

## 作物葉温を用いたカンガイ時期の判定

中野, 芳輔  
九州大学農学部灌漑利水工学教室

長, 智男  
九州共立大学工学部

矢野, 友久  
鳥取大学農学部

<https://doi.org/10.15017/23309>

---

出版情報：九州大學農學部學藝雜誌. 43 (1/2), pp.61-67, 1989-01. 九州大學農學部  
バージョン：  
権利関係：

## 作物葉温を用いたカンガイ時期の判定

中野芳輔・長 智男\*・矢野友久\*\*

九州大学農学部灌漑利水工学教室  
(1988年11月24日 受理)

### Determination of Irrigation Timing Using Crop Temperature

YOSHISUKE NAKANO, TOSIO CHO and TOMOHISA YANO  
Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Faculty of Agriculture,  
Kyushu University 40-05, Fukuoka 812

#### 緒 言

これまで、灌漑時期の判定にはテンシオメータ、電気抵抗ブロック等のように直接土壌水分を測定する方法や、気象要因から蒸発散量を求め、間接的に土壌水分を推定する方法が用いられてきた。赤外放射温度計の応用は以上の方法と異なり、葉温測定を通して作物の水ストレス状態を直接検知することを目的としており、さらに的確な灌漑時期の判定を可能とするものである。また本法の特徴は短時間で測定できること、広範囲な測定が可能であること等の利点も有している。

ここでは野外観測結果をもとに、葉温を用いた灌漑時期判定の指標として、葉・気温差、WSI (water stress index), CWSI (crop water stress index) 等の検討を行い、さらにSPACモデルによる検証を加えた。

#### 赤外放射温度計による温度測定

赤外放射温度計によつて捕捉されるエネルギーは対象物体から放出されるエネルギーだけでなく、背景放射量の反射エネルギーも含まれる。この関係は次式で表される。

$$R_L = \epsilon_L \sigma T_L^4 + (1 - \epsilon_L) B_s \quad (1)$$

ここで、 $R_L$ : 赤外放射温度計に入射するエネルギー、 $\epsilon_L$ : 物体の射出率、 $\sigma$ : Stephan-Boltzmann 定数、 $T_L$ : 物体の絶対温度、 $B_s$ : 背景放射量。したがつて、真の葉温を求めるためには、前もつて  $B_s$ ,  $\epsilon_L$  を知っておく必要がある。この目的で図1の装置を作成した。

厚さ1cm、30×30cmのアルミ板の中央部に、表面より0.1cmの位置に熱電対4本を埋め込み、これを50×50×50cmの発泡スチロールの箱にセットした。底部には赤外ランプを固定し、アルミ板の加熱用に供した。アルミ板の射出率は、赤外放射温度計と熱電対の温度測定によるエネルギー比から求められる。アルミ板はそのままでは鏡面光沢を有するため、射出率は極めて小さく  $\epsilon_L = 0.0439$  であつた。天空の平均的背景放射量を得るためには、アルミ板表面を乱反射面にした方が好ましい。したがつて、ここでは表面にアルミ箔の塗布を行い  $\epsilon_L = 0.46$  とした状態を実験に用いた。

葉の射出率を求める方法としては、①葉に附着させた熱電対と赤外放射温度計とを用いて同時に葉温を測定し、そのエネルギー比から求める場合と、②Fuchs and Tanner (1966) が行つた、内面を鏡面にしたコーン型フードを赤外放射温度計にセットして求めた射出率1の場合の葉温と、これを外した値とのエネルギー比から求める場合の2つの方法がある。以上2つの方

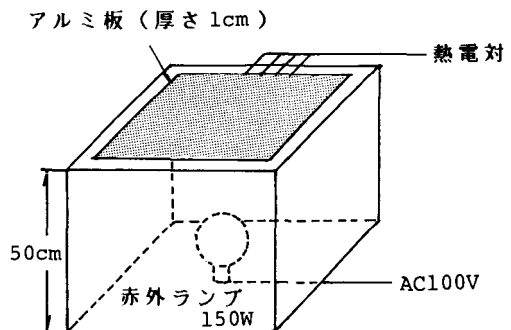


図1 背景放射量の測定

\* 九州共立大学工学部

\*\* 鳥取大学農学部

法を大豆群落に適用し、葉温の安定する夜間(20時頃)に測定を試みた。その結果、風による若干の葉温の変動があつたため、多少のバラツキはあるが  $\varepsilon_i = 0.97 \sim 0.99$  の範囲内の値が得られた。

