

## 作物群落の生産機能および状態の非破壊非接触 診断に関する研究

### 第5報 群落表層における分光反射率分布の解析と分光 反射率による葉身クロロフィル濃度の推定\*

井 上 吉 雄

(農林水産省農業研究センター)

昭和62年6月6日受理

**要 旨：**作物群落における葉身クロロフィル (Chl) 濃度を遠隔推定するための基礎として、数種作物について群落表層葉身群の Chl 濃度の面的分布および分光反射率の面的分布を解析した。分光反射特性に基づいた Chl 濃度推定モデルの作成とその問題点についても検討した。群落上層に位置する活動中心葉の Chl 濃度は、ほぼ正規分布に従った (第2図)。ドラムスキャナによるカラー写真の光学的濃度解析からみた群落表層葉群の分光反射率は、視野の取り方によっては2山型の分布となった。分光反射率の分布は、実際の葉群の Chl 濃度の分布特性とは一致しなかった (第3A～B図, 第4A～B図)。写真解析における光学的濃度の平均値には、特に葉影の有無が強く影響し、一枚の葉の中でも角度によって濃度は微妙に変化した (第3C図, 第4C図)。影の部分をついてできるだけ避けるような視野を選ぶことによって、平均値とモードの差は改善された (第4D図)。トウモロコシとダイズにおいては、550 nm の分光反射率は葉身 Chl 濃度に対応して最も大きく変動し、逆に750～1,050 nm の反射率は群落の Chl 濃度に最も影響されなかった。個葉 Chl 濃度と分光反射率比  $\rho_{850}/\rho_{550}$  の間には、トウモロコシで  $r=0.67^{**}$ 、ダイズで  $r=0.83^{**}$  の相関関係が得られた。 $\rho_{850}/\rho_{550}$  と実測した葉身 Chl 濃度の関係は作物によって大きく異なり、作物間の差には比葉面積 (SLA) が強く関係していた (第1表, 第5図)。

**キーワード：**画像解析, 作物生育診断, テクスチャ解析, 分光反射率, リモートセンシング, 葉身クロロフィル濃度。

**Remote-Monitoring of the Physiological-ecological Status of Crops** V. Texture analysis of canopy reflectance based on optical density in photographs and remote estimation of leaf chlorophyll concentration by spectral reflectances: Yoshio INOUE (*National Agriculture Research Center, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan*)

**Abstract:** The objective of the present study was to obtain basic knowledge necessary for monitoring the physiological and ecological status of crops in fields by remote methods. The texture of reflectance within corn and soybean canopies was estimated from drum scanner analysis of color photographs, and compared with the actual distribution of leaf chlorophyll concentration (Chl) in the canopy. A model that estimated leaf Chl using multispectral remote sensing techniques was also examined. Actual Chl within the canopy had a near normal distribution (Fig. 2). However, the distribution of optical density in canopy photographs usually had a bimodal distribution pattern, which did not correspond with the actual distribution of Chl of leaves (Fig. 3A～B, Fig. 4A～B). The mean value of optical density was strongly affected not only by the color of each plant element but also by the degree of shading and angle of each leaf (Fig. 3C, Fig. 4C). The difference between the distribution mode and mean was reduced by avoiding the shaded parts (Fig. 4D). The spectral reflectance data from both crops revealed that wavelengths centered at 550 nm (Red) were most sensitive to the canopy Chl, while those in a near infrared region 750～1,050 nm (NIR) were least sensitive. Statistically significant correlations were found between the ratio of NIR to Red reflectances (850 nm/550 nm) and leaf Chl for corn (0.68\*\*) and soybean (0.83\*\*). Differences between the regression lines for the two crops were attributed to leaf thickness (SLA) (Table 1, Fig. 5).

**Key words:** Diagnosis of crop growth, Image analysis, Leaf chlorophyll concentration, Remote sensing, Spectral reflectance, Texture analysis.

