

分光反射率計による牧草畑観測例と適用制約に関する一考察

岩 切 敏

三重大学生物資源学部

A Measurement of Spectral Reflectance for Guineagrass in a Field with a Portable Spectral Reflectometer and an Estimation of Weather Restriction to its Applicability

Satoshi IWAKIRI

Faculty of Bioresources, Mie University

Abstract

Application of a portable reflectometer with optical range of 400 nm to 1050 nm was assessed based on changes in LAI of guineagrass and water content of the top 5 cm of soil. The relations of reflection to changes in LAI and soil water content were determined. Frequently cloudy and rainy weather in 1991 limited application.

Statistical analysis of the number of days with sunshine above 80 percent indicated application to be fairly limited, particularly for fast growing crops during the summer in Tsu city.

Key words: Guineagrass · Leaf Area Index · Soil water content · Spectral reflectance

はじめに

資源探査衛星や気象衛星の打ち上げ以後、各種資源の探査あるいは地表および気象などの状態変化に関する情報を、電磁波の分光反射率測定から得る技術が実用化されてきている。農学の分野においても、衛星データの解析・利用に関する研究^{1,2,3)}とともに作物の繁茂状態や土壌水分などの地表での状態変化を、簡便にリモートセンシングする技術として、小型分光反射率計の有用性が報告されている^{4,5,6,7,8)}。これらを含む数多くの地上リモートセンシング研究は、衛星データ解析のための地上での基礎データ収集を目的とした、いわゆるグラントルース (ground truth) として行われているものと、必ず

しもそうではないものとに大別することができる。ここで、グラントルース⁹⁾とは、リモートセンシング画像の分類や解釈のために、地上の実態に関する情報を集めることをいう。リモートセンシング研究の初期には、グラントルースの対象物の分光特性により、スペクトルバンドの組合せや必要とする波長帯のバンドを決定することも重要な課題であった。

グラントルースとしての観測調査では、衛星データに対応したスペクトルのバンド区分となっている測器が必要である。しかし、そうでない場合には多様なスペクトル区分あるいはバンド区分の測器が使用されており、本研究で使用した測器はこれに属する。

本研究の第1の目的は、牧草畑と裸地の分光反射率の測定調査を行い、牧草の繁茂度や裸地表層土壌水分と分光反射率との関係についてのデータの蓄積を図ることに

ある。対象作物として牧草を選定したのは、一般に病虫害発生危険が少なく、これまでの関連研究でも取り上げられていないことによる。また、研究の第2の目的を、分光反射率計によるモニタリング法を適用する場合の気象的問題点を摘出することにおいた。

材 料 と 方 法

観測調査対象は禾本科1年生牧草のギニアグラスと大学構内の裸地畑土壌面とした。ギニアグラスは1991年6月26日に散播した。散播としたのは、列状栽培の生育初期にみられる、分光反射に対する植列間の表層土壌の光反射特性の影響を低減させるためである。Huete et al.¹⁰⁾ は4種類の土壌をトレイに詰め、畦間に入れ換えて分光反射率を測定したが、土壌の種類で異なる「明るさ」の影響が大きく、しかもその除去法は確立し得なかったとしている。

分光反射率測定日にはギニアグラスの葉面積指数(LAI, Leaf Area Index) 調査も行った。LAIは単位土地面積当たりの植物葉群の積算葉面積として表され、作物などの繁茂度の指標として用いられている。ギニアグラスの収穫刈り取り月日と繁茂状況は次のようであった。1番刈りを8月1日に行い LAI は10.7, 2番刈りは9月2日に行い LAI は10.8, 3番刈りは10月14日に行い LAI は7.1であった。

葉面積は刈り取り土地面積約 0.5 m² の標本を対象に、

小型自動葉面積計によって計測した。葉量が多い場合には、代表標本による比葉面積(=葉面積/葉乾物重量)の決定と、それを用いた葉面積の換算を行い、LAIを求めた。葉乾物重量は80℃, 24時間以上の炉乾燥後に測定した。

次に、測定対象とした畑地の表層5cmの土壌(赤黄色砂土)の粒径加積曲線はFig.1のようであり、シルト(粒径0.02~0.002 μm)および粘土(粒径0.002 μm以下)の含有率は低く、合わせて3%程度に過ぎない。したがって、この土壌は保水能力は低く、乾燥あるいは湿潤化に伴って、日射(波長300~3000 nm)反射率が35~10%の広範囲に変化する特徴をもっている。ギニアグラス畑に隣接して設けた観測用裸地の土壌水分(含水比で表示)は、表層5cmの土壌を100 ml 採土管により採取し、105℃, 48時間の炉乾燥後に求めた。

