

日本の圃場条件下における葉気温較差を用いた作物の かんばつ回避性の評価

福岡峰彦・谷英雄・岩間和人*・長谷川利拡・実山豊
(北海道大学)

要旨: 群落表面温度から気温を引いた値である葉気温較差 (ΔT) は、作物品種のかんばつ回避性を圃場条件下で簡便かつ非破壊的に推定できる指標であることが、大気飽差 (VPD) が比較的大きい、乾燥した国々での実験で報告されている。本研究では、VPD が比較的小さい日本の圃場条件下においても、 ΔT をかんばつ回避性の指標として用いることが可能か否かを検討した。なお、かんばつ回避性は気孔コンダクタンス (g_s) と葉内水分ポテンシャル (LWP) を無灌水条件下においても灌水条件下と同様に高く保つ能力と定義した。かんばつ回避性が大きく異なることが想定されるテンサイ、バレイショおよびイネ (水稲用および陸稲用品種) を、降雨を遮断して灌水と無灌水の2種類の土壌水分処理を行った畑圃場で供試した。植付けもしくは移植の7週間後から5週間、サーモグラフィ装置を用いて群落の ΔT を測定し、同時に g_s と LWP を測定した。無灌水区では ΔT に有意な作物間差が認められ、イネ水稲用品種で最も高く、イネ陸稲用品種、バレイショ、テンサイの順で低くなった。また、 g_s および LWP についても有意な差異が認められ、 ΔT とは逆にテンサイで最も高く、バレイショ、イネ陸稲用品種、イネ水稲用品種の順で低くなった。一方、灌水区では、これら3形質における作物間差は相対的に小さかった。3形質のいずれにも、土壌水分処理と作物との間に有意な相互作用が認められた (いずれも $p < 0.001$)。以上のことから、日本の圃場条件下でも、無灌水条件下における ΔT を用いて、作物のかんばつ回避性を推定評価できると推察した。

キーワード: 群落表面温度、サーモグラフィ、水稲、赤外放射測温、テンサイ、熱赤外画像、バレイショ、陸稲。

作物生産を制限する不良環境要因の中で最大のものは水不足であり (石井 1994)、比較的湿潤な気候帯に属する日本とて例外ではない。例えば、陸稲の作況指数は主産地の茨城県においては降水量の影響を強く受けてかんばつ年には低下し、年次間での変動幅は水稲の約4倍である (金 1990)。さらに、近年は日本の降水パターンが不安定化する傾向にあることが指摘されており (近森・紙井 2000、山下・小澤 2000)、作物を安定的に生産するためには高度なかんばつ適応品種の育成が必要である。

Loomis and Connor (1992) は植物のかんばつ適応機構を分類し、生育時期がかんばつ時期と重なるのを避ける戦略であるかんばつ逃避性 (drought escape) と、かんばつにより土壌水分が減少しても植物体の諸機能を維持する能力であるかんばつ抵抗性 (drought resistance) とに大別している。かんばつ抵抗性はさらに、植物体水分状態の低下に耐えて成長と水利用を継続する能力であるかんばつ耐性 (drought tolerance) と、植物体水分状態の低下が生じるのを防ぐ能力であるかんばつ回避性 (drought avoidance) とに分けられる。このかんばつ回避性は、低い気孔コンダクタンス (g_s)、高いクチクラ抵抗、放射負荷の軽減および小さい葉面積による水分消費の抑制と、深い根、高い根長密度および高い通導効率による水分吸収の維持とからなる。

日本において、夏の畑作物でかんばつがしばしば問題となるのは、梅雨期の多雨と高湿度により茎葉部が繁茂するのに対して根系は浅く発達が劣り、梅雨直後の夏期の乾燥する条件下で土壌下層からの水分吸収が困難となるため、

土壌深層に多くの水分を残したまま、植物に水ストレスが生じるためであるとされる (平沢 2002)。したがって、日本ではかんばつ回避性を構成する要因の一つである根系の集水能力を向上させることによって水分吸収を維持することで、比較的容易にかんばつの影響を避けることが可能であると考えられる。実際に、陸稲では土壌深層に従来品種より大きな根系をもつ高度耐乾性品種が育成されており、この品種はかんばつ年でも安定した生育を示し、減収程度が小さいことが報告されている (根本ら 1998)。しかし、圃場条件下における根系分布の調査には多大な時間と労力を要するため、集水能力の優劣を作物品種間で評価するのは大変困難である。

そこで、集水能力をより簡便に評価するための間接的指標として、植物体水分状態の指標である蒸散速度や g_s 、葉内水分ポテンシャル (LWP) が従来用いられてきた。しかし、これらの指標は測定に要する労力こそ、根系を直接調査するよりは軽減されるものの、その測定手法はそれぞれに欠点を抱えている。すなわち、蒸散速度と g_s の測定には主にライシメーターやポロメーターが用いられるが、ライシメーターは大規模な設備を必要とし、またポロメーターは測定対象が個葉の局所に限られることから群落全体を代表させるには問題が多い。LWP の測定には主にプレッシャーチャンバーとサイクロメーターが用いられるが、いずれもサンプルを破壊的に採取する必要があり、測定には手間や時間がかかる上、ある程度の技能が要求される。したがって、これらの手法を用いて、集水能力の優劣を群落全体を対象として非破壊的に評価するのは決して容

易ではない。

葉面からの蒸散が潜熱の放散により葉温を低下させることは古くから知られており (Gates 1964), この関係性をもとにして, 熱電対で測定した個葉局所の葉温から気温を差し引いた葉気温較差 (ΔT) から土壌の乾燥程度を推定し, 灌水管理を行う手法が考案された (Ehrler 1973). その後, 赤外放射温度計の実用化により, 個葉局所のみならず群落全体を対象とした測定が可能になったことから, 群落表面温度をもとに ΔT を算出し, 灌水管理を行う手法が提案された (Jackson ら 1977). 群落表面温度は赤外放射温度計や, 近年になって実用化されたサーモグラフィ装置を用いることで, 非接触および非破壊で遠隔的かつ迅速に測定が可能であるのに加え, 測定装置の取扱いが比較的容易であるため, 測定者の技能に影響されにくいという利点がある. さらに, 将来的には測定の一層の省力化や自動化も期待できる。

しかし, ΔT は蒸散による葉面熱収支を介して大気飽差 (VPD) の変動の影響を受けるため, 植物体水分状態を知るための絶対的な指標としては用いにくいという問題がある. そこで, VPD の変動が ΔT に及ぼす影響を考慮に入れ, 植物体内の水分状態の絶対的な指標としての汎用性を持たせた Crop Water Stress Index (CWSI) が開発された (Jackson ら 1981). しかし, CWSI を用いるにあたっては, VPD を算出するために湿度を測定しておく必要があり, また植物体に水ストレスが全く生じていない状態と, 極めて強い水ストレスにより蒸散がほぼ停止した状態の 2 水準において, 予め実験的に得た ΔT と VPD との関係から基準線を推定しておく必要があるなど, 簡便さに欠けるのが難点である。

