

J-1 人工衛星データ等を利用した陸域生態系の3次元構造の計測とその動態評価に関する研究

(2) スケーリングによる広域生態系の構造評価手法に関する研究

① 衛星データの画素分解手法の開発

研究代表者 農林水産省林野庁森林総合研究所海外森林環境変動研究チーム 沢田治雄

農林水産省林野庁森林総合研究所

企画調整部	海外森林環境変動研究チーム	沢田治雄・中園悦子・三塚直樹
北海道支所	広葉樹林管理研究室	石橋 聡・鷹尾 元
四国支所	経営研究室	松村直人・小谷英司

平成9～11年度合計予算額	11,445千円
(平成11年度予算額)	3,828千円)

[要旨] 近年、地球環境問題や森林管理問題に対応して、森林調査の効率化が求められており、地上調査情報と衛星情報との融合化が進められている。衛星データは高分解能化が進み、より詳細な地表状況を観測できる衛星も現れてきている。そこで、情報システムを利用して分解能の異なる観測データを多段的に関連づけることで、広域かつ詳細な被覆情報が得られることが期待できる。この、「多段的な関連づけ」の手法として、分解能の粗い衛星データの画素内の構成要素を推定する手法が画素分解法であり、極めて重要な役割を担うことになる。そこで、画素分解法の特徴解明が必要となっている。また、日本の森林地帯における衛星データの利用では、1画素内の状況が類推できること、地形の影響が小さいこと、上層木の常・落混交率など林分構造をある程度区別しえること、植生が比較的密な状態でも林分構造の変化に鋭敏であること、などの特徴を持つ「森林観測に適応した解析」が必要とされている。そこで、本研究ではまず森林調査で利用する場合の最適な基本パターンを決定して、画素ごとのパターン展開処理を行い、その展開係数と森林データとの関連分析を行って、画素分解法の適用性を調べた。

衛星データによって画素ごとの森林モニタリングを可能にする画素分解法として、パターン展開法に着目し、様々な森林でその特徴を分析した。その結果、以下のようなことがわかった。(1)画素分解法であるパターン展開によって、森林地帯の画素は一般的に、針葉樹パターン、広葉樹パターンおよび土壌パターンに展開することで森林構造に関する情報を得ることができる。(2)針葉樹パターン展開係数 CPI は、常緑針葉樹の樹冠被覆度に比例する。(3)広葉樹パターン展開係数 VPI は、植生の総量に反応する。(4)土壌パターン展開係数 SPI は、落葉量、土壌に反応する。(5)VPI 値は、CPI 値よりも大気の影響が少ない。また密な常緑針葉樹林の季節変化に対しても鋭敏である。(6)パターン展開係数は、地形の影響が軽減されている。(7)青森ヒバ天然林地帯で、パターン展開法の有効性が確認できた。(8)木曽ヒノキ天然林地帯でも、パターン展開法の有効性が確認できた。(9)営林署単位の質的な針葉樹分布情報は本研究で初めて得られた。

[キーワード] リモートセンシング、画素分解法、パターン展開法、森林調査

## 1. 序

森林計画等に用いられる林分情報は、主に地上調査によって得られてきた。森林の生態系は生長や遷移、人間の利用等によって刻々変化するものであり、森林管理のためには数年ごとの情報更新は不可欠である。しかし、地上調査によって広範囲にわたる森林情報を定期的集めることは困難である。そこで、航空写真や衛星リモートセンシングデータの利用が期待されている。一方、ランドサット衛星などは広範囲を一度に観測できるが、得られるものはセンサーでの観測値であり、光学センサーの場合は主に上層木の樹冠からの反射エネルギーである。そのため林分材積などの物理的情報を直接得ることは難しい。

近年、地球環境問題や森林管理問題に対応して、森林調査の効率化が求められており、地上調査情報と衛星情報との融合化が進められている。衛星データは高分解能化が進み、より詳細な地表状況を観測できる衛星も現れてきている。そこで、情報システムを利用して分解能の異なる観測データを多段的に関連づけることで、広域かつ詳細な被覆情報が得られることが期待できる。この、「多段的な関連づけ」の手法として、分解能の粗い衛星データの画素内の構成要素を推定する手法が画素分解法であり、極めて重要な役割を担うことになる。そこで、画素分解法の特徴解明が必要となっている。

また、これは地理情報システム (GIS) と衛星測位システム (GPS) の発達に寄るところが大きい。これらの技術によって、情報のシステム化が図られ、小さな森林調査地点のデータと衛星データとの照合が可能になっている。その結果、衛星データの特徴もよく分析できるようになってきた。これらの先駆的な技術を利用して広域生態系の評価を行うことが求められている。

## 2. 研究目的

日本の森林調査における衛星データの利用は、1) 単位林分が小さいこと、に加えて、2) 山地林が多く、光学センサーの観測値に地形の影響が大きく出ること、3) 構成樹種が多様であり、季節変化が大きいこと、4) 森林植生が下層植生を含めて非常に密であること、などが障害となっている。そのため、1) 1画素内の状況が類推できる、2) 地形の影響が小さい、3) 上層木の常・落混交率など、林分構造をある程度区別しえる、4) 植生が比較的密な状態でも林分構造の変化に鋭敏である、などの特徴を持つ「森林観測に適応した解析」が必要とされている。

例えば、植生観測に使われる最も一般的なランドサットTMデータの指数に、可視と近赤外データをを用いる正規化植生指数 (NDVI) がある。しかし、これは密度の低い (うっ閉していない) 平地の植生観測に適するものの、地形による入射光量の影響を受けやすく植生が密な部分では値が飽和するため、日本の森林観測には適当であるとは言えない。また、被覆物が単純でない森林では、得られた値の意味するものが掴めない場合が多い。