著者らは、群落-環境系における気温、飽差、日射量などの微気象データと群落からの電磁波データを同時計測し、それらの環境生理的關係の解析と物理法則に基づいたモデル化によって、蒸散速度や光

合成活性、ストレス反応などの生理的機能・状態を遠隔的にモニタリングするための検討を行っている<sup>3,4,5,6)</sup>。このような遠隔的モニタリング手法は非破壊非接触、定量的、リアルタイム、省力的などいくつかの特徴的な利点をもっており、作物生育の診断と予測、さらには実際の作物の栽培管理や収量

\* 大要は日本作物学会第182回講演会 (1986年10月) で発表。

予測にとって有用な情報源になりうると考えられる。

葉身クロロフィル濃度あるいは葉身窒素濃度は光合成速度に強く影響することが明らかにされており<sup>6,7,16)</sup>、かつ、これらは栽培管理で比較的制御しやすい形質である。これまでに、葉色を栽培に利用するための方法として、葉色診断法<sup>10)</sup>や葉緑素計が開発されている<sup>19)</sup>。一方、リモートセンシングの分野では湖水のクロロフィル濃度<sup>21)</sup>、群落の繁茂度、LAI (葉面積指数) やバイオマス<sup>1,9,12,13,14,17,18)</sup>、土地面積当たりクロロフィル量<sup>15,18)</sup>などを分光反射特性によってマクロに推定する試みが行われており一定の成果を挙げている。これをさらに作物個葉のクロロフィル濃度として、蒸散速度等の生理的機能と同時に遠隔的に推定できれば、栽培管理上有用な情報の一つになろう。

本報では、群落における作物のクロロフィル濃度を遠隔的に推定するための基礎として、数種作物について群落表層葉身群の分光反射率の面的分布とクロロフィル濃度の面的分布について検討した。さらに、分光反射特性に基づいたクロロフィル濃度の推定モデル作成とその問題点について論じた。

## 材 料 と 方 法

測定対象としてはおもにトウモロコシとダイズ、オオムギの圃場群落を用い、ほかにイタリアンライグラス、ヒマワリ、カンショの圃場群落についても同様の調査を行った。群落はすべて栄養生長中期～生殖生長初期にあり、草冠はよく発達していた。

分光反射率の面的分布の解析には群落のカラー写真を用い、ドラムスキャナシステム (阿部設計, 2605 型) および自作したパーソナルコンピュータ画像解析システムによって、光学的な RGB (赤緑青) 濃淡の分布解析を行った。

群落の分光反射率の測定にはポータブルフォトメータ (阿部設計, 2703MM 型) を用いた。センサの測定波長は 400~1,050 nm, 半値幅 10 nm の 17 段階で、視野角は 2° とした。基準の白色反射板としては印画紙の裏面を用い、その反射率は硫酸バリウムスプレーを塗布した標準白板により検定した。測定は原則として群落の斜め上方から行った。計測したスペクトルデータはすべて小型のデータログに自動記録し、他の多次元計測データと同様、RS-232C を介して連結されたコンピュータ上にファイル化した (第 1 図)。使用したポータブルフォトメータは 1 回の全波長域の走査に約 50 秒を要した。なお、推定モデルとしては適用範囲が広いことが望ましく、また測定条件を狭く限定することも実際には困難であるので、ここでは逆光になることを避けた以外、測定条件はできるだけ広範囲にとった。

葉身クロロフィル濃度の直接的測定には透過光式の葉緑素計 (Minolta, SPAD-501) を用い、分布の検討には 1,000 反復程度、その他は 50 反復以上測定して平均値を用いた。

