分光反射特性を用いた植生の活力度と緑被率の評価に関する基礎的研究

野々村敦子¹⁾・増田拓朗¹⁾

1) 香川大学工学部 Fac. of Engineering, Kagawa Univ.
nonomura@eng.kagawa-u.ac.jp

摘要：緑地環境の評価にリモートセンシングデータが広く用いられており、植生の活力度を評価する代表的な指標の一つに、赤色域と近赤外域の分光反射率から求めるNDVI（正規化植生指数）がある。NDVIの有用性は、これまでに行われてきた多数の研究成果から明らかにされているが、一方で、NDVIは緑被率や植生の活力度など複数の要因によって決定されるため、NDVIを単独で用いた場合、各要因を個別に評価することができないという問題点がある。そこで本研究では、植生の活力度と緑被率両方の評価が可能な方法を探ることを目的に、カナリーキズタの葉を用いて基礎的な実験を行った。活力度の異なる2種類の葉（緑葉と黄緑葉）を用い、コルクボーラーで葉をくり貫いて葉面積率を100, 80, 60, 40, 20 および0%の6段階設定して分光反射率の測定を行った。その結果、赤色域と緑色域の分光反射率から求めた植生指数（Vgreen）とNDVIの両方を用いることによって、植生を活力度と葉面積率との両方の観点から評価できることが明らかになった。

キーワード：分光反射率、植生評価、植生活力度、緑被率

NONOMURA, Atsuko, MASUDA, Takuro: A fundamental study for evaluation of vegetation vitality and vegetation fraction with spectral reflectance

Abstract : Remote sensing technique has been used for evaluation of vegetation distribution. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is one of the most famous indexes, and the usefulness has been shown by a lot of papers. However, the value of NDVI is decided with several factors of vegetation, such as vitality, fraction, and the stage of the vegetation. So NDVI is not an appropriate index to evaluate detailed vegetation factors. In this paper, we discussed the method to evaluate vegetation vitality and fraction together with spectral reflectance data. It was shown that combining NDVI and Vgreen (normalized visible red and green reflectance) is possible to evaluate vegetation vitality and fraction.

Key words : spectral reflectance, vegetation evaluation/monitoring, vegetation vitality, vegetation fraction

1. はじめに

グローバル規模においても、ローカル規模においても植生分布の評価にリモートセンシングデータが広く用いられている。とくに都市ヒートアイランド現象低減の必要性が叫ばれている現在、緑被率の把握は都市環境の管理において最も重要な課題のひとつである。さらに、その植生の保全及び維持管理のためには植生の生育状況の把握、すなわち緑被率及び活力度のモニタリングが欠かせない。

植生の空間分布を把握するために、植生の分光反射特性を利用してリモートセンシングデータから各種植生指数を求めることが行われてきている。また、近年、分光反射特性を利用して屋上緑化の温度抑制効果を評価する研究も行われている¹⁾。植生指数のなかでも赤色域と近赤外域の分光反射率から求める正規化植生指数（NDVI、式(1)）²⁾は植生の活力度を示す指標として広く用いられている。しかし、NDVI

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \dots (1)$$

R：赤色域の分光反射率、NIR：近赤外域の分光反射率

は分光放射計の視野内、衛星データの場合にはピクセル内の植生の平均的な活力度を示すもので、緑被率や植生の活力度、植生の種類、各植生の生育段階など複数の要因が複合的に反映された平均的な活力度を示すものであり³⁾、個々の要因を個別に評価する指標としては使えない。そのため、リモートセンシングデータから植生に関する詳細な情報を引き出すための研究がなされてきた^{4), 5), 6)}。

緑被率をリモートセンシングデータから求める代表的な方法には“Spectral Mixture Analysis”と衛星データのバンド演算によるものがある。Spectral Mixture Analysis⁷⁾は、緑被率100%及び0%のときのNDVI（以下、エンドメンバーと呼ぶ）から緑被率と分光反射率の関係をモデル化し、

