ハイパースペクトル画像に及ぼす林冠下の構造の影響評価に関する基礎的研究
－立正大学構内のソメイヨシノ並木の解析事例－
Fundamental study on detecting stand structure using hyperspectral imagery
A case study of row of someiyoshino in Rissho University

白石 貴子*・後藤 真太郎**・崎尾 均***
Takako SHIRAISHI , Shintaro GOTO and Hitoshi SAKIO

要旨：本研究の目的は、ハイパースペクトル画像に及ぼす林冠下の構造の影響を抽出することである。まず、構造が単純な大学構内のソメイヨシノ並木を対象とした。ハイパースペクトル画像に近赤外分光法を適用し、ピクセルのスペクトル特性の違いを調べるため主成分分析を行った。反射率の主成分分析の結果、影の影響が反映され、樹冠下の地表面の影響は把握できなかった。二次微分吸光度では、影の影響を受けずに樹冠下の地表面の影響を捉えることができた。二次微分吸光度を用いた主成分分析により、樹冠の縁の部分でソメイヨシノ樹冠下の地表面の影響を抽出できることが示された。樹冠下の影響を捉えるのに本研究の解析方法は妥当であると判断された。

キーワード：ハイパースペクトル画像、二次微分吸光度、主成分分析、ソメイヨシノ樹冠、地表面被覆

Abstract : The objective of this study is to clarify the effect of the structure under canopy on the hyperspectrum imagery. Research site was row of tree *Prunus × yedoensis* in Rissho University. The difference of spectrum between pixels was examined by the principal component analysis. The result of the principal component analysis on the reflectance showed that the influence of the shadow appeared and the influence of the surface under the crown did not detect. The result of the principal component analysis on the second differential absorbance showed that influence of the surface under the crown was able to be detected from the hyperspectrum image without receiving influence of the shadow.

Key Words : hyperspectrum image, the second differential absorbance, the principal component analysis, tree crown, land cover

はじめに

近年、地球規模の生物多様性や温暖化の問題から、時間や空間に配慮した森林管理が求められるようになってきた。しかし、森林管理者の高齢や担い手不足から、森林管理の放棄が進み、二次林では、生物多様性の減少や希少種の消失（恒川 1999）が起こり、無伐林分となったヒノキ人工林からは表土が流出する(渡邊 1994)などの問題が起こっている。このように、森林に手が入らなくなることで、森林の公益機能が低下しており、適切な森林管理を行うことが急務となっている。

このような状況下で、高分解能衛星やハイパースペクトルセンサーの利用により、従来よりも詳細な森林観測が可能になったことから、リモートセンシング画像の森林管理への実用の可能性が高まり、リモートセンシング画像を用いて多くの研究が行われている（沖ら 2002、加藤 2002、小谷ら 2002）。小熊ら（2002）は、ミクセル分解手法を利用した樹冠率推定の可能性を、沖ら（2002）は改良マッチドフィルタ法を提案し樹冠率を精度よく推定可能にしたことを報告している等応用事例も多い。最近では、レーザースキャナデータを用いて、林分の階層的な構造の推定が行われている（田村ら 2000、瀬戸島ら 2001、2003）。

森林管理には、林冠下の植生構造は必要な情報である。これまでのリモートセンシング画像を用いた研究では、林冠下の構造に関しては、その影響を指摘しているものの今後の課題としている(小熊 2000)。また、林冠下の植生は、対象植生のノイズ成分として扱われる(沖ら 2002)にとどまり、林冠下の植生については扱われていない。

近年、用いられるようになった航空機ハイパースペクトル画像は、空間分解能が高く、波長分解能も高い。従来の数バンドの衛星画像とは異なり、連続的な分光スペクトルを入手することができる。そのことにより、ハイパースペクトルセンサーが捉えていると判断される、林冠層の下に位置する樹木樹冠や林床植生からの反射率を、スペクトル特性から抽出することが今まで以上に容易であると考えられる。

また、ハイパースペクトル画像は波長分解能が高いため、波長方向の微分演算が可能である。これにより、Dixit *et al.*（1985）は、地形や照射条件よって生じる反射率の

