

植生被覆率による植物の分光反射特性の変動

Spectral Reflectance Characteristics of Vegetation in Relation to Vegetation Coverage

石山 隆 (千葉大学 環境リモートセンシング研究センター)

T. Ishiyama, Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University

E-mail: ishiyama@rsirc.cr.chiba-u.ac.jp

1. はじめに

リモートセンシングによる植生の評価の尺度としていくつかの植生指数が提案されている。その中で最も広く用いられる植生指数としてNDVI (Rouse, et. al., 1974)がある。植生指数はバイオマス、植生被覆率、活性度など植物の物理的、生理的な要素の影響を受ける。NDVIは可視部の赤バンドと近赤外バンド、例えばTMではバンド3と4を用い、両者の正規化された差によって定義される。この手法を用いて多くの研究者により地球規模や地域の植生指数図が作られている。現在、植生指数とこれら植生の物理量との関係は完全には解明されていない。本研究では、衛星データからバイオマスを推定する過程で重要な指標となる植生被覆率を分光放射計による実測値から、葉面積指数 (LAI) の情報を衛星データから評価することをを行った。

2. 実験

植生被覆率による分光反射率の測定はIRIS分光放射計 (GER社製・米国) を使用した。その測定波長域は400nm~2500nm、分光分解能は可視部と近赤外部は2nm、中間赤外部は4nmである。分光反射率と植生被覆率の関係を調べるために、分光放射計の視野に面積比の異なる植物と土壌をアレンジして反射率を測定する。さらに樹冠の多層構造を考慮して、葉を重ねた場合の効果と背景の土壌の種類による反射率の変動も調べた。これらは樹冠の反射特性を推定するためのモデル実験として行った。植生被覆率による分光反射率の測定の詳細は(Ishiyama et. al, 1996)に報告されている。

3. 結果

3.1 植生指数

Fig.1は植生被覆率の違いによる植生の分光反射率である。植生被覆率の調整に使用した土壌は中国西部の乾燥地から採取したもので、実験の直前に乾燥して用いた。この実験における葉の重なりは1である。植生被覆率が増加するに従って可視部では550nmおよび680nm付近で反射率が減少していることがわかる。これは植生量の増加により、クロロフィルの吸収が増加したことによるものである。植生量の増加による影響は特に近赤外部の800nm~1000nm付近で著しく、最大で反射率が63%を示している。また中間赤外部の1450nmと1950nm付近の吸収は、植物に含有される水分の吸収によるものである。同様の実験で葉の重なりが3層の場合の結果をFig.2に示す。葉の重なりによる近赤外の反射率の増加は単層の場合よりもさらに顕著で、最大で85%に達する。これは葉の内部の細胞付近において、光の多重散乱が増加するためである。しかし可視部および中間赤外部では葉の重なりの効果は小さい。Fig.3は植生被覆率の設定が100%の場合で、葉の重なりの変化によるNDVIの変化を示す。葉の重なりとNDVIは指数関数の関係があ