そこで、1画素以内が均一でない場合にもその構成要素をある程度類推でき、日本のような地形の複雑な森林地帯の調査に利用できるような解析手法の開発が必要とされている。これは、分解能の異なる多段観測データの相互の関連づけでも極めて重要である。これを画素分解法と呼び、本研究の対象とした。

## 3. 研究方法

画素分解法としては、エンドメンバー法 (Tompkins ら) がある。これは、画素のもつ反射ス

ペクトルを被覆物の反射スペクトルの総和と仮定し、代表的な被覆物個有の反射スペクトルパターンをもとに、1画素当たりの被覆割合を推定する方法である。しかし、この手法では被覆物の反射スペクトルの値に依存するため、地形（斜面方位と傾斜角）の影響を受ける。地形の影響を軽減できる画素分解法の一つにパターン展開法がある（藤原ら）。これは画像から土壌、植生、水等の基本スペクトルパターンを選び、各画素のスペクトルパターンをそれらの基本パターンの合成と考える手法である。スペクトルの値ではなく、全スペクトルチャンネルでのパターンを用いるために、地形の影響が軽減できると考えられる。しかし、これまでこの方法は、水田などの農地を対象として研究がなされているだけで、山岳林地帯への適用研究はされていなかった。そのため、パターン展開法が実際の森林状況をどの程度把握できるか、また森林調査に利用できるかなど、その特徴が明らかでなかった。

そこで本研究では、まず森林調査で利用する場合の最適な基本パターンを決定して、画素ごとのパターン展開処理を行い、その展開係数と森林データとの関連分析を行って、画素分解法の適用性を調べた。なお、本研究では陸域森林植生の被覆物として、常緑針葉樹（スギ、トドマツ等）、落葉広葉樹（ブナ、ミズナラ等）、ササ、裸地を代表（基本）とした。

TM データを用いるパターン展開法は、バンド6を除くデータを用いて次のような方法でパターン展開係数を算出する。

#### (1) スペクトルパターンの基準化

$$A = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7)$$

ここで

$$A_i = (D_i - D_{\text{imin}}) / Z$$

$$Z = \sum (D_i - D_{\text{imin}})$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \text{ (TM のバンド)}$$

この時、細心の注意を払って最小値  $D_{\text{imin}}$  を求める必要がある。ここで、 $Z$ （各バンド値の和）は1画素で反射される光量の総和の近似量として取り扱われている。 $Z$ で個々のバンドの値を割るのは、地形による陰の影響など画素ごとの光量の違いを補正するためである。その結果、 $A_i$ で光量の差によらない因子、つまり地上被覆物の反射率情報に関する値が得られると考えられる。

#### (2) 基本スペクトルパターン

パターン展開法では、通常、土壌、植生、水が基本スペクトルパターンとして使われている（藤原ら）。しかし、森林地帯では、マングローブ林を除いて水は通常存在しない。日本の森林地帯で地表を覆うのは、針葉樹と広葉樹、草、ササなどであり、伐採直後の森林や崩壊地を含む林分では裸地が入る程度である。ただし、樹木には常緑と落葉があり、パターン展開における基本パターンは常緑針葉樹、常緑広葉樹、落葉樹、ササ、草、枯草、土壌などが考えられる。対象地域と季節に合わせて適切な基本パターンを設定して処理することで、森林の被覆状況を分析できると考えられる。そこで、地表の基本構成要素としてTM データから例えば土壌、広葉樹、針葉樹等のできるだけ純粋な画素を選び、基本スペクトルパターン（ $S$ ,  $V$ ,  $C$  等）とした。

実際、基本スペクトルパターンを作成する際に様々なランドサットTMの画像を使用して検討

したが、土壌、広葉樹、針葉樹のそれぞれのスペクトルパターンは、どの画像でも非常に似ていた。また、場所、時期が異なる画像に対して同じ基本スペクトルパターンを使用し、画素内の土壌、広葉樹、針葉樹の割合を定性的に分けることも可能であった。このことからパターン展開法は観測時の気象条件などにも左右されにくいと考えられる。

### (3) パターン展開係数

各画素のスペクトルパターンを3つの基本スペクトルパターンの線形加算と仮定する。

$$A = \text{SPI} \cdot S + \text{VPI} \cdot V + \text{CPI} \cdot C + e \quad ; \quad e \text{ は余りの項}$$

この時、 $e$  が最小になるように、SPI、VPI、CPI を算出する。ここで、SPI、VPI、CPI を各基本スペクトルパターンに対するパターン展開係数と呼ぶ。この値が各画素内の基本構成要素の被覆率に比例すると考えるのである。

パターン展開法には、陰の基本パターンは含まれていない。しかし、自動分類手法によっては陰と針葉樹林が同じ分類に入ることがあることから考えて、針葉樹のパターン展開係数が陰に関連するとも考えられる。そこで針葉樹のパターン展開係数が森林地帯でどのような値をとるかにについても調べた。

## 4. 対象地域

対象地として、次の4カ所を選んだ。(1)北海道苫小牧営林署管内、(2)屋久杉林地帯、(3)下北半島ヒバ天然林地帯、(4)木曾ヒノキ天然林地帯。

北海道苫小牧営林署管内の森林は人工林が主であるため、地上データの評価がしやすい。また林分面積が大きいため、TMデータでも判読しやすい。しかも平地林であり、地形の影響が少ない理想的な状況でのリモートセンシングデータが得られる。この地域のデータを用いてパターン展開法の基本的な特徴の把握を試みた。この地域の森林はエドマツ、トドマツなどの針葉樹人工林が主であり、下層植生としてササが見られる。

屋久島は極めて急峻な地形をしており、パターン展開法を屋久島の植生に適用することで、地形要因の影響程度が検討できる。

下北半島は、日本の三大美林（下北のヒバ、秋田のスギ、木曾のヒノキ）のひとつと言われるヒバ天然林が優先する地域である。天然林地帯での森林調査データは極めて限られているが、この地域では、40m×50mの毎木調査が行われていたため、TMデータとの比較が可能であった。そこで、ヒバ天然林を対象として、山地林におけるパターン展開法の適用可能性と実用性を検討した。

