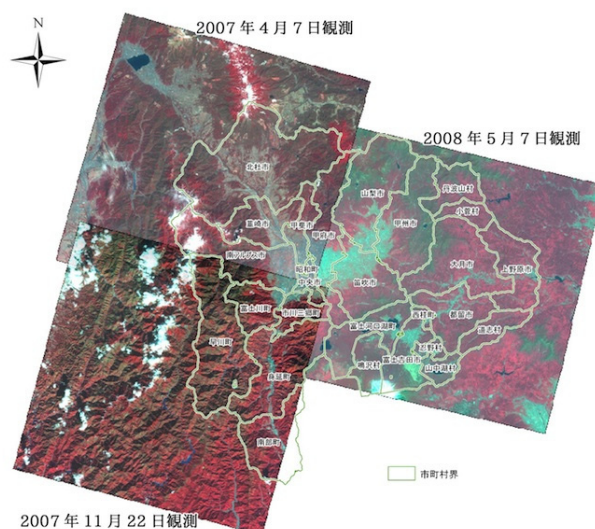
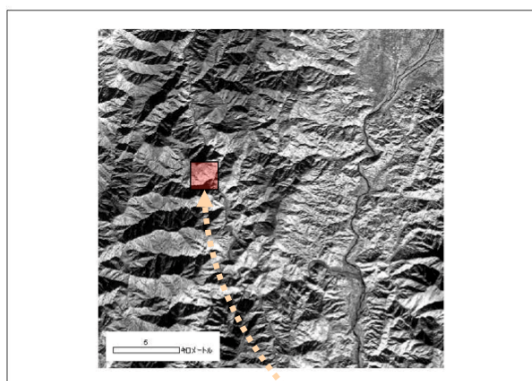
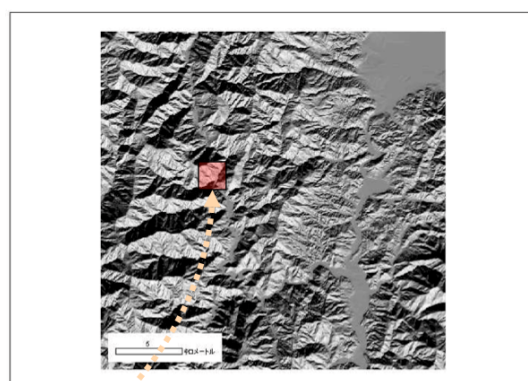


図 I-3 解析に使用した衛星画像の観測範囲

スポット衛星 バンド3濃淡画像  
(近赤外波長帯における反射の強弱)



陰影起伏シミュレート画像  
(衛星観測時の太陽位置を使用)



両画像から数百メートル四方の部分画像を切り出し、陰影起伏画像を基準として、衛星画像を東西南北に平行移動しては画像相関値を求める処理を繰り返し、相関値が最大を示す移動量(ズレ)を決定する。

図 I-4 衛星画像の位置精度評価方法

衛星観測時と同一時刻の太陽位置情報と数値標高モデルを用いることで、衛星観測時の陰影起伏画像をシミュレートし、衛星画像と陰影起伏画像の両画像から数百メートル四方の部分画像を切り出し、陰影起伏画像を基準として衛星画像を東西南北に平行移動しては画像相関値を求める処理を繰り返すことにより、相関値が最大を示す移動量(ズレ)を計量した。その結果、水平面内の位置ズレの平均値は7mの範囲に収まり、RMSによる評価では最大で14m程度

であった。

衛星画像からの林相区分にはオブジェクト指向型の領域分割をベースとした分類方法を採用した。この分類手法では、画像を領域分割して区画を生成する際にスケール(処理単位の大きさ)についてのパラメータ設定が分類精度を左右する。このスケールパラメータ(SP)値ごとに得られた領域分割区画線と衛星画像の目視比較を試み、目標とする森林の面積規模に応じた適切なSP値を見積もった。SPを10か

ら100の範囲で10刻みに変化させながら、領域分割結果の区画数、区画面積を調べた。SPの値と得られた区画線の位置関係の例を、図 I-5（峡北地域）に示した。この図では、領域分割による区画線を確認できるように、約2km四方の範囲を切り出して示した。

この解析の結果、森林管理の基本単位である小班レベルで調査するためには、スケールパラメータを20から30程度の値に設定するのが適当であると見積もることができた。

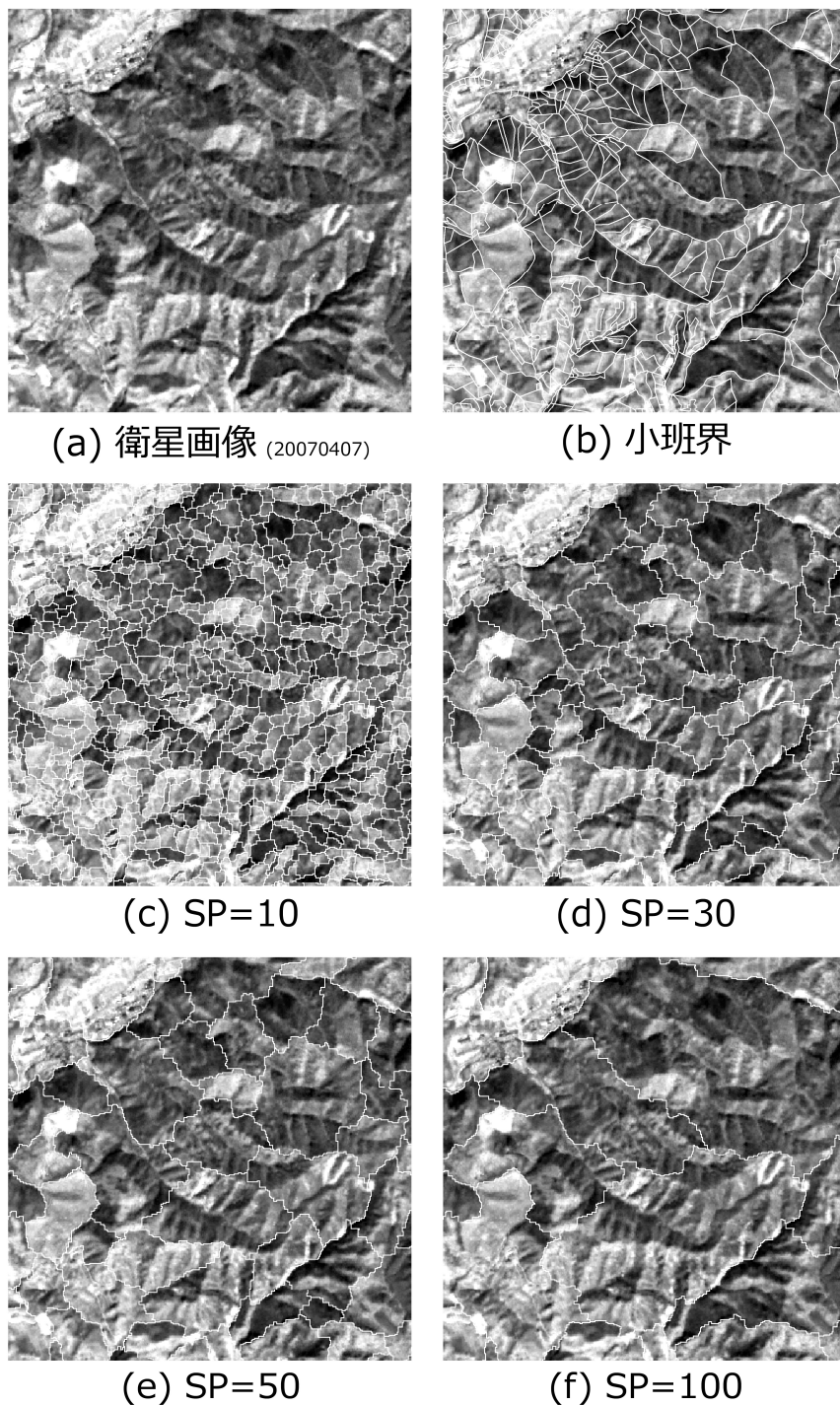


図 I-5 異なるスケールパラメータSPにより領域分割して得られた区画線（峡北地域、2007年4月7日観測）  
（a）衛星画像（バンド3）、（b）小班界、（c）SP=10、（d）SP=30、（e）SP=50、（f）SP=100



図 I -6に、使用した3時期の衛星画像を入力して、スケールパラメータSPと領域分割で生成された区画面積の関係を示す。観測範囲および観測日時が互いに異なり一概に比較することは難しいが、同じ5メートル解像度の衛星画像の入力に対し、生成される区画の大きさの傾向は異なることが読み取れる。

この結果を説明する要因としては、観測対象の地

形の複雑さや、土地利用区画・森林区画の配置と形状、観測時の太陽位置の違いなどが考えられる。このうち、太陽位置の違いによる影響を検証するため、衛星観測時の太陽位置と数値標高モデルを用いて陰影画像をシミュレートし、これを入力データとして、SPと区画面積の関係を調べた結果を図 I -7に示す。