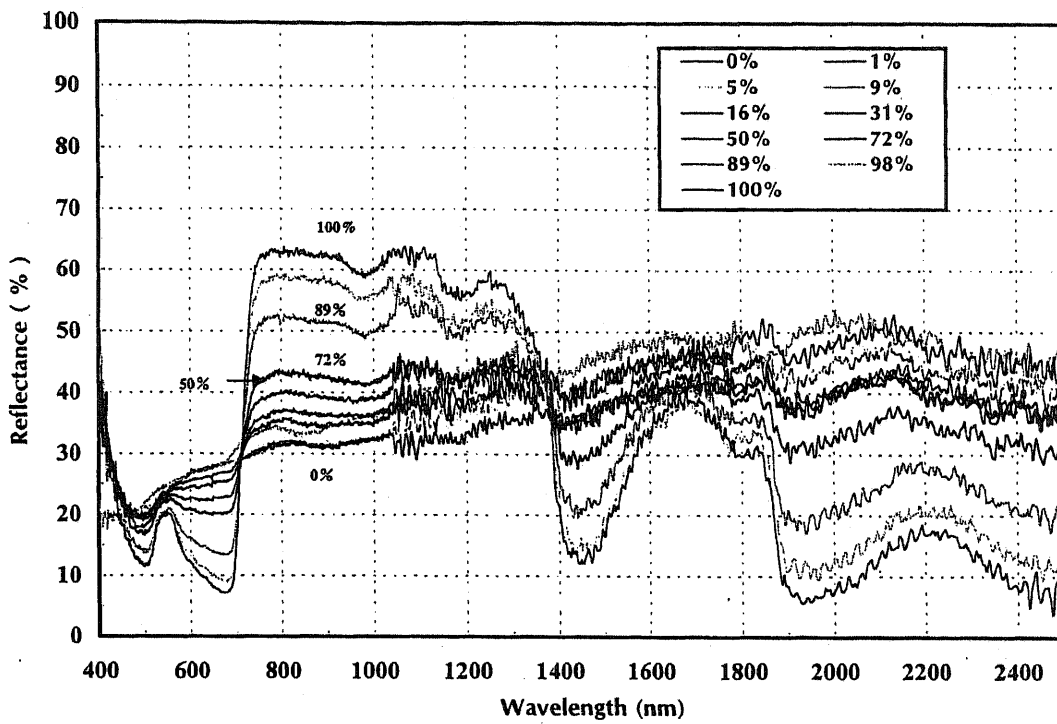


Fig. 1 Spectral reflectance of vegetation cover (single leaf layer) with desert gray sand.

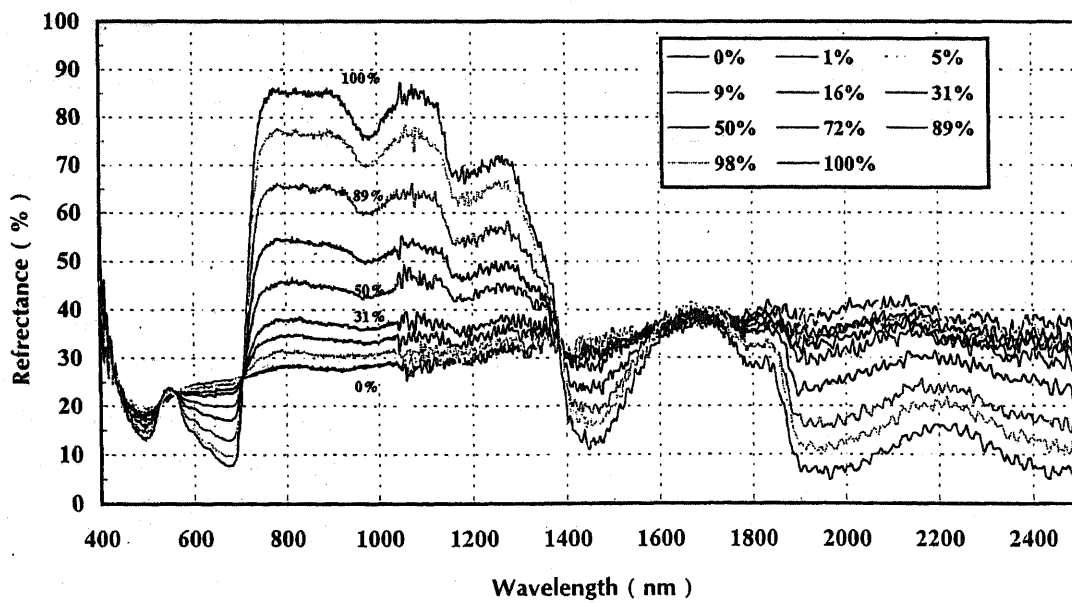


Fig. 2 Spectral reflectance of vegetation cover (triple leaf layers) with desert gray sand.

