

航空機ハイパースペクトルデータと植生GIS データを用いた河道内樹林の分布域推定

—侵略的外来種ハリエンジュ群落を対象とした事例研究—

ESTIMATING RIVERINE TREE DISTRIBUTIONS USING AIRBORNE HYPERSPECTRAL AND VEGETATION GIS DATA

高橋俊守¹・星野義延²・安岡善文³

Toshimori TAKAHASHI, Yoshinobu HOSHINO and Yoshifumi YASUOKA

¹ 東京大学大学院工学系研究科博士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

² 農博 東京農工大学農学部地域生態システム学科助教授 (〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8)

³ 工博 東京大学生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

In recent years, riverine trees have increased their range and grow thickly in river channels, even on the original gravel riverbeds. This expansion includes invasive alien species, such as *Robinia pseudoacacia*. This phenomenon can lead to problems with flood control and biodiversity conservation. Consequently, it is quite important to develop practical methods for monitoring the distributions of riverine trees in riparian ecosystems.

This study evaluated hyperspectral remote sensing methods for estimating the distributions of riverine trees in the midstream of the Tamagawa River. The distribution of *Robinia pseudoacacia* was distinguished using hyperspectral and vegetation GIS data. The estimated distributions were compared with an actual vegetation map and the accuracy was evaluated in a field survey. The results suggest that a method combining hyperspectral remote sensing and vegetation GIS is useful for monitoring riverine trees in riparian ecosystems.

Key Words : *Hyperspectral remote sensing, vegetation GIS, riverine tree mapping, invasive species, Robinia pseudoacacia*

1. はじめに

近年, 我が国の河川においては, 上流部のダム建設や河川改修によって河道の安定性が増した結果, 河道に植生が著しく繁茂する現象が各地で発生している. 中でも, 北米原産のマメ科の木本植物ハリエンジュ (ニセアカシア) による河道内樹林化の現象は, 全国各地の河川で報告されている¹⁾. 河道における木本植物の繁茂は, 洪水時の疎通能力の低下を引き起こし, 治水安全度を低下させる恐れがある. 一方でハリエンジュは, 拡散した場合に生物多様性を脅かす侵略的外来種に相当するため²⁾, 河川生態系保全の観点からも問題となる. このため, 河道内樹林化の動態や機構を解明し, その予測を可能とするとともに, これを適正に管理することが, 河川管理の重要な課題となっている.

河道における樹林の分布を面的に把握するための基礎的な情報源として, 航空写真が利用されることが多い. 航空写真は, 比較的安価に入手可能で, 基本的に空間解像度が高いという利点がある. このため, 航空写真のテ

クスチャーや色の濃淡あるいは立体視を手掛かりとした目視によって, 植生の分布域や種類の判読が行われている. しかし, 航空写真の目視判読には作業の熟練が求められるとともに, 労力と時間を必要とする.

航空写真以外で, 河道における植生の面的な分布を把握する情報源として利用されているものに, 現存植生図がある. 我が国では, 全国109の一級水系の河川等を対象として, 1990年より国土交通省や自治体を実施している「河川水辺の国勢調査」において, 河道における現存植生図が作成されている. この植生図は, 既往の植生図と最新の航空写真によって植生区分図を作成した後, 現地調査によって植生の種類と面的な分布を把握することによって作成されている³⁾. 「河川水辺の国勢調査」は, 関連する各種調査が5年で一巡するように行われているため, 植生図も, 概ね5年毎に更新されている. しかし, 河川は一般的に不安定で動的な生態系であり, 洪水や乾燥によって植生の分布も変化し易いため, 河道における植生の動態を詳しくモニタリングする手段としては十分とは言えない. 一方で, 大規模な出水等に

よって植生の分布が変化する度に、植生図を頻繁に更新することは、労力的にも予算的にも現実的とは言えず、限界がある。

広範囲を同時かつ反復的に観測できるリモートセンシングは、植生の動態を効率的にモニタリングする手段として期待されてきた。しかし従来のセンサには空間解像度や波長分解能において制約があり、多様な植生が複雑に入り組んだ河川生態系における観測に適用するには限界があった。近年になり、科学技術の進展により、対象物を高空間分解能で観測可能な衛星搭載型センサや、対象物の連続的なスペクトルを取得することができる波長分解能の高いセンサが実用化された。これにより、従来のセンサでは難しかった、詳細な空間スケールでの植生の観測や種類の識別、生化学量や生物物理量の推定を、リモートセンシングによって実施できる可能性が高まった。

