農業気象 (*J. Agr. Met.*) 48 (2): 165–169, 1992

携帯用分光光度計によるイネの穂の含水率の推定

山 本 晴 彦

(農林水産省九州農業試験場)

Evaluations of Panicle Water Content in Rice Canopies by Portable Spectroradiometer

Haruhiko YAMAMOTO

(Kyushu National Agricultural Experiment Station)
(MAFF, Nishigoshi, Kumamoto 861-11, Japan)

Remote sensing method with a portable spectroradiometer was applied to estimation of panicle water content in rice canopies.

1) The most effective index of spectral reflectance for estimating the panicle water content (PWC %) in rice canopies was $R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$, the ration of the spectral reflectivity at 750 nm and 650 nm, respectively. The regression equations were “ $\text{PWC} = 12.11 + 4.48 (R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}})$ ” for Reiho, and “ $\text{PWC} = 14.09 + 3.68 (R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}})$ ” for Nishihomare. The correlation coefficient were 0.980 and 0.978, respectively.

2) The observed and the estimated values of PWC were distributed on the ratio line of one to one. The correlation coefficients were 0.978 in both rice canopies for Reiho and Nishihomare. The standard error of prediction were 2.99 and 3.47, respectively.

3) Relationships between LAI and reflectivity ratio ($R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$) in rice canopies for Reiho and Nishihomare were significantly positive. The correlation coefficients were 0.992 and 0.991 for Reiho and Nishihomare at the reproductive stage.

Key words: Panicle water content, Remote sensing, Rice, Spectral reflectance.

キーワード: イネ, 穂含水率, 分光反射, リモートセンシング

1. はじめに

水稻の収穫は、穂首が黄変する時期が適期とされており、この時期の玄米の水分含量は22～26%である(江幡, 1977)。収穫が早すぎると未熟粒や青米が多くなり、収穫が遅れると立毛中に胴割れの発生が増加する傾向が認められ、とくに良食味品種では収穫時期によって玄米品質に大きな差異を生じるため、収穫が適期から外れると品質の劣化や食味の低下を招く原因になる(北農, 1982)。このように、収穫時期が米の品質や食味に大きく影響すると考えられることから、収穫の適期判定技術の開発が必要となっている。

玄米の水分含量は、少数の籾サンプルを採取して電気

1992年3月17日 受付, 1992年6月19日 受理

抵抗を利用した携帯用水分計により測定する方法が用いられているが、接触かつ破壊的な計測方法であり、広域的な測定には、多大な労力と経費が必要である。

近年、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接触・非破壊の方法で迅速かつ高精度で計測する技術の開発が進められており、イネ科作物についてもスペクトルフォトメーターを利用したリモートセンシング技術の検討が加えられ、かなりの成果があげられてきた(青木ら, 1986; 福原ら, 1978; 井上ら, 1988; 石山ら, 1985; Shibayama and Munakata, 1986; Shibayama and Akiyama, 1986)。

本研究では、リモートセンシング技術を利用してイネの穂内含水率(以下、穂含水率)を推定し、穂含水率を目安として収穫適期の判定を行う技術の開発を目的として

いる。本報では、第1ステップとして圃場で分光光度計を利用した可視域および近赤外域の反射スペクトルの測定データと穂含水率の実測データの対応関係を検討した結果、穂含水率を推定するのに有効な推定式を求めることができたので報告する。

2. 材料および方法

品種はレイホウおよびニシホマレを用い1990年および1991年に実験を行った。両年とも5月下旬に播種を行い、6月20日に実験圃場に移植した。レイホウは条間25 cm、株間21 cmで、栽植密度 1 m^2 当り19.1株、ニシホマレは条間30 cm、株間16 cmで、栽植密度 1 m^2 当り20.8株である。施肥量は10 a 当たり成分量で11-11-11 kg (N:P:K)とし、栽培管理は慣行法で行った。

分光反射エネルギーの測定は、晴天日の午前10:30から11:50の間の直達光のもとで、分光光度計(阿部設計製, 2703)を使用して、供試群落に対して高さ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行った。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、1990年は9月6日から10月22日までの計6回、1991年は9月3日から10月2日までの計3回行った。さらに、測定期間が長期間にわたっているため測定時の太陽高度が変化することが予想されたので、分光反射エネルギー測定は太陽高度がほぼ同一高度になる時間帯を選んで測定を行った。

供試群落の分光反射率は、標準白色板からの反射光の測定を行った後、供試群落の反射光を測定し、反射率 R_λ (%、波長 λ nmにおける反射率)を(1)式より求めた。なお標準白色板は粉末マグネシウムを燃焼させてアルミ板面に約2 mmの厚さに煙着させた煙着MgOを用いた。

$$R_\lambda (\%) = 10^{(V_\lambda - V_{w_\lambda})} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 V_λ は波長 λ nmにおける供試群落の反射測光電圧(V)、 V_{w_λ} は波長 λ nmにおける標準白色板の反射測光電圧(V)である。1回の測定に当たっては2反復行い、その平均値を測定値とした。

