

衛星複合画像を用いた竹・樹木混生林の判読

Extraction of the bamboo-tree mixed forest stands using
the merged satellite image張 福平*・秋山 侃**・魏 永芬**
西條 好迪**・河合 洋人*・巴 嘎 那****Fuping ZHANG, Tsuyoshi AKIYAMA, Yongfen WEI,
Yoshimichi SAIJOH, Hiroto KAWAI and BAGANA*

Abstract: The merged image of the high spatial and the high spectral resolution images could provide more information than each individual image. In this study, the feasibility of using the merged image to extract bamboo-tree mixed forests was examined. To achieve this, the merged image was generated from SPOT PAN and Landsat ETM+ satellite images by applying IHS (Intensity-Hue-Saturation) transform, PCA (Principal Component Analysis), Multiplicative transform, and Brovey transform, respectively. The spectral and spatial information was thus evaluated. Among the four merged methods, IHS transform was proved the most effective to present useful information from original images. Besides, using the created merged images with all four merging methods, the land cover type was further classified by the maximum likelihood classifier method, overall extraction accuracy for the bamboo forest was shown to be 80.9%, 75.3%, 74.2% and 78.7%, respectively. Since the classified result displayed the presence of the bamboo forest in mixtures with different tree crown, the results were further interpreted with the aid of the aerial photographs. As a result, bamboo in the mixtures were determined and the occupation percentages of bamboo crown were grouped into four categories: above 90%, 70~90%, 50~70% and 30~50%. For all four categories, reclassification was performed and the extraction accuracy for bamboo forest were obtained as 80.0%, 71.1%, 62.2%, and 53.3%. The corresponding bamboo area ratio in each category against the whole bamboo area occupied by this type, mixed vegetation were 32.4%, 31.3%, 20.5% and 15.7%, respectively. Therefore, it is clear that using the merged image, a great part of the bamboo-tree mixed forest could be extracted in addition to pure bamboo forest; and it is also possible for better assessment of the current bamboo distribution situations and future expansion tendencies in local or larger basin areas.

Key word: bamboo-tree mixed forest, IHS conversion, Landsat ETM+, merged image, SPOT PAN

1. はじめに

近年、竹材の需要低下、筍輸入量の増大、河川敷の

国有化や竹林管理者の高齢化などの原因で、竹林の利用度が減少し、放置竹林が増加していることが多くの研究者によって指摘されている(渡辺ら, 2002; 鳥居, 2003; 中島, 2001; Okutomi et al., 1996; 鳥居・井鷲, 1997; 大野ら, 2004)。竹の生長は速いため、森林や農耕地に侵入し、経済的損害を与えるばかりでなく、地域または流域規模の環境問題に発展することが懸念されている(張ら, 2004)。竹林を効率的に管理するためには、竹林の分布状況の把握および拡大実態の解明が重要である。これまで多くの竹林の研究ではいくつかの地理情報および航空写真を用いて、竹林の拡大速度および経年変化を分析したものが多かった(Isagi and Torii, 1998; 三宅ら, 2000; 甲斐・辻井, 2004;

* 岐阜大学大学院連合農学研究科
United Graduate School of Agricultural Sciences,
Gifu University

** 岐阜大学流域圏科学研究センター
River Basin Research Center, Gifu University

*** 岐阜大学大学院農学研究科
Graduate School of Agricultural Sciences, Gifu University

〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 45, NO. 2, 2006

西川ら, 2005; 大野ら, 1999; 大野ら, 2002; 鳥居・井鷲, 1997; 鳥居, 1998)。例えば, 鳥居・井鷲(1997)は地形図と航空写真を用いて, 京都府南部の西山地域, 大山崎地域, 田辺地域, 山城地域の4箇所において, それぞれ地域の竹林の分布を判読し, 竹林の分布拡大状況を分析した。大野ら(1999)は地形図を用いて大阪泉南地域における竹林面積と箇所数の推移, 土地利用変化および竹林の面積拡大速度などの研究を行なった。鳥居(1998)は航空写真を用いて, 滋賀県八幡山および京都府男山における事例として竹林分布の拡大速度を推定した。しかし, 航空写真を用いた場合, 対象域の範囲が狭く, いずれも目視判読を行っている。流域のような広域の竹林分布の変化状況を知るには多大な労力と時間が費やされる。さらに, 経費の関係で撮影頻度は5年に一度程度であるため, 最新の状況を捉えることが困難である。

衛星画像データはデジタル情報であるため, コンピュータを活用した画像処理が可能であり, 客観的な判断が可能である(加藤, 2004)。このため, 衛星画像データを用いることにより広範囲の調査が短期間で可能で, 最新の状況を知ることができる。衛星画像データを用いて竹林を解析した研究事例がいくつかある(小泉ら, 2003; 張ら, 2004; 大野ら, 2005)。しかし, 竹林の分布は森林植生の分布と異なり, 個々の占有面積が小さく, また侵入の過程では他の植生と混在することが特徴として挙げられる。これまでのリモートセンシング技術を使用した研究では, 竹の純林または圧倒的に竹冠の占有割合の大きい竹林を対象としている。たとえば, 張ら(2004)の場合は竹冠の被覆割合80%以上である。小泉ら(2003)はLandsat TMを用いて純竹林を対象として, 竹林の抽出およびその精度評価を行った。しかし, これらの研究では, 竹林による他植生への侵入実態を把握することは困難である。放置竹林の拡大過程を把握・予測するためには, 純竹林ばかりでなく, 樹林地内に侵入している竹林の樹冠占有率を正確に捉えることが必要である。

高空間分解能衛星画像と高波長分解能衛星画像を複合する場合, 異種衛星画像データを数学的に変換して, それぞれの衛星画像データの長所を生かした複合画像を作成することができる。また, 複合画像は単独画像より豊富な情報を保有することができる。たとえば, SPOT PAN データの空間解像度は10mと高いが, バンド数は1つしかない。Landsat ETM+画像は空間解

