農業気象(*J. Agr. Met.*) 46 (1): 19–22, 1990

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

山本 晴彦・本 條 均

(農林水産省九州農業試験場)

Evaluations of Leaf Area Index and Biomass of Soybean Canopies using Spectral Reflectivity

Haruhiko YAMAMOTO and Hitoshi HONJO

(Kyusyu National Agricultural Experiment Station,
MAFF, Chikugo, Fukuoka 833, Japan)

Non-attach and non-destructive measuring method for estimating leaf area index (LAI) and biomass (top dry weight) of crops was applied for soybean canopy using portable spectroradiometer under natural conditions in the western Japan.

In this paper, we tried to find the most effective band or index suitable for estimating LAI and biomass.

1) The most effective index of spectral reflection characteristics for estimating the leaf area index of soybean canopy is R_{850nm}/R_{650nm} . The regression equation is $LAI = 0.250 (R_{850nm}/R_{650nm}) - 0.149$. In this case, the correlation coefficient is 0.95.

2) The most effective index of spectral reflection characteristics for estimating the biomass in the duration from the early growth stage to the early seed development stage is R_{850nm}/R_{650nm} . The regression equation is biomass (top dry weight, $g \cdot m^{-2}$) = $21.6 (R_{850nm}/R_{650nm}) - 42.1$. The correlation coefficient is 0.96.

3) The effective index of spectral reflection characteristics for estimating the biomass in the duration from the middle seed development stage to the yellow ripe stage is R_{450nm}/R_{1050nm} . The regression equation is Biomass (top dry weight, $g \cdot m^{-2}$) = $-9070 (R_{450nm}/R_{1050nm}) + 921.8$. The correlation coefficient is -0.85 .

Key words: Biomass, Leaf area index, Soybean, Spectral reflectivity

キーワード: ダイズ, バイオマス, 分光反射, 葉面積指数

1. はじめに

九州地域のような夏季に高温環境となる地域では、暖地ダイズの生育は過繁茂状態に陥ることが多いため、生育状態を適切にする肥培管理等が必要であり、それに対する生育診断技術の確立が望まれている。すなわち、葉面積指数、バイオマス、クロロフィル含量等の作物生体

情報を非破壊・迅速かつ高精度で計測する技術の開発が急がれている。

これらに関しては、これまで水稻や小麦等の垂直葉群落構造を形成するイネ科作物についてはスペクトルフォトメーターを利用した近接リモートセンシング技術として検討が加えられ、かなりの成果があげられてきた(青木ら, 1986; 福原ら, 1978; 井上, 1988; 石山ら, 1985; Shibayama and Munakata, 1986; Shibayama and Akiyama, 1986)。また、水平葉群落構造を形成するダイズについても、Kanemasu (1974) や福原 (1984) が、

1989年12月1日 中国四国支部・九州支部合同大会にて
発表

1990年1月11日 受領, 1990年4月11日 受理

可視域の2波長の比を用いて葉面積指数の推定に有効な推定式を求めているが、高い繁茂状態にある暖地ダイズの葉面積指数の推定に適用できるかどうかは明らかでない。また、近接リモートセンシングによりダイズのバイオマスを推定した研究報告は認められない。

本研究では、暖地ダイズ群落の葉面積指数およびバイオマスを非接触、非破壊で推定する方法を確立することを目的に、手軽に使用できる携帯用分光反射計を利用した反射スペクトルの測定と実測データの対応関係を検討した。その結果、有効な推定式を求めることができたので概要を報告する。

2. 材料および方法

供試作物としてダイズを選び、品種は九州の主要品種のフクユタカを用い、条間70 cm、株間20 cmの畦立栽培とし、1989年7月12日に播種した。施肥量はアール成分量当たり0.3-1.0-1.0 kg (N:P:K)で、栽培管理は慣行法でおこなった。

分光反射エネルギーの測定は、晴天日の午前10:30から11:30の間で直達光のもとで、分光反射計(きもと製、PM-12A)を使用して、供試体に対して高さ3.5 mから測定角度を伏角45°、視野角を10°として、太陽を背にしながらおこなった。分光反射エネルギーの測定波長は、400 nmから1050 nmまでの範囲の17波長帯である。測定は、1989年8月16日から10月23日までの計9回おこなった。供試群落の分光反射率は、標準白色板からの分光反射エネルギーを基準(100%)として、供試群落の分光反射率(R%)を求めた。1回当たりの測定回数は2回であり、その平均値を測定値とした。

