

分光反射率の計測と植生指数による 河道内植生の葉面積指数推定

ESTIMATING LEAF AREA INDEX OF RIVERINE VEGETATION USING HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING AND VEGETATION INDEX

高橋俊守¹・安岡善文²

Toshimori TAKAHASHI and Yoshifumi YASUOKA

¹正会員 博（工） 東京大学 大学院農学生命科学研究科（〒262-0018 千葉市花見川区畑町1051）

²工博 東京大学教授 生産技術研究所（〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1）

Hyperspectral data were acquired from in situ ground measurements in a riparian grass field. The leaf area index(LAI) was measured using a LAI-2000 analyzer. Data sets were analyzed by empirical approaches using simple vegetation indices(VIs), NDVI and RVI. The optimal VI band combination for LAI estimation was appeared particularly when adjacent bands in the visible range were used. The correlation coefficient between the LAI and optimal VI reached 0.83, and the coefficient of determination was 0.70 using a simple linear regression model. Although the estimation accuracy was affected by species composition, the optimal VI for LAI estimation was determined through calculations using hyperspectral data. Hyperspectral measurement techniques may prove effective in improving the accuracy of LAI estimation for riparian vegetation, which consists of various plant species and densities.

Key Words : Riverine vegetation, leaf area index (LAI), hyperspectral remote sensing vegetation index(VI)

1. はじめに

葉面積指数（LAI : Leaf Area Index）は、単位地表面積に対する緑葉の全面積の2分の1が占める比率を表す指標である¹⁾。LAIは、植生の物理的特性と関連した最も基本的なパラメータの一つである。LAIは、大気汚染や気候変動等の生物地球科学的过程あるいは光合成活性や純一次生産、炭素固定等の生態学的過程を記述する多くのモデルにおけるインプット・パラメータとして、地域スケールから地球スケールに至るまで広く利用されている。

生産者である河道内植生のLAIを観測する手法を確立することは、特に河川生態系における食物連鎖や物質循環を解明するために重要である。しかし、水際域の多様な生育環境に伴って植物の種組成や生育密度が不均一となり、さらに動的な生態系において観測の対象となる植生そのものが変化しやすいこと等から、河道内植生を対象としたLAIの現地調査や継続的なモニタリングは、困難な課題であった。

広域を反復して観測することができるリモートセンシング技術は、LAIの有効な観測手段となることが期待さ

れてきた。ただし、従来の空間分解能や波長分解能の低いセンサでは、複雑な河道内植生の観測に適用するには限界があった。今日では、対象物を高い波長分解能で観測できる、ハイパースペクトルリモートセンシングが実用化され、波長分解能と空間分解能がいずれも高い、航空機をプラットフォームとするデータの取得も可能となっている。しかし、多様な植物種から構成された植生がモザイク状に分布し、複雑な構造を呈している河道内植生を観測対象とした場合に、LAIの推定精度を確保する有効な手法は示されていない。

このため筆者らは、ハイパースペクトルリモートセンシングを用いた河道内植生のLAI推定可能性や²⁾、植生や環境条件の違いがLAI推定に与える影響について検討を行ってきた³⁾。この結果、LAI推定に有効な波長帯域が複数存在することや、これらの波長を組み合わせで求めた植生指数（VI : Vegetation Index）によって、一定の精度でLAIを推定可能であることが確認された。しかし一方で、特徴波長帯を用いたVIによるLAI推定の精度は、植生高や植生被覆率あるいは表層土壌水分によって影響を受けることも課題として示された。そこで本研究では、複数の特徴波長帯を組み合わせで求めたVIによるLAI推定を、植生タイプ別に適用することで、推定精度を比較

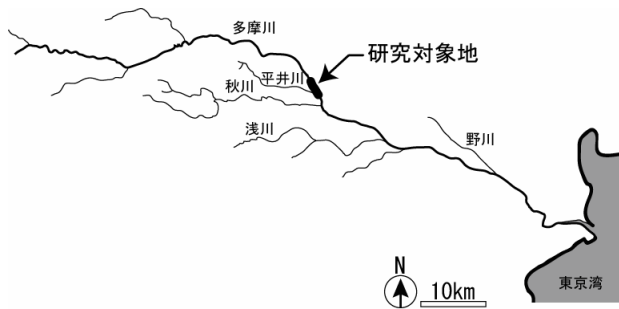


図-1 研究対象地位置図.

