

# 衛星リモートセンシング技術による針葉樹人工林の 樹冠疎密度の推定に関する研究

加藤 正人\*

Studies on estimating crown densities of conifer plantations  
using satellite remote sensing technique

Masato KATOH\*

## 要 旨

研究の目的は衛星リモートセンシング技術を用いて、トドマツ、カラマツ、エゾマツの北海道の主たる針葉樹人工林の樹冠疎密度を推定する手法を開発し、疎密度区分画像を作成することである。本研究には次の手法の検定および開発が含まれる。衛星データから樹冠疎密度を精度良く求めるために、(1)幾何補正、(2)ラジオメトリック及び大気補正、(3)隣接画素の削除とフィルタリングによるノイズ除去などの前処理方法について最適な補正方法を統計的に検定・選択し、(4)最適な解析手法をもとにモデルを求め、疎密度区分画像を作成する。

地上参照データは空中写真のデジタル解析から求め、衛星画像の座標系と対応するように UTM 座標に変換し、衛星データの最小区画(30m×30m)ごとに疎密度を算出した。解析に使用した TM データは 1990 年の春先の 3 シーンである。空中写真のデジタル解析から導かれた針葉樹の樹冠疎密度と TM バンドの反射輝度値および植生指数の関係を調べ、最適な手法を検討した。その結果、改良した手法から  $r^2 = 0.75$  の高い相関関係を得て、モデル化した。それぞれのシーンについて最適な回帰式を使い、樹冠疎密度の区分画像を作成した。開発した手法をもとに道立林業試験場研究林(約 8000ha)の林分について、トドマツ人工林の疎密度区分図(5 万分の 1)を作成した。本研究の結果は、針葉樹人工林の資源の管理や計画に衛星データが有効であることを示した。

キーワード：リモートセンシング，ランドサット，TM，樹冠疎密度，針葉樹人工林

## Abstract

The objectives of this study were to establish models for crown density estimations using Landsat Thematic Mapper(TM) data and to produce estimated images for 3 conifers (*Abies sahalinenisi*, *Picea jezoensis*, *Larix kaempferi*) plantations using improved methods. The study included (1) geometric corrections, (2) radiometric and atmospheric correction, (3) noise corrections using exclusion of neighboring pixels and filtering methods, and (4) establishment of models and estimation

---

\* 北海道立林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-01

images .

The Universal Transverse Mercator coordinates of the field plots derived from digital analysis of the photographs were converted into the line/pixel coordinate system of the TM scenes . The corresponding pixels valued in TM 3 scenes were selected and transformed into data files . The correlation between the rates of conifer crown densities analyzed from digitalized photographs and stand reflectance values in the TM bands and vegetation indices were carried out in order to find the most suitable variables and methods for crown density estimations .

Good relationships (  $r^2 > 0.5$  ) were found using the improved method and models were created . The crown densities of estimated images were presented using the best fitting regression lines .

Finally , the improved method was applied to the other site that was located in a experimental forest ( about 8000ha ) of Hokkaido forestry research institute and produced a crown density map ( A0 size and scale of 1:50000 ) of *Abies sachalinensis* plantations .

The study results indicate that high resolution satellite data has potential for forest resource management and planning within conifer plantations .

## 目 次

第1章 緒 言.....	62
第1節 研究の背景.....	62
第2節 研究の目的と意義.....	63
第3節 研究の方法.....	64
1 . 衛星リモートセンシング技術の概要と沿革.....	64
1 ) 衛星リモートセンシングによる森林現況把握の原理.....	64
2 ) 資源探査衛星ランドサットの概要.....	65
3 ) 衛星リモートセンシング技術による森林資源調査の沿革.....	65
2 . 研究の経過.....	66
3 . 研究の方法.....	66
第2章 調査の概要.....	67
第1節 調査の概要.....	67
第2節 使用データと機材.....	68
1 . 使用した地図・空中写真.....	68
2 . 使用した衛星データ.....	68
3 . 解析機器とソフトウェア.....	68
第3章 画像解析の手順と方法.....	68
第1節 地図情報の入力.....	68
第2節 空中写真のデジタル変換と画素サイズの樹冠占有割合の算出.....	69
1 . デジタル変換.....	69
2 . 写真画像の幾何補正.....	69
3 . 画素サイズの格子作成と通し番号の割り当て.....	69
4 . 最尤法による林相分類.....	70

5 . 画素サイズの樹冠占有割合の算出.....	70
第3節 衛星データの前処理方法の検討.....	70
1 . 3種類の内挿法.....	70
2 . 観測された放射輝度値の補正方法.....	70
1 ) ラジオメトリック補正.....	71
2 ) 大気補正.....	72
3 ) 植生指数の計算.....	72
第4節 画像の重ね合わせと統計処理.....	72
1 . 外周画素の除去の効果.....	72
2 . フィルタリング処理の効果.....	73
第5節 樹冠疎密度区分のモデルと画像の作成.....	73
第4章 画像処理の解析結果.....	73
第1節 空中写真のデジタル交換と画素サイズの樹冠占有割合の算出.....	73
1 . 最尤法による林相区分.....	73
2 . 画素サイズの樹冠占有割合の算出.....	73
第2節 衛星データの前処理方法の検討結果.....	74
1 . 3種類の内挿法と画像の作成.....	74
2 . 放射量の補正画像の作成.....	75
1 ) Haze 値の算出.....	75
2 ) 放射量の補正画像の作成.....	75
第3節 画像の重ね合わせと統計処理.....	76
1 . デジタル空中写真と衛星画像の重ね合わせ.....	76
2 . 統計処理.....	76
1 ) 3種類の内挿法の分散分析と検定.....	76
2 ) 有効波長帯・植生指数の分散分析と検定.....	76
3 ) 放射量補正の分散分析と検定.....	78
4 ) 外周画素の削除の効果.....	78
5 ) フィルタリング処理の効果と画像の作成.....	79
第5章 針葉樹人工林の樹冠疎密度区分モデルと画像作成.....	80
第1節 針葉樹3種のモデルの作成.....	80
1 . トドマツ人工林.....	80
2 . カラマツ人工林.....	80
1 ) 外周画素の削除.....	80
2 ) 内挿法.....	81
3 ) 放射量補正.....	81
4 ) 疎密度区分の推定式.....	81
3 . エゾマツ人工林.....	82
1 ) 外周画素の削除.....	82
2 ) 内挿法.....	82
3 ) 放射量補正.....	82

4) 疎密度区分の推定式.....	83
第2節 樹冠疎密度区分画像の作成.....	83
1. トドマツ人工林.....	83
2. カラマツ人工林.....	83
3. エゾマツ人工林.....	83
第3節 モデルの地地域への対応.....	83
1. 応用地域の概要.....	84
2. 樹冠疎密度区分図(5万分の1)の作成.....	84
1) 応用地域の衛星データの前処理.....	84
2) 対象地の輝度値の強調処理とモザイク処理.....	84
3) モデルから疎密度区分画像の作成.....	84
4) トドマツ人工林の樹冠疎密度区分図(A0版林相図)の作成.....	84
3. 疎密度区分図の精度検証.....	86
第6章 考察.....	86
第7章 結言.....	89
摘要.....	90
引用文献および参考文献.....	90
Summary .....	95

## 第1章 緒 言

### 第1節 研究の背景

北海道の森林面積は約557万haに及び、森林率は72%と高い。また人工林はトドマツ、カラマツなどの一斉造林地が151万ha(人工林率27%)も広がっており、広域の森林現況を捉えるリモートセンシング技術を活用する場面は多い。

人工林の樹冠疎密度は、間伐の適期の判断、蓄積の算定など人工林資源を管理するための重要な因子である。通常は空中写真から判読され、樹冠投影面積の割合に応じて10分率で記されている。

例えば約62万haの森林を管理する道有林の森林調査業務では森林調査簿から現地調査する小班を抽出し、空中写真判読で疎密度を基準に層化する。層化した小班内の標準的な箇所についてプロット調査を行う。帰庁後に現場で確認・層化した現況を図面に色ぬりし、蓄積などを算出する。衛星データによる林相区分や疎密度区分の解析精度が向上するならば、これらの調査・管理業務の効率化が促されよう。

一般民有林では、林業指導事務所の職員が1人当たり約11,000haに及ぶ広大な管轄面積に対し、毎年実施する伐採照査業務や林地転用面積の把握などを行っている。そして、一般民有林の間伐計画をたてる際には樹冠疎密度が3以下は疎、4~6は中庸、7以上は密林分として大別され、密林分は間伐該当小班として積算される。しかし写真判読から疎密度を求めるには熟練を要するとともに個人差もあることから客観性に劣る。また広範囲の写真判読には相当の労力と時間を必要とする現状にある。特に北海道のように広い面積の森林資源を管理・運営する場合、5年おきの空中写真の情報だけでは撮影後年数がたてば信頼性が薄くなり、このギャップを埋める手段の開発が課題となっている。

一方、衛星データを利用すれば、広範囲の森林の現況を周期的に得ることができる。例えば16日周期で定期観測している米国の地球資源探査衛星ランドサットの多重走査計(TM)は、人間の視覚と同じ波長帯を観測する可視光線域に3つの観測波長帯(バンドと呼ぶ)、および可視光線より波長の長い

近・中間赤外線域に3つのバンドおよび波長の長い熱赤外線域に1つのバンドがあり、地表からの反射光の強さを測定している。このように空中写真が可視光線域の1種類の目であるのに対し、TMデータは7種類の目をもっており、林相区分や森林の活力を含む地表における数々の様子(情報)を把握することができる。また空中写真が単木の情報を捉えるのに対し、TMデータの識別能力は30m×30mであることから、ランドサットは0.09haごとの区画単位で捉えている。これは樹冠疎密度のような樹木の集団の情報を広範囲に取得したい場合に極めて有効と考えられる。

本研究ではこのような背景を踏まえ、写真判読にたよらず衛星データから針葉樹人工林の疎密度を推定する手法の開発に努めた。

## 第2節 研究の目的と意義

### 1. 研究の目的

本研究の目的は、衛星データの特徴を利用して、北海道の主要な針葉樹人工林であるトドマツ、エゾマツ、カラマツの樹冠疎密度を精度良く推定し、疎密度区分画像を作成することである。なお、本研究には次の手法の開発と疎密度推定に最適な手法の比較と検討が含まれる。

(1) 空中写真のデジタル解析によって、衛星データと同じプロットサイズ(30m×30m)の樹冠占有面積割合を算出する。

(2) 春先の3シーンのランドサットTMデータについて、それぞれに長所短所のある3種類の内挿法の精度を比較・検討する。

(3) 衛星データの輝度値のラジオメトリック補正・大気補正による絶対値変換を行い、これら放射量補正の効果を比較・検討する。

(4) 針葉樹3種の樹冠疎密度の推定に有効なバンド・植生指数を明らかにする。

(5) 推定精度を上げるため、隣接する林分の影響を受けている外周画素の段階的削除及び3種類のフィルタリング処理によるノイズ除去効果について検討する。

以上のことについて、空中写真のデジタル解析結果と衛星データを対比し回帰計算と分散分析による手法間の検定を行い、最適な処理方法と推定式を求める。

(6) 明らかになった解析手法と推定式を用い、3シーンの衛星画像それぞれについて、現場で使用されているのと同じ出力方式で針葉樹3種の人工林の樹冠疎密度の区分画像を作成する。

(7) ここで求めた関係は、1つのシーン(185km×185km)の全域あるいは同一観測日の他のシーンに応用できることから極めて広域の疎密度区分画像を同時に作成できる。そこで他地域の森林に手法を応用し、現場で使われる林相図と同縮尺(5万分の1)且つ同サイズ(A0版)で疎密度区分画像を作成し、精度について検証する。

### 2. 研究の意義

衛星データの活用はこれまで、土地被覆分類や林相分類など広域を概観する目的が主であり、必ずしも森林施業に役立つというまでには解析されていない。本論文に示す、衛星データから針葉樹人工林の疎密度を捉える手法の開発は以下の理由から意義が大きいと考える。

(1) 針葉樹人工林の樹冠疎密度が衛星データから把握できれば、熟練性と労力を要する従来の写真判読に頼らなくてもよいので、省力化が図られ、迅速な人工林資源内容の把握や間伐適期の判断に使用できる。

(2) 衛星データから作成された疎密度区分画像は熟練者でなくても視覚的に林分の全体的な区分状況を捉えることができる。

(3) 小班内の成績区分に活用できる。人工林の成績は林齢が同じであっても標高，斜面方位，傾斜，土壌条件などによって異なる。現状の一般民有林の森林調査簿の蓄積表示は小班内の平均的な場所の標準地調査から求めた蓄積に面積を乗じる方式であり，明らかに小班内で成績が異なる場合には分班などの区分けが必要になる。疎密度が画素（最小読み取り単位 30m × 30m）単位に把握できることから，面積の大きい小班の層化区分などに有効である。

(4) コンピュータ上で情報が取り扱えることから，すでに北海道林務部で導入している地理情報システム（GIS）との組み合わせや電算化された森林調査簿データとつなげて，小班のデータ修正・更新等のデータベース作成（加藤 1990a，1991c，1993b）に活用できる。

(5) 年度の異なる疎密度区分画像の重ね合わせ・比較によって，若齢人工林や間伐後の樹冠閉鎖の進捗状況を把握することに利用できる。

(6) 人工林の資源把握以外にも，出力画像や図面は広域の森林を含めた土地利用状況が把握できることから，他分野への情報提供に有益である。

### 第3節 研究の方法

#### 1. 衛星リモートセンシング技術の概要と沿革

##### 1) 衛星リモートセンシングによる森林現況把握の原理

地球の表面からは可視光のほかにも人間の目が捉えることのできない赤外線（近赤外線，中間赤外線，熱赤外線）や紫外線そしてマイクロ波などが反射して出ている。これらを総称して電磁波と呼ぶ。すべての物体は固有の電磁波の反射特性を持っているので，人工衛星で捉えた電磁波の強さを数種の波長帯（バンド）ごとに比較すれば，物体を識別できる。例えば森林，農地，市街地，住宅地，川，雪などの土地被覆が分類識別でき，さらに森林について樹種特性を調べることによって，トドマツ，エゾマツ，カラマツ，広葉樹林なども識別することができる。

ランドサットデータは日本の場合，埼玉県鳩山村にある地上受信局で磁気テープに記録され，リモートセンシング技術センターを通して購入できる。1シーンの観測範囲は 185km × 18km と北海道の4支庁分をカバーできる広さである。ランドサットの観測周期は 16 日であるので，5年の周期で撮影される空中写真より観測周期が短いことから，森林の伐採や開発の進捗状況や突発的な災害に対するモニタリングに向いている。

購入した衛星データは地球が球体であること，衛星の観測姿勢の変化などから，歪みがある。そこで5万分の1の地形図などの大縮尺の地図を使い，衛星画像と地図上の地上基準点による対応を行い，幾何変換による地図補正を行う。幾何補正された衛星データから任意に3つのバンドを選択し，赤・青・緑の色の三原色を各バンドに割りあてることによって，ナチュラルカラー，赤外カラー画像などが作成できる。例えば，人間が高度約 700km の人工衛星から実際に地上を見ている色で表現する場合，可視光の赤色域（バンド3）に赤色，緑色域（バンド2）に緑色，青色域（バンド1）に青色を割りあてることによって，トゥルーカラーと呼ばれる画像が作成できる。この画像は地図補正されているので，そのまま地図として利用できる。しかしその場所がどこで，何が植栽されているかは現地と照合しなくては確かな判断は難しい。そこで地図座標入力装置（デジタイザ）を使用して，林相図・森林計画図などから地図情報を入力する。地図情報は林道，等高線，水系などの線分情報と林班や小班などの閉多角形（ポリゴン）情報に大別できる。入力された地図情報は衛星画像上に重ねて表示したり，必要な箇所を切り出し（マスク処理）たりして，画像をより見やすく加工することに使用される。また各ポリゴンに森林調査簿の樹種・林齢などの属性を付加させることによって，カラマツ間伐対象小班の拾い上げも画像上で可能になる。

## 2) 資源探査衛星ランドサットの概要

米国の人工衛星ランドサットが 1972 年に初めて打ち上げられ、その画像を利用できるようになってから、20 年近くが経過した。その間、衛星の種類、機能も増し、ランドサットは地上解像力が 80m から 30m にまで向上した。陸域を対象とする資源探査衛星であるランドサットは、いかなる国の観測範囲のものであっても公開されており、利用できる。

ランドサット TM センサは、地表を約 30m 方眼に区切り、1 つの方眼について地上から反射してくる電磁波を可視光域から短波長赤外域の範囲の中に 6 つの観測波長帯 (バンド) と温度の違いを識別する熱赤外域のバンド (地上分解能力は 120m である) の計 7 つのバンドで観測している。ランドサット衛星は観測年数が長いこと、データの信頼性が高いことなどから、現在でも衛星リモートセンシングの様々な分野で利用されている。

