航空機から観測した多波長帯データを用いた里山の代表的な樹種区分に関する検討

Examination as to the Classification of Representative Tree Species at Satoyama Coppice Forest Using Multiwavelength Range Data Observed from Aircraft

瀬戸島政博* 今井 靖晃* 船橋 学* 河合 雅己* 勝木 俊雄**

Masahiro SETOJIMA Yasuteru IMAI Manabu FUNAHASHI Masaki KAWAI
Toshio KATSUKI

Abstract : In this study, we examined the possibility of classifying representative tree species at Satoyama coppice forest based on spectral reflectance of the tree species. We used the airborne hyperspectral data observed in exhibition leaf stage at the test forest (about 3.4ha) in Tama Forest Science Garden (Hachioji, Tokyo), where the forest type similar to that of Satoyama is preserved. The classification accuracy was verified by comparing the results of interpretation of color aerial photographs taken in spring and autumn in chronological order and the field survey. As a result, the 534-556 nm (band 6 and band 7) in the visible range and 739-762 nm (band 15 and band 16), 785nm (band 17) in the near infrared range are effective bands for classification of the species of such trees as *Castanopsis sieboldii*, *Quercus glauca*, *Zelkova serrata*, *Quercus serrata*, *Cryptomeria japonica*, and *Chamaecyparis obtusa*, which are representative trees in Satoyama coppice forest in Tama district.

Keywords: *Satoyama coppice forest, airborne hyperspectral data, spectral reflectance, near infrared range, tree species classification, tree species interpretation*

キーワード: 里山, 航空機搭載ハイパースペクトラルデータ, 分光反射特性, 近赤外線領域, 樹種区分, 樹種判読

1. はじめに

持続可能な開発や生態系のバランスに配慮した自然資源の活用などが求められる時代に、自然を持続的に活用し、多様な動植物と人間が共存する場である里山の果たす役割や機能が見直されている。そのためには、里山を構成する樹種・樹冠・階層構造などの情報を面的に捉えて整備していくことが必要とされる¹⁾。

里山は多種多様な樹種から構成されるため、構成樹種を面的に区分していくには、リモートセンシング手法が有効とされる。リモートセンシング画像を用いた広域的な樹種区分は、林業分野での森林経営の一環として比較的早い時期から LANDSAT をはじめとする中分解能衛星画像を用いて試みられてきた。わが国のような多様な樹種で構成される森林での樹種区分では、樹木の季節的な変化（芽吹き時期、展葉期、紅葉・黄葉期、落葉期など）が重要なパラメータとなり、複数時期の衛星画像を用いた解析が試みられている²⁾。このような研究により、広域で面的な樹種区分には季節的に時系列な衛星画像の有用性が把握できた。また、商業用高分解能衛星の普及とともに、この高解像度の衛星画像を用いた樹種区分が試みられ、その実用性の向上が図られている³⁾。

以上のような研究から、樹種区分には樹木の生育時期に配慮した季節的なリモートセンシング画像が有用になることが把握できた。そこで、筆者らはこれまで年間にわたる時系列なカラー航空オルソ画像を用いて画像上に写る葉色の変化に基づく樹種区分を試みてきた^{4) 5) 6)}。その結果、里山を構成する代表的な樹種を区分するには、5月中旬と12月上旬が適することが分かった。

しかし、このような時系列なリモートセンシング画像の取得には多大な経費と労力を伴う。そのため、多波長帯観測用センサによる取得データ上の樹種別の分光反射特性を把握することから、里山を構成する代表的な樹種区分の可能性を検討した。

多波長帯観測用センサは、観測データが膨大になること、大気吸収の影響を受ける観測不適な波長帯があることなどの課題はあるものの、複雑で多様な地表面対象物の識別に有効な波長帯の選定、無限に近い波長帯データの組み合わせによるカラー画像作成やそれらを用いた解析や判読などが可能であり、樹種区分の精度向上⁷⁾、森林構成因子の推定⁸⁾などに期待されている。

