

## 作物の水分ストレスと葉気温差

長, 智男  
九州大学農学部灌漑利水工学教室

中野, 芳輔  
九州大学農学部灌漑利水工学教室

山城, 三郎  
琉球大学農学部

<https://doi.org/10.15017/23303>

---

出版情報：九州大学農学部学藝雑誌. 43 (1/2), pp.1-7, 1989-01. 九州大学農学部  
バージョン：  
権利関係：

## 作物の水分ストレスと葉気温差

長 智男・中野芳輔・山城三郎\*

九州大学農学部灌漑利水工学教室  
(1988年3月25日 受理)

### Leaf-Air Temperature Difference as an Index of Crop Water Stress

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

#### 緒 言

近年、赤外放射温度計の開発が進み、従来の接触型の温度計では困難であった作物体温の測定が極めて簡単にできるようになった。畑地灌漑への応用については Geiser *et al.* (1982), Clawson and Blad (1982), 長ら (1986) の葉温を用いた灌漑時期判定への試みがある。灌漑時期の判定は、これまで土壤水分状態によつてなされてきたが、土壤水分のかわりに葉温をパラメータとする指標を用いれば作物生理的な水分ストレス状態によく合致した判定ができると思われる。また圃場が広くなれば、一般に土性の違い、灌水むら等のために土壤水分状態は場所によつて異なるが、赤外放射温度計を用いれば容易にその違いを知ることができ、より適切な灌漑操作が可能となる。

筆者らは南西諸島における主幹作物であるサトウキビを対象に土壤水分と葉温の関係について実験を行ってきた。この間、1983年8月に宮古島が干ばつにおそわれるにおよび、現地観測を試みた。南西諸島一帯は年間降水量は多いにもかかわらず、その分布が不均一であるため干害が生じやすい。とくに夏期は高温で蒸発散量も多いため、この時期の干害が最も顕著である。

ここでは、まず SPAC モデルを用いた数値実験を行い、土壤水分の減少に伴い葉温が上昇するメカニズムについて述べた。次にガラス室におけるサトウキビの栽培実験より得られた、土壤の乾燥、湿潤条件下における作物の水分ストレスの観測結果を述べた。さらに

これらの知見をもとに宮古島で行つた観測結果を紹介した。

#### 土壤水分と葉気温差

##### 1. SPAC モデル

作物が土壤水分を消費する過程については Zur and Jones (1981) のモデルを基本としこれに葉温の算定式を組み込んだ SPAC モデルを作成し、これを用いて検討を試みた。

葉の水ポテンシアルは植物生理的な諸要因との間に次式の関係があるとされている。

$$\begin{aligned}\psi_L &= \psi_0 / (\theta_L - \theta_m) + \beta_j (\theta_L - \theta_j) / \theta_j + \psi_m \\ \psi_p &= \beta_j (\theta_L - \theta_j) / \theta_j\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 $\psi_L$  : 葉の水ポテンシアル、 $\psi_p$  : 孔辺細胞の膨圧、 $\psi_m$  : 葉のマトリックポテンシアル、 $\theta_L$  : 葉の水分率、 $\theta_m$  : 葉の組織に結合されている水分率、 $\theta_j$  : 膨圧がゼロになるときの水分率、 $\psi_0$  : 膨圧最大時の浸透圧、 $\beta_j$  : 葉の細胞膜の塑性。

蒸散抵抗  $r_s$  は  $\psi_p$  の関数と仮定して

$$r_s = r_{\min} + r_0 \exp(-a\psi_p) \quad (2)$$

を用いる。ここで、 $r_{\min}$  : 最小抵抗、 $r_0$  : 膨圧がゼロのときの抵抗、 $a$  : 定数 (=1.37)。

葉層の拡散抵抗  $r_a$  は群落内の平均風速  $u$  を与えることにより次式で求めた。

$$r_a = 8.85 + u^{-0.436} \quad (3)$$

これらの抵抗を用いて蒸散量  $q$  は次式で求めることができる。

\* 琉球大学農学部

$$q = \frac{\Delta R_n + \rho_a c_p (e_a^* - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} A \quad (4)$$

ここで、 $R_n$ ：純放射量、 $\Delta$ ：温度・飽和蒸気圧曲線の勾配、 $\rho_a$ ：空気の密度、 $c_p$ ：空気の定圧比熱、 $e_a^*$ ：空気の飽和水蒸気圧、 $e_a$ ：空気の水蒸気圧、 $\gamma$ ：乾湿計定数、 $A$ ：作物1本当たり占有面積。

