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*

井 上 吉 雄

(農林水産省農業研究センター)

昭和 60 年 9 月 26 日受理

栽培管理あるいは生育予測の基礎には圃場群落の生理生態的機能と状態を的確にモニタリングし作物診断できる技術が不可欠であると考えられる。これに関連するものとしては、これまでに葉色板¹²⁾や葉身の透過光を利用した葉緑素計²³⁾が実用化されている。一方、航空機や人工衛星による作況推定の観点から MSS (Multispectral Scanner) 等による分光反射特性の利用^{1,2,14,21)}やセンサーの開発^{17,22)}が進められつつあり、植物体現存量 (biomass)・収量や葉面積指数 (LAI) 等との相関が調べられている^{14,16,21)}。他方、生長・収量・発育の予測のためには生理生態学的解析に基づく多様なモデル化研究が進められている^{5,8,15)}。

しかし、これまでのところ圃場における作物群落からの生体情報と気象データを総合的・多変量的に利用して、群落の生産機能や状態をモニタリングする技術に関してはほとんど研究が進んでいない。すなわち、これらの要因の計測に基づいて、たとえばストレス状態や光合成蒸散機能を監視しながら、灌漑のスケジューリングや施肥などの栽培管理をよりの確に行うとか、あるいはこれらの機能や状態をモニターしながら生育・収量の予測を行うといったことのために利用できる基礎的知見はきわめて少ないのが現状である。

最近、作物のキャノピー温度を水ストレスの判別に使おうとする試みがアメリカの乾燥地帯を中心にいくつかなされており^{3,11,18)}、キャノピー温度あるいは葉一気温差を直接水ストレスの指標にする試みもなされている^{6,7,10)}。しかし、一般に、圃場における現象は気温、光、湿度、風速等多くの要因が互に関連しながら変動しているために単独の情報による診断や予測はきわめて困難である。

そこで、本研究においては群落の電磁波的な情報、

すなわち赤外線放射温度計によって得られるキャノピー温度、および分光光度計によって得られる分光反射特性の二つを作物群落からの生体情報としてとらえ、これらに同時計測した気温、飽差、PAR 等の気象データを加えて、作物群落の状態や機能との因果関係を明らかにし、さらにこれに基づいて生体機能・状態の推定モデル化を行おうとするものである。特に、本研究では、作物診断および情報システム化の観点から、よりシステムティックな診断を可能にするための前提条件として、非破壊非接触で作物群落一環境系に乱れを発生させないこと、経時的にモニターできること、迅速に、または広域的にモニターできること、の3つを必要条件として設定した⁹⁾。

まず第1報ではキャノピー温度を利用するための基礎として圃場における作物群落のキャノピーの温度分布について検討した。圃場群落を対象として熱画像を撮った例は、NASA (米国航空宇宙局) による航空機からのマクロな観測例¹³⁾があるが、キャノピーの温度分布等についての検討はなされていない。一般に作物群落のキャノピーは、葉身、葉鞘、茎などの集合体からなっており、キャノピー面の温度もモザイク状に分布していると考えられる。本研究では、群落からの生体情報をとる一つの方法として赤外線放射温度計を利用するが、これによって得られる測定値は普通、視野内の放射エネルギーの合計値に対応する一つの温度のみで、その視野の中がどのような温度の集合体から構成されているかについての情報はまったく得られない。したがって、まずキャノピー面の温度の分布関数やレンジ等についての検討が不可欠であると考え、ここでは面的な画像データが得られるサーモグラフィー装置を用いてこれらを検討した。また、放射温度計を用いて測定する場合、Stefan の放射則に基づく測定原理よりキャノピーの放射率 ϵ を知ることが必要であるが、直接これを測る方法はないので、これに近いものとして葉