そこで本研究では、スダジイ・アラカシ・スギ・ヒノキ・ケヤキ・コナラなどの里山を構成する代表的な樹種を対象に、航空機搭載型のハイパースペクトラルスキャナ（Hyperspectral Scanner, 「航空機 HSS」と略す）による観測を実施し、取得された多波長帯データ上での各樹種の分光反射特性を検討して、その特性を用いた樹種区分の可能性について考察した。本研究で対象とするような樹種区分は、里山の景観を構成する重要な要素であり、林相の多様性、季節感、神秘さ、自然への親近感などを判断する基礎情報となる。したがって、樹種の分光反射特性に基づく広域的な樹種区分を林分単位である程度の精度で把握できれば、上記のような里山景観の評価など、ランドスケープ分野に利用できることになる。

なお、本研究結果の検証にあたっては、落葉前後の時期に観測した航空機レーザスキャナ（「航空機 LS」と略す）による樹冠高データに、春季・秋季間の葉色変化を記録した時系列なカラー航空オルソ画像（「航空オルソ」と略す）を用いた解析と現地調査を加えて作成した樹種区分図（検証用）と比較照合した。

2. 解析対象地区および使用データ

本研究では、多摩地方の里山の風情を残す多摩森林科学園（東京都八王子市）の試験林内の混交林（約 3.4ha）を解析対象地区とした。この地区は、アラカシやスダジイなどの常緑広葉樹高木

*国際航業株式会社 **独立行政法人森林総合研究所

とケヤキやコナラなどの落葉広葉樹高木、スギ・ヒノキ高木から構成され、林内にはアオキやアラカシなどの亜高木が被覆している。

使用した航空機 HSS は、高解像度の航空機搭載型の可視近赤外線放射計（カナダ Itres 社製 Compact Airborne Spectrographic Imager : CASI-2）である。今回の観測諸元を表-1 に示す。本研究では、波長分解能よりも空間分解能を優先し、24 バンドでの観測とした（使用した航空機 HSS では 288 バンドが観測できるが、記録容量との関係でその場合には低解像度となり、ここでは解像度約 1.25m としたため 24 バンドに限定して観測した）。観測は、2002 年 9 月 20 日 10:53 ~ 11:00 に実施した。前述のように、筆者らの既往研究^{4) 5) 6)}により、里山を構成する代表的な樹種を区分するには、5 月中旬と 12 月上旬が適することが分かっているが、そのような時系列なリモートセンシング画像を整備するには、多大な経費と労力を伴うことも確かである。そこで、葉色変化の比較的小なく、葉色の安定した夏季の 1 時期のみを使用して、林分単位で里山を構成する代表的な樹種がどの程度の精度で区分できるかを検討した。そのために、夏季の 9 月 20 日に観測し、1 時期のデータのみからの樹種区分を試みた。

なお、HSS による樹種区分の結果検証には、表-2、表-3 に示す航空機 LS データと航空オルソデータを使用した。

航空機 LS は、航空機上から地上に向けてレーザパルスを進方向に直交して（左右に走査しながら）照射し、地上から反射してくる光を受光盤で捉え、その往復時間によって機体と計測点までの距離を測定することで計測点の地上位置が求められる。その計測精度は、水平方向で±30cm、垂直方向で±15cm である。解析には、落葉前（2000.10.11）と落葉後（2001.2.12）に観測されたデータを用いた（前掲の表-2 を参照）。

また、航空オルソデータは、カラー航空写真（Leica 社製 RC-30、撮影高度：2,000m、撮影縮尺 1/10,000）のネガフィルムから入力スキャナにより 1 画素 0.25m×0.25m の画像データを作成し、樹冠部の高さを用いて画像全体を正射投影画像に変換した。使用した航空オルソデータの色調補正にあたっては、各オルソ画像上で、形状と色調とが明瞭に識別できる地物（例えば赤色・青色・白色・黒色の屋根、白色に映る道路など）の領域を抽出して、各 RGB 値を計測し、2000 年 11 月 5 日撮影のオルソ画像の色調を基準に他 7 時期の画像の色調を整合させた（前掲の表-3 を参照）。

3. 研究方法

本研究では、①樹種別の分光反射特性に基づいて選定した複数バンドを用いた分類、②全バンドの主成分分析により使用する主成分を選定した分類、③全バンドを用いた分類の 3 方法を適用し、検証用の樹種区分結果と比較照合した。

