

傾斜装置による水ストレス条件下における イネの葉温の品種間差異

Cultivar Differences in Leaf Temperature of Rice under Water Stress Condition by the Slope Type System

藤井道彦
Michihiko FUJII

（平成5年10月12日受理）

Abstract

Slope type system was made in order to set phasic soil desiccation condition easily. Slope type system consists of flooded W1 plot, and the set from W2 plot to W5 plot. Except for W1 plot, only W2 plot contacts with water table. And the soil bottom of W3, W4 and W5 plots are set high and are apart from the water table, and water is supplied only from W2 plot by oblique water movement. So, compared with the stair type "field" in the previous report, phasic water stress condition could be made by smaller system, and the amount of the needed soil was less.

Using the slope type system, leaf-air temperature differences of three cultivars of rice (Akihikari, IRAT13 and Dular1) were measured continuously by thermocouple. As soil desiccation phase becomes severe, leaf-air temperature differences become higher, but there was distinct cultivar differences, and leaf-air temperature difference of Akihikari became much higher than other cultivars.

圃場条件下で段階的な土壌乾燥程度を設定するには、大規模な圃場面積や灌水設備を必要とする^{6, 20, 21, 25, 27}。著者は、容易に段階的な土壌水分段階を設定する装置として、前報において階段型模擬「圃場」を作製し、4段階の土壌乾燥程度を設定した⁷。しかしながら、強度の乾燥を設けるためには、水面から約180cmの高さまで土壌を充填する必要があり、栽培面積に対して大量の土壌を必要とした。本研究では、階段型模擬「圃場」と比較して、土壌の必要量はるかに少なく、容易に段階的な水ストレス条件を設定することができる、傾斜装置を作製した。傾斜装置は、水面から土壌の底面までの距離によって、段階的な土壌水分段階を設定したもので、圃場条件と同様に乾燥回避性^{12, 13, 14, 16, 18, 23}を発揮しやすいものとした。

水ストレス状態をとらえる指標としては、葉身水ポテンシャル¹⁵があるが、主として破壊測定であり、特に圃場条件下での連続測定は困難である。また、放射温度計を用いた葉温測定も行われているが^{9, 5, 10, 20}、多品種や多処理区についての連続測定は、区が隣接していなければ、複数の放射温度計を必要とするために、困難である。本研究では、土壌乾燥条件下でも高い生

本研究の一部は、財団法人新技術財団の奨学寄付金によるものである。

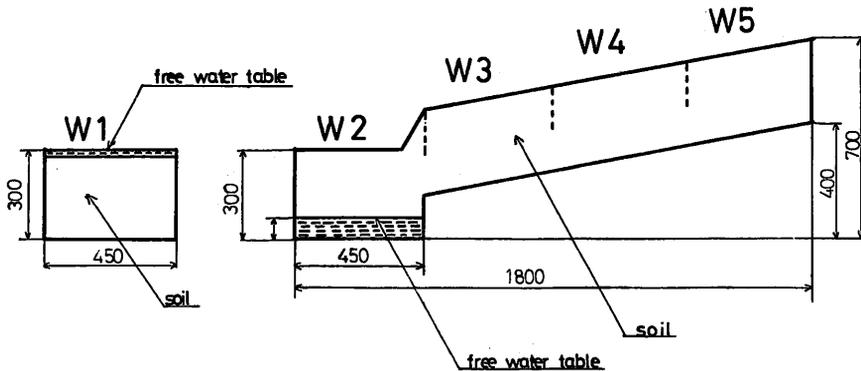


Fig.1. Diagram of slope type system. Width of this system is 75cm.

長が保たれる耐乾性品種のスクリーニングを行うために、熱電対を用いて^{16, 20)}、イネの葉温の連続測定を行い、水ストレスレベルの推定を行った。

本報では、傾斜装置を用いて段階的な土壌水分段階を設定し、イネの葉温の連続測定により、水ストレスレベルの品種間差異について検討した結果について報告する。

材料と方法

供試品種として、来歴が異なり水ストレスに対して異なる反応を示すと考えられる品種を用い、水稻系統から日本型水稻のアキヒカリ、日印交雑品種で韓国の多収品種である密陽23号、陸稲品種からインド型でコートジボアールの改良型陸稲である IRAT13、フィリピンの在来型陸稲である Salumpikit、インドの在来型水陸両用稲の Dular1 の計 5 品種を用いた。

1992年5月27日に、催芽種子をペーパーポットに播種し、7月13日に傾斜装置に1本植えて移植した。品種間は12cmとし、各品種は7cm間隔で1列に移植した。

傾斜装置は、Fig.1に示すように、奥行き180cm、幅75cm、高さ30cmで、土壌を傾斜させており、水面からの距離の違いによって、湛水区(W1区)から強ストレス区(W5区)までの、土壌水分の異なる5段階の処理区を設定したものである。各処理区は幅75cm、奥行き45cmである。傾斜装置の周囲にはコンクリートブロックで堀を作り、内側にビニルシートを敷き、水を5cm貯め、水位が低下したら水を補給した。湛水区であるW1区は、W2区からW5区のセットとは独立に、コンクリートブロックの外に設置した。傾斜装置は、W2区のみコンクリートブロック内の水面に接し、W3区からW5区では土壌底面が水面より高く位置するため、W2区からの斜め方向への水の移動によってのみ、土壌水分が供給される。