分光反射測定後、分光光度計の視野内に入った9株を採取し、ただちに穂生重量を測定した後、通風乾燥し穂乾物重を測定し、(2)式によって穂含水率を算出した。ただし、穂含水率の測定は出穂直後から黄熟期まで、レイホウで12回、ニシホマレで11回行った。

$$\text{穂含水率}(\%) = \frac{(\text{穂生重量} - \text{穂乾燥重量})}{\text{穂生重量}} \times 100 \quad (2)$$

解析に当たっては、1990年に測定した波長の中から、可視域の青、緑、赤に対応した3波長(450 nm, 550 nm, 650 nm)および近赤外域の4波長(750 nm, 850 nm, 950

nm, 1050 nm)の分光反射率を用いることにした。そして、可視、近赤外域の7つの各波長の分光反射率、さらに分光反射特性の解析法として一般的に利用されている任意の2つの分光反射率間の比、差と和の比および差を求めて、イネの穂含水率の実測値との対応関係を相関分析し、最も相関係数の高い演算式を求めた。また、相関分析法によって求められた推定回帰式の年次間にわたる有効性を検討するため、相関分析に用いなかった1990年および1991年の測定データを利用し、実測値と推定回帰式による推定値との相関関係を検討した。

3. 結 果

3.1 イネ穂含水率の推移

出穂期は、レイホウが1990年8月29日、ニシホマレが9月2日で、レイホウは平年より6日も早く出穂した。1990年における出穂直後から黄熟期までのレイホウおよびニシホマレの穂含水率の推移ならびに降水量の推移をFig. 1に示した。出穂直後からの穂含水率の低下は、レイホウでは出穂1日後では59~68%とサンプル間でもかなりの差異があるのに対して、ニシホマレでは約66%で、サンプル間の差異は小さかった。穂含水率は、両品種とも同様な低下傾向を示しているが、ニシホマレでは出穂40日以降の穂含水率の低下が大きかった。両品種とも、登熟後期で若干の穂含水率の上昇が認められているが、これは10月6日~8日に降った60 mmの降水が影響したものと考えられる。

3.2 イネ群落の分光反射率の推移

1990年9月6日から10月22日にかけて測定したイネ群落(品種:レイホウ)の生育に伴う分光反射特性、穂含水率および葉面積指数の推移をFig. 2に示した。400

Fig. 1. Changes of panicle water content of rice plants at reproductive stage in 1990.

Fig. 2. Spectral reflectances, panicle water content (PWC) and leaf area index (LAI) in rice canopies at reproductive stage in 1990.

nmから700 nmまでの可視域の分光反射率は、9月6日は低い数値を示しているが、穂含水率が低下するにしたがって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。750 nmから1050 nmまでの近赤外域の分光反射率は、葉面積指数が高い出穂期では高い反射率を示しているが、葉面積指数の低下とともに反射率は急激に低下した。

3.3 イネ穂含水率の推定に有効な分光反射特性

まず、1990年に測定した波長の中から単波長の対応関係として、 $R_{450\text{nm}}$ (450 nmにおける分光反射率、以下 $R_{x\text{nm}}$ と示す)、 $R_{560\text{nm}}$ および $R_{660\text{nm}}$ をとって穂含水率に対する相関係数を求めたところ、レイホウはそれぞれ-0.869, -0.923, -0.922、ニシホマレではそれぞれ-0.964, -0.974, -0.959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、差と和の比および差を求めて、穂含水率との相関分析を行った。標本数(n)は、レイホウ31、ニシホマレ19である。その結果、 $R_{750\text{nm}}$ の各分光反射率を分子とし、 $R_{450\text{nm}}$ 、 $R_{560\text{nm}}$ および $R_{660\text{nm}}$ の分光反射率を分母とする比は、穂含水率と高い正の相関関係を示し、相関係数はレイホウがそれぞれ0.921, 0.899および0.980、ニシホマレがそれぞれ0.973, 0.964および0.978であった。それらのうち最も高い相関を示した $R_{750\text{nm}}$ と $R_{660\text{nm}}$ の分光反射率の比($R_{750\text{nm}}/R_{660\text{nm}}$)と穂含水率の関係はFig. 3に示すように、次の回帰直線式で表せることが明らかに

Fig. 3. Relation between reflectivity ratio ($R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$) and panicle water content in rice canopies for Reiho and Nishihomare. $R_{750\text{nm}}$ and $R_{650\text{nm}}$ are the spectral reflectivity at 750 nm and 650 nm, respectively.