（1）対象樹種の選定とデータサンプリング

対象樹種は、当該地域の里山を構成する代表的な樹林構成種であるスダジイ・アラカシ・スギ・ヒノキ・ケヤキ・コナラの 6 種とした。これらの樹種毎のサンプリングにあたっては、多摩森林科学園全体を既撮影したカラー航空写真（縮尺 1/10,000 2001 年撮影）から作成した前記の航空オルソ画像を現地に携帯し（現地踏査は航空機 HSS の観測と同日の 2002 年 9 月 20 日実施）、同画像と現地で識別できる樹冠をサンプルデータとして選定した。各樹種は 15 サンプルを選定した（ただし、アラカシのみ 4 サンプルとした。これはアラカシが混在して分布しているため、画像上から樹冠を選定するのが困難なためである）。これらのデータサンプルは、（2）の樹種別の分光反射特性を検討のために用いるとともに、後述する解析対象地区の樹種の自動分類の際のトレーニングデータとして用いた。

（2）樹種別の分光反射特性からみた使用バンドの選定

多波長帯データ上での樹種別の分光反射輝度をグラフ化し、樹

種毎の傾向や特徴的な分光反射特性を示す波長帯などを検討した（図-1）。同図の反射輝度の分布特性と表-4 に示すバンド間相関を勘案して、対象樹種を分類していく上で有効な複数バンドを選定した。さらに、統計的距離から分離度を計算し、選択した複数バンドの妥当性を確認した。

（3）主成分分析と樹種分類に使用する主成分データの選定

多変量解析の一手法である主成分分析を適用し、24 バンドの多次元データの特徴軸を求め、分類に使用する主成分を選定した。

（4）教師付き分類手法による樹種分類

上記までで作成した①分光反射特性に基づく使用バンドデータ、②主成分分析に基づく使用主成分データ、③全バンドデータの 3 通りのデータを用いて、（1）で整理した樹種別のサンプリングデータをトレーニングデータとして最尤法による教師付き分類を実施し、解析対象地区の樹種を区分した。これらの分類手法は、リモートセンシング分野では確立されている手法であるが、その分、利用者にとっては確立された比較的安定した手法として用いることができ、本研究の目的のように葉色変化の安定した時期の多波長帯データによる林分単位での樹種区分の試行を進める意味では有用と考えた。なお、本研究では、樹種分類に際して、（5）に後述する落葉前後に観測した航空機 LS データの両時期の樹冠高データの差分から求めた常緑樹林と落葉樹林のそれぞれの分布領域を①～③のデータ上に予め重ね合わせ処理を施し、HSS データと航空機 LS データとを融合させた上で、常緑樹林領域と落葉樹林領域のそれぞれについて分類を実施する新しい方法を用いた。

（5）検証用の樹種区分図の作成

落葉前後に観測した航空機 LS データからは、両時期の樹冠高を表現している DSM（Digital Surface Model：デジタル表層

表-1 航空機 HSS の観測諸元

観測日時	2002年9月20日 10:53 ~ 11:00				
観測高度	1,050m				
空間分解能	1.25m				
データ長	16bit (1レベル=0.001μW/cm ² /sr/nm)				
Ch	波長 (nm)	中間波長 (nm)	Ch	波長 (nm)	中間波長 (nm)
1	409.45 ~ 434.18	421.82	13	680.49 ~ 705.90	693.20
2	431.63 ~ 456.44	444.04	14	703.41 ~ 728.84	716.13
3	453.90 ~ 478.80	466.35	15	726.35 ~ 751.80	739.08
4	476.26 ~ 501.23	488.75	16	749.31 ~ 774.77	762.04
5	498.70 ~ 523.74	511.22	17	772.28 ~ 797.75	785.02
6	521.22 ~ 546.33	533.78	18	795.27 ~ 820.73	808.00
7	543.81 ~ 568.97	556.39	19	818.25 ~ 843.71	830.98
8	566.46 ~ 591.68	579.07	20	841.22 ~ 866.68	853.95
9	589.17 ~ 614.44	601.81	21	864.19 ~ 889.63	876.91
10	611.94 ~ 637.25	624.60	22	887.14 ~ 912.56	899.85
11	634.75 ~ 660.10	647.43	23	910.07 ~ 935.47	922.77
12	657.60 ~ 682.98	670.29	24	932.97 ~ 958.34	945.66

表-2 使用した航空機 LS データの諸元

観測年月日	観測高度	走査角	走査幅	照射密度
2000.10.11	2,500 m	15°	658 m	0.25 点/m ²
2001.02.12	2,500 m	16°	658 m	0.25 点/m ²