ランドサット以外に森林観測に利用できる衛星は仏国の衛星スポットが 10m の地上解像力をもっている。日本においても、地上解像力が 50m のセンサを持つ海洋観測衛星もも 1 号、1 b 号が飛行中である。また陸域資源探査を目的に 1992 年に打ち上げられたふよう衛星は地上解像力が 18m で、より細かい森林情報が得られる (Katoh 1994d)。さらに 1996 年初頭に打ち上げ予定の ADEOS 衛星は解像力が 8m に向上する。そうなれば現行のプロット単位から単木レベルでの現況把握が可能になるため、衛星データの森林・林業への利用は一層進み、将来的にはこれらの衛星データは作成経費・観測周期性の面から、現行の空中写真や正射写真図と置き変わる時が来ると考えられる。

## 3) 衛星リモートセンシング技術による森林資源調査の沿革

衛星データの北海道の森林資源調査への活用は 1981 ~ 1985 年に国立林業試験場 (現森林総合研究所) と北海道との共同研究として伐採照査業務への利用がある。これは一般民有林を管理する北海道林務部が未届けの伐採地を把握するために、林業試験場の衛星データの経年変化技術を活用し、伐採地抽出を試みることを目的に始められた (粟屋 1988)。しかし解析精度、費用の面、さらに当時は北海道自体に技術の受け皿となる解析機器や専用のスタッフを持ち得ていなかったことなどから実用化するには至らなかった。その後、コンピュータの技術革新により、解析機器の性能向上、小型化および低価格化が進み、道立の研究機関に解析機器の導入が進んだ。また地図情報と森林調査簿をコンピュータ上で一体管理する地理情報システム (GIS) も北海道の一般民有林を対象に平成 2 年度から導入が進められ、宗谷支庁・上川支庁の一部の地域に対して稼働している。リモートセンシングと GIS は、コンピュータ上で扱える道具であり、お互いのデータをやりとりできる。現在では衛星データ上に GIS の地図情報を表示して、小班の林況のチェックや不成績地の抽出を行ったり (加藤 1990a)、GIS 上で各種図面を重ね合わせ (加藤 1990b, 1991c, 1992a)、評価図を作成するなど相互利用が進んでいる (加藤 1993b, 1995a, 平田ほか 1994)。

北海道以外の他府県での取り組みでは広島県林業試験場の松くい虫の被害調査や植生指数を用いた流域単位での緑資源量の把握 (東ほか 1994)、富山県林業試験場の積雪被害や地すべり危険地調査への活用 (小林 1995)、沖縄県林業試験場の海洋への赤土流出によるサンゴへの影響調査 (寺園ほか 1991) などがある。これらは気候、地理的諸条件、森林の構成が異なることから、地域特有の取り組みとなっている。

国外ではマレーシア、インドネシア、タイなどの東南アジア地域の熱帯林を対象として、土地利用変化や森林伐採の現況把握に関する研究が行われている (望月 1994, 小谷ほか 1995)。アフリカの砂濃化の進行やアマゾン河流域の森林開発の現状分析 (吉田ほか 1995) などのグローバルな環境監視に利用される例もある。さらにロシア極東やシベリアなどの亜寒帯森林の乱伐や山火事のモニタリングについても共同研究 (鷹尾ほか 1994, 環日本海北方森林研究会 1994) が開始されている。これらの研究の相手国は日本

とは異なり、地図や空中写真が未整備で、定期的な国レベルの森林資源調査法が確立されていない。このため衛星リモートセンシング技術を用いて、植生図や森林の開発状況を大まかに捉える必要が生じている。使用されている衛星データは解像力は  $1\text{km} \times 1\text{km}$  と粗いが観測範囲の広い衛星ノアが使われることが多い。これらの第一段階の森林情報の整備が進むなかで、ランドサットなどの解像力の高い衛星によって、局所的な林相区分が求められるだろう。

衛星情報の森林資源分野における今後の利用法は、海外の資源調査でみられる大まかな土地利用変化の把握、そして国内においては高分解能力の衛星データをもとに、最も人手を要する林分の質的な内容把握、すなわち疎密度や蓄積の把握へと分化していくものと考えられる。

## 2. 研究の経過

衛星データの活用はこれまで、土地被覆分類や林相分類など広域を概観する目的が主であり、必ずしも森林施業に役立つというまでには解析されていない。そこで樹冠疎密度や蓄積の把握の分野に技術が導入可能かどうか検討してきた。初期の研究 (Katoh 1988) において、当該調査地にランドサット TM データを用いて樹種分類を行った結果、エゾマツに関してはその分類精度は 87% であった。誤分類した 13% についてその原因を詳細に探るため、衛星データの画素に対応する地上において、6 つの調査プロットを設定した。その結果、エゾマツ人工林の誤分類の原因は侵入・生育した広葉樹の樹冠占有面積割合が高いために生じたことがわかった。さらに各プロットのエゾマツ樹冠占有面積割合と衛星データの反射輝度値との比較を行ったところ、高い相関が認められ、疎密度区分に有効であることが示唆された。しかし回帰推定に用いる樹冠投影図などの地上参照データの取得は相当の労力と時間を要した。さらに複数の異なる時期の衛星データでも同じ結果が得られるか調べたところ、記録された輝度値は観測時の地球の天候 (大気中の水分や塵による散乱) や太陽の位置 (地球と太陽の距離、衛星観測時の太陽の天頂角)、そして衛星自らの姿勢制御の違いによって、大きく異なることがわかった。またこれら取得画像を標準化するための前処理は各種の補正方法があることから、どの手法が疎密度などの森林分野において最も良いのか、整理する必要が生じた。

そこで大量の地上参照データを取得する方法として空中写真のデジタル変換と画像処理によって、写真から客観的かつ精度良く樹冠疎密度を求める方法を開発した。以下、本論文ではそれらをもとに疎密度推定に最適な手法は何であるか、統計処理で選定して、針葉樹 3 種のモデル (推定式と処理方法) を求め、鮮明な疎密度区分画像を作成することを試みた。

## 3. 研究の方法

本論文では衛星データの地上参照データとなるトドマツ、カラマツ、エゾマツ人工林の樹冠の情報を、毎木調査や実体鏡による写真判読によらず、空中写真のデジタル解析による中心投影の補正、最尤法による林相分類、衛星データの画素サイズ ( $30\text{m} \times 30\text{m}$ ) に対応する格子作成等の手順を経て、針葉樹 3 種の樹冠占有面積割合を算出する方法について考察した。

衛星データは観測時期の異なる 3 シーン (1990 年 4 月 11 日、4 月 27 日、5 月 29 日) を使い、調査地の針葉樹人工林を切り出し、異なる前処理方法 (内挿法、放射量補正など) について、それぞれ画像ファイルを作成した。

デジタル空中写真の針葉樹の樹冠占有面積割合と衛星画像の画素の各波長の反射輝度値との対応を図り、統計処理により樹冠疎密度推定に最適な画像の前処理方法と有効な波長帯を求め、樹冠疎密度推定のモデルを作成した。モデルをもとにトドマツ、カラマツ、エゾマツ人工林の樹冠疎密度区分画像を 3 シーンの衛星データについて、それぞれ作成した。開発したトドマツの樹冠疎密度モデルを調査地以外の他地域に応用し、五万分の 1 の樹冠疎密度区分図を作成すると共に、区分精度について検証した。



本研究を取りまとめるに当たり，終始懇切な御指導を賜った北海道大学農学部教授和孝雄博士をはじめ，論文の御校閲を賜った北海道大学農学部教授五十嵐恒夫博士，同教授堀口郁夫博士に対して深甚な感謝を申し上げます。さらに本研究の進行に際し，森林総合研究所北海道支所猪瀬光雄博士並びに新潟大学農学部助教授阿部信行博士には御指導と御鞭撻を下され心から御礼申し上げます。また本研究の遂行に当って常に御鞭撻と御協力をいただいた北海道立林業試験場の土川美勝場長をはじめとする職員の各位には心から感謝申し上げます。終わりに調査地の設定・調査に関して，御協力と御理解をいただいた苫小牧営林署，恵庭営林署に対して謝意を表す。なお本論文は北海道大学学位審査論文である。

## 第2章 調査地の概要と使用機材

### 第1節 調査地の概要

調査地は北海道樽前山東部丘陵地の苫小牧営林署丸山，恵庭営林署烏柵舞の国有林である。調査地は以下の理由から衛星データの解析には最適である。

地形が平坦であり，山の影の影響を考えなくてよい。

林班は長方形（短辺 515m × 長辺 818m）で明瞭に区画されている。

地上の情報（図面・調査簿・空中写真）が整備されている。

区分された林班にエゾマツ，トドマツ，カラマツの針葉樹が大面積に一斉造林されている。

ここでは気象災害からの保護を図ることを目的として，交互帯状皆伐施業が行われている。林班の短辺 545m（300 間）を 8 等分し，長辺に平行な帯を作り，さらに中央を 2 等分した計 16 の帯をつくる。1 帯の面積は 2.78ha で，帯をそれぞれ更新帯，保護帯と名付け，先に更新帯を伐採し跡地にエゾマツ，トドマツを植栽する。この造林木を保護帯の天然林によって保護成林させ，その後保護帯を伐採し同様に

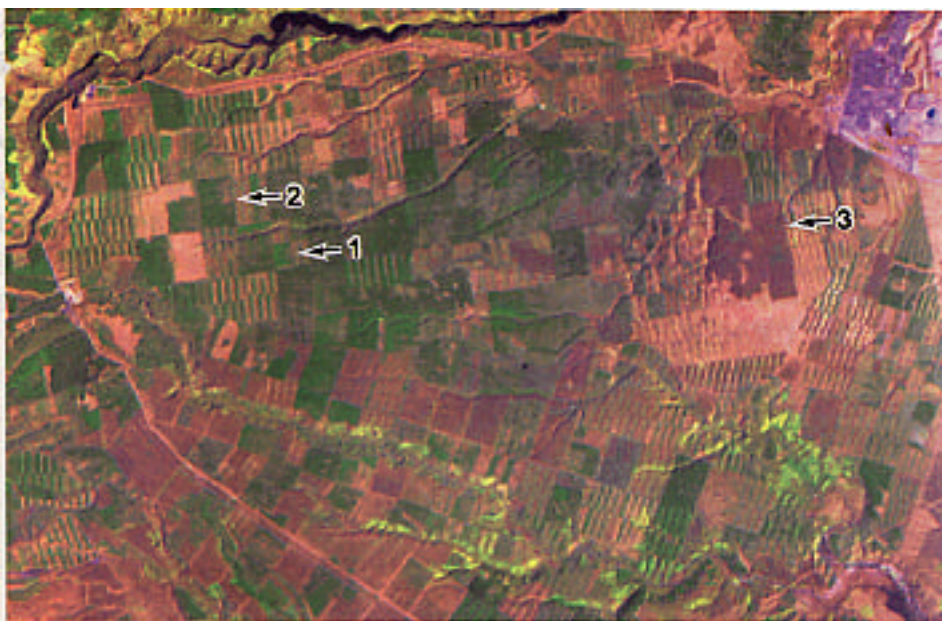


図 - 1 林班界を重ね合わせたTM の合成画像  
矢印は1 はトドマツ人工林（明緑色），矢印2 はエゾマツ人工（暗緑色），矢印3 はカラマツ人工林（赤茶色）の調査地を示す。

Fig .1 A composite TM image overlaid forest compartment . The arrows show the study sites of conifer Plantations:the arrow number 1:Abies sachalinensis(lighr green) , number 2:Picea jezoensis(dark green) , number 3:Larix kaempferi(violet) .

人工植栽し更新する。現在，更新帯はエゾマツ，トドマツの古い造林地からなり，数度の間伐を経ている。また保護帯は近年天然林が伐採されアカエゾマツの幼齢造林地になっている。この交互帯状皆伐施業地は衛星画像では更新帯が濃い緑色，保護帯が白色となっており，市松模様に写る（図 - 1）。図 - 1 は林班界を衛星画像に重ね合わせ表示している。

調査対象としたトドマツ人工林は苫小牧経営区 80 林班ほ小班である（図 - 1 の矢印 1）。天然林の皆伐跡地に昭和 40 年植栽された無間伐の平地林で，大きさは縦 360m・横 270m の長方形で 9.72ha である。林内はトドマツの生立本数の多い部分や，ハルニレ，カンバ類などの侵入した広葉樹が優占する部分などが混在し，トドマツの樹冠占有割合は場所によって異なっている。

同様にエゾマツ人工林の調査地は苫小牧経営区 54 林班い小班（昭和 5 年植栽）に設定し（図 - 1 の矢印 2），カラマツ人工林は恵庭経営区 316 林班い小班（昭和 31 年植栽）に設定（図 - 1 の矢印 3）した。衛星画像上ではエゾマツが暗緑色，トドマツが明緑色，カラマツが赤茶色と樹種固有の色を示している。また人工林内に侵入した広葉樹の優占する箇所はそれぞれ色が薄くなっている。

## 第 2 節 使用データと機材

### 1. 使用した地図・空中写真

トドマツ人工林の樹冠疎密度の算出に使用した白黒空中写真（以下，空中写真と略す）は，1990 年 7 月 1 日撮影の 2 倍引き伸ばし，縮尺約 8 千分の 1 のもので，使用した TM データと同一年の観測である。

地図情報のデジタル化及び地図の座標変換は A0 版デジタイザによって行った。空中写真のデジタル変換に用いた機材はシャープ製カラーシキヤナ（JX-450）である。

### 2. 使用した衛星データ

解析に使用した衛星データは，米国の地球資源探査衛星ランドサットの多重走査計（TM）で観測された 1990 年 4 月 11 日，4 月 27 日，5 月 29 日の 3 つのシーン（path 107-115）である。現地では樹木の芽ぶきから開葉時期にあたり，4 月 11 日は広葉樹の芽ぶき時期，4 月 27 日は開葉初期，5 月 29 日は開葉終期である。

### 3. 解析機器とソフトウェア

衛星データの解析に使用した主なソフトは米国で開発された ERDAS（ERDAS 1991）である。また相関・分散分析・有意差検定などの統計計算は科学統計処理ソフトの SAS（SAS 1989）を用いて処理した。

## 第 3 章 画像解析の手順と方法

解析の流れを図 - 2 に示す。解析の手順は 空中写真上の調査地を衛星データの最小区画（30m × 30m）で区分して，この区分ごとに疎密度を求める。この疎密度と衛星データから得た同じ位置の輝度値との対応関係を統計学的に明らかにする。その対応関係を適用して，衛星データから樹冠疎密度区分画像を作成するという流れである。

なおトドマツ，カラマツ，エゾマツは，いずれも同じ手順で解析が行える。

ここではトドマツの解析例を中心に記し，カラマツ，エゾマツについては疎密度区分の推定式と出力画像及びトドマツと異なる点について記すこととする。

### 第 1 節 地図情報の入力

幾何補正及び地図情報に使用した地図は，緯度・経度座



図 - 2 針葉樹人工林の樹冠疎密度推定の流れ図  
 Fig. 2 Flow-chart of the estimation of crown densities of conifer plantations.

標系の2万分の1事業図， 平面直角座標系の5千分の1基本図であるが，それぞれUTM座標系に変換・統一して補正を行った。

地図情報として入力した線分およびポリゴン（閉多角形）情報は調査地の林班界，小班界（但し80林班のみ），林道，沢である。

空中写真・衛星画像の幾何補正に用いるGCP(地上基準点)は10点を地図と対応する画像から満遍なく一様に採取し，それぞれUTM座標に変換・統一した。特に調査地のトドマツ人工林には林内を通る林道及び林縁を含めコンパス測量を充分に行い，基本図に重ね打ち出しし，林縁，林道の交点，ギャップなど地上測量をもとにGCPを採取した。GCPの精度は地上測量との差異が1.5画素以内として幾何補正を行った。

## 第2節 空中写真のデジタル変換と画素サイズの樹冠占有割合の算出

### 1. デジタル変換

調査地を含む1990年7月1日撮影の2倍引き伸ばし空中写真をカラスキャナによって，赤・緑・青の各成分データにデジタル変換した。読み取り精度は300DPIとした。このデータは1band 32bitなので，いったん24bitに変換し，3band各8bitのBILフォーマットとしてファイルに格納した。

### 2. 写真画像の幾何補正

北を真上に撮影された写真画像は，中心投影の歪みがある。調査地を歪みなく画像の横軸に平行な長方形で出力するため，最近隣内挿法による幾何補正と，林道と林班界に沿って画像の回転を行った。補正処理されたファイルの大きさは576columns×648linesで，地上測量結果と対応計算すると，1画素当たり地上解像力は0.81mになった。

3. 画素サイズの格子作成と通し番号の割り当て 補正された写真画像をランドサットTMデータの画素サイズ(30m×30m)に対応するように調査地のトドマツ，カラマツ，エゾマツ人工林の右上を原点に30m幅の格子を作成し，調査地の上に重ねた。トドマツ人工林の調査地は縦360m，横270mであることから，格子は縦12個，横9個に区切られる。右上から格子番号1，左下が108番となるように格子に通し番号を割り当てた(図-3，右)。 空中写真の画素サイズが0.81mであることから，ランドサットTMの画素サイ

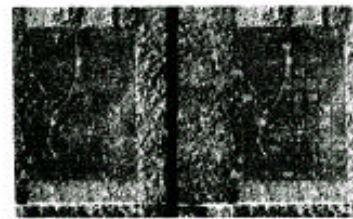


図-3 幾何補正されたトドマツ人工林の空中写真(左)と，画素サイズの格子(30m×30m)の重ね合わせ(右)

Fig.3 Left: a *Abies sachalinensis* plantation on the photographic image rectified using geometric correction. Right: a composite image overlaid grids (30m×30m) on the left image.