## 結 果 と 考 察

遠隔測定においては、直接的な測定の対象となるのは群落上層に分布する葉である。そこでまず、群

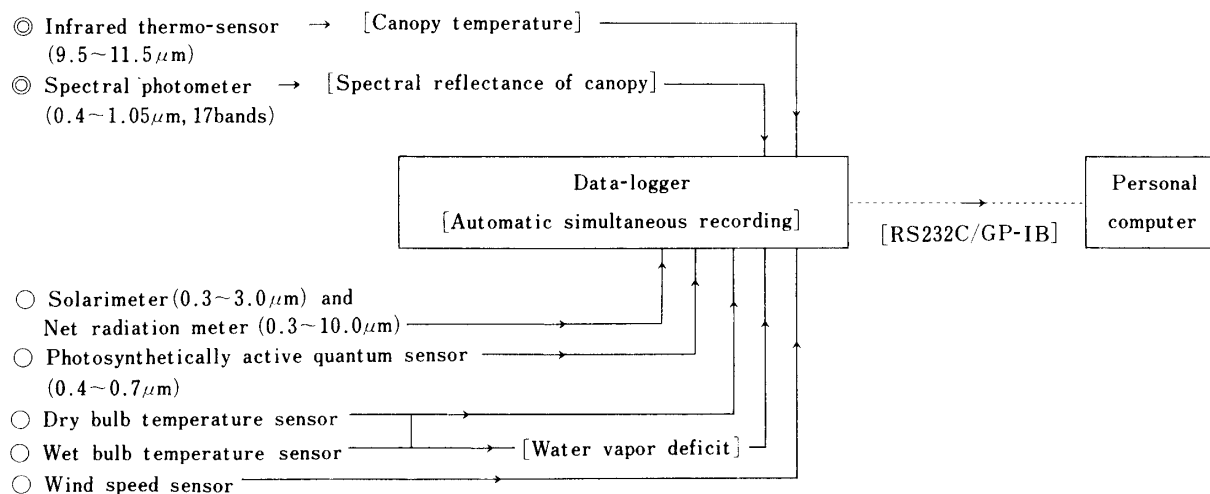


Fig. 1. Multi-sensing system of the crop-environmental systems in the field.

Note; ◎: Optical or electromagnetic information from crops,

○: Micrometeorological information.

落上層に分布する葉のクロロフィル濃度の実際的な分布を調べた。結果を第2図に示す。これは、出穂前のオオムギ（ドリムギ）の群落について、表層に分布する活動中心葉のクロロフィル濃度を1,000箇所測定したものの頻度分布である。この図から、クロロフィルの濃度分布はほぼ正規分布に近い分布をとっていることが明らかである。また、これと同様の結果は他の作物についても得られた。

したがって、圃場群落における葉身クロロフィル濃度の代表値としては、ここで得られた多数の反復の平均値を用いることが妥当であると考えられる。群落の代表値を得るためには本実験で測定したように必ず多くの反復を必要とする。一方、分光器を用いれば、群落の任意の視野について、集約値としての分光学的情報が一瞬にして得られる。しかし、以下に検討するように、その光学的情報から群落の真の代表値に近い値が推定できるかどうかの問題である。

光学的測定の場合には視野内の不均一性ないしは分布が常に問題になるので、まず、カラー写真データに基づいて群落表層葉の光学的濃度の面的分布について調べた。解析結果を第3A～C図および第4A～D図に示す。第3A～C図は出穂前のオオムギ群落、第4A～D図はトウモロコシ群落についての結果である。第3B図および第4B図は、それぞれオオムギおよびトウモロコシのカラー写真（第3A図、第4A図）におけるRGB濃淡の面的頻度分布である。これらの図にみられるように、カラー写真の光学的濃淡からみた群落表層葉群の分光反射率は、視野の取り方によっては2山型の分布となる。すなわち、視野の平均的な分光反射率は群落表層に

おける葉身自体の反射率、あるいは第2図で確認したような実際の葉群クロロフィル濃度の分布特性とは大きくずれることがわかった。また、RGB 3色が同様のパターンを示すこともこの図から確認された。