表-3 使用した航空オルソ画像と色調補正用の相関係数

撮影年月日	撮影高度	画素サイズ	R値	G値	B値
2000.11.05	2,000 m	0.25 m	基準	基準	基準
2000.11.19	2,000 m	0.25 m	0.990	0.986	0.983
2000.12.05	2,000 m	0.25 m	0.991	0.987	0.989
2000.12.26	2,000 m	0.25 m	0.956	0.958	0.968
2001.02.19	2,000 m	0.25 m	0.943	0.958	0.924
2001.04.02	2,000 m	0.25 m	0.937	0.934	0.944
2001.04.27	2,000 m	0.25 m	0.899	0.905	0.933
2001.05.15	2,000 m	0.25 m	0.732	0.793	0.862

図-1 樹種別の分光反射特性

モデル：樹林部では樹冠高を表す)の差分から、常緑樹林領域と落葉樹林領域の区分をした。常緑樹林領域については、展葉期にあたる春季の時系列な航空オルソ画像を用いた画像解析と画像判読から樹種区分を実施し、落葉樹林領域には紅葉・黄葉期にあたる秋季の時系列な航空オルソ画像を用いた画像解析と画像判読から樹種区分を実施した⁹⁾。これらの樹種区分に現地調査によるチェック・修正を加え、解析対象地区の検証用樹種区分図を作成した。

(6) 多波長帯データを用いた樹種分類の適用性評価

多波長帯データを用いた樹種分類と検証用の樹種区分を比較照合し、本研究手法による樹種別の判別精度や誤判別の要因等の分析・考察を加え、適用性について評価した。

4. 樹種別の分光反射特性からみた使用バンドの選定

ここでは、分光反射特性のわずかな違いから、樹種区分をする上で特徴を示すバンドを選択することを目的に、樹種別の分光反射特性をみた。スギなどの針葉樹やブナやミズナラなどのブナクラス域での落葉広葉樹の分光反射特性については、加藤¹⁰⁾によってまとめられているが、当該地区の属するヤブツバキクラス域での常緑広葉樹や落葉広葉樹の樹種別の分光反射特性についての報告は少ない。そこで、既往研究で判明している樹種別の分光反射特性を踏まえ、以下に、研究対象とした各樹種の分光反射特性を記述する。

スダジイは、前掲図-1のように739nm (band15)まではコナラとほぼ同じ傾向を示すが、次の762nm (band16)までの傾向をみると、コナラが示す傾向(反射輝度パターンの急な変化)は示さず、この間ではわずかに分光反射輝度が高まる程度である。785nm (band17)で分光反射輝度のピークを示すのは、他の樹種と同様であるが、コナラほど高い分光反射輝度は示さない。また、これ以降946nm (band24)付近まで分光反射輝度の特性はほぼコナラと同じ傾向を示し、両者に大きな反射特性の違いは認められない。

アラカシは、他の広葉樹に比べて比較的分光反射輝度が低い。可視光線領域では、511~647nm (band5~band11)で他の5種に比べて最も低い分光反射輝度を示す。とくに、他の5種との分光反射パターンの異なる領域が534~556nm (band6, band7)にあり、この付近では他の5種との乖離が大きい。近赤外線領域では、分光反射輝度値は異なるものの分光反射パターンは他の広

葉樹の変化パターンと大差はない。

スギは、他の5種に比べて特異な分光反射パターンを示す。とくに、739~946nm (band15~band24)の間で他の5種に比べて分光反射輝度が極端に低く、785nm (band17)のピーク付近でも分光反射輝度が4.420で他の5種と大きく異なる。スギの場合は全般的にみても分光反射輝度が他の5種に比べて低く、特異な分光反射パターンを示す。

ヒノキは、可視光線領域の一部と近赤外線領域の一部に特異な分光反射パターンが認められる。これ以外の領域では、他の樹種とほぼ類似の変化パターンを示す。また、近赤外線領域の739~946nm (band15~band24)では、ほぼケヤキと同じ変化パターンが認められる。特異な変化パターンを示す可視光線領域の534~556nm (band6, band7)では、他の5種に比べて最も高い分光反射輝度を示している。