像度が30mでやや低い, 6つのバンドを有する。両衛星画像から作成した複合画像は, より詳細な土地被覆状況を提供する一方, 豊富なスペクトル情報で, わずかに葉色の異なる樹種を識別できる可能性がある。これはLandsat ETM+あるいはSPOT PANのいずれか一方だけでは不可能である(Civco et al., 1995)。

そこで, 本研究では, 放置竹林が森林へ侵入していく過程を含めた拡大状況を明らかにすることを目的として, SPOT PANとLandsat ETM+衛星画像の複合画像を用いて, 複合手法の検討と竹と樹木の樹冠占有率別竹林の抽出を試みた。

2. データ処理

図1に示したように, まず, 岐阜県長良川下流域(41000ha)におけるSPOT PANとLandsat ETM+衛星画像をオリジナルデータとして, 4つの手法により複合画像を作成する。そして各複合画像のスペクトル情報および空間分解能情報について評価する。このうち情報の損失が最も少ない手法を選んで土地被覆分類を行う。続いて, 竹林として抽出された領域に対して, 航空写真から判読した竹冠の被覆度情報をもとに, 竹と樹木の樹冠割合別竹林の再分類を行う。最後に,

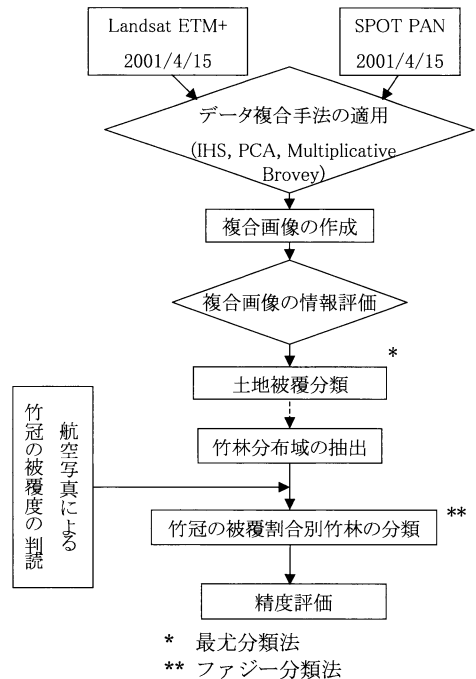


図1 研究の流れ

衛星複合画像から分類された竹冠の被覆割合別竹林の精度を、航空写真の目視判読により得られた結果によって評価する。

2.1 複合画像データの作成手法

通常、衛星画像データを複合する手法は IHS(Intensity-Hue-Saturation) 変換, 主成分分析 (Principal Component Analysis), 乗算法 (Multiplicative), Brovey 変換などがある。これらのデータ複合の方法に対して, Pohl (1998) はデータの複合レベルによって, Pixel-based, Feature-based, そして Decision-based に分けて説明した。Pixel-based とは, 画素ベースで行う複合で, 原画像の段階で複合する方法である。Feature-based とは各々の画像から特徴を抽出して, これを基準データ上の地理的位置に合わせ, 抽出された特徴を融合する方法である。Decision-based とは各々のマルチソースデータの特徴分類してから地理的位置を合わせ, あらかじめ定義したルールによって複合する方法である。

一方, データ複合の目的あるいは特徴によっても大きく3つに分類できる。まず, 第一は画像表示 (display) のためのものである。そして, 第二がスペクトル情報の維持とは関係なく, 空間解像度の改善だけを目的としたデータ複合である。第三がラディオメトリック特徴の保存, すなわち, スペクトル情報の損失を避けるための複合方法である (パクラ, 1999)。

一般的に, データ複合のためには, 正確に地理的位置を合わせることが要求される。本研究では, SPOT PAN データを基準として, ソフトウェア ERDAS IMAGINE (Ver. 8.7) を使って多項式幾何補正により Landsat ETM+ データを補正して, 地上基準点との誤差を0.5ピクセル以内に調整した。さらに, Landsat ETM+ を SPOT PAN の解像度にあわせて, 10m にリサンプリングした。その後, Pixel-based 複合を基本として, IHS 変換, 主成分分析, 乗算法 (Multiplicative) と Brovey 変換により複合画像を作成した。それぞれの複合画像の空間分解能情報とスペクトル情報を評価して, 最も高い空間分解能であり, かつ, スペクトル情報の損失が少ない複合画像を選択して竹林の抽出を試みる。

2.1.1 IHS 変換

IHS (明度-色相-彩度) 変換には, 30m の空間解像

度をもつ6つの Landsat ETM+ バンドのうち3つのバンドしか使えない。また, 波長域によって得られる情報が異なるため, 使用する3バンドを事前に選択しておく必要がある。Chavez et al. (1991) は Landsat TM のバンド6を除く6つのバンドから3つのバンドを選択する際の基準として *OIF* (Optimum Index Factor) を提案した。*OIF* は次のように計算される。

$$OIF = \frac{\sum_{k=1}^3 S_k}{\sum_{k=1}^3 Abs(r_{ij})} \quad \text{式(1)}$$

ここで, S_k は衛星データのバンド k における標準偏差であり, $Abs(r_{ij})$ は3バンド間における相関係数の絶対値を示す。*OIF* 値が大きいバンドの組合せほど, 多くの情報をもっているとともに重複が一番少ない。

本研究でも Landsat ETM+ データの解像度30m を持つ6つのバンドから3バンドを選ぶために *OIF* 値を求めた(表1)。その結果, 全20組の中で, 上位5位までには可視・近赤外・中間赤外波長帯が各1波長ずつ選ばれた。なかでも, バンド3, 4, 7 (可視域, 近赤外域, 中間赤外域) の *OIF* 値が一番大きい。Jensen (1986) は, 各波長帯の情報が異なるため, 可視・近赤外・中間赤外域のような組合せが一番多くの情報が表示されると指摘している。