した. さらに, LAIに対してスペクトルの感度特性が得られる背景について考察を加えた. これによって, LAIに対する感度特性を示す特徴波長帯を組み合わせで求めたVIによる, 河道内植生のLAI推定法の有効性について, 検証することを目的とした.

2. 研究の方法

(1) 研究対象域の概要

多摩川の河口から53km付近に位置する羽村大橋下流部及び, 50km付近に位置するJR五日市線下流部における礫床河川の高水敷右岸を観測対象とした(図-1). いずれの地点も, かつては礫河原であったが, 今日では植生被覆域が優占している. 対象域の河道内植生は, 木本から草本まで多様な植物種によって構成されるが, 本研究では, 地上から分光反射特性を観測しやすい, 草本植物が優占する河道内植生を観測の対象とした.

(2) 植生調査

研究対象域に68箇所の調査区を設置し, 植生調査を行った. 後述する可搬型スペクトロメータの光ファイバースコープで観測する範囲に合わせて, 植生調査の調査区を直径45cmの円内とした.

調査区に出現する植物種の全種名と, それぞれの植物体の地上部を地表面に投影したときに植物が覆う面積の割合を表す被度及び, 全植物が調査区を覆う面積の割合を表す植被率を記録した. ただし, 被度及び植被率の基準には, 植物社会学的手法⁴⁾による階級区分を用いた. さらに, 植物群落の平均的な高さについても併せて計測した.

(3) 分光反射率の計測

分光反射率は, 植生調査を実施した日と同日, 2002年8月8日及び15日, 午前10時から午後2時までの間に, Labsphere社製Spectralonを標準白板としてAnalytical Spectral Device社製FieldSpec FRを用いて計測した. FieldSpec FRは, 内蔵された異なる3つのセンサで, 350-

2,500nmの波長帯域を観測する. サンプル間隔は350-1,000nmが1.4nm, 1,000-2,500 nmが2nm, 波長分解能は700nmで3nm, 1,500nmで10nm, 2,100nmで10nmとなっており, この値を補間して, 最終的に1 nm間隔で計測値が示される. 視野角25度の光ファイバーを用いて, 植物群落のおよそ1m垂直上方より採光して計測した. なお, この場合の観測域は, 直径およそ45cmの円内となる. 計測は5回実施し, これらを平均した値を調査区の植物群落を代表するスペクトルとした.

(4) LAIの計測

LAIの観測は, LI-COR社製LAI-2000プラントキャノピーアナライザーを用いて間接的に計測した. 本装置は, 群落内の天空放射を7° 23° 38° 53° 68°の角度で同時に測定することによって, 非破壊でLAIを計測する. 本装置にはフィルターが内蔵されており, センサは320-490nmの入射光のみを計測に用いる⁵⁾. センサ部を群落外に配置して測定した後, 即座に群落内の透過光を測定し, これらの値を装置本体内のプログラムによって変換して, LAI, 平均葉傾斜角等の値を得る. 計測は3回実施し, これを平均して調査区を代表するLAIとした.

3. 解析の方法

(1) VIの算出とLAIの推定

VIの算出には, 最も一般的に用いられているRVI及びNDVIの単純なアルゴリズムを採用した.

$$RVI_{i,j} = \frac{R_i}{R_j} \quad (1)^6$$

$$NDVI_{i,j} = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \quad (2)^7$$

ただし, R_i , R_j は, バンド*i*及び*j*における分光反射率を示す.