図-4 カラマツ人工林と格子(30m×30m)の重ね合わせ

a: アカエゾマツ人工林 b: 若齢造林地 c: 林道  
d: 裸地(土場跡)

Fig 4 A *Larix kaempferi* plantation image overlaid grids. a: *Picea glehnii* plantation b: young plantation  
c: forest road d: bare land (old site of landing)

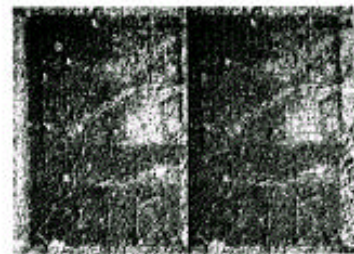


図-5 エゾマツ人工林の空中写真(左)と，格子(30m×30m)の重ね合わせ(右)

Fig.5 Left: a *Picea jezoensis* plantation on the photographic image rectified using geometric correction. Right: a composite image overlaid grids on the left image. a: low density stand b: high density stand

ズに対応する 1 格子 (30m × 30m) には 1369 個の空中写真の画素が入る。

カラマツ及びエゾマツ人工林の調査地は縦 18 個、横 27 個に区切られた。地図補正されたカラマツ人工林の調査地に 30m 幅の格子を重ねたのが図 - 4 である。調査地の上 (図 - 4 の a) は昭和 57 年植栽のアカエゾマツ造林地、左部 (b) は若齢の造林地で、一部火山灰が裸出している。左上から林道 (c) が通っており、調査地の左下部に裸地になっている土場跡 (d) がある。

同様に空中写真のエゾマツ人工林の調査地を地図補正したのが図 - 5 の左で、格子を重ねたのが図 - 5 の右である。調査地の右中部 (図 - 5 の a) はヤチダモ、ミズナラ、シナノキなどの広葉樹が優占しており、写真上は白色で示されている。一方、調査地の左上部 (b) はエゾマツの占有割合が高く、黒色である。

#### 4. 最尤法による林相分類

空中写真上のトドマツ、エゾマツの樹冠は黒色、カラマツは灰色で、ミズナラ、シナノキ、ハルニレなどの広葉樹は白色であることから、肉眼でも色調の違いが明白である (図 - 3, 4, 5)。

そこで現地踏査によって写真上の林相を確認した上で、最尤法を使い林相分類を行った。分類項目はトドマツ、カラマツ、エゾマツの針葉樹、広葉樹、下層植生、非植生 (裸地・林道) の 4 区分とした。

#### 5. 画素サイズの樹冠占有割合の算出

格子ごとにその分類項目の画素数をカウントし、格子内の画素数で除して、格子単位の分類項目の占有面積割合を算出した。人工林は単一樹種の造林地なので、トドマツ、カラマツ、エゾマツ人工林の各調査地の針葉樹の割合はそれぞれの樹種の樹冠占有面積割合に該当する。

### 第 3 節 衛星データの事前処理方法の検討

衛星データから精度良く疎密度を推定するには画像の歪みを取り除いて、地図に投影する前処理や観測時の大気や水分による散乱を補正する前処理が必要である。しかしこれらの前処理に使用される補正方法は数種類あり、それぞれに長所短所があるため、疎密度と相関の高い手法を統計的に検定して選択する必要がある。ここでは以下の手法を比較・検討した。

#### 1. 3 種類の内挿法

TM データが記録された磁気テープからトドマツ、カラマツ、エゾマツ人工林の調査地が含まれた範囲を取り出し、2 万分の 1 事業図と 5 千分の 1 森林計画図の地図を使用して、それぞれ特徴のある 3 種類の内挿法 (本条ほか 1989, Tucker 1979) による画像の補正を行った。地図補正の特徴と略号について表 - 1 にまとめた。

表 - 1 3 種類の内挿法の特徴と略号

Table 1. Characteristic of these geometric correction methods and their abbreviations.

名称 (略号)	特徴
Nearest Neighbor method (NN) 法	オリジナルの画像データをこわさない利点がある。 細かい線状の対象の境界にギザギザが生じる欠点がある。
Cubic Convolution method (CC 法)	見た目にはなめらかな画像をつくることできる。 もとの輝度値をこわしてしまう欠点がある。
Bi Linear method (BL)	平均化された画像が得られる利点がある。 全体的に鮮鋭ででなくなる欠点がある。

#### 2. 観測された放射輝度値の補正方法

TM センサに受信された放射輝度値は、地表からセンサーに届くまでの間に、空気中の水分やごみ (以下 Haze と略す) や散乱 (Scattering) の影響を受ける (和達ほか 1976)。通常の解析では観測された放射輝

度値を放射量補正しないで、そのまま使い、相対的なバンド特性から分類・回帰を行うことが多い (Franklin 1986, 加藤 1987b, Katoh 1988)。

本研究のトドマツの樹冠疎密度の分類はトドマツ人工林の中の細かい輝度値の変化をもとに回帰・推定を行うため、より厳密に放射輝度値の特性をつかむ必要がある。そこで3つの異なる時期に観測されたTMデータの反射輝度値を衛星通過時刻の天頂角、太陽と地球の距離の比、波長帯別の太陽放射量をラジオメトリック補正と呼ばれる変換式に代入し、絶対放射輝度値に標準化した。また大気中の散乱の影響を省く、大気補正による絶対放射輝度値の変換についても調べた。

### 1) ラジオメトリック補正

センサの感受特性のばらつき等に起因するラジオメトリックな歪みはセンサ感度のキャリブレーション及び各バンドに対応する6個の検出器(ダイテクタ)間の感度補正によって修正される(宇宙開発事業団・地球観測センター1986, 和達ほか 1976)。この補正に用いた変換式は Larsson(Larsson 1990)と Chavez(Chavez 1988,1989)を参考に以下の式とした。修正した箇所は、調査地が平坦であることから地形因子を省いたこと、出力される絶対放射輝度値が1桁と小さくなるため100倍して比較できるようにしたことである。

$$\text{Rad}(X, Y) = (\text{Lmax} - \text{Lmin}) \times \text{DN}(X, Y) / \text{DNmax} + \text{Lmin} \quad (1)$$

$$\text{R1}(X, Y) = \{ \text{d}^2 \times \text{Rad}(X, Y) \} / \{ \text{Esun} \times \cos(\text{zenith}) \times 100 \} \quad (2)$$

DN(X, Y) 磁気テープに記録されたデジタル値

DNmax TMの場合255

Rad(X, Y) 放射輝度値

Lmax バンド別の最大放射輝度

Lmin バンド別の最小放射輝度

d 地球と太陽の距離

Esun バンド別の太陽放射量

zenith 衛星通過時の天頂角

R1(X, Y) ラジオメトリック補正された各バンドごとの絶対放射輝度値

変数として入力する衛星通過時刻の天頂角(zenith)は理科年表(国立天文台編 1990)から観測時の太陽と地球の距離の比(d)とグリニッジ視恒星時、視赤経、視赤緯を求め、松家・木幡の作成したプログラム(松家ほか 1988)から求めた。バンド別の最大・最小放射輝度(Lmax, Lmin)と太陽放射量(Esun)を表-2に示す。これらを(1),(2)式に代入し、各バンドごとに観測されたデジタル値を絶対放射輝度値に変換する。

表-2 ランドサット5号の波長別の最大・最小放射輝度と太陽光の放射量

Table2. Post-calibration ranges, band width, spectral radiances and mean solar exoatmospheric spectral irradiances for the Landsat 5.

band	band width	μm	Rmin	Rmax	Lmin *	Lmax **	DNmax	Esun
1	0.45-0.52	0.066	0.0099	1.004	0.15	15.21	255	19.58
2	0.52-0.60	0.081	0.0227	2.404	0.28	29.68	255	182.8
3	0.63-0.69	0.069	0.0083	1.410	0.12	20.43	255	155.9
4	0.76-0.90	0.129	0.0194	2.660	0.15	20.62	255	104.5
5	1.55-91.75	0.216	0.00799	0.5873	0.037	2.719	255	21.91
7	2.08-0.35	0.250	0.00375	0.3595	0.02	1.44	255	7.4557
6	10.4-12.5	1.239	0.1534	1.896				

\* : Lmin = Rmin / μm      \*\* : Lmax = Rmax / μm

## 2) 大気補正

大気の散乱や Haze の影響による放射量歪みの補正は大別すると 2 種類の方法があり、一つは衛星の観測時に光路輝度 (パスラジアン) や対象物の反射率, Haze を直接測定する方法であり、いま一つは取得済みのデータから Dark-object subtraction 法によって散乱や Haze の影響を除去する方法である。

本研究では Dark-object subtraction 法を改良した Chavez の An improved method (Chavez 1988, 1989) を用い、各バンドごとに大気中の Haze 値を求め、以下の式で大気補正を行った。

$$HAZE_i(X, Y) = (L_{max} - L_{min}) \times HAZEDN(X, Y) / DN_{max} + L_{min} \quad (3)$$

$$R2(X, Y) = \frac{d^2 \times \{Rad(X, Y) - HAZE_i(X, Y)\} \times 100}{E_{sun} \times \cos(\text{zenith})} \quad (4)$$

HAZEDN(X, Y) バンド別の Haze 値

HAZE<sub>i</sub>(X, Y) バンド別の Haze の放射輝度値

R2(X, Y) 大気補正された各バンドごとの絶対放射輝度値

## 3. 植生指数の計算

樹木を含む植物の反射率はクロロフィルにより可視域で低く、近赤外域の 800nm~1300nm では高い値を示す。また、植物は種固有の反射特性をもち、これまでの研究により、針葉樹は広葉樹と比較すると、どの波長帯においても反射率は低く、針葉樹の中でもカラマツ、トドマツ、エゾマツの順に低下することが分かっている(加藤 1987b)。こうした植物のもつ反射特性は同じ波長領域における土壌、岩石、人工構造物とは異なるため、単バンドだけの情報よりも植物の特徴的な反射率パターンを利用し、可視域と近赤外域の組み合わせ・演算から求める植生指数が提案されている。ここでは代表的な 5 つの植生指数(本条 1989, Larsson 1990, Tucker 1979)をバンド間演算で求め、樹冠疎密度を推定する上での有効性を調べた。求めた植生指数の式と略号を表 - 3 に示す。

表 - 3 使用した植生指数の式と略号

Table 3. Vegetation indices used in the study and their abbreviations.

植生指数	式	略号
Biband Ratio	TM4/TM3	BR
Normalized Difference	(TM4-TM3)/(TM4+TM3)	ND43
	(TM5-TM3)/(TM5+TM3)	ND53
Transformed Normalized Difference	(ND43+0.5) <sup>0.5</sup>	TND
Brightness	(TM3 <sup>2</sup> +TM4 <sup>2</sup> ) <sup>0.5</sup>	Bri

## 第 4 節 画像の重ね合わせと統計処理

林道・林班界に沿って幾何補正したトドマツ人工林の空中写真の分類画像と衛星画像は縦 12 個、横 9 個の計 108 個の画素について、順番に左上から右下に向かって重ね合わせを行った。

写真のデジタル解析から求めた画素サイズの樹冠疎密度と衛星画像の植生指数を含む各バンドとの関連をみるため、ネットワーク (LAN) によるファイル転送(加藤 1992b)を行い、SAS を使用して相関・回帰、決定係数(r<sup>2</sup>)を求め、分散分析から、どの手法が疎密度推定に有効か検定した。さらに精度を上げるため以下の 2 通りの手法を試みた。

### 1. 外周画素の削除の効果

衛星データの各画素の値はそれぞれ独立しているのではなく、互いに関わりをもっていることから、位置的に隣接する画素は互いに影響し合う。そこで隣接画素のノイズ除去を検討するため、調査地の外周画素について次の 3 段階の削除を行い、樹冠占有面積割合の推定の精度が向上するかどうか検討した。

調査地の上辺の外周画素を省く場合。 調査地の上辺と下辺の外周画素を省く場合。 調査地の

すべての外周画素を省く場合。

## 2. フィルタリング処理の効果

地上参照データと画素との対応で、傾向を見出すために用いられるフィルタリング処理の効果を比較した。ここでは平均化処理、ハイパス、ローパスの3種類の3×3の大きさのフィルターを使用した。

## 第5節 樹冠疎密度区分画像のモデルと画像の作成

統計処理の結果をもとに、トドマツ、カラマツ、エゾマツの樹冠占有面積割合と最も相関の高かった手法により導かれたバンド・植生指数を使ってモデルを求め、調査地の樹冠疎密度区分画像を作成した。このモデルをもとに他地域の森林に応用して、5万分の1の樹冠疎密度区分図を作成し、その区分精度について検証した。

## 第4章 画像処理の解析結果

### 第1節 空中写真のデジタル変換と画素サイズの樹冠占有割合の算出

#### 1. 最尤法による林相区分

デジタル変換された空中写真画像を分類するため、空中写真を持参して現地踏査を行い、林相別のトレーニングエリア（地上実験地域）を選定した。トレーニングエリアの分類項目はトドマツ、エゾマツ、カラマツの針葉樹、ハルニレ、ミズナラ、シナノキなどの広葉樹、針葉樹天然林、未閉鎖の幼齢造林地、下層植生、林道、土場跡などの裸地、樹冠の影の12項目であった。このトレーニングデータを使用した分類方法で、最も信頼の高い最尤法を用いて、画像分類を行った。分類精度は分類前の空中写真からランダムに画素50個を選定し、目視による判別した結果と最尤法の分類結果とを対比して調べた。その結果、正しく分類された画素数は31個で、正当分類率は62%であった。誤分類は2種類あり、1つはトドマツ、エゾマツなどの針葉樹人工林と針葉樹天然林との間で相互に起きたこと。もう一方は造林地内に侵入・生育するハルニレやミズナラなどの広葉樹の間で区別ができなかったことによる。これは可視光の波長域に感光する白黒空中写真の情報をもとに異齡(天然林と人工林)の区分及び広葉樹の樹種区分は困難であることを示すものである。

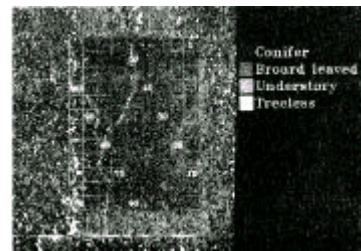


図-6 最尤を使って分類した写真画像

Fig. 6 A classified photographic image with maximum likelihood classifier .

そこで誤分類を生じた項目同士を同一とみなし、誤分類がなくなるまで、分類項目数を減少させ、同一グループ化する方法(Fanklin 1986)を使い誤差を解消することを試みた。最終的に、トドマツ、エゾマツ、カラマツなどの針葉樹人工林と針葉樹天然林を針葉樹、ハルニレやミズナラなどの広葉樹を広葉樹とし、さらに下層植生、裸地、林道・影などを非植生とする4つのグループに編集した結果、100%の正当分類率になった。トドマツ人工林の分類結果を画像化しラベル番号の認識を持つ格子を重ね合わせたのが図-6である。針葉樹は(調査地はトドマツに対応する)濃い灰色である。

#### 2. 画素サイズの樹冠占有割合の算出

格子ごとに分類した4区分に該当する面積をカウントした。その数を格子内の画素数で除じて、1格子当りの占有面積割合を算出した。トドマツ人工林の区分結果をまとめたのが表-4の(1)である。なお調査地の人工林は天然林の皆伐跡地にトドマツを植栽した造林地であることから、林内にはトドマツ以外の針葉樹はない。従って調査地のトドマツ人工林における各格子の針葉樹の割合はトドマツの樹冠

表 - 4 空中写真のデジタル解析結果から導かれた格子 (30m × 30m) ごとの樹冠占有割合

Table 4 . The rates of occupied area per grid(30m × 30m) derived from digital analysis of the photograph corresponding to the TM pixel size .