図-1 可視・近赤外分光放射計による分光反射率測定
Fig.1 Spectral reflectance observation by ASD-HH

表-1 8月14日の測定に使用したカナリーキツタの葉の葉緑素計値と葉色

Table 1 Chlorophyll meter value and Munsell scale color code of sample leaves

葉の種類	葉緑素計値	葉色(マンセル方式)
緑①	58.2	7.5GY3/3-10GY3/3
緑②	58.8	7.5GY3/3-10GY3/3
緑③	55.7	7.5GY3/3-10GY3/3
黄緑④	18.6	2.5GY6/6
黄緑⑤	21.9	2.5GY6/6
黄緑⑥	28.0	2.5GY6/6-2.5GY5/6

葉緑素計値は1枚の葉の5カ所で計測した平均値を示す

図-2 測定に使用したカナリーキツタの葉。(a) 葉面積率80%の緑葉と(b)葉面積率20%の緑葉。直径8mmのコルクボーラーで葉をくり貫いた。黒丸は分光放射計の視野(直径6cmの円)を示す。

Fig. 2 Canary ivy for spectral observation. Leaf area fraction is (a) 80% and (b) 20%. The leaf was bored with a 8mm cork borer. The black circles indicate the view area of ASD-HH (the diameter is 6cm).

そのモデルを用いてNDVIから緑被率を求めるという方法である。この方法は植生の被覆形態が多様な都市域などの緑被率の算定には相応しいが、常にエンドメンバーが既知でなければならない、実用化には至っていない。

一方Pickupら⁴⁾は、乾燥傾向にあるような地域の緑被率の評価には、赤色域と近赤外域の分光反射率から求めるNDVIよりも赤色域と緑色域の分光反射率を用いる方が適していることを示した。またGitelsonら²⁾は、赤色域と緑色域の反射率から式(2)で計算されるVIgreenと緑被率との間には線形関係があることを示した。しかし、植生の活力度や土壌の含水比がVIgreenに及ぼす影響については明らかにされていない。

$$VI_{green} = \frac{(G-R)}{(G+R)} \dots (2)$$

G: 緑色域の分光反射率, R: 赤色域の分光反射率

本研究では、活力度を緑被面積あたりのクロロフィル活性度と捉え、緑被率と植生の活力度を分光反射特性から評価する方法を検討することを目的としている。そこで、野外測定用可視・近赤外分光放射計を用いて地上スペクトル測定を実施し、分光反射特性から葉面積率と活力度を分けて推定する方法を検討した。その際、植生の活力度や植生の背景にある土壌の分光反射特性が及ぼす影響についても考慮した。

筆者らは、本研究で得た知見を今後アップスケーリングし、衛星データに適用することを考えている。そのため、分光反射率測定及びデータ処理は衛星による観測と類似した条件で実施した。

2. 実験方法

活力度が異なると考えられる、葉色の異なるカナリーキツタの葉を採取し、野外測定用可視・近赤外分光放射計(ASD社FieldSpec HandHeld Spectroradiometer, 以下ASD-HH

表-2 本研究で使用した波長帯。Terra/ASTERの可視・近赤外域のバンドと同じ波長帯を用いた

Table 2 Wave lengths of reflectance used in the observation, which are same as Visible/Near Infrared channels of Terra/ASTER data set.

バンド名	波長範囲 (nm)
バンド1	緑色域 (520-600)
バンド2	赤色域 (630-690)
バンド3	近赤外域 (780-860)

と呼ぶ)を用いて分光反射率を測定した(図-1)。ASD-HHではまず、標準白色板の放射輝度を測定する。標準白色板からの放射輝度に対する試料からの放射輝度の比が計算され、反射率として出力される。

測定日は8月14日、8月22日、8月25日の3日間、太陽高度が高い11時～13時の間に行った。測定対象としてはカナリーキツタの緑葉と黄緑葉とし、各測定日とも3枚ずつ用いた。各試料について色票(マンセル方式)を用いて葉色を測定し、同時に葉緑素計(藤原製作所製SPAD-502)を用いて葉緑素含有量(1枚の葉について5カ所)を測定した。表-1に8月14日に測定した試料の葉色および葉緑素計値を示す。他の2日の測定日もほぼ同様の葉を測定対象とした。緑葉と黄緑葉を用いたのは活力度が異なる葉について測定することを意図したためである。葉色および葉緑素計値からみて、緑葉は黄緑葉に比べて明らかに活力度が高いといえる。