そこで, IHS 変換による複合画像を作成する際, *OIF* 値が一番高いバンド3, 4, 7の組合せを用いた。RGB 画像から IHS へ変換する際, 以下の式(2)を用いた (Carper et al., 1990)。

表1 *OIF* 式を用いて算出した Landsat ETM+ の上位10位までのバンド組合せ

Case	B.C.	S_k	$Abs(r_{ij})$	<i>OIF</i> 値
1	3.4.7	62.19	1.77	35.18
2	1.4.7	56.07	1.64	34.13
3	3.4.5	63.28	1.89	33.47
4	1.4.5	57.16	1.74	32.77
5	2.4.7	56.55	1.77	32.03
6	4.5.7	64.30	2.04	31.58
7	1.3.4	55.05	1.80	30.61
8	2.4.5	57.65	1.90	30.37
9	2.3.4	55.54	1.90	29.18
10	3.5.7	73.81	2.62	28.16
:	:	:	:	:

B.C.: バンドの組合せ

$$\begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad \text{式(2)}$$

$$H = \tan^{-1} \left[\frac{V_2}{V_1} \right],$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}.$$

また、I成分はスペクトル的に SPOT PAN と等しく、すべてのスペクトル情報は H 成分と S 成分に含まれている。そのため、SPOT PAN は Intensity 画像データに置き換えられる。これを用いて、新たな IHS 画像を作成し、以下の式(3)を用いて、IHS から RGB に逆変換をして、複合画像を作成する。

$$V_1 = S \cdot \cos(H)$$

$$V_2 = S \cdot \sin(H)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad \text{式(3)}$$

2.1.2 主成分分析 (PCA)

主成分分析 (PCA) はマルチスペクトル画像の解析、特に画像強調とデータ圧縮によく使われる手法である。スペクトル空間の各ピクセルの座標(元のデータ・ファイル値)が、線形式を使用して再計算される。PCA 変換を計算するには、データに対して線形変換が実行される。線形変換を行うには、n 番目の主成分の固有ベクトルと固有値を次の式に示すように共分散行列から数学的に導く必要がある (Faust, 1989)。

$$V = \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & v_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & v_n \end{bmatrix} \quad \text{式(4)}$$

$$E C_{ov} E^T = V$$

ここで

C_{ov} = 共分散行列

E = 固有ベクトルの行列

T = 転置関数

V = 固有値の対角行列で、対角線以外の要素はすべてゼロ

V は、ゼロ以外の要素が最大から最小に並び、 $v_1 > v_2 > v_3 \dots > v_n$ となるように計算される。

PCA データのバンド間には相関がなく、独立している (Jensen, 1996 ; Faust, 1989)。PCA による Landsat ETM+データ (バンド 1 ~ 5, 7) と SPOT PAN を複合する場合、IHS 手法と同様に、PC1はスペクトル的に SPOT PAN と等しく、すべてのスペクトル情報は他の主成分に含まれているため、SPOT PAN を PC1と置き換えて、新たな画像を作成した。最後に逆変換を行い、PCA による複合画像を作成する。

2.1.3 乗算法 (Multiplicative)

Crippen (1989) は Intensity イメージを色のイメージに組み込むための4つの数学的手法(加算, 減算, 除算および乗算)を議論した。その中で乗算だけは色の歪みがなかったとしているので、Landsat ETM+画像の各レイヤと SPOT PAN 画像を乗算して、複合画像を作成する (式(5))。

$$(DN_{TMI})(DN_{SPOT}) = DN_{newTMI} \quad \text{式(5)}$$

ここで、 i はバンド番号である。

2.1.4 Brovey 変換

Brovey 変換は衛星データの簡単な複合手法である (ESRI ジャパン株式会社 ERDAS 技術部, 2003)。この手法では式(6)にしたがって3つのバンドを使用する。この手法は3つのバンドを使用するため、前述した OIF 値が最も大きいバンドの組合せを用いて、SPOT PAN と複合画像を作成する。

$$Fusion_i = \frac{Multi_i}{Multi_{sum}} \times PAN \quad \text{式(6)}$$

ここで、 i は Landsat ETM+画像のバンド 3, 4, 7 であり、 $Multi_{sum}$ は3バンドの輝度値の和である。

2.2 複合画像データの評価手法

各手法を用いて作成した複合画像は図2に示した。異なる手法により作成した複合画像における土地被覆のイメージが異なる。例えば、森林、草地、竹林のような植生は異なる複合画像で表現されたイメージは感覚的に違って見える。このため、複合画像が単独画像のスペクトル情報ならびに空間解像度情報をどのように表現しているのか、複合画像上で評価する必要がある。