(1)Abies sachalinensis crown density reference data

(2)Larix kaempferi (3)Picea jezoensis

(1) トドマツ					(2) カラマツ					(3) エゾマツ				
格子	占有面積割合 (%)				格子	占有面積割合 (%)				格子	占有面積割合 (%)			
No.	トドマツ	広葉樹	下層	非植生	No.	カラマツ	広葉樹	下層	非植生	No.	エゾマツ	広葉樹	下層	非植生
1	63.3	26.5	6.1	4.1	1	91.3	7.0	1.5	0.2	1	78.1	11.6	3.6	6.7
2	74.6	18.8	2.1	4.5	2	93.4	5.6	0.5	0.4	2	81.4	7.3	4.3	7.0
3	68.6	25.8	3.7	1.9	3	92.2	7.6	0.2	0.0	3	86.5	2.6	5.7	5.2
4	52.9	38.7	8.4	0.0	4	81.1	14.2	2.2	2.4	4	85.2	8.5	3.2	3.1
5	48.7	40.3	9.7	1.3	5	51.1	20.0	16.6	12.3	5	82.6	9.6	2.8	5.0
105	74.6	15.2	1.7	8.5	132	67.8	13.3	11.1	7.8	132	87.1	5.4	3.1	7.4
106	82.4	9.5	0.3	7.8	133	52.2	27.0	12.8	8.0	133	76.9	16.0	2.6	4.5
107	83.1	5.2	1.8	9.9	134	52.7	29.1	10.0	8.2	134	67.9	8.3	12.8	11.0
108	87.3	7.4	2.9	5.4	135	77.7	8.3	7.8	6.2	135	73.0	16.0	5.87	5.2
平均	64.3	24.9	4.5	6.3	平均	52.2	28.8	15.9	3.0	平均	69.8	15.6	9.2	5.4

占有面積割合を示す。同様にエゾマツ人工林，カラマツ人工林についても，その格子の針葉樹の割合は，それぞれエゾマツ，カラマツの樹冠占有面積割合を示す。

例えば，図 - 3 の格子番号 1 の樹冠占有面積割合は，表 - 4 - (1) に示すようにトドマツ 63.3%，広葉樹 26.5%，下層植生 6.1%，非植生 4.1% である。また 108 個の格子のトドマツ樹冠占有面積割合は 26.8% ~ 87.3% までの範囲で，平均は 64.3% であった。

図 - 4 の写真をもとに格子ごとのカラマツ人工林の樹冠占有割合を算出したのが表 - 4 の (2) である。解析に使用した 135 個の格子数のカラマツの占有割合は 14.2% ~ 97.6% までの範囲で，平均は 52.2% であった。

同様にエゾマツ人工林の樹冠占有割合を求めたのが表 - 4 の (3) である。その範囲は 17.2% ~ 94.4% で，平均は 69.8% であった。

各調査地の侵入・生育した広葉樹の樹冠占有割合を比較すると，平均値から最も多いのがカラマツ人工林 28.8% で，ついでトドマツ人工林 24.9%，エゾマツ人工林 15.6% の順であった。

この手法によって，空中写真から衛星データの画素サイズに対応した格子ごとの樹冠占有面積割合が把握でき，衛星データの地上参照データとすることができる。この出力結果をもとに格子ごとにトドマツの樹冠占有面積割合を 10% 単位に区分出力したのが図 - 7 である。凡例は黒が濃くなればトドマツの占有割合が高いことを示す。図より調査地の左側と下部がトドマツの占有割合が高い。一方，右側は侵入・生育する広葉樹の割合が高くトドマツの占有割合が 50% 以下の格子が多いことがわかる。

## 第 2 節 衛星データの前処理方法の検討結果

調査地を含む全域が記録されたランドサット TM データ(Path=107 Row=30)は磁気テープ(1600bpi)の Vol.7 と Vol.8 にまたがるため，それぞれのテープから 1500columns × 750rows, 7 バンドの範囲で切り出し，位置合わせをした後で，つなぎあわせた(加藤 1992a)。

### 1. 三種類の内挿法と画像の作成

調査地について，三種類の内挿法の比較を行った。エゾマツとトドマツの調査地が含まれた箇所を取

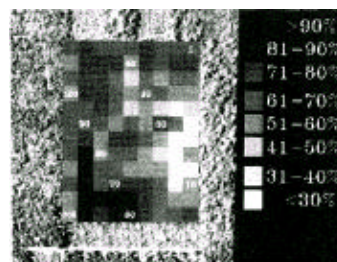


図 - 7 異なるグレイカラーを使って格子ごとのトドマツ樹冠占有面積割合のパターン画像  
Fig.7 A pattern image of the density of abies sachalinensis crown occupied area per grid with different gray colors .



り出し、比較したのが図 - 8 である。大面積皆伐跡地に植栽されたエゾマツ人工林は暗緑色で、トドマツ人工林は明緑色、伐採跡地や幼齢造林地は白色で示されている。交互帯状皆伐施業区では、更新帯のエゾマツ、トドマツ高齡人工林の緑色と保護帯跡に植栽されたアカエゾマツの幼齢造林地の白色との色調の違いが明白市松模様を示され、内挿法の長所短所が容易に分かる。

図 - 8 から NN 法は輝度やエッジが明瞭だが、1 林班 16 伐区の交互帯状区ではオリジナルデータの配列を壊

さない利点がある反面、長方形の帯状の更新帯がギザギザとなり、矩形の形状を示していない。これに比べ CC 法、BL 法は輝度値の明瞭さは劣るものの、帯状が滑らかである。また BL 法は CC 法に比べ境界が少しぼやけている。

## 2. 放射量の補正画像の作成

### 1) Haze 値の算出

内挿法の処理後、放射輝度値をラジオメトリック補正と大気補正による絶対放射輝度値へ変換した。ラジオメトリック補正では、時期の異なる 3 シーンのため、地球と太陽の距離(d)、衛星通過時の天頂角(Zenith)をそれぞれ求め、表 - 2 の波長別の最大・最小放射輝度と太陽光の放射量の値を前掲(1)、(2)式の変換式に代入し、各バンドのラジオメトリック補正の絶対放射輝度値を求めた。

大気補正での各バンドの Haze 値は、可視域のバンド 1 ~ 3 を使い、シーン内にある風不死岳と千歳川の渓谷の暗黒条件下にある画素(理論上は可視域の反射値はゼロになる)を用いて、ヒストグラムから Starting Haze Value(SHV)を求め、また各バンドごとに相対散乱モデルの係数を乗じて求めた。3 シーンの Haze 値を表 - 5 に示す。表から Haze 値は大気のもや、散乱の大きい TM1 ~ 3 の可視域の波長帯で大きい。3 シーンとも雲のない決晴時のものであるが、この結果は天気の良い日は短波長(TM1 ~ 3)でのレイリー散乱が大きく、長波長(TM4, 5, 7)でのミー散乱は小さく影響が少ない(和達ほか 1976)ことと一致する。

### 2) 放射量の補正画像の作成。

この Haze 値を前掲(3)式で波長別の放射輝度値に変換し、(4)式に代入して絶対放射輝度値を求めた。4 月 11 日のシーンの森林域における補正なし(No-cor.)、ラジオメトリック補正(Radio.)、大気補正(Atmos.)の各波長ごとの輝度値の平均値と標準偏差を表 - 6 に示す。いずれの波長の平均値を比べても、未補正、ラジオメトリック補正、大気補正の順に値が低くなった。特に可視域ではラジオメトリック補正值が未補正の放射輝度値の 1/5 ~ 1/7 と小さくなるのに対し、大気補正值では 1/10 ~ 1/40 まで小さくなった。これは大気補正の絶対放射輝度値は表 - 5 の Haze 値を引く分だけラジオメトリック補正值より低くなったのが原因である。

各補正值をもとに可視域の TM1 に青、TM2 に緑、TM3 に赤を割り当て画像化したのが図 - 9 である。左から補正なし画像(No-cor.)、ラジオメトリック補正画像(Radio.)、大気補正画像(Atmos.)の 3 種である。画像上からも、補正なし画像、ラジオメトリック補正画像、大気補正画像の順にシャープさが増していることが判読できる。



図-8 3種類の地図投影法による幾何補正画像  
NN:最近隣内挿法 CC:キュービック・コンボリューション法 BL:バイ・リニア法

Fig.8 Geometric correction images using three different methods.

NN:Nearest Neighbor CC:Cubic Convolution  
BL:Bi-Linear method

図 - 5 3 シーンの Haze 値

Table 5 . Haze values derived from atmospheric correction in TM3 scenes .

Band	Haze value		
	APR.11	APR.27	APR.29
TM1	68	68	65.4
TM2	22	38	36.8
TM3	18	19.8	19.1
TM4	10	8	7.7
TM5	4	5	4.9
TM7	1	0.1	0.1



図-9 放射量補正処理画像  
 No-cor.:放射量補正なし Radio.:ラジオメトリック補正 Atmos.:大気補正  
 Fig.9 Calibration correction images.  
 No-cor.:No calibration correction Radio.:Radiometric correction Atmos.:Atmospheric correction

表 - 6 放射量補正による波長別反射輝度値の平均値と標準値

Table 6 . Mean values and standard derivwd from calibration corrections in Apr. 11 , 1955 of TM scene

Band	No-Cor <sup>1)</sup>		Radio <sup>2)</sup>		Atmos <sup>3)</sup>	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
TM1	82.4	6.6	11.7	1.0	2.1	0.9
TM2	33.2	4.1	9.5	1.3	3.4	1.3
TM3	37.0	7.2	8.7	1.8	4.7	1.8
TM4	52.9	7.8	9.5	1.5	8.0	1.5
TM5	63.9	23.1	14.2	5.5	14.1	5.5
TM7	28.6	12.5	10.1	4.6	9.5	4.6

### 第3節 画像の重ね合わせと統計処理

#### 1. デジタル空中写真と衛星画像の重ね合わせ

写真のデジタル解析で求めた格子ごとの針葉樹3種の樹冠占有面積割合と衛星画像から作成したNN法・BL法・CC法の3種類の内挿法及びラジオメトリック補正,大気補正,補正なしの3種類の処理について,画素をマッチングし,ネットワーク(LAN)を使って統計処理(SAS)の可能なワークステーションにファイル転送を行った(加藤1992)。以下,トドマツの統計処理結果について示し,カラマツ,エゾマツの解析結果は第5章第1節で示す。

#### 2. 統計処理

空中写真のデジタル解析の樹冠占有面積割合と衛星データの輝度値について,相関,決定係数( $r^2$ )を求めたのが表-7である。

例えば1990年4月11日のシーンのTM5のNN法の大気補正值(Atmos.)と疎密度との $r^2$ は0.260で,1%有意で統計的に相関が認められる。表ではシーンごとに各手法の中で,最も高い $r^2$ を太字で示した。それによれば前述のシーンの大気補正と疎密度の最も高い値はTM5であり,3種類の内挿法では3シーンとも $r^2$ にCC法>BL法>NN法の傾向が見られる。また $r^2$ の最高値は4月27日のシーンにおいて,CC法を用い大気補正したときの植生指数TVIの0.528であった。 $r^2$ が0.5以上は極めて高い相関であり,この因子だけで十分説明できる寄与率とされている。

##### 1) 3種類の地図内挿法の分散分析と検定

どの地図投影法が疎密度の推定に有効か統計的に調べるため,表-7の決定係数( $r^2$ )をアークサイン変換(正規化)し,SASを使って三元配置のLSD法を用い分散分析を行った(表-8-1)。地図投影法の処理方法間で有意差があるか検定した結果,いずれもF値に有意差が認められた。その順位は3シーンともCC法が最も高くaクラス,BL法は4月11日,4月27日でaクラスだったが,5月29日ではcクラス,NN法はいずれもbクラスであった。同じ文字間で結ばれた群間(クラス)の平均値の差は5%有意でないことから,樹冠疎密度を推定するにはCC法が最も良いことが統計的に認められた。

##### 2) 有効波長帯・植生指数の分散分析と検定

波長帯(バンド)選択の結果(表-8-2)では,F値が0.1%水準と極めて有意差が大きく,樹冠疎密度の推定にバンドの選択が重要であることが認められた。4月11日シーンではTM5がaクラス, TM7がb, TM4と4つの植生指数がc, TM3とND43がd, TM3とBri.がe, TM2とTM1がfクラスの順であった。また4月27日では植生指数のT・ND43・BR・TM3がaクラス, TM7・TM5・TM2がb, TM5・TM2・TM1がc, TM4とND53がd, Bri.がeクラスの順で, 5月29日はTM4とBri.がaクラス, TM5がb, TM7とBRがc, 4つの植生指数がd, TM2とTM1がe, TM3がfクラ

表 -7 トドマツの樹冠占有割合と補正した輝度値および植生指数との決定係数 ( r<sup>2</sup> )

Table 7. Calibration r<sup>2</sup> results of the relationship rates of Abies crown occupied area transformd band reflectances and vegetation indices.

	NN			CC			BL		
	No-cor <sup>6)</sup>	Radio <sup>7)</sup>	Atmos <sup>8)</sup>	No-cor .	Radio .	Atmos .	No-cor .	Radio .	Atmos .
APR . 11 , 1990 Sample No . = 108									
Band									
TM1	0.014	0.011	0.014	0.008	0.009	0.009	0.033	0.038**	0.037*
TM2	0.010	0.013	0.011	0.014	0.014	0.014	0.025	0.025	0.025
TM3	0.053*	0.056**	0.050*	0.074**	0.074**	0.074**	0.109**	0.108**	0.108**
TM4	0.094**	0.090**	0.093**	0.134**	0.135**	0.135**	0.133*	0.131**	0.133**
TM5	0.256**	0.256**	0.260**	0.304**	0.296**	0.295**	0.302**	0.260**	0.259**
TM7	0.211**	0.195**	0.220**	0.246**	0.250**	0.250**	0.192**	0.216**	0.220**
Vegetation Index									
BR <sup>1)</sup>	0.089**	0.087**	0.072**	0.120**	0.121**	0.115**	0.137**	0.141**	0.137**
ND43 <sup>2)</sup>	0.086**	0.087**	0.071**	0.114**	0.114**	0.101**	0.129**	0.136**	0.129**
ND53 <sup>3)</sup>	0.289**	0.293**	0.034	0.327**	0.327**	0.028	0.008	0.265**	0.008
TVI <sup>4)</sup>	0.084**	0.085**	0.069**	0.112**	0.013**	0.099**	0.177**	0.135**	0.177**
Bri. <sup>5)</sup>	0.002	0.041*	0.074	0.004	0.069**	0.113**	0.109**	0.062**	0.109**
APR . 27 , 1990									
TM1	0.138**	0.138**	0.139**	0.194**	0.322**	0.309**	0.300**	0.294**	0.284**
TM2	0.282**	0.315**	0.320**	0.014	0.382**	0.394**	0.341**	0.325**	0.338**
TM3	0.296**	0.290**	0.286**	0.510**	0.510**	0.515**	0.432**	0.384**	0.418**
TM4	0.095**	0.094**	0.095**	0.156**	0.167**	0.169**	0.225**	0.217**	0.214**
TM5	0.216**	0.216**	0.054**	0.393**	0.391**	0.393**	0.324**	0.339**	0.344**
TM7	0.199**	0.199**	0.197**	0.423**	0.426**	0.427**	0.367**	0.365**	0.369**
BR	0.333**	0.326**	0.305**	0.504**	0.500**	0.453**	0.456**	0.418**	0.401**
ND43	0.327**	0.319**	0.309**	0.524**	0.527**	0.525**	0.467**	0.429**	0.439**
ND53	0.063**	0.070**	0.058**	0.105**	0.109**	0.100**	0.095**	0.126**	0.087**
TVI	0.324**	0.317**	0.307**	0.527**	0.527**	0.528**	0.469**	0.430**	0.440**
Bri .	0.009	0.019	0.047*	0.027	0.078**	0.084**	0.016	0.063**	0.120**
MAY . 29 , 1990									
TM1	0.127**	0.103**	0.205**	0.203**	0.186**	0.214**	0.185**	0.186**	0.151**
TM2	0.120**	0.124**	0.150**	0.154**	0.152**	0.157**	0.214**	0.213**	0.224**
TM3	0.058**	0.059**	0.083**	0.043*	0.043**	0.043*	0.053*	0.053**	0.038*
TM4	0.305**	0.304**	0.385**	0.386**	0.387**	0.385**	0.336**	0.272**	0.336**
TM5	0.289**	0.288**	0.346**	0.404**	0.404**	0.406**	0.134**	0.132**	0.134**
TM7	0.305**	0.294**	0.278**	0.381**	0.378**	0.378**	0.085**	0.083**	0.089**
BR	0.264**	0.260**	0.079**	0.369**	0.368**	0.145**	0.286**	0.239**	0.102**
ND43	0.261**	0.256**	0.078**	0.361**	0.358**	0.138**	0.285**	0.164**	0.104**
DN53	0.255**	0.256**	0.140**	0.375**	0.377**	0.225**	0.123**	0.127**	0.079**
TVI	0.261**	0.255**	0.078**	0.360**	0.357**	0.137**	0.285**	0.158**	0.104**
Bri	0.304**	0.302**	0.324**	0.322**	0.322**	0.324**	0.325**	0.272	0.322**

\* : P < 0.05 \* \* P < 0.01

1) BR = TM4/TM3 2) ND43 = ( TM4-TM3 ) / ( TM4+TM3 ) 3) ND53 = ( TM5-TM3 ) / ( TM5+TM3 ) 4) TVI = ( ND+0.5 )<sup>0.5</sup>

5) Bri = ( TM3+TM4 )<sup>0.5</sup> 6) No-cor : No correctio 7) Radiometric correctio 8) Atmoa : Atmpsheric correction

スという順であった。この結果から、以下のことが分かった。

ア．樹木の開葉時期の5月29日では、4月11日、27日とは異なりTM4,植生指数のBri.が高く、可視域のTM1~3が極端に低い。

イ．植生指数はシーンによってばらつきがあり、これを使えばよいという指数は存在しなかった。ほとんどの指数がTM3とTM4の演算比を用いていることから、概して単バンドのTM3, TM4よりr<sup>2</sup>値が低くなった。また植生指数のr<sup>2</sup>値が高くなるのはTM3とTM4のr<sup>2</sup>値が高い場合である。

ウ．3シーンに共通して有効な波長帯や植生指数は存在しなかったが、表7、8から一つの傾向が読み取れ、順位の高いのはTM4,5,7の近・中間赤外線域、次に植生指数のグループであり、可視域のTM1~3は全体に低い傾向が見られる。

そこで性質の同質な上記のグループ化が可能かどうか検定したところ、いずれのシーンもグループ間で有意になり、近・中間赤外線域、植生指数、可視域の順になった。以下、可視域、近・中間赤外線域、

植生指数ごとに分散分析を行った。

3) 放射量補正の分散分析と検定

可視域, 近・中間赤外線域, 植生指数ごとに放射量補正の分散分析を行い, まとめたのが表 - 9 である。

可視域(Vis.)と近・中間赤外線域(Inf)ではどのシーンにおいても有意差はないが, 5月29日の植生指数(VI)では有意差が認められ, その順位は放射量補正なしが a クラス, ラジオメトリック補正が b クラス, 大気補正 c クラスとなり, 放射量補正を行うことによって精度が落ちることがわかった。これは比演算によって画像のラジオメトリック, 散乱などのノイズを分子と分母で相殺する植生指数の特徴を裏付けるものといえる。

4) 外周画素の削除の効果

3段階の外周画素の削除とトドマツ樹冠占有面積割合との  $r^2$  結果をまとめ, 4月27日について記載したのが表 - 10 である。左から 99 個, 90 個, 70 個の画素数における  $r^2$  を示す。108 個すべての画素を使用した表 - 7 の CC 法では  $r^2$  が 0.5 を示すのは少なかったが, 表 - 10 では同法でも大部分の  $r^2$  が 0.5 を超えている。またサンプル画素数が減るにしたがって  $r^2$  が大きくなり, 特に外周画素をすべて省いたサンプル数 70 個では 0.6 ~ 0.7 と高い値を示した。また大部分が 1% 有意となった。

外周画素の削除効果を検定するため, 同様に  $r^2$  をアークサイン変換し, 3シーンごとの分散分析を行ったのが表 - 11 である。いずれのグル

表 - 8 表 - 7 の分散分析による検定結果  
Table 8. T-test of the following with anova analysis

1.Geometric corrections 2.TM bands and vegetation indices.