ケヤキは、可視・近赤外線領域ともに特異な分光反射パターンは示さない。ただし、15サンプルの個別の分光反射パターンでは、可視光線領域で分光反射輝度が高いものは近赤外線領域では低い値を示し、反対に可視光線領域で分光反射輝度の高いものは近赤外線領域では低い値を示す傾向がみられる。

コナラは、近赤外線領域ではすべての波長帯で他の5種に比べて最も高い分光反射輝度を示す。とくに、他の5種との差が顕著になるのは762~877nm (band16~band21)付近であり、これらの領域ではコナラに次いで高い分光反射輝度を示すスダジイと比べても両者の差が明瞭である。全体的な分光反射パターンで比較すると、スダジイ・アラカシ・ケヤキとほぼ同じ分光反射パターンを示す。

以上の樹種別分光反射パターンから、特徴的なバンドは次のようにまとめられる。

- ①可視光線領域では、534~556nm (band6, band7)の間で樹種によっては特異な分光反射パターンを示す(ヒノキでは他樹種に比べて高い分光反射輝度を示し、アラカシでは他樹種に比べて低い分光反射輝度を示す)。
 - ②近赤外線領域の739~762nm (band15, band16)の間では、ヒノキやスギが他の樹種と異なる分光反射パターンを示す。
 - ③近赤外線領域の785nm (band17)では、すべての樹種がそれぞれの分光反射パターンの中で最も高い分光反射輝度を示す。
- 以上より、6樹種の分光反射特性の違いを強調するのに有効な

バンドとして、band7, band15, band16, band17が挙げられる。この4バンドを用いて分類を実施すると、近赤外線領域の3バンドの影響を強く受けることが想定されるため¹⁰⁾、これを軽減するために青色域、赤色域の中でバンド間相関が低く独立性の高いband4, band12を追加した(表-4)。

以上より、分光反射特性に基づく手法では、band4, band7, band12, band15, band16, band17の6バンドを用いることとした。

なお、統計的距離から分離度を計算した結果、6バンドの組み合わせの中では上述したband4, band7, band12, band15, band16, band17が最も分離度が高く、選択した複数バンドの妥当性が確認された。

表-4 バンド間相関による使用バンドの追加

バンド	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10	b11	b12
波長帯 (nm)	421.8	444.0	466.4	488.7	511.2	533.8	556.4	579.1	601.8	624.6	647.4	670.3
	← 青			←	緑			→	赤 →			
ave_r	0.776	0.782	0.779	0.772	0.782	0.821	0.829	0.804	0.785	0.768	0.752	0.734
バンド	b13	b14	b15	b16	b17	b18	b19	b20	b21	b22	b23	b24
波長帯 (nm)	693.2	716.1	739.1	762.0	785.0	808.0	831.0	854.0	876.9	899.9	922.8	945.7
	赤 ←			近				赤		外 →		
ave_r	0.779	0.862	0.779	0.748	0.743	0.740	0.737	0.735	0.733	0.731	0.730	0.732

ave_r: 他バンドとのバンド間相関係数の平均値

5. 主成分分析と樹種分類に使用する主成分データの選定

主成分分析は多変量解析手法の一つで、多次元データの特徴軸を求めることで情報を失うことなくデータを集約することができる。そのため、航空機HSSデータの処理で比較的頻繁に用いられる手法である。ここでは24バンドの航空機HSSデータに主成分分析を適用し、樹種分類に使用する主成分を選定した。

樹種分類に使用する主成分は、累積寄与率によって選定した。累積寄与率は第1主成分で既に82.8%に達しており、第3主成分までで99.7%に達する。第4主成分以降は累積寄与率にほぼ影響しないことから、樹種分類に使用する主成分データとして、第1～第3主成分を選定した。

また、主成分得点(表-5)ならびに各主成分画像を総観すると、第1～第3主成分の意味合いは以下のとおりと考えられる。

- ・第1主成分: 樹林の主成分得点が高く、構造物の主成分得点が高いことから、植生活力度を示していると考えられる。
- ・第2主成分: 濃淡のある疎林の主成分得点が高く、平板な密林や構造物の主成分得点が高いことから、画像の肌理、テクスチャを示していると考えられる。
- ・第3主成分: 密林の主成分得点が高く、疎林や構造物の主成分得点が高いことから、樹木の密植度合いを示していると考えられる。