使用した分光反射率計の測定波長域は400~1050 nmである。波長700 nmまでは25 nm 刻み、それ以上は750, 850, 950, 1050 nmの合計17波長での測定が可能となっている。視野角は2度と10度の切り換え式である。これらの測定は1991年7月下旬から11月下旬にかけて行い、分光反射率の測定時刻は、太陽光の状態変化が相対的に小さい晴天日の正午頃とした。測器は太陽を背にして測定対象物に向かう、順光状態での測定が可能のようにセットした。

この測器を使用した場合の波長別の分光反射率 R_n (%) は次式で近似される：

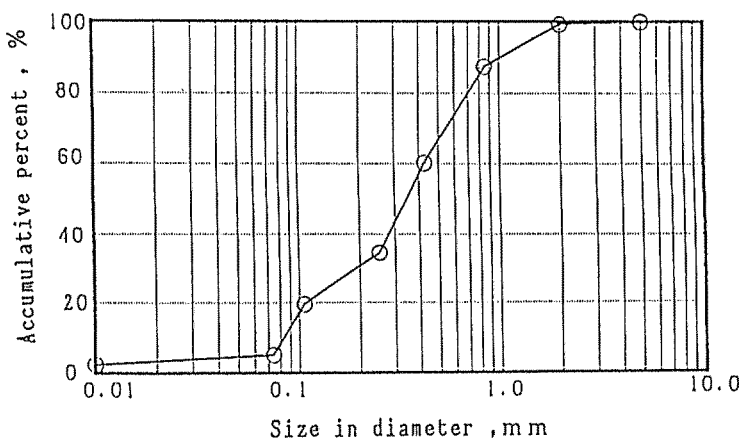


Fig. 1 Particle size distribution curve for a bare soil observed with a spectral reflectometer.

$$R_n \equiv 10^{(V_n - V_{On})} \times 100$$

ここで V_n と V_{On} は波長 n (nm) における対象物反射読み取り値と白色標準板反射読み取り値である。白色標準板には炭酸バリウム粉末を充填したものが理想的であるが、ここでは簡便法として光沢のある厚手の白色紙面を利用した。上の近似式で反射率が指数形となっているのは、測器の読み取り値が入射光の強さの対数値となっていることによる。このようにして得られる反射率は、白色標準板の反射率に対する相対値をとっているため、一種の基準化された反射率を示していることになる。

結果ならびに考察

1. ギニアグラスの LAI と分光反射率

ギニアグラスは各番刈りにおいて、LAI が10程度、草高約 1 m までに繁茂するのに30日程度の日数しか要しない、早い生長速度を示した。そのため各番刈り間の観測回数は、天候条件とのからみもあって、非常に少なく

なった。そこで、データの解析に当たっては、1～3番刈りの調査データをこみにして取り扱うことにした。

1.1 単回帰分析による結果

LAI 推定のための経験式を得るために、まず単純な単一波長反射率と LAI との関係を検討した。単一波長反射率の関数とした一次回帰式と相関係数を Table 1 に示している。

多くは負の相関関係にあり、LAI の増加につれて反射率は減少するが、いずれも相関係数値は低い。正の相関関係が波長 850 nm と 950 nm で得られている。全体の中で統計的に有意な関係が得られたのは、波長 525 nm, 550 nm, 950 nm の3波長の場合のみである。

危険率 1% で有意とみなされた R_{550} と LAI との関係を Fig. 2 に示している。図上の点の分散はやや大きく相関係数も高くないが、これには1～3番刈りのデータをこみにしていることも影響しているようである。普通作物の場合にも、毎年の栽培条件をそろえても、分光反射率測定値に年ごとの若干のばらつきが生ずることが経

Table 1 Linear regression equations for estimating leaf area index (LAI) of guineagrass (*Panicum maximum* Jacq. var. *maximum*) as a function of spectral reflectance (R_n).

Wavelength nm	Linear regression equations	Coeff. of correlation	Significant point (%)
400	LAI = -121.21 R_{400} + 12.93	-0.5068	n
425	LAI = -111.15 R_{425} + 12.91	-0.4999	n
450	LAI = -118.07 R_{450} + 13.39	-0.6356	n
475	LAI = -78.38 R_{475} + 11.12	-0.5666	n
500	LAI = -40.79 R_{500} + 11.02	-0.5647	n
525	LAI = -75.13 R_{525} + 15.42	-0.7029	b
550	LAI = -83.30 R_{550} + 18.88	-0.7751	a
575	LAI = -42.56 R_{575} + 12.03	-0.6163	n
600	LAI = -44.23 R_{600} + 11.31	-0.6132	n
625	LAI = -32.01 R_{625} + 9.58	-0.5641	n
650	LAI = -39.28 R_{650} + 9.69	-0.5456	n
675	LAI = -17.78 R_{675} + 8.41	-0.3882	n
700	LAI = -30.57 R_{700} + 13.10	-0.5165	n
750	LAI = -2.20 R_{750} + 7.59	-0.1233	n
850	LAI = 0.77 R_{850} + 0.08	0.4252	n
950	LAI = 1.09 R_{950} - 1.56	0.6531	b
1050	LAI = -5.01 R_{1050} + 9.74	-0.2098	n