1. 内挿法

	APR.11	APR.27.	MAY.29
NN	b	b	b
CC	a	a	a
BL	a	a	c
F value	6.7*	44.68***	138.05***

2. バンドと植生指数

Band	APR.11	APR.27.	MAY.29
TM1		f	c
TM2		f	bc
TM3	de	a	e
TM4	c	d	a
TM5	a	bc	b
TM7	b	b	c
Vegetation Index			
BR	c	a	cd
ND43	cd	a	d
ND53	c	d	d
TVI	c	a	d
Bri.	e	e	a
F value	50.78***	45.11***	111.08***

\* : P < 0.05 \* \* : P < 0.01 \* \* \* : P < 0.001  
同じ文字間で結ばれた群間の平均値の差は 5% 有意でない。

表 - 9 放射量補正の分散分析による検定結果  
Table 9. T-test of calibration correction with anova analysis

Method	APR.11			APR.27			MAY.29		
	Vis	Inf	Vi	Vis	Inf	VI	Vis	Inf	Vi
No-cor	a	a	ab	a	a	a	a	a	a
Radio.	a	a	a	a	a	a	a	a	b
Atmos.	a	a	b	a	a	a	a	a	c
F value	0.41	0.45	3.1	2.1	0.48	0.89	2.4	2.64	190**

\* \* : P < 0.01

同じ文字間で結ばれた群間の平均値の差は 5% 有意でない

表 - 10 隣接ピクセルの段階的削除の  $r^2$  結果

サンプル画素数 99,90,70 個解析には 1990 年 4 月 27 日のシーンで CC 法を使い幾何補正された画像を使用した。

Table 10. T-test of calibration correction with anova analysis calibration  $r^2$  results of excluded neighbor pixels for noise

corection.Sample number=99,91,70pixels. Image files rectified by the cubic-convolution method were used for noise correction in Apr.27,1990 of the TM scene.

Band	Sample No.=99			No.=90			No.=70		
	No-cor.	Radio.	Atmos.	No-cor.	Radio.	Atmos.	No-cor.	Radio.	Atmos.
TM1	0.216**	0.367**	0.347**	0.246**	0.423**	0.410**	0.175**	0.394**	0.368**
TM2	0.014	0.397**	0.407**	0.414	0.471**	0.478**	0.516**	0.506**	0.516**
TM3	0.560**	0.561**	0.566*	0.610**	0.613**	0.614**	0.661**	0.669**	0.661*
TM4	0.183**	0.174**	0.200**	0.153**	0.169**	0.169**	0.188**	0.203**	0.202**
TM5	0.394**	0.361**	0.394**	0.593**	0.591**	0.593**	0.635**	0.633*	0.634**
TM7	0.420**	0.422**	0.424**	0.601**	0.603**	0.602**	0.638**	0.640**	0.639**
Vegetation Index									
BR	0.574**	0.574**	0.517**	0.607**	0.609**	0.558**	0.663**	0.668**	0.594**
ND43	0.592**	0.596**	0.588**	0.627**	0.633**	0.629**	0.689**	0.699**	0.681**
ND53	0.103**	0.108**	0.190**	0.334**	0.342**	0.143**	0.338**	0.348**	0.137**
TVI	0.594**	0.598**	0.590**	0.630**	0.635**	0.631**	0.693**	0.702*	0.684**
Bri.	0.028	0.044	0.100**	0.092**	0.104	0.063*	0.068*	0.068*	0.088*

\* : P < 0.05 \* \* P < 0.01

表 -11 表 -10 の分散分析による検定結果  
Table 11. T-test of Table-10 with anova analysis.

Sample No.	APR.11			APR.27,			MAY.29		
	Vis.	Inf.	VI	Vis.	Inf.	VI	Vis.	Inf.	VI
108	d	b	c	b	c	c	c	d	d
99	a	a	a	b	c	bc	a	b	c
90	b	a	a	ab	b	b	b	c	b
70	c	a	b	a	a	a	b	a	a
F value	9999***	145.4***	213***	4.3*	2425***	9.8***	475***	8519***	874***

\* : P<0.05 \*\* : P<0.01 \*\*\* : P<0.001  
同じ文字期で結ばれた群間の平均値の差は5%有意でない。

- プも F 値で有意差が認められた。サンプル数の違いによるピクセル除去の効果は4月11日、4月27日、5月29日のシーンの可視域(Vis.), 近・中間赤外線域(Inf.), 植生指数(VI)のいずれも、

108個の全画素使用が最下位のクラスとなり、外周画素の削除の効果認められる。また4月27日の各グループ、5月29日の近・中間赤外線域、植生指数は外周画素をすべて削除した70個の画素数がaクラスであった。

以上のことから目的とする地上データと回帰推定などの画素対応を行う場合には、隣接する林分の影響を受けている外周画素を削除することが必要と考えられる。

5) フィルタリング処理の効果と画像の作成  
ノイズ除去のもう一つの方法であるフィルタリング処理について画像を作成した上で、その効果を検討した。使用したフィルターは平均化処理(Average), ローパス(Low-Pass) ツイパス(High-pass)の3つの特徴の異なる3画素×3画素の大きさのフィルターである。またフィルタリング処理に用いた画像は表-10において最も決定係数(r<sup>2</sup>)の高



図-10 3種類のフィルタリング処理画像  
a: 平均化処理 b: ローパス c: ハイパス  
Fig.10 Filtering correction images using three different methods.  
a: Average filter b: Low-pass filter c: High-pass filter

かったCC法の4月27日のシーンで、サンプル画素数70個の3種類の放射量補正画像である。図-10はその結果を示したものであるが平均化処理とローパス処理画像がぼやけ、反対にハイパスは林縁がシャープとなっている。

フィルタリング処理した画像とトドマツの樹冠疎密度とのr<sup>2</sup>について結果をまとめたのが表-12である。左から平均化処理, ローパス, ハイパスフィルター処理のr<sup>2</sup>を示す。例えば, TM3のラジオメトリック補正の平均化処理のr<sup>2</sup>は0.610, ローパスでは0.561, ハイパスでは0.344になった。一方, フィル

表 -12 フィルタリングの効果

解析に使用した画像は1990年4月27日のシーンでCC法を使い幾何補正され、隣接画像を削除した画像(画素数70個)である。

Table 12. Calibration r2 results of filtering methods for noise correction. Image files rectified by the cubic-convolution method were used for filtering method in Apr.27, 1990 of the TM scene. Sample number=70pixels.

Band	Average filter			Low-pass filter			High-pass filter		
	No-cor.	Radio.	Atmos.	No-cor.	Radio.	Atmos.	No-cor.	Radio.	Atmos.
TM1	0.258**	0.386**	0.312**	0.315**	0.382**	0.402**	0.202**	0.187**	0.135**
TM2	0.407**	0.478**	0.483**	0.470**	0.555**	0.538**	0.267**	0.246**	0.214**
TM3	0.592**	0.610**	0.575**	0.570**	0.561**	0.601**	0.382**	0.344*	0.477**
TM4	0.368**	0.382**	0.368**	0.300**	0.346**	0.349**	0.016	0.023	0.016
TM5	0.501**	0.502**	0.506**	0.503**	0.507**	0.499	0.499**	0.466**	0.508**
TM7	0.512**	0.520**	0.510**	0.505**	0.508**	0.517**	0.527**	0.512**	0.556
Vegetation Index									
BR	0.585**	0.610**	0.576**	0.570**	0.563**	0.594**	0.065*	0.014	0.168**
ND43	0.589**	0.615**	0.584**	0.577**	0.565**	0.604**	0.311**	0.287**	0.469**
ND53	0.261**	0.262**	0.209**	0.265**	0.329**	0.282**	0.162**	0.119**	0.119**
TVI	0.589**	0.615**	0.584**	0.578**	0.565**	0.604**	0.337**	0.306**	0.466**
Bri.	0.020	0.159**	0.257**	0.043	0.150**	0.234**	0.054*	0.001	0.001

\* : P<0.05 \*\* : P<0.01

ター処理しなかったときの画素数70個の $r^2$ は表-10に示すように0.669である。3種類のフィルタリング処理を行った $r^2$ は、フィルタリング処理をしていない表-10に示すバンド・植生指数の $r^2$ より低く、特にエッジの強調であるハイパスフィルターはかなり低くなった。

フィルタリング処理の効果を検定するため、同様の分散分析を行った(表-13)。F値は0.1%水準と高く、フィルター処理間で有意差が認められた。処理方法間の順位はフィルタリングなし(No nlt・ng)がいずれもaクラスの上位で、平均化処理、ローパス、ハイパスの順となり、本研究の樹冠占有面積割合の推定にはフィルタリング処理が有効でないことが明らかになった。

表-13 表12の分散分析による検定結果  
Table 13. T-test of Table-12 with anova analysis.

Method	Apr.27		
	Vis.	Inf.	VI
Average	a	b	b
Low pass	a	c	b
High pass	b	d	c
No filtering	a	a	a
F value	40.6***	484***	36.8***

\*: P<0.05 \*\* : P<0.01 \*\*\* : P<0.001  
同じ文字圏で結ばれた群間の平均値の差は5%有意でない。

## 第5章 針葉樹人工林の樹冠疎密度区分モデルと画像作成

### 第1節 針葉樹3種のモデルの作成

以上の結果からトドマツ、カラマツ、エゾマツについて、樹冠占有面積割合と最も $r^2$ の高かった手法のバンド・植生指数を3シーンそれぞれ選択し、疎密度区分の推定式と処理条件を求めた。ここでは推定式と処理条件を一括して疎密度区分のモデルと呼ぶこととする。

#### 1. トドマツ人工林

4月27日のシーンでは表-10より、外周画素をすべて省いた画素数(70個)のラジオメトリック補正の植生指数(TVI)が最も $r^2$ が高かった( $r^2=0.702$ )。そこで該当する衛星データの画像ファイルからTVIのみを選択し、再度トドマツの樹冠占有面積割合との回帰式を求め、さらに樹冠占有面積割合の10%単位にレベルスライスして対応する輝度値を求めた。

4月27日のシーンの回帰式は

$$Todo=674.8 \times TVI-628 \quad r=0.838^{***} \quad (P<0.001) \text{ である。}$$

Todo : 1画素(30m x 30m)当りのトドマツの樹冠占有面積割合(%)

4月11日のシーンでは、70個の画素数のラジオメトリック補正のTM5が最も $r^2$ が高く、以下の回帰式となった。

$$Todo = -8.75859 \times TM5 + 138.9 \quad r = -0.797^{***} \quad (P < 0.001)$$

5月29日のシーンは70個の画素数のラジオメトリック補正のTM4が高く、回帰式は

$$Todo = -4.92424 \times TM4 + 214.3 \quad r = -0.764^{***} \quad (P < 0.001) \text{ である。}$$

#### 2. カラマツ人工林

3シーンとも同様の傾向を示しているため、ここでは4月27日のシーンについて説明し、他の4月11日と5月29日の2シーンについてはモデル及び疎密度区分画像を示す。

##### 1) 外周画素の削除

外周画素を含めた135個と外周を省いた100個の格子と衛星データの画素対応を行い、相関・決定係数( $r^2$ )を算出したのが表-14のaである。どのバンド・植生指数においてもトドマツと同様に外周画素を省いた方が $r^2$ は大きくなった。特にTM4では0.299から0.471へ、植生指数のBRが0.111から0.242に、ND43が0.109から0.231に、TVIが0.108から0.227と $r^2$ が0.1以上大きくなり、外周画素の削除の効果が認められた。

表 -14 カラマツの樹冠占有割合と補正処理した輝度値および植生指数との決定係数 ( r<sup>2</sup> )

**Table 14.** Calibration r<sup>2</sup> results of the relationship rates of *Larix kaempferi* crown occupied area and transformd band reflectances and vegetation indices. a.Exclusion of neighboring pixles b.Geometric corrections c. Calibration corrections

	a . 外周画素の削除		b . 内挿法			c . 放射量補正		
	135	100	NN	CC	BL	No-cor <sup>1)</sup>	Radio <sup>2)</sup>	Atmos <sup>3)</sup>
TM1	0.208**	0.264**	0.066*	0.264**	0.261**	0.264**	0.317**	0.374**
TM2	0.135**	0.185**	0.063	0.185**	0.166**	0.185**	0.232**	0.240**
TM3	0.092*	0.118**	0.103**	0.118**	0.124**	0.118**	0.120**	0.117**
TM4	0.299**	0.471**	0.161**	0.471**	0.207**	0.471**	0.464**	0.470**
TM5	0.281**	0.375**	0.105**	0.375**	0.202**	0.375**	0.267**	0.267**
TM7	0.142**	0.299**	0.111**	0.142**	0.120**	0.142**	0.026**	0.030
Vegetation Index								
BR <sup>4)</sup>	0.111**	0.424**	0.156**	0.241**	0.132**	0.241**	0.233**	0.190**
ND43 <sup>5)</sup>	0.109**	0.231**	0.150**	0.231**	0.129**	0.231**	0.223**	0.176**
ND53 <sup>6)</sup>	0.203	0.236**	0.189**	0.236**	0.234**	0.236**	0.223**	0.130**
TVI <sup>7)</sup>	0.108**	0.227**	0.149**	0.227**	0.127**	0.227**	0.218**	0.172**
Bri <sup>8)</sup>	0.117**	0.465	0.208**	0.465**	0.279**	0.465**	0.378**	0.426**

\* : P < 0.05 \*\* : P < 0.01

1) No-cor : No\*correction 2) Radio : Radiometric correction 3) : Atmos : Atmospheric correction 4) BR = TM4/TM3

5) ND43 = ( TM4-TM3 ) / ( TM4+TM3 ) 6) ND53 = ( TM5-TM3 ) / ( TM5+TM3 ) 7) TVI = ( ND+0.5 )<sup>0.5</sup>

## 2) 内挿法

3種類の内挿法ごとに、樹冠占有割合と衛星データのバンド・植生指数について r<sup>2</sup> を求めた ( 表 - 14 の b )。表から r<sup>2</sup> に関し、C C 法 > B L 法 > N N 法の傾向が見られた。各処理方法の r<sup>2</sup> の最高値は太字で示した。表から r<sup>2</sup> の最高値は C C 法の TM4 で 0.471 であった。

## 3) 放射量補正

放射量の補正なし (No-cor.)、ラジオメトリック補正 (Radio.)、大気補正 (Atmos.) ごとの r<sup>2</sup> を算出した ( 表 - 14 の c )。可視域の TM1 では補正なしの r<sup>2</sup> が 0.264 からラジオメトリック補正では 0.317 に、大気補正では 0.374 に値が大きくなった。同様に TM2 でも補正なしの 0.185 から 0.232、0.240 とラジオメトリック補正や大気補正の効果が表れている。近・中間赤外線域の TM4,5,7、植生指数は放射量補正の効果はあまり見られず、逆に r<sup>2</sup> の値を下げている。

以上の統計結果はいずれもトドマツの場合と同じ結果であった。

## 4) 疎密度区分の推定式

3シーンごとに同様の手順を踏み、カラマツの樹冠占有割合と r<sup>2</sup> の最高値の処理方法から推定式を求めた ( 表 - 15 )。4月11日では植生指数 Bri. ( r = -0.798\*\*\* )、4月27日は TM4 ( r = -0.686\*\*\* )、5月29日は植生指数 BR ( r = 0.745\*\*\* ) が変数として最高値であった。得られた3シーンの推定式の変数は異なっており、それは春先の芽ぶきから開葉までの生態的な違いが影響したものと考えられる。

表 -15 カラマツの樹冠占有割合を求める推定式と処理方法

**Table15.** The optimun equation models and data transformation methods for estimating *Larix Kaempferi* crown occupied area.