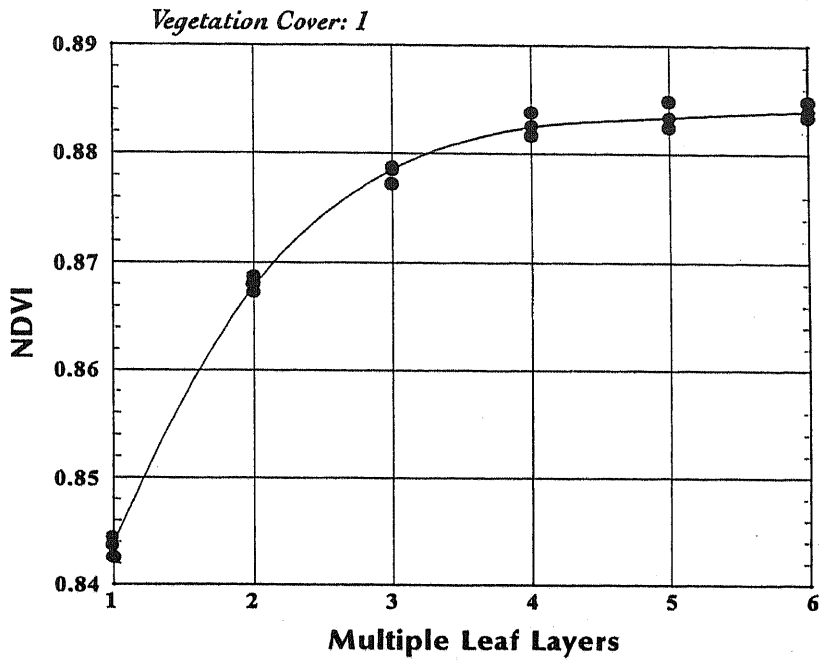


Fig. 3 Multiple leaf layers vs NDVI.

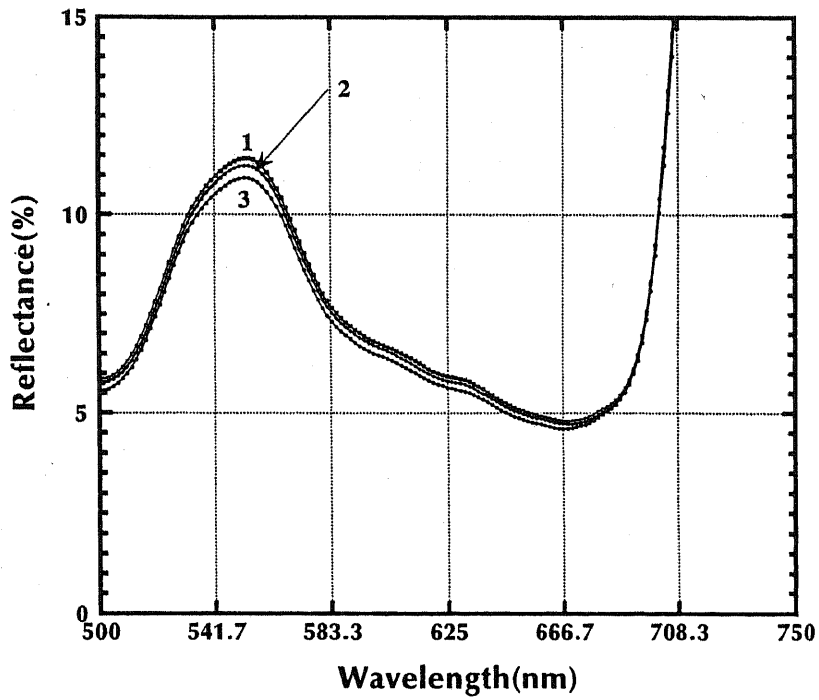


Fig. 4 Spectral reflectance of multiple leaf layers in visible part.

り、葉の重なりが4以上になるとNDVIは飽和することがわかる。葉が重なることによって反射率から計算したNDVIは増加する。そのため同じ植生被覆率（100%）にもかかわらずNDVIは異なった値をとる。ここからNDVIによって植生被覆率を評価することは誤差を生じることがわかる。Fig.4は葉の重なりが1~3に変化した場合の可視部の500nmから700nm付近の反射率を示す。葉の重なり増加による反射率の減少は、絶対量は少ないが緑と赤の波長で見られる。Table 1に緑と近赤外バンド、赤と近赤外バンドを組み合わせたシンプルな植生指数を示す。それらの植生指数から、本研究では植生被覆率を推定するためのアルゴリズムとして、広く使われている正規化植生指数の近赤外部（NIR）の代わりに緑（G）の波長の値を代入した以下の植生指数を用いた。

$$\text{NDVI (Green, Red)} = (G - R) / (G + R). \quad (1)$$

Fig.5はNDVI(Green,Red)と葉の重なりが1~6に変化した場合の関係を示す。ここから、NDVI(Green, Red)が葉の重なりの影響を最小にして評価できることを示す。Fig.6はNDVI(Green, Red)と植生被覆率の関係を示したもので、両者の関係は直線で近似できる。