純放射量は次式によつて求める。

$$R_n = (1.0 - \alpha)I + L - \varepsilon\sigma(T_L + 273)^4 \quad (5)$$

ここで、 $I$ ：短波放射量、 $\alpha$ ：アルベド、 $L$ ：長波放射量、 $\varepsilon$ ：葉の射出率、 $\sigma$ ：Stefan-Boltzmann 定数、 $T_L$ ：葉温。

葉温  $T_L$  は次式により求められる。

$$T_L = T_a + r_a R_n \frac{\gamma(1 + r_s/r_a)}{\rho_a c_p [\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)]} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} \quad (6)$$

$\psi_L$  と根の水ポテンシアル  $\psi_{root}$  との間には次の関係がある。

$$\psi_{root} = \psi_L - qR_x - z \quad (7)$$

ここで、 $R_x$ ：xylem 抵抗、 $z$ ：根群の平均深さ。また、 $\psi_{root}$  と土壌の水ポテンシアル  $\psi_{soil}$  との間には次の関係がある。

$$q = \frac{\psi_{root} - \psi_{soil}}{R_{soil} + R_{root}} \quad (8)$$

$$R_{soil} = \frac{\ln(r_{cyl}/r_{root})}{2\pi k_s \rho_r V}$$

$$R_{root} = \frac{1}{k_r \rho_r V}$$

表 1. 計算に用いた諸特性量

$\psi_0$ ：膨圧最大時の浸透圧	-12.3 bars
$\psi_m$ ：マトリックポテンシアル	0 bar
$\theta_m$ ：葉の組織に結合されている水分率	0.1
$\theta_j$ ：膨圧がゼロになる水分率	0.70
$\beta_j$ ：葉の細胞膜の塑性	60 bars $\theta_L > 0.83$ 15 bars $0.70 < \theta_L < 0.83$
$k_r$ ：根の通水係数	$0.86 \times 10^{-6}$ cm/d
$k_s$ ：土壌の透水係数	$2.59 \times 10^{-2} \sim 5.16 \times 10^{-8}$ cm/h
$\rho_r$ ：根の密度	2.16 cmroot/cm <sup>3</sup>
$V$ ：根群の体積	40 cm × 40 cm × 30 cm
$R_x$ ：xylem 抵抗	36 bar s/cm
$r_{root}$ ：根の半径	0.017 cm
$r_{cyl}$ ：根の吸水半径	0.5 cm
$r_{min}$ ：最小抵抗	1.0 s/cm
$r_0$ ：膨圧最小時の蒸散抵抗	50.0 s/cm

ここで、 $r_{cyl}$ ：根の吸水半径、 $r_{root}$ ：根の半径、 $k_s$ ：土壌の透水係数、 $k_r$ ：根の通水係数、 $\rho_r$ ：根の分布密度、 $V$ ：根群層の体積。

以上、(1)～(8)式を解くことにより、土壌と葉面の水ポテンシアルの相互関係を調べることができる。図 1 は、日射量 1.0 cal/cm<sup>2</sup>min、長波放射量 0.6 cal/cm<sup>2</sup>min、気温 30°C、湿度 17 mb、風速 50 cm/s の環境条件下における土壌水分と葉気温差、葉の水ポテンシアルの関係を求めたものである。計算には表 1 に示した土壌、作物に関する諸量を用いた。土壌水分の低下に伴い葉の水ポテンシアルは指数減衰を示すが、葉気温差はマイナス値より直線的に増加する傾向が得られた。実際には気象、土壌、作物条件によつて種々に異なるものであるが、図 1 の傾向は実験で見られる現象とよく符合する。

以上述べてきたことは、大気・作物・土壌系における水の流れを概念化したモデルの 1 例に過ぎない。これに類したモデルは他にも多く、例えば Nimah and Hanks (1973), Feddes *et al.* (1976), Rose *et al.* (1976), Federer (1982), 等が見られる。