各試料について、分光反射率を測定した後、直径8mmのコルクボーラーを用いて葉面積20%相当分の葉をくり貫き、葉面積80%にして分光反射率を測定した(図-2(a))。同時に、くり貫いた葉片を用いて葉面積率20%の分光反射率を測定した(図-2(b))。引き続いて葉面積80%の葉をくり貫き、葉面積率60%と40%の分光反射率を測定した。測定は葉をマサ土の上に置いて行った。マサ土は乾燥状態のものと湿潤状態のものと2種類を用意し、土壌水分条件の違いの影響についても検討した。ASD-HHに視野角(FOV)7.5度のレンズを装着し、地上50cmの距離から、直径6cmの円(図-2の黒丸)を視野として測定した。なお、測定中に雲がかかることがあり、正しいデータが得られないことがあった。本論文では、測定中に雲がかからず、正しく測定できたデータのみを使用した。

筆者らは、本研究で得た知見を衛星データに適用することを考えている。ASD-HHは波長域325～1075nmまで1nm間隔で分光反射率の測定が可能である。筆者らはTerra衛星に搭載されたASTERセンサーのデータを利用しているので、本研究のデータをTerra/ASTERデータに対応させ、表-2に示した波長域の反射率を平均して各波長域の反射率とした。

3. 実験結果

図-3 分光反射率測定結果 (a)葉面積率100%, (b)葉面積率60%, (c)葉面積率0%

Fig. 3 Spectral reflectance observation. (a) 100% leaf area fraction, (b) 60% leaf area fraction, (c) 0% leaf area fraction

3.1 分光反射率曲線

図-3に緑葉、黄緑葉、マサ土の分光反射特性を示す。葉面積率100%の緑葉と黄緑葉では(図-3(a))、葉色の違いは緑色域、赤色域、及び近赤外域の分光反射率に反映されている。

緑色域では黄緑葉の反射率（0.3程度）が緑葉の反射率（0.1程度）より高い。これは、マンセル方式で測定した葉色（表・1）で黄緑葉の方が緑葉よりも明度が高いことが反射率にも反映されているといえる。赤色域では緑葉でも黄緑葉でも反射率が低くなり、光が吸収されていることがわかる。700nmを境に近赤外域で反射率が高くなる。近赤外における緑葉の反射率は0.6を超え、黄緑葉の反射率を上回る。葉緑素は700nm以上の赤外域の光を吸収しないので、一般に葉緑素含有量の多い葉は近赤外域の反射率が高い⁶⁾。今回の実験でも緑葉の葉緑素含有量が多く（表・2）、それが反射率に反映されているといえる。

マサ土については乾燥状態と湿潤状態の分光反射率を測定した（図・3(c)）。植物葉と比べると、赤色域での反射率の落ち込みがなく、近赤外域での反射率が低い。乾燥状態と湿潤状態の反射曲線はよく似ているが、乾燥状態の方が全体的に高い反射率を示しており、土壌水分条件の違いが反映されている。

葉面積率60%の分光反射特性は（図・3(b)）、緑色域の反射率のピークや近赤外域での反射率の立ち上がりの傾向は見られるが、葉面積率100%より平滑化され、分光反射特性に葉面積率の影響が見られる。

葉面積率と活力度の影響が分光反射特性に現れていることが認められた。そこでこの特性を利用して分光反射率による植生の活力度及び葉面積率判定方法を検討する。分光反射率から計算した植生指数で植生を評価する場合、植生の情報を最大限に引き出すことが必要となる。これまでに、ギャップの土壌の影響を最小限に抑えるためにいくつかの植生指数が提案されてきたが³⁾、まだ完全に確立された手法はない。そこで本研究では、分光反射特性から緑被率を推定するにあたり、土壌水分条件の違いも考慮に入れて、より適切な植生指数及び手法について検討する。

3.2 葉面積率とNDVI

分光反射率測定データからNDVIを計算し、葉面積率との関係を調べた。図・4(a)に乾燥マサ土の上で測定した結果を示す。緑葉、黄緑葉を個々に見ると、葉面積率の増加に応じて線形的にNDVIが増加している。しかし、緑葉と黄緑葉とでは葉面積率の増加に対するNDVIの増加率が異なる。そのため、同じNDVIでも緑葉と黄緑葉で葉面積率が異なる。例えば、NDVIが0.5のときの葉面積率を回帰直線から求めると、緑葉では61.0%であるのに対して、黄緑葉では76.6%である。