Fig.7は葉の重なりが単層の場合の植生被覆率とNDVI、赤、近赤外部の反射率の関係を示す。植生被覆率が増加するに従って赤の反射率はゆるやかに減少し、近赤外部の反射率は逆に著しく増加していることがわかる。NDVIと植生被覆率の関係は指数関数で近似できる。葉が3層の場合、植生被覆率が50%でNDVIは0.3、100%の場合では0.85と高い値を示す。また植生被覆率が0の場合（土壌100%）でのそれは0.05である。Table2にいくつかの対象物の実測値と衛星データから計算したNDVIを示す。植生のモデルとして行った葉の重なりが3層の場合の観測ではNDVIは0.85である。一方、草地（草本類）が疎らな場合（植生被覆率：21%）では0.36、密（植生被覆率：98%）の場合はNDVIは0.76を示す。以上からNDVIは植生の厚さ（3次元の情報）の影響を強く受ける。一方、植生被覆率は定義から解釈して2次元の情報であるから、NDVIから植生被覆率を求める場合は誤差が大きくなることがわかる。

Fig.8は背景の土壌の種類によりNDVIが変化することを示す。特に、植生被覆率が低い場合（植生が疎ら）はその影響が強い。背景の土壌のモデルとして、変質鉱物（Alunite, Kaolinite, Gypsum）とオーストラリアの代表的な土壌である赤褐色土壌、中国西部の乾燥地の土壌を用いた。ここで変質鉱物は乾燥地の土壌に含有される代表的な成分である。変質鉱物は概ね明るい灰色~白色のため、可視部の反射率が高く、結果として植生指数は小さな値を示す。

一方、赤褐色土壌は赤バンドの反射が小さくなるので、見かけの植生指数は大きくなる。Gray Sandはほぼ、両者の中間値を示す。このように植生指数は植生被覆率、特に植生被覆率が低い場合は背景の土壌の色に強く影響を受けることがわかる。また土壌水分が大きい場合も見かけの植生指数は大きくなる。

3.2 Leaf Area Index

人工衛星データからバイオマスを評価する過程で、葉面積指数（LAI）を精度よく求めることは重要である。赤バンドと近赤外バンドの反射率より求められた植生指数とLAIとの関係について、過去の多くの研究ではLAIの増加に伴って植生指数は徐々に飽和することが報告されている。両者は指数関数の関係があり、それは半経験的なモデル式として次式で示される(Baret and Guyot,1991)。

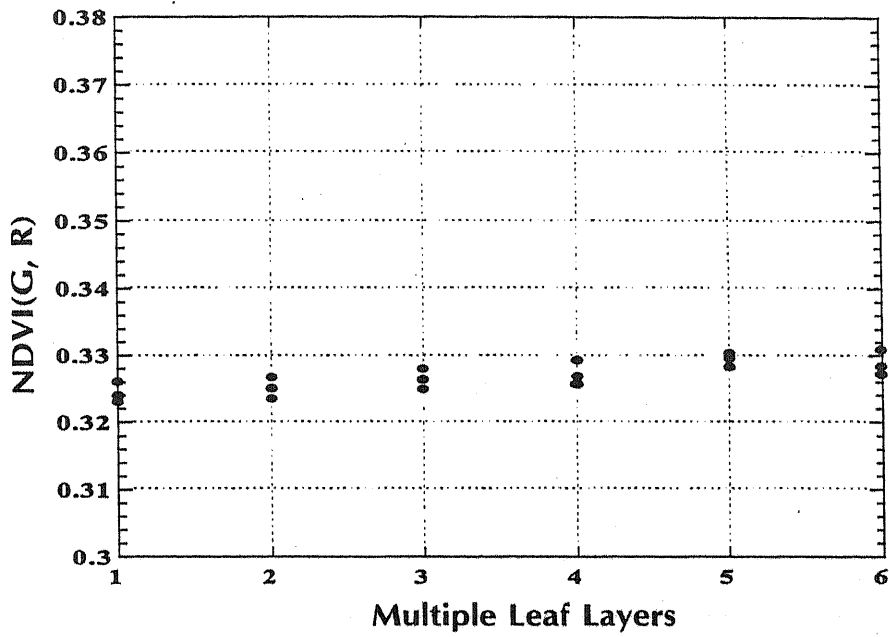


Fig. 5 NDVI(G/R) vs multiple leaf layers.