本研究では、対象物を高い波長分解能と空間分解能で観測可能な、航空機ハイパースペクトルリモートセンシングの手法に着目した。対象物を高波長分解能で観測した画像は、バンド数が多いため、植生の分光特性を示す連続的なスペクトルを把握することができる。植生のスペクトルは、窒素やリグニン等の生化学量や、葉面積指数等の生物物理量と関連することが知られており、これらの性質を利用して、河道内樹林、さらには特定の植物群落の分布域を推定するための有効な手段となる可能性があると考えられる。

そこで本研究は、(1) 航空機ハイパースペクトルリモートセンシングの手法を適用して、侵略的外来種ハリエンジュが優占した河道内樹林の観測を実施し、(2) 画像解析の手法によって河道内樹林及びハリエンジュ群落の分布域を推定し、(3) 解析結果と既存の植生図の一致率を評価するとともに、現地踏査によって精度を詳しく検証することで、本手法の河川生態系における実用可能性について評価することを目的として実施した。

2. 研究対象域の概要

研究対象域は、多摩川の河口から 51.7 ～ 53.2km 付近に位置する約 1.5km の扇状地区間で、永田橋から羽村大橋までの河川区間約 39.7ha とした。この区間の平均河床勾配は約 1/250、河川幅約 300 m である。本区間においては、左岸低水敷が低下し、右岸高水敷が上昇した結果、複断面化が進行している。河川水面と高水敷との比高が増加し、出水時の高水敷への冠水頻度が減少した結果、河道内樹林化が著しい。

多摩川永田地区現存植生図⁴⁾によると、対象区間においては 32 の植生タイプが記録され、河道内樹林に相当する木本植生として、イヌコリヤナギ群集、タチヤナギ群集、ハリエンジュ群落、オニグルミ群落・ミズキ群落の 4 タイプが認められる。この内、ハリエンジュ群落

は植生図に示されたすべてのタイプの中で最も大きく、総面積約 6.9ha、河道内樹林全面積の約 75% を占めている。

3. データの取得及び解析方法

(1) 航空機ハイパースペクトルデータ

ハイパースペクトルデータの取得は、CASI (ITRES, Inc.) を用いて実施した。CASI は、512 個のセンサで構成されるリニアアレイセンサを搭載したプッシュブルームスキャナである。CASI は可視近赤外の約 410 ～ 957nm を観測波長帯域とし、これを最大 288 バンドの多波長画像として観測することができる。ただし、航空機の飛行速度を一定とした場合、バンド数を増加させると、スキャンラインの積分時間をより必要とすることから、空間分解能が低下する。

画像解析による分類では、用いるイメージの空間解像度が精度に与える影響は大きい。植生の識別を行う場合、目的とする植生内での分散が最小で、異なる植生間での分散が最大となる空間解像度が最も理想的であると考えられる。これは、空間解像度が低すぎると目的とする植生クラスの判別が困難となり、逆に解像度が高すぎるとクラス内での変化性が増し、分類精度が低下することによる。一方で、河道植生の観測に適した調査スケールについて、砂田らは富士川の扇状地河川における調査結果に基づき、植物の種組成に関する生態学的な観点から、効率的な基準スケールとして 10 m メッシュを提案している⁵⁾。

本研究で識別することを目標としたハリエンジュ群落は、縮尺 5000 分の 1 で作成された現存植生図において、最小面積は約 50.7m²、平均面積は約 1279.8m² のパッチで表されている。これらの条件を考慮し、ピクセルサイズが 10m² ～ 25m² となる空間解像度が得られるバンド数と飛行高度を設定して観測を行うこととした。このため、CASI の観測条件を、波長分解能約 11.7nm、48 バンドのスペクトルモードとし、2002 年 9 月 20 日午前 11 時 15 分に、高度 5000feet から観測を実施した。なお、航空機観測にあたっては、少なくとも観測の前日 3 日間は降雨が無く、風による影響も少ない快晴の日を待って実施した。