一方, 指標としての絶対性よりも利用の簡便さを追求するため, 群落表面温度や ΔT のみを VPD 補正せずにそのまま用いて, 作物品種間における相対的なかんばつ回避性の差異を推定する試みがコムギ (Blum ら 1982, Blum ら 1989, Rashid ら 1999), バレイショ (Stark ら 1991), イネ (Garrity and O'Toole 1995), パールミレット (Singh and Kanemasu 1983) などで報告されている. しかし, これらの研究の多くは日中の VPD が大きく, 日射などの気象条件が安定している乾燥地帯において実験を行っている. これに対して, 日本は湿潤な気候帯に属しており, 一般に VPD が一日の中で最大となる昼前後でも比較的小さい. VPD は蒸散の推進力であり, VPD が大きな環境と比べて小さな環境では, 同じ g_s の差異であっても蒸散速度の差異は小さく, 結果として ΔT の差異も小さいことが予測される. 加えて, 日本では快晴の日が少なく, 気象条件が短時間で変動しがちであるため, 日本において ΔT を作物品種間でのかんばつ回避性の差異の推定に適用するにあたっては困難が予想される. 日本における報告は陸稲での例 (根本ら 1997) があるものの, 極めて限られている。

そこで本研究は, 日本において ΔT を用いた作物のかんばつ回避性の推定が可能であるか否かを明らかにすることを目的として, 降雨を遮断して灌水および無灌水の 2 種類の土壌水分処理 (以下, 水処理と表記する) を行った畑圃場において作物群を供試し, g_s および LWP と ΔT との関係を検討した. ただし, 本研究ではかんばつ回避性を「植物体内の水分状態を無灌水条件下においても灌水条件下と同様に高く保つ能力」と定義し, その指標として「 g_s の無灌水/灌水比」および「LWP の水処理間差」を用いた. なお, VPD の小さな日本の環境条件下における, ΔT を用いたかんばつ回避性の推定には, 前記のように測定上の困難が予測されたため, 本研究ではまずその端緒として, かんばつ回避性が同一作物の品種間よりもさらに大きいと想定される作物間での比較を行うこととし, 根系分布が大きく異なるテンサイ, バレイショ, イネの水稻用品種および陸稲用品種の 4 作物を供試作物として選定した。

材料と方法

実験は 2000 年に北海道大学農学部附属農場において行った. 供試品種はテンサイが「ユーデン」, バレイショが「コナフブキ」, イネの陸稲用品種が「早不知」, 水稻用品種が「あきたこまち」である. 栽植様式はテンサイおよびバレイショで 40 cm, イネで 20 cm の方形植えとした. 区制は 3 反復の分割試験区法で, 主区を水処理, 副区を作物とした. テンサイおよびイネはあらかじめペーパーポットで育苗しておき, バレイショとともに 5 月 29 日に圃場へ植付けた。

水処理を行うにあたって障害となる降雨を遮断するため, 圃場全体を覆う幅 7.2 m, 長さ 37 m のビニールハウスを植付け前に設置した. ハウスの側面のビニールは巻き上げ式とし, 降雨時と強風時を除いて常時開放することで, 気温, 湿度および風速についてのハウス内外での差が可能な限り小さくなるようにした. また, ビニールは光透過性の経時低下が比較的少ない農業用ビニール (三井化学プラテック (株) 製 スーパーライト T, 0.15 mm 厚) を使用した. 畦間には 40 cm 間隔で灌水チューブを設置し, 植付け後 1 ヶ月間は圃場全面に週 1 回ないし 2 回の頻度で総量 330 mm を灌水した. その後, 灌水を全く行わない無灌水区と, 引き続き灌水を行う灌水区を設け, 灌水区には群落表面温度の測定を行う前日に週 2 回の頻度で, 水処理開始後から群落表面温度の最終測定日 (8 月 30 日) までに総量 510 mm, 最終測定日から 10 月中旬に行った乾物重の調査期までに総量 480 mm を灌水した. 各作物における試験区 (プロット) の大きさは灌水区で 2.4 m 四方, 無灌水区で 2.4 m × 3.2 m とした。

群落表面温度の測定と熱画像の処理

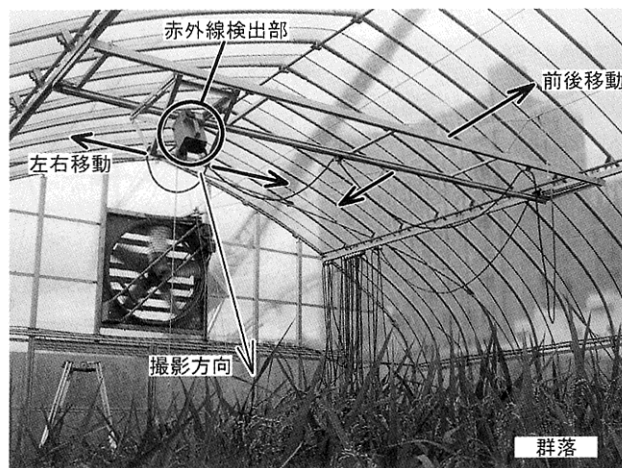
群落表面温度の測定は, 7 月 21 日から 8 月 30 日までの毎週, 原則として連続する晴天日の 2 日間に, サーモグラ

フィー装置 (NEC 三栄 (株) 製 TH1101, 測定波長 8~13 μm) を用いて行った。サーモグラフィ装置の赤外線検出部をハウス内の任意の測定位置に迅速に移動できるよう、レールを用いた移動装置をハウスの天井に設置し (第1図)、各プロットの北側、地上2.7mの高さから下向き60度に向けて測定した。放射率については、井上 (1986) が10 μm 付近の波長域における作物キャノピーの放射率はほぼ1とみなせると報告していることから、本実験では1に設定した。10時から14時の間に各プロット8回ずつの反復測定を行い、その平均を各測定日の代表値とした。ただし、7月21日はテンサイとバレイショのみを対象とした。全24プロットを測定するのに要する時間は、1回の測定につき20~30分であった。

典型的な熱画像の例として、測定期間半ばの8月10日にイネの陸稲用品種を測定したものを第2図(a)に示した。図に示されているように、各プロットのボーダーを除いた中央部分のおおよそ1.6m四方の範囲が1枚の熱画像となるように測定した。熱画像は、温度識別の最小単位であるピクセルが縦に207個、横に255個並んで構成され、計52785個のピクセルがそれぞれ固有の温度情報をもつ。