以上の方法により、 $B_s$  と  $\varepsilon_i$  が既知となり、これを(1)式に代入して真の葉温を求めることができる。

### シミュレーションモデルの構成

葉温を用いた水ストレス評価の指標として、葉・気温差、WSI、CWSI等、様々な指標が考案されている。土壤水分の減少に伴う、これら諸指標の動態を明らかにするために、ここでは簡単なSPACモデルを導入し、種々解析を試みた。

作物群落のエネルギー収支式は次式で表される。

$$R_n = G + H + LE \quad (2)$$

ここで、 $R_n$ :純放射量、 $G$ :地中熱ラックス、 $H$ :顕熱フラックス、 $LE$ :潜熱フラックス、 $L$ :水の蒸発の潜熱、顕熱フラックスは作物葉温  $T_L$  と気温  $T_a$  との差を用いて、

$$H = c_p \rho (T_L - T_a) / r_a \quad (3)$$

で求められる。 $c_p$ 、 $\rho$ はそれぞれ空気の定圧比熱、密度である。 $r_a$ は拡散抵抗で、風速  $U$  の関数として次式で求めることができる。

$$r_a = \ln((Z - d + z_0) / z_0) / \kappa^2 / U \quad (4)$$

ここで、 $Z$ :観測高度、 $d$ :地面修正量、 $z_0$ :粗度長、 $\kappa$ :カルマン定数。 $d$ および  $z_0$ はMonteith(1973)によつて経験的に

$$d = 0.63H, z_0 = 0.13H \quad (5)$$

で与えられる。

蒸散流量は次のMonteith式によつて計算される。

$$E = \frac{\Delta R_n + c_p \rho (e_s(T_a) - e_a) / r_a}{L(\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a))} \quad (6)$$

一方、作物体を通る蒸散流量は

$$E = (\psi_s - \psi_L) / (R_s + R_p) \quad (7)$$

で表される。ここで、 $\Delta$ :飽和水蒸気圧・温度曲線の勾配、 $\gamma$ :乾湿計定数、 $e_s(T_a)$ :温度  $T_a$  での飽和水蒸気圧、 $e_a$ :大気の水蒸気圧、 $r_s$ :作物抵抗、 $\psi_s$ および  $\psi_L$ :土および葉の水ポテンシアル、 $R_s$ および  $R_p$ :土から根、根から葉に至る蒸散流の通水抵抗。

作物抵抗については多くの関数形が与えられているが、ここでは次のReicosky and Lambert(1978)の式

$$r_s = \frac{(1 + 175 / (I + 10))}{LAI(\psi_L - \psi_c)} \times 1.4 \times 10^4 \quad (8)$$

を用いた。ここで、 $I$ :日射量( $W/m^2$ )、 $LAI$ :葉面積指数、 $\psi_c$ :葉の限界水ポテンシアル。(6)、(7)、(8)の3式の中で、未知数は  $E$ 、 $r_s$ 、 $\psi_L$  3つであるので、連立して解くことができる。

(7)式の  $R_s$ 、 $R_p$ はChoudhury(1983)になつて、

$$R_s = 125(\psi_s / C)^{2.57} \quad (9)$$

$$R_p = r_r / L_r \quad (10)$$

を用いた。ここで、 $C$ :定数、 $r_r$ :根の通水抵抗、 $L_r$ :根の密度。

以上により蒸散流量  $E$  がわかれば、(2)、(3)式より葉温を知ることができる。

## 実験の方法

ガラス室内に2基の小型ライシメータを設け、大豆を栽培した。作物高が約50cmに達した8月下旬から9月上旬にわたる数日間、10時から14時の間ライシメータを野外に搬出し、自然条件下で観測を行つた。土壤水分は湿潤状態・乾燥状態(-10 bar)の2種にコントロールし、葉温・湿度・気温・風速・日射量等の測定を行つた。

一方、大豆圃場においても葉温およびそれに関与する諸因子の測定を試みた。葉温測定には赤外放射温度計を用いたが、本器が全天候型でないためとして昼間の連続観測を試みた。またこれを補うために群落の上層葉に3対並列の熱電対を配した。観測期間は9月から10月にかけて約1カ月間であり、この間に12日間の無降雨日に遭遇した。