さらに、放射量補正を行うため、航空機観測と同期して、可搬型スペクトルメータ FieldSpec Pro FR (ASD, Inc.) を用いて、植生、土壌、砂敷のグラウンド、河畔池沼の 4 点を対象として分光反射スペクトルをそれぞれ観測した。これらのデータを基に放射量補正を行い、航空機で取得した輝度値イメージを分光反射率イメージに変換した。

(2) 解析方法

以上の工程によって処理された分光反射率イメージを

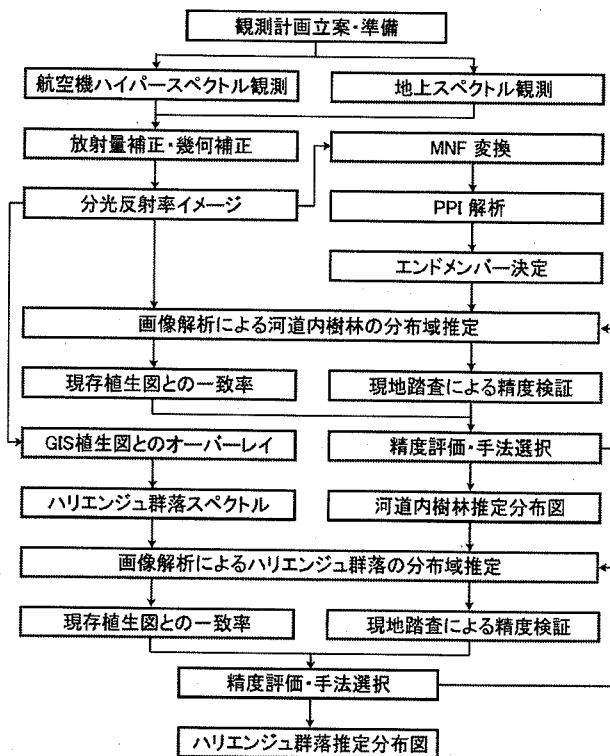


図-1 解析全体フロー

基本データとして、河道内樹林の分布域推定及び、ハリエンジュ群落の分布域の識別を実施した。解析には複数の手法を適用してそれぞれの結果を比較した。本研究において適用した解析の全体フローを図1に示す。

a) 河道内樹林の分布域推定

河道内樹林の分布域推定は、分光反射率イメージ及びこのイメージをMNF (Minimum Noise Fraction) 変換したイメージを対象として行った。MNF変換とは、SN比を低減すると共に、従来の主成分分析と比較して分散の大きな合成変数に情報を縮約する、連続した2段階のオペレーションから成るアルゴリズムである⁶⁾。

まず、分光反射率イメージ及びMNF変換イメージそれぞれに対して、最も一般的な非階層的クラスタリングの手法であるK-means法及びISODATA法を適用して教師無し分類を行い、分類クラスから河道内樹林の分布域と想定されるカテゴリを任意に選定した。

次に、樹林地を始めとしたエンドメンバーを設定し、各クラスにおけるスペクトルの特徴量を定義することで教師付き分類を実施した。ここで、各分類クラスのエンドメンバーは、MNF変換イメージを用いてPPI (Pixel Purity Index) を算出することで決定した。PPIとは、MNF変換イメージのバンドを組み合わせさせた散布図をランダムな単位ベクトル上に反復して投影し、この時ピクセルが極値となる頻度を指標する値である⁷⁾。PPI解析によって得られた分類クラスの標準スペクトルを教師データとして、最尤分類法、最短距離分類法(ユークリッド距離及びマハラノビスの汎距離を使用)及び、SAM (Spectral Angle Mapper) 法を適用して分類を行っ



図-2 研究対象域のハイパースペクトルイメージ

た。SAM法は、スペクトルの形状をベクトルに置き換え、ベクトルの角度を尺度としてハイパースペクトルイメージを分類する手法である⁸⁾。

b) ハリエンジュ群落の識別

研究対象地における河道内樹林は、ハリエンジュ群落が大半を占めているが、その他の種類の木本群落も認められる。そこで、画像解析によって推定された樹林地の分布域から、特に侵略的外来種のハリエンジュ群落の分布域を識別することを目的として解析を行った。