第2図(a)に示した熱画像についてのピクセルごとの温度の頻度分布を第2図(b)に示した。群落上方から見た葉群の分布が密であり、土壌表面がほとんど見えない場合には、頻度分布は通常、鋭いピークをもつ一頂型の分布となる。そこで、1枚の熱画像で最も多くのピクセルを占める、すなわちサーモグラフィ装置の視野内において最も多く観測される温度である最頻値を、各々の熱画像の温度代表値とした。なお、最頻値は著者らが独自に作成したパソコン用プログラム (REXX プロシージャ) を用いて容易に算出できるようにした。各熱画像の温度代表値から、熱画像測定の前後30秒以内に測定した気温を引き、 ΔT を算出した。

イネの水稲用品種は測定期間を通じて、群落上方から見た葉群の分布が疎らで土壌表面が透かし見える状態であった。第3図(a)に示した熱画像は、概ね出穂期にあたる8月25日に測定した、灌水区におけるイネの水稲用品種の例である。暗い部分は主に植物体であり、その周囲の明るい部分は主に背景の土壌表面である。熱画像の大部分が土壌表面によって占められた結果、温度の頻度分布 (第3図(b))にみられるピークは主に土壌表面の温度によって構成された。このため、最頻値は植物体の温度を代表する値として不適當であった。そこで、イネの水稲用品種については測定後の熱画像から目視により植物体の最低および最高温度を判定し、両者の中間の値 (最低温度と最高温度の平均) を各熱画像の代表値として最頻値の代わりに用いた。なお、この値を求める作業は時間と労力を要するため、後記する g_s および LWP の測定を行った日のみを対象とした。

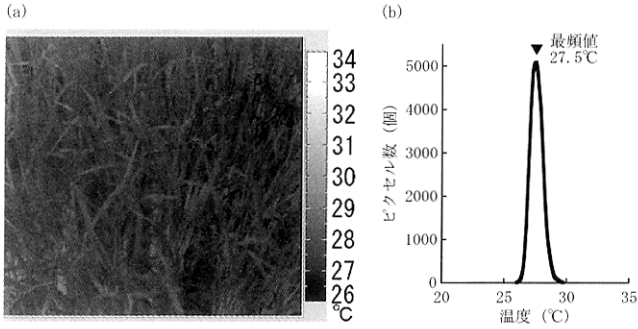


第1図 サーモグラフィ装置の赤外線検出部の移動装置。

g_s , LWP, 土壌水分ポテンシャル (SWP) および気象要素の測定

g_s および LWP の測定は群落表面温度の測定と同じ日に行ったが、測定に時間を要するため、毎週2日間の測定日のうち1日はテンサイおよびバレイショを、別のもう1日はイネの2品種を、それぞれ対象とした。 g_s は各プロット5個体 (イネのみ8個体) の最上位葉の裏面を各個体1ヵ所について、ポロメーター (Li-cor Inc. 製 LI-1600) を用いて10時から14時の間に測定した。LWP は各プロット1個体の最上位葉について、テンサイおよびバレイショはリーフパンチで打ち抜いた直径1cmの円形サンプルを、イネは1cmの長さで切断した葉身片を、いずれも5枚を1組として11時前後に採取し、サンプルホルダーに封入した状態で約1.5時間静置した後、サイクロメーター (Decagon Devices, Inc. 製 Tru Psi) を用いて測定した。なお、サンプルの静置と測定は室温25°Cの恒温室において行い、測定時の平衡時間は10分、冷却時間は15秒とした。

SWP は、各プロットの深さ20cm、50cmおよび100cmにテンシオメーターを埋設して、毎週2日間行う群落表面温度の測定日のうち、第1日目の夕方に測定した。また、 ΔT と VPD の算出に用いるための気温と相対湿度は、気温・相対湿度計 ((株) ティアンドデイ製 RTR-72) を用い、温湿度センサー ((株) ティアンドデイ製 TR-3220) を各反復中央の地上高1.0mに垂直に設置した筒形の放射除けに格納して、上部に取り付けた電動ファンで下方から上方に強制通風しながら測定した。水平面における日射の放射照度 (以下、日射強度と表記する) は全天日射計 (Li-cor Inc. 製 LI-200SB) を各反復中央の地上高1.2mに設置して測定した。気温、相対湿度および日射強度の測定間隔はいずれも1分とし、実験期間中継続して測定した。



第2図 イネ陸稲用品種の熱画像の例と、ピクセルごとの温度の頻度分布。

(a) 熱画像, (b) ピクセルごとの温度の頻度分布。

ピクセルは熱画像の最小構成単位で、1枚あたり52785個のピクセルが各々固有の温度情報をもつ。

乾物重の測定

全ての作物でほぼ成熟期に達した10月中旬に、テンサイおよびバレイショは各プロット8個体、イネの2品種は各プロット32個体について、テンサイは塊根と地上部、バレイショは塊茎、イネは穂と穂以外の地上部をそれぞれ採取した。通風乾燥機を用いて80°Cで72時間乾燥させた後、乾物重を測定した。

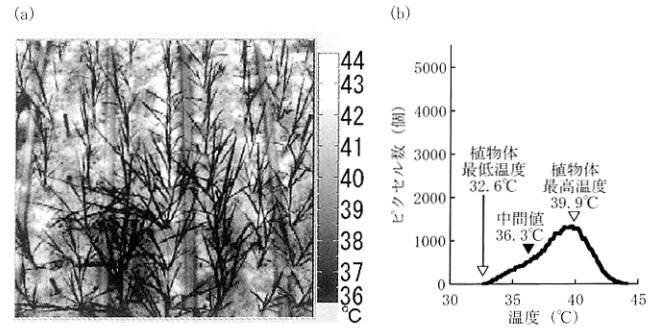
結 果

1. 土壌水分条件の推移

植付け後から水処理を開始するまでの期間では、いずれの作物および深さでも、SWPは0 kPa付近の高い値で推移した(第4図)。その後、灌水区では引き続き0 kPa付近で推移した。一方、無灌水区では、深さ20 cmのSWPはテンサイおよびバレイショでは水処理開始後に急速に低下し、イネの陸稲用品種ではこれらにやや遅れて低下した。しかし、イネの水稲用品種では低下がゆるやかであった。また、テンサイおよびバレイショでは7月中旬に、イネの陸稲用品種ではやや遅れて8月上旬に、それぞれ-80 kPa程度のテンシオメーターの測定限界値(Hillel 1997)にまで低下した。しかし、イネの水稲用品種では8月下旬でもおおよそ-60 kPaであった。さらに、深さ50 cmのSWPは、バレイショでは7月上旬からゆるやかに低下し、8月下旬におおよそ-30 kPaに達した。また、テンサイでは8月上旬から急激に低下し、8月下旬にはバレイショを超えるおおよそ-40 kPaに達した。しかし、イネでは両品種とも8月上旬までは灌水区と同程度の高い値で推移し、その後ゆるやかに低下したが、8月下旬でも-20 kPa程度の高い値であった。なお、図は省略したが、深さ100 cmのSWPはいずれの作物でも灌水区および無灌水区ともに期間を通じて0 kPa付近で推移した。