木曾ヒノキ林地帯も上記のように、三大美林のひとつである。他の地域で得られた成果をもとに、ヒノキの蓄積量推定と実利用の可能性を検証した。これによって、森林地帯の針葉樹蓄積推定におけるパターン展開法の特徴とその利用可能性が明らかになると考えた。

## 5. 結果と考察

### (1) パターン展開法の基本的特徴（北海道苫小牧営林署管内と下北の人工林）

TM画像としては、観測時に晴れているものを選んだ。苫小牧地域の画像は以下のとおりである。1986年：6月26日、1987年：5月21日・5月28日・6月22日、1988年：5月30日、

1990年：4月11日・4月27日・5月29日・6月5日・6月14日・8月8日・10月11日。また、下北半島と津軽半島の画像でも、針葉樹人工林を対象とする分析を行った。衛星の取得年月日は次のとおりである。下北半島：1996年6月14日、津軽半島：1991年5月7日。

地上データとしては林齢を用いた。林齢は、厳密には林分の物理量を反映するとは言えないが、地域別、樹種別では一般に林齢と樹高、胸高断面積等の林分構成要素との間に相関が高い。衛星画像をパターン展開法で処理して地上調査データと比較した結果、針葉樹の多い部分で針葉樹パターン展開係数の値（CPI）が大きくなる傾向が確認できた。さらに、人工林のCPIと林齢を比較分析した結果、以下のことなどが明らかになった。

- 1) 5月のデータでは草地に近い新植地で、CPIが大きな値を示すが、これは雪どけの影響で土壌が湿った状態にあるためと考えられる。10年生の森林でCPIが最小値を示すが、より林齢の高い森林では林齢と正の相関となる。35～40年生の森林で最大値をとり、それより林齢が高い林分ではほぼ同一の値を示すが高齢級では低くなる傾向を示す。ただし対象地には極大値付近の林齢の森林が少ないため、この変曲点の正確な林齢の把握は今後の課題である。
- 2) 10年生以上の森林におけるCPIと林齢の正の相関は季節、地域に関係なく確認できる。
- 3) 薄雲の影響を受ける。これは影響が波長で異なり、スペクトルパターンを崩すためである。

以上の結果から、次のことが考えられる。CPIは若齢常緑針葉樹林では林齢に比例する。この比例関係は季節、地域によらないことから、上層針葉樹の樹冠状態と関係すると考えられる。林齢30～40年あたりでこの比例関係が終わり、より高齢級ではCPI値が小さくなるのは、樹冠がうっ閉して樹冠被覆率の変化が小さくなり、次第に広葉樹も侵入してくるためと思われる。この関係は下層植生などの影響が大きくなる夏のデータでも見ることができるため、広葉樹が混交している場合にも、針葉樹の被覆情報を得ることができると考えられる。平地にある苫小牧の森林だけでなく、下北、津軽でも同様の関係を得ることができた。これはCPIにおいて、地形の影響が軽減されていることを示唆しており、CPIは山地でも針葉樹のうっ閉度モニタリングに有効な指数であると考えられる。

苫小牧のデータで、VPI値に対しても針葉樹人工林の林齢との関係を調べた。その結果、春と秋のデータでは、林齢20年生程度までは常緑針葉樹林のBPI値と林齢の間に相関が見られる。しかし初夏から夏にかけてのデータでは林齢10年の森林で飽和し、より高齢級では林齢と殆ど無相関である。また、VPI値は春から夏にかけて値が大きくなる傾向があり、林齢が1～5年生の森林でもCPI値と異なり単調増加の傾向を示す。

また、年次の異なる5月下旬のデータでは、各年でかなりのばらつきがあるのに対し、6月のデータの値は非常に揃っている。これは、6月になると季節が安定し、年による差が小さいためであろう。この地域は下層植生が豊富で、常緑針葉樹と落葉広葉樹が混交しているため、広葉樹や下層植生がめだたない春や秋にはVPI値が低いものの、常緑針葉樹の樹冠面積を反映した値が得られると考えられる。初夏から夏にかけては広葉樹や下層植生の影響が加わるため、針葉樹の林齢との相関がなくなる。以上から、VPI値が各画素の植生被覆の総量を反映していることがわかる。また、かなり林齢の高い人工林でも、春から夏にかけてVPI値が上昇することから、この値はかなり密な森林の季節変化にも対応していることがわかる。

これらのことから、植生パターン展開係数から、植生の葉量に関する季節変化を観測できることも分かった（図1）。

## (2) 地形の影響評価（屋久島での事例）

屋久島は、原生林のかなりの面積が世界自然遺産として登録されている。また、屋久杉を中心とする豊かな植生については既に多くの情報が蓄積されている。しかし、その多くが地上調査で得られているため更新されるまでに時間がかかり、現在の状態と合わない場合もある。特に屋久杉の分布については、最近の伐採等の範囲が植生図に捉えられていない。

一方、屋久島は標高差最大 1935m に達する非常に地形の変化に富んだ地域であり、衛星データを使用して植生状況を分析する場合、地形の影響が大きな問題点の一つとしてあげられる。衛星データは光学センサーの観測エネルギー値であり、地形の影響は避けられない。一般的な植生指数としては NDVI があるが、これは地形の影響を大きく受ける。そこで、本研究ではパターン展開法における地形の影響程度から分析した。具体的には TM データのパターン展開法を用いた屋久杉分布域の推定を行い、屋久杉分布図の更新の可能性を検討した。使用したデータは次の通りである。1984 年 7 月 18 日、1992 年 5 月 21 日、1993 年 3 月 5 日。

パターン展開を行った結果と植生図（宮脇）とを比較したところ、5 月の VPI 画像で、広葉樹分布域（特にひめじやら群落部分）が高い値を持っており、VPI 値の 0.85 を閾値として広葉樹と針葉樹を区別できることがわかった。