つぎに、頻度分布図に表わされた各相対濃度をもつ点が、実際にどのような面的分布をしているかをみた。G（緑）について相対濃度90付近を中心にレベルスライスして図化したものが、それぞれ第3C図（オオムギ）と第4C図（トウモロコシ）である。これらの図から明らかなように、とくに葉影の有無が光学的濃淡に強く影響し、さらに一枚の葉の中でも角度の違いによって濃度は微妙に変化することがわかる。ところで、一般にカラー写真のもつ色情報は、露出やフィルムの分光的特性、被写体のコントラストなどによって大きく変化する。すなわち、カラー写真の光学的濃淡は必ずしも分光反射率と同値ではない。しかし、この点を考慮してもなお、カラー写真が実際の光学的濃度分布をかなり忠実に再現していることは明らかであり、ここで得られた結果から、実際の分光反射率の面的分布の傾向を推定することは可能であると考えられる。なお、相対的比較ではなく、より絶対的な比較のためには標準色板を写し込むなどの方法がある。

第4C図を参照しながら影の部分をはできるだけ避けるようにして視野を選び、その視野内の画素について光学的濃度の頻度分布をみた（第4D図）。このように影の少ないような視野をとることによって平均値とモードの差は改善されるが、群落表層面を巨大な一枚の葉とみなして測定するには<sup>1)</sup>、なお葉影が本質的な誤差要因になると考えられた。

つぎに、トウモロコシとダイズの葉身クロロフィル濃度と分光反射率の関係についての検討結果を第1表と第5図に示した。測定対象のトウモロコシおよびダイズの葉群の葉色は、濃緑色（クロロフィル濃度で約  $60 \mu\text{g cm}^{-2}$ ）から淡黄色（同約  $10 \mu\text{g cm}^{-2}$ ）までの広範囲であった。これらは農業研究センター実験圃場における多くの処理区から選ばれたもので、葉色の範囲は通常の圃場で起こる濃度範囲を十分カバーしている。このような測定対象の特性の差は、反射率の変動係数が最小の波長における反射率と、変動係数が最大の波長における反射率の違いに最もよく表わされ则认为、作物ごとに各波長における反射率の変動係数を調べた。その結果、550 nm（赤）付近で最大、750～1,050 nm（近赤外）

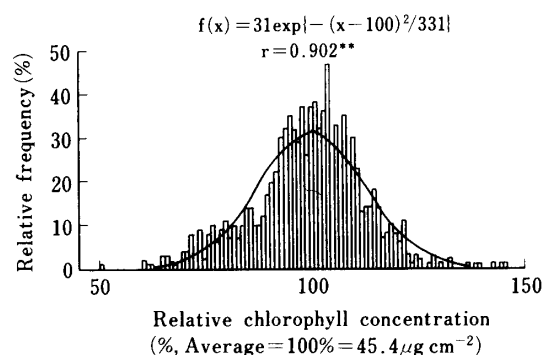


Fig. 2. Actual distribution of chlorophyll concentration of leaves in a barley canopy.

Note; One thousand points were measured within a canopy by a chlorophyll meter.

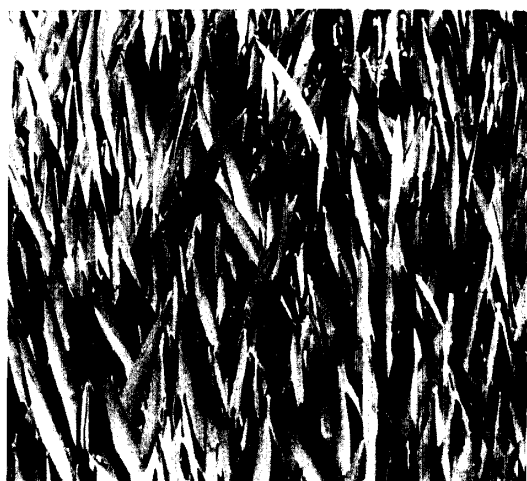


Fig. 3A. Natural color photograph of a barley canopy.