2.2.1 スペクトル情報の評価法

いくつかのスペクトル情報の評価は、複合画像と標

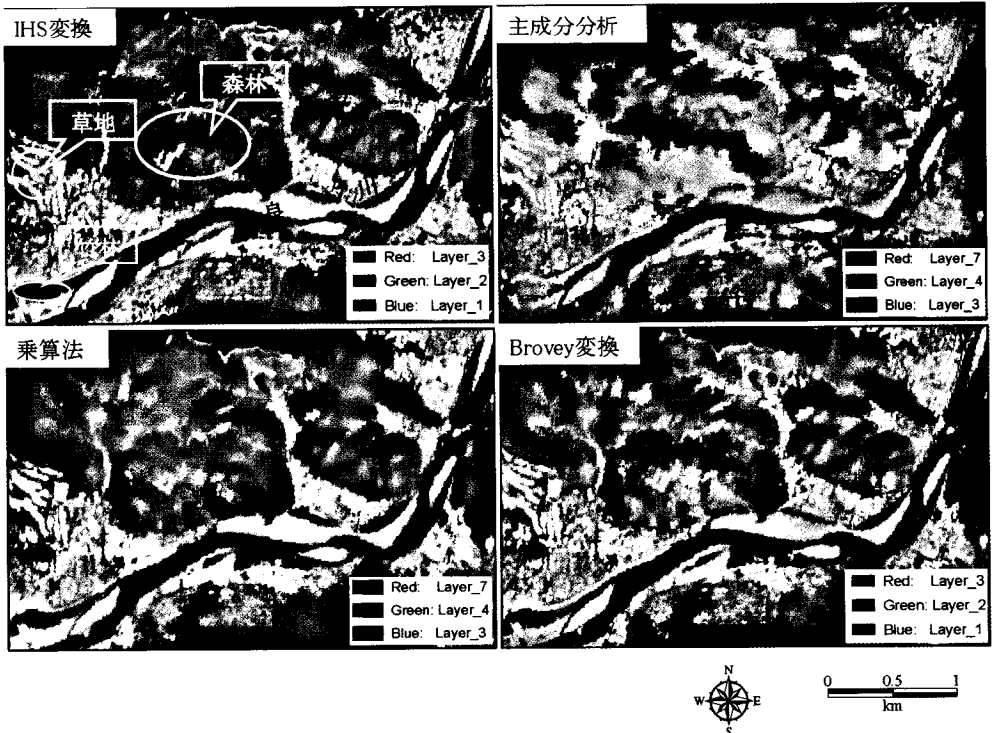


図2 4つの手法により作成した複合画像（岐阜市周辺の一部）

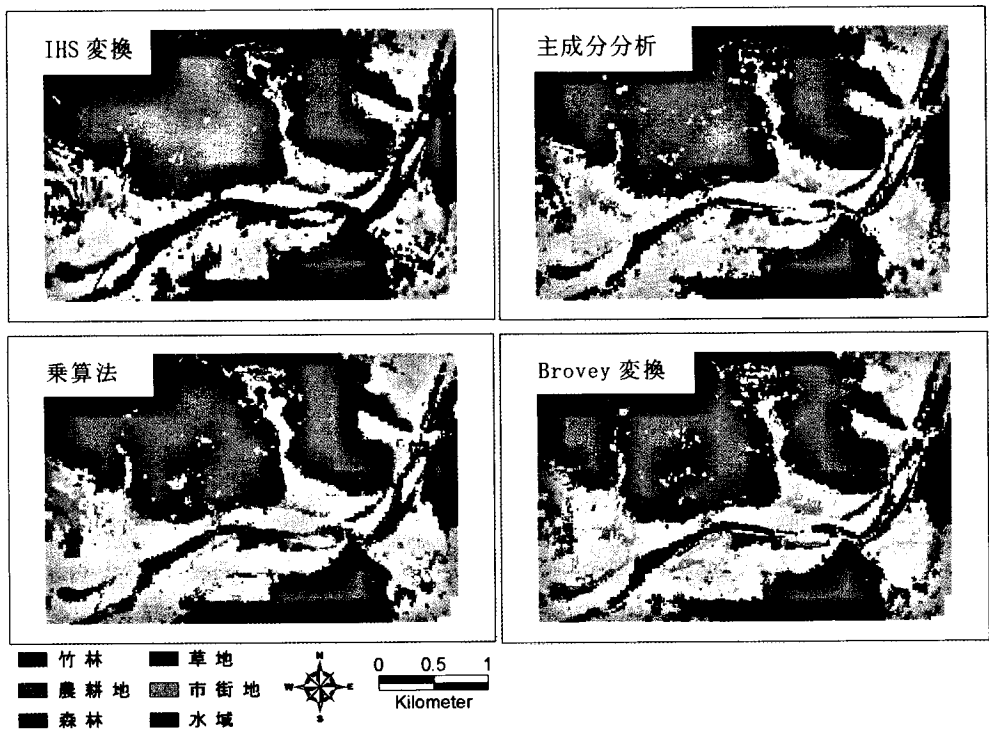


図3 複合画像を用いた土地被覆分類結果

準画像間の差に基づいて行われている (Yocky 1995, Li et al., 1995)。しかしながら、標準画像を決めることは常に難しい。Chavez et al. (1991) は高空間解像度衛星画像と高波長分解能衛星画像とを複合する場合、高波長分解能衛星画像のオリジナルスペクトル情報を維持することが重要であるとした。この考えに基づくならば、複合画像のスペクトル情報は複合画像とオリジナル Landsat ETM+画像のピクセル値ごとの差の平均値から評価できる。その式は以下のように表される。

$$D_k = \frac{1}{n} \sum \sum |V_{kij} - V_{kij}| \quad \text{式(7)}$$

ここで、 V_{ij} と V_{ij} は複合画像とオリジナル画像のピクセル値、 k は第 k バンドで、 i, j は第 i 行、第 j 列で、 n は画像中の全ピクセル数である。したがって、複合画像とオリジナル Landsat ETM+画像の差の平均値が小さければ小さいほど、多くのオリジナル Landsat ETM+画像のスペクトル特性を保持していることになる。

2.2.2 空間分解能情報の評価法

これまでの研究では、複合画像の空間分解能情報の評価に関して確立された方法はなかった。Zhou et al. (1998) はハイパスフィルタ SPOT-Landsat TM 複合画像とハイパスフィルタ SPOT PAN 画像との相関係数を 1 つの評価指標として、複合画像の空間分解能情報を評価した。複合画像と SPOT PAN 画像のオリジナル画像を用いて、両画像間の相関係数から複合画像の空間分解能情報を定量的に評価する。

2.3 複合画像を用いた竹林分布の抽出

2.3.1 土地被覆分類

張ら (2004) は、2001年 9月16日、2000年10月16日、2001年11月 7日の 3 時期に撮影した IKONOS 画像をモザイク合成した画像と 3月、12月に撮影された Landsat ETM+データを基にして、IHS 変換による複合画像を作成した。これらの複合画像を用いて、最尤分類法およびツリー決定法による竹林の抽出を行った。その結果、最尤分類法を用いた場合、竹林の分類精度はそれぞれ 84.9% (3月画像) と 82.6% (12月画像) が得られた。しかし、ツリー決定法を用いた場合、竹林の分類精度は 45.3%、47.7% にとどまり、複合効果は認められなかった。そこで、本研究は 2001年 4月15