本研究では、縮尺5000分の1現存植生図を入力した植生GISデータを利用して、識別する木本群落に対応したスペクトルをハイパースペクトルイメージから求め、スペクトルの類似性を尺度として分類を実施することとした。このため、植生GISにおける樹林各クラスの分布域と分光反射率イメージをオーバーレイし、各クラスに対応するピクセルのスペクトルをそれぞれ平均化してエンドメンバースペクトルを求めた。この際、隣接する他の植生クラスとのスペクトルの混合を低減させるため、植生GISにおける木本群落のポリゴンの周辺から中心に向かって任意に2.5mのバッファを発生させ、これをポリゴンから切り捨ててから、オーバーレイを行った。

c) 解析結果の検証

解析結果の検証は、航空機観測の前年2001年5月に作成された縮尺5000分の1現存植生図及び現地踏査結果との一致率の判定によって行った。ここで、画像解析、現存植生図及び現地踏査の結果はそれぞれ解像度が異なることから、GISを用いて作成した一辺10mのメッシュ単位で情報を集計した。

樹林地の推定分布域と現存植生図との一致率の判定は、現存植生図における4種の木本群落を合わせた分布域と画像解析結果との一致率で判定した。一方でハリエンジュ群落の推定分布域は、現存植生図に示されたハリエンジュ群落の分布域との一致率で判定した。

現地踏査による検証は、画像解析による樹林地の推定分布域と現存植生図の一致率が低い場所を対象として実施した。10m×10mのメッシュで構成される100m四方の領域3箇所において、ディファレンシャルGPS及び可搬型GISを用いて、それぞれのメッシュにおける木本植生の有無及びその種類を記録した。

なお、検証結果の判定尺度として、結果が同一のメッシュ数の全メッシュ数に占める比率を百分率で表した一致率及び、偶然の一致を考慮したCohenのKappa係数を用いた。

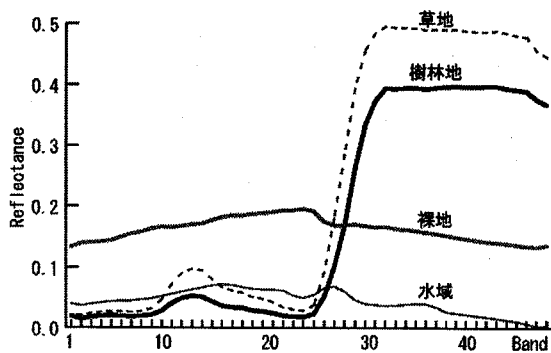


図-3 PPI ピクセルのスペクトルを平均化して求めたエンドメンバースペクトル

4. 結果と考察

(1) 航空機ハイパースペクトルデータ

航空機観測と放射量補正によって、図2に示すように48バンドで構成される分光反射率イメージを得た。観測されたイメージの空間分解能は、航空機進行方向に約5m、進行方向と直角方向に約2.5mであった。なお、観測時の天候は快晴で、研究対象域から最も近い八王子气象台によると、当日同時刻の気温は23.5℃、北北東の風、風速2m/sであった。

(2) 解析結果

a) 河道内樹木の分布域推定結果

本研究で河道内樹木の分布域を推定するために適用したすべての手法と、それぞれの推定結果の現存植生図との一致率を表1に示した。

分光反射率イメージを対象とした教師無し分類の結果は、今回適用した解析法の中では相対的に現存植生図との一致率が最も低かった。これに対して、MNF変換イメージを対象とした教師無し分類の結果は、現存植生図との一致率及びkappa係数でともに改善が見られた。