図・4(b)に湿潤マサ土の上で測定した葉面積率とNDVIの関係を示す。乾燥マサ土上で測定した場合と同様、葉面積率の増加に伴いNDVIが増加するが、増加率は緑葉と黄緑葉では異なる。このことから、活力度が均一な植生が分布している場合を除き、NDVIのみから葉面積率を推定することはできないといえる。

3.3 葉面積率とV_{Igreen}

図・4 緑葉と黄緑葉の葉面積率とNDVIとの関係。(a)乾燥マサ土上での測定結果、(b)湿潤マサ土上での測定結果
Fig. 4 The relationship between NDVI and leaf area fraction of green leaf and yellow green leaf (a) observed over the dry and moist weathered granite soil.

緑被率を評価するためには、赤色域と緑色域から式(2)により計算されるV_{Igreen}が有用であることがGitelsonら²⁾によって示された。しかし、植生の活力度及びギャップの土壌にかかわらずV_{Igreen}で緑被率を評価することができるかどうかは明らかにされていない。そこで、緑葉と黄緑葉について同一の土壌条件下で分光反射率を測定し、葉面積率とV_{Igreen}との関係に葉の活力度が及ぼす影響を調べた。

図・5に緑葉と黄緑葉について葉面積率に対するV_{Igreen}を示す。乾燥マサ土上において（図・5(a)）、葉面積率の増加に伴いV_{Igreen}の増加が見られるが、緑葉と黄緑葉ではその関係は異なる。その差はNDVIに見られたものよりやや小さいが、葉色あるいは活力度を無視してV_{Igreen}から葉面積率を推定できるほど小さい差ではない。この傾向は湿潤マサ土での測定結果でも同様である（図・5(b)）。このことから、活

図-5 緑葉と黄緑葉の葉面積率とVIgreenとの関係。(a)乾燥マサ土上での測定結果, (b)湿潤マサ土上での測定結果

Fig.5 The relationship between VIgreen and leaf area fraction of green leaf and yellow green leaf

(a) observed over the dry weathered granite soil, (b) observed over the moist weathered granite soil

図-6 NDVIとVIgreenの両者を指標とした植生評価 (NDVI-VIgreen座標)。凡例の頭文字は葉の種類 (G: 緑葉, Y: 黄緑葉), 数字は葉面積率を示す。(a)乾燥マサ土上測定結果, (b)湿潤マサ土上測定結果

Fig.6 Vegetation evaluation with NDVI and VIgreen ("NDVI-VIgreen space"). The initial indicates the leaf type and the number indicate leaf fraction rate. (a) observation over the dry granite soil, (b) observation over the wet granite soil

力度が異なる植生が分布する条件下での葉面積率推定にはVIgreenだけでは不十分であるといえる。

以上のような分光反射測定結果の解析から次のようなことが明らかになった。

- ① NDVIは葉面積率の増加に応じて増加する。その増加率は葉の活力度によって異なる。よって、活力度が均一な植生が分布している場合を除き、NDVIから葉面積率を推定することはできない。
- ② NDVIと同様、VIgreenも葉面積率の増加に伴い増加する。VIgreenと葉面積率との関係の葉の活力度によ

る違いは、NDVIと葉面積率との間に見られた差ほど大きくはないが、無視できるほど小さくはない。

以上のことより、NDVIもVIgreenも葉面積率との関係は葉の活力度によって異なるため、それ自体の値から葉面積率と植生の活力度をそれぞれ個別に推定することはできない。

3.4 NDVIとVIgreenの両者を指標とした植生評価

ここまでの結果から、分光反射率から植生の活力度と葉面積率をそれぞれ個別に推定するための指標としては、NDVIもVIgreenも単独では不適切であることがわかった。しかし一方で、NDVIとVIgreenともに、葉面積率及び活力度と密