*立正大学大学院　地球環境科学研究科　環境システム学専攻
**立正大学　地球環境科学部　環境システム学科　***埼玉県農林総合研究センター　森林・緑化担当

変動の減少とスペクトルの吸収の特徴を強調することができる事を、Wessman *et al.* (1989) は、林冠の構造に由来した輝度の差や飛行ライン間の反射率の差を減少させることができることを報告している。

また、農業の分野で用いられる近赤外分光法は、青果の糖度の推定などに用いられており、実用的な精度を得ている(岩本ら 1994、伊藤ら 1999)。近赤外分光法はスペクトル解析に有用である。この近赤外分光法で用いられている手法をハイパースペクトル画像に適用することによって、これまでの点情報としてのスペクトル解析が面的に拡張できるようになる。

本研究では、スペクトル解析に有用である近赤外分光法で用いられている手法をハイパースペクトル画像に適用して、林冠下の構造をリモートセンシング画像から抽出し、リモートセンシング画像の森林管理への適用可能性を検討する。本研究ではまず、構造が単純であり、また樹冠下に道路などの人工物があり樹冠下の影響を抽出しやすいと判断される立正大学構内のソメイヨシノ並木を対象にして、ソメイヨシノ樹冠部おいて地表面の反射の影響を抽出した。ソメイヨシノ並木の樹冠部において本研究の解析方法の妥当性を検討し、二次林に適用していくこととした。

1. 調査地

埼玉県熊谷市に位置する立正大学熊谷キャンパス内のソメイヨシノの並木を対象とした(図 1)。

並木は、1 列で東西方向に並び、途中南北方向に折れ曲がっている。樹冠下は草がまばらに生える砂利の混じる土、草地、道路またはタイル張りの歩道など人工物となっている。また、並木の南側にはコナラ林があり、ソメイヨシノの樹冠とコナラの樹冠が接している。

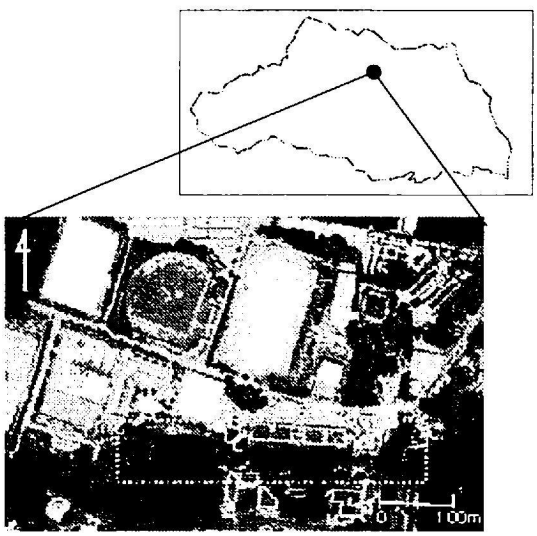

図 1　立正大学熊谷キャンパスの位置と、解析対象のソメイヨシノ並木

2. 方法

2. 1 解析方法

解析方法を図 2 に示した。リモートセンシング画像に微分演算を適用することにより、地形や照射条件の違いによる反射率の変動の減少させることが可能であること(Dixit *et al.* 1985)、林冠の構造に由来した輝度の差や飛行ライン間の反射率の差を減少させることができる(Wessman *et al.* 1989)との報告があるため、ハイパースペクトル画像では地形補正は行わず、立正大学の 500 分の 1 地形図を用いて幾何補正のみを行った。

現地調査結果による樹木位置と樹冠投影図を GIS ソフト(ArcMap9)を用いてオーバレイを行った。

リモートセンシングソフト (ERDAS IMAGINE8.6) を用いてハイパースペクトル画像から、解析対象のソメイヨシノ並木の樹冠部からすべてのピクセル値を抽出した。抽出した値から二次微分吸光度 (式 1) (岩本ら 1994) を計算した。