RVI とNDVIは, 通常は植物が強い反射率を示す近赤外バンド及び, 植物が低い反射率を示す可視赤バンドの二つの波長帯域を組み合わせで算出される. 近赤外バンドは, 主として植物細胞の構造特性を反映し, 赤バンドは, 植物のクロロフィルによる光合成の吸収特性を反映している. 可視近赤外バンドを用いたNDVIとRVIは, 植生域と非植生域の対比を鮮明にし, 照度による影響を軽減する利点を持つ一方で, 背景土壌の影響を受け易いことが指摘されている. またNDVIは, 植生キャノピー密度が高くなり, LAIが増加すると飽和する問題があることが知られている. 課題があるとは言え, これらのVIは今日に至るまで, 最も一般的に用いられている.

観測した可視, 近赤外, 中間赤外波長帯域の350nmから2,500nmまでの1 nm間隔の2,151バンドの分光反射率を

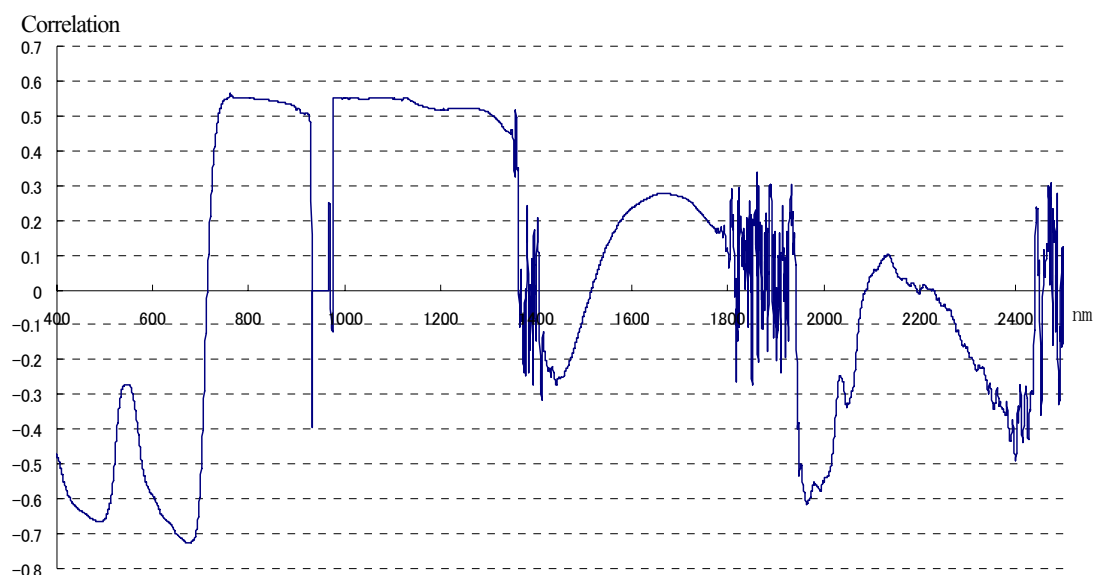


図-2 分光反射率スペクトルと LAI の相関スペクトル.

用いて、総当たりでおよそ230万通りに及ぶすべての可能な組み合わせについて、NDVI及びRVIを算出した。これらのVIとLAIの相関分析を行い、LAIに対して最も感度特性の高いVIを検索した。さらに、この最適なVIを用いて、線形一次回帰によってLAIを推定した場合の決定係数 (R^2) 及び標準誤差 (SE) を求めて精度を検証した。