この結果と現存植生図を比較して、現存植生図に記された天然林域の変化を調べた。その結果、杉天然林域で伐採されずに残っている部分が判読された。これによって、衛星画像をもとに天然杉林の範囲が推定でき（図 2）、山地林におけるパターン展開法の有効性が確認できた。

## (3) 天然ヒバの蓄積量分布と利用可能量推定への適用

青森地方の天然ヒバ林は日本の三大美林の一つに数えられており、その良質材は重要な資源とされている。このヒバ材を長期にわたって安定供給するためには、ヒバの蓄積量とその分布の様子を知ること、また、その情報を定期的に更新することが必要である。この地域では、天然林内の針葉樹が全てヒバであると仮定して問題がない。そこで、針葉樹の物理量（蓄積）と衛星データを関連させることでヒバの推定を行った。使用した画像は、TM の 1996 年 6 月 14 日のデータである。落葉広葉樹の新芽の時期で、針葉樹と落葉広葉樹の違いが衛星データで最もはっきりしており、CPI を使った解析には適した時期のものである。

天然林内の主要な常緑針葉樹はヒバであるが、人工林はスギである。衛星データからはこの二種の区別がつかないため、縮尺 2 万分の 1 の森林計画図をデジタル化し、天然林のみを対象地として抜き出した。また、森林計画図から営林署の境界のベクターデータ、森林機能別ベクターデータも作成した（図 3）。対象域全域に 66 点、それぞれ基本として 40m×50m (0.2ha) のプロットデータが平成 8 年に得られた。その位置は、縮尺 5,000 分の 1 の森林基本図上にプロット調査者によって記されており、現地にも追認が可能なようにテープが残されている。調査は、針葉樹については胸高直径 4cm 以上、広葉樹については 6cm 以上を対象とし、胸高直径、樹高、樹種について毎木調査が行われた。ただし、衛星データの雲の範囲にあるもの、その形状から衛星データとの照合に使用できないものなどを除き、最終的に 41 プロットのデータを利用した。調査点と対応する画素のパターン展開係数と、地上データ値の間の単相関を調べたところ表のような結果となった。この中で最も相関が高かったのが、CPI 値と ha あたり胸高断面積であった。そこで、CPI 値と ha あたり胸高断面積との相関式を算出した。ただし、広葉樹 100% の森

林でも CPI 値に幅があるため、広範囲の広葉樹林を選んで CPI 値を確定し、全体を調整した。

その結果、推定式は次のようになった。  $G$  (胸高断面積/ha)  $=2.927CPI-8.770$

定数項部分は、広葉樹林の CPI 値である。この推定式を用いて、各画素についての推定胸高断面積を算出した。このとき、プロット調査データから ha あたり胸高断面積の上限を  $75 \text{ m}^2$  とした。また、下北半島の各プロットの ha あたり胸高断面積  $G$  と平均蓄積  $V$  との値から関係式を求めたところ、次の式が得られた。  $V=5.263G^{1.127}$

この式から天然ヒバの蓄積の分布推定画像を作成した (図4)。また、総蓄積量を営林署ごとに算出し、森林調査簿からの蓄積量と比較した。ただし、大気中の雲だけでなく、薄いヘイズの影響もまた CPI 値に対する誤差の原因となるため、雲のかかった大間、野辺地営林署は対象地から除いた。営林署ごとにヒバ推定蓄積量と森林調査簿データとの比較を行ったところ、推定値は調査簿の値の 1.47 倍から 2.72 倍、平均すると 1.77 倍となることがわかった。この原因としては、①森林調査簿の値が過小、②調査プロットと衛星データとの位置ずれに起因する関係式のエラー、などがあげられる。

①については、今回地上調査プロットを設定した小班について、調査結果をその小班の平均蓄積と仮定したところ、平均して森林調査簿記載の蓄積量の 1.65 倍だった<sup>9)</sup>。この値と今回の衛星データの推定値はそれほど大きくかけ離れたものではない。

②については、プロットの位置が紙上に描かれたものであるため、デジタル化の際に誤差が含まれると考えられる。使用した 41 プロットでも、プロットの実際の位置と紙上に記された位置とが若干異なるものもあろう。また、この推定式は、樹冠の面積を介して胸高断面積を推定しているために、CPI 値からヒバの樹冠面積を推定する際の誤差と、樹冠面積から胸高断面積を推定する際の誤差が含まれていると考えられる。

各営林署ごとの ha あたり蓄積の分布は、図5のようになった。この図から、営林署全体の蓄積量だけではわからない各営林署のヒバ林の分布傾向がわかる。特に川内営林署の場合、かなりの森林面積にわたって平均蓄積が低く、天然ヒバの良林がほとんど見られないと考えられる。また、大畑営林署の場合、全体にヒバの蓄積量が多く、良林も多いことがうかがえる。また、ほぼ同じ平均蓄積値を持つ陸奥、脇野沢、横浜の三つの営林署についても、平均蓄積分布図を見ると、陸奥は他の二つの営林署に比べて平均蓄積の低い森林の割合が高いことが予測される。

このように画素分解法では、画素ごとに ha あたりの蓄積量が推定されるため、資源の質に関する情報が得られることは注目に値する。これまでは、画素ごとにヒバか広葉樹かの分類が一般的であったため、このような資源量に関する散布図は得られず、営林署ごとの針葉樹面積が得られるのみであった。これは、森林管理の上で極めて重要な知見であり、画素分解法の最大の利点と考えられる。

さらに蓄積量分布と GIS を組み合わせた解析を行い、実利用の可能性として、ヒバの供給可能量情報を得ることを試みた。林道からの距離とヒバの平均蓄積量、天然林率との関係は、図7のようになった。大畑、川内共に、林道からの距離が 200m 以下の範囲では、道から遠くなるに従って天然林率、平均蓄積量共に増加するが、200m 以上はなれたところでは、天然林率は増加する一方で、平均蓄積量は減っていることがわかる。これは、林道がもともとヒバの伐採に都合がよいように、蓄積量の多い部分を通過するように設置されているためと考えられる。