分光反射測定後、分光反射計の視野内に入った5株を採取し、葉面積、バイオマス(地上部乾物重量)等の調査をおこなった。

解析に当たっては、測定した17波長の中から、葉面積指数およびバイオマスの推定には7つの波長(450 nm, 550 nm, 650 nm, 750 nm, 850 nm, 950 nm, 1050 nm)とそれらの演算式を用いた。すなわち、7つの各波長の分光反射率、任意の2つの分光反射率間の比、任意の2つの分光反射率の差と和の比および任意の2つの分光反射率の差を求めて、ダイズの葉面積指数およびバイオマスとの対応関係を相関分析によって推定し、それらの有効なものを追究した。

3. 結 果

九州において8月から10月にかけて測定したダイズ群落(品種:フクユタカ)の生育に伴う分光反射特性の推移をFig.1に示した。400 nmから750 nmまでの可視域

Fig. 1. Spectral reflectances of soybean canopies at various growing stages.

の分光反射率は、生育初期には高い数値を示しているが、葉面積指数が増加するにしたがって低下した。子実肥大後期に入り葉身の黄化が始まると、分光反射率は増加し始め、とくに700 nm付近の増加は著しかった。850 nmから1050 nmまでの近赤外域の分光反射率は、生育初期には比較的低く、葉面積の増加に伴って増加し、黄化に伴う葉面積指数の低下とともに低下した。

ダイズ群落の葉面積指数と分光反射率の関係を単波長ならびに2波長の演算値をとって調べた。まず、単波長の対応関係として、 $R_{450\text{nm}}$ 、 $R_{650\text{nm}}$ 、 $R_{850\text{nm}}$ および $R_{950\text{nm}}$ をとって葉面積指数に対して相関係数を求めたところ、それぞれ-0.77、-0.79、0.71、0.70となった。なお、これら以外の波長も検討したが相関係数は低かった。

ついで7つの波長から任意の2つの分光反射率間の比、任意の2つの分光反射率の差と和の比および任意の2つの分光反射率の差を求めて、葉面積指数との相関分析をおこなった。標本数(n)は、42である。その結果、 $R_{750\text{nm}}$ 、 $R_{850\text{nm}}$ 、 $R_{950\text{nm}}$ および $R_{1050\text{nm}}$ の各分光反射率を分子とし、 $R_{650\text{nm}}$ の分光反射率を分母とする分光反射比は、葉面積指数と高い正の相関関係を示し、相関係数はそれぞれ0.94、0.95、0.94および0.93であった。それらのうち最も高い相関を示した $R_{850\text{nm}}$ と $R_{650\text{nm}}$ の分光反射率の比($R_{850\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$)と葉面積指数の関係はFig. 2に示すように、次の回帰直線式で表せることが明らかになった。予測の標準誤差(pe)は、0.49であった。

$$\text{LAI} = 0.250 (R_{850\text{nm}} / R_{650\text{nm}}) - 0.149 \quad (1)$$

$$(r = 0.95, n = 42, pe = 0.49)$$

つぎにダイズ群落のバイオマスと分光反射率との関係

Fig. 2. Relation between reflectivity ratio (R_{850nm}/R_{650nm}) and leaf area index (LAI) for soybean canopies during from the early growth stage to the yellow ripe stage. R_{850nm} and R_{650nm} are the spectral reflectivity at 850nm and 650nm, respectively.