$$二次微分吸光度 = d^2 A(\lambda)/d\lambda^2 \quad \cdots (1)$$

ここに、A=Log(1/r)；吸光度、r；反射率、λ；波長である。ただし、実際の微分演算については数値微分を用いた。

スペクトルデータから樹冠部分の各ピクセルの特性を調べるために、統計ソフト (SPSS12.0) を用いて反射率

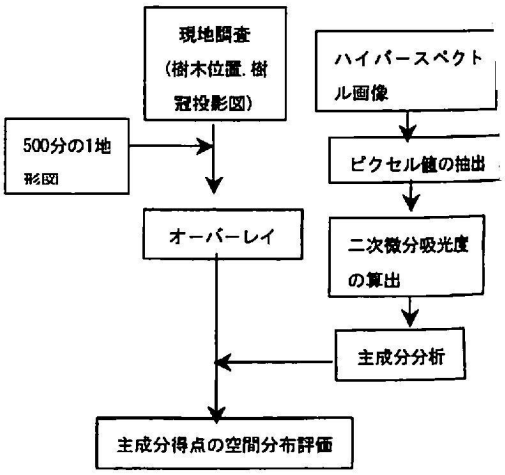

図 2　解析方法のフローチャート

表1　ハイパースペクトルデータの諸元

項　目	諸　元
プラットフォーム	航空機
撮影日	2004年7月20日
センサー名	AISA EAGLE (ハイパースペクトルセンサー)
空間分解能	1.5m
波長分解能	8.15～9.19nm
バンド数	68
観測波長域	約400～1000nm

と二次微分吸光度を用いて主成分分析を行った。主成分分析では、分散・共分散行列から求める方法を用いた。主成分分析結果から、統計ソフトで各主成分得点を計算し、GIS ソフトを用いて主成分得点の空間分布図を作成した。この空間分布図と樹冠投影図を重ねあわせ、地表面からの反射の影響を把握できるかを検討した。

2.2 使用データ

樹冠下の影響を捉えるためには、ソメイヨシノの各個体の樹冠を特定することができ、スペクトル特性の詳細な変化を把握する必要がある。そこで、高空間分解能かつ高波長分解能を有する航空機搭載型ハイパースペクトルセンサーAISA EAGLE により観測された画像を使用した。ハイパースペクトル画像の緒元を表1に示した。画像のピクセル値は反射率として与えられている。観測時に下向き放射量センサーが航空機の屋根に搭載しており、地表面放射量と同時に下向き放射量が計測されている。下向き放射量で地表面放射量を除算することにより輝度値からの反射率への変換を行った。

2.3 現地調査

現地調査では、①樹木位置図の作成、②樹冠投影図の作成を行った。位置図は、立正大学の500分の1地形図を用いて歩道などを基準にして計測した。樹冠投影図は、8方位にとして幹から枝の端までの距離を測定して作成した。また、地表面からの反射の影響を特定するために、並木周辺の地表面被覆を調べた。樹木位置図は、地表面の被覆では、地表面が何であるかを地形図に記し、植生であった場合には、ブラウン-ブランケ法(ブランケ(鈴木訳)1971)を参考にして被度のみを+～5までの6段階で評価し記録した。被度が4、5と評価された場所を草地として扱った。

3. 結果および考察

3.1 教師なし分類結果

並木周辺のハイパースペクトル画像において、教師なし分類を行った結果を図3に示した。並木周辺には、建物や草地などがあり、樹冠との境界となっている部分もあるため分類数を10として行った。その結果、樹冠部分において人工物、土、草地と同じに分類されるピクセルがあり誤分類が生じた(表2)。また、影と分類されるピクセルもあり樹冠の境界が不明瞭になるところがあった。

分類クラス4は、樹冠の北側や西側の樹冠の縁周辺に多く見られたが、道路との境界部分に見られなかった。また、樹冠内部において分類クラスが4であるピクセルがみられ、分類クラス4が地表面の影響を反映しているピクセルなのかを判断することができなかった。分類クラス3では、道路、建物、草がまばらに生える土が同じ分類となり、一律に説明することは困難であった。以上のように、教師なし分類では、地表面の影響を反映していると判断されるピクセルを抽出することができなかった。そこで、現地の状況が画像にどのように反映されているのかを、ソメイヨシノ樹冠部分のみを対象として、樹冠内部、樹冠と道路または草地との境界となるピクセル値を比較することにより調べた。また、ソメイヨシノの樹冠部分のみのピクセル間のスペクトル特性の違いを