* 大要は第 180 回講演会 (昭和 60 年 9 月) で発表。

身の放射率を調べ、キャノピーの放射率を推定した。

材料と方法

測定対象として、オオムギ、コムギ、トウモロコシおよびダイズの群落を用いた。各作物とも普通に生育してキャノピーの良く発達した群落を選んだ。計測・解析システムの構成は第1図に示した。熱画像はサーモグラフィー装置（日本電子製サーモビューア JTG 3200）によって撮像した。放射温度測定の方法は物体の絶対温度と放射エネルギーを関係づけた Stefan の放射則に基づく²⁰⁾。この装置のカメラ部分の検出器は液体窒素冷却型の水銀カドミウムテルライド (HgCdTe)、観測波長域は 8～13 μm 、温度分解能は 0.025 $^{\circ}\text{C}$ であった。画像パターンの計測はこの検出器に対して機械的な走査を行うことによるもので 1 画面の走査に約 8 秒かかる。被写体群落の草丈が高い場合にはこれを三脚ごとフォークリフトにのせて撮像した。フォークリフトの使用によって視点を約 5 m の高さまであげることが可能であった。測定方位は南東～南西、俯角は 8～45 $^{\circ}$ の範囲にとった。測定視野角は横 25 $^{\circ}$ ×縦 23 $^{\circ}$ （1 倍）で 2 倍と 5 倍のズームアップも使用した。装置の本体はデータメモリ容量として 240 ライン×512 ピクセル×8 bit（256 段階）を 4 画面持っているが、今回は熱画像データをすべて一旦ビデオテープ（アナログデータ）に収録しあとでデジタル処理する方法をとった。測定はすべて晴天の日の日中に行った。なお、GP-IB インターフェースを介しての、パーソナルコンピュータによる装置の制御および画像データの処理には自作した BASIC+マシン語のソフトを用いた。

葉面の放射率の測定は、切取った葉身の半分に放射率既知 0.96 の黒体塗料（アサヒペン黒艶消し 20 μm スプレー）を塗布したものをサーモグラフィーで観測し、両者を比較することによって求めた。

結果と考察

葉面の放射率の測定結果（第1表）より、コムギで 0.96 以上、トウモロコシで 0.93 から 0.96 以上、ダイズで 0.95、ヒマワリで 0.92 という値が得られた。ここで 0.96 以上と表示しているのは、比較に使っている黒体塗料の放射率が 0.96 であったので、それ以上は計測できなかったことによる。一方、滝内ら¹⁹⁾の計測例では、測定方法は異なるがタバコで 0.99、カンショで 0.95、イチゴで 0.98 という高い値が得られているので、一般的にこの波長域における個葉の放射率は 0.95 程度あるいはそれ以上としてよいものと考えられる。以上の個葉についての測定結果より、作物キャノピーの放射率もほぼ 1 に近いと推定した。なお、放射率を 0.95 とした場合と 1.00 とした場合の温度誤差は 0.1～0.3 $^{\circ}\text{C}$ 程度と小さく、また分布を問題にする場合には相対値で十分と考えられるので、ここでは放射率をすべて 1.0 として計算した。

つぎに、実際の作物キャノピーの温度分布の検討に移る。第2図にコムギ（農林 61 号）の穂ばらみ期のキャノピーについて、普通のカラー写真、それに

Table 1. Avaraged emissivity of leaf in the wavelength region from 8 to 13 μm .

Crops	ϵ
Wheat	0.96<
Maize	0.93~0.96<
Sunflower	0.92
Soybean	0.95
TAKIUCHI et al. (1977). (9~12 μm)	
Tobacco	0.99
Strawberry	0.98
Sweet potato	0.95

Fig. 1. Diagram of the thermal image analyzing system.

対応する熱画像および温度分布のヒストグラムを示した。写真は全温度範囲を22段階に分けてカラー表示したものである。背景にみえているのはコンクリートの建築物である。実際には葉色や草高からみてかなり均一な群落にみえたが、図のように広い視野で熱画像を見ると、場所別にかなりのムラがあることがわかる。そこでA, B, C, の3箇所について別々にヒストグラムをとってみると、全体としては約3℃の中におさまっているものの、A, B, Cはそれぞれ3つの山に別れていることがわかる。このように一枚の圃場内でも温度差が検出されるわけで、この差が作物のどういう生理生態的特性と関連しているかを究明していくことが今後の仕事の中心となる。第3図はこの視野の一部を拡大して観察したものである。縦横約1mの範囲が写っており（中央部分の1画素は実視野で一辺約2mmに相当）、いくつ