## 2. 実験の方法

ガラス室に設けた排水収支型のライシメータ (φ80 cm、深さ 80 cm) 2 基にサトウキビを栽培し、乾燥条件、湿潤条件に対する作物の応答について比較実験を

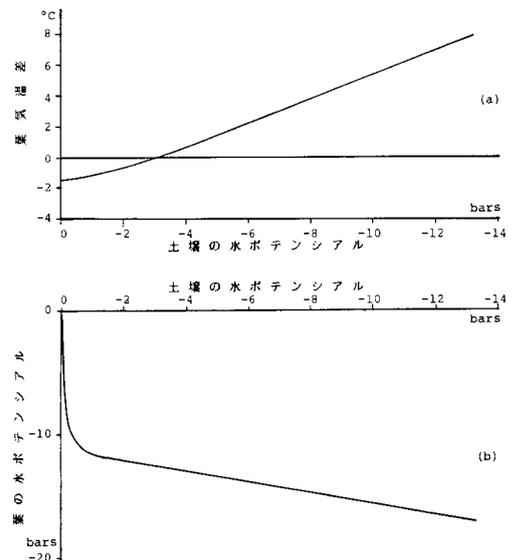


図 1 土壌水分減少に伴う葉気温差、葉の水ポテンシアル変化 (SPAC モデルによる)

行つた。環境要因として、日射量、気温、湿度を測定し、作物要因として葉温、葉の水ポテンシャルを測定した。葉温は3対並列にした熱電対(φ0.1 mm)を用いて測定した。また葉の水ポテンシャル測定には pressure chamber を用いた。

サトウキビの葉は先端部を20 cm程度切り取り、切断側の約3 cmについて、中心の葉脈を残して周囲の葉を切除した。この葉脈部を観察孔から外に出し、残りの葉の部分を加圧室中に挿入した。観測は7時から18時まで1時間間隔で行つた。

3. 結果および考察

表層約40 cm内の土壤水分状態は、乾燥区で-10.0 bar(pF4.0)、湿潤区で-0.06 bar(pF1.8)であつた。ただし、掘削調査により40 cmより下層への根の伸張が認められたので、根群域の水ポテンシャルは厳密にはこれより高い値であつたと思われる。図2は以上の条件下における葉の水ポテンシャルの時間変化を示したものである。乾燥区の最低は-17 bar、湿潤区の最低は-13 barであつた。早朝における両者の差は2.5 barであつたが夕刻にはその差は10 barにも達しており

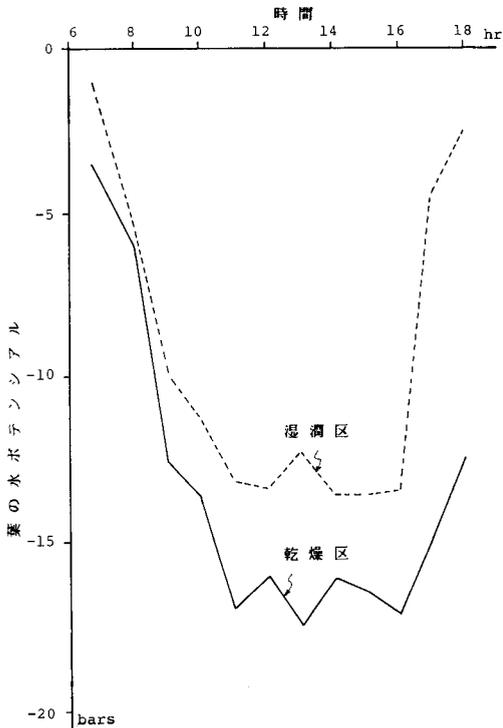


図2 土壤水分を乾燥状態、湿潤状態においたときの葉の水ポテンシャル変化 (サトウキビ)

乾燥区の回復の遅れが顕著であつた。

図3は熱電対による葉温観測を示したものである。乾燥区の葉温は日中を通して湿潤区より高く、正午付近で4°Cの差が認められた。日射の強い日向葉面においてとくにこうした乾湿の影響が生じる。またこのときの気温は12時以降、ほぼ乾燥区と湿潤区の間を保っている。午前中は熱電対を接着した葉が日陰に位置したため、異なつた傾向となつた。

葉気温差が作物の水分ストレスの指標になることは Idso and Reginato (1982), 長ら (1986) 等によつて報告されている。図4は同じくサトウキビで測定した、灌漑前後の葉気温差の日変化を示したものである。根群域約40 cmまでの土壤水分状態は、湿潤区で-0.06 bar(pF1.8)、乾燥区では灌漑前日で-50 bar(pF4.7)であつた。灌漑前の両区の間には明らかに葉気温差が正負の相違が認められた。しかし灌漑後の乾燥区の葉気温差は負の傾向へと顕著な変化を示した。