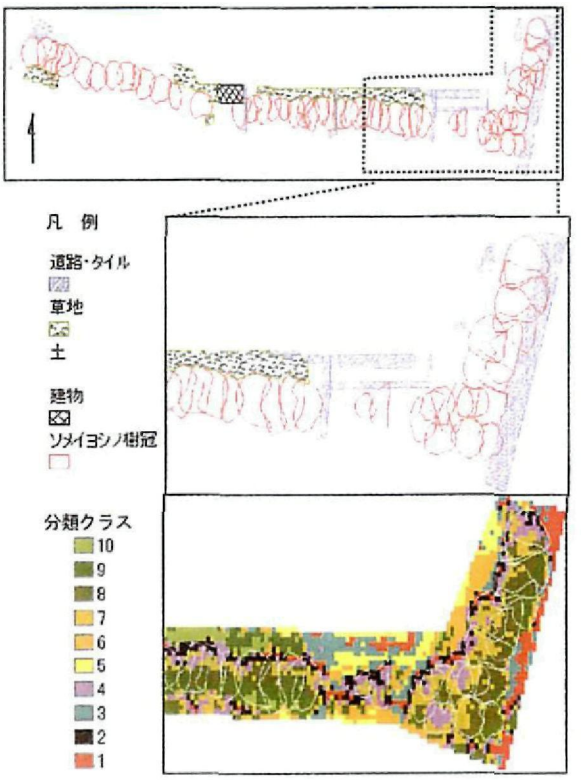

図3　ソメイヨシノ並木周辺の土地被覆図と教師なし分類結果

表 2　教師なし分類によるソメイヨシノ樹冠部分における分類結果

分類クラス	項　目＊	樹冠内に占める割合
1	建物・道路	3.4%
2	影	8.7%
3	不明	0.6%
4	樹冠の縁	14.0%
5	土	0.1%
6	土	0.5%
7	樹冠	24.9%
8	樹冠	33.1%
9	樹冠	13.9%
10	草地	0.8%

＊現地調査結果から確認した土地被覆分類

調べるために主成分分析を行い、地表面からの反射の影響が抽出できるかを検討した。

3.2 ハイパースペクトル画像に反映された樹冠下の構造の違い

ハイパースペクトル画像から抽出したソメイヨシノ樹冠部分における樹冠部、樹冠と草地の境界、樹冠と道路の境界にあたるピクセルの反射率を図 4 に示した。樹冠の境界部分は樹冠の縁に当たる部分であり、この部分の分光スペクトルには、樹冠からの反射と樹冠下の地表面からの反射の両方を含んだ内容になっていると判断される。

図 4 および図 5 中の値は、各々の場所で影の影響がないと判断された任意の 10 点の平均値を示す。

樹冠と草地の境界部分の反射率では、可視域では樹冠の反射率とほぼ重なるが、近赤外域では樹冠よりも高くなった。また、道路と樹冠の境界部分では、可視域で反射率がやや高くなり近赤外域でやや低くなり、地表面からの反射の影響があるものと考えられた。

図 5 に二次微分吸光度を示した。樹冠と樹冠と草地の境界部分の二次微分吸光度は類似した形状を示したが、波長約 480nm～490nm では、草地境界の二次微分吸光度が樹冠よりも低く、約 530nm では高くなり違いが見られた。道路との境界部分の二次微分吸光度は、特に可視域で樹冠に比べ二次微分吸光度の変化が小さく、波長 665nm では、樹冠の二次微分吸光度には見られなかったピークが見られた。以上のことから、樹冠の縁にあたる部分では、地表面の影響が現れていることが分かった。また、反射率を比較した場合よりも二次微分吸光度では詳細な違いを捉えることができた。以上から、反射率、二次微分吸光度を用いてピクセル値を比較したところ、樹冠の縁にあたるピクセルの分光スペクトルには、樹冠からの反射のほかに、地表面からの反射も含まれている