推定式	r	衛星データの処理方法			
		内挿法	放射量	ノイズ補正	フィルタリング
TPR.11	r = 0.798***	CC 法	未補正	外周削除	効果無し
K a r a = -6.95 × Bri.+434					
APR.27	r = -0.686***	CC 法	未補正	外周削除	効果無し
K a r a = -6.07 × TM4 + 354.9					
MAY.29	r = -0.745***	CC 法	Radio.法	外周削除	効果無し
K a r a = 49.34 × BR-83.2					

Kara : 1 画素 ( 30m × 30m ) 当りのカラマツの樹冠占有面積割合 ( % )

Bri. = ( TM3<sup>2</sup> + TM4<sup>2</sup> ) 0.5 BR = TM4 ÷ TM3 \*\*\* P < 0.001

### 3. エゾマツ人工林

4月27日の統計結果をもとに説明し、4月11日と5月29日の2シーンについてはモデル及び疎密度区分画像を示す。

#### 1) 外周画素の削除

外周画素を含めた135個と外周画素を省いた100個について、エゾマツの樹冠占有割合と衛星データのバンド・植生指数について $r^2$ を算出したのが表-16のaである。トドマツ、カラマツと同様に外周画素を省いた方がバンド・植生指数とも $r^2$ は高い。すなわち樹種に関係なく、外周画素は隣接する林分の影響を受けるため、データ照合の精度を落とすことがわかった。

#### 2) 内挿法

3種類の内挿法の比較(表-16のb)では、いずれのバンド・植生指数においてもCC法の $r^2$ が高く、植生指数のND43以外はCC法>BL法>NN法の順になった。この結果はトドマツ、カラマツと同様であり、針葉樹3種の地図投影法ではいずれもCC法が優位であった。

#### 3) 放射量補正

放射量の補正結果を表-16のcに示す。可視域のTM1とTM2では補正の効果が表れ、 $r^2$ の値は大気補正>ラジオメトリック補正>補正なしの順である。近・中間赤外線域では補正なしが高い。植生指数ではラジオメトリック補正>補正なし>大気補正の順になった。以上の補正処理の結果は4月11日と5月29日の2シーンについても同様であった。

表-16 エゾマツの樹冠占有割合と補正処理した輝度値および植生指数との決定係数( $r^2$ )

Table16. Calibration  $r^2$  results of the relationship rates of Picea jezoensis crown occupied area and transformd band reflectances and vegetation indies. a.Exclusion of neighboring pixels b.Geometric corrections c.Calibration corrections

	a. 外周画素の削除		b. 内挿法			c. 放射量補正		
	135	100	NN	CC	BL	No-cor <sup>1)</sup>	Radio <sup>2)</sup>	Atmos <sup>3)</sup>
TM1	0.398**	0.449**	0.385*	0.449**	0.412**	0.449**	0.453**	0.456**
TM2	0.366**	0.389**	0.281**	0.389**	0.352**	0.389**	0.426**	0.437**
TM3	0.395**	0.426**	0.365**	0.426**	0.415**	0.426**	0.452**	0.450**
TM4	0.074*	0.105**	0.098**	0.105**	0.102**	0.105**	0.110**	0.115**
TM5	0.314**	0.327**	0.270**	0.327**	0.288**	0.327**	0.322**	0.319**
TM7	0.349**	0.351**	0.346**	0.351**	0.350**	0.351**	0.346**	0.348**
Vegetation Index								
BR <sup>4)</sup>	0.436**	0.510**	0.421**	0.510**	0.483**	0.510**	0.532**	0.455**
ND43 <sup>5)</sup>	0.501**	0.525**	0.501**	0.525**	0.427**	0.525**	0.544**	0.497**
ND53 <sup>6)</sup>	0.141	0.137**	0.127**	0.137**	0.128**	0.137**	0.544**	0.297**
TVI <sup>7)</sup>	0.108**	0.528**	0.428**	0.528**	0.504**	0.528**	0.547**	0.502**
Br <sup>8)</sup>	0.221**	0.262**	0.233**	0.262**	0.253**	0.262**	0.332**	0.292**

\* :  $P < 0.05$  \*\* :  $P < 0.01$

1) No-cpr : No-correction 2) Radio : Radiometric correctopn 3) : Atmospheric correction 4) BR = TM4/TM3

5) ND43 = (TM4-TM3) / (TM4 + TM3) 6) (TM5-TM3) / (TM5 + TM3) 7) TVI = (ND + 0.5)<sup>0.5</sup>

表-17 エゾマツの樹冠占有割合を求める推定式と処理方法

Table17. The optimum equation models and data trnsfomation methods for estimating Picea jezoensis crown occupied area.

		衛星データの処理方法			
		内挿法	放射量	ノイズ補正	フィルタリング
APR. 11	$Ezo = 82.56 \times BR - 25.8$	CC法	未補正	外周削除	効果無し
$r = 0.742***$					
APR. 27	$Ezo = 316.3 \times TVI - 187.9$	CC法	未補正	外周削除	効果無し
$r = 0.739***$					
MAY. 29	$Ezo = 37.9 \times TM3 + 250.2$	CC法	Radio法	外周削除	効果無し
$r = 0.723**$					

Ezo : 1画素(30m×30m)当りのカラマツの樹冠占有面積割合(%)

BR. = TM4 ÷ TM3 TVI = {(TM4-TM3) ÷ (TM4+TM3) + 0.5}<sup>0.5</sup> \*\*\*P<0.001



#### 4) 疎密度区分の推定式

4月27日のシーンで $r^2$ の最高値はラジオメトリック補正で、CC法の投影変換した植生指数TVIは $r^2 = 0.547^{**}$ であった。同様の関係を4月11日、5月29日から求め、3シーンごとにエゾマツの樹冠占有割合と処理方法から推定式を計算した(表-17)。4月11日では植生指数BR( $r = 0.742^{***}$ )、4月27日はTVI( $r = 0.739^{***}$ )、5月29日はTM3( $r = 0.723^{***}$ )で、いずれも寄与率は50%を超えている。

処理方法はCC法、外周画素削除、ラジオメトリック補正と共通しているが、推定式に用いる変数はカラマツと同様にそれぞれのシーンで異なっていた。

### 第2節 樹冠疎密度区分画像の作成

#### 1. トドマツ人工林

それぞれのシーンを80林班について取り出し、CC法の内挿法およびラジオメトリック補正処理したTM3、TM4、TM5の3バンドに青・緑・赤を割り当て、フォルスカラー画像を作成して背景画像とした。そして調査地のトドマツ人工林のみを白黒濃淡の疎密度区分表示で重ねあわせたのが図-11である。調査地のトドマツ人工林は左下の四角で囲まれた範囲で、凡例の疎密度コードを右側に示した。グレイスケールの表示は濃くなるにしたがって疎密度が高くなる。

衛星データから作成した区分画像は、3シーンとも調査地の左上部と下部が密で、右側の中間部は疎で示され、空中写真が表わした樹冠疎密度(図-7)とよく対応している。また衛星から推定した疎密度の確からしさは(寄与率)はいずれのシーンも60%である。

#### 2. カラマツ人工林

図-4で示した316林班のカラマツ人工林を含む調査地について、4月11日、4月27日、5月29日の3シーンのフォルスカラー画像をトドマツと同様に作成し、表-15のモデルをもとに316林班の調査地のカラマツ人工林を疎密度区分表示したのが図-12である。中央の4月27日のシーンについて図-4の空中写真と対応する箇所、すなわちアカエゾマツ造林地(a)、若齢造林地(b)、林道(c)、土場跡(d)をマークした。背景のフォルスカラー画像では5月29日は画像全体が開葉しているため緑色を帯びている。一方、4月11日、4月27日は開葉していないため、画像全体が茶褐色である。常緑のアカエゾマツ造林地(a)は4月11日、4月27日においても暗緑色を呈している。カラマツの疎密度区分では林道(c)に沿って土場跡(d)の裸地など疎な林分については3シーンとも同様の表示となり、またカラマツの密な箇所は4月11日、4月27日は同じであるが、5月29日では一部右上部が密になっている。これは開葉した広葉樹の影響を受けて、実際より密になったためと考えられる。

#### 3. エゾマツ人工林

54林班のエゾマツ人工林に関して、表-17の推定式をもとに疎密度区分を行い、4月11日、4月27日、5月29日の3シーンのフォルスカラー画像に重ねたのが図-13である。3シーンのモデルは観測時期の違いから最適なバンドとパラメータが異なっているが、前処理方法は内挿法ではCC法、放射量補正ではラジオメトリック補正、外周画素の削除など共通の処理条件であった。

図-13の衛星データから求めた3シーンの疎密度区分結果は同様の疎密度の配色パターンであり、また図-5の空中写真上で確認したエゾマツが疎な箇所(a)とエゾマツの密な林分(b)と対応している。従って、観測時期が異なる衛星データであっても、本手法によってトドマツ、カラマツ、エゾマツ人工林の疎密度区分の推定が可能なが分かった。

### 第3節 モデルの他地域への応用

以上、求めたモデルは、1つのシーン(185km×185km)の全域あるいは同一観測日の他のシーンに応用できることから極めて広域の疎密度区分画像を作成できる。一例として道立林業試験場森林施業・生

態研究林(中央研究林)のトドマツ人工林に関し、疎密度区分画像を作成した。

## 1. 応用地域の概要

衛星データの解析した範囲は岩見沢道有林管理センターで使用している5万分の1林相図と同じ範囲で、岩見沢市、三笠市、月形町、美唄市、奈井江町、砂川市、栗山町、栗沢町を含む石狩川水系の市町村が含まれる。そのうち疎密度区分の対象とした地域は岩見沢道有林管理センター所管の三笠市、岩見沢市、栗沢町にまたがる63~90林班(約8000ha)で、平成6年度、道立林業試験場森林施業・生態研究林(中央研究林)として設定されている。この地域は地形が険しく、林床にクマイザサおよび標高500mを超える箇所ではチシマザサが密生しており、夏場における現地調査は苛酷である。奥地と尾根筋の保護帯以外は天然林が伐採され、トドマツを中心とした針葉樹に転換されており、特に林齢25年以下の間伐対象小班が多いのが特徴である。現地調査によれば造林地の成績は一様でなく、地形、斜面方位、標高や土壌型によって小班内においても成績が異なり、また一部の造林地では霜や積雪などによる気象害や野鼠害を受け、標高の高い箇所などでは不成績林分も見られる(加藤1990a)。

## 2. 樹冠疎密度区分図(5万分の1)の作成

### 1) 応用地域の衛星データの前処理

前述の解析結果をもとに各バンドごとに最適な前処理方法を行った。すなわち1990年5月29日のランドサットTM画像の可視域に大気補正を、近・中間赤外線域にラジオメトリック補正を行い、地図投影法はCC法を用いて幾何補正を行った。

### 2) 対象地の輝度値の強調処理とモザイク処理

解析範囲の石狩川水系の全域から、対象地の8000haを含む岩見沢道有林管理センター所管の約2万haについて、画像上で容易に把握するため出力方法を改良し、対象地の輝度値の強調処理とモザイク処理を行った。

モザイク処理に使用した地図は岩見沢道有林管理センター5万分の1林相図を使い、林班界の外郭線、小班界をデジタル入力した。最初に補正された衛星画像から林班の外郭線をもとに対象地を切り出した。これを切り出し画像と呼ぶ。これまでの研究で森林域の強調処理は切り出し画像以外について9.5割に輝度値を下げ、モザイクで繋ぎ合わせる方法が最も見やすいことがわかっている(加藤1991,1992a)。しかし、今回の応用に際して、A0版サイズで出力すると森林以外の岩見沢市、三笠市の市街地や農地を含む石狩川水系が含まれることから、観測された輝度値の範囲が大きく、分散も大きいことがわかった。試行の結果、全体画像の輝度値を6.5割に下げ、また対象地の切り出し画像の輝度値はそのままにして、モザイクで繋ぎ合わせる方法が最も見やすいことが分かった。これを背景画像とした。

### 3) モデルから疎密度区分画像の作成

衛星画像から対象地のトドマツ小班のみを小班界をもとに切り出した。この切り出した小班の輝度値に対し、前述のトドマツのモデルをもとに演算を行い、疎密度区分の10分率の値に変更した。これを背景画像に重ねることによって衛星画像の上にトドマツ疎密度区分を表示した。

### 4) トドマツ人工林の樹冠疎密度区分図(A0版林相図)の作成

3)で作成した画像上に林道、水系、地名、番号などの地図情報を重ね合わせ、疎密度区分の凡例、縮尺、題名など5万分の1地図として脚色した。でき上がったのが図-14である。上から左下に向かって蛇行する石狩川は黒色を示し、周辺の青黒色の箇所は水田である。ピンク色は岩見沢市(a)、美唄市(b)、奈井江町(c)、砂川市(d)の市街地である。緑色を呈しているのが森林域で、前掲のモザイク処理によって、道有林のみ黄緑色で示され見やすくなっている。左上部は月形町の樺戸山系で、右下部に桂沢湖(e)、そして疎密度区分表示をした中央研究林が隣接する。従来の地図とは異なり、背景に衛星画像が

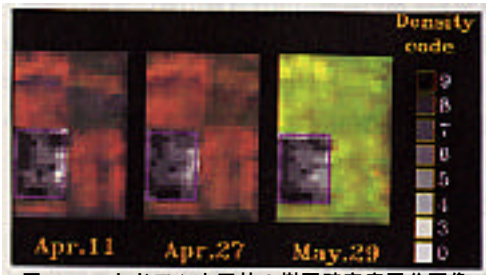


図 -11 トドマツ人工林の樹冠疎密度区分画像  
 Fig.11 Estimated images of crown densities of *Abies sachalinensis* plantations.

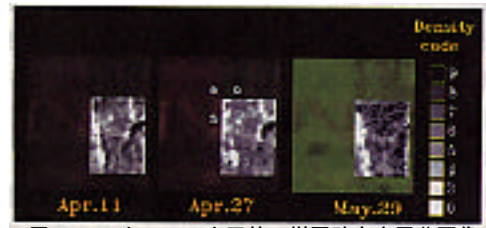


図 -12 カラマツ人工林の樹冠疎密度区分画像  
 Fig.12 Estimated images of crown densities of *Larix kaempferi* plantations.  
 a : *Picea glehnii* plantation b : young plantation c : forest road d : bare land ( old site of landing )

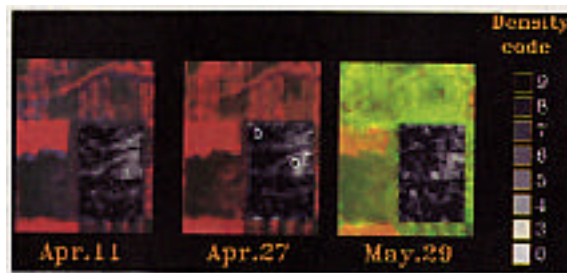


図 -13 エゾマツ人工林の樹冠疎密度区分画像  
 Fig.13 Estimated images of crown densities of *Picea jezoensis* plantations.  
 a : low density stand b : high density stand



図 -14 モデルの他地域への応用：中央研究林の疎密度区分図 (A0版・5万分の1)  
 Fig.14 Application of the crown density model to the other sites.

A crown density map ( A0 size & scale of 1 : 50000 ) of a experimental forest of Hokkaido Forestry Research Institute.  
 a : Iwamizawa b : Bibai c : Naie d : sunagawa e : Lake Katsurazawa



図 -15 疎密度区分図一部抜粋  
 Fig.15 A crown density map extracted from Fig.14.