なった。

品種：レイホウ

$$\begin{aligned} \text{Panicle water content (\%)} \\ = 12.11 + 4.48 (R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}) \quad (3) \\ (r=0.980, n=31) \end{aligned}$$

品種：ニシホマレ

$$\begin{aligned} \text{Panicle water content (\%)} \\ = 14.09 + 3.68 (R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}) \quad (4) \\ (r=0.978, n=19) \end{aligned}$$

ここで、予測の標準誤差(sep)は、それぞれ2.89, 3.74であった。

3.4 イネ穂含水率の推定回帰式の有効性の検討

相関分析法によって求められた推定回帰式の年次間にわたる有効性を検討するため、相関分析に用いなかった1990年および1991年の分光反射データおよび穂含水率の実測データを使用して、レイホウおよびニシホマレの穂含水率の実測値と推定回帰式による推定値との対応関係をFig. 4に示した。標本数(n)は、レイホウ23、ニシホマレ18である。実測値と推定値の関係は、いずれの品種による場合ともほぼ1:1ライン上に分布しており、相関係数は両品種とも0.978で、きわめて高い関係を示すことが明らかになった。また、予測の標準誤差も、レイホウで2.99、ニシホマレで3.47であり、両品種に対す

Fig. 4. Relationships between observed and estimated panicle water content (PWC) in rice canopies for Reiho and Nishihomare in 1990 and 1991.

る推定回帰式は高い精度を有することが立証された。

4. 考 察

平木ら(1988)は、分光測定装置を用いてイネ群落の分光反射率を400 nmから1900 nmにかけて測定し、イネ穂含水率の推定に有効な分光反射特性を検討しているが、近・中赤外域の反射係数との相関係数は低く、 $R_{660\text{nm}}/R_{860\text{nm}}$ 、 $R_{840\text{nm}}/R_{660\text{nm}}$ 、 $R_{840\text{nm}}/R_{480\text{nm}}$ を3変数とする重回帰式で相関が最も高く、寄与率は0.86であったことを報告している。

ここでは、暖地におけるイネ群落(品種:レイホウおよびニシホマレ)を対象に、晴天日かつ太陽高度がほぼ等しい測定条件下において、可視域および近赤外域の分光反射率から穂含水率の推定を試みた結果、(3)および(4)式に示すように穂含水率と $R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$ との間に一次の回帰式が成立し、相関係数もそれぞれ0.980、0.978と高いことを示し得た。さらに、推定回帰式の有効性を検討した結果、実測値と推定値との間には、高い相関関係(0.978)が認められ、予測の標準誤差も2.99および3.47であり、年次間にわたり一次回帰式の有効性が実証された。予測の標準誤差が2.99、3.47であったことから、収穫適期とされる時期の玄米の水分含量の22~26%を推定することは可能であると考えられる。

したがって、手軽に使用できる携帯用分光光度計を利用して、イネ群落の反射スペクトルを調べることで、非接触・非破壊的に穂含水率を推定することが可能となった訳で、イネの良食味化を考慮しての収穫適期判定に必要な基礎技術の確立の一助になると期待される。

供試した2品種の一次回帰式の係数は、レイホウで4.48、ニシホマレで3.68であり、品種間に差異が認められた。これは、籾の黄化程度と穂含水率との関係が品種

Fig. 5. Relation between leaf area index and reflectivity ratio ($R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$) in rice canopies for Reiho and Nishihomare. $R_{750\text{nm}}$ and $R_{650\text{nm}}$ are the spectral reflectivity at 750 nm and 650 nm, respectively.

により異なることが影響しているものと考えられる。さらに、本実験において登熟期のイネ群落のLAIと $R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$ の間には、レイホウで0.992、ニシホマレで0.991の高い正の相関関係が認められた(Fig. 5)。近赤外域と可視域の赤の分光反射比からLAIを推定した多くの研究結果(青木ら, 1986; Shibayama and Akiyama, 1986; 山本・本條, 1990)から推察するに、イネ群落の $R_{750\text{nm}}/R_{650\text{nm}}$ の変化は直接的にはLAIの減少や穂の表面色の黄化がもたらしたスペクトルの変化を測定しているのに過ぎない可能性も示唆されることから、穂のみの反射スペクトルの測定データの取得して解析を行う必要がある。

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。

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.
江幡守衛, 1977: 食用作物学. 養賢堂, 119-121.
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. 写真測量とリモートセンシング, **17**, 15-22.
平木永二・芝山道郎・山形与志樹・秋山 侃, 1988: リモートセンシングによる稲穂水分の推定. 日本農業気

- 象学会昭和 63 年度全国大会講演要旨, 72-73.
- 北農研究成果シリーズⅦ, 1982: お米の味—その科学と技術—, 北農会, 1-87.
- 井上吉雄, R. D. Jackson, P. J. Pinter, 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, 109-202.
- 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.
- 山本晴彦・本條 均, 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. 農業気象. **46**, 19-22.