* : a = significant at error level below 1%, b = below 5%, n = not significant

** : Number of data analysed = 11

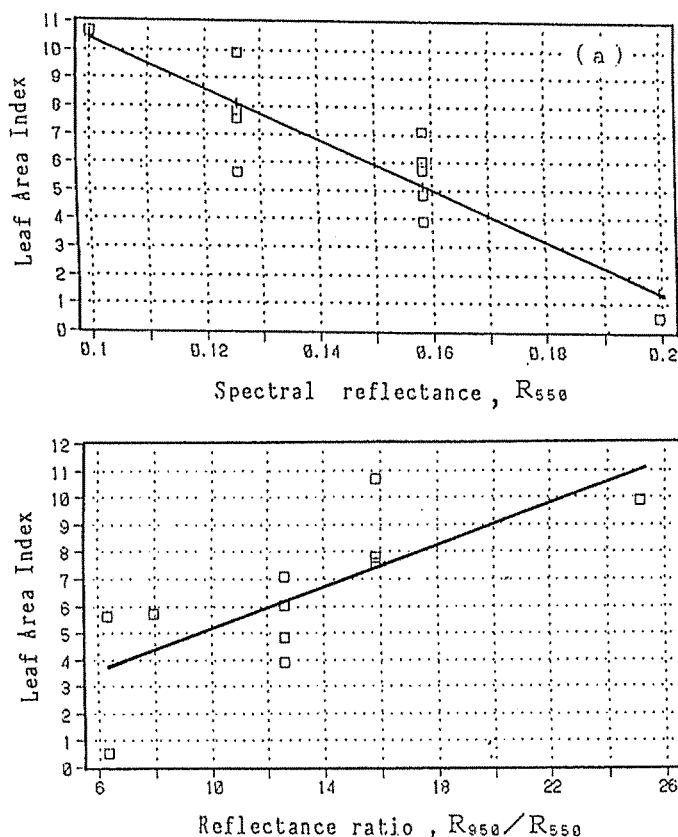


Fig. 2 Examples of relation between LAI of guineagrass and spectral reflectance of wavelength 550 nm (R_{550}) (a) and of spectral reflectance ratio (R_{950}/R_{550}).

験的に知られている。

上記のように単一波長反射率を用いた式の相関度はそれほど高くはないので、関連研究成果を参照して、種々の波長別反射率の組合せ値を用いた場合の回帰関係を検討した。Table 2 には相関係数0.6以上の結果のみを示している。

Table 2 の第1欄に示した分光反射率の組合せの内容からわかるように、有意な関係となっているのは、波長850 nm, 950 nm, および1050 nm とより短い波長との組合せである。波長850 nm については2通り、950 nm については13通り、1050 nm については6通りの関係式が得られている。これらの中で危険率1%で有意となっているのは、(R_{950}/R_{425}) と (R_{1050}/R_{425}) の2組合せであり、ともに R_{425} が関係している。

1.2 重回帰分析による結果

上述のように、単一波長の反射率あるいはそれらの組合せを用いた場合の、回帰式の相関係数あるいは決定係数はそれほど高くはない。そこで多変量解析の手法(田中ら¹¹⁾)を用いて、Stepwise方式で線形重回帰式の導出を試みた。

Table 3 には独立変数として、測定値の17波長反射率のすべてを含めた場合 (a), R_{850} を予め除いた場合 (b), と R_{850} および R_{950} を予め除いた場合 (c) の3通りの統計解析結果をまとめている。表中の(1), (2), (3)は取り込んだ独立変数の違いの区分を示している。(a) の(1)の場合を例にとると、LAI 推定の重回帰式は次のようになる。

$$\text{LAI} = 18.043 R_{850} + 0.219 R_{475} - 1.986$$

Table 3 において、すべての波長反射率を対象とした

Table 2 Linear regression equations for estimating LAI of guineagrass as a function of spectral reflectance ratio (R_m/R_n).