Fig. 3C. Distribution diagram of level-sliced relative optical density in the green band.  
Note; The threshold numbers represent relative density of each slice level.

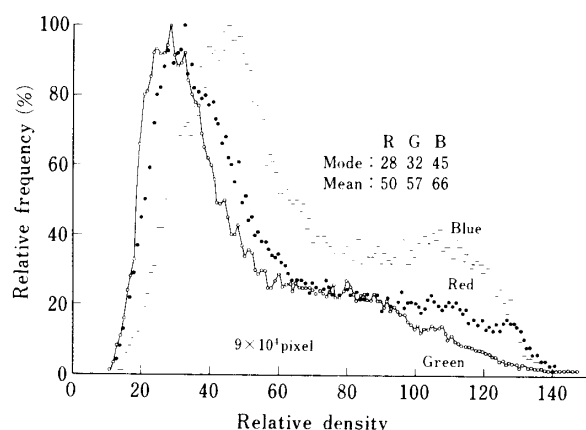


Fig. 3B. Frequency distribution of optical density in red, green and blue bands obtained by drum scanner analysis of Fig. 3A.

で最小の変動係数が得られた。すなわち本実験の測定範囲では、実際のクロロフィル濃度の変化に対する波長別の感度は550 nm付近で最も高く、逆に750~1,050 nmの反射率は葉身のクロロフィル濃度に最も依存しなかった。

そこで、850 nmの反射率  $\rho_{850}$  を基準にした各波長 (x) の分光反射率比  $\rho_{850}/\rho_x$  と葉身群のクロロフィル濃度の関係を検討した (第1表)。Inada<sup>2)</sup> が個葉について得た結果と同様の550 nm付近のほか、700 nmにも比較的高い相関が認められた。しかし、いずれにしても相関係数は個葉について報告されている0.95という値に比べてかなり低いものになった。その原因として考えられるのは、前述した葉影のような面的な不均一性と、この実験では天候条件として曇天から快晴までいろいろな場合を含んでいるという二つの点が大きいと思われる。さらに、群

落を対象とする場合には、分光反射率は表面の光学的濃度だけでなく群落内の立体的な幾何学的構造とバイオマスによって大きく影響される。したがって、分光反射率は少なくともバイオマスと表面濃度の2要因の関数として考える必要がある。両方の作物を込みにした場合には相関係数はさらに低下し、葉身クロロフィル濃度の推定という面からは、多くの作物に共通の関係式を利用できる可能性は低いと思われる。

個葉クロロフィル濃度と相関係数の最も高かった分光反射率比  $\rho_{850}/\rho_{550}$  の関係を、作物ごとに第5図に示した。この図で明らかなように、分光反射率比  $\rho_{850}/\rho_{550}$  と実測した葉身クロロフィル濃度の関係は作物によって大きく異なる。葉の厚みの指標として、両者のSLA (比葉面積) を実測し図注に示した。トウモロコシのSLAは平均  $212 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ 、ダイズでは平均  $406 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$  で、ダイズとトウモロコシのSLAの比は約2、すなわちトウモロコシの葉の厚みはダイズのその約2倍であることがわかる。一方、各作物についての回帰直線の傾きはトウモロコシで8.39、ダイズで3.15と約2.6倍になっている。したがって、両作物におけるクロロフィル濃度と分光反射率比の関係の差のかなりの部分 (単純計算で約7割) は、両者の葉の厚みの違いによるものと推定される。

以上のように両者の回帰式の差はおもに葉の厚みの影響と考えられるが、個葉の反射率には、そのほか葉の内部構造や、毛の有無など作物に固有な要因も影響することが明らかにされている。すなわちマ