傾斜装置は、降雨を避けるために、無加温のガラス室内に設置した。施肥は、元肥として10a当り窒素成分量で4kg、追肥として4kgを与え、合計で窒素8kgとした。移植直後は、活着させるために土壌表面に灌水したが、移植8日後の7月21日以降は灌水を停止し、土壌乾燥処理を開始した。

W1区からW4区までのアキヒカリ、IRAT13、Dular1について、各区の中央付近から生育の平均的な1個体を選び、完全展開した上位3葉についての平均葉気温差を、銅-コンスタンタン熱電対を用いて8月11日から収穫日まで連続測定した。熱電対は、直径0.1mm、長さ110cmの銅線とコンスタンタン線を交互に組み合わせ、3組直列に接続して作製した⁸⁾(Fig.2)。

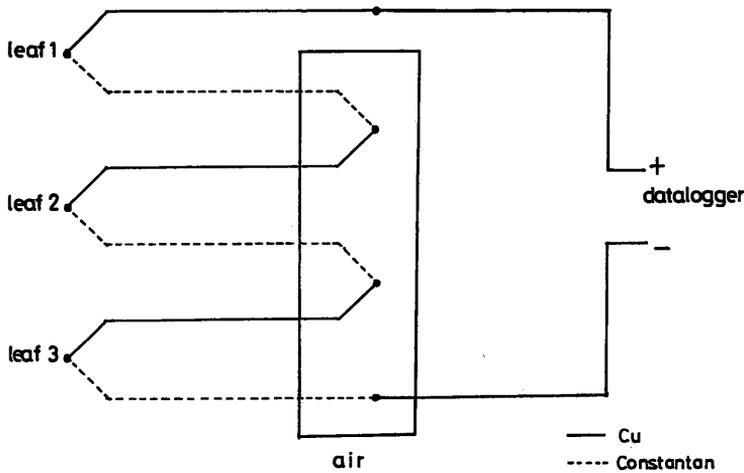


Fig.2. Diagram of measuring leaf-air temperature difference by thermocouple.

気温測定部は、直射日光を避けるために、発泡スチロール3枚により作製した気温測定ハウスの内に設置した。発泡スチロールは厚さ1cmのもので、屋根面は1枚が20×25cm、底面は25×30cmとした。発泡スチロール製の屋根面の裏側は、光の反射を防ぐためにスプレーで黒色に着色した。

また、葉温測定部は、約5mm角の絆創膏で葉身の裏側に接着した。そして、気温測定部と葉温測定部を直列に接続することにより、葉気温差を直接測定した。葉温測定部は、葉身の展開につれて上位葉に移動させた。熱電対の両端は銅線に接続し、その銅線をデータロガー（21X、Campbell社製）に接続して測定を行った。なお、測定前に葉気温差センサーのキャリブレーションを行った。

葉気温差の測定は30秒毎に行い、30分毎の平均値として、データロガーのメモリーに記録した。データは、2～3日おきにRS232Cインターフェイスを介して、パソコンに転送した。

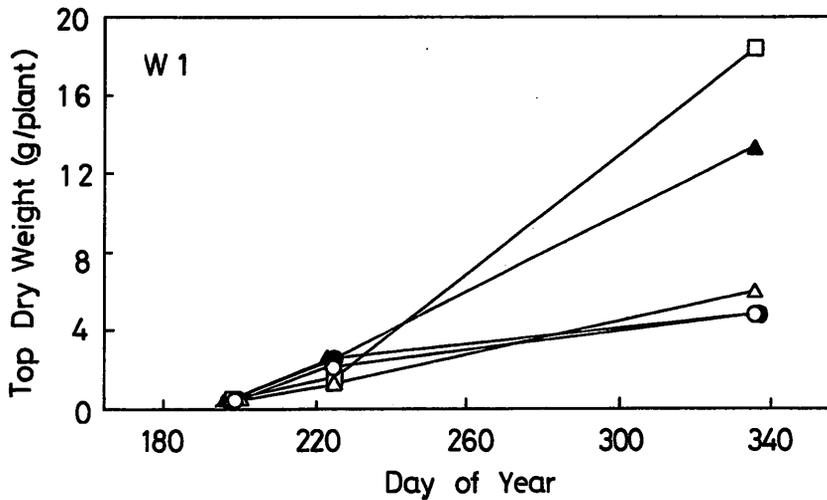
各区について、土壤乾燥処理開始時の7月17日と、8月12～13日、および12月1～8日の収穫時に抜取り調査し、通風乾燥機に入れて80℃で48時間以上乾燥させた後、葉・茎・穂の部位別の地上部乾物重を測定した。