表-5 第1～第3主成分の主成分得点

被覆状態	第1主成分	第2主成分	第3主成分
テニスコート	-0.26	-1.00	-0.18
屋根	-0.54	-1.19	-0.07
樹林(密)	2.18	-0.48	0.86
樹林(疎)	0.05	0.82	-0.18

6. 教師付き分類手法による樹種分類と結果検証

教師付き分類に先立ち、図-2(カラー頁)に示すように落葉前後に観測した航空機LSに基づく樹冠高の差分により、常緑樹林と落葉樹林の分布域を抽出し、それぞれの分布域別に構成樹種の区分を実施した。

①分光反射特性に基づく使用バンドデータ、②主成分分析に基づく使用主成分データ、③全バンドデータの3通りのデータによる樹種分類結果を表-6に、その正答率を表-7に示す。図-3

および図-4はスダジイとケヤキの分類結果を重ね合わせたものである。さらに、3通りのデータによる樹種分類結果のうち、最も分類精度の良かった分光反射特性に基づく使用バンドデータによる当該地区の樹種区分結果を図-5、検証用の樹種区分結果を図-6、両結果の重ね合わせによる正答箇所、誤答箇所の比較を図-7に示す(カラー頁参照)。

(1) 樹種別分光反射特性に基づく選定バンドによる樹種分類

常緑樹林の樹種区分では、当該地区に広範に分布しているアラカシで検証結果に近い分類精度が認められた。抽出面積(表-6)、正答率(表-7)ともに検証結果に近いことが分かる。スダジイは、抽出面積では検証結果に近いものの、正答率は17%程度である。前掲図-3から分かるように、分類結果ではある程度まとまって塊状に分布するスダジイが捉えられていないことが分かる。ヒノキは、抽出面積では検証結果に近く、その正答率は55%であるのに対し、スギは、抽出面積では検証結果に近いものの、正答率では13%に過ぎず、地区全体に渡り誤分類が多くみられた。

落葉樹林の樹種区分では、ケヤキおよびコナラともに抽出面積では検証結果に近く、正答率はそれぞれ54%、69%であった。ケヤキの場合、前掲図-4から分かるように、まとまって分布している箇所では検証結果とよく整合しているが、それ以外の箇所においては誤分類がみられる。

以上のように、葉色の安定している9月観測データの分光反射特性に基づく選定バンドを用いた樹種区分では、アラカシ、ヒノキ、ケヤキ、コナラについては50%以上の正答率で分類が可能と考えられる。また、表-8に示すように、分光反射特性に基づく選定バンドを用いた樹種区分は、主成分分析に基づく主成分データおよび全バンド使用による樹種分類に比べて、分類精度が高い方法であった。

(2) 主成分分析に基づく選定バンドによる樹種分類

ここでは、累積寄与率が99.7%に達する第1～第3主成分までのデータを用いて樹種分類を行った(表-6, 7)。

常緑樹林の樹種区分では、分光反射特性に基づく選定バンドによる樹種区分に比べて、アラカシでは多少正答率の向上が認められるが、スダジイ・スギ・ヒノキでは精度が低下していた。スダジイは、検証結果に比べて若干多めに抽出され、その正答率は10%であり、まとまって塊状に分布するスダジイを抽出できていないのが分かる。アラカシでも検証結果に比べて若干多めに抽出され、正答率は82%であった。スギは、抽出面積が検証結果のほぼ半分であり、その正答率も6%に過ぎない。ヒノキは、ほぼ検証面積と同程度の抽出面積を示しているが、その正答率は34%で、分光反射特性に基づく選定バンドを使用した分類に比べてかなり低い正答率であった。

落葉樹林の樹種区分では、ケヤキおよびコナラの正答率は51%、59%であり、分光反射特性に基づく選定バンドを使用した分類に比べて若干分類精度の低下が認められた。ケヤキでは、検証結果に比べて多めに分類されているのが分かる。分光反射特性に基づく分類結果と比較しても若干多めに分類されている。

以上より、第1～第3主成分までのデータを使用した樹種区分では、分光反射特性に基づく選定バンドを用いた樹種分類に比較して分類精度が低下することが分かった(表-8)。