あることから、街からどれくらいの位置に対象林分があるのか、他の林分の現況（緑の濃い箇所は閉鎖した針葉樹林、緑の薄い箇所は若齢造林地、鮮紅色は伐採地を含む裸地）もおおまかに把握できる。

研究林に関する部分を抜粋したのが図 - 15 である。トドマツ人工林のみ白黒濃淡の疎密度コードで表示している。地図情報が重なっていることから、各小班の位置と現況を同時に把握できる。なお、トドマツ人工林の疎密度においても疎密度は一樣でなく、濃い所と薄い所が混在している。

### 3. 疎密度区分図の精度検証

作成したトドマツ人工林の疎密度区分図の精度を検証した。縮尺 8 千分の 1 の空中写真から樹冠疎密度板（空中写真上で、樹冠疎密度を 10% 単位に測定する透明の OHP 用紙）を使用して、トドマツの密林分と疎林分から、それぞれ衛星画像の画素に

対応する箇所を 20 個選び、疎密度コード値を判読した。また衛星画像の疎密度区分図から対応する箇所（画素）の疎密度コード値を出力して、写真判読結果との対応関係を調べた。比較は 3 ~ 9 までの疎密度コード別区分と、疎密度コードの 7~9 を密、4~6 を中庸、3 以下を疎とする区分の 2 通りで行なった。

密林分のトドマツ人工林（84 林班 54 小班）について対応表にしたのが表 - 18 の(1)である。疎密度コード値の比較において、疎密度 9 が区分図では 15 箇所あるのに対して、写真判読では 13 箇所、2 箇所が誤分類であった。合計 20 箇所の比較の比較では 6 箇所が誤分類で疎密度コード別の整合率は 70% であった。一方、密・中庸・疎の区分の対応では誤分類は 2 箇所と減少し、整合率は 90% に向上した。

疎林分のトドマツ人口林（84 林班 58 小班）について同様に写真判読による対応を行ったのが表 - 18 の(2)である。疎密度コード 3 の疎林分は区分図と写真判読とも同じく 5 箇所であった。合計 20 箇所の対応関係では、誤分類が 4 箇所、疎密度コード別の整合率は 80% であった。また、密・中庸・疎の区分では誤分類はなくなり、整合率は 100% となった。

疎林分は密林分と比較して写真判読の面で区分しやすく、疎密度区分図との整合率も高い結果が出たが、密・中庸・疎で区分した場合には、疎密度コード別区分より、整合率がそれぞれ 20% も高くなり、疎林分の密・中庸・疎区分では全箇所一致(整合率 100%)した。

表 - 18 疎密度区分図の精度検証  
Table 18. Verification of accuracy of a estimated crown density map

(1) high density stand (2) low density stand

(1) 密区分					
疎密度コード	衛星の疎密度区分図	空中写真の判読区分	誤分類		
			コード別	密	疎
9	15	13	2	密	1
8	1	3	2		
7	2	3	1		
6	2	3	1	中庸	1
計	20	20	6		2
整合率					70% 90%

(2) 疎林分					
疎密度コード	衛星の疎密度区分図	空中写真の判読区分	誤分類		
			コード別	密	疎
9	1	1	0	密	0
8	2	2	1		
7	1	2	1		
6	4	3	1	中庸	0
5	3	4	1		
4	4	4	0	疎	0
3	5	5	0		
計	20	20	4		0
整合率					80% 100%

## 第 6 章 考 察

衛星データから森林の現況・変化を回帰推定する際には、地上参照データを得るため空中写真を判読した上で分類のトレーニングエリア（地上実験地域）を設定し、現地調査を行うことが多い。しかし衛星画像と空中写真をもとに衛星データと対応できるようにプロット位置を決め、画素サイズに合った大きさのプロット測量や毎木調査を行い、地上参照データを算出 (Katoh 1988) することは多大な労力を要

した。こうした労力を避けて、現状ではある程度の誤差は認めた上で写真判読で区分した植生図や現行の基本図をそのまま使い、地上参照データとすることが多い。しかし小班内における樹冠の疎密度の違いを画素単位で把握することは既存の植生図では対応できない。また写真判読で層化し、任意の大きさの格子ごとに疎密度を求めていく方法も判読の熟練が必要であり、サンプル数が多い場合には客観性にも劣る。さらに衛星画像とのUTM座標の位置合わせは反射実体鏡による判読では困難である。

そこで本研究では、空中写真のデジタル解析による中心投影の補正、画素サイズの格子作成と重ね合わせ、最尤法による分類等の手順を経て、格子ごとの針葉樹の樹冠占有面積割合を算出する方法を考案した。これによって空中写真から任意の場所の特定の樹種の樹冠占有面積割合をメッシュ単位に抽出することが可能になり、これまでの地上調査に変わる簡便なやり方で、労力的にも軽減できる見通しが得られた。但し、白黒空中写真の場合には、広葉樹と針葉樹の区別や針葉樹人工林への利用には適するが、広葉樹の樹種区分は難しく、また複層林や天然林などの樹冠の凹凸による影が生じる林分での適用は困難である。したがって、衛星データの利用に最も適する林地は、地上参照データとなる空中写真のデジタル解析が容易な、地形の影響のない平坦地に植栽された針葉樹人工林である。

衛星データの解析に際して、3種類の地図投影法を使い、疎密度との相関・適合度の検定を行った。その結果CC法、BL法、NN法の順に精度が低下した。このことに関し、これまではデータを壊さないNN法が最適と考えられていた。しかし画像の回転を伴う内挿法には位置ずれが生じて直線がギザギザになり、統計処理した結果からも他の2種の投影法に比べて精度が劣ることがわかった。これについては長(1993)の各種地図投影法の視覚による定性的評価でもCC法やBL法はNN法に比べエッジが強調され、判読が容易である。さらにCC法は画像がBL法よりシャープに見えることも報告されている。以上の結果から、林分内容を推定する際の投影法はCC法が最適と考えられた。

放射量の補正は、これまでの研究で、川の濁り水や湖沼の透明度などの水域情報解析において行われており、これらの解析には可視域の波長帯の大気補正が有効であると報告(Lathrop 1992)されている。しかし本研究で行った大気補正処理の効果では、可視域のTM1, TM2では若干 $r^2$ が高くなるものの、近・中間赤外線域のバンドおよび植生指数では $r^2$ の値が下がり、大気補正はいずれの樹種においても疎密度を求める際のモデルの処理方法としては選ばれなかった。これは森林の場合、水域と比較するとレイリー散乱や大気中の水分などのHazeの影響が少ないためと考えられる。なお、放射量の補正ではエゾマツ、トドマツの2種のモデルで、3シーンいずれもラジオメトリック補正で処理したバンド・植生指数の $r^2$ が高くなった。

本研究ではノイズ除去の方法として外周画素の削除を行った。外周をすべて除いた画素数で最も精度が高く、外周を含んだ画素数の $r^2$ に比べて、0.1~0.2も高くなった。また分散分析による有意差検定でも精度が上がるということが認められた。したがって目的とする地上データと回帰推定などの画素対応を行う場合には、隣接林分の影響を受け易い外周画素は除去することが必要と考えられる。

トドマツ人工林のフィルタリング処理では、視覚的にも統計的にもその効果が認められなかった。これに関しては、本手法のように5千分の1の基本図を用いて幾何補正を行い、地上データと精度よくマッチングする場合には、フィルタリング処理がデータを平滑化するため、疎密度のような微小な輝度値の違いを減衰させたものと考えられる。このことから地上データとの1対1の画素対応(Pixel to Pixel)による回帰推定では、データを平滑化させるフィルタリング処理は不要といえる。なお、フィルタリング処理の適用は5万分の1以下の小縮尺での大面積のパターン処理、最尤法などの教師付き分類におけるトレーニングエリアを大きくとった場合の代表値抽出、また評価画像作成後のパターン化(志賀 1993)については有効であろう。

樹冠占有面積割合の推定に有効なバンド・植生指数は近赤・中間赤外線域が上位にきたが、バンド間では衛星データのシーン毎に順位が異なっていた。同様に5種の植生指数も順位がシーンごとに入れ替わり特定できなかった。これは樹木の春先の芽ぶきから開葉期に至る生態的な変化が衛星データの輝度値に反映したものと考えられる。調査地の針葉樹人工林は侵入・生育する広葉樹が多く、場所によっては広葉樹の樹冠占有面積割合が50%を超えている。このため芽ぶき時期の4月11日、4月27日は傾向が似ているが、開葉の終了した5月29日のシーンでは広葉樹の開葉による画素当たりの葉緑素の占有割合が増加し、近・中間赤外域との相関が高くなったと考えられる。したがって、樹木の生理・生態的变化の大きい春先の芽ぶき時期や紅葉時期の観測データを用いる場合には、その都度、同様の手法で検定した上で、有効バンド・植生指数を決定する必要がある。

今回提示した各バンド・植生指数との単回帰による決定係数は、外周画素の削除によって4月27日のカラマツ( $r^2=0.471$ )以外は0.5~0.7と高い値を示した。これまでの研究では、人工衛星の輝度値と対象物の決定係数は大部分が0.5以下を示すことが多いため、重回帰モデルにして $r^2$ を高くする例(Fanklin 1986, Lmson 1990)が多い。しかし観測されたシーンごとに有効波長帯が変わるため重回帰の変数の選択や数、使用する式がその都度問題になる。したがって重回帰によって決定係数を高くするよりは条件の良い場所で、精度良く地上データと合致し、その上で、単バンドの独立変数として関係式を求めの方が実用的と考える。

今回のモデルを求めるための処理方法では3樹種ともCC法、外周画素の削除について共通した結果が得られた。また放射量補正では常緑のトドマツ、エゾツツに間してはラジオメトリック補正処理したバンド・植生指数であった。

以上の前処理の解析結果をふまえ、デジタル空中写真と衛星画像を重ねあわせ、前処理方法の中で最大の $r^2$ を示したバンド・植生指数を使って、衛星データからトドマツ、カラマツ、エゾマツ人工林の樹冠疎密度の区分画像を作成した。3種とも空中写真が表わす樹冠の疎・密な箇所とよく対応しており、また4月11日、4月27日、5月29日と観測時期が異なっても同様の疎密度の配色パターンを示した。したがって、本手法によってトドマツ、カラマツ、エゾマツ人工林の疎密度区分の推定が可能ながわかった。

求めたモデルは同一観測日のシーンであれば他地域にも応用できる。一例として、道立林業試験場の中央研究林のトドマツ人工林にモデルを応用して、現場で使われる林相図と同縮尺・同サイズのトドマツ疎密度区分図を作成した。得られた区分画像は視覚的に小班の中を画素単位に疎密度識別が可能なことから、小班内の人工林の成績の層化区分や密林分を主とする間伐対象小班の選択・抽出など、施業計画を策定する上での活用が期待できる。

作成した疎密度区分図の精度の検証を行った結果、空中写真の判読結果と整合性が高いことが分かった。このことは時間と労力を必要とする地上調査や熟練性を要する写真判読を行わなくても、広範囲の人工林の疎密度の現況を把握するのに有効であることを示すものである。

なお、空中写真が単木を識別するのに対して、TMデータは0.09ha(30m×30m)ごとの大きさで樹木の集団の情報を捉えることに利点をもつ。ここではこのTMデータの特性を利用して、トドマツ、カラマツ、エゾマツ人工林の樹冠疎密度を推定する方法を開発し、その有効性を確かめることができた。本手法はスギやヒノキなどの本州の針葉樹人工林の疎密度推定にも応用可能である。

## 第7章 結 言

本研究で明らかにした点は以下のとおりである。

- (1) 白黒空中写真をデジタル変換し、任意の場所で衛星データの画素サイズの格子を作成して、格子単位に樹種の樹冠占有面積割合を算出し、画像化した。
- (2) 衛星データの幾何補正に使用する3種類の内挿法を比較・検定した結果、CC法、BL法、NN法の順に精度が低下した。従来使われていた最近隣内挿法(NN法)の精度は最も低かった。
- (3) 放射量の補正では、大気中の塵や水分による散乱の影響を除去するため画像は見やすくなったが、疎密度推定に対する大気補正の効果は認められなかった。トドマツ、エゾマツではラジオメトリック補正処理したバンド・植生指数が疎密度推定式の変数として最適であった。
- (4) バンド選択の結果では、観測する波長のバンド間に有意差が大きく、樹冠疎密度の推定にバンドの選択が重要であることが分かった。疎密度推定に有効な波長帯を検討した結果、その順位はTM4,5,7の近・中間赤外線、次に植生指数のグループ、可視域のTM1~3の順になった。しかし単バンドで比較するとシーンごとに順位が変わり、有効な波長帯を特定することは出来なかった。これは樹木の芽ぶきから開葉期に至る春先の生態的な変化が衛星データの輝度値に反映したものと考えられる。
- (5) 外周画素の削除による効果は外周をすべて省いた方が精度が高くなった。これは衛星データの画素の空間的な特徴に起因しており、輝度値が隣接する広葉樹林や若齢の人工林の影響を受けていることを示している。
- (6) フィルタリング処理は使用した3種類とも疎密度との $r^2$ 値を下げ、処理の効果が見られなかった。5千分の1レベルでの地上参照データとの正確なマッチングを行った場合には本処理は不要である。
- (7) 最適な処理方法を明らかにした上で、トドマツ、カラマツ、エゾマツについて疎密度区分の推定式を求めた。観測時期の異なる3シーンの疎密度の推定式に選択された変数(バンド・植生指数)は、それぞれ異なっていた。これは春先の芽ぶきから開葉の生態的な違い、各樹種の固有の反射特性が影響していると考えられる。
- (8) 推定式を用い、レベルスライス法でトドマツ、カラマツ、エゾマツの樹冠疎密度区分画像を作成した。観測時期の異なる衛星データであっても同様の疎密度区分のパターンを示した。本手法によって、視覚的に小班の中を画素単位に疎密度識別が可能となった。
- (9) 疎密度区分のモデルは衛星データの1つのシーンの全域(185 km × 185 km)あるいは同一観測日の他のシーンに応用できる。そこで現場で使われる林相図と同縮尺・同サイズの疎密度区分図を作成した。本研究の将来展望として、以下の利用が考えられる。
- (10) 本手法は当初エゾマツで疎密度区分を試み、それをもどに手法の改善を図りトドマツ、カラマツに適用した。本手法を利用することによりスギ、ヒノキなど他の針葉樹の疎密度区分にも応用できる。
- (11) 森林の経年変化の把握に利用できる。例えば、5年前と現在の疎密度区分画像の比較によって、人工林のうっ閉状況の進捗状況が捉えられる。また土地利用の変化に対しても活用が期待できる。
- (12) 針葉樹と広葉樹の占有割合が把握できることから、人工林だけでなく天然林の針広割合、疎密度区分などへの活用が期待できる。

## 摘 要

調査地は千歳市周辺の森林で、地上の情報（2万分の1事業図・5千分の1森林計画図・空中写真）が整備されており、解析可能な3つのランドサットTM（1990年4月11日、4月27日、5月29日）シーンがある。調査地は地形が平坦であること、林班は長方形で明瞭に区画され、エゾマツ、トドマツ、カラマツの針葉樹が大面積に一斉造林されていることから衛星データの解析には最適である。

本論文では、針葉樹人工林の疎密度区分の推定モデルを求め、区分画像を作成する。なお、本研究には衛星データの複数ある前処理方法（ラジオメトリック補正・大気補正などの放射量補正や内挿法）の効果を比較・検討すること、空中写真のデジタル解析結果と衛星画像の輝度値との相関を調べ、どの前処理法が最適かを検定することが含まれる。

解析の手順は最初に、空中写真のデジタル変換、地図投影の変換、林相分類によって、衛星データと同じプロットサイズ（30m×30m）の樹冠占有面積割合を算出し、これを地上参照データとした。この疎密度と衛星データから得た同じ位置の輝度値との対応関係を統計学的に対比し、樹冠疎密度の推定に有効なバンド・植生指数を明らかにする。さらに分散分析による手法間の検定を行い、3つのTMシーンについて針葉樹3種の疎密度区分モデルを作成して、疎密度区分画像を作成する。

本研究で明らかにした点ば以下の通りである。

- 1 空中写真上の調査地を衛星データの最小区画（30m×30m）で区分して、この区分ごとに樹冠占有面積割合を求めた。本手法は従来の写真判読から求める方法より、効率的かつ客観的である。
- 2 衛星データの内挿法の方法を比較・検定した結果、CC法、BL法、NN法の順に精度が低下した。
- 3 大気補正では、その効果は認められなかった。
- 4 バンド選択の結果では、観測する波長のバンド間に有意差が大きく、樹冠疎密度の推定にバンドの選択が重要であることが分かった。疎密度推定に有効な波長帯を検討した結果、その順位はTM4,5,7の近・中間赤外線、次に植生指数のグループ、可視域の順になった。
- 5 外周画素の削除による効果は外周をすべて省いた方が精度が高くなった。
- 6 最適な前処理方法と変数を明らかにした上で、針葉樹3種の疎密度区分モデルを作成し、回帰式から樹冠疎密度区分画像を作成した。
- 7 他地域に本手法を応用し、現場で使われる林相図と同縮尺（5万分の1）の疎密度区分画像を作成した。

本手法は疎密度などの森林現況を把握できることから、小班の層化区分やデータベースの作成、施業計画を策定する上で活用が期待できる。

## 文 献

- AHERN, F. J., ERDLE, T., MACLEAN, D. A. and KNEPPECK, D. A. 1991 A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements. *International Journal of Remote Sensing* 12 : 387 ~ 400
- 栗屋善雄・大貫仁人・沢田治雄 1985 森林解析のための LANDSAT TM データのチャンネル選定. *日本リモートセンシング学会論文集* 5:77 ~ 80
- 1988 森林資源調査リモートセンシングによる伐採地解析. *日本リモートセンシング学会誌* 10 (3): 65 ~ 75
- BENSON, A. S. and DEGLORIA, S. D. 1985 Interpretation of Landsat-4 Thematic Mapper and Multispec scanner data for forest surveys. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 51(9):1281 ~ 1289