MNF変換イメージを用いて算出したPPIを、MNFバンドで展開した2次元の散布図に投影すると、大きく4つの明瞭な極値に分離された。これらのPPIピクセルはイメージにおいて、それぞれ樹林地、草地、水域、裸地に対応していた。そこで、それぞれのPPIピクセルのスペクトルを平均化してエンドメンバースペクトルを求めた(図3)。これらのスペクトルを用いて教師付き分類を行った結果、最尤分類法を適用した樹林地の推定分布域が、現存植生図における樹林地分布域との一致率が最も高く、一致率が約75%、kappa係数が0.50であった。なお、最短距離分類法による結果及びSAM法による分類結果も、やや劣るが、最尤分類法による分類結果とほぼ同等の結果を示した。図5に、最尤分類法を用いて推定した河道内樹木の推定分布域を示した。

最尤分類法による樹木の推定分布域のメッシュ数は、現存植生図における樹林地のメッシュ数の約1.2倍であった。画像解析結果と現存植生図が一致しなかった範囲では、現存植生図においてススキ群落、オギ群落、ツ

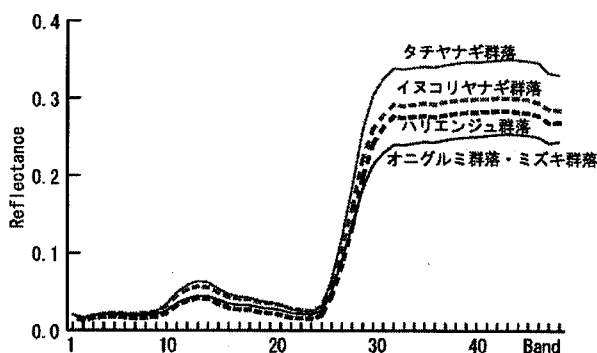


図-4 現存植生図とハイパースペクトルイメージをオーバーレイして求めたエンドメンバースペクトル

ルヨシ群落の分布域が、画像解析では樹林地とされている場合が多かった。

現存植生図における木本群落それぞれの分布域に対する、画像解析による抽出率を調べると、ハリエンジュ群落が約92%と高い比率で抽出されていた。これに対して、イヌコリヤナギ群落、タチヤナギ群落、オニグルミ群落・ミズキ群落の抽出率は、それぞれ、約67%、64%、69%であった。木本群落によって抽出率に差が生じた主要原因として、各群落のパッチ面積の違いによる影響が考えられる。すなわち、ハリエンジュ群落に対してパッチ面積がおよそ4分の1と小さい木本群落では、他の植生タイプとのスペクトルの混合が生じやすくなり、この結果として抽出率が低下する。

現地踏査結果と画像解析結果の一致率を表2に示した。現地検証域において把握した実際の樹林地分布域との一致率は、最尤分類法を用いた場合に約90%、Kappa係数が0.90を示し、高い精度で樹木の分布域が推定されていた。これに対して、現地検証域における現存植生図との一致率は、約53%と低い値であった。画像解析の結果が現存植生図と比較して実際の樹木の分布域を良く推定していたのは、孤立木あるいは規模の小さな木本群落が生じた草地の分布によるものであった。孤立木や小さな木本群落は、縮尺5000分の1現存植生図では、実際の分布を表現することが難しい。また、植物の種組成を根拠に分類単位を決定する現存植生図では、木本群落が生じている場合でも、草本群落として分類されることがあり得る。これに対して、画像解析ではイメージの空間分解能に対応した大きさまで、規模の小さな木本群落でも観測することができる。このように、高い空間分解能で観測したイメージから、孤立木や小さな木本群落に至るまで、河道内樹木の分布を詳細に推定できることは、本手法の利点の一つであると言える。

なお、画像解析の結果と現地踏査結果とが一致しなかったメッシュには、アズマネザサ群落または、オオバタクサ、イタドリなどの高茎広葉草本群落が認められた。これらの群落と樹木を識別し、誤分類の発生をさらに低下させることは、今後の課題である。