## 結果および考察

### 1. 葉温と環境要因

赤外放射温度計による葉温観測は連続した観測が好ましいが、現実にはそれは難しい。このためアメリカにおける実験ではほとんどが、葉温変化の最も顕著に現れる日射の強い時間帯で行われている。しかし日本のように晴天下であつても雲の多い場合、葉温の安定するための日射の継続時間が問題となる。葉温は作物の水ストレス状態によつて影響されるため、2基の小型ライシメータを用いて、土壤水を-10 bar 近くまで乾燥させた場合と、十分灌水した場合について、日射量変化に対する葉温の応答を調べてみた。両区からそれぞれ1枚の葉を選び、太陽方向に直角に固定した。

1×2 mの大型放射覆いを用いて、両区を同時に太陽から遮断し、温度が安定状態に達したのちこれを除去した。熱型日射計は応答遅れがあるため、ここでは量子型日射計を用いた。

図2でみるように、日陰状態から急激に日向状態になることによつて、乾燥葉、湿潤葉ともに約40 s後に一旦ピークに達し、次に1~2°C程度の温度低下を示した。この現象は計10回の試行の際に必ず認めることが出来た。また、この温度低下の後に再び温度が上昇し、第2のピークが出現する傾向も認められた。暗所から明条件に移された作物の葉温が40分程度の周期で振動することが、滝内・橋本(1977)によつて示されている。今回得られた現象は、周期は短い、これも一種の気孔開度の振動現象の結果であると思われる。急激な日射量の回復によつて開度は大きくなり、蒸発量が増加する。このために葉温が一旦低下するが、次に反動として開度は若干小さくなる。このため葉温は再び上昇する傾向を示す。野外では風速の乱れ等のために3つめのピーク以降は顕著に認めることは出来な

かつた。室内実験等によれば、暗所に置かれた作物の光に対する応答は、振幅は次第に小さくなるものの、2時間程度続くようである。しかし、雲による日射の自然遮断の場合は日陰時であつても完全に暗黒になるわけではなく散乱光等がある。このため時折晴れ間が見られる程度の天気の場合では、葉温が平衡状態に達するために必要な日射の継続時間は約3分程度以上あれば十分であると思われた。赤外放射温度計の使用にあたりこの点を注意さえすれば、雲の多い天気であつても測定が可能であろう。

以上、日射量の変化についてのみ述べてきたが、この他にも葉温の変化に関係する因子として湿度・風速・気温等がある。図3は曇天下で時折太陽の見えかくれする条件で諸要因を同時観測したものである。これで見ると葉温変化にとつて最も大きな要因は明らかに日射条件である。葉温に見られる微振動の原因は、気温・湿度にほとんど変化がないことから、風速変動による拡散係数の変化に負うものであろう。またこうした変動を平均化するためには2分程度の走査が