Combination	Linear regression equations	Coeff. of correlation	Significant point (*)
850/525	LAI=0.643 (R_{850}/R_{525}) +2.103	0.6427	b
850/625	LAI=0.344 (R_{850}/R_{625}) +3.136	0.6545	b
950/400	LAI=0.408 (R_{950}/R_{400}) +0.622	0.6872	b
950/425	LAI=0.387 (R_{950}/R_{425}) +1.276	0.7411	a
950/450	LAI=0.341 (R_{950}/R_{450}) +1.787	0.7166	b
950/475	LAI=0.263 (R_{950}/R_{475}) +2.630	0.6586	b
950/500	LAI=0.390 (R_{950}/R_{500}) +1.998	0.6862	b
950/525	LAI=0.698 (R_{950}/R_{525}) +1.793	0.7190	b
950/575	LAI=0.751 (R_{950}/R_{575}) +1.815	0.7254	b
950/600	LAI=0.495 (R_{950}/R_{600}) +2.680	0.7067	b
950/625	LAI=0.383 (R_{950}/R_{625}) +2.818	0.7262	b
950/650	LAI=0.291 (R_{950}/R_{650}) +3.170	0.6809	b
950/675	LAI=0.385 (R_{950}/R_{675}) +2.512	0.6721	b
950/700	LAI=1.422 (R_{950}/R_{700}) +1.379	0.7086	b
950/750	LAI=8.076 (R_{950}/R_{750}) -3.362	0.6472	b
1050/425	LAI=0.608 (R_{1050}/R_{425}) -1.438	0.7683	a
1050/500	LAI=0.530 (R_{1050}/R_{500}) +0.613	0.6674	b
1050/525	LAI=0.842 (R_{1050}/R_{525}) +0.946	0.6627	b
1050/600	LAI=0.607 (R_{1050}/R_{600}) +1.980	0.6779	b
1050/625	LAI=0.461 (R_{1050}/R_{625}) +2.262	0.7050	b
1050/650	LAI=0.384 (R_{1050}/R_{650}) +2.356	0.6796	b

* : a=significant at error level below 1%, b=below 5%

** : Number of data analysed=11

場合には、反射率 R_{850} が主要な役割を演じ、その他として1～3個の独立変数（ここでは R_{475} 、 R_{500} と R_{575} ）を加えることで実用上十分な予測精度をもつ重回帰式が得られている。なお、この Table 3 で標準回帰係数 (S. R. C.) は、各独立変数の入力値の大小関係が式の係数に及ぼす影響を消去してある。したがって、標準回帰係数のオーダーで式に取り込む独立変数間の比重の大小を把握することができる。

Table 1 では R_{850} と並んで R_{950} も正の相関関係を示しているので、 R_{850} を予め除いた場合に重回帰式がどう変化するかをみたのが Table 1 (b) である。この場合には反射率 R_{950} が主要な役割をもち、Table 1 (a) と同様に1～3個の独立変数（ここでは R_{425} 、 R_{475} と R_{550} ）の追加ではば十分な精度の重回帰式が得られている。

2変数 R_{850} と R_{950} を共に予め除いた場合には (c)、反射率 R_{1050} が主要な役割をもち、1～8個の独立変数

（ここでは R_{425} 、 R_{450} 、 R_{625} 、 R_{600} 、 R_{575} 、 R_{650} 、 R_{750} 、 R_{475} の順となっている）を付加することで著しく高い重相関係数をもつ式が得られている。

分光反射率データの解析において、このような重回帰分析法が適用されている例はそれほど多くないが、Wiegand et al.¹²⁾ は LANDSAT データの解析から、秋播小麦の緑植生指数推定の重回帰式に MSS データのバンド 4 (0.5～0.6 μm)、5 (0.6～0.7 μm)、6 (0.7～0.8 μm)、と 7 (0.8～1.1 μm) を独立変数に取り込んでいる。

2. 表層土壌水分と分光反射率

2.1 単回帰分析による結果

表層 5 cm の平均土壌水分推定の経験式を得ることを目的として、単一の波長反射率と表層土壌水分との関係を検討した (Table 4)。5 cm 層としたのは、土壌の3相分布などの物理的特性調査においては、層の深さが一般

Table 3 Multiple regression analyses for the relationship between leaf area index (LAI) of guineagrass and spectral reflectance.

(a)

Variables	(1)		(2)		(3)	
	P.R.C.	S.R.C.	P.R.C.	S.R.C.	P.R.C.	S.R.C.
R ₈₅₀	18.0433	1.0013	18.0858	1.0037	17.8526	0.9907
R ₄₇₅	0.2185	0.1727	0.2030	0.1605	0.1825	0.1443
R ₅₀₀			-0.2730	-0.1546	-0.2835	-0.1605
R ₅₇₅					-0.2526	-0.0993
Constant	-1.9864		-1.7672		-1.5437	
Multi.correl.co.	0.9705		0.9827		0.9875	
R-square	0.9419		0.9656		0.9752	

P.R.C.: Partial Regression Coefficient for R_n,

S.R.C.: Standard Regression Coefficient for R_n.