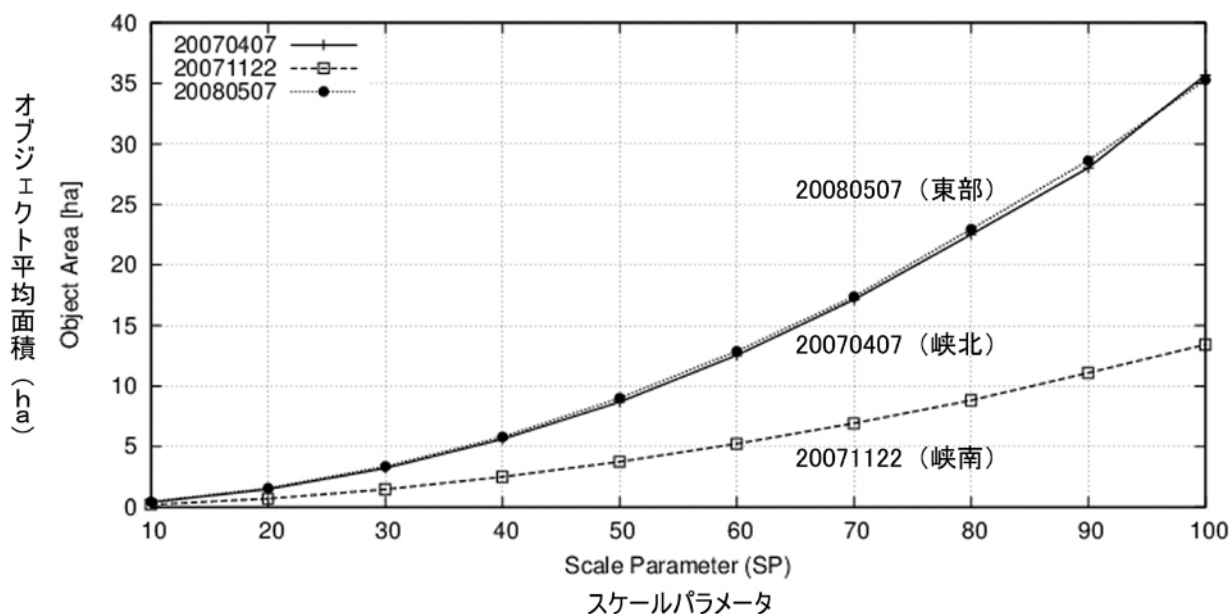


図 I -6 スケールパラメータSPと領域分割により生成されるオブジェクトの平均面積の関係

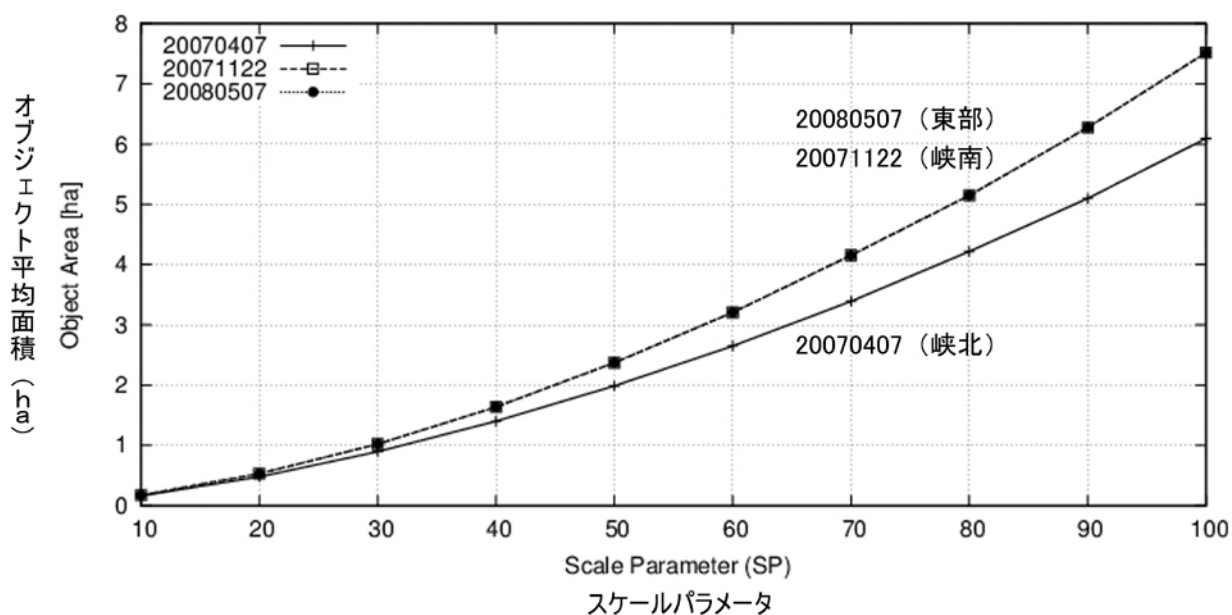


図 I -7 衛星データ観測時の陰影シミュレート画像を入力した場合のスケールパラメータSPと領域分割により生成されるオブジェクトの平均面積の関係

この図から、陰影画像を用いて調べたSPと区画面積の関係は、元の衛星画像を用いた結果に見られた相違に比べ、観測日すなわち太陽高度の違いに影響を受けていないことが示唆され、高解像度衛星画像の解析においては、太陽高度の影響をある程度無視できると考えられる。

衛星画像による樹種区分について検討した結果は以下のとおりである。

上記領域分割結果の区画単位に樹種区分することを考え、スケールパラメータSPの値を30に固定して検討を行った結果を示す。手法としては、階層型の樹種区分処理（図 I-8）を採用し、区分の判定基準として使用する特徴量選定に多変量回帰木を用い、処理にはオープンソースの統計解析ソフトRのmvpartパッケージを使用した。

樹種区分を目的変数、領域分割された区画ごとに計量されるパラメータを説明変数として用いた。樹種区分としては、「スギ」「ヒノキ」「アカマツ」「カラマツ」「その他針葉樹」「広葉樹」を設定し、これに「影」と「非森林」の2項目を加えた計8項目を設定した。用いた説明変数は、表 I-2に列挙した通り、合計26個の変数である。

分類ルール決定には、元の衛星画像から25km四方の範囲を切り出したデータを使用した。その後、元の衛星画像全体（約60km四方）の領域分割処理を行い、決定された分類ルールを適用して、林相の分類図を作成した。この方法による樹種区分の結果は、分類ルールが樹形状に連なった「分類木」として得られるため、分類ルールが明示され解釈しやすいことが利点である。

本研究で使用した3シーンの衛星画像それぞれを入力して得られた樹種区分ルールは、それぞれ異なった分類木として得られた。図 I-9に2008年5月7日観測データ（東部地域）から求められた階層的な樹種区分ルール（分類木）を示す。

本研究で使用した3時期の衛星画像それぞれから得られた樹種区分ルールは、それぞれ異なった分類木になっており、入力した26個の指標のうち実際に分類ルールに採用された説明変数は4個から5個であった。「影」および「非森林」が最初に安定して区分され、その後に森林区画が類別される分類構造は共通していた。展葉前に相当する4月の衛星画像に対する結果からは、常緑樹・落葉樹の区分に相当する分類構造も得られた。また、峡北地域（4月観測）および東部地域（5月観測）から求めた分類木には、説明変数として「相関」、「異質性」、「角2次モーメント」というGLCM特有のテクスチャ特徴量が組み込まれ、オブジェクト指向型の利点が生かされる結果が得られた。

以上の結果をもとに、森林の林相特徴量パラメータ、区画形状パラメータの組み合わせ選択を適切に行うことにより、SPOT-5衛星画像からの林相判別方法を取りまとめた。図 I-9に階層的な樹種区分ルール（分類木）の一例を示し、図 I-10に樹種区分結果を示す。

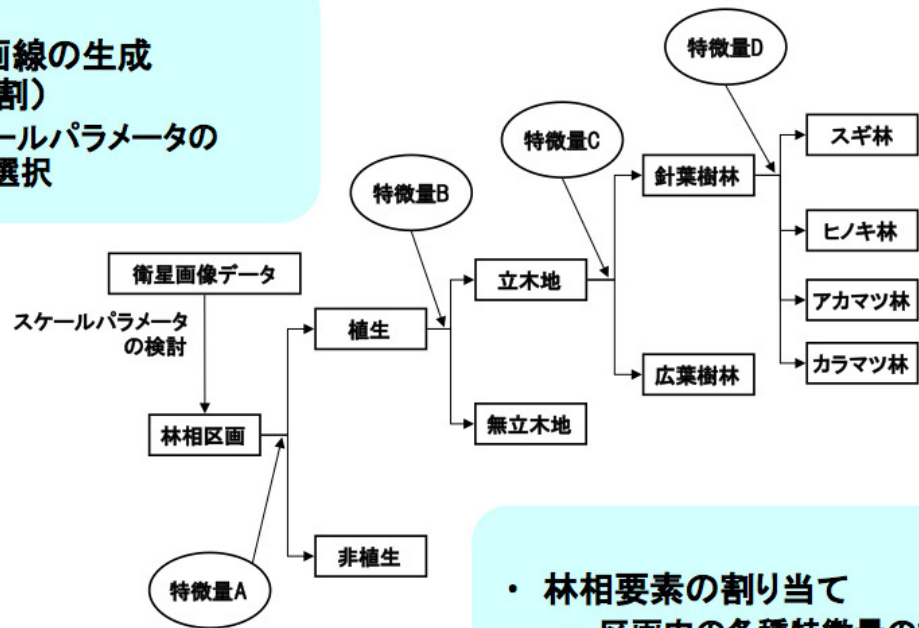
以上の結果をふまえ、森林の林相特徴量パラメータ、区画形状パラメータの組み合わせ選択を適切に行うことにより、高解像度衛星画像からの林相判別が可能になると期待される。

表 I-2 樹種分類の説明変数

説明変数	バンド	記号
全バンドの輝度総和 (brightness)	—	Br
均質性 (homogeneity)	1	Homo1
	2	Homo2
	3	Homo3
コントラスト (contrast)	1	Cont1
	2	Cont2
	3	Cont3
異質性 (dissimilarity)	1	Diss1
	2	Diss2
	3	Diss3
エントロピー (entropy)	1	Entr1
	2	Entr2
	3	Entr3
角2次モーメント (angular second moment)	1	ASM1
	2	ASM2
	3	ASM3
平均 (mean)	1	Mean1
	2	Mean2
	3	Mean3
標準偏差 (standard deviation)	1	SD1
	2	SD2
	3	SD3
相関 (correlation)	1	Corr1
	2	Corr2
	3	Corr3
植生指数 (NDVI) $NDVI = (Mean3 - Mean2) / (Mean3 + Mean2)$	—	NDVI