一方、大畑では林道からの距離が 50m 以内の範囲の天然林が 50%以上残っており、林道から

離れるにつれ緩やかに天然林率が変化するのに対し、川内では林道から 200m 以内とそれ以上との天然林率の差が大きい。また、200m 以内の範囲で天然林率は 50%以下である。このことから、川内での林道周辺の伐採は、大畑に比べてかなり進んでいることがわかる。

傾斜角度と平均蓄積量、天然林率との関係は、図 6 のようになった。大畑、川内共に、傾斜角度が大きくなるにつれ、天然林率、平均蓄積量共に大きな値を取ることがわかる。特に大畑では、傾斜 25 度のあたりで平均蓄積の変化がゆるやかになる。また、天然林率の変曲点も 25 度から 30 度の間にある。このことから、25 度付近に伐採の制限が加えられていることが考えられる。これは現行の施業と矛盾しない。

一方、川内では傾斜角度と天然林率との間に相関があることは見て取れるが、その相関は直線に近く、大畑のように特定の角度での変曲点が存在しない。また、傾斜角度 5 度以下の天然林率は 25%程度であり、平地での伐採がかなり進んでいることがわかる。また、平均材積の値は傾斜角度 40 度あたりまで安定しない。以上から、川内での伐採は、大畑に比べ、傾斜角度がかなり大きい部分まで進行していると考えられる。

林道からの距離が 100m 以内、傾斜角度 25 以下の森林の蓄積量は、大畑で全蓄積量の 14.9%、川内で 14.3%になるが、生産林部分でこれらの条件の森林にあるヒバ蓄積量は、大畑で 9.7%、川内で 8.6%となる。林道からの距離を 200m まで広げた場合でも、生産林内の蓄積量は、大畑で 19.9%、川内では 16.2%である。林道から離れた地域でのヒバの平均蓄積量が総体的に低いことを考えると、現在利用可能なヒバ蓄積量は全体の 2 割以下と考えられる。

このように天然林の地上情報と衛星データからの指数とを関連付けることにより、地上情報を補完して、広域にわたる天然林内のヒバの分布状況を捉えることが可能になった。また、分布図と GIS 情報を組み合わせることにより、利用可能なヒバ蓄積量を推定することが可能であった。

#### (4) 天然ヒノキの蓄積量分布と利用可能量推定への適用

木曾地帯では最近の地上データを得ることが出来なかった。そこで、天然林、特に針葉樹林については、1966 年から 1974 年の間に全国で作成された空中写真判読資料を使用した。この資料では、調査地域 (0.1ha、31.6m 四方) が空中写真上に記されているため、場所の特定がある程度可能である。各調査地に対し、平均樹高、平均直径、本数、材積、樹種とその割合、立地条件などが得られている。これらの地上調査地点から王滝営林署管内の 58 点について、衛星データ、最近の空中写真、また現地調査によって確認し、現在まで大きな林相の変化が無いと判断された点について解析した。最終的に使用可能と判断した点は 22 点だった。

使用した衛星データは TM の画像 (1998 年 6 月 18 日) である。この時期のデータは、広葉樹と針葉樹との分離を行なうには適した時期のデータと思われる。木曾谷の森林は、天然林としては非常に特異で、天然林といっても、多くは純林を形成している。また地上調査点も、針葉樹がほぼ 100%に等しい部分が主である。木曾のヒノキの蓄積量を推定する際には、このような密な森林の微小な差異に対して、区別をつける必要がある。そこで、木曾天然林の分析に特化した基本パターンの組を作成することを考えた。地上調査の結果、代表的な被覆の種類として、「針葉樹、広葉樹とカラマツ、笹、伐採跡地と枯れた笹」があることがわかった。また、保護林の中で、非常に老齡、かつ、密である森林の場所を特定することができた。そこで、そのスペクトル反射パターンも加え、5 つの基本パターンを作成して、それを元に 4 つの組を作った。基本パターンの



組は、〔針葉樹、広葉樹、土壌〕〔針葉樹、広葉樹、笹〕〔密な針葉樹、広葉樹、土壌〕〔密な針葉樹、広葉樹、笹〕の4通りである。これらを用いてパターン展開を行なった。その結果と地上調査データとの相関は表1のようになった。これから次のことがわかる。

表1 5つの基本スペクトルパターン

	バンド1	バンド2	バンド3	バンド4	バンド5	バンド7
伐採地	10.9	6.5	13.8	21.0	30.7	17.1
ササ	7.1	5.6	8.6	33.2	33.3	12.2
広葉樹	7.0	4.3	7.5	43.0	30.0	7.8
針葉樹	8.5	6.0	9.8	38.2	29.1	8.1
密な針葉樹	10.7	5.9	10.4	38.3	27.4	7.2

針葉樹林において、どの組み合わせに関しても、CPIは従来の水パターン展開係数(WPI)と高い相関を持ち、CPI値同士の相関も高い。また、CPIと地上データとの単相関では、針葉樹の胸高断面積との相関が最も高くなった。地上データと最も高い相関を示したCPIは〔針葉樹、広葉樹、土壌〕の基本パターンの組から得られたものである。そこで、以後の解析には、この基本パターンの組み合わせを使った。

上の関係を使ってCPIから針葉樹のhaあたり胸高断面積を推定する式を導き出した。その結果、推定式は次のようになった。 $G=63.9 \times CPI$  ( $r=0.71$ )

また、haあたり胸高断面積と林分材積との関係は次のようになった。 $V=8.065 \times G$  ( $r=0.82$ )

