

6-7

分光反射と温度情報を用いた 植生リモートセンシング

東京大学大学院農学生命科学研究科 内藤 裕貴、清水 庸、大政 謙次

植生リモートセンシングとは？

植生とは、ある対象とする地域に生育している植物の総称である。砂漠や氷河といった極端な気候条件下を除いて、地球上の陸地は、植生によりその表面が覆われている。植生リモートセンシングとは、植生を非接触・非破壊で計測し、植生の分布や量、機能に関する情報を得ることである¹²⁾。たとえば、植生の分布の変化から、植生の遷移や、気候変動が植生に及ぼす影響、砂漠化の進行程度を評価できる。また、植生の機能を調べることで、全球気候モデルの計算に必要な大気中の二酸化炭素の吸収量や、大気汚染ガスの取込み量の評価も行うことができる。

本稿では、植生リモートセンシングで広く用いられている、分光反射特性を用いた手法と温度情報を用いた手法について解説し、それぞれについて代表的な指標をいくつか示す。最後に、2つの手法を組み合わせた事例として、植生の優占種ごとに植生量と蒸発散量の比較を行った研究について紹介する。

分光反射特性を用いた 植生リモートセンシング

1. 植生と土壌の分光反射特性

物体に光が入射すると、入射光の一部が透過光や反射光となり、残りが物体に吸収される。入射光のエネルギーに対する、反射光エネルギーの比を、反射率とよぶ。反射光エネルギーは入射光エネルギーを超えることはないため、反射率は0～1までの値をとり、無次元量である。光の波長ごとの物体の反射率を分光反射

率とよぶ。物体によって、それぞれ特徴的な分光反射率を持つため、リモートセンシングではこの分光反射特性を利用して、物体を計測することが可能となる。

植生の地上部は、おもに植物葉、枝、幹から構成されるが、植生の分光反射率に大きな影響を与えるのは、植物葉である。植物葉の分光反射率は、

- ①可視域(400nm～700nm)で反射率が小さい
 - ②近赤外域のうち、800nm～1,300nmでは反射率が大きく、水の吸収により部分的に反射率が小さくなる(たとえば、1,450nm、1,950nm)
- という性質がある(図1)。

可視域で分光反射率が小さいのは、おもに植物色素による吸収のためである。植物葉は光合成を行い、光の物理エネルギーを有機物の化学エネルギーに変換する。その際、すべての波長の光を使用するわけではなく、光合成に有効である400nm～700nmの波長(可視域)の光を吸収し使用する。したがって、400nm～700nmの可視域において、植物葉の反射率は小さくなる。とくに、主要な植物色素であるクロロフィルは、吸収帯である青色光(450nm付近)と赤色光(680nm付近)の波長の光を吸収するため、2つの波長に挟まれる緑色光(550nm付近)では、反射率が少しだけ大きくなる。

近赤外域の800nm～1,300nmでは、葉内でほとんど光が吸収されないため、反射率は可視域と比べて大きくなる。しかし、1,300nm以上の近赤外域では、複数の波長帯で反射率が小さくなる。これは、おもに葉内の水分が光を吸収するためである。たとえば、1,450nm、1,950nm付近に大きな水の吸収帯がある。

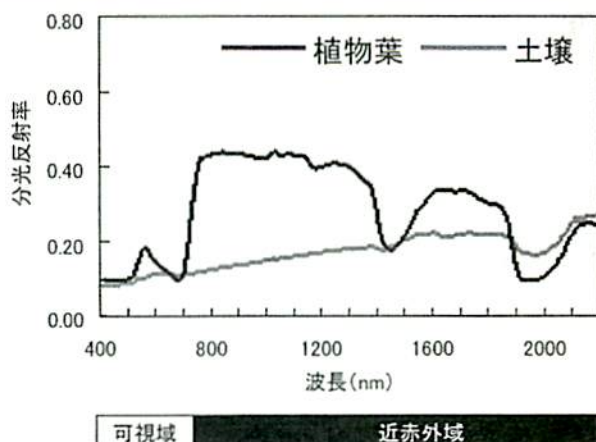


図1 波長400nm～2,200nmにおける植物葉と土壌の分光反射率の変化

また、1,200nmあたりにもわずかではあるが水の吸収帯が存在する(図1)。植物に含まれる水分量に応じて、これらの波長における反射率は変化(乾燥すると反射率は上昇)する。しかし、注意しないとけないのは、葉の含水量がほとんど変化しなくても、葉の表層のわずかな含水率の変化で、葉内の細胞間隙での光の乱反射の状態が変化する。この場合は水の吸収帯に関係なく全波長域で反射率が大きくなる傾向がある。