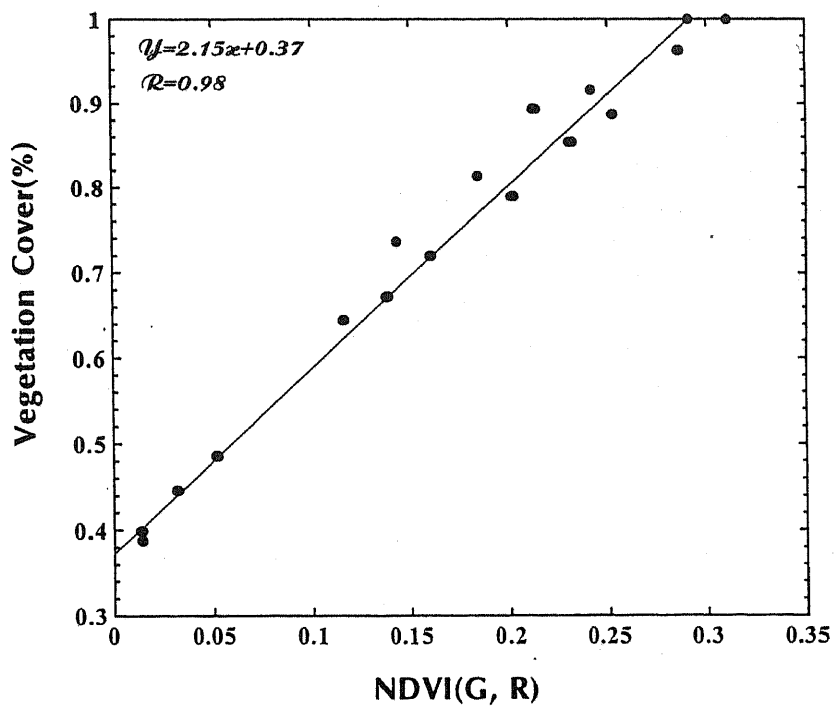


Fig. 6 Relationships between NDVI(G/R) and vegetation coverage.

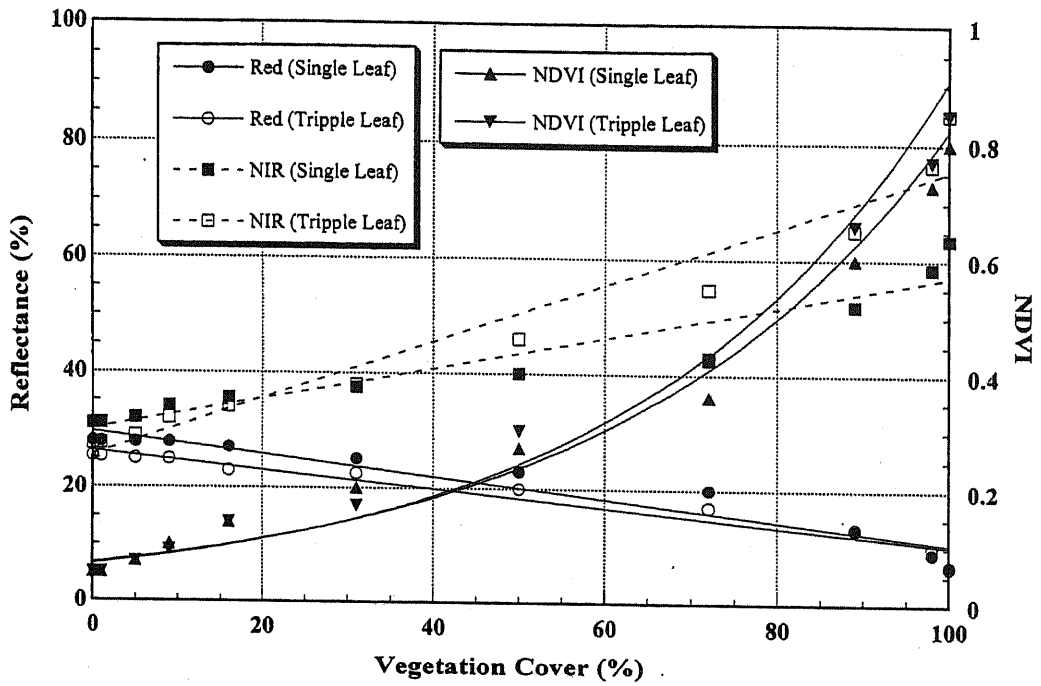


Fig. 7 Vegetation cover vs Red, NIR reflectance and NDVI of single and tripple leaf layers.