(b)

Variables	(1)		(2)		(3)	
	P.R.C.	S.R.C.	P.R.C.	S.R.C.	P.R.C.	S.R.C.
R ₉₅₀	10.5127	1.0177	11.0402	1.0688	11.2140	1.0856
R ₄₂₅	-0.3300	-0.3581	-0.3295	-0.3575	-0.3236	-0.3511
R ₄₇₅			0.2303	0.1821	0.2446	0.1934
R ₅₅₀					0.1167	0.0566
Constant	-0.9012		-1.2527		-1.3997	
Multi. correl. co.	0.9793		0.9948		0.9962	
R-square	0.9591		0.9897		0.9925	

(c)

Variables	(1)		(2)		(3)	
	P.R.C.	S.R.C.	P.R.C.	S.R.C.	P.R.C.	S.R.C.
R ₁₀₅₀	10.4742	1.2538	10.2819	1.2308	10.0501	1.2031
R ₄₂₅	-0.6338	-0.6877	-0.6507	-0.7060	-0.7346	-0.7971
R ₄₅₀	-0.8240	-0.6297	-0.8494	-0.6491	-0.9135	-0.6981
R ₆₂₅			-0.1718	-0.1062	-0.2750	-0.1701
R ₆₀₀			-0.1109	-0.0805	-0.1926	-0.1397
R ₅₇₅					-0.2738	-0.1076
R ₆₅₀					-0.1540	-0.0905
R ₇₅₀					-7.0240	-0.1135
R ₄₇₅					-0.0468	-0.0370
Constant	-0.6704		-0.3473		1.1087	
Multi. correl. co.	0.9883		0.9961		0.9999	
R-square	0.9767		0.9923		0.9999	

* : Number of data analysed=11

Table 4 Exponential regression equations for estimating mean moisture content (W) of top soil layer 5 cm deep as a function of spectral reflectance.

Wavelength nm	Non-linear regression equations	Coeff. of correlation	R-square
400	$W=0.250 \exp (-2.17R_{400})$	-0.6612	0.4372
425	$W=0.214 \exp (-1.14R_{425})$	-0.5279	0.2787
450	$W=0.217 \exp (-1.15R_{450})$	-0.4690	0.2200
475	$W=0.183 \exp (-0.34R_{475})$	-0.2170	0.0471
500	$W=0.257 \exp (-1.54R_{500})$	-0.7697	0.5924
525	$W=0.210 \exp (-0.71R_{525})$	-0.3590	0.1289
550	$W=0.220 \exp (-0.75R_{550})$	-0.3825	0.1463
575	$W=0.202 \exp (-0.51R_{575})$	-0.4590	0.2107
600	$W=0.172 \exp (-0.07R_{600})$	-0.0707	0.0050
625	$W=0.164 \exp (-0.06R_{625})$	-0.0648	0.0042
650	$W=0.202 \exp (-0.44R_{650})$	-0.4882	0.2383
675	$W=0.219 \exp (-0.66R_{675})$	-0.6277	0.3940
700	$W=0.215 \exp (-0.62R_{700})$	-0.6267	0.3927
750	$W=0.200 \exp (-0.40R_{750})$	-0.4481	0.2008
850	$W=0.201 \exp (-0.40R_{850})$	-0.3996	0.1597
950	$W=0.216 \exp (-0.53R_{950})$	-0.5515	0.3041
1050	$W=0.206 \exp (-0.42R_{1050})$	-0.4465	0.1994

* : Number of data analysed=11

に 5 cm にとられているため、データの互換性を考慮したためである。Table 4 に示した指数式による近似は、山本ら⁹⁾ が表層 2 cm 厚さの平均土壌水分と分光反射率との関係を解析した際にも用いている。しかし、Table 4 の相関係数および R^2 値 (決定係数) からわかるように、多くの波長反射率からは十分な予測精度をもつ関係式は得られなかった。採用できるのは、反射率 R_{500} を独立変数とする式だけであろう。

2.2 重回帰分析による結果

上記のように、単一の波長反射率による回帰式では満足すべき結果が得られなかったので、多変量解析法による重回帰式の検討を行った。Table 5 には、独立変数を 3, 5, 9 個とった場合の偏回帰係数と標準回帰係数とを示している。表中の(1), (2), (3)は重回帰式に取り込んだ独立変数の違いの区分を示している。独立変数を 3 個取り込んだ(1)の場合の重回帰式は次のようになる。

$$W = -0.5788 R_{500} + 0.5076 R_{450} - 0.0477 R_{675} + 0.2355$$

独立変数を逐次増加した場合、5 個までの相関係数の増加は大きい⁸⁾、それ以降の独立変数増加による相関係数の増加は小さいので、この表層土壌水分の場合、実用的には波長 500, 450, 675, 1050, 650 nm の反射率を用いた重回帰式でよいと考えられる。

3. 地表状態推定に役立つ波長についての考察

(1) 作物繁茂度の場合

既往の関連報告の中では、各種作物の LAI 推定に役立つ波長 (以下、有効波長とよぶ) として次のような結果が得られている。

小麦¹³⁾ では衛星搭載の MSS データに対応したバンド 5 (0.6–0.7 μm) とバンド 7 (0.8–1.1 μm) が LAI 推定に有効である。同じく小麦¹⁴⁾ では衛星搭載の TM データに対応したバンド 3 (0.63–0.69) とバンド 4 (0.76–0.90) の比值などが LAI 推定に有効であるが、バンド 7 (2.08–2.35) までを使用すると推定式の相関度が高まるとしている。

水稻⁹⁾ では、TM データ対応のバンド 3 (0.63–

Table 5 Multiple regression analyses for the relationship between soil moisture content (W) for top layer 5 cm deep and spectral reflectance.