(2) 植生データの解析

植生データの解析は、多変量解析の分類型の手法であるTwo-way indicator species analysis (TWINSpan)⁸⁾を用いて行った。

TWINSpanでは、調査区における植物種組成の類似性に基づいて、調査区及び植物種を複数のグループに分類し、調査区及び植物種を軸とした表を作成する。調査区は、階層的、段階的に複数のグループに分割され、これに対応して植物種も複数のグループに分類される。TWINSpanは、特に植物生態学の分野において一般的に用いられている分類型の多変量解析手法である。本研究では、TWINSpanで形成されたグループ間において、複数の有効波長帯域を組み合わせたVIによってLAIを推定し、その精度を比較した。

4. 結果と考察

(1) 植生調査の結果

68調査区において、クズ、ツルヨシ、オオブタクサ、ヨモギ、ツルマンネングサ、イタドリ等を優占種とする未同定の2種を含む28科64種の植物種が確認された。

植生高は最低25cm、最大190cmで、平均は約123cmであった。目視による植被率は最低70%、最大100%で、平均は約93%であった。調査区あたりの出現種数は、最

低3種、最高10種で、平均は約6.2種であった。

植物種組成と被度のデータを基に、TWINSpanによる分類を行った結果、TWINSpan第1段階の分類によって、調査区は高さ1m程度に生育したヨモギ、ツルヨシ及びほふく性のカキドオシを指標種とする48グループ(グループA)と、低茎のシバ、ツルマンネングサを指標種として、グループAよりもやや低い被度を呈する20グループ(グループB)に大別された。グループAの植生高の平均は約145cm、植被率は96%、グループBの植生高は約70cm、植被率は約86%であった。よって、それぞれの特徴を現すと、グループAは高茎草本が優占する密生草地、グループBは低茎草本が優占する疎生草地である。

さらに、第2段階の分類によって、グループAはつる性のクズ及びカキドオシを指標種として、本種が出現するグループと出現しないグループに二分された。一方でグループBは、外来のイネ科牧草オニウシノケグサ及び落葉低木テリハノイバラの優占度が高いグループと、シバ及びクズの優占度が高いグループに二分された。このように、観測対象地の植生は、TWINSpan第2段階までの分類によって、4つのグループに大別された。

(2) LAI観測の結果

LAI計を用いた観測によって、68調査区においてLAI値を得た。観測したLAIの最低値は0.54、最高値は8.16で、平均は約4.52、分散は4.71であった。

先に分類したTWINSpan第1段階のグループAのLAIの平均値は約5.5、グループBのLAIの平均値は2.1であった。2グループ間におけるLAIの値には、有意差が認められた(U -test, $p < 0.01$)。植物種組成によって分類されたグループ間において、グループAはグループBと比較してLAIの値が高い傾向にある。グループA及びグルー