2. 気象条件の推移

個々の熱画像測定の前30秒以内に測定した日射強度、気温およびVPDについて、瞬間値の日平均値を第5図に



第3図 イネ水稲用品種の熱画像の例と、ピクセルごとの温度の頻度分布。

(a) 熱画像, (b) ピクセルごとの温度の頻度分布。

示した。日射強度の期間全体での平均は 0.5 kW m^{-2} であったが、日平均値は日によって大きく変動し、最低で 0.3 kW m^{-2} 、最高で 0.7 kW m^{-2} であった。一日の変動幅も日によって大きく異なり、標準偏差は最大で 0.25 kW m^{-2} 、最小で 0.07 kW m^{-2} であった。期間中に観測された瞬間値での最高は 1.2 kW m^{-2} 、最低は 0.1 kW m^{-2} であった。

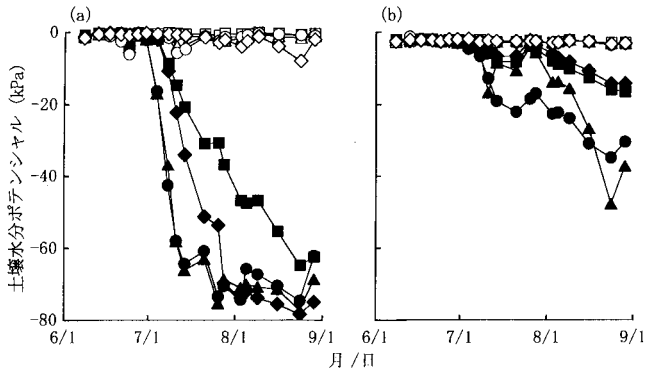
気温は期間の始めは低く、その後上昇した。日平均値は最低で 21.5°C 、最高で 29.6°C 、期間全体での平均は 27.6°C であった。期間中に観測された瞬間値での最低は 20.0°C 、最高は 31.5°C であった。また、VPDは気温とほぼ並行して推移し、期間の始めは低く、その後増大した。日平均値は最低で 0.4 kPa 、最高で 1.6 kPa 、期間全体での平均は 1.2 kPa であった。期間中に観測された瞬間値での最低は 0.3 kPa 、最高は 2.2 kPa であった。

3. 群落表面温度と ΔT の推移

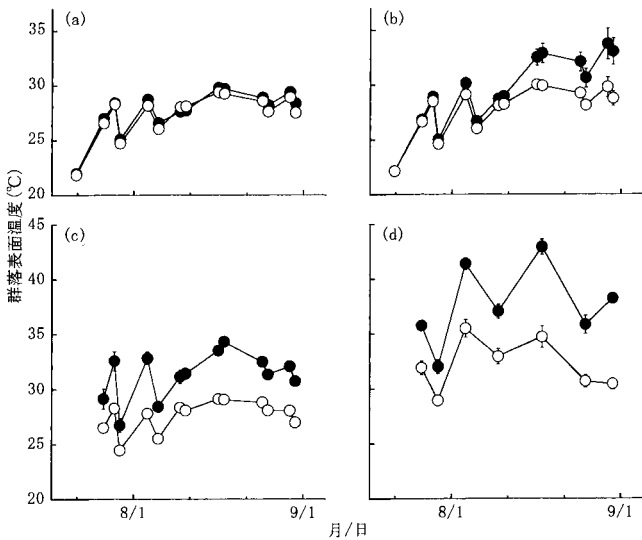
群落表面温度の生育に伴う推移を第6図に示した。群落表面温度には作物および水処理により値に高低がみられたものの、基本的には気温に追従して推移した。灌水区においては、テンサイ、バレイショおよびイネ陸稲用品種では、期間を通じて気温とほぼ同じ値で推移した。一方、イネの水稲用品種では8月中旬までは気温より 5°C 前後高い値で気温の上下動に追従しながら推移した。

無灌水区においては、テンサイでは灌水区と同様に気温とほぼ同じ値で推移した。一方、バレイショでは期間の始めは灌水区と同様に気温とほぼ同じ値で推移したが、期間の半ばからは気温の上下動に追従しながらも次第に上昇し、期間の終わりには気温より約 5°C 高い値に達した。また、イネの陸稲用品種では終始、気温よりも 2°C から 5°C 高い値で気温の上下動に追従しながら推移した。さらに、イネの水稲用品種では他の作物より著しく高く、気温より 7°C 以上高い値で推移した。他の作物と同様、基本的には気温の上下動に追従する傾向が認められたが、変動幅は他の作物と比べて大きかった。

ΔT の生育に伴う推移を第7図に示した。灌水区におい



第4図 深さ別の土壌水分ポテンシャルの推移。
(a) 深さ 20 cm, (b) 深さ 50 cm。
▲ △はテンサイ, ● ○はパレイシヨ, ◆ ◇はイネ陸稲用品種, ■ □はイネ水稲用品種。黒印は無灌水区, 白印は灌水区。

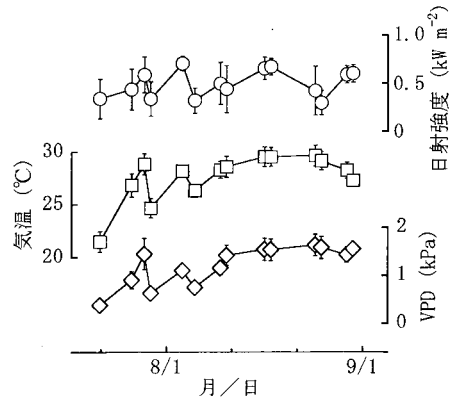


第6図 群落表面温度の推移。
(a) テンサイ, (b) パレイシヨ, (c) イネ陸稲用品種, (d) イネ水稲用品種。
黒印は無灌水区, 白印は灌水区。縦棒は標準誤差 (n=3)。