水のほかにも、タンパク質(1,510nm、2,180nm)、油脂(2,310nm)、リグニン(1,690nm)、セルロース(1,780nm)の吸収帯も近赤外域には存在するが³⁾、水と比較して吸収量が小さいため、水や他の成分の影響を受け、吸収帯の変化からこれらの成分を直接推定できるとは限らない。多量に存在する成分との相関が大きい場合には、間接的に推定できることがあるが、計測には注意が必要である。葉の反射率は、これ以外に葉毛やクチクラの状態などで変化する。また、光源の方向によっても変化する(方向性反射率)。

土壌の分光反射特性については、水分量、有機物含有量、酸化鉄含有量、土性、表面粗さ、などの違いの影響を大きく受ける。可視域と近赤外域での土壌の反射率は、波長が長くなるに従って反射率がゆるやかに大きくなる傾向があるが、植生のような急激な反射率の変化はない(図1)。土壌表層でのわずかな水分状態の変化が、表層の土壌間隙での光の乱反射の状態を変化させ、結果的に水の吸収帯に関係なく全波長域で反射率が大きくなる傾向を持つことは、植物の場合と同じである。

2. 分光反射率を用いた指標

植生の状態を評価するために、さまざまな指標が用いられる^{2,4,5)}。ここでは、多くの研究で用いられている指標のうち、代表的なものを紹介する。

(1) 可視・近赤外域反射率を用いた植生指標

実際の植生リモートセンシングでは、単位面積(単位画素)で植生と土壌が混在する状態(ミクセル)が問題となる。植生被覆率(植生の被覆が占める比率)や葉面積指数(単位面積あたりの葉の片側総面積の割合)が大きい場合、対象エリアは植生で覆われるため、反射率は植生(植物葉)の分光反射特性に近くなる(可視域と近赤外域の反射率の差が大きい)。一方、植生被覆率や葉面積指数が小さくなると、背景にある土壌が露出するために、反射率は土壌の分光反射特性に近づく(可視域と近赤外域の反射率の差が小さい)。植生指標は、これら植生と土壌の分光反射特性の違いを基に、植生の量が多くなると、値が大きくなるように設計されている。また植生指標から、植生量と関係のある、光合成有効放射吸収率(FPAR)や純一次生産量(NPP)といった、植生による機能も推定することができる⁶⁾。

・比植生指標(Simple Ratio:SRまたはRatio Vegetation Index:RVI)

SRは近赤外域と可視域における地表面反射率を比で示したものである⁷⁾。

$$SR = \frac{NIR}{VIS} \quad (式1)$$

ここで、*NIR*は近赤外域(Near infrared)の反射率を示し、*VIS*は可視域(Visible)の反射率を示す。可視域を分光している場合、クロロフィルの吸収帯である赤色光の反射率(*Red*)が多く用いられる。

・正規化植生指標(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)

SRのままでは0から∞までの値をとり、あまり実用的ではない。そこで、近赤外域と可視域の反射率の差を、2つの反射率の和で除算することで、-1から+1までの値に正規化したNDVIが提案されている⁷⁾。

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (式2)$$

NDVIは、計算式が単純で理解しやすく、比をとることにより大気効果や地形効果の補正が期待できるため、植生リモートセンシングに広く利用されている。可視域の反射率として、赤色光の反射率(*Red*)が用いられることが多いが、高密度の植生に対する感度が高い緑色光の反射率(*Green*)を用いたGreen NDVIも提案されている⁸⁾。

・垂直植生指標(Perpendicular Vegetation Index: PVI)