(3) 全バンドを用いた樹種分類

24バンド全部を用いた樹種分類結果を表-6, 表-7に示す。常緑樹林では、スダジイ・アラカシは検証結果に比べて抽出面積が多めに分類され、正答率は13%、67%であった。とくにアラカシは、他のデータによる分類の場合に比べて正答率が15%近く低下していた。スダジイでは、塊状に分布しているものを抽出している箇所もあるが、地区全体に渡り誤分類が認められた。スギについては検証結果の2倍の面積が抽出され、正答率は18%

であった。ヒノキは検証結果とほぼ整合する分布面積が抽出でき、正答率は52%であった。

落葉樹林では、ケヤキは検証結果に比較して少なめの抽出面積であり、その正答率も30%程度であった。コナラの抽出面積は、検証結果よりも多めではあるが、正答率は82%で他のデータを使用した樹種区分に比べ、分類精度が高かった。

全24バンドをすべて使用した樹種区分では、分光反射特性に基づく選定バンドデータや主成分分析に基づく第1～第3主成分データを用いた樹種分類に比較して、その分類精度が低いことが分かった（表－8）。

以上、3通りのデータを使用した樹種区分では、樹種別の分光反射特性に基づく選定バンドによる樹種分類手法が最も分類精度が良いことが判明した。その場合において、アラカシ・コナラ・ケヤキ・ヒノキについてはほぼ分類が可能と考えられるが、スダジイとスギの抽出には課題が残った。

表－6 使用データ別にみた樹種分類結果の面積比較

樹種区分	分光反射特性に基づく分類	主成分による分類	全バンドによる分類	検証用
スダジイ	1,527	1,775	2,450	1,492
	4.5%	5.3%	7.3%	4.4%
アラカシ	19,097	19,808	16,400	19,349
	56.8%	58.9%	48.8%	57.5%
スギ	1,812	728	3,662	1,807
	5.4%	2.2%	10.9%	5.4%
ヒノキ	2,845	2,969	2,768	2,842
	8.5%	8.8%	8.2%	8.5%
ケヤキ	3,362	3,700	1,846	3,194
	10.0%	11.0%	5.5%	9.5%
コナラ	4,981	4,643	6,498	4,940
	14.8%	13.8%	19.3%	14.7%
計	33,624	33,624	33,624	33,624
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

上段：面積（m²）
下段：面積率（%）

表－7 使用データ別にみた樹種分類結果の正答率

手法		検証用の区分					
樹種区分		スダジイ	アラカシ	スギ	ヒノキ	ケヤキ	コナラ
3 手法 による 区分	スダジイ	17.1%	4.8%	7.5%	2.0%	0.0%	0.0%
		9.8%	6.7%	4.8%	8.5%	0.0%	0.1%
		13.1%	10.2%	10.3%	3.9%	0.0%	0.1%
	アラカシ	75.6%	80.7%	77.2%	37.6%	0.7%	0.8%
		74.6%	81.7%	79.4%	53.6%	0.8%	0.8%
		72.3%	66.5%	68.2%	41.3%	0.8%	0.7%
	スギ	4.4%	7.2%	12.5%	5.2%	0.0%	0.1%
		3.5%	2.5%	6.2%	3.4%	0.0%	0.0%
		11.0%	15.9%	17.9%	3.1%	0.1%	0.2%
	ヒノキ	2.9%	7.0%	1.3%	55.0%	0.4%	0.2%
		12.1%	8.9%	8.0%	34.4%	0.2%	0.2%
		3.6%	7.1%	2.0%	51.5%	0.1%	0.2%
	ケヤキ	0.0%	0.1%	0.4%	0.2%	53.7%	30.2%
		0.0%	0.1%	0.7%	0.1%	50.6%	40.3%
		0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	30.3%	16.5%
	コナラ	0.0%	0.2%	1.2%	0.0%	45.2%	68.6%
		0.0%	0.2%	0.8%	0.1%	48.4%	58.5%
		0.0%	0.2%	1.6%	0.1%	68.7%	82.3%

上段：分光反射特性に基づく手法における面積比率（%）
中段：主成分分析に基づく手法における面積比率（%）
下段：全バンドによる手法における面積比率（%）
網掛け：正答率（%）

表－8 使用データ別の総合評価

手法	総合精度	平均精度
分光反射特性に基づく手法	68.0%	47.9%
主成分分析に基づく手法	64.6%	40.2%
全バンドによる手法	59.4%	43.6%