日に撮影された SPOT PAN と Landsat ETM+との複合画像を用いて竹林分布域を抽出する際にも最尤分類法を用いた。張ら (2004) は竹の樹冠割合が 80% 以上の竹林のみを対象としたが、本研究では竹冠が 30% 以上含まれるものすべてを教師データとして与えた。そして上述の 4 つの複合手法により作成した複合画像のスペクトル情報および空間分解能情報をそれぞれ評価した。

また、平成 9 年に作成された数値地図 25000 分の 1 地形図を用いて、対象域の土地被覆状況を把握し、竹林以外に、森林、農耕地、草地、都市域、水域などの分類項目を決めて、トレーニングデータを選定した。これらデータを基にして、各手法により作成した複合画像を用いて、最尤分類法による土地被覆分類を行った。本研究で、4 月の衛星データが使われたため、分類項目は以下のように設定した。

- 竹林：東海地域に多く分布しているモウソウチク、マダケ、ハチクを含む
- 森林：広葉樹、針葉樹を含む
- 農耕地：田、畑、果樹園を含む
- 草地：河川敷、市街地の庭園およびゴルフ場の芝地を含む
- 都市域：裸地、市街地の様々な非植生・貧植生地を含む
- 水域：河川、池、湖を指す

2.3.2 竹冠の被覆割合別竹林の分類

地形図から選択した竹林および現地調査した竹林では、竹と樹木が混生している場合が多い。そこで、2000年10月 5日に撮影した撮影高度 4700m、縮尺 30000 分の 1 の航空写真を用いて、立体視で竹林と樹木の混生割合が異なる 40 箇所を竹林を選んだ。次に、渡辺ら (2002) が作成した竹林のポリゴンデータを参照して、各竹林において、竹と樹木の樹冠を立体視で分別し、各樹冠をポリゴン化した。各竹林地において、航空写真から判読した樹冠の面積を算出し、樹冠の被覆割合以外を竹冠の被覆占有率とした。判読した 40 箇所の竹林のうち、面積が大きく、竹冠の割合が相対的に均一な竹林を 12 箇所選択し、トレーニングデータとした。残りの 28 箇所の竹林は検証用データに用いた。なお、航空写真から判読した竹林の周辺はほとんど針葉樹の人工林が優占種である。また、衛星データは 4 月のデータで、この時期には広葉樹はまだ完全に展開していない

め、竹と混生している樹種は針葉樹人工林とした。その結果、40箇所の竹林はすべて竹冠の被覆割合が30%以上であった。この判読結果をトレーニングデータとして、竹林の抽出精度が最も高い衛星複合画像を用いて竹の被覆割合を20%間隔に設定し、分類した結果と航空写真から判読した結果とを照合しながら、ファジー分類法により竹の被覆割合別竹林を分類した。つまり、竹林の分類項目として竹冠の被覆割合が90%以上、70~90%、50~70%と30~50%の竹林を設定した。ファジー分類とは、1ピクセル内に複数のカテゴリが混在している場合に、1ピクセルに対して一意的に1つのカテゴリを割り当てるのではなく、メンバーシップ関数によって、最も確度の高いカテゴリを割り当てる分類手法である。

設定した竹冠の被覆割合が90%以上、70~90%、50~70%と30~50%の4段階の竹林を分類項目として、IHS変換により作成したSPOT PANとLandsat ETM+の衛星複合画像の土地被覆分類により、竹林として選ばれた地点に対して、ファジー分類法により再分類を行った。また、航空写真から立体視判読した竹冠の被覆割合結果をArcGIS (Ver. 8.3) を使って10mメッシュごとに集計した。さらに、集計した結果を複合画像から再分類した結果とピクセルごとに照合し、竹林の抽出精度を評価した。さらに、各項目段階のKappa係数を求めて、分類した竹林の精度を評価した。

3. 結果と考察

3.1 異なる手法により作成した複合画像のスペクトルおよび空間分解能情報の評価

複合画像とオリジナルマルチスペクトル画像との差の平均値が小さければ小さいほど、複合することによって失われるスペクトル情報は少ない。表2に示したのはSPOT PANとLandsat ETM+の複合画像の各レイヤと対応するLandsat ETM+データの各バンドとの差の平均値である。各手法により作成した複合画像の各バンドの平均値を比べると、IHS変換により作成した複合画像は差の平均値が9.8で最も小さく、スペクトル情報の損失が最も少ないと判断される。また、各バンドで比較すると、バンド3と4はIHS変換により作成した複合画像とLandsat ETM+との差の平均値が最も小さかった。しかし、バンド7の場合、Brovey変換により作成した複合画像の差が最も小さくなった。すなわち、バンド3、4の場合、IHS変換により作成した複合画像のスペクトル情報は原画像のスペクトル情報を最も多く持つ一方、バンド7についてはBrovey変換の情報が多いことを意味している。

空間分解能情報は複合画像とSPOT PAN画像の相関係数から評価した。相関係数が高ければ高いほど、作成した複合画像が原画像の空間分解能情報を良く反

表2 各手法間におけるスペクトル情報量の評価

手法	バンド1	バンド2	バンド3	バンド4	バンド5	バンド7	平均
IHS			7.9	7.9		13.5	9.8
主成分分析	15.6	16.7	22.5	8.1	23.6	22.7	18.2
乗算法	31.6	24.2	23.2	20.6	28.0	19.9	24.6
Brovey			20.1	14.8		8.6	14.5