は、生育ステージにより異なり、子実肥大初期を境にして大きな変化を示すことがわかった。そこで、バイオマスと分光反射率の関係は、子実肥大初期（9月17日）までと子実肥大中期（9月25日）から収穫直前の黄熟期までの2つの生育期に分けて相関分析をおこなった。標本数(n)は、子実肥大初期までが22、子実肥大中期から黄熟期までが20である。子実肥大初期までのバイオマスに対する R_{650nm} 、 R_{750nm} 、 R_{850nm} 、 R_{950nm} および R_{1050nm} などの単波長の相関係数は、それぞれ -0.81, 0.83, 0.88, 0.87 および 0.82 であった。なお、これら以外の波長をとった場合には、相関係数は低かった。

ついで7つの波長のうち任意の2つの分光反射率間の比、任意の2つの分光反射率の差と和の比および任意の2つの分光反射率の差を求めて、子実肥大初期までのバイオマスとの相関分析をおこなった。その結果、 R_{750nm} 、 R_{850nm} 、 R_{950nm} および R_{1050nm} の各分光反射率を分子とし、 R_{650nm} あるいは R_{550nm} の各分光反射率を分母とした分光反射比は、バイオマスと高い正の相関関係を示し、相関係数は R_{650nm} のそれを分母とした場合にはそれぞれ 0.95, 0.96, 0.95 および 0.95 であった。また、 R_{650nm} のそれを分母とした分光反射比ではそれぞれ 0.94, 0.95, 0.93 および 0.92 であった。それらのうち、 R_{850nm}/R_{650nm} と子実肥大初期までのバイオマスとの関係は、Fig. 3の●印で示したように次の回帰直線式で表せることが明らかになった。予測の標準誤差(pe)は、41.9 であった。

$$\begin{aligned} \text{Biomass (top dry weight, g} \cdot \text{m}^{-2}) \\ = 21.6 (R_{850nm}/R_{650nm}) - 42.1 \quad (2) \\ (r=0.96, n=22, pe=41.9) \end{aligned}$$

ただし、Biomass は子実肥大初期までとする。

この、(2)式を子実肥大中期から黄熟期までのバイオ

Fig. 3. Relation between reflectivity ratio (R_{850nm}/R_{650nm}) and biomass (top dry weight) for soybean canopies from the early growth stage (Aug. 16) to the early seed development stage (Sep. 17). R_{850nm} and R_{650nm} are the spectral reflectivity at 850nm and 650nm, respectively.

マス推定に適用したところ、Fig. 3の○印で示すようにバラつきが大きく、相関係数も0.65とかなり低くなる結果となった。これは、この生育時期に対しては R_{850nm}/R_{650nm} の分光反射比では十分に推定することができないことを意味する。

そこで、改めて R_{450nm} から R_{1050nm} までの分光反射率と子実肥大中期から黄熟期までのバイオマス相関係数を求めたところ、単波長では R_{450nm} の -0.84, R_{650nm} の 0.77 などが高く、これ以外では相関係数は低かった。

さらに7つの波長のうち任意の2つの分光反射率間の比、任意の2つの分光反射率の差と和の比および任意の2つの分光反射率の差などを求めて、子実肥大中期から黄熟期までのバイオマスとの相関分析をおこなった。その結果、 R_{450nm} の分光反射率を分子とし、 R_{850nm} 、 R_{950nm} および R_{1050nm} の各分光反射率を分母とする分光反射比は、子実肥大中期から黄熟期までのバイオマスに対して高い負の相関関係を示し、相関係数はそれぞれ -0.84, -0.84 および -0.85 であった。

また、 R_{850nm} 、 R_{950nm} および R_{1050nm} と R_{450nm} の分光反射率の差と和の比においても、それぞれ 0.84, 0.84 および 0.85 と高い正の相関関係を示した。それらのうち、暖地ダイズの子実肥大中期から黄熟期までのバイオマスは、Fig. 4に示したように R_{450nm}/R_{1050nm} との関係をとるのがよく、次の回帰直線式で表せることが明らかになった。予測の標準誤差(pe)は、59.9 であった。

$$\begin{aligned} \text{Biomass (top dry weight, g} \cdot \text{m}^{-2}) \\ = -9070 (R_{450nm}/R_{1050nm}) + 921.8 \quad (3) \\ (r=-0.85, n=20, pe=59.9) \end{aligned}$$

ただし、Biomass は子実肥大中期から黄熟期までのものである。

Fig. 4. Relation between reflectivity ratio ($R_{450\text{nm}}/R_{1050\text{nm}}$) and biomass (top dry weight) for soybean canopy from the middle seed development stage (Sep. 25) to the yellow ripe stage (Oct. 23). $R_{450\text{nm}}$ and $R_{1050\text{nm}}$ are the spectral reflectivity at 450nm and 1050nm, respectively.