- ・ 林相区画線の生成  
(領域分割)
  - スケールパラメータの適値選択



- ・ 林相要素の割り当て
  - 区画内の各種特徴量の計算
  - 樹種に関する特徴量の決定

図 I-8 階層型の樹種区分処理の流れ

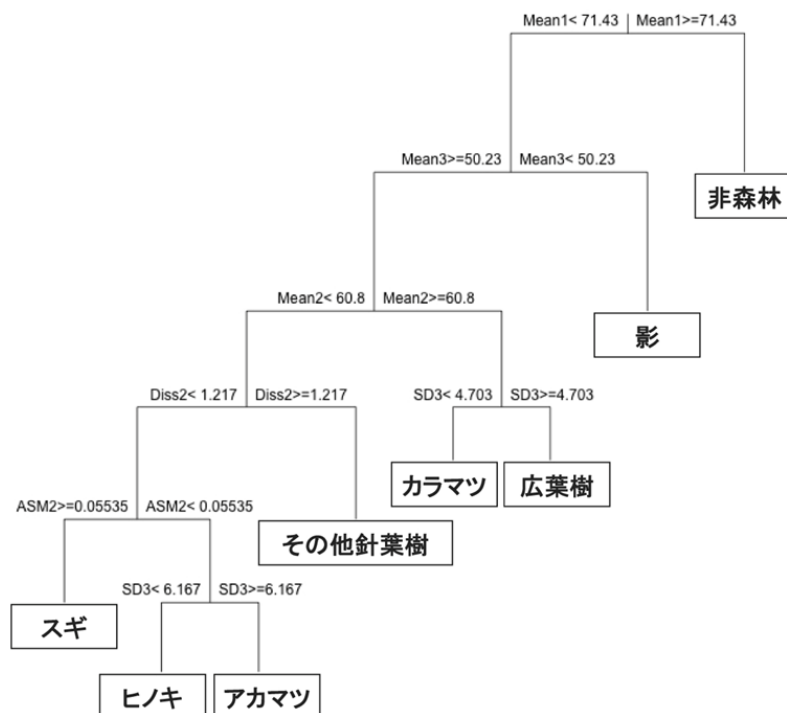


図 I-9 多変量回帰木により決定された階層的な樹種区分ルールの一例：2008年5月7日観測データ（東部地域）の分類木

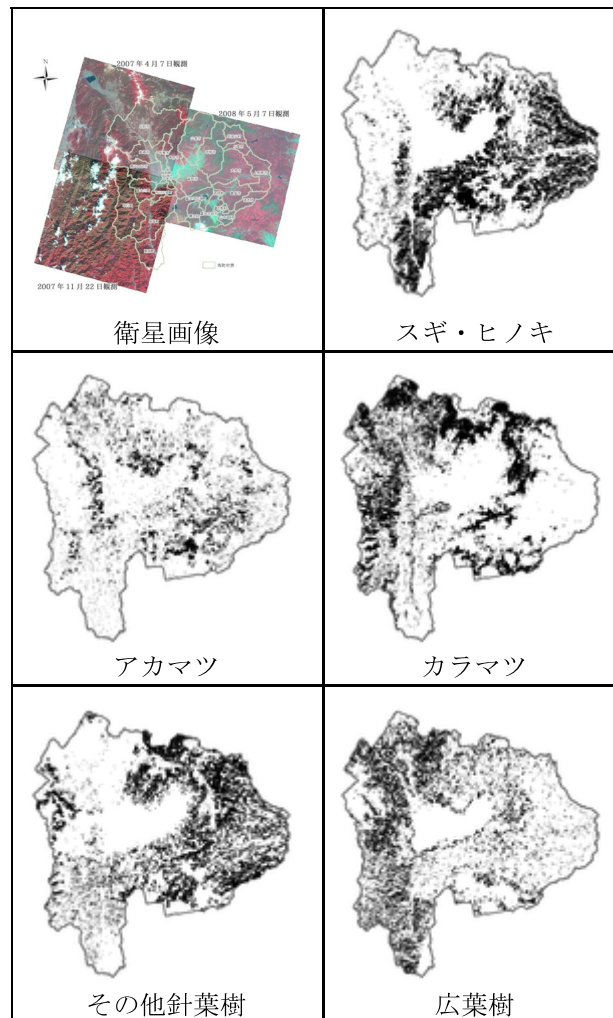


図 I-10 SPOT-5（スポット5）号衛星データを用いた樹種区分結果

# 本 編

## Ⅱ 研究成果報告

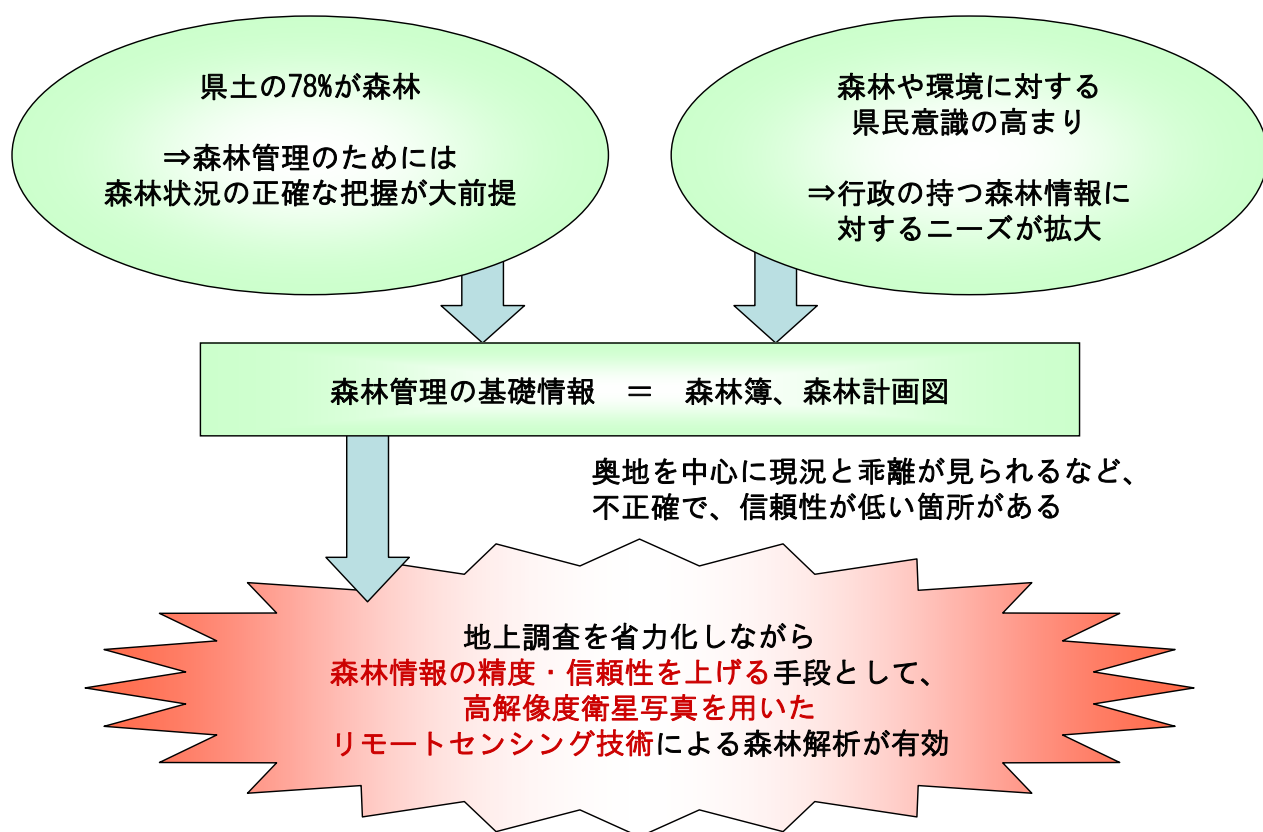
### Ⅱ- 1 研究目的

本県のような森林県にとって、森林を健全な状態に維持するために不可欠な情報を効率的に収集・利用するための基盤技術を手に入れることは重要である。例えば地球温暖化の防止においては森林整備による森林吸収源対策を着実に進める必要があり、森林の状況を正確に把握することはその大前提となる。また、森林や環境に対する県民の意識が高まるとともに、都市住民を中心に森林ボランティアやNPOが組織され、都市上流地域の森林整備を行うといった動きもあり、行政の持つ森林情報に対するニーズが増えてきている。県が管理する森林簿や森林計画図は森林行政に関する基礎資料であるが、奥地を中心に現況との乖離が見られる箇所もあるため、精度向上は喫緊の課題である。

一方、公務員制度改革など行政の効率化が進められている中で、森林行政も今後は一層業務の効率化を進められることが予想されており、森林情報の精度を上げつつ業務を効率化する手段として、高解像度衛星画像を用いたリモートセンシング技術による森林解析が有効であると考えられる（図Ⅱ-1）

本研究に関連する過去の研究成果は、次のようにまとめられる。

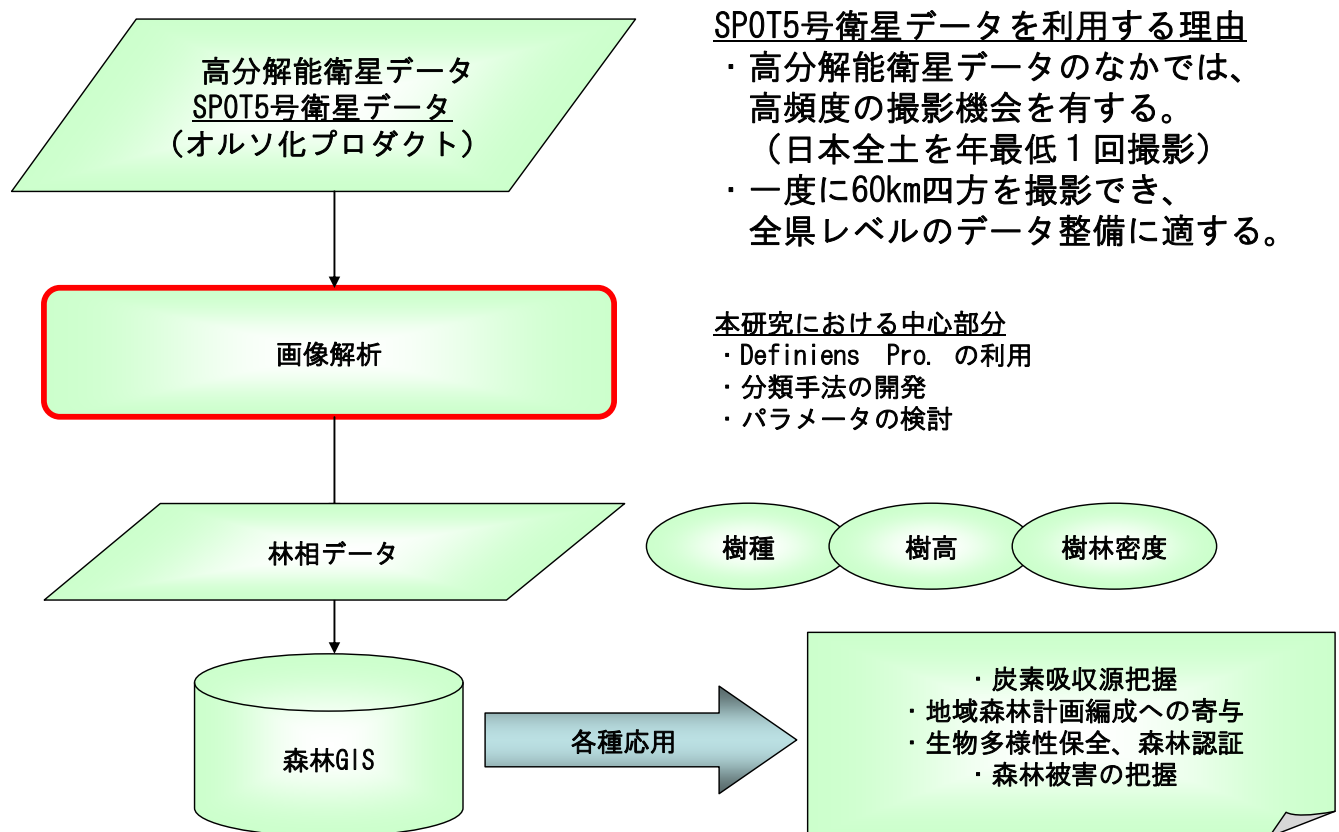
これまでの研究成果として、基盤研究「環境変動把握手法と環境変動モデリングに関する研究」（平成9～14年度）、基盤研究「広域環境調査手法と環境の指数化に関する基礎的研究」（平成9～18年度）では、中分解能（数十メートル分解能）の衛星データの解析手法の開発・整備に取り組み、山梨県全域といった数十キロメートル～100キロメートル四方程度の広範囲の自然環境を人工衛星観測データによりモニタリングする場合、山梨県の険しい地形起伏による衛星データの歪みを取り除き、地形図などに対して正確に精密に位置合わせする手法（衛星画像の高精度オルソ画像化手法）を確立するとともに、地形起伏による陰影の補正に取り組み、実用に足る手法を確立した。このことは、山梨県全域を対象とした衛星データ解析の基盤技術となっている。このほか、プロジェクト研究「富士山周辺における自然特性に関する研究」（平成9～13年度）およびプロジェクト研究「森林による地球温暖化ガスの吸収効率に関する研究」（平成14～17年度）では、ランドサット衛星（30m分解能）およびスポット衛星（10m分解



図Ⅱ-1 研究の背景

能のプロダクト)の観測データを使用して、主に富士山北麓地域の樹種分類などを行い、森林の分布把握の手法について関連する知見を得るとともに、10mの地上分解能は森林の林相判別には不十分であることが確認されている。

そこで本研究では、森林の基礎情報となる森林簿、森林計画図の精度向上を目指し、森林の林相、分布、資源量等といった森林の現況を高解像度衛星画像(数メートル分解能)から把握する手法を確立し、GISデータ化することを目的とする(図Ⅱ-2)。具体的には、高解像度衛星画像データを用いた森林の林相判別手法の確立、森林の分布と資源量把握手法の確立、県内の代表的林相の森林を対象とした森林の現況把握とその評価、森林情報のGISデータ化と既存の森林管理情報との比較を研究目標としている。



図Ⅱ-2 衛星データから森林情報

## Ⅱ- 2 研究成果

本研究では、高分解能の衛星画像データから林相情報を正確に取り出し、分類することが最重要課題のひとつである。これまで衛星画像処理に用いられてきた一般的な画素単位を基本とする画像解析ツールとは異なり、解析対象画像を細かく区画化することで生じるイメージオブジェクトを利用して解析を行う新しいタイプの画像処理ソフトウェアが高分解能衛星画像からの林相判別に有効であることが既往研究でも報告されている（大西ら2005）。イメージオブジェクトが持つ属性（スペクトル、形状、大きさ、テクスチャなどの情報）およびイメージオブジェクトが持つ相互関係から得られる情報を用いて画像解析を行うことにより、従来の一般的な分類よりも複雑な分類を行うことが可能になるほか、林班に特徴的な形状を覚え込ませて分類を支援することで、林班ごとの分類を高度化できる。このような解析は、高い解像度を有する衛星画像を使用して初めて可能となるものである。本研究では林相分類手法の確立のため、分類対象の形状についての情報が利用できるDefiniens Professionalソフトウェアを使用した。

### Ⅱ-2-1 対象範囲および使用衛星データ

対象範囲は、山梨県全域（4,465km<sup>2</sup>）である（図の山梨県境界線の範囲）。総面積に占める森林面積（3,481km<sup>2</sup>）の割合は78%となっている。

本研究では高解像度衛星データとして、SPOT-5（スポット5号）衛星観測データを基に画素サイズ5m相当でオルソ幾何補正処理が施されたカラー画像データプロダクト（SPOTView Ortho）を用いた。使用したSPOT-5衛星の諸元を表Ⅱ-1に示す。

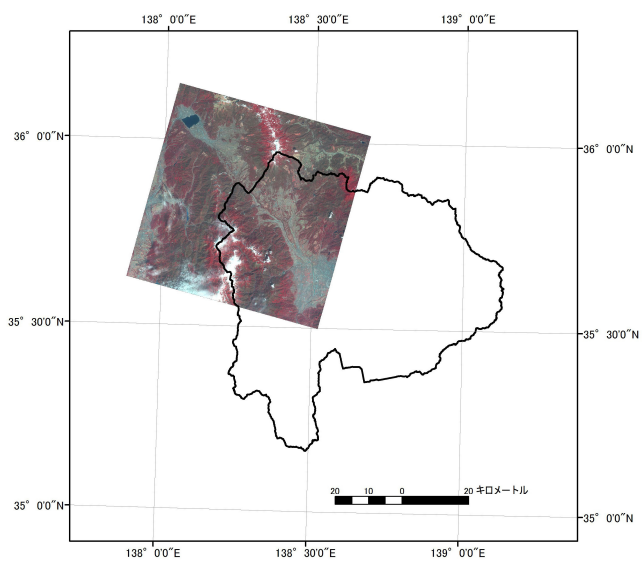
表Ⅱ-1 SPOT-5（スポット5号）衛星の諸元

打上年	2002年5月
打上国	フランス
観測波長帯と分解能	P（パנקロ）（緑～赤）： 0.48-0.71 $\mu$ m（分解能5m）
	Band1（緑）： 0.50-0.59 $\mu$ m（分解能10m）
	Band2（赤）： 0.61-0.68 $\mu$ m（分解能10m）
	Band3（近赤外）： 0.78-0.89 $\mu$ m（分解能10m）
	Band4（中間赤外）： 1.58-1.75 $\mu$ m（分解能20m）
観測幅	60km
衛星軌道	太陽同期極軌道
高度（赤道上）	822 km
軌道周回時間	101.4分
軌道回帰時間	26日