干ばつ時の葉気温差

1. 現地概況

1983年6月から8月にかけて南西諸島一体は例年になく雨が少なく、主幹作物であるサトウキビは甚大な被害を被つた。現地調査を行つた宮古島における6月、7月の降水量はそれぞれ52.0、40.5 mmでこれを

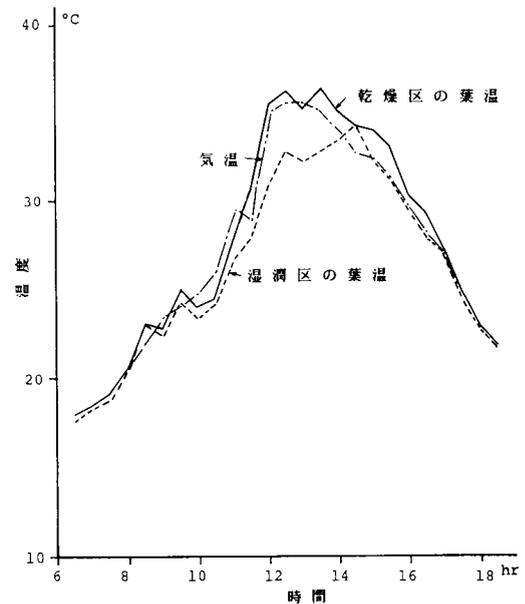


図3 土壤水分を乾燥状態、湿潤状態においたときの葉温変化 (サトウキビ)

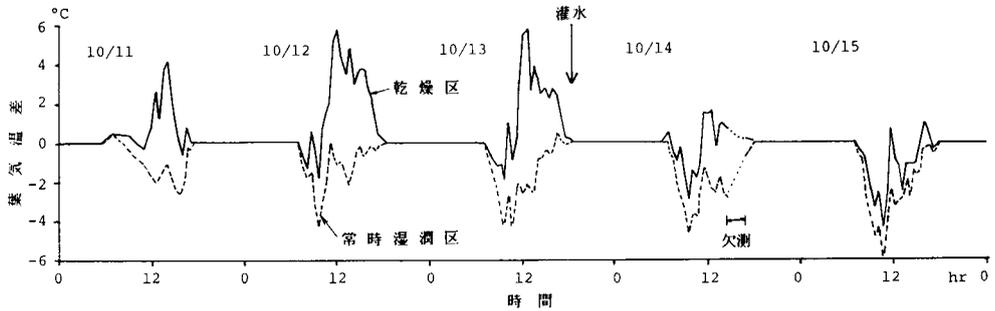


図4 灌水前後の葉気温差変化(サトウキビ)

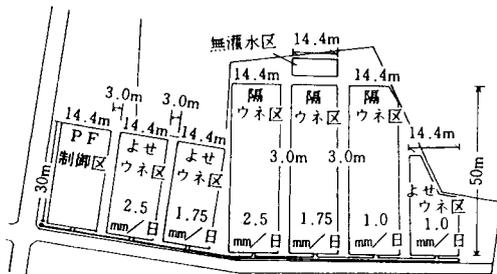


図5 沖縄県宮古農業試験場点滴灌漑試験圃場

5月末から8月中旬の寡雨期間で通算すれば87日間であつた。さらにこの間、21日間の連続干天日数を記録している。干ばつ被害は島内一円に広がっていたが、局地的降雨、地形、灌漑等の差によつて場所による相違も見られた。

ここでは前節で得られた知見を現地で検証することを目的として、干ばつ被害が顕著になつた8月1日、2日を観測日に選び赤外放射温度計によるサトウキビの葉温観測を行つた。1日目は沖縄県宮古島農業試験場で定置観測を行い、2日目は島内の移動観測を行つた。

## 2. 灌水量と葉温

### (1) 実験の方法

観測には点滴灌漑区を利用した。試験場は図5に示す配置で、4日間断 1.0 mm/d, 1.75 mm/d, 2.5 mm/d の灌水制御区、無灌水区、pF 制御区の設定がなされている。サトウキビの栽培間隔は隔ウネ区 120 cm, よせウネ区 90 cm, 150 cm 交互であり、株間は 30 cm であつた。土壌は島尻マージで、根群域は 40 cm に満たない。