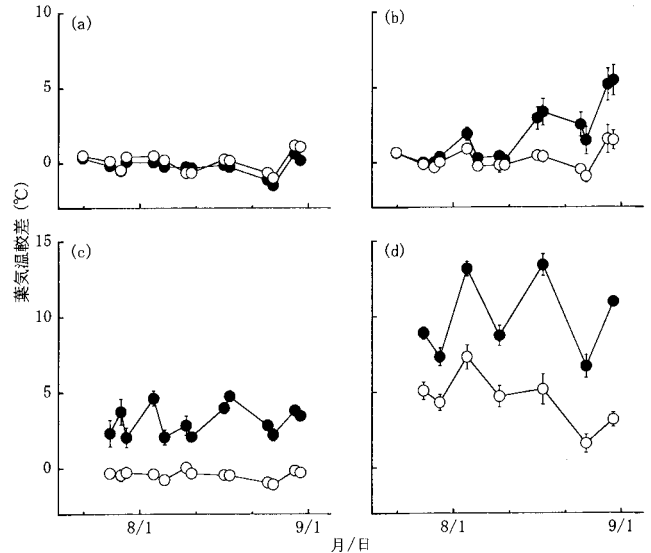
ては、テンサイ、パレイシヨおよびイネ陸稲用品種では、期間を通じていずれも 0°C 前後で推移した。一方、イネの水稲用品種では8月中旬までは 5°C 前後の ΔT を示し、他の作物と比べて終始高い値で推移した。無灌水区においては、テンサイでは灌水区と同様に終始 0°C 付近で推移した。一方、パレイシヨでは期間の始めは灌水区と同様に 0°C 付近で推移したが、期間半ばから上昇し、期間の終わりには約 5°C に達した。また、イネの陸稲用品種では終始 2°C から 5°C の間で変動しながら推移した。さらに、イネの水稲用品種では他の作物と比べて大幅に高い 7°C から 13°C の間で大きく変動しながら推移した。

4. ΔT と g_s および LWP との関係

ΔT , g_s および LWP について、測定期間中の平均値を



第5図 日射強度、気温および大気飽差 (VPD) の推移。
いずれの値も、熱画像と同時に測定した瞬間値の日常平均値。○は日射強度, □は気温, ◇は VPD。縦棒は標準偏差 (n=192, 7月21日のみ n=96)。



第7図 葉気温較差の推移。
(a) テンサイ, (b) パレイシヨ, (c) イネ陸稲用品種, (d) イネ水稲用品種。
記号は第6図と同一。

第1表に示した。無灌水区では、いずれの形質も有意な作物間差を示し、 ΔT はテンサイで最も低く、パレイシヨ、イネ陸稲用品種、イネ水稲用品種の順で高くなった。また、 g_s および LWP はテンサイで最も高く、パレイシヨ、イネ陸稲用品種、イネ水稲用品種の順で低くなった。

灌水区でもこれらの形質について有意な作物間差が認められたが、変異幅は無灌水区に比べて小さかった。また、 ΔT および g_s には、イネ水稲用品種と他の3作物との比較以外では、有意な差異は認められなかった。さらに、LWP には、パレイシヨとイネ水稲用品種およびイネ陸稲用品種との比較以外では、有意な差異は認められなかった。なお、作物間での順位関係は形質によって異なっており、 g_s 以外の形質では無灌水区の順位関係とも一致しなかった。

第1表 葉気温較差, 気孔コンダクタンスおよび葉内水分ポテンシャルの測定期間中の平均値。

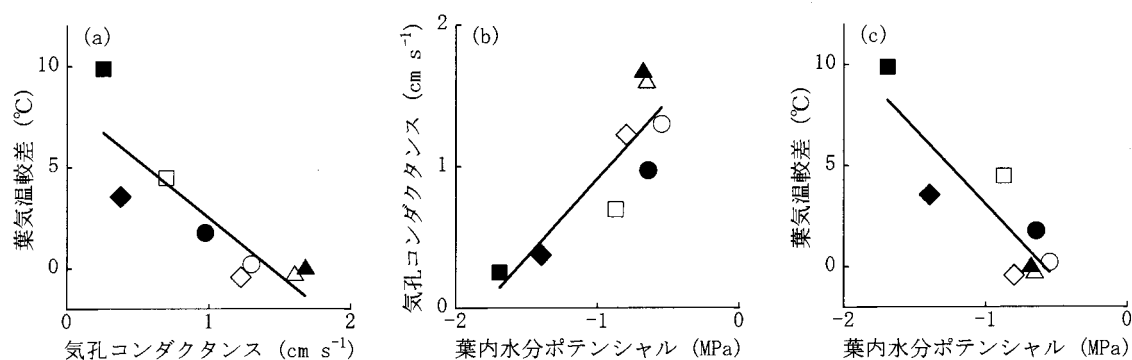
作物	葉気温較差 (°C)			気孔コンダクタンス (cm s^{-1})			葉内水分ポテンシャル (MPa)		
	無灌水区	灌水区	水処理間差 ¹⁾	無灌水区	灌水区	無灌水/灌水区	無灌水区	灌水区	水処理間差 ²⁾
テンサイ	0.07 a ³⁾	-0.22 a	0.29 a	1.68 a	1.61 a	1.04 a	-0.68 a	-0.66 ab	0.02 a
バレイショ	1.84 ab	0.22 a	1.62 ab	0.97 b	1.30 a	0.75 ab	-0.65 a	-0.55 a	0.10 a
イネ陸稲用品種	3.25 b	-0.42 a	3.67 ab	0.38 c	1.23 a	0.31 b	-1.40 b	-0.80 b	0.60 b
イネ水稲用品種	9.89 c	4.49 b	5.40 b	0.25 c	0.70 b	0.36 b	-1.69 c	-0.87 b	0.82 b

- 1) 葉気温較差の水処理間差は無灌水区の値から灌水区の値を引いた値。
- 2) 葉内水分ポテンシャルの水処理間差は灌水区の値から無灌水区の値を引いた値。
- 3) 各列において同一のアルファベットのついた値は, Scheffe 法により 5%水準で有意な差がないことを示す。

第2表 収穫期における部位別乾物重および無灌水/灌水比。

作物	部位	乾物重 (g m^{-2})				無灌水/灌水比
		無灌水区		灌水区		
		平均	標準誤差 ¹⁾	平均	標準誤差	
テンサイ	塊根	1121	106	1181	110	0.95
	塊根・地上部合計	1492	132	1546	72	0.96
バレイショ	塊茎	588	31	692	23	0.85
イネ陸稲用品種	穂	351	132	473	65	0.74
	穂・地上部合計	750	164	944	92	0.79
イネ水稲用品種	穂	13	11	188	78	0.07
	穂・地上部合計	158	59	376	101	0.42

1) n=3.