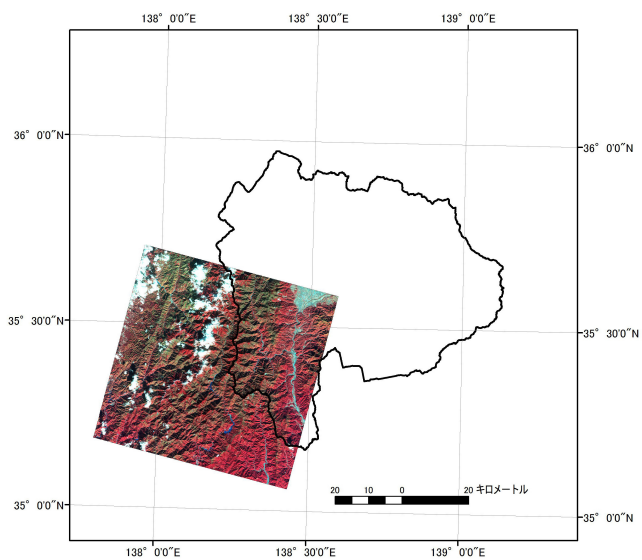
本研究で使用した衛星画像の観測日は、表Ⅱ-2に示した通り、2007年4月7日（峡北地域をカバー、図Ⅱ-3）、2007年11月22日（峡南地域、図Ⅱ-4）、および2008年5月7日（東部地域、図Ⅱ-5）の3シーンである。これら3シーンのSPOT-5衛星画像で、山梨県全域をほぼ覆うことができる（図Ⅱ-6）。

表Ⅱ- 2 使用したSPOT-5衛星データと観測時の太陽位置

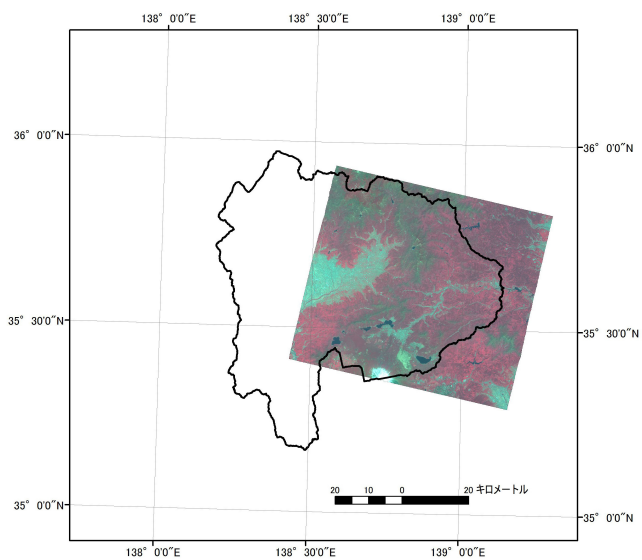
名称	観測日	観測時の太陽高度 （地平線：0度、真上90度）	観測時の太陽方位角 （東：90度、南180度）
峡北地域	2007年 4月7日	56.4	146.9
峡南地域	2007年 11月22日	32.9	162.7
東部地域	2008年 5月7日	63.8	130.3



図Ⅱ-3 SPOT-5衛星データの観測範囲  
(2007年4月7日観測)



図Ⅱ-4 SPOT-5衛星データの観測範囲  
(2007年11月22日観測)



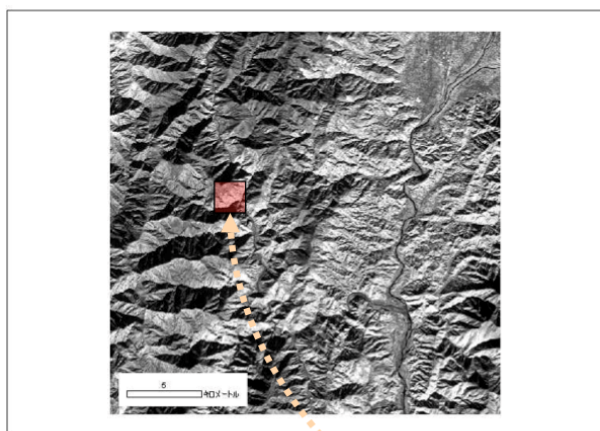
図Ⅱ-5 SPOT-5衛星データの観測範囲  
(2008年5月7日観測)



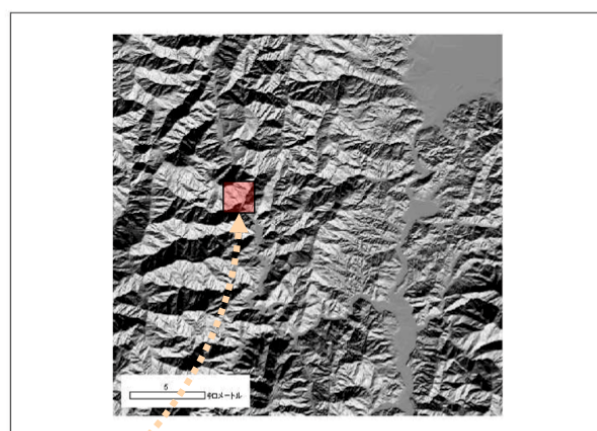




スポット衛星 バンド3濃淡画像  
(近赤外波長帯における反射の強弱)



陰影起伏シミュレート画像  
(衛星観測時の太陽位置を使用)



両画像から数百メートル四方の部分画像を切り出し、陰影起伏画像を基準として、衛星画像を東西南北に平行移動しては画像相関値を求める処理を繰り返し、相関値が最大を示す移動量(ズレ)を決定する。

図Ⅱ-7 衛星画像の位置精度評価方法

表Ⅱ-3 位置精度評価結果

名称	観測日	評価 地点数	平均 [m]			RMS [m]		
			東西方向	南北方向	全体	東西方向	南北方向	全体
峡北地域	2007年 4月7日	91	5.6	-1.4	5.8	8.3	9.2	12.4
峡南地域	2007年 11月22日	208	2.4	-2.4	3.4	5.7	7.7	9.6
東部地域	2008年 5月7日	85	0.1	-6.8	6.8	9.4	10.1	13.8

### Ⅱ-2-3 衛星画像分割のスケールパラメータの検討

本研究では、衛星画像からの林相区分にオブジェクト指向型の領域分割をベースとした分類方法を採用した。オブジェクト指向の分類処理機能を有する代表的な解析ソフトDefiniens Professional Ver.5.0 (旧称 eCognition, Definiens Imaging社、ドイツ)を用いて、画素サイズ5mのSPOT5衛星データの林相区分の可能性を検討した。

このDefiniensソフトウェアは、「画像を分類するのに必要かつ重要な情報は、単一の画素からではなく、イメージオブジェクトとそれらの相互関係によって得られる」という概念に基づいて開発された、オブジェクト指向のマルチスケール画像分類

ツールである。Definiensソフトウェアは、まず森林と非森林に分類した上で、森林と分類されたオブジェクトをさらに針葉樹と広葉樹に分類する、というような階層構造を持たせた分類機能を有するため、森林域の系統立った分類も実現可能である(大西ら2005)。

従来から利用されているランドサット(Landsat)やスポット(SPOT)1~4号などの衛星データは空間分解能が20~30mであり、画素ベースでの解析が行われていた。近年、イコノス(IKONOS)のような高い空間分解能を有する衛星データに対しては画素ベースでの解析には限界があるとされ、新しい画像分類法の検討がなされている。

従来の衛星画像の分類では、それぞれの地点での地表面の光の反射の特性を用いて土地被覆の分類が行われてきた。これに対してオブジェクト指向型分類では、周囲の地点との光の反射の特性の類似性を加味して分類が行われる。これにより、土地被覆が同一とみなされる領域を分割して土地被覆分類図を作成することができる。

本研究で使用したDefiniensソフトウェアにおける領域分割の過程では、あるオブジェクト（グループ化した画素を意味する）を隣接したオブジェクトと統合するかどうか判断するための異質性の指標（fusion value:  $f$ ）が用いられている（Navulur 2006）。この指標  $f$  は、色調に関する基準（color criterion:  $h_{color}$ ）と形状に関する基準（shape criterion:  $h_{shape}$ ）の重み付け線形和として、以下のように算出される。

$$f = w \cdot h_{color} + (1 - w) \cdot h_{shape} \quad (1)$$

ここで、 $w$  ( $0 \leq w \leq 1$ ) は形状に対する重みである。さらに、形状に関する因子はcompactness基準 ( $h_{compact}$ ) とsmoothness基準 ( $h_{smooth}$ ) の重み付け線形和として以下のように算出される。

$$h_{shape} = w_{compact} \cdot h_{compact} + (1 - w_{compact}) \cdot h_{smooth} \quad (2)$$

ここで、 $w_{compact}$  ( $0 \leq w_{compact} \leq 1$ ) はcompactnessに対する重みである。

色調に関する指標colorは、輝度値の標準偏差にレイヤー（観測バンド）ごとの重み付けを乗算した合計により評価される。形状に関する異質性のうちcompactnessは周囲長とオブジェクトサイズ（オブジェクトを構成する画素数）の平方根の比から求められ、smoothnessはオブジェクトの周囲長と短辺の長さの比から求められる。

ある2つのオブジェクトを統合する場合、色調および形状に関する異質性因子（color, compactness, smoothness）のそれぞれについて、オブジェクトサイズを考慮して合計した統合前の評価値と、統合後のオブジェクトの評価値の差をとったものが異質性評価の3つの基準因子、すなわち、色調に関する基準  $h_{color}$ 、形状に関する基準  $h_{compact}$  および  $h_{smooth}$  となる。これら3つの因子  $h_{color}$ 、 $h_{compact}$  および  $h_{smooth}$  を(1)式と(2)式に代入することにより、異質性指標  $f$  が算出される。

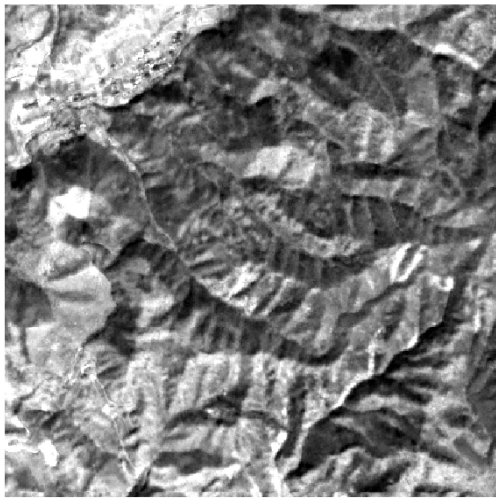
Definiensでは、領域分割に必要なパラメータとして、各観測バンドの重み、色調と形状の重み配分、compactnessとsmoothnessの重み配分のほかにスケールパラメータ（scale parameter: SP）という重要な

パラメータが存在する。SP は上記の異質性指標  $f$  と関係しており、 $f$  とSPの二乗が比較され、オブジェクト統合の是非が決定される。SPの大きさは全体のオブジェクトサイズと間接的に関係している。一般にSPを小さく設定すると異質性の許容範囲が狭まり画像をより細かく分割する結果となり、SPを大きく設定すると領域統合の許容範囲が大きくなり、得られるオブジェクトサイズは大きくなる。また、(1)式で表されるように、色調と形状のどちらかを重視することにより、オブジェクトの形状が変わってくる。一般に、形状に重みをおくとオブジェクトは丸みを帯びた形状に近づき、輝度値に重みをおくと入り組んだ複雑なオブジェクトが生成されやすくなる。