観測対象として隔ウネ 1.0, 1.75, 2.5 mm/d 区、よ

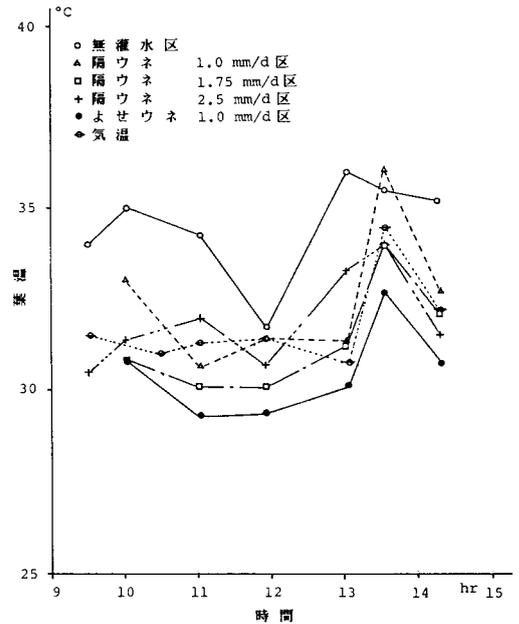


図6 灌水量と葉温(サトウキビ, 1983年8月1日)

せウネ 1.0 mm/d 区、無灌水区の計 5 区を選定した。最も差の大きいと思われる無灌水区と 2.5 mm/d 区はとくに観測ポールを設置し、温度、湿度、日射量、風速の鉛直分布の測定を行つた。葉温は赤外放射温度計を用いて高所より群落頂部について測定した。土壌水分状態は各区の深さ 10 cm 毎の採土試料から秤量法によつて求めた。葉面積指数は無灌水区と隔ウネ 2.5 mm/d 区について層別刈り取りによつて測定した。よせウネ 1.0 mm/d 区は灌水を行い他区との比較に供した。

### (2) 結果および考察

サトウキビの生育状態は無灌水区についてやや劣り、 $LAI=2.75$ であったが、隔ウネ2.5mm/d区では $LAI=3.40$ であった。草丈は無灌水区が200cm、2.5mm/d区が220cmであった。他の灌水区は $LAI$ 、草丈とも2.5mm/d区と大差はなかつた。図6は葉温の観測結果である。無灌水区と2.5mm/d区はほぼ同時の測定であったが、他区については5~10分程度の時間的ずれはやむを得なかつた。無灌水区は他区に比べ大きな値を示したが、隔ウネ3灌水区は相互に大きな差が認められなかつた。よせウネ1mm/d区は他に比べ最も低い温度を示している。このときの土壤水分状態を表2に示した。土壤の水分張力は採土した計24個の試料の水分特性曲線をWarrick *et al.* (1977), 瀬口ら (1983) に従ってScalingによつて修正して求めた。図7はScaling前後の水分特性曲線である。これから求めた各区のpF値は表2に示した通り無灌水区、隔ウネ1mm/d区、隔ウネ2.5mm/d区、隔ウネ1.75mm/d区、よせウネ1.0mm/d区の順であった。この結果と図6を比較してみると、午前中の比較的安定した気象条件下においておおむね上記の土壤水分張力にそつた配列になつていることがわかる。また葉気温差

については、土壤水分の多いよせウネ1mm/d区、隔ウネ1.75mm/d区が負の値を示している。隔ウネ1mm/d区と隔ウネ2.5mm/d区が錯綜しているのは土壤水分条件がほぼ同じであつたためと思われる。

以上、葉温観測について述べてきたが、こうした葉温の違いは周囲温度環境に影響をおよぼすと思われる。図8は無灌水区と隔ウネ2.5mm/d区の群落内の鉛直温度分布の観測結果を示したものである。10時の観測では両者の間にはほとんど差が認められないが、それ以降若干無灌水区の気温が灌水区より大きい傾向を示している。とくに13時以降にその傾向を増している。ただし10時から15時の日射量は $1.3\sim 0.6\text{ cal/cm}^2\text{min}$ と安定せず、もし晴天下の強い日射条件が連続すれば、さらに違いが明確になつたと思われる。このように土壤水分状態の違いは接地層の気層の環境にも影響をおよぼすことが知れる。

### 3. 干ばつ被害畑の葉温測定

移動観測では図9に示す島内5地区を選び、葉温、気温および土壤水分の観測を行つた。表3は観測結果である。観測は雲によつて時折中断したが、砂川を除き比較的長時間の日照を得ることができた。表3で見