接に関係していることもわかった。そこで、NDVIとVIgreenの両方を用いて植生を評価してみた。

NDVIを横軸、VIgreenを縦軸にとり、緑葉と黄緑葉のデータをプロットした。図-6(a)に乾燥マサ土上での測定結果を示す。グラフの凡例は、先頭のアルファベットが緑葉 (G) もしくは黄緑葉 (Y) を示し、あとに続く数字は葉面積率を示す。データの分布パターンをもとに、「NDVI-VIgreen座標」を葉面積率ごとにゾーン分けできる。葉面積率が同じ場合、同一のゾーンに緑葉と黄緑葉の両方のデータがともに含まれる。ゾーン内では葉の活力度が高い緑葉は右下部に、すなわちNDVIが高くVIgreenが低いところに分布している。葉の活力度が低い黄緑葉は、NDVIが低くVIgreenが高い左上部に分布している。

これらのことから、NDVIとVIgreenの2つの植生指数を用いた「NDVI-VIgreen座標」では、葉面積率0%の点からの距離で区分したゾーンで葉面積率を推定することができ、さらに、ゾーン内に分布する点の位置によって同程度の面積率をもつ植生の活力度を評価することができることが明らかになった。

さらに、「NDVI-VIgreen座標」にギャップの土壌の水分状態が及ぼす影響について調べるため、湿潤マサ土の上でも調べた。図-6(b)は湿潤のマサ土を使用して測定した結果を示す。葉面積率0%の点から区切ったゾーンで葉面積率を評価できることや、ゾーン内の点の位置で葉の活力度を評価できることは、先に述べた乾燥マサ土の場合と同じである。湿潤マサ土と乾燥マサ土では葉面積率で区分されるゾーンの境界の位置に違いが見られるが、葉面積率により区分されるゾーンのパターンとゾーン内に分布するデータのパターンは湿潤マサ土でも乾燥マサ土でも同じような傾向を示す。

4. まとめ

本研究の結果、分光反射特性から植生の葉面積率と活力度をそれぞれ個別に推定するためには、NDVIやVIgreenなどの植生指数を単独で用いた評価では不十分であることが確認された。その他、赤色域と近赤外域の反射率から計算される土壌の影響を差し引いた植生指数など（例えばSAVIやPVI）いくつかの植生指数があるが、緑被率と活力度の両方を個別に推定するものではない。一方、NDVIとVIgreenの両方の指数を用いた「NDVI-VIgreen座標」は、葉面積率と活力度をそれぞれ推定するのに有効であることが明らかとなった。そしてこの関係は、乾燥、湿潤どちらの土壌水分状態でも成り立つことが分かった。

本研究では、カナリーキズタの緑葉と黄緑葉の2種類の葉について活力度と葉面積率の関係が「NDVI-VIgreen座標」

で異なることを示した。今後は多段階の活力度について検討し、NDVIとVIgreenが分かれば緑被率と活力度が推定できるような汎用性の高い「NDVI-VIgreen座標」の構築を目指したい。植物の成長段階や植物の種類による違いについても検討する必要がある。さらに本研究で得た知見を衛星データに適用し、植生の緑被率とその活力度の評価を行うことも考えている。

本研究は、かがわ産業支援財団助成金をもとに行いました。ここに記して謝意を表します。また、分光反射率測定に協力してくれた学生諸君に心より感謝いたします。

引用文献

- 1) 大野朋子・前中久行, 2006, 蒸発散量と分光反射特性からみた薄層緑化におけるメキシコマンネングサとヒメコウライシバ、裸地の温度緩和効果, 日本緑化工学会誌, 第32巻, 86-91.
- 2) Gitelson, A.A., Kaufman Y. J., Stark, R., and Rundquist D., 2002, Novel algorithms for remotes estimation of vegetation fraction, *Remote Sensing of Environment*, 80, 76-87.
- 3) Liang, S., 2004, *Qualitative Remote Sensing of land Surfaces*, 246-309, Wiley, New Jersey
- 4) Pickup, G., Chewings, V. H., and Nelson, D. J., 1993, Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using Landsat MSS data, *Remote sensing of Environment*, 43, 243-263.
- 5) 資源・環境観測解析センター, 2005, 資源・環境リモートセンシング実用シリーズ⑤地球観測データの利用, 177-226.
- 6) 佐藤和彦, 1992, エネルギー代謝, 光合成 (宮地重遠編), 朝倉書店, 18-38.
- 7) Small, C., 2006, Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature, *Remote Sensing of Environment*, 104, 168-189.
- 8) Tucker, C. J., Townshend, J.R.G., and Goff, T.E., 1985, African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227, 369-375.

(2007.7.9 受理)