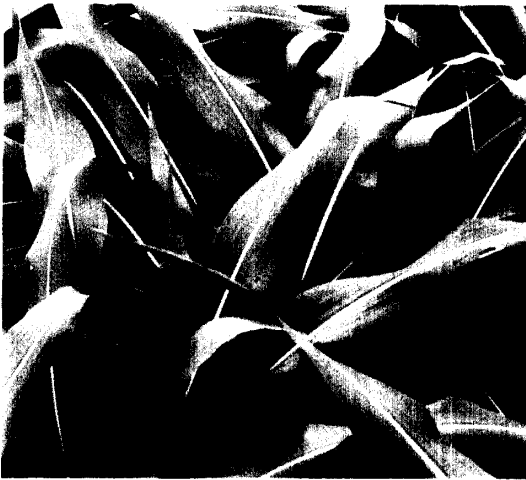


Fig. 4A. Natural color photograph of a corn canopy.



Fig. 4C. Distribution diagram of level-sliced relative optical density in the green band.

Note; The threshold numbers represent relative density of each slice level.

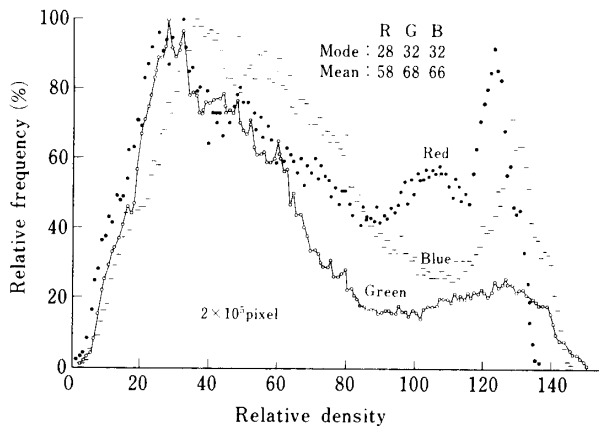


Fig. 4B. Frequency distribution of optical density in red, green and blue bands obtained by drum scanner analysis of Fig. 4A.

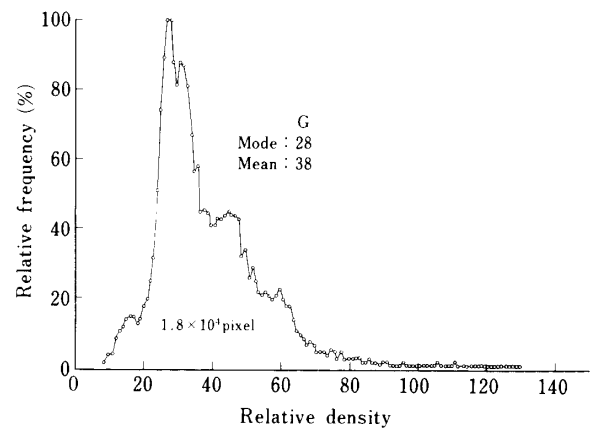


Fig. 4D. Frequency distribution of optical density in the green band for a part selected so as to reduce shaded parts in the Fig. 4C.

メ科では表面に柵状組織、裏面に海綿状組織が分布していて、両者の内部反射はかなり異なっており、一方、トウモロコシでは両組織が分化しておらず、表裏面の反射率の差は小さい<sup>11,20)</sup>。また、葉の表面にある毛の密度やロウ状物質があるかないかなどの影響も無視はできないといわれている<sup>11,20)</sup>。したがって、分光反射特性を利用したクロロフィル濃度の推定式は、このような各作物の特性を考慮しながら作成する必要があると思われる。相関係数はトウモロコシで0.67\*\*、ダイズで0.83\*\*で、統計的には有意であるが比較的低い値であり、同じ作物においても葉の厚みが気象や栽培条件によって異なってくることなどを考慮すると、このままではあまり推定精度はあがらないと思われる。なお、葉色による診断<sup>10)</sup>においても、汎用化する場合には本実験結果