Variables	(1)		(2)		(3)	
	P.R.C.	S.R.C.	P.R.C.	S.R.C.	P.R.C.	S.R.C.
R ₅₀₀	-0.57882	-1.75372	-0.51197	-1.55116	-0.46901	-1.42100
R ₄₅₀	0.50758	1.25900	0.42726	1.05977	0.33239	0.82446
R ₆₇₅	-0.04769	-0.27746	-0.20713	-1.20593	-0.28103	-1.63618
R ₁₀₅₀			0.08938	0.57611	0.19307	1.24447
R ₆₅₀			0.06334	0.42635	0.10145	0.68283
R ₆₂₅					-0.02917	-0.18996
R ₉₅₀					-0.04400	-0.27717
R ₈₅₀					-0.00938	-0.05728
R ₅₂₅					0.01108	0.03409
Constant	0.23546		0.22874		0.23324	
Multi. correl. co.	0.96693		0.99402		0.99999	
R-square	0.93495		0.98808		0.99999	

P.R.C. : Partial Regression Coefficient for R_n,

S.R.C. : Standard Regression Coefficient for R_n,

* : Number of data analysed=11

0.69 μ m) とバンド 4 (0.76–0.90) が LAI 推定に有効である。同じく水稻¹⁵⁾ では 3 種の反射率組み合わせ、R₈₄₀/R₅₆₀, R₁₁₀₀/R₈₄₀, (R₁₁₀₀–R₈₄₀)² が LAI 推定に有効とされている。また、大豆⁷⁾ では (R₈₅₀/R₆₅₀) が LAI 推定に有効となっている。

これらをまとめてみると、波長 560–1100 nm の範囲に小麦・水稻・大豆の LAI 推定に有効な波長は含まれている。本報告で、ギニアグラスについての回帰分析から得た有効波長は、Table 1 からは波長 525, 550 と 950 nm である。また、Table 2 からは (R₉₅₀/R₄₂₅) と (R₁₀₅₀/R₄₂₅) の 2 組合せが予測にとって有効とみなされる。しかし、これらの単回帰式よりも予測精度を上げようとする場合には、Table 3 の重回帰式に頼ることになる。この場合の主要な有効波長は 850, 950 あるいは 1050 nm のより長い波長であり、これに 425–750 nm の短～中位の波長が加わることになる。このような結果は、Shibayama ら¹⁶⁾ が水稻について得ている長い波長域の反射率の組合せに近いが、一致はしていない。

上記のように、作物別の LAI 推定に有効とされる波長はまちまちである。また、いずれも因果関係をブラックボックスとしたデータ解析の結果として摘出されるもので、事前に予測されたものではない難点を有している。

この難点を克服するためには、植物の生長・発育および体内水分状態等が葉群の光学的特性に及ぼす影響についての定量的知見が必要である。さらに、もし作物の種類の数だけ LAI 推定に固有の有効な波長があるということになると、今後も多種類の作物についてのデータの集積が必要となる。

(2) 裸地の表層土壌水分の場合

各種土壌の水分含量推定の有効波長について山本ら¹⁶⁾ は、灰色低地土では 450 nm, 褐色森林土 950 nm, 黒ボク土 1000 nm, 赤黄色土 1050 nm をあげている。本研究の赤黄色砂土では、Table 4 の指数型回帰式の相関係数から判断すると、400 nm と 500 nm の反射率が表層土壌水分推定に有効であり、波長の短い領域となっている。これを山本らの報告と比較すると、灰色低地土についての有効波長に近い結果とみなされる。

重回帰分析を適用した場合に得られる表層土壌水分推定の有効波長は、Table 5 のようになっており、多くの波長が関係している。しかし、その数を 5 波長にとどめるとすると、500 nm, 450 nm, 675 nm, 1050 nm, 650 nm をあげることができる。Table 5 からわかるように、LAI 推定の場合と異なり、回帰係数の中で圧倒的な比重をもつ波長（標準回帰係数の大きい波長）がないことも

土壌水分の場合の特徴であろう。

4. 分光反射率の時刻による変化

測定時刻は正午頃を標準としたが、完全晴天日にはその他の時刻についてもデータを収集した。Table 6 には、牧草葉面の分光反射率の昼間の変動を、正午の値を基準にしたパーセントで示している。各波長ごとにその変動はまちまちであるが、概して言えば正午からの時間の隔たりにつれて反射率は変化しており、前後3時間も隔

Table 6 Fluctuation of spectral reflectance in percent during daytime.