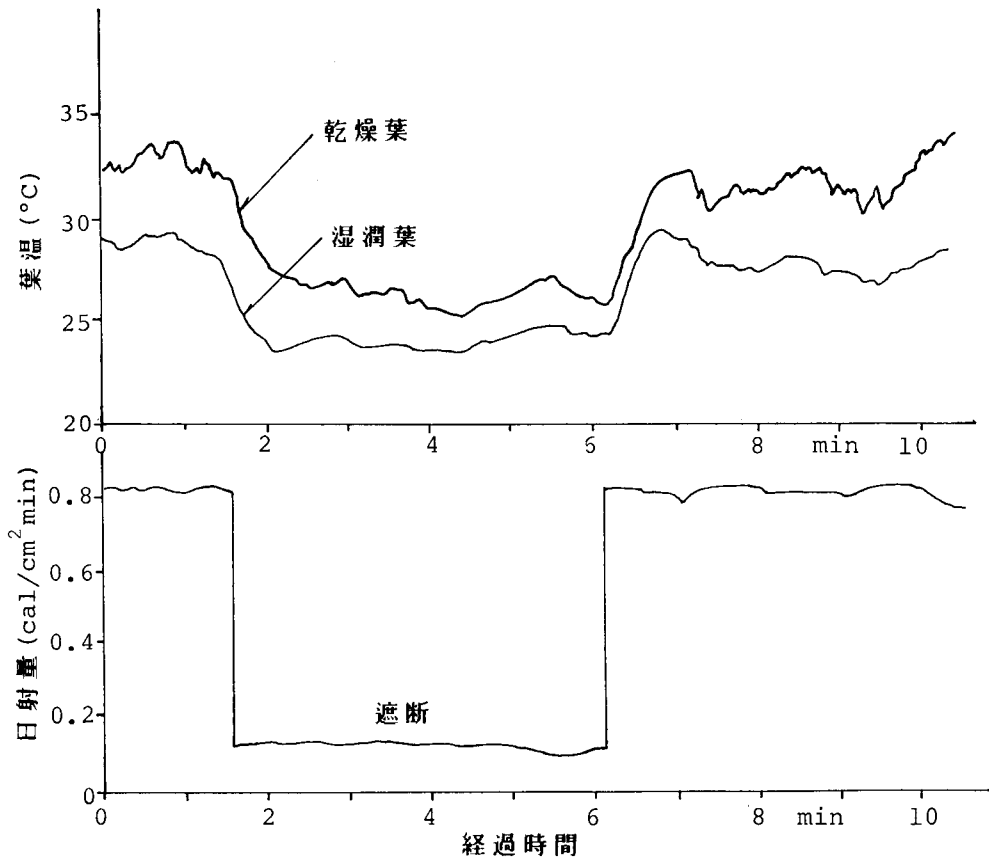


図2 日射の遮断・回復による葉温変化

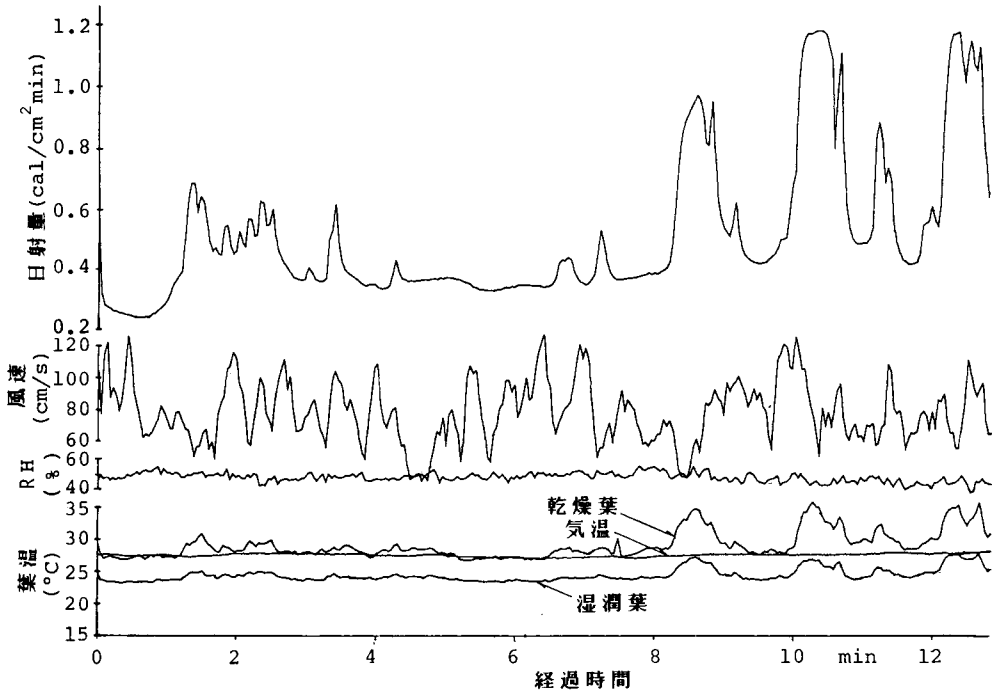


図3 葉・気温差変化と諸環境因子

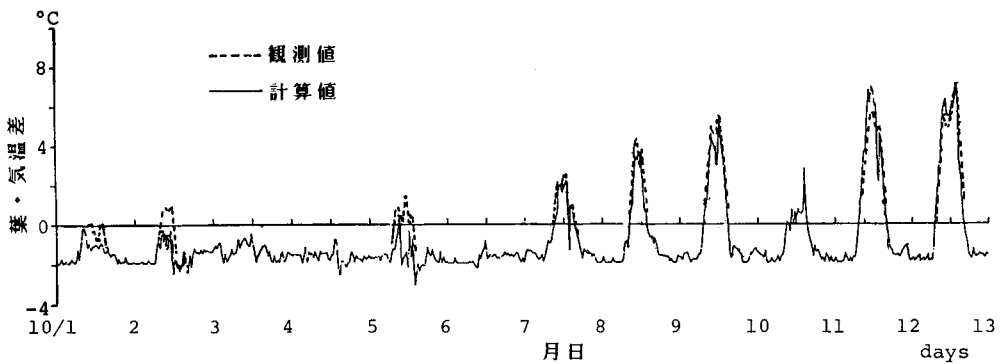


図4 葉・気温差変化

必要と思われるが、葉温差を目的とする場合は 30 s 程度の走査でも十分であろう。

図2・図3に共通して、乾燥区・湿潤区の葉温差は日射量の強いほど大きな差が認められることがわかる。図3の場合、日向時の最大温度差は7°Cであるのに対し、日陰時は3°C以下になっている。またこのような大きなストレス差がある場合は、日向、日陰にかかわらず湿潤区の葉温は乾燥区を越えることがないことも明らかである。また乾燥区の葉温は気温より常時高いのに対し、湿潤区では気温以下の値を保っている。

## 2. 灌漑時期判定の諸指標

### (1) 葉・気温差指標

図4は10/1~10/12の計12日間にわたる葉・気温差の実測値と計算値の比較を行った結果である。保有の赤外放射温度計は全天候型ではないため、葉温観測は主として昼間に行つた。土壌水分は10/9から5cmの深さで-0.3 barに達し、10/12にはさらに乾燥し、テンシオメータの測定範囲外に出た。このとき深さ15 cm, 25 cm, 35 cmのポテンシャルはそれぞれ-0.3, -0.1, -0.1 barでとくに根群の密な上層に水分の欠

乏が認められた。

モデルによる計算結果は図で示すように、10/7より  
正值が目立つ傾向が認められ、以後次第に振幅が大き  
くなっている。これは赤外放射温度計による実測値と

ほぼ一致した。

図5はこのときの日射量を示したものである。10/1,  
10/2, 10/5等は日射量の割合に比して、葉・気温差が  
明らかに小さい。また曇天日ではストレスがあつても