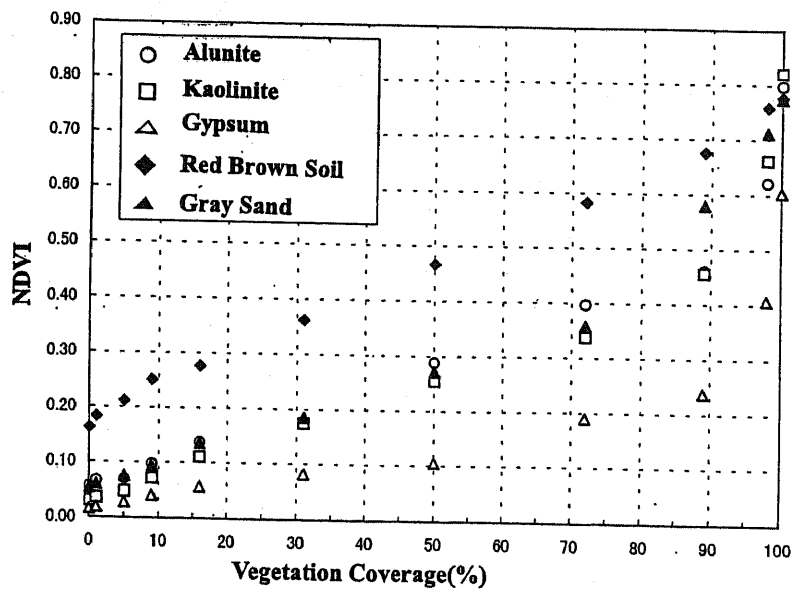


Fig. 8 Vegetation cover vs NDVI with various background soils.

$$VI = VI_{\infty}(VI_g - VI_{\infty}) \cdot \exp(-k_{VI} \cdot LAI). \quad (2)$$

ここで、 VI_g はbare soil ($LAI=0$)の VI 値を、 VI_{∞} は VI の飽和値を、そして KVI は消散係数を示す。これらの定数は太陽照度や葉の分布状態によって変化するが、平均値として、NDVIでは $VI_g=0.19$ 、 $VI_{\infty}=0.93$ 、SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index、Huete、1988)では $VI_g=0.12$ 、 $VI_{\infty}=0.77$ である。 KVI は天頂に対する植物の葉の傾きの分布によって大きく変化し、植生指数では0.7から1.4、SAVIでは0.5から1.0の値をとる。しかし、植生指数の KVI は常にSAVIの KVI の約1.4倍という関係がある。 KVI は植生の密度によって変化する。特に乾燥地のような植生密度の低い地域ではその値は小さくなる。また植生の種類、例えばトウモロコシのような比較的、葉が起立している場合は樹木に較べて小さい。