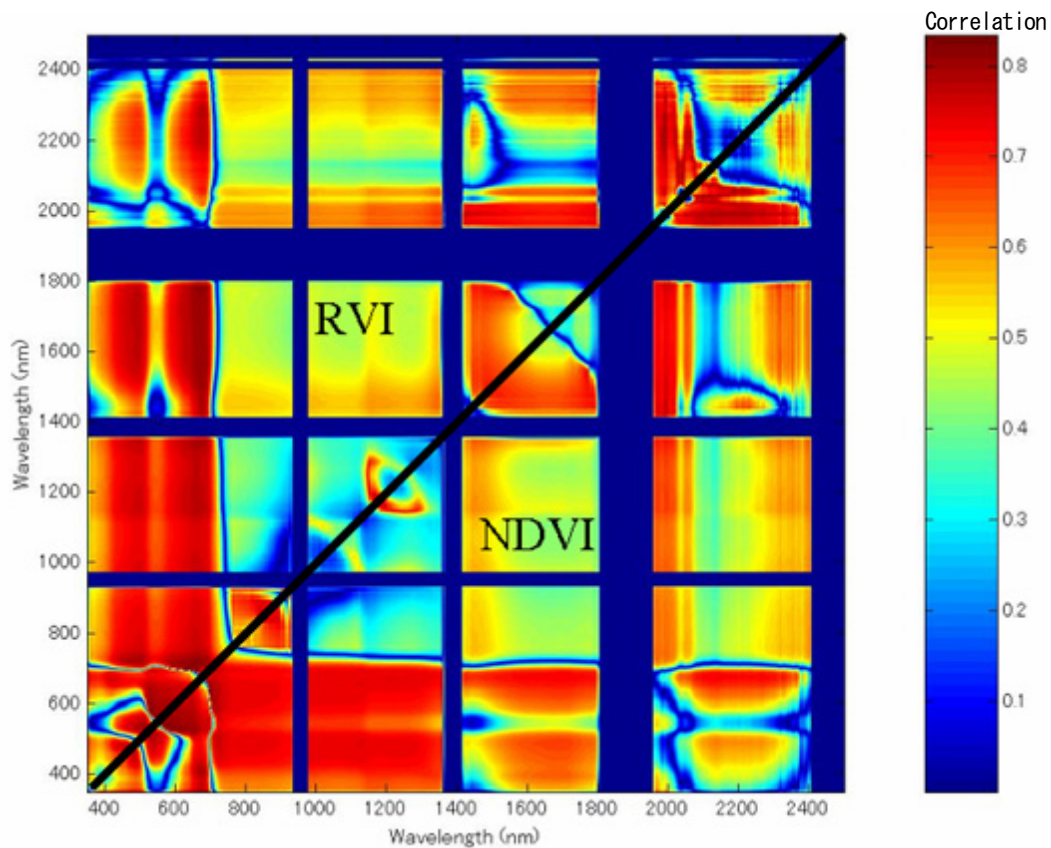


図-3 LAIに対するRVI及びNDVIの相関を示すコンタープロット（波長の交点は相関係数を示す）。

ブBそれぞれのグループ間で分類された小グループにおいても、LAIの値が異なる傾向が認められた。すなわち、河道内植生の草本群落において、植物群落を形成する植物種の組成やその出現の程度を示す被度に対応して、LAIの値も変化していた。

(3) LAIに対する分光反射スペクトルの感度特性

68調査区を対象としたスペクトロメータを用いた観測によって、350～2,500nmを波長帯域とする分光反射率スペクトルを得た。LAIに対する分光反射率スペクトルについて相関分析を行い、この結果を相関スペクトルとして図-2に示した。なお、1,000nm、1,900nm及び2,500nm付近は極端に相関が低くなっているが、これらは大気中の水分による吸収や、スペクトロメータの検出器の移行帯や終端におけるノイズによるもので、これらの波長帯域においては、有効な情報を持っていない。

分光反射率とLAIの相関係数は、無相関であることを示す0を最低として、673nmにおける-0.73及び、761nmにおける0.56を極値とし、この値の範囲で変動した。可視域(400～700nm)、近赤外域(700nm～1,300nm)、中間赤外域(1,300nm～2,500nm)の順に、LAIに対するスペクトルの感度特性を述べる。

a) 可視域(400～700nm)における感度特性

可視域におけるLAIに対して感度特性の高い波長帯域

は、植物色素の吸収ピークに対応して487nm($r=-0.67$)と673nm($r=-0.73$)に特徴的な2つのピークが見られた。673nmにおける相関係数は、すべての波長帯域を通じて負の極値を示していた。

673nmは、クロロフィルaによる吸収ピークに相当する波長帯域であった。この波長帯付近のLAIに対する感度特性は、全波長帯域を通じて最も高かった。

487nmは、植物色素すなわち、クロロフィルb、 β -カロチン、 α -カロチン及びキサントフィル等の吸収ピークに相当していた。

b) 近赤外域(700nm～1,300nm)における感度特性

近赤外域においては、760～1,300nmの波長帯域において、スペクトロメータの検波器の移行部を除き、全波長帯域を通じて最も高い、およそ0.5のほぼ一定した正の相関を示した。さらに、761nm($r=0.56$)において、正の相関係数では極値となる小さなピークを特異値として示した。760～1,300nmのほぼ一定した正の相関は、葉の細胞構造が支配的な要因となって、近赤外域で高い反射率を示す⁹⁾ことによるものと考えられる。761nmにおいて、LAIに対して感度特性の高い鋭い正の小さなピークが示されたのは、同様に葉の細胞構造によるものと推察されるが、既存資料からは明確な記述が見られなかった。