PVIは土壤線(Soil line)への垂線の長さで計算される指標である⁹⁾。土壤線とは、赤色光の反射率(*Red*)と近赤外域反射率(*NIR*)の特徴空間において、さまざまな土壤の種類や土壤の湿り具合の異なるサンプルが示すプロットを回帰して得られる直線であり、傾きがほぼ1の直線である。

$$PVI = \frac{NIR - aRed - b}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (式3)$$

a、*b*は、それぞれ土壤線の傾き、切片である。PVIの等値線は土壤線と平行であり、植生の密度が大きくなると土壤線から離れる方向に移動する。

・土壤調整植生指標(Soil Adjusted Vegetation Index: SAVI)

植生の密度が小さい場合、センサで取得する情報には、植生以外にも植生の背景となる土壤の情報が入り込んでしまう。この場合、植生指標の値は背景の土壤

の状態に大きな影響を受ける。SAVIは、NDVIを修正し、土壤の影響を小さくするために工夫した植生指標である¹⁰⁾。

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L}(1 + L) \quad (式4)$$

*L*は、土壤の影響を除去する補正項であり、近赤外域および赤色域で植物群落を透過する放射の差を補正している。*L*の値は植生被覆率に応じて設定する値であり、高植生率の場合は*L*=0、低植生率の場合は*L*=1に近い値をとる。

SAVIにはさまざまな改良型が提案されており、SAVIの*L*項を繰り返し計算で最適化することにより得られるMSAVI(Modified SAVI)¹¹⁾や、土壤線を基に補正係数を決定するTSAVI(Transformed SAVI)¹²⁾、植物群落内の放射伝達モデルを用いて補正係数を最適化するOSAVI(Optimized SAVI)¹³⁾などがある。

・拡張植生指標(Enhanced Vegetation Index: EVI)

EVIは赤色光の反射率と近赤外域反射率に加えて、青色光の反射率(*Blue*)も用いることで、大気中のエアロゾルと土壤の影響を除去するよう設計されている¹⁴⁾。

$$EVI = G \times \frac{NIR - Red}{NIR + C_1 \times Red - C_2 \times Blue + L} \quad (式5)$$

ここで*L*はSAVI同様、土壤の影響を除去する補正項であり、*C*₁、*C*₂は青色光の反射率を用いて赤色光の反射率におけるエアロゾルの影響を補正する係数である。*G*はゲイン(scale factor)であり、EVIの値域を調整するパラメータである。MODIS(中分解能撮像分光放射計)センサにより取得されたデータの場合、*L*=1、*C*₁=6、*C*₂=7.5、*G*=2.5が採用されている¹⁴⁾。EVIは大気の影響を受けにくく、高密度の植生に対する感度が高いと言われている。

(2) 近赤外域反射率を用いた水分指標

近赤外域では、水の吸収帯がいくつか存在する。これらの波長帯を用いて、植生における水分量(湿潤・乾燥状態)を評価する指標が提案されている。式のかたちはNDVIと同じであり、NDVIにおける可視域の反射率の代わりに、NDII(Normalized Difference Infrared Index、正規化赤外線指標)¹⁵⁾は1.550 ~ 1.750 nmの反

射率を使用し、NDWI(Normalized Difference Water Index、正規化水指標)¹⁶⁾では、1.240nm付近の反射率を使用している。

温度情報を用いた 植生リモートセンシング

1. 植生の温度と蒸散の関係

熱赤外リモートセンシングでは、熱赤外放射計などを用いて、植生の表面温度情報を計測し、目では見えない蒸散機能を推定することができる^{17,18)}。植物は光合成を行うとき、気孔を開孔して二酸化炭素を吸収するが、同時に水分を空气中に放出する。この現象を蒸散と言うが、植物は水分欠損時や何らかのストレスを受けている場合、気孔を閉じてしまうため、植物から大気への蒸散速度が低下し、植物(キヤノピー・葉)の温度が上昇する¹⁷⁾。そのため、植生の温度上昇を計測することで、蒸散速度の低下を伴う植物の気孔閉口を検知することができる。Omasaらの研究^{19,20)}では、植物の葉面における熱収支式を解いて、葉温分布から気孔抵抗、蒸散速度そして汚染ガスの吸収量などの葉面分布を定量的に求めている。それらの応用例として、地上やヘリコプターから取得した温度の画像情報を使って、比較的熱環境が一定の条件下で、街路樹や都市近郊の森林を対象とした植生のストレス診断を行っている^{21,22)}。