- BLAIR, B.O. and BAUMGARDNER, M.F. 1977 Detection of green and brown wave in hardwood canopy covers using multiband, multispectral data from Landsat-1. *Agronomy Journal*. 80: 808 ~ 810
- CHAVEZ, P.S., Jr. 1988 An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24: 459 ~ 479
- Chavez, P.S., Jr. 1989 Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 55: 1285 ~ 1294
- 長幸平・村井俊治 1993 判読を目的としたデジタル衛星画像の適性縮尺の検討. *写真測量とリモートセンシング* 32 (1): 4 ~ 17
- COLWELL, J.E. 1974 Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 3: 175 ~ 183
- DIJKSTER, A. 1987 Smoothing Vegetation index profiles: an alternative method for reducing radiometric disturbance in NOAA/AVHRR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 53(8): 1059 ~ 1067
- ERDAS 1991 PC ERDAS and VGA ERDAS System Guide. Version 7.5. ERDAS, Inc., Atlanta, Georgia, USA
- FIORELLA, M. and RIPPLE, W.J. 1993 Determining successional stage of temperate coniferous forests with Landsat satellite data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 59(2): 239 ~ 246
- Fiorella, M. and Ripple, W.J. 1993 Analysis of conifer forest regeneration using Landsat Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 59(9): 1383 ~ 1388
- FRANK, T.D. 1988 Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain front range with Landsat Thematic Mapper and digital terrain data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 53(8): 1075 ~ 1301
- FRANKLIN, J. 1986 Thematic Mapper analysis of coniferous forest structure and composition. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1287 ~ 1301
- GORDON, D.K., PHILIPSON, W.R. and PHILPOT, W.D. 1986 Fruit Fly inventory with Landsat Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 52(12): 1871 ~ 1876
- 東 敏 生 1990 二時期のランドサット TM データを用いた松枯れ被害拡大地域の抽出. *日本リモートセンシング学会誌* 10(3): 389 ~ 393
- ・寺田公治 1994 衛星データを利用した流域の森林管理技術の確立. *日林関西支論* 3: 25 ~ 28
- 1994 衛星リモートセンシングデータによる林相区分. *森林航測* 173: 6 ~ 14
- 平田泰雅・増田義昭・沢田治雄・斎藤英樹 1994 リモートセンシングと GIS を併用した森林変化の抽出法 ( ) — 森林変化スコア図の作成 — . *日林論* 105: 171 ~ 174
- 1994 リモートセンシングと GIS を併用した森林変化の抽出法. *森林航測* 172: 1 ~ 5
- HODGSON M.E. and JENSEN, J.R. 1987 Remote sensing of wetland habitat: a wood stork example. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 53(8): 1075 ~ 1080
- Jensen, R., Mackey, H.E. and Coulter, M.C., 1988 Monitoring wood stork foraging habitat using remote sensing and Geographic information systems. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 54(11): 1601 ~ 1607
- Hopkins, P.F., Maclean, A.L. and Lillesand, T.M. 1988 Assessment of Thematic Mapper imagery for forestry applications under Lake States conditions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54(1): 61 ~ 68
- Horler, D.N.H. and Ahern, F.J. 1986 Forestry information content of Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 7(3): 405 ~ 428

- 本条毅・高倉直 1989 植生指数(VegeuUon Index)を用いた都市における緑被率の推定．造園雑誌 52(5)：283～287
- 伊藤達夫 1990 森林管理のための地理情報システムの開発 - 森林区画線の数値化 - .森林航測 160：9～13
- 加藤正人 1985 森林管理データマップシステム．Journal of PC-Forestry．3(2)：43～46
- 1986a 図形処理による森林管理システム．光珠内季報 63：1～6
- 1986b ランドサット TM データによる樹種分類日林北支論 35：14～16
- ・柳井清治・遠藤祐司 1986c リモートセンシングを応用した災害予知システムの開発(I)．97 回日林論 553～554
- ・ 1986d リモートセンシングを応用した山地災害予知システムの開発．森林航測 149：3～8
- 1986e パソコンによる森林管理プログラム( )．Journal of PC-Forestry．4(2)：92～97
- 1987a ランドサット TM データによる樹種分類(I) - TM データの有効性 - ．北方林業 39(3)：11～16
- 1987b ランドサット TM データによる樹種分類( ) - 利用と問題点を探る - ．北方林業 39(5)：22～26
- 1987c パソコンによる森林管理システム 光珠内実験林を使った例 61 年道林研論 56～57
- M.Katoh 1988 Estimation of rate of the crown area in yezo spruce plantation with Landsat Thematic Mapper data. proceeding 16th ISPRS/URO, Kyoto, Japan, 23-29
- 加藤正人 1988 ラジコンヘリコプターによる空中写真撮影技術の開発. 62 年道林研論 50～51
- 1989a ラジコンヘリコプターで空中写真を撮影するには．北方林業 41(1)：10～14
- 1989b ラジコンヘリコプターを使用した効果的な空中写真撮影方法．日林誌 71(1):23～25
- 1989c 簡易空中写真を使用した小規模な風倒被害と野鼠害の現況把握.光珠内季報 74:13～18
- 1989d ランドサット TM データを使ったエゾマツ人工林の樹冠占有面積割合の推定．森林航測 156:14～17
- 1989e 北海道におけるリモートセンシング技術の活用. Journal of PC-Forestry. 7(1):13～18
- 1990a 衛星リモートセンシングと GIS の統合に基づく森林管理の展望．リモートセンシング学会誌 10(3)：109～117
- 1990b 衛星データと地図情報との重ね合わせによる森林現況の把握．光珠内季報 81：1～4
- 1990c ラジコンヘリコプターを使用した紅葉期における広葉樹林の樹種判読．日林北支論 39：117～118
- 1991b ラジコンヘリコプターを使用したウダイカンバの単木識別．森林航測 163：14～18
- 1991c 衛星リモートセンシングと GIS を活用した林分の評価とモデル化．写真測量とリモートセンシング 30(6):39～46
- 1991d リモートセンシング技術を使用した湿原のモニタリング．2 年道林研論 52～53
- 1992a 衛星画像のモザイク処理と近接解析画像の重ね合わせ．日林北支論 40:182～183
- 1992b ネットワークによる異機種間の画像ファイルの転送. Journal of PC-Forestry. 10(3):111

- 1993b 衛星リモートセンシングとGISの組み合わせ技術によるトドマツ小班データベースへの適用. 日林誌 75(2):154~158
- 1994 a ランドサットTMデータを使用した天然林の林相分類 写真判読による類型区分との比較. 平成5年度地域流動研究報告書 130~135
- 1994 b ランドサットTMデータによるトドマツ人工林の樹冠疎密度の推定 森林計画誌 23:11~31
- M. Katoh 1994c Estimating crowndensities of todomataplantations usingLandsat TM data . Proceeding of IUFRO International workshop on (Susminable fi)rest managements . 9p
- 1994d Classincation of conifdr treespecies usingJERS-1OPS data . Final repon of JERS-1/ERS-1 system v . ncation program . Volume 2-81~2-85
- 加藤正人 1995a リモートセンシング情報を利用した森林現況の変化を把握するためのソフトウェア開発 平成6年度次期森林資源調査システム化事業報告書. 北海道林務部森林計画課 4~14
- 1995b 衛星データを使用した天然林の類型区分 自然度の高い生態系の保全を考慮した流域管理に関するランドスケ = プエコロジー的研究 . (財)北海道森林技術センター204~213
- 1995c ふよう衛星OPSデータの林相分類への適用. 日林北支論 43:87~89
- 1995d 衛星データからトドマツ人工林の樹冠疎密度を推定する. 光珠内季報 99:11~15
- KAUTH,R.J. and THOMAS,C.S. 1976 The tasselled cap: a graphical description of spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat, Proceedings of the Machine processing of Remotely Sensed data 41~51
- 環日本海北方森林研究会 1994 日・口国際フォーラム シベリアの森はいま.森林計画学会出版局. 76pp
- 小林裕之 1995 Landsat MSS データによる地すべり発生前の特徴把握.日林論 105:137~140
- 小谷英司・沢田治雄 1995 気象衛星NOAAデータを使用した土地被覆区分の試み - タイ・時系列GVIデータの分析 - .日林講要旨 106:550
- 国立天文台編 1990 理科年表(平成2年1990)16~34 丸善株式会社
- LARSSON ,H. 1990 Remote Sensing for forest management insemi arid environment.Proceedings 23th Symposium on Remote Sensing ofEnvironment.573~580,Bangkok,Thailand.
- LATHROP,R.G.,Jr.1992 Landast Thematic Mapper monitodng of turbidinland waterquality. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.58(4):465~470
- LEPRIER,C.E. and DURAND,J.M. 1988 Influence of topography onforest reflectanceusing Landsat Thematic Mapper and digiml terrain data.Photogrammetric Engineering& Remote Sensing 54(4):491~496
- 増田義昭・平田泰雅・沢田治雄 1994 リモートセンシングとGISを併用した森林変化の抽出法 (I) - トレーニングエリアの抽出法 - .日林論 105:163~166
- 松家英樹・木幡靖夫 1988 プログラム「SUN」.未発表.
- 望月潔 1994 熱帯林地域における土砂流出危険地の予測 - ランドサット画像データの利用によるインドネシア・チモール島での予測事例..日林論 105:145~148
- MOORE,M.M.and BAUER,M.E.1990 Classincation of forestvegetationin north-central Minnesotausing Landsat Multispec ethod Scanner and Thematic Mapperdata.Forest Science36(2):330~342
- NAKANE,K. and KIMURA,Y. 1992 Assessment of pine forest damage by blight based onLandsat TM data and correlationwith environmental factors. Ecological Research 7(1):9~18

Multispeckal Scanner and Thematic Mapper data. Forest Science 36(2):330 ~ 342

NAKANE, K. and KIMURA, Y. 1992 Assessment of pine forest damage by blight based on Landsat TM data and correlation with environmental factors. Ecological Research 7(1):9 ~ 18

NELSON, R.F., LATTY, R.S. and MOTT, G. 1984 Classifying northern forests using Thematic Mapper simulator data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 50(5):607 ~ 617

日林協技術開発部 1989 リモートセンシング(衛星データ)の樹種区分・材積推定への利用例. 森林航測 156 : 9 ~ 13

大貫仁人 1981 Landsat データの地形条件の差による電磁波歪の補正法とその効果. 日林論 92 : 147 ~ 148  
1987 植生情報に関する研究 - 森林伐採調査法 - , リモートセンシング技術の利用実証に関する研究(第 1 期)成果報告書, 科学技術庁研究調整局, 141 ~ 160

ORMSBY, J.P. 1987 Whitetail Deer food availability maps from Thematic Mapper data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 53(8):1081 ~ 1085

PLATT, B. and SCHANTA, M., 1992 Forest plan monitoring: role of remote sensing and GIS on the Mark Twain national forest. Proceedings of the stand inventory technologies. Bethesda, Maryland, 342 ~ 348

SAS. 1989 SAS-STAT user's guide. Version 6. Fourth edition. Volume 2. SAS Institute, Cary, North Carolina, 209 ~ 244

佐藤一紘 1986 マングローブ林へのリモートセンシングの適用. 森林航測 148 : 14 ~ 19

1990 リモートセンシングのマングローブ林への沖縄での適用. 日本リモートセンシング学会誌 10(3) : 55 ~ 61

沢田治雄 1989 衛星リモートセンシングによる熱帯林調査研究. 森林文化研究 10:57 ~ 65

1990 リモートセンシング技術の森林植生分野での適用及び将来展望. 日本リモートセンシング学会誌 10(3) : 349 ~ 353

・平田泰雅 1993 リモートセンシングによる資源・環境のモニタリング, 林野庁平成 4 年度次期森林資源調査システム開発調査報告書, 35 ~ 66

妹尾俊夫・岩波英二・田中総太郎・杉村俊郎 1983 比演算を施した 2 季節のランドサット MSS データによる広域山地の林相区分. 日本リモートセンシング学会誌 5(3) : 55 ~ 65

1990 森林のデータ特性 - 輝度補正 - . 日本リモートセンシング学会誌 10(3) : 354 ~ 358

瀬戸島政博・甲斐祐子・広瀬葉子 1993 重ね合わせ解析を主体とした都市内の樹林地の分布状況と傾向の把握. 日本リモートセンシング学会誌 13(1) : 48 ~ 58

SKIDMORE, A.K. and TURNER, B.J. 1988 Forest mapping accuracies are improved using a supervised nonparametric classifier with SPOT data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 54(10):1415-1421

志賀弘行 1993 北海道の農業情報システム - 土地評価のための農耕地情報統合とリモートセンシング利用 - . システム農学 9(1) : 32 ~ 39

資源観測解析センター 1990 画像データの処理と解析(I) : 41 ~ 63 資源観測解析センター

SMITH, N.J., BORSTAD, G.A., HILL, D.A. and KERR, R.C. 1991 Using high-resolution airborne spectral data to estimate forest leaf area and stand structure. Canadian Journal of Forest Research 21(7):1127 ~ 1132

鷹尾元・大貫仁人・粟屋善雄 1994 伐採照査への LANDSAT データの利用. 日林論 100:151 ~ 152  
・石塚森吉・K. Voltskii 1994 シベリア凍土地帯の植生の分布と変動(I) - 森林限界附近の植生分布の把握 - . 日林講要旨 105 : 211

- 寺園隆一・生沢均 1991 リモートセンシングによる赤土流出モニタリング手法の開発(I) - ランドサットTMデータのスペクトル特性の検討. 沖縄県林試研究報告 23 : 21 ~ 32.
- 寺田公治・東敏生 1990 リモートセンシング技術の林業への利用 - 広島県におけるランドサットデータ解析の現状と方向 - . 広島県林試研報 24 : 115 ~ 127
- TOM, C.H. and MILLER, L.D. 1980 Forest site index mapping and modeling. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 46(12):1585.1596
- TUCKER, C.J. 1979 Red and Photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 10:127 ~ 150
- 露木聡 1990 森林計画における流域管理 - リモートセンシングを利用した環境評価手法の開発 - . 森林航測 161 : 3 ~ 6
- ・増田義昭・小谷英司・山本博一・高田功一 1993 リモートセンシングによる森林資源調査におけるGPSの有効性 - 単独測位結果を使ったトレーニングエリアの抽出 - . 104 回日林論 : 271 ~ 274
- 宇宙開発事業団・地球観測センター 1986 地球観測データ利用ハンドブックランドサット版・改定版 . 6-1 ~ 6-2 , リモートセンシング技術センター
- WALSH, S. J. 1980 Coniferous tree species mapping using Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 9:11-26
- 和達清夫編著 1976 リモートセンシング . 132 ~ 164 , 朝倉書店
- 渡辺宏 1985 森林における多段階リモートセンシングの試み . 森林航測 145 : 8 ~ 12
- 吉田茂二郎・ネルソン中島・今永正明 1995 衛星データによるブラジル熱帯林の林相区分 - マナウス周辺の森林を対象として - . 日林講要旨 106 : 522

## Summary

The Chitose region, Hokkaido, Japan, was selected as the study area because of the large number of representative conifer plantations and the availability of three TM scenes, taken on 11 April 1990, 27 April 1990, 29 May 1990, the corresponding panchromatic aerial photographs (June 1990) and a forest stand map (1:20000) and a forest base map (1:5000). This area has a wide range of flat land and pure conifer plantations of *Abies sachalinensis*, *Picea jezoensis*, *Larix kaempferi*.

This paper will establish models and estimation images for crown density estimation in conifer plantations. This report involves radiometric, atmospheric and geometric correction, correlation and anova procedure analysis between TM data and todomatsu crown density.

First, aerial photographs were transformed into the line/pixel coordinate system of the TM scenes by scanner system.

A photograph image was positioned precisely by ground controlled points and rectified by geometric correction, and then classified by the maximum likelihood classifier.

The rates of crown occupied area per grid (30m x 30m) were derived from digital analysis of the photograph corresponding to the TM pixel size. These varied from 26.4 to 87.2 per cent. This data was applied to the crown density reference data.

Stand reflectance in the different TM bands and vegetation indices were plotted against and correlated to the rates of todomatsu crown densities derived from the digitalized photograph.

Simple regression models were carried out in order to find the most suitable variables and methods using SAS

Stand reflectance in the different TM bands and vegetation indices were plotted against and correlated to the rates of todomatsu crown densities derived from the digitalized photograph.

Simple regression models were carried out in order to find the most suitable variables and methods using SAS software.

The variables with the best correlation co-efficient for each Landsat scene were chosen.

The estimated crown densities images of 3 conifer species are presented using the optimum equation model and data transformations which used cubic convolution, radiometric correction and the exclusion of neighboring pixels.

The study results were as follows;

1. The crown density reference data consisted of digital analysis derived from aerial photographs. This technique was more effective than a common method which derived from interpretation of photographs.
2. Geometric corrections ranked in the following order: Cubic convolution > Bi-linear > Nearest neighbor
3. Atmospheric corrections were not significant. The best calibration correction for *Abies sachalinensis* and *Picea jezoensis* regression model was radiometric correction.
4. Relationships between TM variables (bands and vegetation indices) and reference data were found to have a useful coefficient of determination in the infrared bands (TM4,5,7). On the other hand, there was a low correlation in the visible bands, and vegetation indices were medium.
5. The correlations between crown density of 3 conifer species and TM bands and vegetation indices improved when the all neighboring pixels were removed.
6. The estimation images established from the best fitting regression models were effective for identifying crown density per pixel.
7. These methods were applied to the other site and produced a crown density map (1:50000) for forest resource management and planning within conifer plantations.

The technique may be used to grasp stand condition and to support planning of the stand level database of plantations.

**Key word** : Remote sensing, Landsat, TM, Crown density, Conifer plantation