結果

1. 地上部乾物重

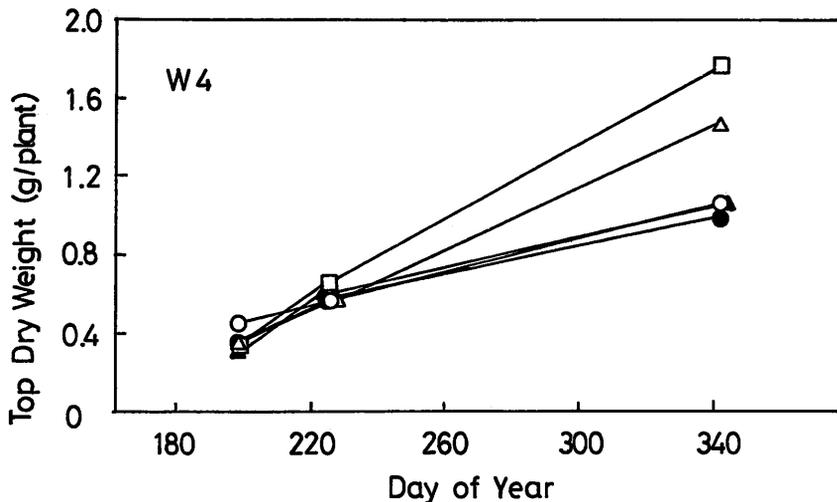
湛水区であるW1区における個体当たり地上部乾物重は、7月11日、8月12日、収穫時の12月1～8日と、生育が進むにつれて急激に増加したが、増加程度には品種間でも明確な差異が認められた（Fig.3）。収穫時において、Salumpikitは18.6g、密陽23号は13.4gと、他品種に比べて高い値を示した。一方、アキヒカリとDular1では、約5gと低い値を示した。

強ストレス区であるW4区における地上部乾物重の増加は、W1区と比べて著しく抑制された（Fig.4）。W4区においても地上部乾物重に品種間差異が認められ、収穫時において陸稲系統のSalumpikitとIRAT13が、それぞれ1.8g、1.5gと、他品種と比べ高い値を示したのに対し、Dular1と、水稻系統のアキヒカリ、密陽23号では、約1.0gと低い値を示した。水稻の



○: Akihikari △: IRAT13 □: Salumpikit ●: Dular1 ▲: Milyang23

Fig.3 Changes in top dry weight in W1 plot.



○: Akihikari △: IRAT13 □: Salumpikit ●: Dular1 ▲: Milyang23

Fig.4 Changes in top dry weight in W4 plot.

多収品種である密陽23号は、W1区では高い値を示したが、W4区の値は低く、W1区と比較した低下が著しかった。

Table1に、W1区からW4区までの、収穫時の地上部乾物重を示す。W1区からW4区へと土壤の乾燥段階が進行するとともに、地上部乾物重もW1区の4.8~18.6g、W2区の2.5~14.5g、W3区の1.1~5.7g、W4区の1.0~1.8g、W5区の0.4~0.6gへと、段階的に減少する傾向が認められた。

Table 1. Top dry weight at harvest of each cultivar in each treatment.

Treatments	Top Dry Weight (g/plant)				
	Akihikari	IRAT13	Salumpikit	Dular1	Milyang23
W 1	4.79	5.95	18.55	4.77	13.43
W 2	6.13	5.19	14.48	2.49	9.26
W 3	1.92	3.30	5.66	1.08	3.79
W 4	1.06	1.49	1.78	1.00	1.06
W 5	0.43	0.42	0.62	0.51	0.44

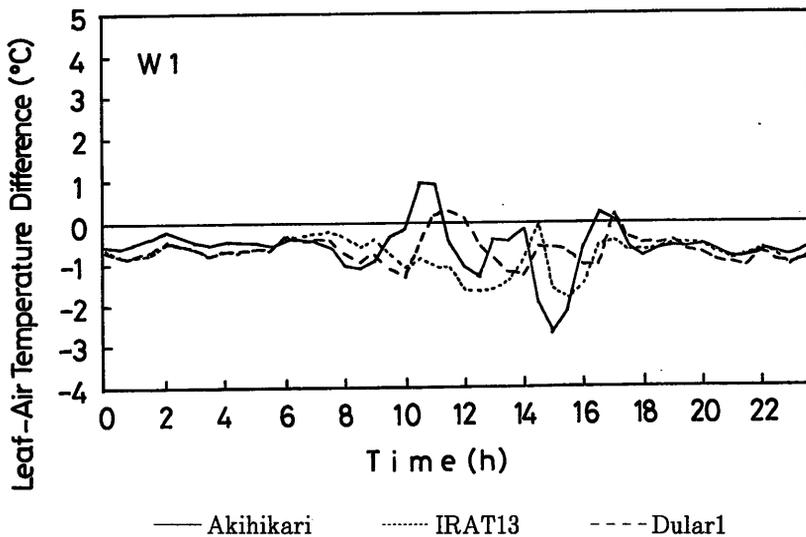


Fig.5. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W1 plot on August 20.

2. 葉気温差の日変化

晴天日の8月20日における、W1区の葉気温差の日変化をFig.5に示す。いずれの品種においても、日中には大きく低下し、負の値を示す傾向が認められた。葉気温差の日変化における品種間差異では、アキヒカリは15時に約 -3°C と大きく低下したのに対し、Dular1は最低で約 -1.5°C と低下は小さかったが、長時間にわたる明確な品種間差異は認められなかった。夜間は、いずれの品種の葉気温差もほぼ -0.5°C ～ -1°C であった。

8月20日における、W2区の葉気温差の日変化をFig.6に示す。W2区の葉気温差の日変化も、W1区と同様に日中に低下する傾向を示した。W2区でも、明確な品種間差異は認められなかったが、日中の最低値では、IRAT13は約 -3°C と低下が大きかったのに対し、アキヒカリは約 -2°C と低下が小さかった。