2. 温度情報を用いた指標

・作物水ストレス指標(Crop Water Stress Index : CWSI)

CWSIは、Jacksonら²³⁾によって、圃場における農作物の水ストレス診断のために提案された指標である。CWSIの導出において中心となる考え方は、式6に示すとおり、可能(最大の)蒸発散速度 E_{rp} に対する実際の蒸発散速度 E_r の比である。

$$CWSI = 1 - \frac{\lambda E_r}{\lambda E_{rp}} = \frac{(T_s - T_a) - (T_s - T_a)_{min}}{(T_s - T_a)_{max} - (T_s - T_a)_{min}} \quad (式6)$$

このとき、 λ は水の蒸発潜熱、 E_{rp} は可能蒸発散速度、 E_r は実際の蒸発散速度である。水ストレスを受けた植生は、蒸散速度が低下するため、CWSIの値は1に近づくことになる。この指標は可能蒸発散速度と比較することによって、実際の蒸発散の程度を相対値として表現している。また、蒸発散速度の比は地表面のエネルギー収支式から、「植生(地表面)の温度 T_s 」と「大気(大気)の温度

T_a 」の差 $T_s - T_a$ を変数とした式に置き換えることができる(式6)。下添え字のmaxとminはそれぞれ、 $T_s - T_a$ の最大値と最小値を示す。

・水分欠損指標(Water Deficit Index : WDI)

CWSIの導出では、植生が地面をすべて覆っている(背景の土壌が見えない)ことを前提条件としている。WDI²⁴⁾は、植生指標(SAVI)を利用して、土壌が見える状態において取得された地表面温度でも、植物の蒸発散速度を評価できるように、CWSIの考え方を拡張したものである。図2に、横軸を植生被覆率(植生の被覆が占める比率)、縦軸を地表面温度から気温を差し引いた値($T_s - T_a$)と設定した場合に描かれる台形状のかたちを示す。台形の各頂点P、Q、V、Wは、それぞれ、「十分に灌水された植物」「水ストレスのかかった植物」「十分に灌水された土壌」、そして「乾燥した土壌」を示している。CWSIは、地表面温度の測定時に土壌が見えていないとき、すなわち、横軸の植生被覆率が1.0のときのみを対象としている。P点における $T_s - T_a$ の値は可能蒸発散速度を示すときの値であるため、 $T_s - T_a$ の最小値を示し、反対にQ点では $T_s - T_a$ の最大値を示す。 $T_s - T_a$ の観測値がR点のとき、R点のCWSIは次のように示すことができる。

$$CWSI = 1 - \frac{RQ}{PQ} = \frac{PR}{PQ} \quad (式7)$$

RQ、PQ、PRは各線分の長さを示す

WDIは、ある植物の量の下で、可能蒸発散速度に対する実際の蒸発散速度を比較することから、植生被覆率が1.0未満でも適用可能である。図2のC点は、植生被覆率が0.4のときを例として示し、C点におけるWDIは次のように示すことができる。

$$WDI = 1 - \frac{CB}{AB} = \frac{AC}{AB} \quad (式8)$$

CB、AB、ACは各線分の長さを示す

なお、図中の各頂点P、Q、V、Wの4点は、純放射量や水蒸気輸送に関する空気力学的抵抗、風速など、圃場における多くの観測データを使用して算出することになる。また線分VPと線分WQは、植生被覆率を変数とする一次式によって、それぞれ算出可能であるため、C点におけるWDI算出に必要な点Aと点Bはそれ

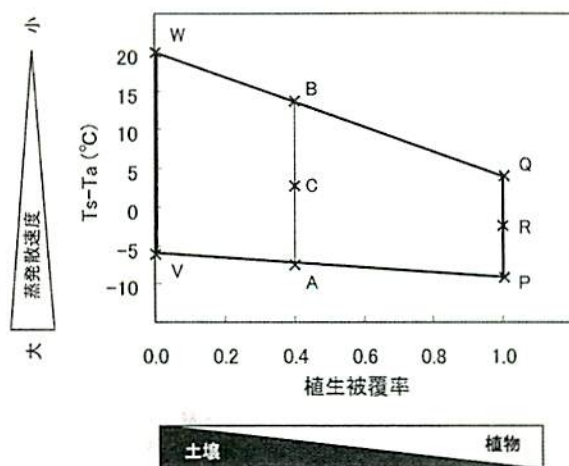


図2 温度情報 (Ts-Ta) と植生被覆率の関連性¹⁸⁾

らの一次式から求めることができる。

・温度・植生乾燥指標 (Temperature-Vegetation Dryness Index : TVDI/iTVDI)