第8図 形質間の相関関係。

(a) 気孔コンダクタンスと葉気温較差。

$$y = -5.666x + 8.177, r = -0.860, p = 0.006$$

(b) 葉内水分ポテンシャルと気孔コンダクタンス。

$$y = 1.111x + 2.029, r = 0.853, p = 0.007$$

(c) 葉内水分ポテンシャルと葉気温較差。

$$y = -7.456x - 4.376, r = -0.869, p = 0.005$$

記号は第4図と同一。値は測定期間を通じた平均。

ΔT , g_s および LWP のいずれでも, 水処理と作物との間に有意な相互作用が認められた (いずれも $p < 0.001$)。灌水区と無灌水区との関係を考えるために, 水処理間で比をとることができる g_s については灌水区の値に対する無灌水区の値の比 (無灌水/灌水比) を, 比をとることができない LWP と ΔT については水処理間差 (LWP: 灌水区 - 無灌水区, ΔT : 無灌水区 - 灌水区) を, それぞれ第1表に示した。

g_s の無灌水/灌水比はテンサイで最も大きく, バレイショ, イネ水稲用品種, イネ陸稲用品種の順で小さくなった。 ΔT および LWP の水処理間差はいずれもテンサイで最も小さく, バレイショ, イネ陸稲用品種, イネ水稲用品種の順で大きくなった。 g_s および LWP の作物間差は灌水区に比べて無灌水区で著しく大きく, g_s の無灌水/灌水比と無灌水区の値との間, および LWP の水処理間差と無灌水区の値との間には, いずれも強い相関関係が認められ

た(それぞれ $r=0.984$, $p=0.015$ および $r=-0.995$, $p=0.005$). ただし, イネの水稲用品種は灌水区においても通常の水田状態と比べて生育が著しく劣っており, g_s が他の3作物と比べて低下していたことから, 土壤乾燥ストレスを受けていたことが示唆された. このため, イネの水稲用品種については通常の水田状態を基準とした場合に比べて, g_s の無灌水/灌水比は過大に, LWPの水処理間差は過小に, それぞれ評価している恐れがある. しかし, 土壤乾燥ストレスが存在しない条件での値として, 灌水区におけるイネ水稲用品種の値に代えて, 灌水区におけるイネ陸稲用品種の値を用いた場合でも, g_s の無灌水/灌水比と無灌水区の値との間, およびLWPの水処理間差と無灌水区の値との間には, いずれも強い相関関係が認められた(それぞれ $r=0.990$, $p=0.010$ および $r=-0.993$, $p=0.007$).

灌水区と無灌水区の全体について, ΔT , g_s およびLWPの形質間の関係をみると(第8図), ΔT と g_s およびLWPとの間には, それぞれ有意な負の相関関係が認められた. また, LWPと g_s の間には有意な正の相関関係が認められた.

5. 収穫期における乾物重

第2表に, 収穫期における各作物の乾物重を示した. 灌水区の乾物重に対する無灌水区の乾物重の比, すなわち乾物生産能力からみた耐乾性は, テンサイで最も高く, パレイショ, イネ陸稲用品種, イネ水稲用品種の順で低くなった. g_s の無灌水/灌水比と収穫部位乾物重の無灌水/灌水比との間には正の相関関係が($r=0.662$, $p=0.338$), LWPの水処理間差と収穫部位乾物重の無灌水/灌水比との間には負の相関関係が($r=-0.866$, $p=0.134$), それぞれ認められた. なお, 前記のように, イネの水稲用品種については通常の水田状態を基準とした場合に比べて, g_s および収穫部位乾物重の無灌水/灌水比は過大に, LWPの水処理間差は過小に, それぞれ評価している恐れがある. しかし, 灌水区におけるイネ水稲用品種の値に代えて, 灌水区におけるイネ陸稲用品種の値を用いた場合でも, g_s の無灌水/灌水比およびLWPの水処理間差と, 収穫部位乾物重の無灌水/灌水比との間にはいずれも前記と同様の相関関係が認められた(それぞれ $r=0.776$, $p=0.223$ および $r=-0.890$, $p=0.110$).

考 察

植物体温度情報を指標にした作物品種間でのかんばつ回避性の差異の推定に関する研究は, その多くが日中のVPDが大きく, 日射などの気象条件が安定している乾燥地帯において実験を行っている. 例えば, Blumら(1982, 1989)はイスラエルで実験を行っており, また米国アイダホ州で実験を行ったStarkら(1991)はVPDが1.22から4.68 kPaであったと報告している. 米国カンザス州で実

験を行ったSingh and Kanemasu(1983)はVPDを図示しており, おおよそ2から7 kPaであったことが読み取れる.

一方, 日本におけるVPDは, これらの研究が行われた地域と比較して極めて小さい. 日本におけるVPDの現況を把握するため, 作物が梅雨明け後の厳しい乾燥にさらされる8月の全国における日最大VPDを, 1998年から2000年までの3ヵ年について, 「気象庁年報」(気象庁1999, 2000, 2001)の相対湿度および蒸気圧の特別データをもとに算出した. なお, 都市部の気象観測点では近年, 都市化の影響により相対湿度が著しく低下しているとの報告があり(三澤1998), 農耕地の環境とは大きく異なる可能性がある. そこで, 本報では全国を代表する観測点として, 「気象庁気候変動監視レポート2001」(気象庁2002)において, 都市化の影響が少ないことと地理的位置を考慮して選ばれている地上気温観測点のうち, 「現在天気」のデータがない伏木を除く16地点(網走, 根室, 寿都, 山形, 石巻, 長野, 水戸, 飯田, 銚子, 境, 浜田, 彦根, 多度津, 宮崎, 名瀬および石垣島)を用いた. VPDの日最大値を15時の観測における現在天気で類別した上で, 各年, 各日および各観測点についてすべて平均すると, 快晴だった日では1.90 kPa, 晴または快晴だった日では1.72 kPa, 降水現象がなかった日では1.59 kPaであった. すなわち, 日本におけるVPDはこれまでの諸外国における報告例と比較して大幅に小さいといえる. 加えて, 降水現象がなかった日は1ヵ月に27.9日あったが, 晴または快晴だった日は14.6日, 快晴だった日は2.7日しかなかった. このように, 比較的大きなVPDが得られる天候の日は限られており, 逆に天候を選ばなければ小さなVPDのもとで測定を行わなければならないという, 相反する制約がある.

本実験において, 個々の熱画像測定の前30秒以内に測定したVPDは, 瞬間値で0.3~2.2 kPa, 日平均値で0.4~1.6 kPa, 期間全体での平均値で1.2 kPaであり, 日本全国での平均値と比較して同等ないし若干小さめであったといえる. このようなVPD条件下においても, ΔT と g_s およびLWPとの間に強い負の相関関係が認められたことは, 日本を始めとするVPDが小さい環境においても, ΔT が g_s およびLWPの間接的指標となりうることを示している.

また, 本実験では可能な限り, 日射が安定している晴天の日を選んで測定を行ったが, それでも一日の測定の間には雲の通過などにより日射強度が短時間で変動し, 必ずしも安定した気象条件のもとで測定が行われたとはいえない. 前記のように, 日本の8月は快晴の日が少なく, 気象条件が短時間で変動することは避けられない. しかし, 一日毎の ΔT の測定において反復測定を行うことにより, 短時間での気象条件の変動による影響は, 実用上差し支えない程度に平準化できていたと考えられる.