注1：各バンド内での複合画像とLandsat ETM+の手法別差の平均値

注2：差の平均値が小さいほど失われる情報は少ない

注3：太字は第1位；斜体字は第2位を示す

表3 各手法間における空間分解能情報量の評価

手法	バンド1	バンド2	バンド3	バンド4	バンド5	バンド7	平均
IHS			0.973	0.962		<i>0.987</i>	0.974
主成分分析	0.950	0.968	0.926	0.854	0.942	0.837	0.913
乗算法	0.971	0.955	0.931	<i>0.958</i>	0.937	0.908	0.943
Brovey			<i>0.957</i>	0.938		0.993	<i>0.963</i>

注1：表中の数値は各バンド内で複合画像とSPOT PANとの相関係数

注2：相関が高いほど空間分解能情報が多く保持されている

注3：太字は第1位；斜体字は第2位を示す

映している。表3は異なる手法によって作成した複合画像と SPOT PAN 画像との相関係数である。各手法において、各バンドの平均値を比べると、IHS 変換により作成した複合画像が総合的に相関が0.974で最も高く、SPOT PAN の空間分解能情報を多く保有することが判明した。さらに、各バンドにおいて、バンド3、4の場合、IHS 変換により作成した複合画像と SPOT PAN との相関が一番高い。バンド7の場合は Brovey 変換により作成した複合画像と SPOT PAN との相関が最も高く、次いで IHS 変換により作成した複合画像であった。

以上の結果から、IHS 変換により作成した複合画像は空間分解能情報を最も多く保持することが明らかになった。これは IHS 変換をする際、I 成分は空間分解能情報を表し、H、S 成分はスペクトル成分を表す (Grasso, 1993) ので、I 成分を SPOT PAN データと置き換えることができる。これにより、SPOT PAN の空間分解能情報を取り込んで、さらに、H、S は Landsat ETM+ のスペクトル情報を使うことで、作成された複合画像の空間分解能情報とスペクトル情報がオリジナル画像の特長を良く反映できると思われた。Brovey 変換は画像のヒストグラムにおける高域と低域の末端のコントラストを視覚的に増幅する (都市部の地物などのような反射強度が高い部分と、影や水の部分のように反射強度が低い部分のコントラストを得る) ために開発された (ESRI ジャパン株式会社 ERDAS 技術部, 2003)。Brovey 変換により作成した複合画像に、バンド7のスペクトル情報および空間分解能情報が多いが、総じて IHS により作成した画像の方が情報を多く持つことが判った。

3.2 複合画像を用いた竹冠の被覆割合別竹林の抽出および精度評価

3.2.1 一般分類

各手法により作成した複合画像を用いて、最尤分類法による土地被覆分類を行った。その結果を図3に示した。一つ一つの竹林の面積は小さく、ほとんど河沿いまたは山麓に分布している。さらに、現地調査データを用いて手法別の分類精度を評価した。その結果、表4に示したように、IHS 変換、主成分分析、乗算法、Brovey 変換を用いた場合、全体の土地被覆の分類精度はそれぞれ89.8%、85.7%、84.7%、86.0%であった。また、竹林の分類精度はそれぞれ80.9%、75.3%、

表4 各複合手法を用いた土地被覆の最尤法分類精度 (%)

分類項目	IHS 変換	主成分分析	乗算法	Brovey 変換
竹林	80.9	75.3	74.2	78.7
森林	84.4	84.4	86.7	82.2
農耕地	86.7	88.9	93.3	75.6
草地	97.8	91.1	77.8	93.3
都市域	97.8	93.3	93.3	97.8
水域	100.0	91.1	93.3	95.6
総合	89.8	85.7	84.7	86.0

74.2%、78.7%で、比較的高い精度で竹林の抽出ができた。この結果と4月の Landsat ETM+ を用いて抽出した竹林 (54.7%) (張ら, 2004) に比べると、IHS 変換はかなり分類精度が高かった。一方、IKONOS と Landsat ETM+ の複合画像を用いた場合、竹林の抽出精度は84.9%で (張ら, 2004)、今回の結果はこれより低くなった。これは IKONOS の空間解像度は4mで、100m²以下の竹林も抽出できるため、抽出精度が高くなると思われる。また、小泉ら (2003) は5月の Landsat TM データを用いて、ツリー決定法による竹林の抽出を行っている。その結果、3箇所の純竹林検証地において、それぞれの抽出精度は76%、78%、58%となった。この結果は本研究での IHS 変換に基づく複合画像の竹林抽出精度 (80.9%) より低かった。これは Landsat ETM+ と SPOT PAN との複合画像は Landsat ETM+ 画像の空間分解能情報と SPOT PAN のスペクトル情報を相互補完し、地上物の情報をより多く保有したためと判断した。

3.2.2 竹冠の被覆割合別竹林の分類

竹林の抽出精度が最も高い IHS 変換により作成した衛星複合画像の一般的な土地被覆分類により竹林として選ばれた地点に対して、ファジー分類法を用いて竹冠の被覆割合別に再分類した。図4に示したのは航空写真の立体視により判読した竹林および樹冠ポリゴンデータ (左) と、衛星複合画像から分類した結果 (右) である。図から判るように、ほとんどの竹林は多少なりとも樹木と混生している。また、航空写真から判読した結果を用いて、分類精度を評価した結果、表5に示すように、竹冠の被覆割合が90%以上、70~90%、50~70%、30~50%の竹林の抽出精度はそれぞれ80.0%、71.1%、62.2%、53.3%となった。竹冠の被覆割合が90%以上の竹林の抽出精度が最も高く、竹冠の被覆割合が低くなるほど、竹林の抽出精度は低く