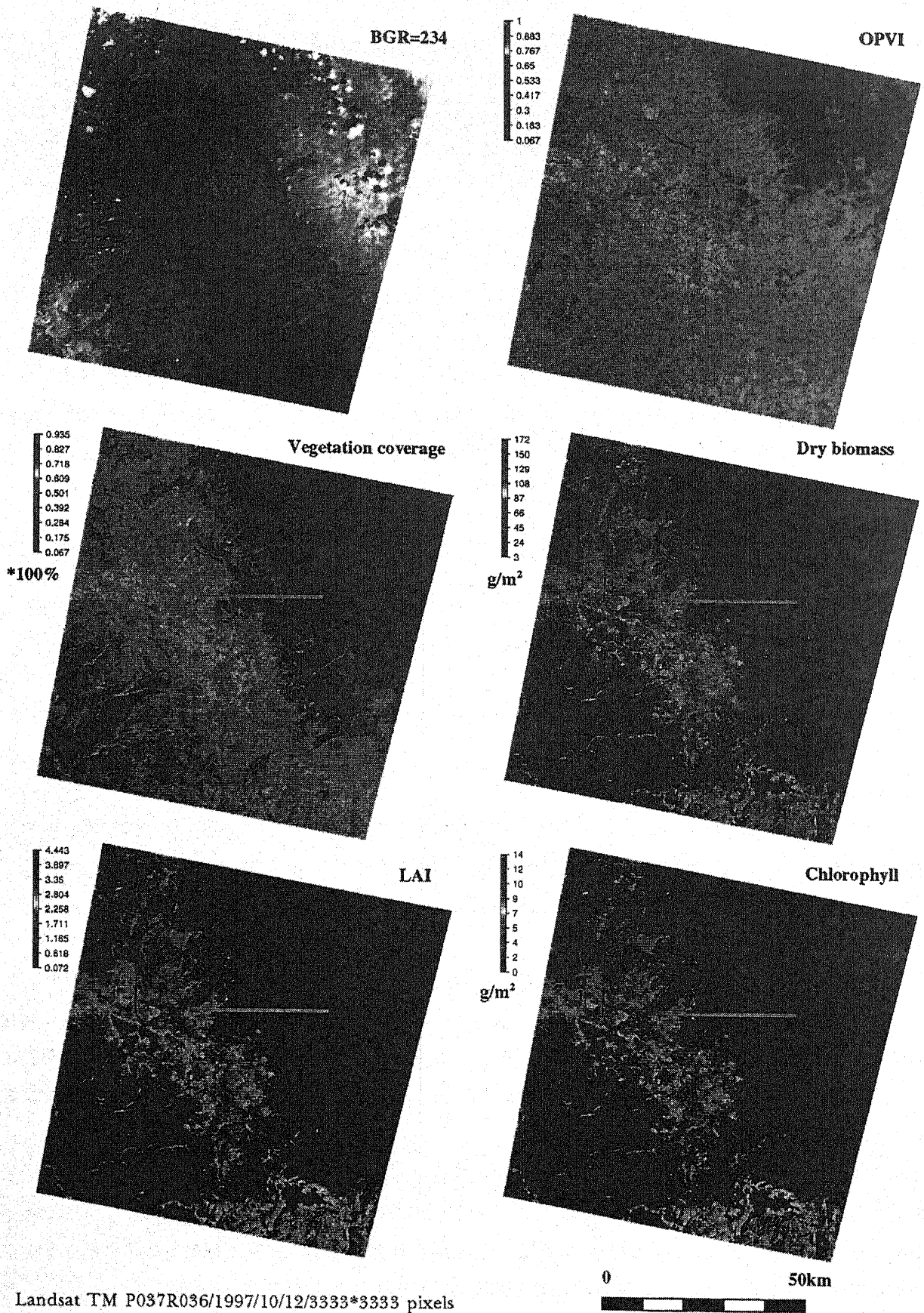
本研究ではLandsat TMから計算した植生指数と(2)式により、 LAI を推定した。また回帰式を用いて衛星データから植生被覆率、ドライバイオマス、クロロフィルを推定した。テストサイトは乾燥地のアリゾナのFlagstaff周辺である。解析の対象とした地域は植生密度のダイナミックレンジが大きい地域であるから、 KVI は0.7から1.4の中間値を(2)式に代入して LAI を推定した。また衛星の観測と同期して LAI 、植生被覆率などの地上調査を行った。Fig.9にフォールスカラー画像と植生指数、植生被覆率、ドライバイオマス、クロロフィル、 LAI の分布図(オリジナルはカラー)を示す。またテストサイト周辺の植生被覆率のダイナミックレンジが大きい地域の LAI のプロファイルをFig.10に示す。植生密度の高い地域では LAI は3.9、逆に植生の疎らな地域では0.3である。Allen(1978)によると、成熟した植物でも LAI は最大5よりは大きくならないと述べ、実測した250cmの高さの樹木の LAI は4.33であったと報告している。本実験で衛星データから推定したFlagstaff周辺の LAI の最大値は現地調査の結果から妥当なものといえる。

4. 考察とまとめ

本研究では分光放射計により、植生の被覆率の違いによる分光反射率を実測した。得られた結果から、植生被覆率と赤バンド、近赤外バンドの反射率および植生指数の関係を考察した。従来の研究では植生被覆率による分光反射率の精度の高い文献値は見あたらず、本研究で得られた植生被覆率による分光反射率のデータセットは貴重である。

衛星データによる植生被覆率の評価は簡単ではないことがわかる。特に現在広く使われているNDVIから植生被覆率を推定することは問題がある。本研究で提案されたNDVI(Green、Red)は植生被覆率の推定には理論的には有効であるが、衛星データの解析には問題がある。というのは、分光放射計に比較して衛星のセンサーの分光分解能が低いため、緑と赤バンドの反射率の感度が悪くなるためである。そこで、植生被覆率を導出するための新たなアルゴリズムの開発が必要である。

またNDVIは植生の被覆率が低い場合は背景の土壌の光学的特性、特に土壌の色や土壌水分に強く影響を受ける。また衛星データから評価した LAI は、植生バイオマスの推定のアルゴリズムを開発する過程で重要なパラメータである。近年問題となっている炭素循環を研究する上で、その主な起源となる植生のバイオマスを評価するためには、最初に LAI を精度よく評価することが重要である。



Landsat TM P037R036/1997/10/12/3333*3333 pixels

Figure 9. False color image and vegetation coverage, dry biomass, chlorophyll content, LAI and VI (OPVI) based on Landsat TM in Flagstaff, Arizona.