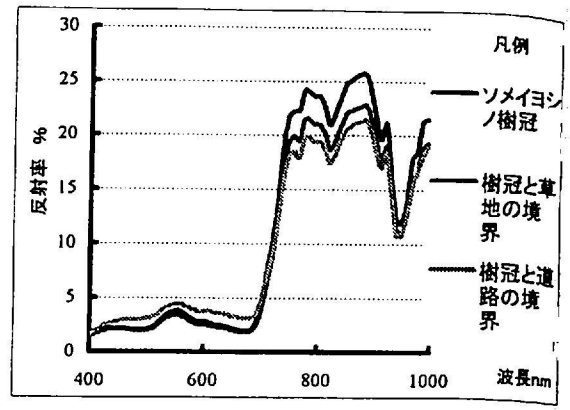

図 4　ソメイヨシノ樹冠部分の反射率

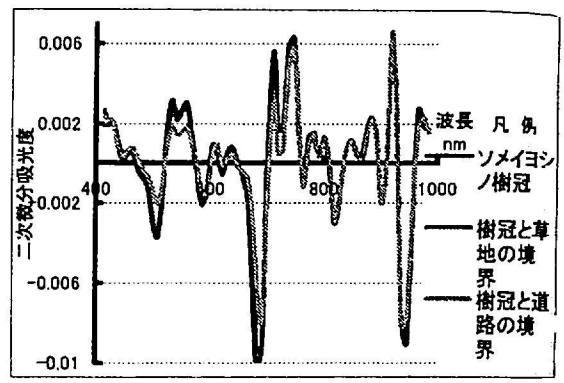

図 5　ソメイヨシノ樹冠部分の二次微分吸光度

と判断された。

3.3 主成分分析結果

樹冠部分の各ピクセルの反射率や二次微吸光度の特徴の違いを調べることにより、地表面からの反射の影響をハイパースペクトル画像から把握することができると考えられた。そこで、統計ソフトで主成分分析を用いてスペクトルデータから、ソメイヨシノの樹冠部分における各ピクセルのスペクトル特性の違いを調べた。

反射率を用いたソメイヨシノ樹冠部分の主成分分析の結果を表 2 に示した。解析では、統計ソフトを用いて主成分得点を求め、GIS ソフトにより主成分得点の空間分布図を作成し、樹冠投影図とを重ね合わせた（図 6）。なお、主成分得点は平均値が 0 になるように標準化されている。

主成分の固有ベクトルは、すべて正の値となり主成分は、可視域から近赤外域の反射率の累積を示すものと判断した。主成分得点は樹冠の南側で高く、北側へ向かって低くなっている。主成分は反射率の累積を示すことから、樹冠の北側で主成分得点が低くなったのは、樹冠自

表 3　ソメイヨシノ樹冠部分における反射率の主成分分析結果

	1
固有値	264.27
寄与率	95.7
累積寄与率(%)	95.7

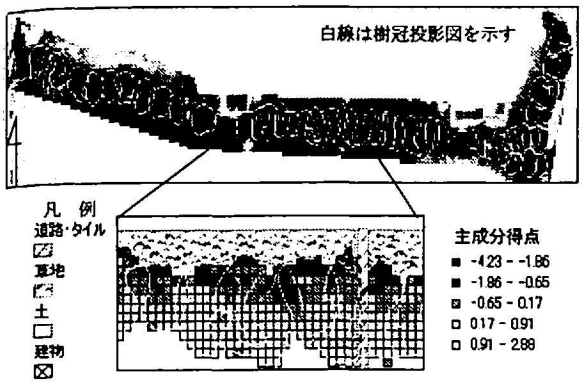

図 6　ソメイヨシノ樹冠部分における反射率の主成分得点の空間分布図

表 4　ソメイヨシノ樹冠部分における二次微分吸光度の主成分分析結果

	1	2	3
固有値	9.08	4.04	3.44
寄与率	35.7	15.9	13.6
累積寄与率(%)	35.7	51.6	65.2

身の影の影響であると考えられ、主成分得点の違いは地表面からの反射の影響を反映したものではないと判断された。

次に、二次微分吸光度を用いたソメイヨシノ樹冠部分の主成分分析の結果を表 3 に示した。第 1 主成分などに比べて、第 4 主成分、第 5 主成分の寄与率は 10%未満と小さいため、第 3 主成分までを扱うこととした。第 1 主成分の固有ベクトルでは、683nm～710nm 波長域にかけて固有ベクトルの大きさが大きく変わった。この波長域は、赤波長から近赤外波長へ変わるところであり、植物の吸収スペクトルが急激に変化するところである。このことから、第 1 主成分は、植物による赤波長の吸収スペクトルの大きさを表しているものと判断される。