総合精度：全画素数における一致画素数合計の割合（%）
平均精度：6樹種の正答率の平均値（%）

7. まとめ

本研究は、里山を構成する代表的な樹種（スダジイ・アラカシ・スギ・ヒノキ・ケヤキ・コナラ）を対象に、葉色の安定した夏季1時期の航空機 HSS による観測データから、分光反射特性に基づく選定バンドを用いた分類、主成分分析に基づく選定バンドを用いた分類、全バンドを用いた分類の3通りの樹種区分を実施した。その結果、樹種別の分光反射特性に基づく選定バンドを用いた樹種区分手法が3手法の中では有用であった。この方法では、アラカシ・コナラ・ケヤキ・ヒノキについてはほぼ分類が可能であるが、スダジイとスギの抽出には誤分類が生じていた。加えて、区分精度が68%程度（表－8）であり、今後課題を残すが、本研究の目的である葉色の最も安定した時期に観測した単一時期の航空機 HSS データのみからの樹種区分に関する精度の目安を得ることはできた。これにより、筆者らのこれまでの研究知見（時系列な葉色変化に基づく樹種区分の可能性など）^{4) 5) 6)}と併用することで、今後、広域にわたる里山の代表的な樹種区分の可能性を見出すことができよう。さらに、今回使用した夏季の航空機 HSS データ（2002.9.20）に加えて、秋季の航空機 HSS データ（2003.10.17）を併用した季節による葉色変化を考慮した樹種分類を試み、樹種区分の精度向上を図る所存である。

なお、東京大学生産技術研究所安岡善文教授には、航空機 HSS データの利用等の便宜を図って頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

引用・参考文献

- 1) 重松敏則・朝廣和夫・瀬戸島政博・牧田史子（1997）：現存植生環境動態図の作成とその活用に関する基礎的研究：日本造園学会誌 60(5), 527-530
- 2) 栗屋善雄・田中伸彦（1999）：冷温帯森林の反射スペクトルの季節変化の特徴－ランドサット TM データを利用した解析－：写真測量とリモートセンシング 38(4), 35-46
- 3) 加藤正人（2002）：高分解能 IKONOS 衛星による針広混交林の樹種分類：森林航測 198, 6-9
- 4) 瀬戸島政博・赤松幸生・福井裕子・重松敏則・朝廣和夫・児玉滋彦（2001）：春季の時系列カラー航空写真データからみた里山林の代表的な常緑広葉樹の色調変化：ランドスケープ研究 64(5), 801-804
- 5) 瀬戸島政博・赤松幸生・今井靖晃・重松敏則・朝廣和夫・児玉滋彦（2002）：カラー航空写真上の季節の色調変化からみた里山構成樹種の識別に関する研究：ランドスケープ研究 65(5), 679-684
- 6) 瀬戸島政博・赤松幸生・今井靖晃・朝廣和夫・重松敏則（2002）：時系列なカラー画像の色調変化に基づく里山構成樹種の区分について：環境情報科学論文集 16, 177-180
- 7) M. Martin, S. Newman, J. Aber, and R. Congalton（1998）：Determining Forest Species Composition Using High Spectral Resolution Remote Sensing Data : Remote Sensing of Environment, 65, 249-254
- 8) P. Sampson, P. Zarco-Tejada, G. Mohammed, J. Miller, and T. Noland（2003）：Hyperspectral Remote Sensing of Forest Condition: Estimating Chlorophyll Content in Tolerant Hardwoods: Forest science, 49(3), 381-389
- 9) 瀬戸島政博・今井靖晃・船橋学・勝木俊雄（2005）：航空データ上の色調変化および落葉推移に基づく混交林の代表的な樹種の区分：ランドスケープ研究 68(5), 931-936
- 10) 加藤正人（2004）：森林リモートセンシング：日本林業調査会, 273pp

図-2 落葉前後に観測した航空機 LS による樹冠高の差分による常緑樹林・落葉樹林の分布域抽出

図-3 分光反射特性による樹種分類の結果比較 (スダジイ)

図-4 分光反射特性による樹種分類の結果比較 (ケヤキ)

図-5 分光反射特性に基づく樹種分類結果

図-6 検証用の樹種区分結果

図-7 正答箇所、誤答箇所の比較