これらの式から、画素ごとの蓄積量(/ha)を算出し、推定画素を作成した。ただし、地上調査データなどから蓄積量 $1,350m^3$ を上限とした。なお、毎木調査点の林分材積と平均胸高断面積の関係では、地域的な差は認められなかった。以上から、各小班の針葉樹平均蓄積量と林分蓄積量を求めた。また、小班ごとに森林調査簿上の総蓄積量とも比較した。

その結果は、以下のようになった。

森林調査簿と、針葉樹蓄積推定量との関係 推定量 $=0.858 \times$ 森林調査簿値 ( $r=0.897$ )

森林調査簿を下回る値が出たが、この原因としては、第一に胸高断面積の推定に使用した地上データの精度の問題がある。実際、最近の毎木調査の結果追加された5点について調べると、推定式から算出された蓄積よりも高い蓄積量を持っていた。

次に、小班ごとにhaあたりの平均蓄積値を出し、森林調査簿と比較した。その結果、以下のことがわかった。

①伐採地に隣り合った小班の平均蓄積量は、調査簿に載っている値と比較して小さい場合が多い。これは、伐採した範囲が小班よりも大きい場合が多いためではないかと思われる。また、細い帯状に残された森林が風倒などで被害に遭い、結果として針葉樹が減少している可能性もある。また、残っている小班が細長い場合、適切な衛星データの画素を勘定できないこともあり得る。

②かなり大きな面積の小班で調査簿のhaあたり蓄積量の方が大きい場合は広葉樹の混交が著しいことが多かった。特に沢筋の広葉樹の混交や間伐が見られる林分で蓄積量が過小に推定されている。これは、CPIとの関連分析に用いた地上調査地に広葉樹があまり含まれていないことに起因すると思われる。

③一方、森林空間利用林部分については、多くの小班で衛星データからの推定値が調査簿の値を上回っていた。

木曾の天然林に対し、パターン展開法を適用して針葉樹の蓄積量を求めた。この際、この地域の森林に特化した基本パターンの組を使用することによって、より精度の高い地上データとの相関式が得られることがわかった。ただし、今回の解析によって、特に、広葉樹の混交の見られる地域については針葉樹の蓄積量が低く推定された。また、衛星データからの推定値が、全体的に低く推定されていることもわかった。

また、衛星データからの推定値と調査簿の値を比較して、ずれの大きな部分に対して地上調査を行ない、その結果をまた推定式に反映させて精度の向上を図ることで、現地データの乏しい場合でも本手法が有効に利用できることが確認できた。

## 6. 本研究で得られた成果

衛星データによって画素ごとの森林モニタリングを可能にする画素分解法として、パターン展開法に着目し、様々な森林でその特徴を分析した。その結果、以下のようなことがわかった。

- 1) 画素分解法であるパターン展開によって、森林地帯の画素は一般的に、針葉樹パターン、広葉樹パターンおよび土壌パターンで展開することで、森林構造に関する情報を得ることができる。
- 2) 針葉樹パターン展開係数 CPI は、常緑針葉樹の樹冠被覆度に比例する。
- 3) 広葉樹パターン展開係数 VPI は、植生の総量に反応する。
- 4) 土壌パターン展開係数 SPI は、落葉量、土壌に反応する。
- 5) VPI 値は、CPI 値よりも大気の影響が少ない。また密な常緑針葉樹林の季節変化に対しても鋭敏である。
- 6) パターン展開係数は、地形の影響が軽減されている。
- 7) 青森ヒバ天然林地帯で、パターン展開法の有効性が確認できた。
- 8) 木曾ヒノキ天然林地帯でも、パターン展開法の有効性が確認できた。
- 9) 営林署単位の質的な針葉樹分布情報は本研究で初めて得られた。

この分析手法には、ランドサット TM を使用しているが、もしそれ以外の衛星データを使用するとすれば、TM 程度かそれ以上のスペクトル幅とバンド数を持っていることが必要である。これは、CPI 値に一番影響を与えるのがバンド 1 の青色光の範囲であり、VPI 値と SPI 値に大きな影響を与えるのが、近赤外および中間赤外の範囲であるためである。また、各画素の反射光量の総和（アルベド）をバンド値の和で近似できるように、各バンドの波長域の全幅がある程度広いことが必要である。そのような衛星センサなら、本研究で行ったように基本パターンを設定することで、パターン展開を用いて、画素ごとの分析を行うことが可能であろう。

## 7. 参考文献

- ・ Tompkins, S., J.F. Mustard, C.M. Pieters, D.W. Forsyth, Optimization of endmembers for spectral mixture analysis, Remote Sensing of Environment, 59:472-489, 1997
- ・ 藤原昇・松村加奈子・阿部忍・羽澄妙子・落合史生、衛星データ解析のためのパターン展開法の開発、日本リモセン学会、16(3)：17-34、1996