と同様、葉身クロロフィル濃度と葉色の関係に対する葉の厚みの影響も考慮する必要がある。

前述したように群落を対象としてマクロに観測する場合には、反射率は群落葉層全体の特性によって影響される。したがって、分光反射率は葉表面の光学的濃度と群落内の立体的な幾何学的構造およびバイオマスの影響が総合されたものとして求められる。実際に、同一の LAI をもち幾何学的構造の異なる2つのコムギ品種の群落は、異なった反射率をもつことが報告されている<sup>8)</sup>。したがって、単位土地面積あたりの総量として推定するのがより直接的であるが<sup>15,18)</sup>、個体あるいは個葉のクロロフィル濃度の診断には、バイオマスあるいは LAI を別々の波長を利用するなど何らかの方法で分離して同時に検出し、推定に利用することが必要であろう。単位

Table 1. Relationship between the reflectance ratio  $\rho_{850}/\rho_K$  and chlorophyll concentration of leaves in corn and soybean.

W.L. (nm)	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	750	850	950	1050
r(a)	0.49	0.48	0.47	0.47	0.64	0.86	0.83	0.86	0.86	0.82	0.79	0.67	0.82	0.42	-	-0.16	-0.12
(b)	-0.53	-0.53	-0.49	-0.42	-0.08	0.49	0.67	0.63	0.49	-0.10	0.03	-0.03	0.63	0.51	-	-0.01	-0.10
(c)	-0.23	-0.25	-0.25	-0.16	-0.02	0.36	0.47	0.38	0.33	0.10	0.09	0.08	0.57	0.49	-	-0.09	-0.13

Note; W.L.: Wave length, r: single correlation coefficient.

(a): Corn, (b): Soybean, (c): Combined.

土地面積あたりの総クロロフィル量の推定値をバイオマスあるいは LAI で割るなどの補正をすることによって、葉身クロロフィル濃度の平均値や葉面積などのより作物生理的な形質の推定に結びつけることができると考えられる。

以上、葉身クロロフィル濃度を分光反射特性によって非接触で推定する方法について若干の検討を行った。このような方法は、分光センサとモデルによって、作物群落における葉身のクロロフィルの平均濃度を瞬間的に推定できるという利点は持っているが、個葉についての測定とは異なり影などの面的な不均一性の問題や葉の厚みの問題があることが明らかになった。しかし、今後の可能性として、葉の厚みや形態的な構造を考慮したパラメータを各作物について決めること、群落の分光反射率に対するバイオマスあるいは LAI と個葉の光学的濃度の寄与率を分離すること、およびモデルによって天候などの計測条件の影響を消去するなどの対策によって、推定精度を上げることができると思われる。

**謝辞:** 本研究を遂行するにあたり、画像解析そのほかについて有益な助言を頂いた棟方 研博士 (現在東北農試), U.S. Water Conservation Laboratory (U.S.A.) の Dr. Ray D. Jackson, Dr. Paul J. Pinter, Jr. と Dr. Susan M. Moran に深謝します。

### 引用文献

- Curran, P.J. 1981. Multispectral remote sensing for estimating biomass and productivity. In *Plants and the Daylight Spectrum*. (Ed). H. Smith, Academic Press, London. 65-99.
- Inada, K. 1985. Spectral ratio of reflectance for estimating chlorophyll content of leaf. *Japan. J. Crop Sci.* 54: 261-265.
- 井上吉雄 1986. 作物群落の生産機能および状態の非破壊非接触診断に関する研究. 第1報 自然条件下における作物キャノピーの熱画像解析. 日作紀 55: 261-268.
- 1987. ———.