かの葉身が明るい縦に細長い部分として見えている。画面はかなり均一でヒストグラムもきれいな左右対称の分布となった。そこで、これにガウス分布のあてはめを試みた結果、図中の式のように相関係数で0.999と非常によく合致した。式からそれぞれ頂点の頻度21.6%, 平均値18.59℃, 標準偏差0.655℃が読み取れる。また、群落の一番表層にある直射光のあたっている葉身の温度がやはり高く、蔭の部分やチラチラみえている少し深いところが低い。全体としては約3℃のレンジでガウス分布にしたがっていることがわかる。第4図にトウモロコシ群落の熱画像を示した。縦横約3mの範囲が写っており（1画素は一辺約6mm）、何枚かの葉身が斜めに交差しているのが見える。これは気温が約34℃と高温の時に撮ったものであるが、回帰式から得た標準偏差は0.223℃、レンジが1℃と小さく均一なガウス分布をしていることがわかる。つぎにダイズ群落についての画像を第5図に示した。横約8m程度の視野（1画素は一辺約15mm）で後方には防風林の一部が写っている。白線で囲んだ部分をとるとやはり標準偏差が0.246℃、レンジが約1℃となり、トウモロコシと同様な分布特性を持っていることがわかった。以上のことから本実験の条件範囲では作物群落のキャノピー温度は、標準偏差で0.2℃から0.8℃、レンジで1℃から3℃程度ときわめて均一なガウス分布をとることが明らかとなった。

つぎに視野のとり方についてみるために、極端な場合として、条播されたオオムギ（カシムギ）の

Fig. 2. Natural color image (upper), thermal image (lower) and temperature distribution of wheat canopy (var. Norin 61) at boot stage.

Fig. 3. Thermal image and temperature distribution of wheat canopy. Zoomed image of a part of the Fig. 2.

** : Significant at 1 % level.

Fig. 4. Thermal image and temperature distribution of maize canopy (var. TX 120).

Fig. 5. Thermal image and temperature distribution of soybean canopy (var. Kurosengoku).

Fig. 6. Thermal image and temperature distribution of stripe-speeded barley canopy (var. Kashimamugi).

Fig. 7. Thermal image and temperature distribution of barley canopy (var. Sekitori 1) at heading stage.

群落をわざと条に平行な方向から撮った（第6図）。後方には防風林の樹幹が明るく見えている。条間は60 cmで条間のかなり地表面に近いところまで写っている。白樺Aのように視野をとると（1画素は一辺約2 mm）、図中の白いゆがんだ分布になり温度レンジも約3°Cであるが、Bのようなとり方をすると図中の黒いヒストグラムのようにレンジで約1.5°C、標準偏差で0.431°Cと均一なガウス分布となる。したがって、視野を比較的均一な部位からスポット的にとれば視野内の温度分布についての問題はあまりないと考えられた。

最後に穂のようなやや異質なものがまじっている

群落の場合をみるためにドリル播きしたオオムギ（関取1号）の出穂期の熱画像を第7図に示した（1画素は一辺約4 mm）。明るく点状に見えるのが出穂直後の穂である。分布をみるときれいなガウス分布からは少しずれており、約20°C以上の高いところの歪みは穂の温度が高いことによる。この結果は放射温度計による測定値が穂をもつ群落のほうが約2°C高かったとする計測例⁴⁾を裏付けるものである。穂ぞろいが済んで穂の部分がもっと多くなるとこの部分がさらにふくらんで分布のパターンが変化してくるものと推定される。

つぎに、キャノピーを見るとききの俯角の温度レン

Table 2. Relationship between view angle and temperature range (°C).