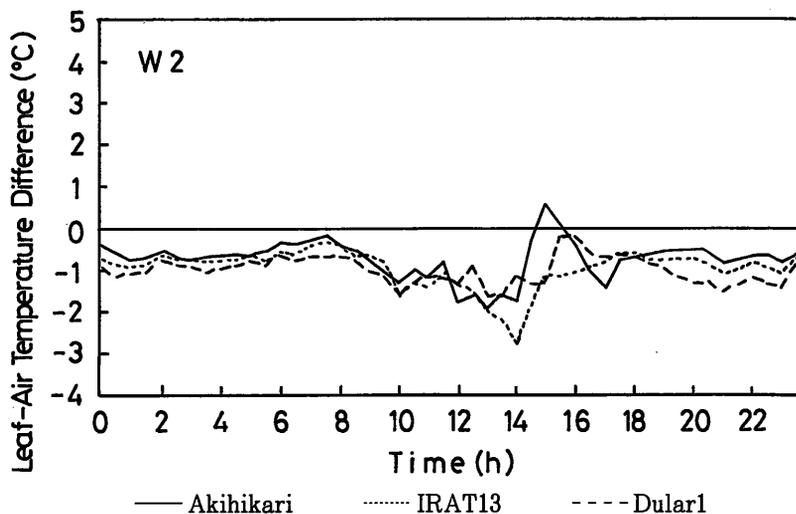


Fig.6. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W2 plot on August 20.

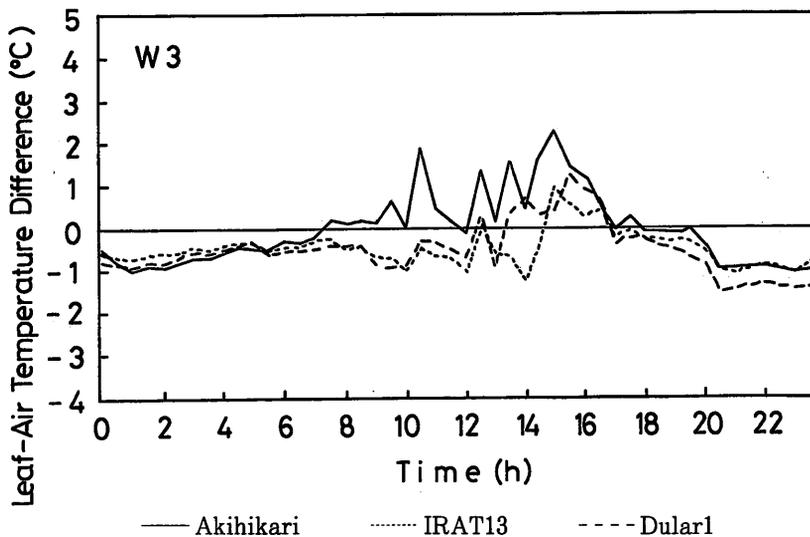


Fig.7. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W3 plot on August 20.

8月20日における、W3区の葉気温差の日変化をFig.7に示す。W3区では、日中に葉気温差が上昇する傾向が認められ、いずれの品種も最高値は正の値を示した。また、明確な品種間差異が認められ、アキヒカリの葉気温差は、日中においてIRAT13とDular1よりも高い値で推移し、最高値は約 $+2^{\circ}\text{C}$ であった。

8月20日における、W4区の葉気温差の日変化をFig.8に示す。W4区では、いずれの品種の葉気温差も、日中にW3区よりもさらに大きく上昇し、W1区の日変化の傾向と大きく異なった。W4区において、葉気温差には顕著な品種間差異が認められた。アキヒカリは、他品

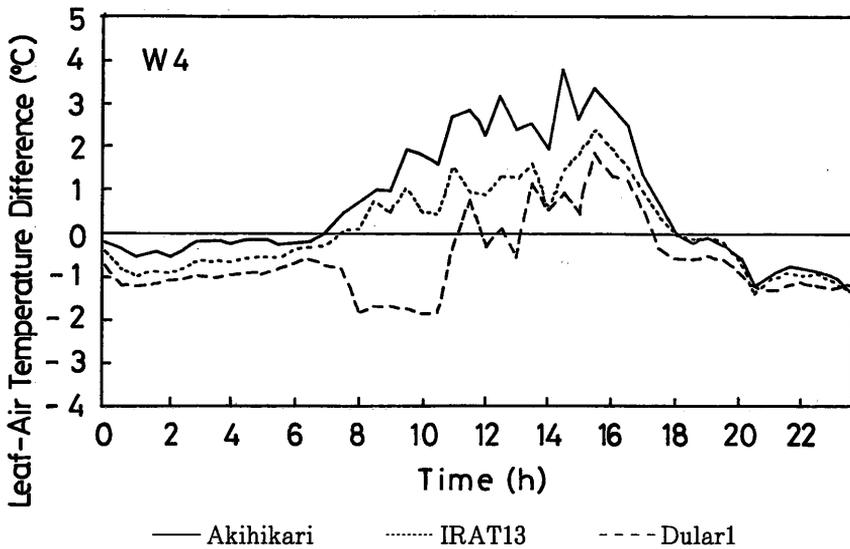


Fig. 8. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W4 plot on August 20.