イネは生育を通じて比較的浅い土層 (深さ 0~25 cm) から吸水するのに対して、テンサイは生育に伴って吸水活動の場を浅い土層から、中間の土層 (25~50 cm) を経て、深い土層 (50~75 cm) へと順に移していくことが報告されている (上堂 1987)。また、深さ別にみた根の分布割合は、浅層ではバレイショ・テンサイ<イネの順で大きくなるのに対して、深層ではイネ<バレイショ<テンサイの順で大きくなり、また根系諸形質 (乾物重、長さ、表面積および体積) について全体の 9 割が含まれる平均土壌深度はイネでは深さ 23 cm と浅いのに対して、バレイショでは 35 cm と中間程度、テンサイでは 51 cm と深いことが報告されている (Yamaguchi and Tanaka 1990)。さらに、イネの根数は深さ 20 cm までは水稲用品種が陸稲用品種に比べて多いが深層においては逆に少なく、根重は深さにかかわらず水稲用品種が陸稲用品種に比べて小さいと報告されている (長谷川ら 1960)。本実験では根系分布の調査は行わなかったが、本実験の供試作物ではテンサイが最も深い根系をもち、バレイショ、イネ陸稲用品種、イネ水稲用品種の順で浅くなっていたと推測される。また、無灌水区においても深さ 100 cm の土壌深層に終始十分な水が存在していたことから、根系をより深層まで展開して集水能力を高めることで、灌水の制限によって生じた土壌乾燥ストレスを回避できる土壌水分環境であったと推察される。

本実験の g_s および LWP には、無灌水区において大きくかつ有意な作物間差が認められた一方、灌水区においては両形質の差異は小さかった。水処理と作物との間には両形質ともに有意な相互作用が認められ、無灌水区における g_s および LWP の灌水区に対する低下程度は、より深い根系をもち、集水能力が高いと考えられる作物ほど小さかった。したがって、本実験の作物間ではその生育過程において、主に根系深度の違いによりかんばつ回避性の差異が生じていたと考えられる。また、 g_s の無灌水/灌水比と無灌水区の値との間、および LWP の水処理間差と無灌水区の値との間にはいずれも強い相関関係が認められ、 g_s の無灌水/灌水比および LWP の水処理間差は主としてそれぞれの無灌水区の値によって決定されていた。したがって、 g_s および LWP の無灌水区における値のみを、かんばつ回避性の指標として用いても差し支えないと推察できる。なお、本実験では g_s の無灌水/灌水比、および LWP の水処理間差と、収穫期における各作物の収穫部位乾物重の無灌水/灌水比との間にも関係性が認められた。このことから、かんばつ回避性は収量にもとづいて評価される総合的な耐乾性にも関連している可能性がある。

ΔT についても、 g_s および LWP と同様に無灌水区において大きくかつ有意な作物間差が認められた一方、灌水区においては差異は小さかった。また、水処理と作物の間には有意な相互作用が認められた。灌水区と無灌水区の全体について g_s および LWP と ΔT との関係を見ると、いずれも有意な負の相関関係が認められた。さらに、無灌水

区における ΔT の順位は、 g_s および LWP の順位とは完全な逆順であった。このように、無灌水条件下における ΔT は、 g_s および LWP によるかんばつ回避性評価とよく一致していたことから、無灌水条件下における ΔT を用いてかんばつ回避性の差異を推定評価できると推察した。

本実験と同様に、土壌乾燥条件下における植物体温度情報を用いて畑作物の耐乾性が比較評価できることを示した例としては、Blum ら (1982) がコムギ品種間で、群落表面温度と LWP および g_s との間にそれぞれ有意な負の相関があり、土壌の乾燥が強くなるほど群落表面温度と LWP との相関係数は大きく、有意性は高くなると報告している。さらに、Blum ら (1989) はコムギ品種間で、群落表面温度が高い品種ほど土壌の乾燥による収量の低下が大きいと報告しており、品種間での比較にあたっては土壌乾燥ストレスが十分にかかっている必要があると指摘している。また、Garrity and O'Toole (1995) は陸稲品種間で、群落表面温度と収量との間に強い負の相関関係があると報告している。さらに彼らは、耐乾性の異なる陸稲品種群の ΔT に有意な差異が存在し、耐乾性が高いことが既知である品種の ΔT は低かったと報告している。

これに対し、むしろ土壌乾燥ストレスの小さい灌水条件下で得られた植物体温度情報の方が、畑作物の耐乾性を比較評価する上で有用であるとする報告もある。例えば、Stark ら (1991) はバレイショについて、また Singh and Kanemasu (1983) はパールミレットについて、いずれも品種間で葉温や群落表面温度、 ΔT といった植物体温度情報と耐乾性との関係を検討している。このうち Stark ら (1991) は、十分な灌水条件下においては均質な土壌水分条件が得やすく、また灌水が行われている通常の育種圃場をそのまま使って測定が行えるため、別個に無灌水区や雨除けの覆いを設置する必要がないことを利点として挙げている。また Singh and Kanemasu (1983) は、灌水条件下における ΔT は無灌水条件下におけるそれに比べて品種間の差異が大きく、このため品種間における耐乾性の差異を判別しやすいと報告している。しかし、これらの報告では VPD が大きい、すなわち大気の蒸発要求が高い環境で実験が行われており、灌水条件下といえども植物体にはかなりの乾燥ストレスが生じていた可能性がある。Singh and Kanemasu (1983) は土壌の乾燥が進むほど植物体温度の品種間差は小さくなると報告しているが、これは無灌水条件下では乾燥ストレスが過大となり、ほとんどの品種において同程度まで蒸散が低下してしまったことが原因ではないかと思われる。

しかし、本実験において g_s および LWP の作物間差がいずれも無灌水区に比べて灌水区で著しく小さかったことは、VPD が比較的小さい日本において、十分な灌水条件下で生じる乾燥ストレスは、灌水の制限による土壌乾燥条件下で生じるそれと比べて極めて軽微であることを示している。本実験は品種間よりも大きな差異が想定される作物

間で比較を行ったにもかかわらず、灌水条件下における g_s および ΔT にはイネ水稲用品種と他の3種の畑作物との間以外に差異は認められなかった。また、かんばつ回避性は主として無灌水条件下における値により決定されており、灌水条件下における値とは関係性が認められなかった。これらのことから、日本においては十分な灌水条件下では畑作物にかんばつ回避性の差異は生じないと考えられる。灌水を行うことには Stark ら (1991) が指摘しているように均質な土壤水分条件が得られるなどの利点はあるにしても、十分な灌水条件下において畑作物を対象としてかんばつ回避性を比較することは、日本においては無意味であるといえよう。したがって、灌水をある程度制限した土壤乾燥ストレス条件下で比較を行うことが適当であると考えられる。