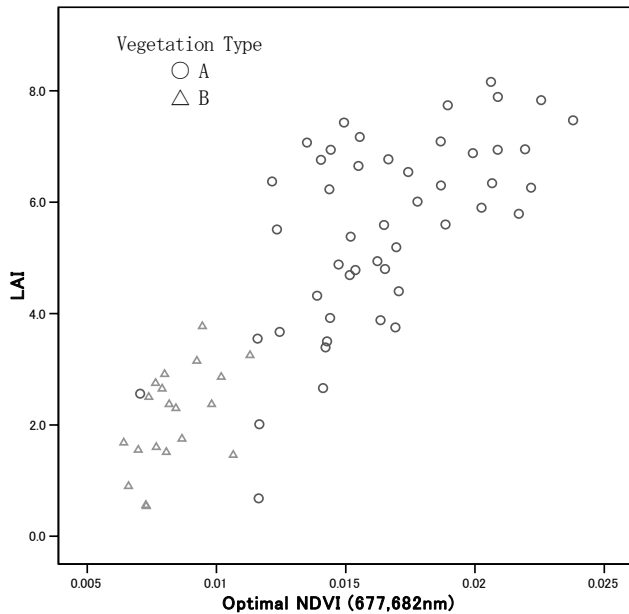


図-4 植生タイプ別に示した最適なバンド (677,682nm) 組み合わせによる NDVI と LAI の関係.

c) 中間赤外域 (1,300nm~2,500nm) における感度特性

中間赤外域においては, 1,628nm ($r = 0.28$) に1つのおだやかな正のピーク, 1,965nm ($r = -0.62$) 及び 2,401nm ($r = -0.49$) に2つの鋭い負のピークが見られた.

1,628nmのおだやかな正のピークは, 中間赤外域における水の強い吸収極大である1,450nmおよび1,940nmの中間に位置し, 細胞構造等の特性を反映したものと考えられる.

1,965nmの鋭い負のピークは, 水の吸収が極大を示す1,940nm付近に位置している. その他, この波長帯付近は, リグニン, 蛋白, 糖やでんぷん等の有機物のOH結合による吸収ピークも存在する. 従って, 葉に含まれる水分や有機物量を反映したものと考えられる.

2,401nmの鋭い負のピークは, セルロース, リグニン, 蛋白等の有機物量を反映したものと推察されるが, スペクトロメータのS/N比が低下しており, はっきりとした特定は難しい.

(4) LAIに対するVIの感度特性

350-2,500nmの分光反射率を用いて, 2組のバンドすべての組み合わせでRVI及びNDVIを計算し, それぞれの値とLAIの相関係数の絶対値を求めたコンタープロットとして図-3に示した. 図の縦軸, 横軸は, それぞれ植生指数を算出するにあたって用いた波長帯を示しており, 双方の値の交点に, LAIとのVIの相関係数の絶対値が示されている. 対角線を境界線として, 左上にRVI, 右下にNDVIのアルゴリズムを用いて算出した値を示した. なお, 対角線に近い位置に示された値は, 隣接する2波長を用いたVIとLAIの相関係数を示しており, これらは