衛星リモートセンシングデータを利用し、山岳地など、広域における植生や土壌の水分状態のモニタリングを行う場合、図2の4つの頂点(P、Q、V、W)を求めるために必要となる多くの観測データを正確に求めることは難しい。TVDI (Temperature-Vegetation Dryness Index)²⁵⁾や、iTVDI (improved Temperature-Vegetation Dryness Index)²⁶⁾はWDIの考え方を利用し、リモートセンシングでの実利用を考慮した指標である。iTVDIの場合、具体的には、1) 対象地域にてリモートセンシングにより取得された地表面温度 (T_s) と植生指標 (NDVI) の2つの画像データと、2) 対象地域内の気象観測所において記録された気温データを空間補間・標高補正することによって作成した気温 (T_a) の画像データを使い、図2のように、 T_s ・ T_a を縦軸に、植生被覆率 (NDVI) を横軸に設定し、画像データの各ピクセルをサンプルとして散布図を描く。そして図2における4つの頂点P、Q、V、Wを、多くの観測データを使って算出する代わりに、散布図の外縁部の点群から、線分VPと線分WQの代理となる2つの直線を推定することによって、各植生被覆率のもとでのiTVDIを算出している。なお、TVDIの場合、気温 (T_a) の画像データを使用しておらず、温度の情報は地表面温度 (T_s) のみである。したがって、標高差の大きい地域など、対象地域内に気温の差がある場合には正しい推定はできず、適用可能な対象地域の範囲は限定される。

TVDIやiTVDIを植生リモートセンシングに適用した事例として、Ishimuraら²⁷⁾がMODISデータ (可視～近赤外域の反射率データと地表面温度データ) を使用してiTVDI画像を作成し、丹沢山地におけるブナ林の衰退状況のモニタリングを行っている。

植生の優占種による 植生量・蒸発散量の違い

可視・近赤外域の分光反射率を用いた指標は、植生量 (植生被覆率や単位面積あたりの植物葉) や水分量を評価する一方で、温度情報を用いた指標では、目では見えない植生の蒸散機能を推定できる、という特徴がある。実際の植生を考えた場合、植生量と蒸散機能は、その植生の優占種が持つ性質に影響を受けていると考えられる。これまでの研究では、山岳地域の多様な植生の優占種を対象として、それらの違いを解析した例は少ない。そこで、筆者らは、植生量の指標であるNDVIと蒸発散量の指標であるiTVDIを用いて、植生の優占種に違いがあるかを検討した²⁸⁾。

解析地域に北海道摩周湖周辺を選択し、衛星データは、2006年夏季に取得されたLandsat TM画像を使用した。研究の流れとしては、まず衛星画像 (Landsat TM) の各バンドを大気補正・反射率変換処理し、反射率画像 (NIR, Red)、地表面温度画像 (T_s) を作成した。次に、対象地域内に分布する数点のAMeDAS気温データを空間補間し、気温画像 (T_a) を推定した。さらに T_a は Digital Elevation Model データ (標高の画像データ) により標高補正を行った。これらから、NDVI画像、 T_s ・ T_a 画

像を作成し最終的にiTVDI画像を作成した(図3)。

作成したNDVI画像、iTVDI画像を基に、植生図(環境省第7回自然環境保全基礎調査植生調査の成果)を用いて優占種ごとのNDVIとiTVDIの平均値を比較した(図4)。誤差バーは標準誤差を示し、異なる添字はTukey-KramerのHSD法での有意差(有意水準5%)を示している。植生量を表すNDVIについては、優占種値に差はあるが、とくに「低木・草本」と「高木」との間に、大きな差が見られ、高木の植生量が大きいことが