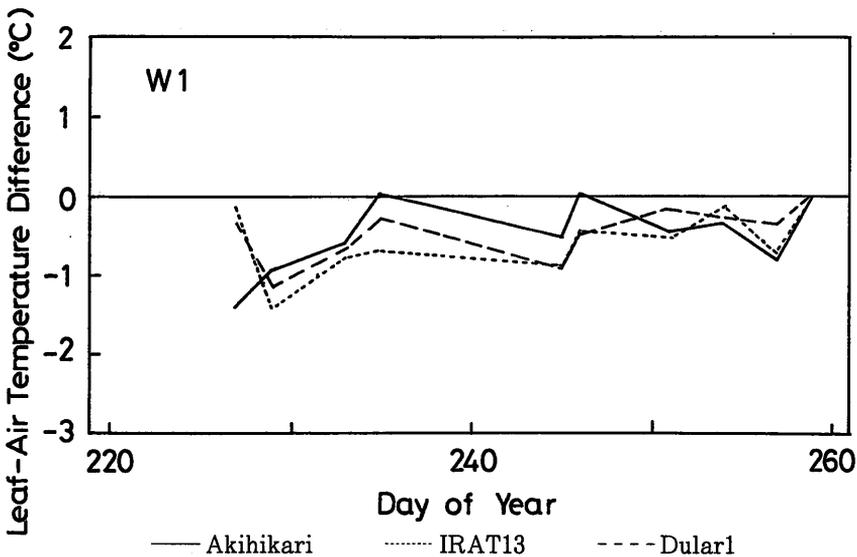


Fig. 9. Daily changes in average leaf-air temperature difference in W1 plot.

種よりも葉気温差が1日中高い値を示したが、日中には大きく上昇し、最高値は約+4°Cであった。IRAT13は、アキヒカリより低い値を示し、最高値は約+2.5°Cであった。一方、Dular1の葉気温差は最も低く、最高値で約+2.0°Cであったが、特に午前中は他品種より大きく低下し、負の値を示した。

3. 葉気温差の日平均値の経日変化

W1区における、葉気温差の日平均値の経日変化をFig.9に示す。なお、この図の値は、晴天であった8月14 (DOY 227)、16 (DOY 229)、20 (DOY 233)、22日 (DOY 235)と、9

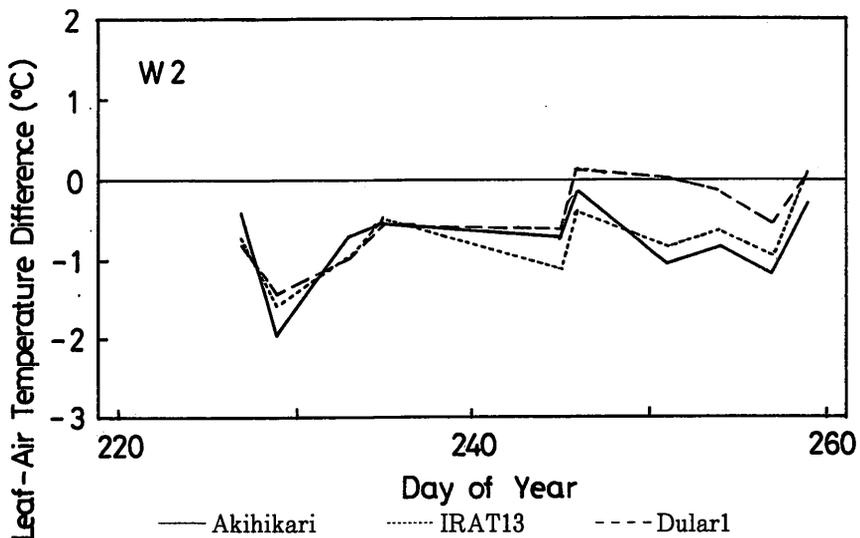


Fig.10. Daily changes in average leaf-air temperature difference in W2 plot.

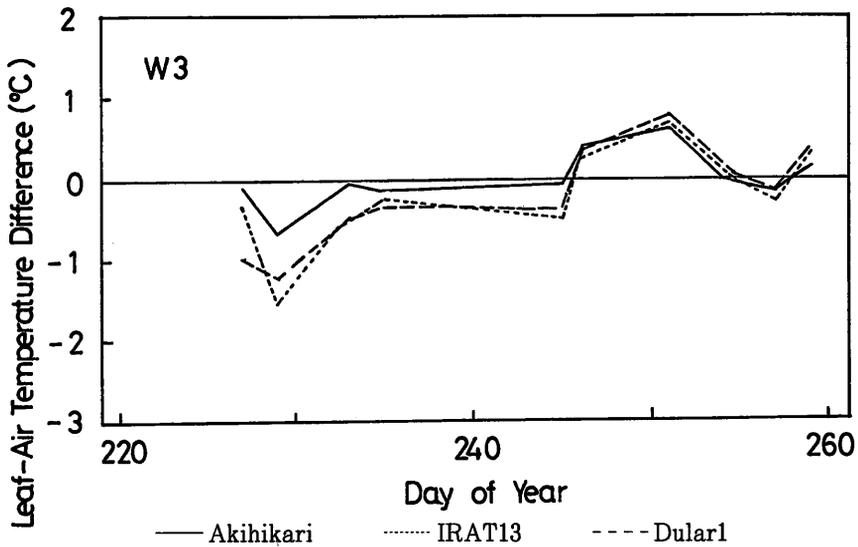


Fig.11. Daily changes in average leaf-air temperature difference in W3 plot.