第 1 主成分得点の空間分布では、反射率の場合のように、樹冠の南側で主成分得点が高く、北側で低くなるといった影の影響は見られなかった。図 7 に示したように、樹冠と道路の境界にあたる樹冠の縁の部分で第 1 主成分得点は低くなった。また、土との境界部分においても第 1 主成分得点は低くなった。これらから、第 1 主成分得点の空間分布から、地表面からの反射の影響を抽出することができたと判断された。

第 2 主成分の固有ベクトルでは、約 938nm～956nm の波長域にかけて固有ベクトルが大きく変化した。この波長域は、水の吸収波長帯である。第 2 主成分は、水分量を表しているものと判断された。第 2 主成分得点の空

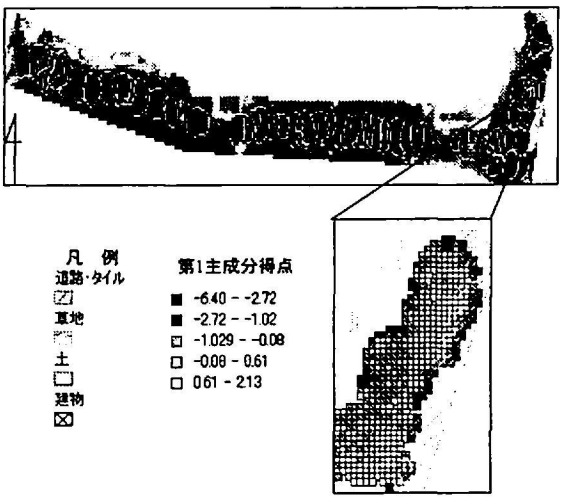

図 7　ソメイヨシノ樹冠部分における二次微分吸光度の第 1 主成分得点の空間分布図

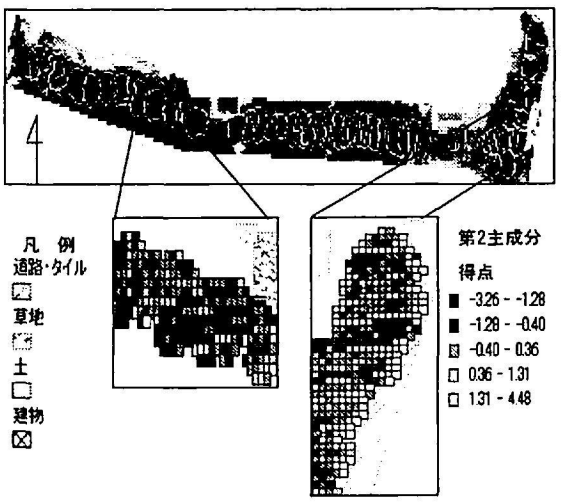

図 8　ソメイヨシノ樹冠部分における二次微分吸光度の第 2 主成分得点の空間分布図

間分布図を図 8 に示した。樹冠と土との境界部分では第 2 主成分得点は低くなったが、道路との境界部分では高くなり、地表面の違いによって主成分得点に差が見られた。このことは、地表面の水分量の違いを推定できる可能性を示唆していると考えられる。

第 3 主成分固有ベクトルは 929nm～965nm の波長域にかけて固有ベクトルの大きさが大きく変わった。この波長帯は、水の吸収波長帯であり、第 3 主成分も第 2 主成分と同様水分量を表しているものと判断された。第 3 主成分得点の空間分布図は、第 2 主成分得点の空間分布図と類似していた。

以上、主成分分析の結果、反射率では影の影響があり、地表面からの反射の影響が反映していると判断されるピクセルを抽出できなかったが、二次微分吸光度を用いることにより、影の影響をほとんど受けずに樹冠の縁の部分で地表面からの反射の影響を評価することができた。