表2. 試験圃場の土壤水分状態

	無灌水区	隔ウネ1mm/d	隔ウネ1.75mm/d	隔ウネ2.5mm/d	よせウネ1.0mm/d
容積含水率	26.5 %	28.6 %	34.7 %	28.8 %	38.6 %
飽和度	0.46	0.50	0.60	0.50	0.67
pF	3.7	3.2	2.1	3.1	1.5

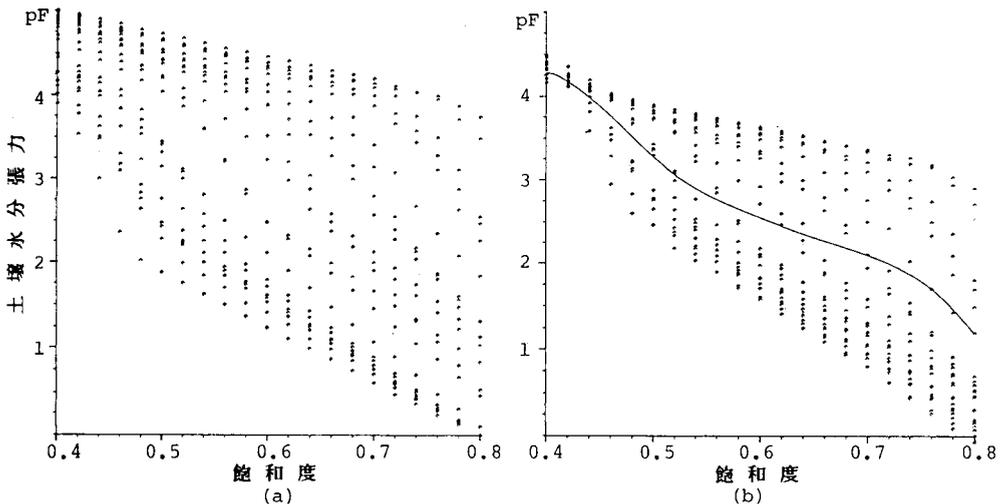


図7 Scaling前(a)と後(b)の土壤水分特性曲線(島尻マージ)

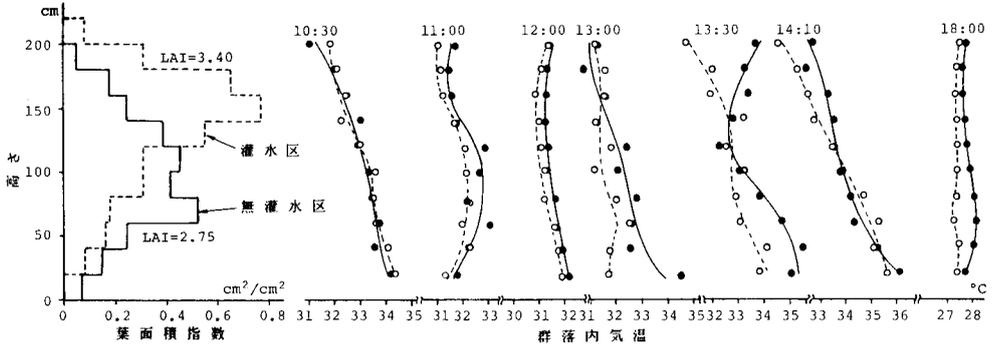


図8 無灌水区と灌水区（隔ウネ 2.5 mm/d 区）の葉面積指数および群落内温度分布（サトウキビ）



図9 宮古島島内葉温観測点

るように、葉気温差が負の値を示したのはわずか上地のみであった。本地区は島内唯一の河川があるところで、低湿地として知られている。他地区がほとんど干ばつ被害を受けているのに対し、サトウキビの生育は良好であった。上地以外の地区では被害程度の大小によって2つの圃場を設定し観測を行った。久松、友利、

保良の3地区は容積含水率が小さくなるにつれ葉気温差が上昇する関係がよく対応しているが、砂川については逆の対応が見られた。これは測定時間帯に雲が発生し、晴れ間をぬつた測定のため、葉温が定常に達していなかったためと思われる。

上記の5地区、9地点の採土試料の水分特性曲線によれば、上地、友利Aを除く全地点は $-16 \text{ bar (pF4.2)}$ を越えており、異常干天の影響を明確に知ることができた。最も広範な被害が見られたのは保良地区で、その被害は極めて甚大であった。わずかに残る緑色部分もすべてロール化し、末期的症状を呈していた。