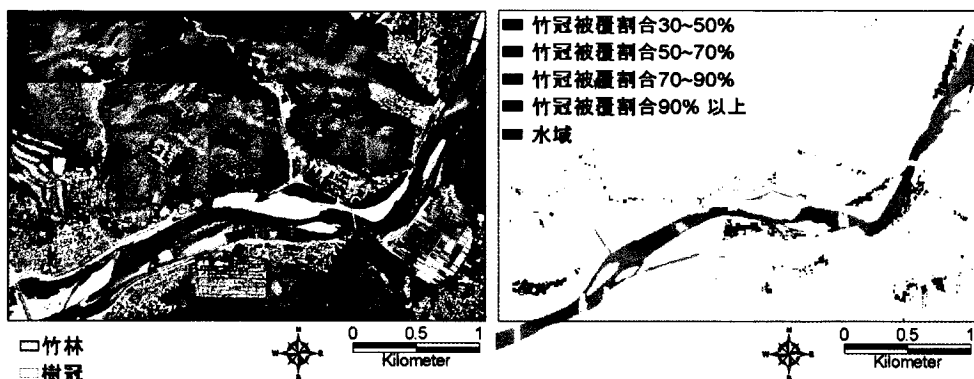


図4 岐阜市長良川周辺における竹林の分布
 (左：航空写真の立体視により判読した竹林およびその中の樹冠
 右：複合画像による分類した竹冠の被覆割合別竹林)

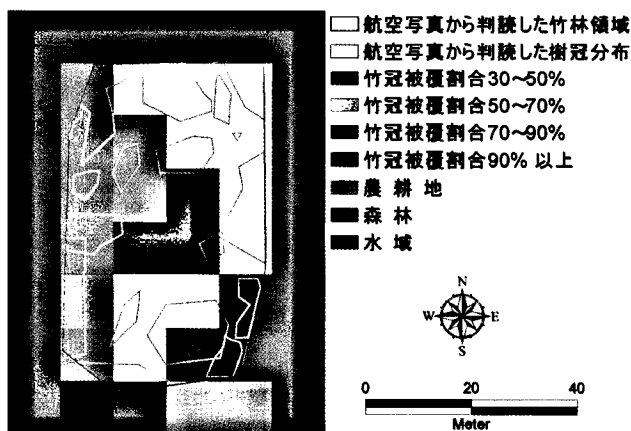


図5 竹の被覆割合別竹林分布の一例（岐阜市上土居地区）

表5 竹と樹木の樹冠被覆割合別竹林の分類精度

検証用データ		分類結果				判別精度			
分類項目	ピクセル数	未分類	竹冠被覆割合 90%以上	竹冠被覆割合 70~90%	竹冠被覆割合 50~70%	竹冠被覆割合 30~50%	一致した ピクセル数	精度(%)	Kappa 係数
竹冠被覆割合 90%以上	45	2	36	4	3	0	36	80.0%	0.71
竹冠被覆割合 70~90%	45	4	5	32	4	0	32	71.1%	0.59
竹冠被覆割合 50~70%	45	4	2	5	28	6	28	62.2%	0.56
竹冠被覆割合 30~50%	45	6	3	5	7	24	24	53.3%	0.73

なった。

小泉ら(2003), 張ら(2004)は衛星データを用いて純竹林を対象にして解析したが, 本研究では竹と樹木の樹冠被覆割合別竹林の抽出を試みた。その結果, 前

述したように, 樹木の割合が高くなるほど, 竹林の抽出精度が低くなった。これは竹と他植生の分光反射特性が異なり(張, 2004; 小泉ら, 2003), 竹冠の被覆割合が低くなると, 竹林中の樹木の影響が強くなって,

竹林の抽出が難しくなるためと思われる。さらに、分類した竹冠の被覆割合が90%以上、70~90%、50~70%、30~50%の竹林の Kappa 係数はそれぞれ 0.71, 0.59, 0.56, 0.73で、占有割合別分類で発生した誤差の71%, 59%, 56%, 73%が回避された。竹林中に竹と混生している樹種はいろいろあり、それぞれ樹種の分光反射特性が異なるため、被覆割合別に竹林を抽出する際、樹種の影響を受けると思われる。

以上の結果から、衛星画像によって竹と樹木の樹冠の被覆割合別に竹林を抽出でき、竹林の拡大実態をより一層正確に把握できると思われる。例えば、図5に示したように、岐阜市上土居地区における竹林に対して、航空写真から判読した竹林の領域およびその中の樹冠分布状況と衛星複合画像から分類した結果とおおむね一致している一方、この竹林の中心部は純竹林になっているが、周辺部では樹木との混在の様子が見られる。このことより、二時期の衛星画像を用いて、竹の被覆割合別に竹林を分類し、竹林の経年変化を抽出すれば、竹林の拡大実態を把握できると思われる。

4. おわりに

小泉ら (2003)、張ら (2004) は竹の割合が100%に近い純竹林のみを研究対象としてきたが、これでは放置竹林拡大の把握は困難である。本研究では複合画像を用いて、竹冠の被覆割合別の区分が可能になった。今回の解析法によって長良川下流域である全対象域 (41000ha) において、竹林321.3haが存在していることが明らかになった。その中で、竹冠の被覆割合が90%以上、70~90%、50~70%、30~50%の竹林の割合はそれぞれ32.4%、31.3%、20.5%、15.7%であった(表6)。すなわち、竹冠の被覆割合が90%以上の竹林は32.4%であり、残り67.6%は竹冠の被覆割合が90%以下の竹林を判読し、その混生割合も分類できるため、

表6 竹冠の被覆割合別竹林の面積とその割合の内訳

竹冠の被覆割合	分類精度 (%)	分類面積 (ha)	分布割合の内訳 (%)
90%以上	80.0	104.2	32.4
70~90%	71.1	100.6	31.3
50~70%	62.2	66.0	20.5
30~50%	53.3	50.6	15.7
全竹林	66.7	321.3	100.0