Angle (degree)	Zoom		
	×1	×2	×5
5	1.25	1.75	1.25
16	2.25	3.00	2.50
30	3.50	3.75	3.50

ジに対する影響を第2表に示した。俯角が大きいほど群落の深いところが見えやすくなるので、当然温度レンジは広がる傾向がみられるが、30°の場合でも3.5°C程度であることからみて、俯角を10°から20°程度にとり、視野のなかに地面がはいらないようにすればキャノピー温度の平均値および分布は大きく影響をうけないものと推定した。

以上、作物キャノピーの温度分布について検討した結果を総括すると、10 μm 付近の測定波長域におけるキャノピーの放射率はほぼ1とみなせること、キャノピーの温度のレンジは気温やキャノピー温度の日変化などに比べて予想外に小さく、たいてい2°C前後またはそれ以下であること、均一なキャノピーの温度分布の確率密度関数はガウス分布でよく近似でき標準偏差も非常に小さいこと、さらに、俯角など視野の取り方によるキャノピー温度の変化もあまり問題にしないでよいことが明らかになった。以上のように作物キャノピーの温度の分布特性が明らかになり、群落の機能および状態の変化を把握するための情報として、放射温度計によるキャノピー温度を利用するための基礎知見が得られた。

摘 要

赤外線放射温度計によって得られるキャノピー温度を作物群落からの生体情報としてとらえ、作物群落の状態や機能の推定モデルに利用するための基礎として、サーモグラフィー装置を利用して圃場における作物群落のキャノピーの温度分布について検討した。得られた結論は以下のようであった。

1. 葉面の放射率を測定した結果、コムギで0.96以上、トウモロコシで0.93から0.96以上、ダイズで0.95、ヒマワリで0.92という値が得られた。放射温度の測定に用いる10 μm 付近の波長域における群落キャノピーの放射率はほぼ1に近いと推定した(第1表)。

2. キャノピーの温度のレンジは気温やキャノピー温度の日変化などに比べて小さく、各作物ともキ

ャノピーの温度分布の確率密度関数は標準偏差で0.2°Cから0.8°C、レンジで1°Cから3°C程度と均一なガウス分布をとることが明らかとなった(第3, 4, 5図)。

3. キャノピーに構造的なムラがある場合にも、視野角の鋭い放射温度計によって視野を比較的均一な部位からスポット的にとれば、視野内の温度分布も均一とみなしてよいと推定された(第6図)。

4. 穂がまじっている群落の温度分布は、穂の温度が高いことによってきれいなガウス分布からは少しずれており、出穂後は分布のパターンが変化してくることが推定された(第7図)。

5. キャノピーを観測するときの俯角が大きいほど温度レンジは広がる傾向がみられたが、俯角を10°から20°程度にとり、視野のなかに地面がはいらないようにすればキャノピー温度の平均値および分布はあまり影響をうけないものと推定した(第2表)。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、サーモグラフィー装置の利用に便宜を図って頂いた農研センター小野良孝室長に深謝します。

引 用 文 献

1. AHLRICHES, J.S. and M.E. BAUER 1983. Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat. *Agron. J.* **75**: 987-993.
2. AKIYAMA, T. 1985. Remote sensing techniques for grassland management and assesment of agricultural development. *Tropical Agriculture Reserch Series* **18**: 241-255.
3. EHRLER, W.L., S.B. IDSO, R.D. JACKSON and R.J. REGINATO 1978. Diurnal changes in plant water potential and canopy temperature of wheat as affected by drought. *Agron. J.* **70**: 999-1004.
4. HATFIELD, J.L., P.J. PINTER, JR., E. CHASSERAY, C.E. EZRA, R.J. REGINATO, S.B. IDSO and R.D. JACKSON 1984. Effects of panicles on infrared thermometer measurement of canopy temperature in wheat. *Agricultural and Forest Meteorol.* **32**: 97-105.
5. 堀江 武 1983. 作物の物質生産と気象—モデルと測定法—。農及園 **58**: 853-858.
6. IDSO, S.B., R.D. JACKSON, P.J. PINTER, JR., R.J. REGINATO and HATFIELD 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* **24**: 45-55.
7. ———, ——— and J.W. RADIN 1982. Leaf diffusion resistance and photosynthesis in cotton as related to a foliage temperature based plant water stress index. *Agric. Meteorol.* **27**: 27-34.