Wavelength nm	Local time						
	9	10	11	12	13	14	15
400	200	102	102	100	100	100	100
425	200	108	108	100	100	100	126
450	126	107	102	100	100	100	100
475	159	95	96	100	100	79	100
500	159	128	120	100	100	126	126
525	100	86	96	100	100	79	79
550	126	86	102	100	100	79	126
575	126	128	152	100	100	100	50
600	126	90	110	100	100	79	50
625	126	96	110	100	100	100	50
650	159	120	128	100	100	126	63
675	100	96	100	100	126	159	79
700	126	93	98	100	100	100	50
750	126	105	96	100	100	100	25
850	126	109	88	100	100	100	20
950	126	109	96	100	100	100	25
1050	126	100	105	100	126	126	32

* : Number of data analysed=3

たった時刻での測定値の信頼度は明らかに低いとみなしてよいことがわかる。Everitt et al.⁵⁾ は測定時刻を12～14時としているが、これは安定した測定値を得られる時刻ということができる。

そこで、12～14時の数値に注目し、±5%以上の差異を示している波長をみると、475, 500, 525, 550, 600, 650, 675, 1050 nm の8波長がある。前項までに葉面積指数と土壌水分についての数多くの予測式を示したが、具体的にどの式を利用するのかの選定に当たっては、このような分光反射率の時刻による変動性を考慮するのも一つの方法であろう。なお、ここでは分光反射率の変化を安易に時刻で整理したが、一般的には太陽高度で整理すべきである。

5. 気候条件と分光反射率法の適用性

前述のように分光反射率計の使用条件として、晴天日の正午頃の太陽光照射条件の変動の少ない時刻を選んでいる。観測を行った1991年夏季は全般に天候に恵まれず、十分な観測データ数を確保できなかった。そこで、ギニアグラスの生育に対応して随時行った観測日の日照条件を日照率（＝日照時間／可照時間）でまとめた結果、観測に適するのは日照率が80%以上の快晴日であることがわかった。

Table 7 には、三重県津市における日照時間の累年（1961～1990年）観測値を用いて、月別の適用可能日数について検討した結果を示している。適用可能日数の再現期間（RP）の決定には、Hazen 法として知られている次式を用いた。

$$RP = \frac{2N}{2J-1}, \quad (\text{年})$$

Table 7 Probable number of days in respective month for the use of spectral reflectance method at Tsu city.

	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.
Mean (days)	7.68	7.52	3.06	3.10	4.84	4.58	8.94	9.74
S.D. (days)	2.70	2.77	2.41	1.66	3.16	2.73	2.95	2.57
C.V. (%)	35.2	36.8	78.8	53.6	65.3	59.6	33.0	26.4
RP10 (days)	4	4	0	2	1	1	5	7
RP 5 (days)	6	5	1	2	2	3	6	8

S.D. : Standard Deviation, C.V. : Coefficient of Variation,
RPn : Return Period of n year

* : Number of data analysed=30 (1961-1990)

ここで N は統計年数, J は適用可能日数の少ないほうから並べたときの順位数。上式の逆数は J 番目の事象の非超過確率を与える。

この Table 7 には 4 月から 11 月にかけての数値を示しているが, 作物対応の観点からすると 6～9 月の値が最も重要である。この夏季 4 か月間の月別の適用可能平均日数は 3～5 日である。1 週間に 1 回程度の観測実施を予定すると, これらの可能日が分散していればデータ収集可能日数はこれらの日数と同じとなるが, そうでない場合は実際には利用できる日数はこれらの日数をさらに下回ることになる。

次に, 再現期間 5 年と 10 年の月別可能日数をみると, 1～3 日および 0～2 日と非常に少ない値となっている。この数値から判断すると, 比較的に降雨頻度の高い津市において, 生育速度が早く, 生育期間の短い作物に対する生育モニタリングの手段としての分光反射率法の適用は, あまり大きな期待がもてないと言える。

要 約

測定波長域 400～1050 nm の小型分光反射率計による, 禾本科 1 年生牧草 (ギニアグラス) の LAI (葉面積指数) および赤黄色砂土の裸地表層土壌水分 (含水比) のモニタリングに関する実験的研究を行った。結果は次のように要約される:

- ① LAI の推定に利用できる単一波長は 525, 550 と 950 nm である (Table 1)。
- ② 1 次回帰式による LAI 推定に利用できる分光反射率の組合せは, 波長 850 nm との組合せで 2 通り, 950 nm との組合せで 13 通り, 1050 nm との組合せで 6 通りが得られた。この中で危険率 1 % で有意な組合せは (R_{950}/R_{425}) と (R_{1050}/R_{425}) の 2 組合せである (Table 2)。
- ③ LAI 推定のための重回帰式を求めた。式はその主要な独立変数となる波長が 850 nm の場合, 950 nm の場合, および 1050 nm の場合の 3 通りに分けられることがわかった (Table 3)。
- ④ 裸地表層土壌水分 (含水比) の推定に利用できる 1 次回帰式は, R_{400} あるいは R_{500} を独立変数とする指数式である (Table 4)。
- ⑤ 裸地表層土壌水分推定のための重回帰式は, 圧倒的