b) ハリエンジュ群落の識別結果

現存植生図とハイパースペクトルイメージのオーバー

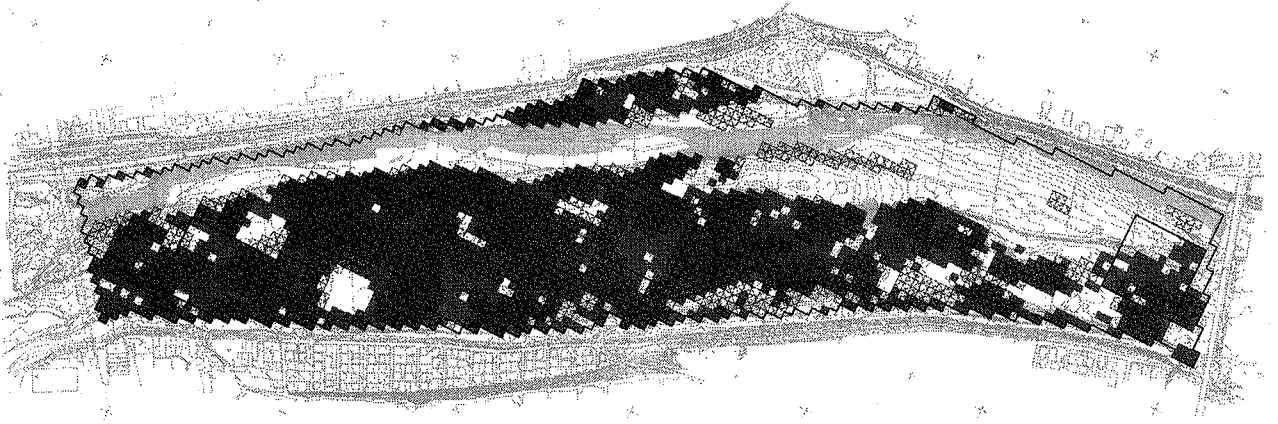


図-5 河道内樹林推定分布図（メッシュは現存植生図における樹林地の分布域，大きな3箇所の方形区は現地検証域を示す）



図-6 ハリエンジュ群落推定分布図（メッシュは現存植生図におけるハリエンジュ群落の分布域，大きな3箇所の方形区は現地検証域を示す）

表-1 画像解析による河道内樹林の推定分布域と現存植生図の一致率

推定分布域	解析対象	分類方法	一致率 (%)	Kappa 係数
河道内樹林	分光反射率イメージ	教師無し分類 K-means 法	67.7	0.35
		ISODATA 法	67.4	0.37
		教師付き分類 Spectral Angle Mapper 法	74.3	0.49
	MNF 変換イメージ	教師無し分類 K-means 法	71.5	0.44
		ISODATA 法	68.6	0.36
		教師付き分類 最尤分類法	74.9	0.50
		最短距離分類法 (ユークリッド距離)	73.2	0.47
		最短距離分類法 (マハラノビスの汎距離)	73.4	0.47
	分光反射率イメージ	教師付き分類 Spectral Angle Mapper 法	77.9	0.55

表-2 画像解析による河道内樹林の推定分布域と現地踏査結果の一致率

推定分布域	解析対象	分類方法	一致率 (%)	Kappa 係数
河道内樹林	分光反射率イメージ	教師無し分類 K-means 法	77.7	0.78
		ISODATA 法	81.7	0.82
		教師付き分類 Spectral Angle Mapper 法	84.7	0.85
	MNF 変換イメージ	教師無し分類 K-means 法	86.0	0.86
		ISODATA 法	69.7	0.70
		教師付き分類 最尤分類法	89.7	0.90
		最短距離分類法 (ユークリッド距離)	87.3	0.87
		最短距離分類法 (マハラノビスの汎距離)	88.3	0.88
	分光反射率イメージ	教師付き分類 Spectral Angle Mapper 法	78.7	0.79

レイによって、各木本群落のエンドメンバースペクトルを得た（図 4）。現存植生図及び現地踏査結果との一致率が最も高かった、MNF 変換イメージを最尤分類法によって推定した樹林地の推定分布域の範囲を解析対象域として、各木本群落のエンドメンバースペクトルを教師データとして用い、SAM 法によって分類した結果、図 6 に示すハリエンジュ群落の推定分布図を得た。

画像解析によって推定されたハリエンジュ群落のメッシュ数は、現存植生図におけるハリエンジュ群落のメッシュ数の約 1.4 倍であった。現存植生図に示されたハリエンジュ群落分布域との一致率は約 78%，kappa 係数は 0.55 を示した。画像解析による結果と現存植生図が一致しなかった場合の多くは、現存植生図においてハリエンジュ群落以外のススキ群落、ツルヨシ群集、オギ群集等で示されている分布域が、画像解析ではハリエンジュの分布域として識別された場合が多かった。なお、本研究の対象域において、これらの草本群落からハリエンジュ群落へと変化する植生遷移があることが報告されている⁹⁾。