以上の調査結果から、葉温が土壤水分状態をよく表すことが明らかとなった。

## 摘 要

葉温を用いた作物の水分ストレス評価を試みた。まず土壤水分の減少に伴い、作物の水ポテンシャルが低下し葉温が上昇するメカニズムについてSPACモデルを用いて数値実験を行った。次にガラス室でのサトウキビを用いた栽培実験により土壤水分状態と葉の水ポテンシャル、葉温、葉気温差等の関係を調べた。こ

表3. 宮古島島内葉温観測結果（サトウキビ、1983年8月2日）

測定地点	測定時刻	気 温	葉 温	葉気温差	容積含水率
久松 A	10:20	31.5°C	35.4°C	+3.9°C	35.0%
久松 B			37.8	+6.3	32.7
上 地	11:10	33.4	32.9	-0.5	47.0
砂川 A	13:30	32.9	32.9	0	30.2
砂川 B			34.6	+1.7	32.6
友利 A	14:40	33.1	34.4	+1.3	45.0
友利 B			36.0	+2.9	24.5
保良 A	15:30	31.4	33.1	+1.7	29.8
保良 B			34.0	+2.6	24.8

れにより葉気温差は灌水前後で大きく変動することが明らかとなった。さらに干ばつ被害の生じた宮古島において赤外放射温度計を用いて現地調査を試みた。その結果、被害地区と無被害地区とで作物葉温が異なり、わずかな土壤水分状態の違いにも反応を示すことが明らかとなった。このことは葉温観測値を用いた灌漑操作が可能であることを示唆するものである。

## 文 献

- Clawson, K. L. and B. L. Blad 1982 Infrared Thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agronomy Journal* **74**, pp. 311-316
- 長 智男・矢野友久・中野芳輔 1986 赤外放射温度計を用いた灌漑時期判定の試み, 農土論集, 125, pp. 37-44
- Feddes, R. A., P. Kowalik, K. K. Malinka and H. Zarandny 1976 Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *Journal of Hydrology*, **31**, pp. 13-26
- Federer C. A. 1982 Transpirational supply and demand: Plant, soil, and atmospheric effects evaluated by simulation. *Water Resources Research*, **18**, **2**, pp. 355-362
- Geiser, K. M., D. C. Slack, E. R. Allred and K. W. Stange 1982 Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference. *Transactions ASAE*, **25**, pp. 689-693
- Idso, S. B. and R. J. Reginato 1982 Soil- and Atmosphere-induced plant water stress in cotton as inferred from foliage temperatures. *Water Resources Research*, **18**, **4**, pp. 1143-1148
- Nimah M. N. and R. J. Hanks 1973 Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations : 1. Description and sensitivity. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **37**, pp. 522-532
- Rose, C. W., G. F. Byrne and G. K. Hansen 1976 Water transport from soil through plant to atmosphere : A Lumped-parameter model. *Agric. Met.* **16**, pp. 171-184
- 瀬口昌洋・田中宏平・四ヶ所四男美 1983 Scaling による出水発生場の土壌水分特性値の場所的分布性の評価, 農業土木学会講演要旨集, pp. 120-121
- Warrick, A. W., G. J. Mullen and Nielsen 1977 Scaling field-measured soil hydraulic properties using a similar media concept. *Water Resources Research*, **13**, **2**, pp. 355-362
- Zur B. and J. W. Jones 1981 A model for the water relations, photosynthesis, and expansive growth of crops. *Water Resources Research*, **17**, **2**, pp. 311-320

## Summary

The study reported here was conducted to evaluate the effectiveness of leaf temperature in estimating crop water stress. Firstly, a SPAC model was developed to examine the relationship between leaf temperature and soil moisture. Secondly, experimental tests were pursued on the relationship between soil moisture condition and crop indices such as leaf water potential, leaf temperature, leaf-air temperature difference. It was observed that leaf-air temperature difference showed drastic response to the irrigation treatment.

Infrared leaf temperature measurement were made at Miyako island, Okinawa where suffered severe drought from July to August in 1983. The investigated data showed that sugarcane leaf temperatures with lack of soil water were almost always higher than the temperatures with no shortage of soil water. These results obtained above will effectively be used for the irrigation scheduling.