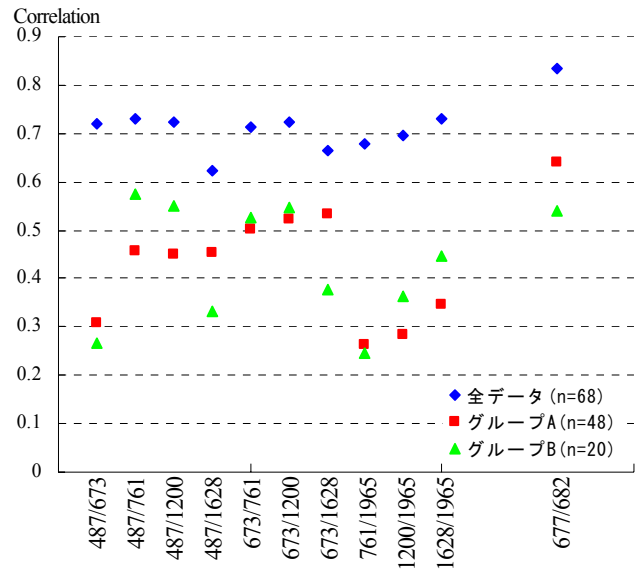


図-5 有効波長帯域を組み合わせた VI による LAI 推定値と LAI の植生タイプ別の相関係数. (数字は波長を示す. 右端に最適な VI を示した.)

スペクトルの微分値に相当する特性を示している. それ以外の次元に示された値の高い領域は, 離散した2波長を用いたVIとLAIの相関係数を示す.

RVIとNDVIでは, LAIに対して感度特性の高いバンドの組み合わせが出現した領域は似通っていた. すべての組み合わせを通じて, RVIとLAIの相関係数が最も高かったのは, いずれも可視域の赤バンドの吸収ピーク付近の隣接した677nmと682nmの組み合わせによるVIであり, このときの相関係数は0.83であった. ただし, NDVIの方がRVIより値がわずかに高かった. 極値を示した波長帯は, LAIに対して分光反射スペクトルの相関が極値を示した673nmとほぼ一致していた. この波長帯は, クロロフィルaの吸収極大付近の赤バンドに出現するものであり, バンドの組み合わせを総当たりさせて求めたVIを用いた場合においても, LAIに対する感度が最も高い特徴波長帯であることが示された.

(5) 最適なVIを用いたLAIの推定

図-4に最適な結果が得られた赤バンド付近の677nmと682nmの隣接した波長帯の組み合わせで算出したNDVIとLAIの関係を示した. この図から, 一般的に用いられている可視近赤外のバンド組み合わせによるNDVIを用いた場合に発生する, LAI推定の飽和問題が発生していないことが分かる. また, LAIの全値域に渡って, 比較的線形な関係が保持されていた. 最適な組み合わせによるNDVIを説明変数とする線形回帰モデルを当てはめたところ, 決定係数は $R^2 = 0.70$, 推定値の標準誤差は1.2を示した. なお, RVIの場合も決定係数の値はほぼ等しかった.

このように、感度特性が最も高い隣接波長のバンド組み合わせを検索すれば、単純な線形回帰によって、比較的高い精度でLAIを推定することが可能である。これらの知見は、LAIの値域幅や植被率の分散が大きい河道内植生を観測する手段として、波長分解能が高いハイパースペクトルリモートセンシングの観測手段が有効であることを示唆している。

データセットを植生タイプ別に分割し、LAIに対するVIの感度特性が植物の種組成や構造を表す植生タイプによって受ける影響を検査した結果を図-5に示した。ここから、LAIに対するVIの感度特性は植生タイプによって影響を受けており、その程度はVIの算出に用いたバンドの組み合わせによって異なることがわかる。ただし、本研究で最適なバンド組み合わせとして選択された、677nmと682nmを用いたVIは、植生タイプの違いによる影響が相対的に少なく、LAIに対する感度特性は比較的安定していることが認められた。