4. 考 察

暖地ダイズ群落を対象に、可視域および近赤外域の分光反射率から葉面積指数の推定を試みた結果、暖地ダイズのような高い葉面積指数を備えた水平葉群落構造においても(1)式に示すように葉面積指数と $R_{800\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$ との間に一次の回帰式が成立し、相関係数も0.95と高いものであることがわかった。この波長域は青木ら(1986)が9種の植物について検討した $R_{800\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$ が良いとする結果にはほぼ相当するものである。しかし、我々の結果では、Kanemasu (1974)や福原(1984)がダイズ群落の葉面積指数の推定に有効であると指摘した可視域の2つの分光反射率の比、すなわち $R_{645\text{nm}}/R_{655\text{nm}}$ および $R_{650\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$ は相関係数がそれぞれ-0.87($R_{650\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$)および-0.81と低く、高い葉面積指数を有するダイズ群落を推定するのに有効な反射比ではなかった。また、Shibayama and Akiyama (1986)は、水稻の葉面積指数の推定には $R_{800\text{nm}} \sim 900\text{nm} / R_{680\text{nm}}$ の分光反射比が有効であり、1次回帰式の係数は0.224、定数項は0.372としているが、我々の値は前者が0.250、後者が-0.149で若干異なった。

以上のように、近赤外域と可視域の赤の分光反射比($R_{800\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$)を測定することによって、群落の葉面積の推定が可能であることは確かであるといえる。

バイオマスの推定法としては、ダイズの場合、生育ステージによって適用すべき分光反射の波長に差異があること、しかし、いずれも直線回帰が成り立つことがわかった。すなわち、子実肥大初期までとそれ以降の黄熟期までの期間に対して(2)、(3)式に示す関係式が得られた。福原ら(1978)も、出穂直後の小麦の分光反射デー

タを解析し、 $\log(R_{800\text{nm}}/R_{680\text{nm}})$ と乾物重の間に0.923の高い相関係数を得ていることから、近赤外域と可視域の赤の分光反射比($R_{800\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$)を測定することによって、群落のバイオマスの推定が可能であることは明らかである。

したがって、手軽に使用できる携帯用分光反射計を利用してダイズ群落の反射スペクトルを調べることによって、非接触・非破壊で葉面積指数およびバイオマスを推定することが可能となったことで、ダイズの生育状態に適した肥培管理等の生育診断にとって必要な基礎技術の確立の一助になるといえる。

5. 謝 辞

本論文の作成に当たり、山口大学農学部鈴木義則教授に校閲を賜り、貴重な御助言を頂いた。ここに厚く謝意を表します。また、分光反射計の使用にあたっては、北海道農業試験場畑作管理部畑土壌管理研究室に便宜を図って頂き、圃場の使用にあたっては、地域基盤研究部害虫行動研究室に便宜を図って頂いた。厚く謝意を表します。

引用文献

- 青木正敏・王 茂新・矢吹万寿・戸塚 績, 1986: 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.
- 福原道一・斎藤元也・安田嘉純, 1978: 小麦の分光反射特性の測定. 写真測定とリモートセンシング, 17, 15-22.
- 福原道一, 1984: 大豆の分光特性. ブラジル農業研究協力プロジェクト研究報告書, 4: 345-354.
- 井上吉雄, R. D. Jackson, P. J. Pinter, Jr., R. J. Reginato, 1988: コムギ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.
- 石山 隆・寺田真敏・岡山 浩・土屋 清, 1985: リモートセンシングにおける植生のGLAIの評価. 日本リモートセンシング学会 第5回学術講演会論文集, 199-202.
- Kanemasu, E. T., 1974: Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum and soybean. Remote Sensing of Environment, 3, 43-47.
- Shibayama, M. and K. Munakata, 1986: A Spectroradiometer for Field Use (III) A comparison of some vegetation indices for predicting luxuriant paddy rice biomass. Japan Jour. Crop Sci., 55, 47-52.
- Shibayama, M. and T. Akiyama, 1986: A Spectroradiometer for Field Use (VI) Radiometric estimation for chlorophyll index of rice canopy. Japan Jour. Crop Sci., 55, 433-438.