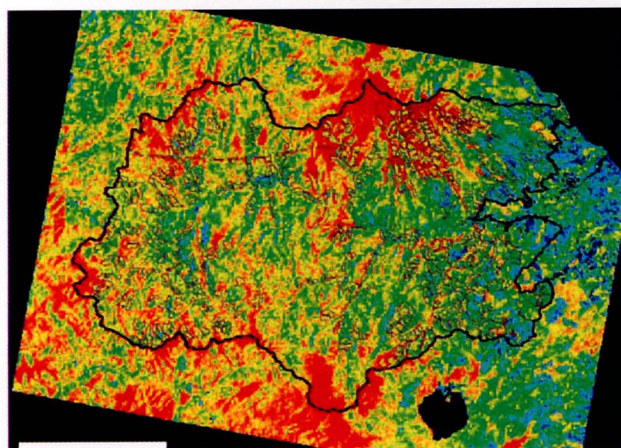
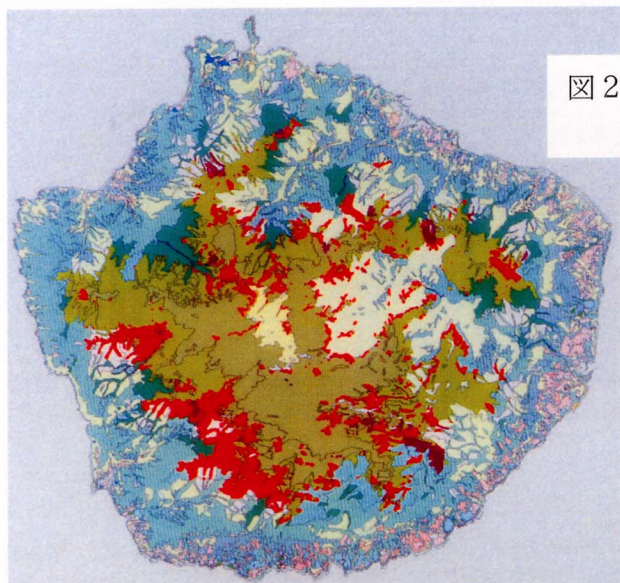
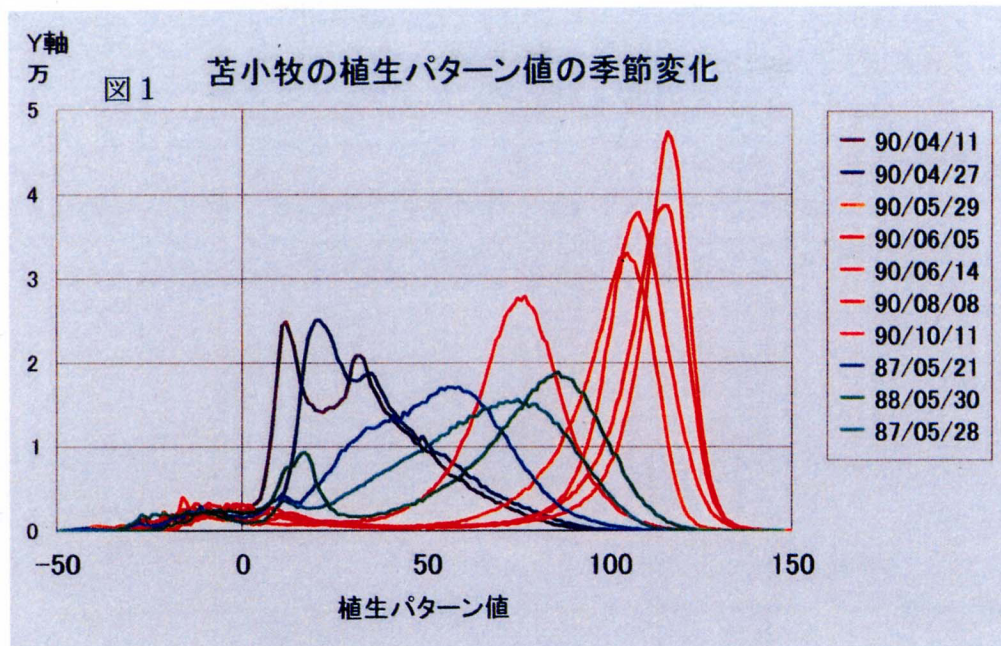
## [研究成果の発表状況]

### (1) 口頭発表

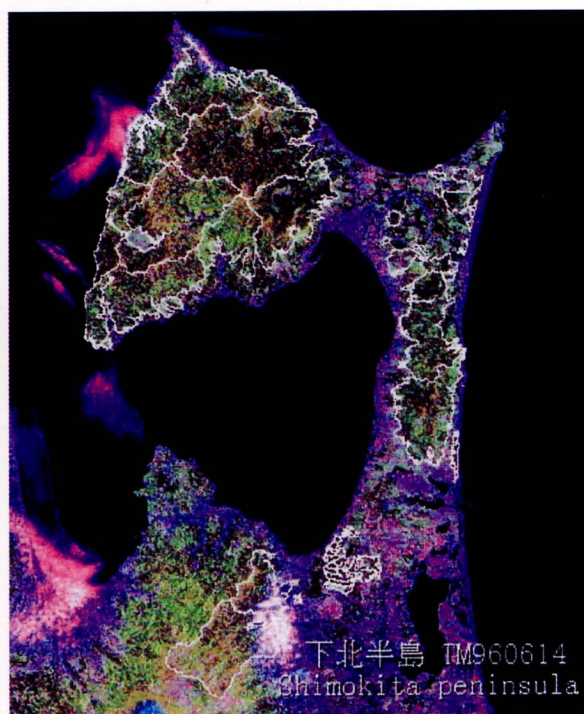
- ① 沢田治雄、中園悦子、四十沢祐子、池田世範：日本林学会要旨集、109, 293 (1998.4)  
「ランドサットTMによる天然ヒバ林の分布推定」

### (2) 論文発表

- ① 中園悦子、沢田治雄、永谷泉：リモセン学会誌、予定 (2000)  
「衛星データによる青森天然ヒバの蓄積量の推定」
- ② 中園悦子、沢田治雄：リモセン学会講演論文集、22, 247-248 (1997)  
「森林解析へのパターン展開法の応用 (2) 屋久島天然杉林の分布範囲の更新」
- ③ 中園悦子、沢田治雄：リモセン学会講演論文集、25, 51-52 (1998)  
「森林解析へのパターン展開法の応用 (3) 青森天然ヒバ林の幹材積の推定」
- ④ 中園悦子、沢田治雄：リモセン学会講演論文集、26, 59-60 (1999)  
「パターン展開法による熱帯林の常緑樹混交率の推定」
- ⑤ 中園悦子、沢田治雄、永谷泉：リモセン学会講演論文集、27, 71-72 (1999)  
「Landsat TM画像による天然ヒノキの幹材積の推定」
- ⑥ 三塚直樹、沢田治雄、鷹尾元、石橋聡、小林達治：リモセン学会講演論文集、26, 61-62 (1999)  
「高分解能多周波航空機SARによる森林型判別」
- ⑦ 小林達治、浦塚清峰、灘井章継、梅原俊彦、佐竹誠、沢田治雄、三塚直樹、鷹尾元、石橋聡、島田政信：リモセン学会講演論文集、26, 563-564 (1999)  
「高分解能多周波航空機SARによる森林観測」
- ⑧ 三塚直樹、沢田治雄、鷹尾元、石橋聡、川端幸蔵、武生雅明、小林達治、若林裕之：リモセン学会講演論文集、27, 193-196 (1999)  
「高分解能多偏波航空機SARと森林バイオマスの関係解析」
- ⑨ 小林達治、梅原俊彦、灘井章継、松岡建志、浦塚清峰、佐竹誠、沢田治雄、三塚直樹、若林裕之、田殿武雄、Muhtar Qong, : リモセン学会講演論文集、27, 197-198 (1999)  
「多機能航空機SARによる森林観測」