現地検証域において確認した実際のハリエンジュの分布域と画像解析による推定結果の一致率は約 79%，Kappa 係数で 0.79 を示し、比較的高い精度でハリエンジュの分布域が推定されていた。一方で、現地検証域を対象として現存植生図におけるハリエンジュ群落と現地踏査結果の一致率は、約 62% と低い値であった。

現地踏査結果と画像解析の結果が一致しなかったメッシュには、ハリエンジュ以外の木本植生が認められた場合と、ハリエンジュの幼木が低密度で生育している場合が多かった。また、現地踏査結果と現存植生図の一致率や推定面積が大きく異なっていたのは、画像解析では、草本植生が支配的な群落におけるハリエンジュの孤立木や根萌芽の実際の存在を識別することが可能であったためと推察された。このように、高い空間分解能で観測したハイパースペクトルデータと現存植生図を併用することによって、河道内に分布するハリエンジュの実際の分布域を比較的高い精度で推定可能であることが明らかになった。

5. 結論

航空機ハイパースペクトルリモートセンシングと植生 GIS を併用することによって、河道内樹林及びハリエンジュ群落の分布域を推定する手法を示した。

空間分解能が高いハイパースペクトルデータを用いた画像解析によって、河道内樹林の実際の分布を約 90% の精度で推定することができた。また、植生 GIS データを併用することによって、ハリエンジュの実際の分布を約 79% の精度で推定することができた。

画像解析による推定分布域は、縮尺 5000 分の 1 現存植生図と比較して面積的に大きく、また一致率も現地踏

査結果との一致率よりも低かった。これらの結果は、画像解析の結果が孤立木やハリエンジュの根萌芽等、河道内樹林の実際の分布を、現存植生図よりも反映していたことによるものであった。

以上の結果から、空間分解能及び波長分解能の高い航空機ハイパースペクトルデータの解析によって、河道内樹林の分布域を比較的高い精度で推定可能であると言える。さらに、既存の現存植生図を入力した植生 GIS データを併用することによって、特定の植物群落の分布域を効率的に推定することが可能である。航空機ハイパースペクトルデータと植生 GIS データを併用した手法は、河川生態系における河道内樹林を始めとした植生モニタリングの効率的な手段となり得る。今後は、他の植物群落にも適用範囲を広げ、本手法の有効性を検討したい。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省における新世紀重点研究創生プラン（RR2002）及び河川生態学術研究会多摩川グループの調査研究の一環として実施されたものである。また、土木研究所自然共生センターの皆川朋子氏には貴重な資料をご提供いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 萱場祐一：河川における樹林化の実態とその経緯，第 32 回日本水環境学会年会講演集，1998
- 2) 日本生態学会編：外来種ハンドブック，地人書館，2002
- 3) 建設省河川局河川環境課監修：河川水辺の国勢調査マニュアル平成 9 年度版・河川版（生物調査編），（財）リバーフロンティア整備センター，1998
- 4) 長岡聡子，畠瀬頼子：多摩川永田地区現存植生図，2002
- 5) 砂田憲吾，白石孝幸，岩本尚：河川植生の分布とその調査方法に関する基礎的解析，土木学会水工学論文集，第 43 巻，pp.965-970，1999
- 6) Green, A.A., M. Berman, P. Switzer, and M.D. Craig : A transform for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 26(1), pp.65-74, 1988
- 7) Boardman, J.W., Kruse, F.A., and Green, R.O. : Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data, JPL Publication 95-1(1), pp.23-26, 1995
- 8) Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, J.P., and Goetz, A.F.H. : The spectral image processing system (SIPS), Remote Sensing of Environment, 44, pp.145-163, 1993
- 9) 李参熙，藤田光一，山本晃一：礫床河道における安定植生域拡大のシナリオ，土木学会水工学論文集，第 43 巻，pp.977-982，1999

(2004. 4. 7 受付)