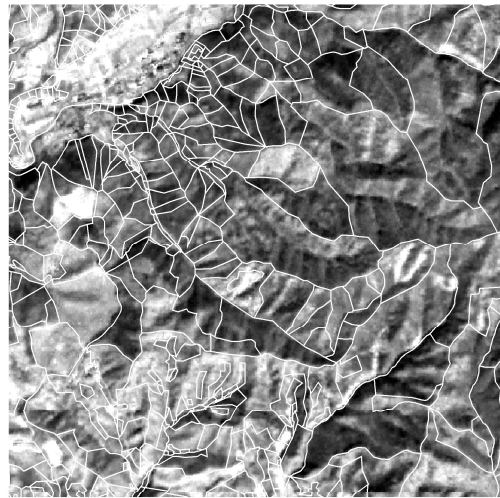
オブジェクト指向型の分類方法では、領域分割の良否はその後の作業に大きく影響し、領域分割で不適切な区画線が生成されると、その後の分類精度を低下させる要因になる可能性がある。このため、画像を領域分割して区画を生成する際に、スケール（処理単位の大きさ）についてのパラメータSPを適切に設定することが必須である。

前述した通り、SPとは各領域内の画素値の標準偏差と領域の形状因子にそれぞれ重み付けを行った上で合計し、この値を基準として領域統合の判定を行う閾値である。既往研究の中には、分解能1mのIKONOS衛星データの林相区分を検討した結果、SPの値によって分類精度が変動し、適切なSP設定により従来型の画素ベースの分類よりも高い分類精度を示す報告（大西ら 2004）もある。適切なSP値を探索することは、衛星データからの林相区分において、重要なステップである。このため、スケールパラメータSPの設定値ごとに得られた領域分割区画線と衛星画像の比較を試み、目標とする森林の面積規模に応じた適切なSP値を見積もった。具体的には、SPを10から100の範囲で10刻みに変化させながら、領域分割結果の区画数、区画面積を調べた。このとき、色調基準colorと形状基準shapeの比率配分は0.5:0.5 ( $w=0.5$ ) とし、shapeの2つの因子であるsmoothnessとcompactnessについても、それぞれ0.5ずつの重み ( $w_{compact}=0.5$ ) とした。

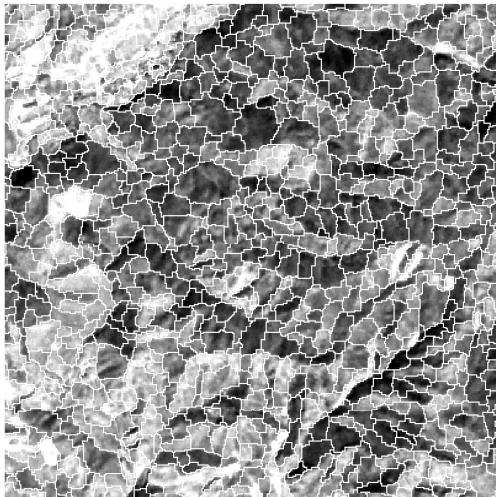
スケールパラメータSPを10から100の範囲で10刻みに変化させたとき、SPの値と得られた区画線の位置関係の例を、図Ⅱ-8（峡北地域）、図Ⅱ-9（峡南地域）、および図Ⅱ-10（東部地域）に示した。



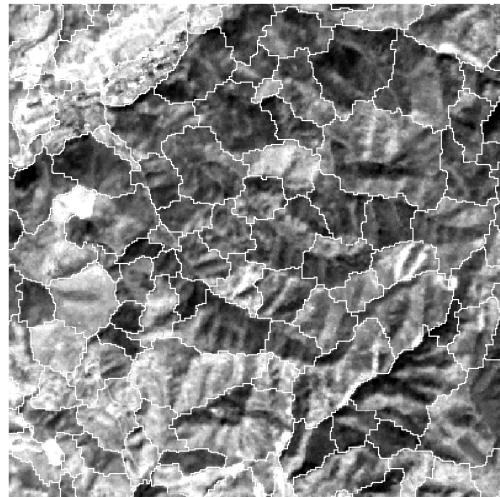
(a) 衛星画像 (20070407)



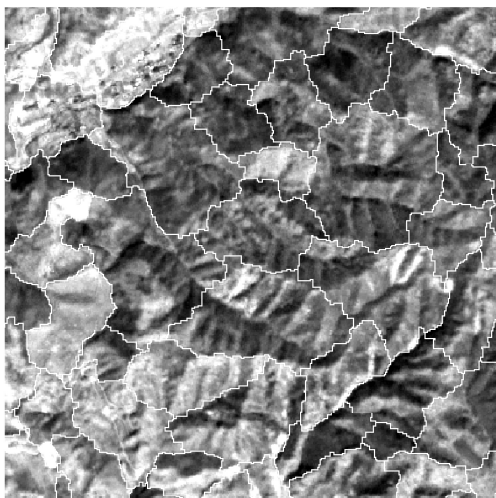
(b) 小班界



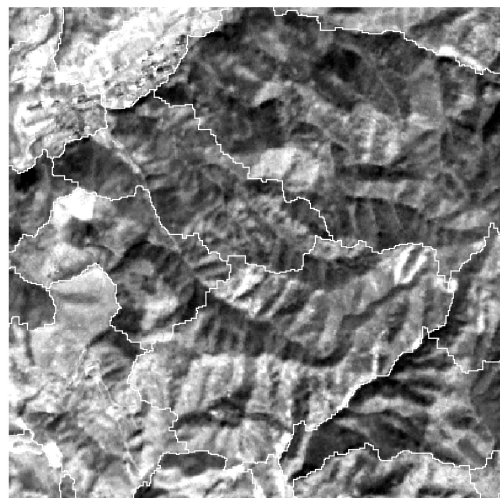
(c) SP=10



(d) SP=30

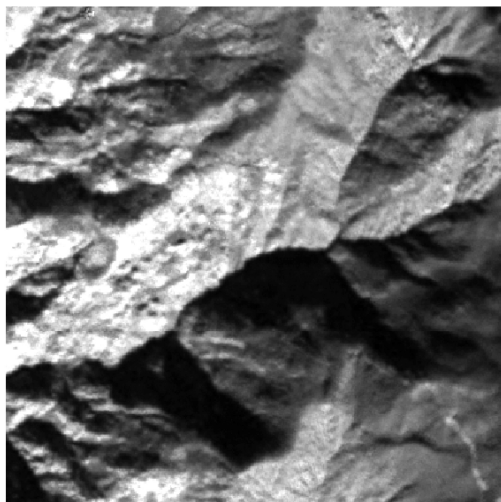


(e) SP=50

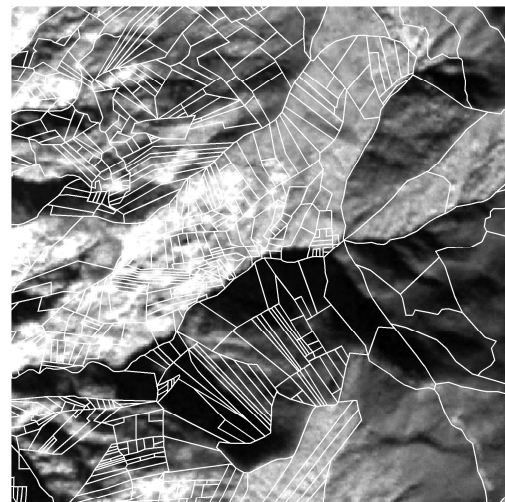


(f) SP=100

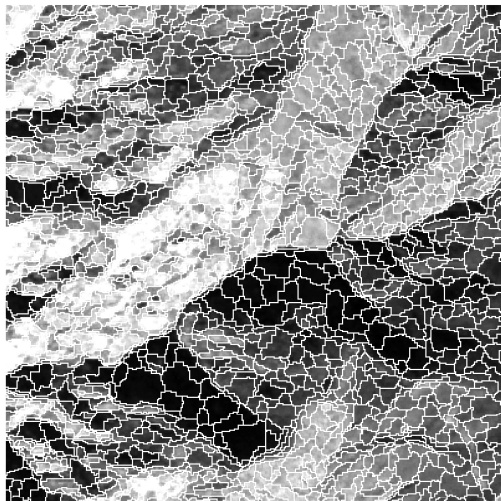
図Ⅱ-8 異なるスケールパラメータSPにより領域分割して得られた区画線（峡北地域、2007年4月7日観測）  
 (a) 衛星画像（バンド3）、(b) 小班界、(c) SP=10、(d) SP=30、(e) SP=50、(f) SP=100



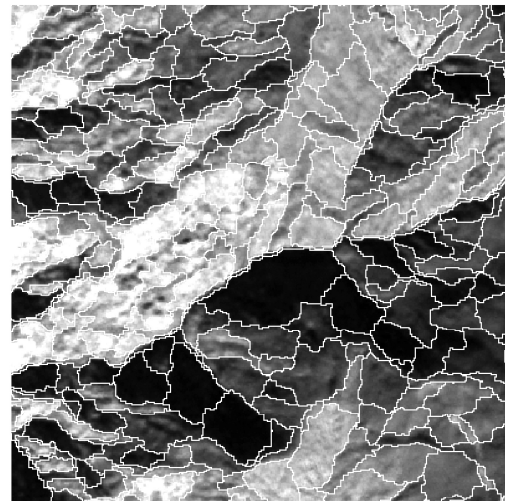
(a) 衛星画像 (20071122)



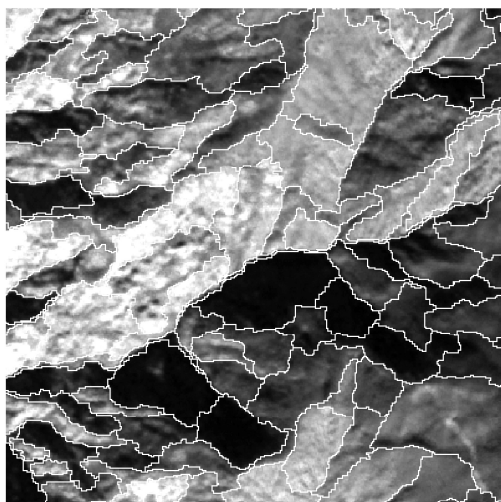
(b) 小班界



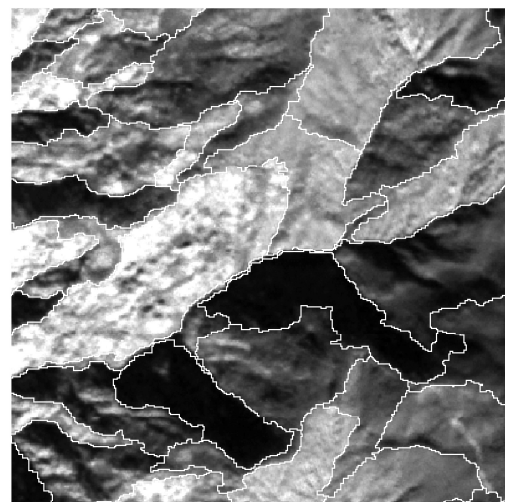
(c) SP=10



(d) SP=30



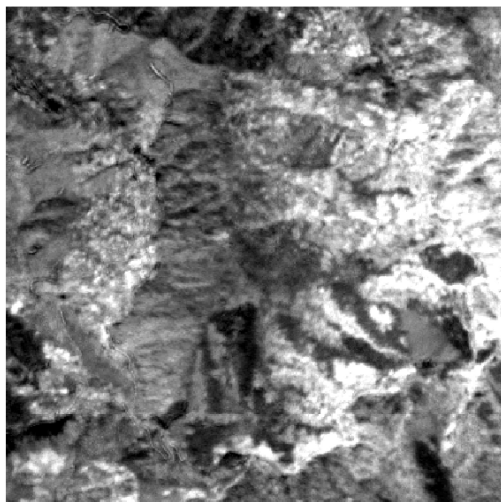
(e) SP=50



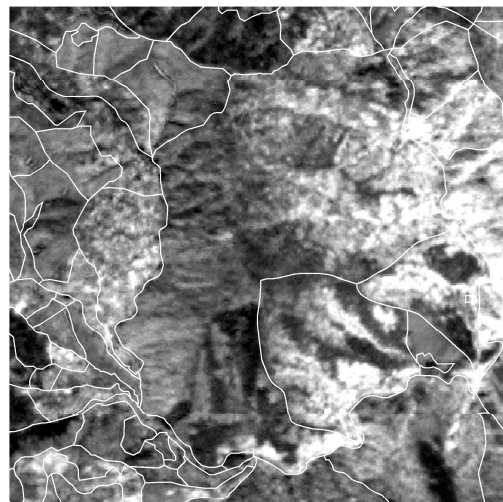
(f) SP=100

図Ⅱ-9 異なるスケールパラメータSPにより領域分割して得られた区画線（峡南地域、2007年11月22日観測）  
 (a) 衛星画像（バンド3）、(b) 小班界、(c) SP=10、(d) SP=30、(e) SP=50、(f) SP=100