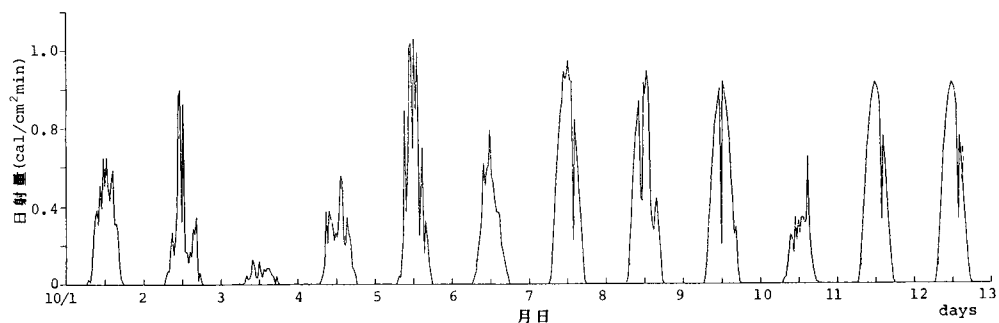


図5 日射量の経日変化

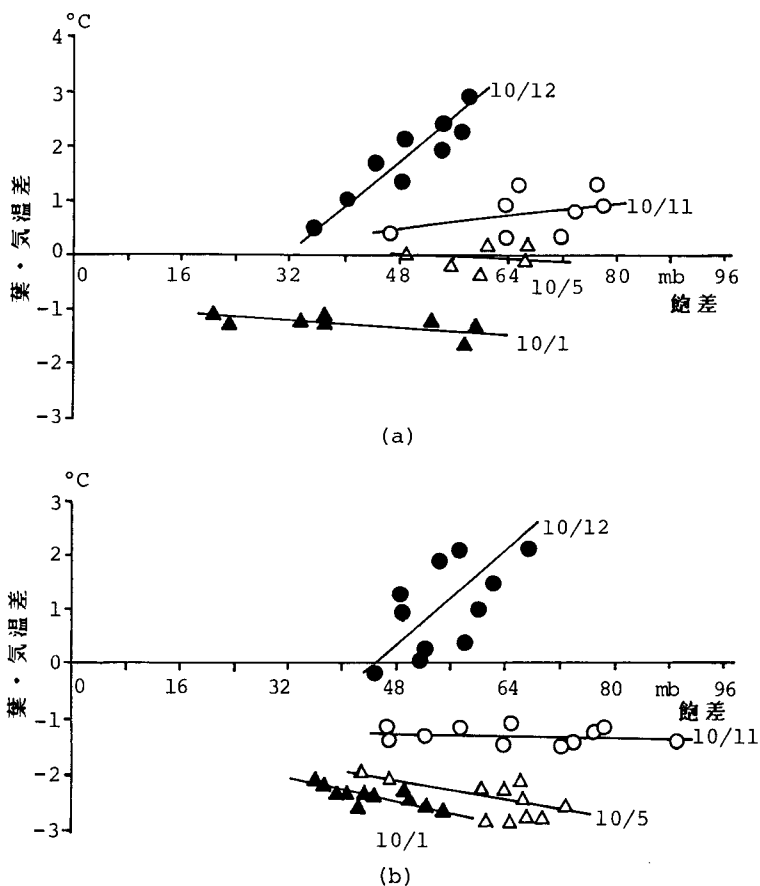


図6 葉・気温差と飽差。  
(a) 実測値, (b) 計算値

10/10のように、葉・気温差が小さくなることがわかる。葉・気温差は最も簡単な指標であるが、このように数日にわたる変動をとらえることにより、作物の置かれているストレスの状態を把握することが可能である。

### (2) 葉・気温差と飽差を用いた指標

WSIといわれる指標で、図6のように葉・気温差を縦軸に、飽差を横軸にとつて示したもので、土壤水分の減少につれ、勾配が変化することが知られている。野外观測の結果、水分不足の無い状態では図6(a)のように値のバラツキが多く、Idso *et al.* (1981), Jackson *et al.* (1983) のようなきれいな負勾配は見られなかったが、ストレスの昂じた10/11になつて正勾配となり明らかな兆候を認めることができた。図6(b)はこのときのモデルによる計算結果である。葉・気温差には実測値との間に $2^{\circ}\text{C}$ 程度の相違があるが、ほぼ同時期に実験値と同様の傾向をシミュレートすることができた。

### (3) 作物水ストレス指数

Jackson *et al.* (1983) によつて提唱されたCWSIは次式であらわされる値である。

$$\text{CWSI} = 1 - \frac{LE}{LE_p} \quad (11)$$

ここで、 $LE_p$ ：ポテンシャル蒸散量。図7(a)は観測された葉温を用いて上式を計算した場合の1時間毎の

値を示したものである。これで見ると、かなりの変動はあるものの10/6頃から指数の上昇を認めることができる。図7(b)は同じ環境データを用いたモデルによる計算結果である。10/10、10/12を除けば平均的には実験値に近い値を示している。この指数の計算には多くの入力データを要するため、必ずしも便利な指数とは言えない。

## 摘 要

赤外放射温度計による作物の水ストレス評価は、アメリカにおいて数多くの研究報告がなされている。従来の熱電対による葉温観測は局部に限定されていたが、本手法は圃場全体の平均葉温を瞬時に測定できる点で意義は大きい。ただ装置が高価であるため圃場に放置したり、多点同時観測の点で多少の難点がある。

こうした理由から、アメリカでは日射の強い日中に一回の観測がほとんどであり、赤外放射温度計を用いた終日観測の事例はほとんど見あたらない。わが国でも事情は同様であるが、アメリカ乾燥地域に比べ晴天下であっても雲が多く一日一回の定時観測には若干の問題がある。そこで、本報では葉温の日射に対する応答について乾燥・湿潤状態に設定した大豆を用いて実験を行った。その結果、日射回復後に短周期の葉温振動が認められたが、おおよそ3分程度の日射継続があれば、ほぼ安定した葉温が得られることが明らかにな