に比重の大きい波長がなく, 3 あるいは 5 個の独立変数を含む式で十分な予測精度を得ることができる (Table 5)。

- ⑥ ギニアグラス葉面反射率の時刻による変動を調査した。正午から前後 3 時間も隔たった時刻での測定値は, 明らかに正午値と異なるとみなしてよい (Table 6)。
- ⑦ 毎日の測定可能限界日照率を 80 % とした場合の, 分光反射率法適用の月別平均可能日数は, 津市において 4～5 月と 10～11 月には 7 日/月以上であるが, 6～9 月には 3～5 日/月であることがわかった (Table 7)。これは作物生育の盛んな時期における本法適用への気象的制約が, 当地ではかなり厳しいことを示している。
- ⑧ 使用した計器は測定波長域がやや狭く, 土壌水分推定に有効と判断されるより長い波長域が不足している。また, 測定の分解能が十分とはいえないことがわかった。

謝 辞

この研究の計画に当たり, 有益な示唆と便宜を図って頂いた, 現, 農林水産省農業環境技術研究所井上吉雄博士に対し深く感謝の意を表する。

この実験の研究課題は 1992 年 3 月卒業の黒木 卓 (現, ㈱フジタ) 君が, 卒業研究として取り組んだものであるが, 研究の実施に当たっては飯田昌弘 (現, 奈良県庁) 君の献身的協力もあった。両君の協力に感謝する。

また, 実験に当たり, 機械関係実験園場の一部使用を快諾して頂いた生物生産機械学コースの堀部和雄教授と王秀侖助手に感謝申し上げる。

引 用 文 献

- 1) ト蔵健治・山下 洋・鈴木哲夫, 静止気象衛星「ひまわり」のデータによる冷害気象の研究. 2. 昭和 55 年東北地方に発生した冷害冷害時への適用例. 農業気象, 37: 309-315 (1982).
- 2) 堀口郁夫・谷 宏・元木敏博, 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究(3) GMS (ひまわり) 赤外データによる地域分類と小地域の気温測定. 農業気象, 42: 129-135 (1986).

- 3) 谷 宏・堀口郁夫・元木敏博. 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究—GMS (ひまわり) 赤外データによる地表温度と AMeDAS 気温との関係. 農業気象, 40: 111-117 (1984).
- 4) 青木正敏・王 茂新・薮木万寿・戸塚 績. 葉のクロロフィル量の遠隔測定法に関する研究 (II) 植物群落のクロロフィル量および葉面積指数の推定に有効な分光反射特性. 生物環境調節, 24: 33-39 (1986).
- 5) Everitt, J. H., D. E. Escobar, and A. J. Richardson. Estimating grassland phytomass production with near-infrared and mid-infrared spectral variables. Remote Sensing Environ. 30: 257-261 (1989).
- 6) 井上吉雄, R. D. Jackson, P. J. Pinter, Jr. R. J. Reginato. 小麦群落の全生育期間における分光反射特性と GLAI, 体内水分含有率の関係. 日作紀, 57 (別 2) : 141-142 (1988).
- 7) 山本晴彦・本條 均. 分光反射特性を利用した暖地ダイズの葉面積指数およびバイオマスの推定. 農業気象. 46: 19-22 (1990).
- 8) 山本晴彦・本條 均・脇山恭行. 分光反射特性による九州の表層土壌水分の推定. 農業気象. 46: 223-227 (1991).
- 9) 日本リモートセンシング研究会編. リモートセンシング用語辞典. 共立出版, pp. 1-321 (1989).
- 10) Huete, A. R., R. D. Jackson and D. F. Post. Spectral response of a plant canopy with different soil background. Remote Sens. Environ., 17: 37- 53 (1985).
- 11) 田中 豊・垂水共之・脇本和昌. パソコン統計ハンドブック II 多変量解析編. 共立出版, pp. 1-403 (1984).
- 12) Wiegand, C. L., A. J. Richardson, and E. T. Kanemasu. Leaf area index estimates for wheat from LANDSAT and their implications for evapotranspiration and crop modeling. Agronomy Journ., 71: 336-342 (1979).
- 13) Aase, J. K. and Siddoway, F. H. Determining winter wheat stand densities using spectral reflectance measurements. Agron. J., 72: 149-152 (1986).
- 14) Dusek, D. A., R. D. Jackson, and J. T. Musick. Winter wheat vegetation indices calculated from combination of seven spectral bands. Remote Sensing Environment, 18: 255-267 (1985).
- 15) Martin, Jr. R. D. and J. L. Heilman. Spectral reflectance patterns of flooded rice. Photogrammetric Engng. and Remote Sensing, 52: 1885-1890 (1986).
- 16) Shibayama, M. and T. Akiyama. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relational to LAI and above-ground dry phytomass. Remote Sens. Environ., 27: 119-127 (1989).