わかる。一方の蒸発散量の指標であるiTVDIについては、

- ①植生区分(低木、草本、高木、等)の間でiTVDIの値に有意差がある
- ②高山低木群落(コケモモ・ハイマツ)・草本群落(ササ)、ダケカンバ群落、その他高木群落の順でiTVDIは減少傾向(蒸発散が増加傾向)
- ③畦畔林(ハルニレ群落)では利用可能な水が多いため、iTVDIが低い(蒸発散が多い)

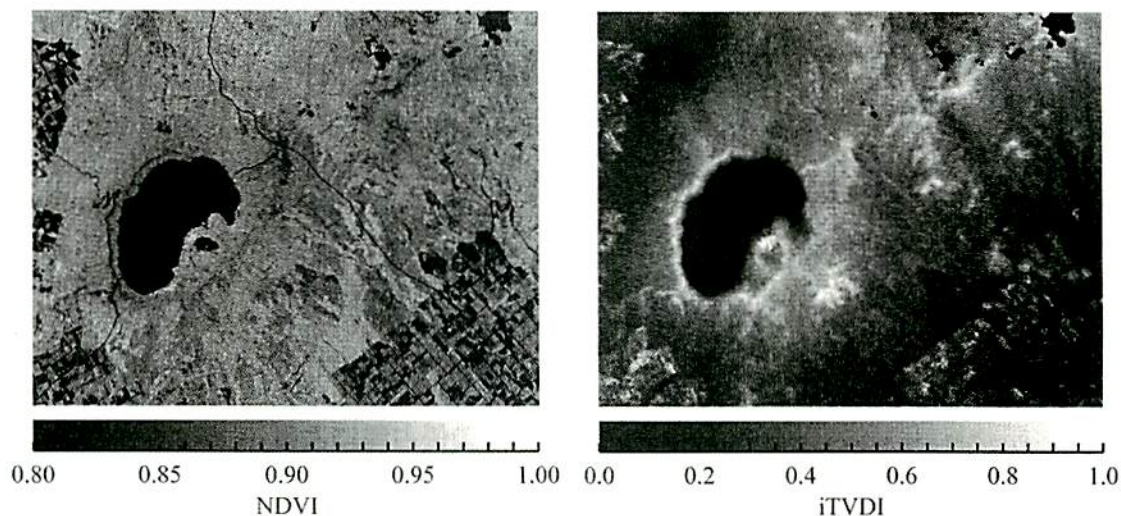


図3 NDVI画像(左)とiTVDI画像(右)²⁸⁾

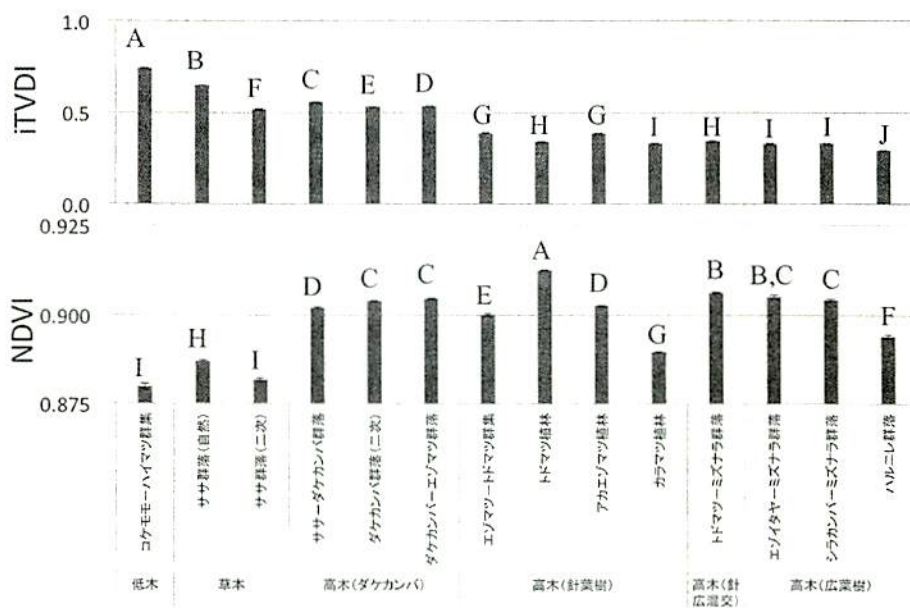


図4 植生の優占種ごとのNDVI・iTVDIの平均値²⁸⁾

といった結果を得ており、iTVDIが植生の優占種による蒸発散量の相対的な違いを反映していることを示している。今後、温度情報を用いて植生の蒸散機能低下を検出するためには、これらの優占種に由来する蒸散特性の違いを考慮しなければならない。