月1 (DOY 245)、2 (DOY 246)、7 (DOY 251)、10 (DOY 254)、13 (DOY 257)、15日 (DOY 259)について示したものである。いずれの品種の日平均値もほぼ負の値で推移したが、アキヒカリは9月2日までは最も高い値を示し、その後は他品種よりも低下した。一方、Dular1は9月2日まではアキヒカリよりも低い値を示したが、その後は上昇した。IRAT13は、約 -1°C と低い値を示し、9月10日以降を除いて最も低い値で推移した。

W2区における、葉気温差の日平均値の経日変化をFig.10に示す。W2区でもW1区と同様に、ほぼ負の値で推移したが、9月2日以降、Dular1は他品種よりも高い値を示した。

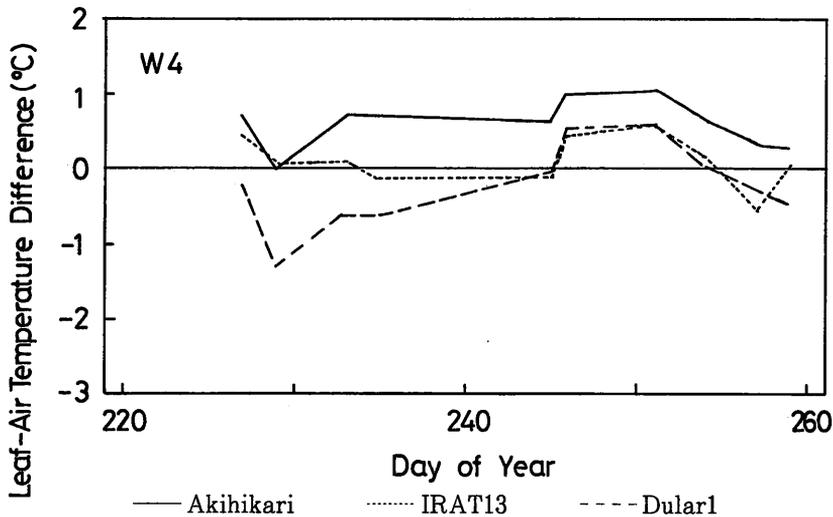


Fig.12. Daily changes in average leaf-air temperature difference in W4 plot.

W3区における、葉気温差の日平均値の経日変化を Fig.11 に示す。W3区では、9月2、7、15日に、いずれの品種も正の値を示した。品種間差異では、9月2日までは、アキヒカリは他品種よりも高い値を示したが、その後は差は認められなかった。

W4区における、葉気温差の日平均値の経日変化を Fig.12 に示す。W4区では、W3区の日平均値よりもさらに高い値で推移した。また、W4区の日平均葉気温差の品種間差異は、W3区よりも顕著であった。アキヒカリは常に正の値を示し、+1°C近くと高い値で推移した。一方、Dular1の日平均葉気温差は他品種と比べ、最も低い値で推移し、特に8月16日には-1°C以下であった。また、IRAT13の日平均葉気温差は、初期はアキヒカリと同程度であったが、9月1日以降はDular1と同程度に低く保たれた。

考 察

圃場において、段階的な土壌乾燥程度を設定した例^{6, 20, 21, 26, 27)}もあるが、圃場での設定にはスプリンクラーなどの灌漑設備や広い面積を必要とする。また、日本のように降水量の多い条件下で土壌乾燥処理を行う場合、天候によっては土壌の乾燥に長期間を要する^{7, 8)}。一方、ポット実験において、異なる灌水量を与えることにより、段階的な土壌水分段階を設定することも可能であるが、灌水量に段階を設けるには労力を要する。また、ポット条件では圃場条件と比較して根圏が制限されるために、耐乾性の品種間差異が圃場条件と異なることが考えられる¹⁾。本研究では、圃場に近い条件において、容易に段階的な土壌乾燥程度を設定することを試みた。本研究で作製した傾斜装置を用いることにより、Table1 に示したように、地上部乾物重がW1区からW5区へと段階的に低下し、イネの生長に影響を及ぼす5段階の土壌乾燥段階を設定することができたことを示している。

前報⁷⁾の階段型模擬「圃場」では、水面からの垂直方向のみの距離により土壌乾燥段階を設定していたため、供試したすべての品種の収穫時乾物重を湛水区の半分程度にまで抑制するためには、土壌の深さを180cm程度とする必要があった。このため、強乾燥区を設定するためには膨大な土壌の量が必要となり、広い栽培面積を設けることは困難となる欠点があった。

本研究で用いた傾斜装置では、水面からの水平方向の距離によって土壌水分段階を設定する (Fig.1) ために、土壌の深さはいずれの区でも 30cm で一定であり、土壌水分段階を設定するために必要な土壌の量は、はるかに少量しか必要としない利点がある。また、W3区において、収穫時地上部乾物重は湛水区のW1区と比較して、全品種が半分程度の値を示した (Table 1)。本研究ではW5区まで設定したが、湛水区の生長の約半分程度までの水ストレス条件を対象とする場合には、W3区まで設定すればよく、本研究で用いた傾斜装置よりもさらに非常に小規模な装置とすることも可能である。