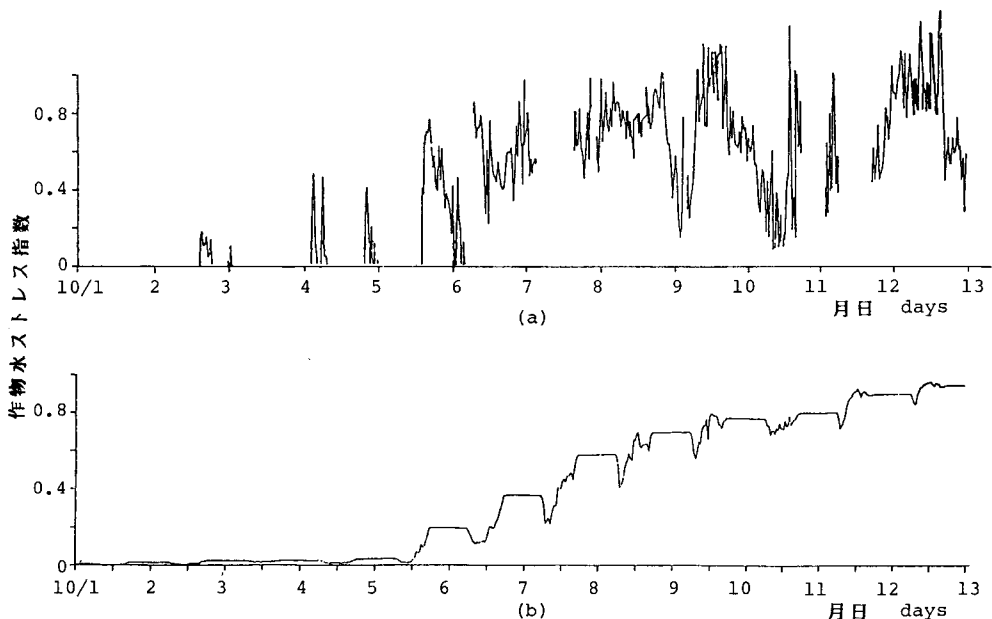


図7 作物水ストレス指数

つた。ただし、それ以後も多少の振動が残ること、風の乱れによる微振動等があること等のため、観測の走査時間は最低2分程度必要と思われた。

次にカンガイ時期判定の指標について、大豆圃場の観測結果をSPACモデルを用い検証を行った。葉気温差指標は最も簡単な指標であるが、長期観測を行うことにより、作物の水ストレスの徴候をとらえることが可能であることを明らかにした。その他WSI, CWSIについても検討した結果、これら指標の有意性を認めることができた。しかし、その利用はデータ数が増すため葉・気温差指標ほど容易でない。

本研究は文部省の科学研究費、一般研究A(土・水・作物系における水需給機構とカンガイ効果に関する研究)によるものであり、またその一部は試験研究1(灌漑時期判定のための新しい指標の確立に関する研究)によって行われたものであり、ここに記して感謝の意を表す。

## 文 献

Choudhury, B. 1983 Simulating the effects of

weather variables and soil water potential on a corn canopy temperature. *Agro. J.*, 29. pp. 221-228

Fuchs, M. and C. B. Tanner 1966 Infrared thermometry of vegetation. *Agro. J.*, 58. pp. 597-601

Idso, S. B., R. D. Jackson, P. J. Pinter., R. J. Reginato and J. L. Hatfield 1981 Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Met.*, 24, pp. 45-55

Jackson, R. D., S. B. Idso., R. J. Reginato and P. J. Pinter 1983 Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, 17. pp. 1133-1138

Monteith, J. L. 1973 Principles of environmental physics. Edward Arnold Press Ltd.

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との関連. 計測自動制御学会論文集, 13. (5), pp. 482-488

Reicosky, D. C. and J. K. Lambert 1978 Field measured and simulated corn leaf water potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42. pp. 221-228

## Summary

Much of the work relating canopy temperature to crop water stress has been done in the U. S. A. The leaf-based measurements are time consuming when the fields of the size larger. The measurement of canopy temperature using infrared thermometer is the most promising approach to irrigation scheduling.

In this paper, three indices were examined. The first index used only canopy-air temperature differentials. The second index used canopy-air temperature differentials and vapor pressure deficits. The third index used crop water stress index(CWSI). These three indices were evaluated the applicability to irrigation scheduling.

The canopy temperature are simulated for progressive soil drying using the continuity equation for water flux in the soil-plant-atmosphere system. With this model, characteristic features of these three indices were mathematically examined.