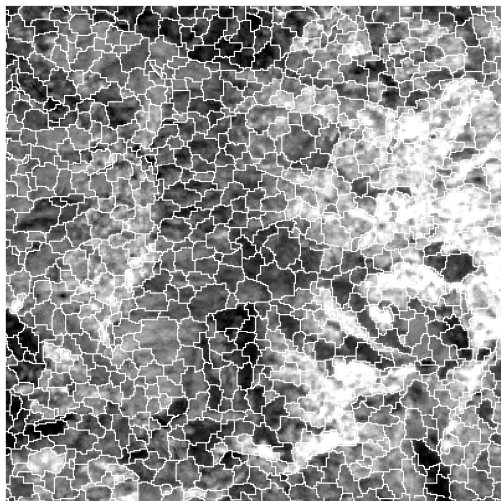




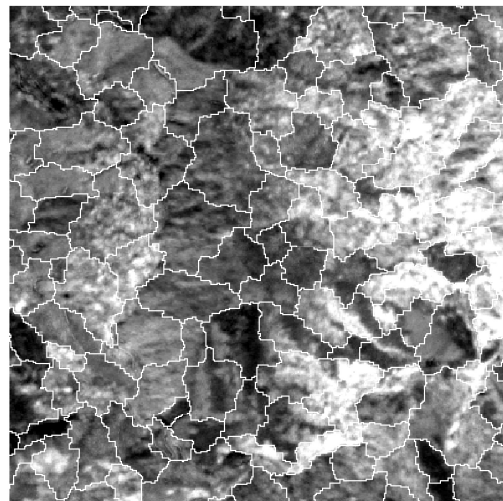
(a) 衛星画像 (20080507)



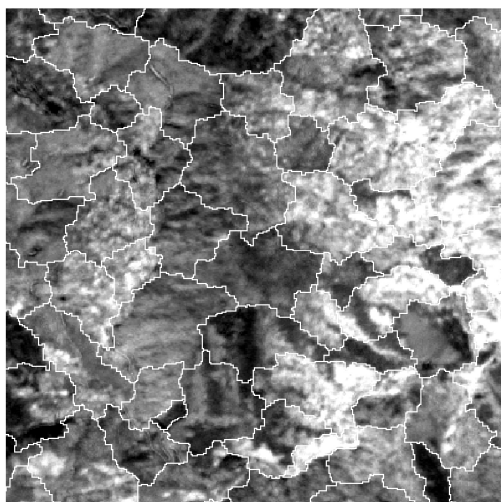
(b) 小班界



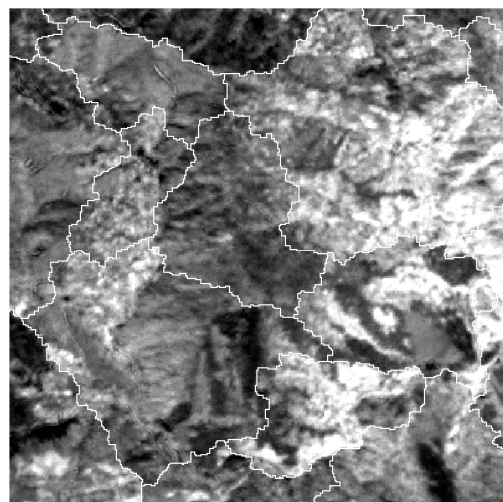
(c) SP=10



(d) SP=30



(e) SP=50



(f) SP=100

図Ⅱ-10 異なるスケールパラメータSPにより領域分割して得られた区画線（東部地域、2008年5月7日観測）  
 (a) 衛星画像（バンド3）、(b) 小班界、(c) SP=10、(d) SP=30、(e) SP=50、(f) SP=100

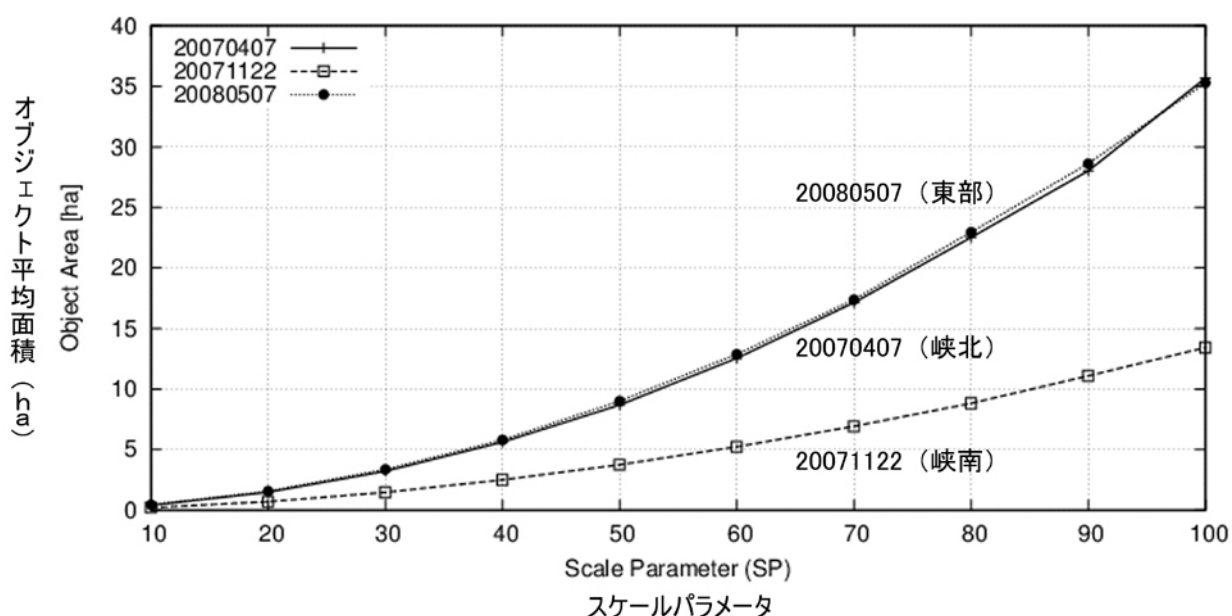
これらの図では、領域分割による区画線を確認できるように、峡北地域（図Ⅱ-3）、峡南地域（図Ⅱ-4）、東部地域（図Ⅱ-5）からそれぞれ約2km四方の範囲を切り出して示した。

領域分割の結果は、設定したどのスケールパラメータSPにおいても、森林計画図の林相区分とうまく整合することはなかった。しかし、目視で判読できるような林相の境界線は領域分割処理で発生させることができた。また、Definiensによる領域分割ではパッチ状に林相が区分されるのに対し、従来型の画素ベースの教師付き分類では粒子状の区分となり、林相単位での把握が困難である。Definiensによる領域分割では、林相をパッチとして把握することが容易であるために、林相の境界線をトレースすることが可能であり、林相区分の前段処理に適してい

ると言える。

使用した3シーンの衛星画像を入力して、スケールパラメータSPと領域分割で生成された区画（オブジェクト）平均面積の関係を図Ⅱ-11のグラフに示した。

これに対し、森林GISの小班の面積統計量を調べたところ、県有林では平均5.2ha、中央値（メディアン）2.6ha、民有林では平均0.6ha、中央値0.2ha、全体では平均0.9ha、中央値0.2haであった（表Ⅱ-4）。小班面積を図Ⅱ-11と比較すると、全体あるいは民有林については1haに満たない小班が大半であり、スケールパラメータSP=10～20程度が対応するのに対し、県有林については、2～5haの面積の小班が多数で、SPを30～40程度に設定するのが適当であると考えられる。また、図Ⅱ-8～図Ⅱ-10から、小班



図Ⅱ-11 スケールパラメータSPと領域分割により生成されるオブジェクトの平均面積の関係

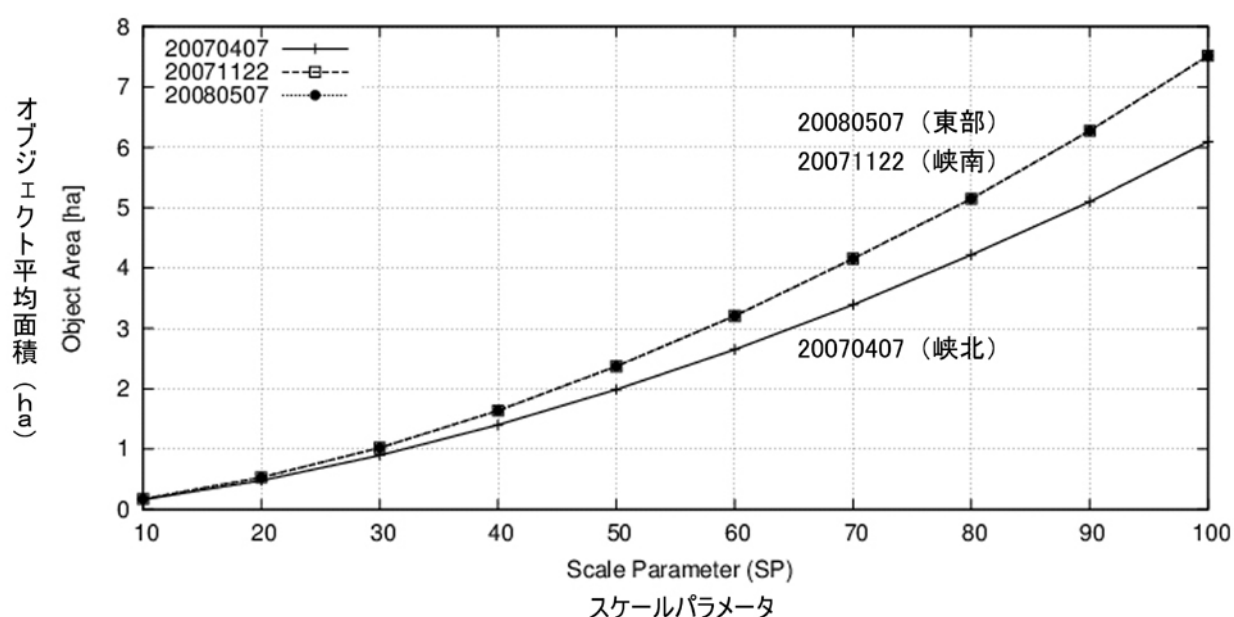
表Ⅱ-4 森林GISデータにおける林班面積（ha）

	最小	25%点	中央値	平均	最大
林班	(0)	46.2	80.4	101.4	801.9
準林班	(0)	1.1	3.1	8.3	527.4
小班	(0)	0.1	0.2	0.9	527.4
	県有林 (0)	1.1	2.6	5.2	527.4
	民有林 (0)	0.1	0.2	0.6	384.1

のポリゴンと区画線の整合性、あるいは衛星画像から判読される林相パッチと区画線の整合性が良いのは、SP=30程度と見積もることが出来た。

また図Ⅱ-11から、観測範囲および観測日時が互いに異なり一概に比較することは難しいが、同じ5m解像度の衛星画像の入力に対し、生成される区画の大きさの傾向は異なることも読み取れる。つまり、峡南地域（11月観測）では峡北地域（4月観測）および東部地域（5月観測）に比べ、同じスケールパラメータSPに対して生成される領域の面積が小さい。この

結果を説明する要因としては、観測対象の地形の複雑さや、土地利用区画・森林区画の配置と形状、観測時の太陽位置の違いなどが考えられる。このうち、太陽位置の違いによる影響を検証するため、衛星データ観測時の太陽位置（表Ⅱ-2参照）と数値標高モデルを用いて陰影画像をシミュレートし、これを入力データとしてスケールパラメータSPと領域分割処理で生成される区画の平均面積の関係を調べた結果を図Ⅱ-12に示す。