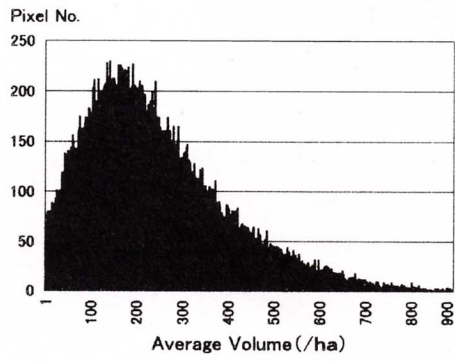


大畑営林署ヒバ蓄積推定画像  
Image of estimated stand volume of Hiba  
(Oohata forestry district)

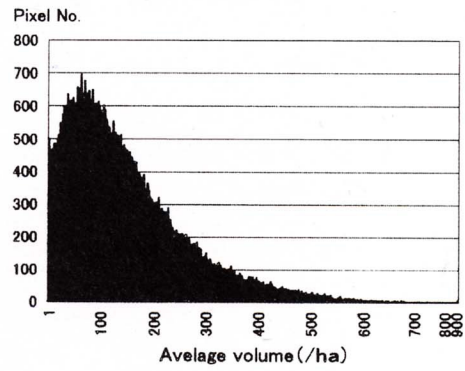


下北関東ヒバ蓄積量研究対象地  
(白い範囲が営林署)

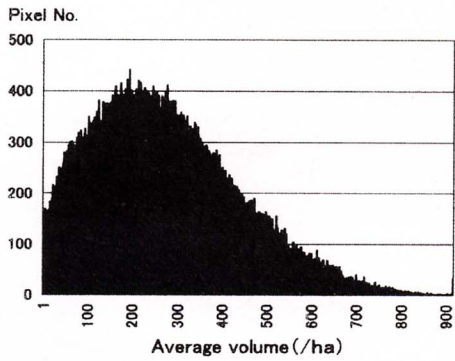




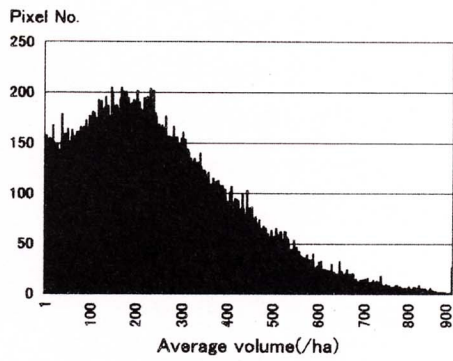
脇野沢



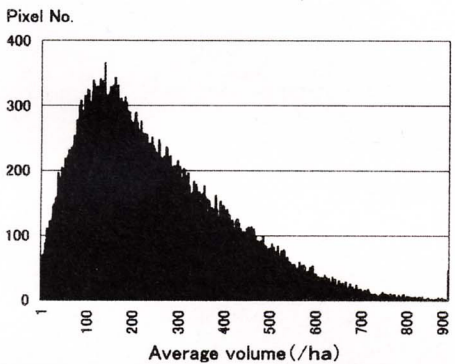
川内



大畑



陸奥



横浜

図5 TMで推定した各営林署のhaあたり蓄積量分布(営林署ごとの森林の質がうかがえる)

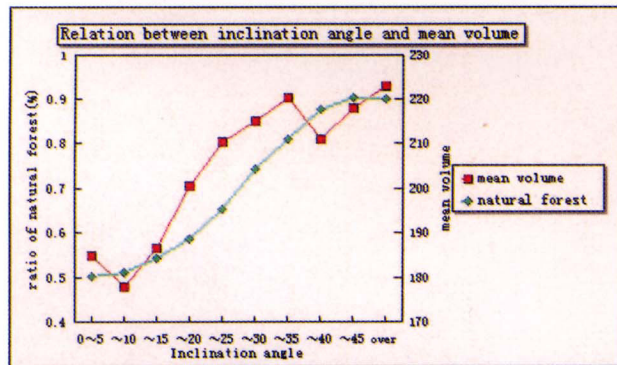


図6 斜面傾斜とヒバ蓄積量および天然林率との関係

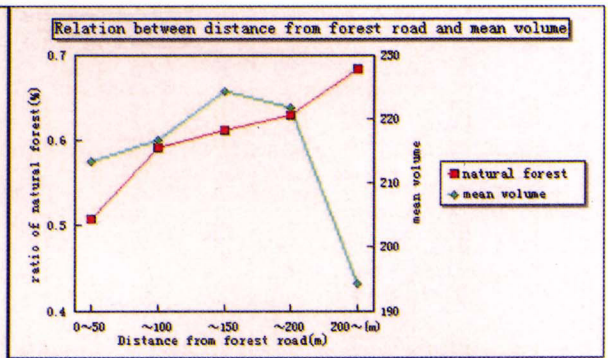


図7 林道からの距離とヒバ蓄積量および天然林率との関係