このように、本研究で用いた傾斜装置は、土壌の必要量が少なく、さらに傾斜装置を複数台用いることにより、各土壌水分段階の供試面積を容易に拡大することが可能であると考えられる。また、階段型模擬「圃場」では、水面からの土壌の高さが装置により数段階にあらかじめ固定されているために、土壌乾燥の段階が固定されるが、傾斜装置では連続的に土壌乾燥程度を設定することが可能である。なお、この傾斜装置では、W2区からW5区までにおいては、深根性品種の根が隣接する、より湿潤な区に伸長することが考えられる。この場合には、圃場において重要であると考えられている¹⁰⁾ 乾燥回避性^{12, 13, 14, 16, 18, 20)} を、各区が隔離されている場合よりも顕著にとらえることができるため、利点と考えられる。また、例えばW3区における蒸散が非常に盛んな場合には、一時的にはW3区の土壌の方がW4区よりも乾燥する可能性も考えられるが、W3区の収穫時乾物重はW1区の1/2~1/4と大きく抑制され、W4区ではさらに抑制された (Table 1) ことから、影響は小さいと考えられる。一方、玉井^{24, 25)} は自動灌水式苗床を考案しているが、地下水位の上下により土壌水分を調節しているため、強度に乾燥させるためには地下水位を約1mにする必要がある。また、土壌の深さが15cmと浅いため、乾燥回避性^{12, 13, 14, 16, 18, 20)} を発揮させることは困難であると思われる。傾斜実験としては、IITAやIRRIにおいて圃場で行われた例があるが^{14, 17)}、IRRIの例で長さ100mと大面積を必要とする。本研究の傾斜装置は、作製が容易で、段階的な土壌乾燥条件を設定することができ、また乾燥回避性を発揮しやすいものと考えられる。なお、本装置での土壌乾燥程度は気象環境に依存し、制御することができない点は、今後の課題である。

葉温の測定法としては、放射温度計を用いた例も多いが^{3, 5, 10, 20)}、日中の一定時刻のみの測定であることも多く、多処理区について連続測定を行うのは困難であると思われる。本研究では、著者らが圃場で2品種について測定した方法⁹⁾ により、熱電対を用いて葉気温差を連続測定することにより、水ストレスレベルをとらえることを試みた。

W1区の葉気温差は、日中に負の値を示す傾向がみられたが (Fig.5)、W3区では日中の最高値は正の値を示し (Fig.7)、強ストレス区であるW4区では、日中の葉気温差はさらに上昇する傾向にあった (Fig.8)。しかし、それぞれの土壌水分段階において、品種間差異が認められ、その差はW1区からW4区へと水ストレスが強度になるに従って拡大した (Figs.5, 6, 7, 8)。水稲であるアキヒカリは、W1区では8月20日に最低値が低かったが (Fig.5)、W3区では測定期間の前半において他品種よりも高い値を示し (Fig.11)、さらにW4区では、測定期間全体にわたって最も高い値を示した (Fig.12)。一方、耐乾性品種とされている^{4, 19)} Dular1は、W1区とW2区では、葉気温差が他品種よりも顕著に低い傾向は認められなかったが (Figs. 9, 10)、強ストレス区であるW4区における葉気温差は、測定期間全体にわたって、アキヒカリよりも顕著に低く保たれていた (Fig.12)。また、陸稲であるIRAT13も、W4区における葉気温差は、初期にはアキヒカリと同程度と高かったが、生育の進行に伴い、

Dular1と同程度の値にまで低下した。Dular1とIRAT13は、強ストレス区であるW4区においても、蒸散を高く保つことにより葉温を低下させており、一方、アキヒカリはW4区では蒸散が抑制されて葉温が上昇しているものと推定される。

圃場において、アキヒカリとDular1の葉気温差の比較を行った結果でも、土壤乾燥条件下でアキヒカリの葉気温差がDular1より上昇する傾向が認められており⁹⁾、圃場条件下での品種間差異と同じ傾向を、傾斜装置を用いてとらえることができた。これは、傾斜装置の土壤の厚さは30cmと深く、また異なる土壤水分段階の区が隔離されずに隣接しているために、圃場条件と同様に深根性¹⁰⁾が発揮されやすいためと考えられる。

葉気温差と乾物生産との関係についてみると、W1区において葉気温差が最も低かったIRAT13の収穫時乾物重は6.0gで、アキヒカリとDular1の4.8gよりも大きな値を示した(Table 1)。また、W4区においても、IRAT13は葉気温差が低く保たれ、収穫時の乾物重は1.5gで、アキヒカリの1.1gよりも大きな値を示した。しかし、W4区で最も葉気温差が低く保たれていたDular1の収穫時乾物重は1.0gと、大きな値を示さなかった。この原因としては、出穂日の違いなどが考えられるが、葉気温差と乾物重との関係についてはさらに検討が必要で、今後の課題である。

以上のように、本研究で作製した傾斜装置を用いて、圃場に近い条件下での段階的な水ストレス条件を容易に設定することができ、熱電対を用いた葉気温差の連続測定により、イネの水ストレスレベルの品種間差異をとらえることができ、アキヒカリは土壤水分の低下に従って、Dular1やIRAT13と比較し、葉気温差が大きく上昇した。また、水ストレス条件下の乾物生産の品種間差異を、熱電対による葉気温差の連続測定によりとらえる可能性が示唆された。

要 旨

段階的な土壤乾燥程度を容易に設定するために、傾斜装置を作製した。傾斜装置は、湛水区であるW1区と、W2区からW5区のセットで構成されている。W1区以外は、W2区のみが水面に接しており、W3区からW5区では土壤底面が水面から高く位置し、W2区からの斜め方向への水の移動によってのみ、土壤水分が供給される。このため、前報で報告した階段型模擬「圃場」と比較し、小規模な装置により段階的な水ストレス条件を設定することができ、必要な土壤の量も少なかった。