図Ⅱ-12 衛星データ観測時の陰影シミュレート画像を入力した場合のスケールパラメータSPと領域分割により生成されるオブジェクトの平均面積の関係

この図から、陰影画像を用いて調べたSPと区画面積の関係は、元の衛星画像を用いた結果に見られた相違に比べ、「4月および5月」と「11月」の間の観測日の違い、すなわち太陽高度の違いに影響を受けていないことが示唆された。この結果、高解像度衛星画像の解析においては、太陽高度の影響をある程度無視できると考えられる。

#### Ⅱ-2-4 林相区分の検討

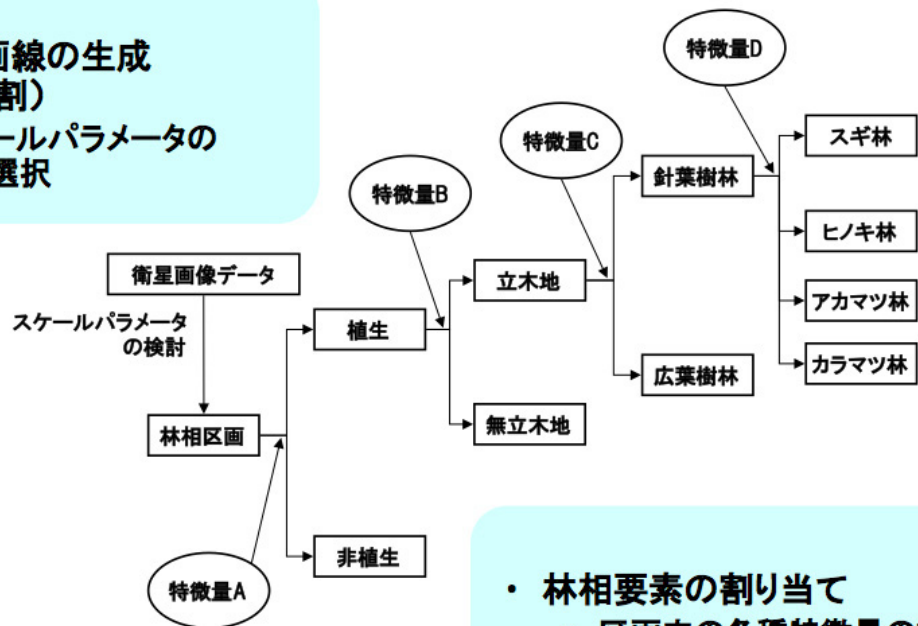
衛星画像からの林相区分について検討した結果は以下の通りである。

上記領域分割結果の区画単位に樹種区分することを考え、スケールパラメータSPの値を30に固定して

検討を行った。手法としては、階層型の樹種区分処理（図Ⅱ-13）を採用した。区分の判定基準として使用する特徴量選定に多変量回帰木を用い、処理にはオープンソースの統計解析ソフトRのmvpartパッケージを使用した。樹種区分を目的変数とし、領域分割された区画ごとに計量されるパラメータを説明変数として用いた。樹種区分としては、図Ⅱ-14に示す通り県内の代表的樹種である「スギ」「ヒノキ」「アカマツ」「カラマツ」の4種に加え「その他針葉樹」「広葉樹」を設定し、これに「影」と「非森林」の2項目を加えた計8項目を設定した。

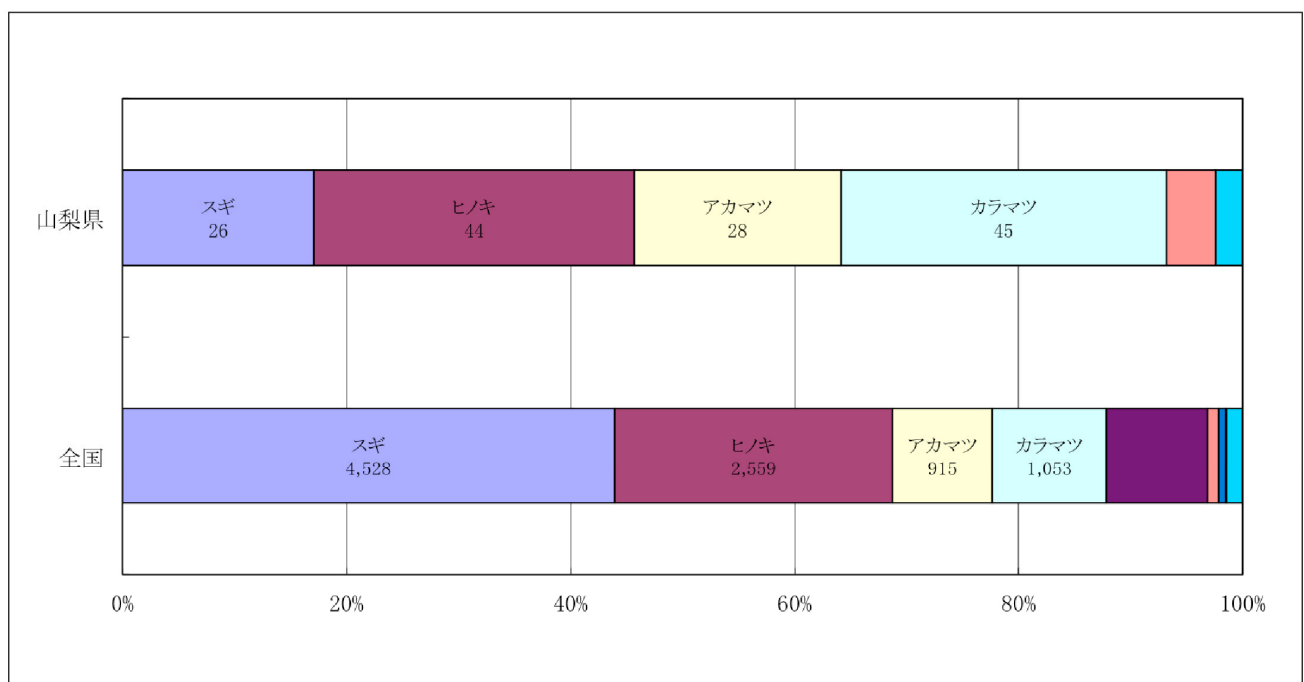
領域分割後の区画ごとに特徴量を計算し、分類ルールの検討を行った。

- ・ 林相区画線の生成  
(領域分割)
  - スケールパラメータの適値選択



- ・ 林相要素の割り当て
  - 区画内の各種特徴量の計算
  - 樹種に関する特徴量の決定

図Ⅱ-13 階層型の樹種区分処理の流れ



図Ⅱ-14 樹種別面積（2000年世界農林業センサス、単位：千ha）



オブジェクト（領域分割された区画）の特徴量のうち、テクスチャ特徴量を統計的に算出する方法は数多く提案されているが、本研究で使用したDefiniensソフトウェアでは、代表的な手法である同時生起行列（Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM）（Haralick et al., 1973, 太田ら 2006）を用いた手法が採用されている。GLCMを用いた手法は、画像の濃度  $i$  の点から一定の変位  $\delta=(r, \theta)$  だけ離れた点の濃度が  $j$  である確率  $P_{\delta}(i, j)$ , ( $i, j = 0, 1, \dots, n-1$ ) を要素とする同時生起行列を求め、その行列から特徴量を計算し、それらの値によってテクスチャを特徴づ

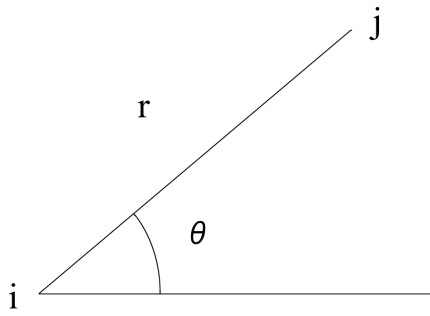


図 II-15 GLCM算出時の2点 ( $i, j$ ) と変位  $\delta=(r, \theta)$  の関係

ける手法である（図 II-15）（高木・下田, 1991）。

GLCMを計算する角度 ( $\theta$ ) は0度、45度、90度、135度の4方向であるが、本研究ではこの4方向それぞれの特徴量を総合した全方位の特徴量を用いた。GLCMから計算される特徴量は十数種類存在し、そのうち本研究では、均質性、コントラスト、異質性、エントロピー、角2次モーメント、平均、標準偏差、相関の8つの特徴量を用いて検討した。これら特徴量の算出方法は、GLCM における  $i$  行  $j$  列の要素を  $P(i, j)$  とした時、以下の式 (3) ～ (10) のように定義される（高木・下田, 1991）。

角2次モーメント (angular second moment)

$$\sum_i \sum_j \{P(i, j)\}^2 \quad (7)$$

平均 (mean)

$$\sum_i \sum_j (i + j) P(i, j) \quad (8)$$

均質性 (homogeneity)

$$\sum_i \sum_j \frac{1}{1 + (i - j)^2} P(i, j) \quad (3)$$

標準偏差 (standard deviation)

$$\sqrt{\sum_i \sum_j (i + j - \text{mean})^2 P(i, j)} \quad (9)$$

コントラスト (contrast)

$$\sum_i \sum_j (i - j)^2 P(i, j) \quad (4)$$

相関 (correlation)

$$\frac{\sum_i \sum_j i \cdot j \cdot P(i, j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (10)$$

異質性 (dissimilarity)

$$\sum_i \sum_j |i - j| P(i, j) \quad (5)$$

ただし

$$\mu_x = \sum_i \sum_j i \cdot P(i, j)$$

$$\mu_y = \sum_i \sum_j j \cdot P(i, j)$$

$$\sigma_x = \sum_i \sum_j (i - \mu_x)^2 P(i, j)$$

$$\sigma_y = \sum_i \sum_j (j - \mu_y)^2 P(i, j)$$

エントロピー (entropy)

$$-\sum_i \sum_j P(i, j) \log P(i, j) \quad (6)$$

このような画像の肌理（きめ）を反映するGLCMテクスチャ特徴量のほか、衛星画像の全バンドの輝度の総和（brightness）および植生指数（NDVI）を加えた。用いた説明変数をまとめると、表Ⅱ-5に列挙した通り、合計26個の変数である。

分類ルール決定には、元の衛星画像から25km四方の範囲を切り出したデータを使用した。その後、元の衛星画像全体（約60km四方）の領域分割処理を行い、決定された分類ルールを適用して、林相の分類図を作成した。この方法による樹種区分の結果は、分類ルールが樹形状に連なった「分類木」として得られるため、分類ルールが明示され解釈しやすいことが利点である。

本研究で利用した3シーンの衛星画像それぞれを入力して得られた樹種区分ルールは、図Ⅱ-16（峡北地域）、図Ⅱ-17（峡南地域）、および図Ⅱ-18（東部地域）に示した通り、それぞれ異なった分類木として得られた。

図から分かる通り、入力した26個の指標のうち実際に森林の区分ルールに採用された説明変数は4個から5個であった。「影」および「非森林」が最初に安定して区分され、その後に森林区画が類別される分類構造は共通していた。展葉前に相当する4月の衛星画像に対する結果からは、常緑樹・落葉樹の区分に相当する分類構造も得られた。また、峡北地域（4月観測）および東部地域（5月観測）から求めた分類木には、説明変数として「相関」、「異質性」、「角2次モーメント」というGLCM特有のテクスチャ特徴量が組み込まれ、オブジェクト指向型の利点が生かされる結果が得られた。

得られた分類ルールを用いて、元の衛星画像の範囲（約60km四方）で林相分類を行った結果を図Ⅱ-19に示す。また、3シーンから得られた分類結果を集成し、山梨県の範囲で切り出した結果を図Ⅱ-20に示した。この図では分類結果との比較のために、現存植生図および森林GISの樹種データを本研究での分類項目に合わせて集約して作成した同様の樹種分類図を併置した。

表Ⅱ-5 樹種分類の説明変数

	バンド	記号
全バンドの輝度総和 (brightness)	--	Br
均質性 (homogeneity)	1	Homo1
	2	Homo2
	3	Homo3
コントラスト (contrast)	1	Cont1
	2	Cont2
	3	Cont3
異質性 (dissimilarity)	1	Diss1
	2	Diss2
	3	Diss3
エントロピー (entropy)	1	Entr1
	2	Entr2
	3	Entr3
角2次モーメント (angular second moment)	1	ASM1
	2	ASM2
	3	ASM3
平均 (mean)	1	Mean1
	2	Mean2
	3	Mean3
標準偏差 (standard deviation)	1	SD1
	2	SD2
	3	SD3
相関 (correlation)	1	Corr1
	2	Corr2
	3	Corr3
植生指数 (NDVI) $NDVI = (Mean3 - Mean2) / (Mean3 + Mean2)$	--	NDVI