4. まとめ

立正大学熊谷キャンパス構内のソメイヨシノ並木において、反射率や二次微分吸光度のスペクトルの特徴から、樹冠の縁の部分には樹冠と樹冠下の地表面の両方の情報が含まれていると判断された。しかしながら、ソメイヨシノ樹冠部分の反射率を用いた主成分分析から得た主成分得点の空間分布を評価したところ、影の影響が現れていると判断され、樹冠下の地表面の影響を捉えることはできなかった。二次微分吸光度を用いた主成分分析では、影の影響を受けずに、ソメイヨシノの樹冠部分を評価することができた。また、第 1 主成分得点から樹冠の縁の部分で地表面からの反射の影響を捉えることができた。第 2 主成分得点では、地表面の水分量の違いを把握できる可能性が示唆された。以上より、樹冠下の地表面の影響を抽出するには、反射率よりも二次微分吸光度を用いる方が有効であり、主成分分析によりハイパースペクトル画像から樹冠の縁の部分で地表面の反射の影響を抽出できることが示された。

おわりに

現在、国営武蔵野丘陵森林公園の北口周辺に成立するコナラ二次林を対象にして解析を進めている。現地調査を行い、その現地調査結果に基づいて、ハイパースペクトル画像から上層木の樹冠下に位置する常緑樹を捉えられるかを検討している。

現地の状況に基づいて、主成分分析からスペクトルの特性の違いを捉えることは、スペクトル特性の違いが何によって生じたのかを解釈する上で必要なことであると考える。リモートセンシング画像を用いて、その情報を抽出することができれば、スペクトル特性のパターンから林分構造を面的に捉えられるようになると考えられる。広域かつ周期的に、林分構造を面的に把握することにより、林分の構造の類型区分を行うことができ、類型区分に適した管理計画の策定に役立つものと考える。

謝辞

本研究は、文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンター整備事業内の「ジオインフォマチックスの地域利用および環境教育への適用に関する研究」（代表後藤真太郎）により実施した。ここに記して謝意を表します。

引用文献

伊藤茂・大竹良知・吉村幸江・鬼頭勇夫（1999）近赤外分光法によるスイカ果実の非破壊糖度測定.愛知県農業総合試験場研究報告書第31号, p.153-158.

岩本睦美・河野澄夫・魚住純（1994）近赤外分光法入門.幸書房, 東京, 168pp.

Wessman, C.A., Aber, J.D., and Peterson, D.L., (1989) An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry. *Int.J.Remote Sence*10 (8), p.1293～1316.

沖雄一・小熊宏之（2002）リモートセンシングデータを用いた特定森林樹冠の推定-釧路湿原におけるハンノキ推定-.日本リモートセンシング学会誌, 22(5), p.510～516.

小熊宏之・島崎彦人・山形与志樹（2002）森林樹冠率の推定におけるミクセル分類手法の有効性に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, 41(2), p.4～14.

加藤正人（2002）高分解能衛星 IKONOS 衛星による針広混交林の樹種分類.森林航測, 第 198 号, p.6～9.

小谷英司・粟屋善雄・岡野通明（2002）航空機 MSS による落葉広葉樹林での分光反射特性の季節変化と樹種分類.日本写真測量学会春季学術講演会論文集, p.63～64.

瀬戸島政博・今井靖晃・天野正博（2003）落葉前後の航空機レーザースキャナデータを利用した林分構造の推定.森林航測.第 199 号, p.6～9.

田村正行・高槻幸枝（2000）航空機レーザースキャナデータによる樹高計測.写真測量とリモートセンシング, 39(2), p.8～13.

Dixit, L., and Ram, S. (1985) Quantitative analysis by derivative electronic spectroscopy. *All. Spectr. Rev*, 21(4), p.311～418.

林真智・沼田洋一・小熊宏之・山形与志樹（2001）リモートセンシングデータを利用した林分構造の計測.写真測量とリモートセンシング, 40(3), p.41～46.

ブラウン-ブランケ（鈴木時夫訳）（1971）植物社会学 I, ,朝倉出版、東京, 359pp.