まとめ

植生を対象として、植生リモートセンシングで広く用いられている分光反射特性や温度情報を用いた指標を説明するとともに、植生リモートセンシングの事例として、植生の優占種の植生量・蒸発散を比較した研究について紹介した。植生のモニタリングが重要性を増すなかで、植生の量や分布に加えて、蒸散のような生理機能を推定することで、より詳細に植生の機能を評価することができる。そのためにも植生の性質を十分理解し、必要に応じて適切なデータを利用することが、植生リモートセンシングを行う上で重要である。

【参考文献】

- 1) Hobbs R J and Mooney H A (著), 大政謙次ら(監訳): 生物圏機能のリモートセンシング, Springer, 1993.
- 2) Jones H G and Vaughan R A : Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications, Oxford University Press, 2010.
- 3) Curran P J : Remote Sens. Environ., 30 (3) : 271-278, 1989.
- 4) 大政謙次ら : 農業・環境分野における先端的画像情報利用—ファイトイメージングからリモートセンシングまで—, 農業電化協会, pp.10-11, 2007.
- 5) 清水庸ら : 農業・環境分野における先端的画像情報利用—ファイトイメージングからリモートセンシングまで—, 農業電化協会, pp.115-125, 2007.
- 6) 恒川篤史 : 緑地環境のモニタリングと評価, 朝倉書店, pp.121-134, 2005.
- 7) Rouse J W, et al. : Proceedings of the 3rd ERTS Symposium, 309-317, 1973.
- 8) Gitelson A A, et al. : Remote Sens. Environ., 58 (3) : 289-298, 1996.
- 9) Richardson A J and Wiegand C L : Photogramm. Eng. Remote Sens., 43 (12) : 1541-1552, 1977.
- 10) Huete A.R., et al. : Remote Sens. Environ., 25 (3) : 295-309, 1988.
- 11) Qi J, et al. : Remote Sens. Environ., 48 (2) : 119-126, 1994.
- 12) Baret F and Guyot G : Remote Sens. Environ., 35 (2-3) : 161-173, 1991.
- 13) Rondeaux G., et al. : Remote Sens. Environ., 55 (2) : 95-107, 1996.
- 14) Huete A R, et al. : Remote Sens. Environ., 83 (1-2) : 195-213, 2002.
- 15) Hardisky M A, et al. : Photogramm. Eng. Remote Sens., 49: 77-83, 1983.
- 16) Gao B : Remote Sens. Environ., 58 (3) : 257-266, 1996.
- 17) 大政謙次ら : 植物の計測と診断, pp.155-192, 1988.
- 18) 清水庸ら : 遺伝, 65 (2) : 65-70, 2011.
- 19) Omasa K, et al. : Environ. Control Biol., 19 (3) : 85-92, 1981.
- 20) 大政謙次ら : 計測自動制御学会論文集, 17 (6) : 657-663, 1981.
- 21) 大政謙次ら : 農業気象, 45 (4) : 271-275, 1990.
- 22) 大政謙次ら : 生物環境調節, 31 (3) : 161-168, 1993.
- 23) Jackson R D, et al. : Water Resour. Res., 17 (4) : 1133-1138, 1981.
- 24) Moran M S, et al. : Remote Sens. Environ., 49 (3) : 246-263, 1994.
- 25) Sandholt I, et al. : Remote Sens. Environ., 79 (2-3) : 213-224, 2002.
- 26) Rahimzadeh P B, et al. : ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 68 (1) : 1-12, 2012.
- 27) Ishimura A, et al. : iForest, 4: 195-199, 2011.
- 28) Naito H, et al. : Environ. Control Biol., 50 (2) : 163-171, 2012.