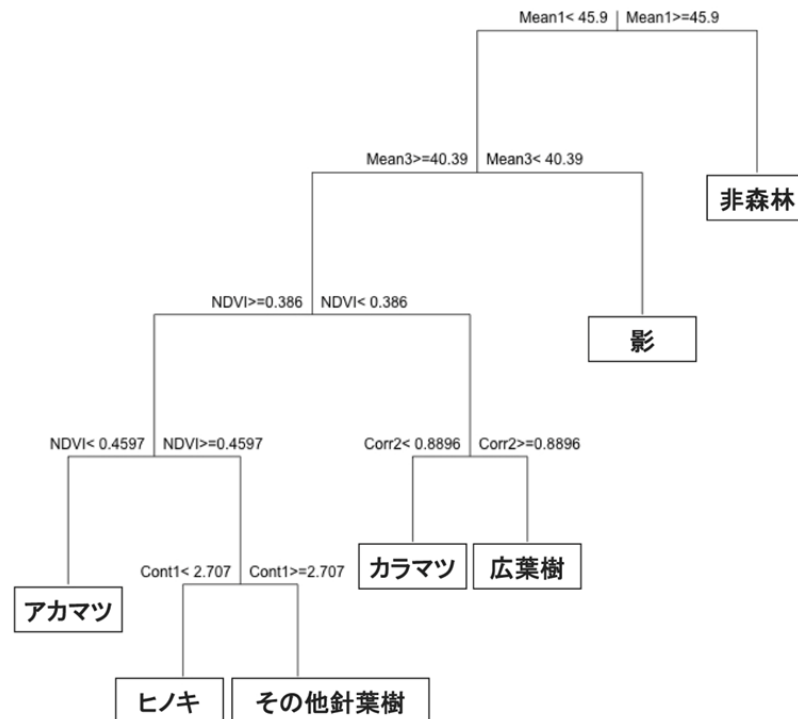


図 II-16 2007年4月7日観測データ（峡北地域）の分類木

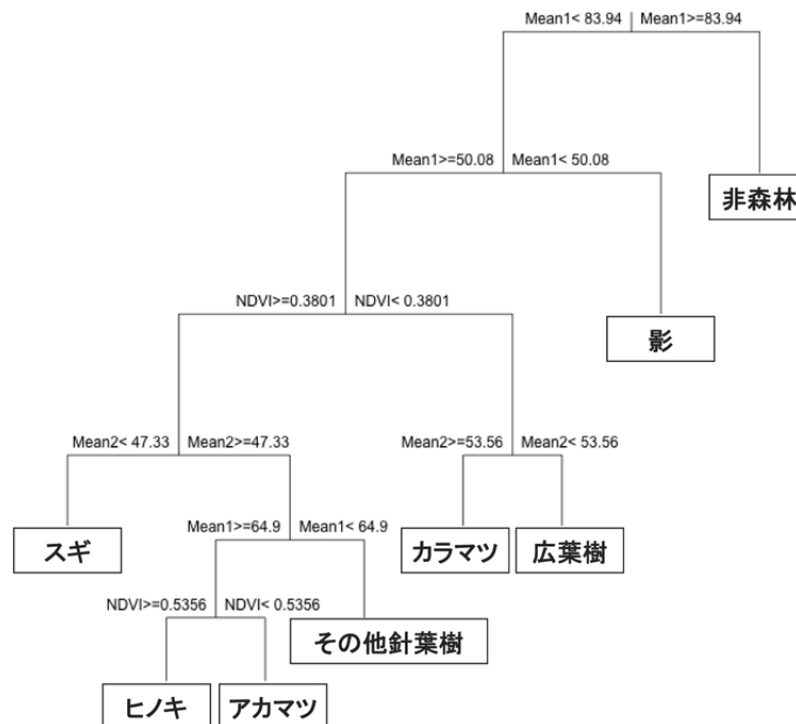


図 II-17 2007年11月22日観測データ（峡南地域）の分類木

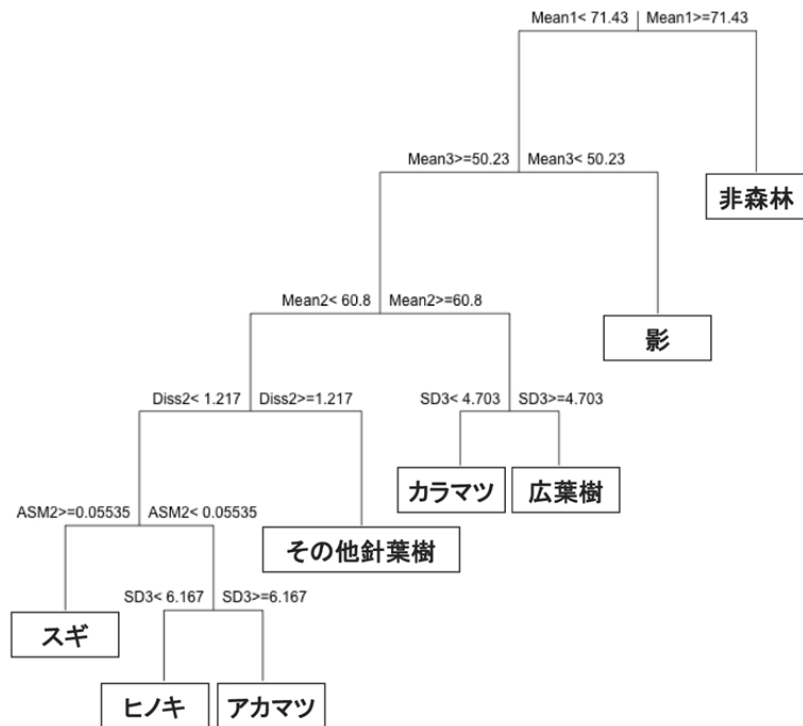

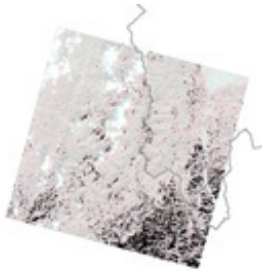

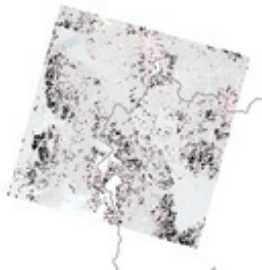


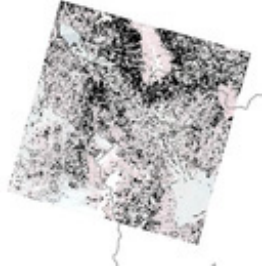
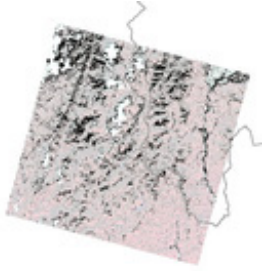
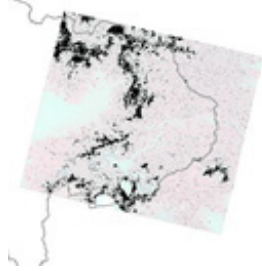
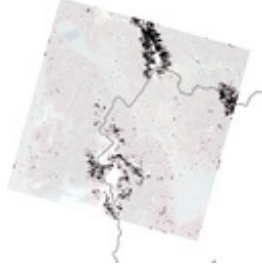



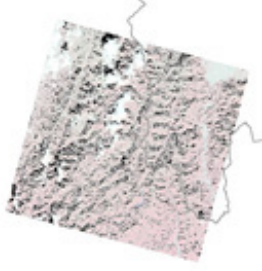


















図 II-18 2008年5月7日観測データ（東部地域）の分類木

	2007年4月7日	2007年11月22日	2008年5月7日
スギ・ヒノキ			
アカマツ			
カラマツ			
その他針葉樹			
広葉樹			

図Ⅱ-19 SPOT-5データから得られた林相分類図

	現存植生図	森林GIS	SPOT-5分類結果
スギ・ヒノキ			
アカマツ			
カラマツ			
その他針葉樹			
広葉樹			

図Ⅱ-20 SPOT-5データの樹種分類結果と現存植生図、森林GISの比較

## II-3 まとめ

本研究では高解像度衛星データとして地上分解能5メートル相当に加工されたSPOT-5（スポット5号）衛星の画像データを用いた。衛星画像からの林相区分にはオブジェクト指向型の領域分割をベースとした分類を行った。この分類手法では、画像を領域分割して区画を生成する際にスケールについてのパラメータ設定が分類精度を左右する。検討の結果、森林管理の基本単位である小班レベルで調査するためには、スケールパラメータSPを20から30程度の値に設定するのが適当であると見積もられた。

次に、スケールパラメータSPの値を30に設定した領域分割結果の区画単位に樹種区分する方法を検討した。手法として階層型の樹種区分処理を採用し、区分の判定基準として使用する特徴量選定に多変量回帰モデルを用いた。用いた説明変数は、衛星データ観測値のオブジェクト内平均や標準偏差のほか、画像の肌理（きめ）を反映するテクスチャ特徴量である「均一性」や「エントロピー」などの合計26個の指標である。使用した3シーン（峡北地域、峡南地域、東部地域）の衛星画像それぞれから得られた樹種区分ルールでは、それぞれ異なっており、実際に分類ルールに採用された説明変数は4個から5個であった。森林の林相特徴量パラメータ、区画形状パラメータの組み合わせ選択を適切に行うことにより、SPOT-5衛星画像を入力して県内の林相を区分し、樹種で分類した画像を作成することができた。

以上の結果をふまえ、森林の林相特徴量パラメータ、区画形状パラメータの組み合わせ選択を適切に行うことにより、高解像度衛星画像からの林相判別が可能になると期待される。

当初計画よりも林相判別手法の検討に時間を要したこと、現地調査や空中写真等を用いて検証用のデータを整えることができなかったことにより、樹種区分結果の精度検証を行うことができなかった。樹種分布の検証材料として、現存植生図や森林計画図の利用も考えられようが、データ整備年代の違いや情報の偏り（民有林、高標高で不確実）の観点から、精度検証への使用が適当ではないと判断した。

林相判別手法確立に遅れがあったこと、得られた森林の林相区分結果について資源量把握の目的にかなう精度を確認できていないことなどの理由により、本研究期間内では着手することができなかったが、林相区分方法の確立を前提条件として、森林の管理単位である林班単位で森林簿などの既存情報との比較から樹種ごとにモデル式により推定する方法などにより、森林資源量の把握の検討が可能である。

今後も衛星画像解析技術の基礎的な研究を進めるのに並行して、本特定研究課題で得た知見および十分に検討できなかった内容について、引き続き研究に取り組んでいく考えである。

## 引用文献

Haralick, R.M., Shanmugam, K. and Dinstein, I. (1973) Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 6:610-621.

Navulur, K. (2006) Multispectral Image Analysis Using the Object-Oriented Paradigm. pp.20-21, CRC Press.

大西紀子, 村上拓彦, 吉田茂二郎 (2004) IKONOSデータを用いた屋久島南部の林相区分. 九州森林研究 57:200-202.

大西紀子, 村上拓彦, 溝上展也, 吉田茂二郎 (2005) オブジェクトベース画像分類による林相区分-高分解能衛星データと中分解能衛星データの比較-. 九州森林研究 58:131-134.

太田徹志, 村上拓彦, 加治佐剛, 溝上展也, 吉田茂二郎 (2006) 同時生起行列 (GLCM) から得られるテクスチャ情報に対する最適ピクセル間距離の検討—高解像度衛星画像を用いたスギ林区分を目指して—. 九州森林研究 59:137-140.

高木幹雄, 下田陽久 (1991) 変換 (画像解析ハンドブック, 775pp, 東京大学出版会, 東京), pp.475-637.

R-04-2013

平成24年度  
山梨県環境科学研究所研究報告書  
第32号

YIES Research Report

---

2013年発行

編集・発行  
山梨県環境科学研究所

〒403-0005 山梨県富士吉田市上吉田字剣丸尾5597-1

電話 : 0555-72-6211

FAX : 0555-72-6204

<http://www.yies.pref.yamanashi.jp/>

---