サーモグラフィー装置を用いた群落表面温度の測定は極めて迅速であり、所要時間は LWP や g_s の半分以下である。また、熱画像から群落表面温度の代表値を算出し、気温との差から ΔT を得る作業は、パソコン上で動作するプログラムを用いることで概ね自動化できる。以上を総合すると、サーモグラフィー装置を用いて測定した無灌水条件下の群落表面温度にもとづく ΔT は、かんばつ回避性の差異を比較評価する手法として優れていると考えられる。なお、かんばつ回避性の各作物における品種間差は、本研究で取り扱った作物間差と比較して小さいと予想されることから、実際の育種場面での利用の可否については今後、同一種内における品種間比較を行って明らかにする。

謝辞: 本実験に使用した陸稲種子は静岡大学教育学部藤井道彦先生よりお譲りいただきました。ここに記し、深く感謝申し上げます。

引用文献

- Blum, A., J. Mayer and G. Gozlan 1982. Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. *Field Crops Res.* 5: 137–146.
- Blum, A., L. Shpiler, G. Golan and J. Mayer 1989. Yield stability and canopy temperature of wheat genotypes under drought-stress. *Field Crops Res.* 22: 289–296.
- 近森邦英・紙井泰典 2000. わが国の年降水量の変動について. *農土誌* 68: 34–40.
- Ehrler, W.L. 1973. Cotton leaf temperature as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agron. J.* 65: 404–409.
- Garrity, D.P. and J.C. O'Toole 1995. Selection for reproductive stage drought avoidance in rice, using infrared thermometry. *Agron. J.* 87: 773–779.
- Gates, D.M. 1964. Leaf temperature and transpiration. *Agron. J.* 56: 273–277.
- 長谷川新一・中山兼徳・白井恵治 1960. 畑作物水陸稲の吸水特性の比較. *日作紀* 28: 279–280.
- Hillel, D. 1997. 土壌物理学概論 第5版. 岩田進午監修, 高見晋一・内嶋善兵衛訳. 朝倉書店, 東京. 73.
- 平沢正 2002. 作物と水. 作物学事典. 日本作物学会編. 養賢堂, 東京. 153–158.
- 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.
- 石井龍一 1994. 植物生産生理学. 朝倉書店, 東京. 1–5.
- Jackson, R.D., R.J. Reginato and S.B. Idso 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water. Resour. Res.* 13: 651–656.
- Jackson, R.D., S.B. Idso, R.J. Reginato and P.J. Pinter, Jr. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water. Resour. Res.* 17: 1133–1138.
- 上堂秀一郎 1987. 畑作物の水分代謝と気孔特性に関する実験生態学的研究. *愛媛大学農学部紀要* 31: 1–130.
- 気象庁 1999. 平成10年 気象庁年報. 気象業務支援センター, 東京. 機械可読データファイル (CD-ROM).
- 気象庁 2000. 平成11年 気象庁年報. 気象業務支援センター, 東京. 機械可読データファイル (CD-ROM).
- 気象庁 2001. 平成12年 気象庁年報. 気象業務支援センター, 東京. 機械可読データファイル (CD-ROM).
- 気象庁 2002. 日本の気候変動. 気象庁編, 気候変動監視レポート 2001. 財務省印刷局, 東京. 13–23.
- 金忠男 1990. 耐干性. *農業技術* 45: 38–43.
- Loomis, R.S. and D.J. Conner 1992. *Crop ecology: productivity and management in agricultural systems.* Cambridge University Press, Cambridge. 224–256.
- 三澤正 1998. 日本の主要都市における近年の湿度変化. 千葉大学教育学部研究紀要 (自然科学編) 46: 1–10.
- 根本博・和田義春・平山正賢 1997. 陸稲育種における葉面温度による耐干性選抜法. *日作紀* 66 (別1): 228–229.
- 根本博・平山正賢・岡本和之・宮本勝・須賀立夫 1998. 陸稲新品種「ゆめのはたち」の育成. 茨城県農業総合センター生物工学研究所研究報告 2: 57–74.
- Rashid, A., J.C. Stark, A. Tanveer and T. Mustafa 1999. Use of canopy temperature measurements as a screening tool for drought tolerance in spring wheat. *J. Agron. Crop. Sci.* 182: 231–237.
- Singh, P. and E.T. Kanemasu 1983. Leaf and canopy temperatures of pearl millet genotypes under irrigated and nonirrigated conditions. *Agron. J.* 75: 497–501.
- Stark, J.C., J.J. Pavek and I.R. McCann 1991. Using canopy temperature measurements to evaluate drought tolerance of potato genotypes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116: 412–415.
- Yamaguchi, J. and A. Tanaka 1990. Quantitative observation on the root system of various crops growing in the field. *Soil. Sci. Plant Nutr.* 36: 483–493.
- 山下佳彦・小澤孝三 2000. 気候の温暖化が降水量に与える影響. *技術開発年報* 8: 39–44.

Difference between Canopy Temperature and Air Temperature as a Criterion for Drought Avoidance in Crop Genotypes under Field Conditions in Japan : Minehiko FUKUOKA, Hideo TANI, Kazuto IWAMA, Toshihiro HASEGAWA and Yutaka JITSUYAMA (*Grad. Sch. of Agr., Hokkaido Univ., Sapporo 060-8589, Japan*)

Abstract : The difference between canopy temperature and air temperature (ΔT) is reported to be a convenient criterion for the non-destructive evaluation of drought avoidance of crop varieties under field conditions in arid countries, where vapor pressure deficit (VPD) is high. We examined its validity under field conditions in Japan, where VPD is low. We defined the drought avoidance as the ability to maintain stomatal conductance (g_s) and leaf water potential (LWP) under non-irrigated conditions as high as those under fully irrigated conditions. Four crops (sugar beet, potato and two rice genotypes of upland and lowland), which were assumed to be greatly different in drought avoidance, were grown in both fully irrigated and non-irrigated fields under a rain shelter. For five weeks starting from the 7th week after planting, ΔT was measured by infrared thermography, in concurrence with the measurement of g_s and LWP. In the non-irrigated plot, ΔT , g_s and LWP differed significantly among the crops; lowland rice showed the highest ΔT and the lowest g_s and LWP, followed by upland rice, potato and sugar beet. Meanwhile, in the irrigated plot, their differences were relatively small. There was significant interaction between irrigation treatment and crop in ΔT , g_s and LWP (all $p < 0.001$). These results indicate that the difference in drought avoidance among crops can be evaluated under field conditions in Japan, using ΔT under non-irrigated conditions.

Key words : Infrared thermometry, Lowland rice, Paddy rice, Potato, Sugar beet, Thermography, Upland rice.