8. 井上吉雄・桃木徳博・田辺 忍 1984. トウモロコシの Plastochron Model—出葉速度, 葉原基分化速度と気温の関係—. 日作紀 **53**(別2): 48—49.
9. ———・田辺 忍 1985. 作物生産機能の非接触モニタリングに関する研究. 第2報 キャノピー温度と気温, 飽差, PAR の関係. 日作紀 **54**(別2): 148—149.
10. KEENER, M.E. and P.L. KIRCHER 1983. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. *Agric. Meteorol.* **28**: 339—349.
11. KIRKHAM, M.B., D.E. JHONSON, JR., E.T. KANEMASU and L.R. STONE 1983. Canopy temperature and growth of differentially irrigated alfalfa. *Agric. Meteorol.* **29**: 235—246.
12. 松崎昭夫・刈谷国夫・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果数の推定. 日作紀 **49**: 439—444.
13. MILLARD, J.P., R.D. JACKSON, R.C. GOETTEL-MANN R.J. REGINATO and S.B. IDSO 1978. Crop water-stress assessment using an airborne thermal scanner. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* **44**: 78—85.
14. MILLER, G.P., M. FUCKS, M.J. HALL, G. ASRAR, E. T. KANEMASU and D.E. JOHNSON 1984. Analysis of seasonal multispectral reflectance of small grains. *Remote Sensing Environment* **14**: 153—167.
15. 棟方 研 1975. 生長モデル. 高倉直他編, 施設園芸における環境制御技術. ソフトサイエンス社, 東京. 280—292.
16. ———・芝山道郎 1982. 圃場作物反射スペクトル解析装置の開発. 第4報 水稻群落における乾物重・葉緑素量・玄米収量の推定. 日作紀 **51**(別1): 165—166.
17. ———・芝山道郎 1985. 作物群落反射スペクトル解析装置の開発. 第1報 圃場作物用ダブルビーム分光測定装置の試作. 日作紀 **54**: 15—21.
18. O'TOOLE, J.C., N.C. TURNER, O.P. NAMUCO, M. DINGKUHN and K.A. GOMERZ 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Sci.* **24**: 1124—1128.
19. 滝内基弘・橋本 康 1977. 放射温度計による葉温測定と植物生体情報の関連. 計測自動制御学会論文集 **13**: 482—488.
20. 戸田盛和・小口武彦・高野文彦 1964. 物性物理学. 朝倉書店, 東京. 142—144.
21. TOMAS, J.R. and A.H. GERBERMANN 1984. Yield/reflectance relations in cabbage. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* **43**: 1257—1266.
22. TUCKER, C.J. and E.L. MAXWELL 1976. Sensor-design for monitoring vegetation canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* **42**: 1399—1410.
23. 渡辺 包・畑中 勇・稲田勝美 1980. デジタル葉緑素計の開発. 第1報 構造と性能. 日作紀 **49**(別1): 89—90.

Remote-Monitoring of Function and State of Crop Community

I. Analysis of thermal image of crop canopy

Yoshio INOUE

(*National Agriculture Research Center,
Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305*)

Summary

The present study was aimed to obtain basic knowledge to monitor the physiological and ecological function or state of crop communities remotely. This paper deals with the temperature distribution of crop canopies investigated with and infrared scanning thermometer.

The results obtained are summarized as follows :

1. The emissivity of crop canopy was estimated at approximately 1.0 with wheat, maize, soybean and sunflower according to the measurement as to their leaf blades (Table 1).
2. The range of canopy temperature was relatively small compared with diurnal change of air temperature or canopy temperature. The distribution pattern of canopy temperature was fitted to gaussian distribution very well. Standard deviation and range of each canopy temperature were estimated at $0.2 \sim 0.8^{\circ}\text{C}$ and $1 \sim 3^{\circ}\text{C}$ respectively (Figs. 3 ~ 5).
3. Even if there were some structural differences within a canopy the change of distribution of canopy temperature was not significant as far as a field of view was set to a rather uniform part of such canopies (Fig. 6).
4. The temperature distribution of wheat canopy with panicles was biased from gaussian pattern because of high temperature of panicles (Fig. 7).
5. The range of temperature distribution tended to increase with increment of the dip of view. But setting a field of view fully to foliage with $10 \sim 20^{\circ}$ dip, canopy temperature was not affected very much by the dip (Table 2).