5. 結論

筆者らの研究によって、分光反射率の計測によって得られたスペクトルには、河道内植生のLAIに対して感度特性を持つ特徴波長帯が、可視近赤外及び中間赤外波長帯域において、複数存在することが明らかになっている。これらは、葉に含まれる植物色素、細胞構造、水分、有機物量に関係する吸収ピークと対応関係があるものと推察された。すなわち、LAIと相関関係にあるこれらの感度特性によって、LAIが推定可能になっていると考えられる。LAIに対して最も感度の高い波長帯域は、可視域赤バンドの680nm付近に見られ、既往研究による知見から、クロロフィルaによる吸収ピークに相当するものと推察された。特徴波長帯域を用いた最適なバンド組み合わせによるNDVIとLAIの相関係数は0.83を示した。最適なバンド組み合わせによるNDVIとLAIの間には比較的線形な関係が成立し、直線単回帰モデルによってLAIを推定することができ、この時の決定係数は0.70を示した。

一般的に用いられている可視赤バンド及び近赤外の2バンドを組み合わせで算出したNDVIを用いたLAIの推定法では、LAIがおよそ4を超えると飽和問題が発生し、推定能が低下する問題が指摘されていたが、最適なバンド組み合わせによって求めたVIとLAIは、LAIのすべての値域に渡って比較的線形な関係が保持され、飽和問題による影響は見られなかった。ただし、特徴波長帯を組み合わせたVIによるLAIの推定精度は、植生タイプによって影響を受けていた。しかし、赤バンドの680nm付近を用いた最適なバンド組み合わせによるNDVIは、植生タイプや植被率、種組成や植被率の影響を受けにくく、相対的に安定性が高いことが認められた。

以上の結果から、多様な植物種が混生し、複雑な形態を示す河道内植生におけるLAIを観測する手段として、波長分解能が高いハイパースペクトルリモートセンシングの手法が有効であることが示された。植物種組成及びそれに伴う形態的特性を考慮した上で、ハイパースペクトルデータを用いて、LAIに対する感度が高いVIを検索することによって、河道内植生のLAIの推定精度を高めることができると言える。さらに、植生タイプや植生構造、環境条件の多様な河道内植生を対象とする場合には、クロロフィルaに相当する赤バンドの680nm付近の有効波長帯の利用が、LAI推定に最も効果的である。

謝辞：東京大学小池研究室（藤井秀幸氏）、国立環境研究所社会環境システム研究領域（現京都大学教授、田村正行博士）には、スペクトロメータを貸していただいた。虫明研究室（小池雅洋氏）には、LAI計を貸していただいた。一澤麻子博士、東京大学生産技術研究所安岡・柴崎研究室の学生諸氏には、フィールド調査をお手伝いいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Chen, J.M., and Black, T.A. : Defining leaf area index for nonflat leaves. *Plant Cell Environment* 13, 2565-2581, 1992.
- 2) 高橋俊守、一澤麻子、安岡善文：河川生態系の植生を対象とした植生指数による葉面積指数推定の可能性、平成14年度日本写真測量学会秋学術講演論文集、pp.151-154 2002.
- 3) Takahashi, T and Yasuoka, Y : Remote sensing of riparian leaf area index based on vegetation index approach using hyperspectral data, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.XXXIV, Part 7/W14, International Workshop on Monitoring and Modeling of Global Environmental Change, E-1: pp.1-6, 2003.
- 4) Braun-Blanquet, J. : *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde*. 3.Auflage. Springer, Wien. 1964.
- 5) Li-COR inc. : LAI-2000 plant canopy analyzer instruction manual..
- 6) Pearson, R.L. and Miller, L.D. : Remote mapping of standing crop biomass for estimation of productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, pp. 1355-1379, 1972.
- 7) Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. : Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I: pp.309-317, 1973.
- 8) Hill, M.O. : TWINSPAN - a FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. Ithaca, New York, Cornell University. 1979.
- 9) Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C. and Weidner, V.R. : Spectral properties of plants. *Applied Optics* 4, 11-20, 1965.

(2005. 9. 30受付)