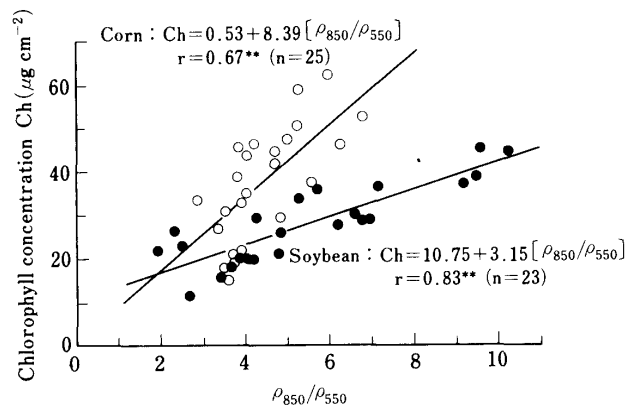


Fig. 5. Relationship between the reflectance ratio  $\rho_{850}/\rho_{550}$  and chlorophyll concentration of leaves in corn and soybean.

Notes; 1) Data were obtained under sky conditions from cloudy to blue clear.

2) Specific leaf area (SLA) was  $211 \text{ cm}^2 \text{g}^{-1}$  for corn and  $406 \text{ cm}^2 \text{g}^{-1}$  for soybean.

第2報 赤外線放射センサによるトウモロコシキャノピー温度の特性および気象要因との関係. 日作紀 56: 30-37.

5. ——— 1987. ———.

第3報 群落放射温度と微気象データの多次元センシングによるトウモロコシ蒸散速度の遠隔推定. 日作紀 56: 337-344.

6. ——— 1987. ———.

第4報 野外条件下における光合成速度と蒸散速度の定量的関係. 日作紀 56: 474-481.

7. 石原 邦・飯田 修・平沢 正・小倉忠治 1979. 水稻葉身の窒素濃度と光合成速度との関係—気孔開度・気孔伝導度に着目して—. 日作紀 48: 543-550.

8. Jackson, R.D., and P.J. Pinter, JR. 1986. Spectral response of architecturally different wheat canopies. *Remote Sens. Environ.* 20: 43-56.

9. Jordan, C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50: 663-666.

10. 松崎昭夫・刈屋国男・町田寛康・角田公正 1980. 水稻の生育調節と栄養診断に関する研究. 第1報 色票による葉色診断と単位面積当たり穎花数の推定. 日作紀 49: 439-444.

11. Pearman, G.I. 1966. The reflection of visible radiation from leaves of some western Australian species. *Aust. J. Biol. Sci.* 19: 97—103.
12. Richardson, A.L. and C.L. Wiegand 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogram. Eng. and Remote Sens.* 43: 1541—1552.
13. Rouse, J.W., R.H. Hass, J.A. Schell and D.W. Deering 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS; 3rd ERTS Symp., NASA SP-351 I: 309—317.
14. Shibayama, M. and K. Munakata 1986. A spectroradiometer for field use. II. Biomass estimates for paddy rice using 1,100 and 1,200 nm reflectance. *Japan. J. Crop Sci.* 55: 28—34.
15. ——— and T. Akiyama 1986. A spectroradiometer for field use. VI. Radiometric estimation of chlorophyll index of rice canopy. *Japan. J. Crop Sci.* 55: 433—438.
16. 武田友四郎・玖村敦彦 1957. 水稻における収量成立過程の解析. (I) 窒素条件が葉面積, 同化能率及び呼吸能率に及ぼす影響. (II) 受光態勢並びに物質生産過程に及ぼす窒素条件の影響について. *日作紀* 26: 165—175.
17. Thomas, J.R. and A.H. Gerbermann 1984. Yield/reflectance relations in cabbage. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 43: 1257—1266.
18. Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127—150.
19. 渡辺 苞・畑中 勇・稲田勝美 1980. デジタル式葉緑素計の開発. 第1報 構造と性能. *日作紀* 49(別1): 89—90.
20. Woolley, J.T. 1971. Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiol.* 47: 656—662.
21. 安岡善文・宮崎忠国 1977. 遠隔計測による霞ヶ浦の定量的水質計測 (クロロフィル a の定量). 国立公害研究所研究報告 6: 85—93.