広域に分布している竹林の動態を把握する見通しを得た。今後、1990年の SPOT PAN データと Landsat TM データの複合利用により竹林を抽出し、竹林分布の経年変化を把握する。さらに、本研究の結果を加え、被覆割合別竹林分布域の変化から、竹林による樹林地へ侵入実態や侵入しやすい立地環境との関係を明らかにしたい。

謝 辞

本研究は21世紀 COE プログラム「衛星生態学創生拠点」の一部として実施した。また、本論文を作成する際、児島利治助教授には有益なご助言をいただき、ここに厚く御礼申し上げます。

(受付日2005.7.13, 受理日2006.3.10)

参考文献

- Carper, W.J., Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W., 1990. The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(4), pp.459-467.
- Chavez, P.S., Sildes, S.C., and Anderson, J.A., 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, pp.295-303.
- Civco, D.L., Wang, Y. and Silander, J.A., 1995. Characterizing forest ecosystems in Connecticut by integrating Landsat TM and SPOT panchromatic data. *Proceedings of the ACSM/ASPRS Annual convention, Charlotte, NC.*, 2 (Reston, VA: ASPRS), pp.216-224.
- Crippen, R.E., 1989. A simple spatial filtering technique for the cosmetic removal of scan-line noise from Landsat TM P-Tape imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(3), pp. 327-331.
- ESRI ジャパン株式会社 ERDAS 技術部, 2003. アーダス フィールドガイド(日本語版), ESRI ジャパン株式会社, 東京, pp.149-151.
- Faust, N.L., 1989. *Image Enhancement. Volume 20, Supplement 5 of Encyclopedia of Computer Sci-*

- ence and Technology. Ed. A. Kent and J.G. Williams. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Grasso, D.N., 1993. Application of the IHS color transformation for 1: 24,000-scale geologic mapping: A low cost SPOT alternative. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(1), pp. 73-80.
- Isagi, Y. and Torii, A., 1998. Range expansion and its mechanisms in a naturalized bamboo species, *Phyllostachys pubescens*, in Japan. *J. Sustainable For.*, 6, pp.127-141.
- Jensen, J.R., 1986. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Jensen, J.R., 1996. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 2nd ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- 甲斐重貴, 辻井美香, 2004. GISを用いた九州南部地域の里山における竹林拡大の時系列変化と要因の検討—宮崎県高岡町の事例—. *宮大農研報*, 50, pp. 73-83.
- 加藤正人, 2004. 森林リモートセンシング. *J-FIC*, pp. 14-27.
- 小泉圭吾, 谷本親伯, 朴 春澤, 2003. LANDSAT 5号 TM データを用いた竹林の抽出手法に関する研究. *写真測量とリモートセンシング*, 42(6), pp.42-51.
- Li, H., Manjunath, B.S, and Mitra, S.K., 1995. Multisensor image fusion using the wavelet transform. *Graphical Models and Image Processing*, 57(3), pp.235-245.
- 三宅 尚, 川西基博, 三宅三賀, 石川慎吾, 2000. 高知市北山地域における竹林の分布拡大 I. 過去30年間の竹林面積の変化. *Hikobia*, 13, pp.241-252.
- 中島章文, 2001. 都市近郊における竹林の管理・経営の実態—京都市近郊のタケノコ生産地を事例にして—. *森林応用研究*, 10, pp. 1-7.
- 西川僚子, 村上拓彦, 吉田茂二郎, 光田 靖, 長島啓子, 溝上展也, 2005. 隣接する土地被覆別にみた竹林分布変化の特徴. *日本森林学会誌*, 87, pp.402-409.
- Okutomi, K., Shinoda, S. and Fukuda, H., 1996. Causal analysis of the invasion of broad-leaved forest by bamboo in Japan. *Journal of Vegetation Science*, 7, pp.723-728.
- 大野朋子, 平井 潤, 丸山 宏, 前中久行, 1999. 地形図を用いた都市近郊林における竹林化の解析. *ランドスケープ研究* 62, pp.599-602.
- 大野朋子, 加我宏之, 下村泰彦, 増田 昇, 2002. 大阪府岸和田市における竹林の拡大特性に関する研究. *ランドスケープ研究* 65, pp.603-608.
- 大野朋子, 下村泰彦, 前中久行, 増田 昇, 2004. 竹林の動態変化とその拡大予測に関する研究. *ランドスケープ研究*, 67(5), pp.567-572.
- 大野朋子, 前中久行, 増田 昇, 2005. 衛星画像解析による竹林の抽出—大阪府岸和田市を事例として—. *Bamboo Journal*, 22, pp.39-48.
- バク ジョンヒョン, 建石隆太郎, ケットト ウィカンチカ, 1999. 都市域の判読を目的としたマルチセンサおよびマルチ解像度データの融合. *写真測量とリモートセンシング*, 38(5), pp.48-60.
- Pohl, C., 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5), pp.823-854.
- 鳥居厚志, 1998. 空中写真を用いた竹林の分布拡大速度の推定—滋賀県八幡山および京都府男山における事例—. *日本生態学会誌*, 48, pp.37-47.
- 鳥居厚志, 2003. 周辺二次林に侵入拡大する存在としての竹林. *日本緑化工学会誌*, 28(3), pp.412-416.
- 鳥居厚志, 井鷲祐司, 1997. 京都府南部地域における竹林の分布拡大. *日本生態学会誌*, 47, pp.31-41.
- Yocky, D.A., 1995. Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform. *Journal of Optical Society of America*, 2, pp.1834-1841.
- 渡辺 修, 西條好迪, 張 福平, 秋山 侃, 2002. 空中写真とGISによる竹林分布拡大の解析. システム農学会2002年度春季シンポジウム・個別研究発表会要旨集, 18 (別号1), pp.84-85.
- 張 福平, 魏 永芬, 秋山 侃, 西條好迪, 2004. 異種衛星データを用いた竹林分布域の抽出. *システム農学*, 20(1), pp.86-96.
- Zhou, J., Civco, D.L. and Silander, J.A., 1998. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4), pp.743-757.