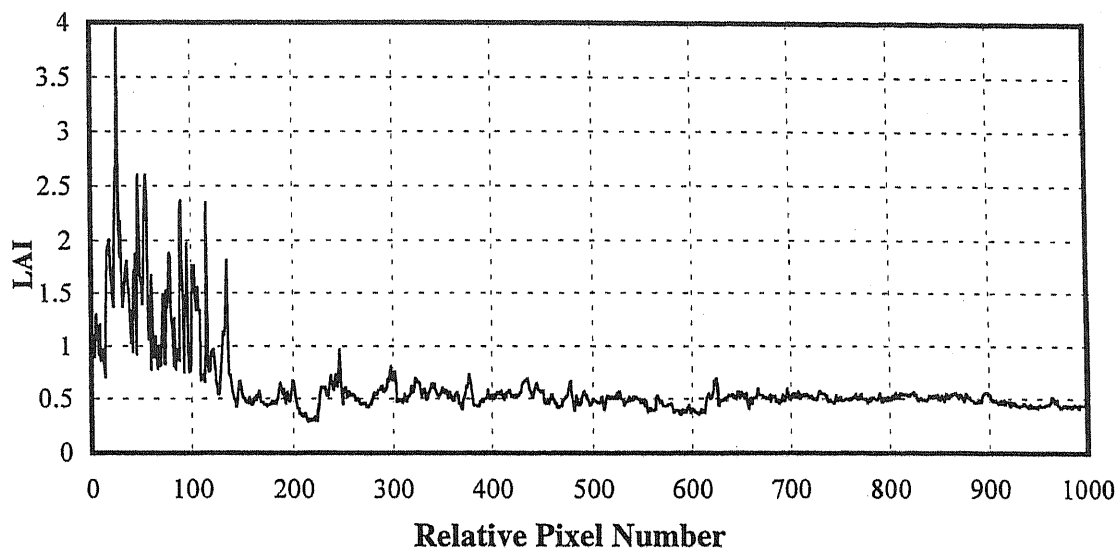


Fig. 10 Horizontal distribution of LAI in periphery of Flagstaff, Arizona.

Table 1. Regression equations against the IR and Red, Green and Red radiance variables.

IR and Red Radiance Variables	Green and Red Radiance Variables
1. Red Radiance (0.63~0.69 μm)	1. Green Radiance (0.52~0.60 μm)
2. IR Radiance (0.75~0.80 μm)	2. Red Radiance (0.63~0.69 μm)
3. IR / Red	3. Green / Red
4. SQRT (IR / Red)	4. SQRT (Green / Red)
5. IR - Red	5. Green - Red
6. IR + Red	6. Green + Red
7. (IR - Red) / (IR + Red) NDVI	7. (Green - Red) / (Green + Red) NDVI (G/R)
8. (IR + Red) / (IR - Red)	8. (Green + Red) / (Green - Red)
9. $\sqrt{(\text{IR} - \text{Red}) / (\text{IR} + \text{Red}) + 0.5}$	9. $\sqrt{(\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red}) + 0.5}$

Table 2. NDVI of various surfaces based on *in situ* measurements and satellite data.

Reflectance Measurement				Satellite Data (NOAA, AVHRR)	
Laboratory		<i>In situ</i>			
Soil	Triple Leaf	Grass (Height, 3-4 cm)		Desert	Forest
		Cover 21%	Cover 98%		
0.05	0.85	0.36	0.76	0.10 (Approx.)	0.60 (Approx.)

References

- Allen, W. A., T. V. Gayle and A. J. Richardson (1970): Plant-canopy irradiance specified by the Duntley Equations, *J. of the Optical Soc. of America*, **60**, 3, 372-376.
- Baret, F., and G. Guyot (1991): Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, **35**:161-173.
- Huete, A. R. (1988): A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*. **25**: 295-309.
- Ishiyama, T, Nakajima Y and Kajiwara K.,(1996): Vegetation Index Algorithm for Vegetation Monitoring in Arid and Semi Arid Land. *Journal of Arid Land studies* **6**: No.1, 35-47.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Scell, J. A., Deering D. W., and J. C. Harlan (1974): Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 371.

(付 録)

植生被覆率 (Vegetation Coverage)

地表面に投影した植物群落の単位面積

葉面積指数 (Leaf Area Index; LAI)

単位地上面積当たりの、樹木の頂上から地上までに存在するすべての葉の片面の面積の和