本研究で作製した傾斜装置において、アキヒカリ、IRAT13、Dular1の3品種のイネについて、葉気温差を、熱電対を用いて連続測定した。土壤乾燥段階が強度になるに従って、葉気温差は上昇したが、アキヒカリの葉気温差は他品種よりも大きく上昇し、顕著な品種間差異が認められた。

謝 辞

本論文を取りまとめるに当たり、貴重な御助言をいただいた静岡大学農学部助手狩野敦博士に、厚く感謝の意を表します。また、本実験に御協力いただいた、本学教育学部卒業生の辛川有希君と本学教育学部自然観察実習地技官石原清二氏に、謹んで御礼申し上げます。

引用文献

1. Ahmad S. 1985. Physiological responses of diverse rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to water deficits in the vegetative stage. Ph. D. Thesis. Kyoto University, Kyoto. Japan.
2. Ball, M. C., I. R. Cowan and G. D. Farquhar 1988. Maintenance of leaf temperature and the optimisation of carbon gain in relation to water loss in a tropical mangrove forest. Aust. J. Plant Physiol. 15:263-276.
3. 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 Research 5 :137-146.
4. Chang T. T., G. C. Loresto and O. Tagumpay 1974. Screening rice germ plasm for drought resistance. Sabrao Journal. 6 (1) 9-16.
5. Clawson, K. L., R. D. Jackson, and P. J. Pinter, Jr. 1989. Evaluating plant water stress with canopy temperature differences. Agron. J. 81:858-863.
6. Cruz R. T. and J. C. O'Toole 1984. Dryland rice response to an irrigation gradient at flowering stage. Agron. J. 76:178-183.
7. 藤井道彦 1992. 階段型模擬「圃場」を用いたイネの水ストレスレベルの品種間差異と乾物生産の関係. 静岡大学教育学部研究報告(自然科学編) 43:27-40.
8. 藤井道彦・堀江武 1989. イネの水ストレスに関する生態生理学的研究 2. 圃場におけるストレス回避性と乾物生産. 日作紀58(別2):135-136.
9. 藤井道彦・堀江武 1990. イネの水ストレスに関する生態生理学的研究 3. 熱電対を用いた葉温の連続測定による水ストレスの検出. 日作紀59(別2):233-234.
10. 井上吉雄 1987. 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.
11. IRRI 1986. Annual report for 1985. Los Banos, Philippines. 305-319.
12. Jones, H. G. 1983. Drought and drought tolerance. In Plants and microclimate. Cambridge University Press, Cambridge. 212-226.
13. 小葉田亨 1983. イネ登熟期における水ストレスと穀実収量との関係に関する水分生理学的研究. 京都大学博士論文, 京都.
14. 小葉田亨 1990. 第7章水利用と耐乾性 第2節耐乾性. 稻学大成第2巻生理編. 農文協, 東京.
15. 小葉田亨・高見晋一 1984. プレッシャーチェンバーによるイネ葉身の水ポテンシャル測定法の検討. 日作紀53:290-298.
16. Levitt, J. 1972. Responses of plants to environmental stress. Academic Press, New York.
17. Mambani, B., and R. Lal. 1983. Responses of upland rice varieties to drought stress. II. Screening rice varieties by means of variable moisture along a toposequence. Plant Soil 73:73-94.
18. O'Toole, J. C. and T. T. Chang 1979. Drought resistance in cereals -Rice:a case study. In stress physiology on crop plants. (Ed.) H. Mussell and R. C. Staples, Wiley Interscience, New York. 373-405.

19. O'Toole, J. C. and T. B. Moya 1978. Genotypic variation in maintenance of leaf water potential in rice. *Crop Sci.* 18:873-876.
20. O'Toole, J. C., N. C. Turner, O. P. Namuco, M. Dingkuhn and K. A. Gomez 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Sci.* 24:1121-1128.
21. Plaut Z., M. Ben-Hur, and A. Meiri 1992. Yield and vegetative growth as related to plant water potential of cotton irrigated with a moving sprinkler system at different frequencies and wetting depths. *Irrig. Sci.* 13:39-44.
22. Sheriff, D. W., M. J. Fisher, G. Rusitzka and C. W. Ford 1986. Physiological relations to an imposed drought by two twining pasture legumes: *Macroptilium atropurpureum* (desiccation sensitive) and *Galactia striata* (desiccation insensitive) *Aust. J. Plant Physiol.* 13:431-445.
23. 高見晋一 1985. 作物特にイネの乾燥適応機構. 日本農業気象学会農業気象災害研究部会第6回研究会講演要旨: 1-6.
24. 玉井虎太郎 1956. 畑作用水法の合理化に関する研究. 愛媛大学紀要第六部農学2(2) 1-176.
25. 玉井虎太郎 1971. 植物用水管理の理論と技術 [6]. 農業および園芸46:117-120.
26. Turner, N. C., J. C. O'Toole, R. T. Cruz, O. S. Namuco and Sayeed Ahmad 1986. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits. I. Stress development, canopy temperature, leaf rolling and growth. *Field Crops Research* 13:257-271.
27. Turner, N. C., J. C. O'Toole, R. T. Cruz, O. S. Namuco and Sayeed Ahmad 1986. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits. II. Osmotic adjustment, leaf extension, leaf death, stomatal conductance and photosynthesis. *Field Crops Research* 13:273-286.
28. Yoshida, S. and S. Hasegawa 1982. The rice root system: its development and function. In *Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice*. IRRI Los Banos, Phillipines. 97-114.