

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

Relationship between Cultivar Differences in Water Stress Level and Dry Matter Production in Rice by Stair-Type Simulated "Field"

藤井道彦

Michihiko FUJII

(平成4年10月12日受理)

Abstract

Phased water stress levels were established by stair-type simulated field, which consists of three levels of height above free water (50,110 and 170cm) and flooded plots. In the simulated field, cultivar differences in rice in drought avoidance and in dry matter production were investigated. Six cultivars of lowland rice and upland rice from japonica type and indica type were used. Two days after transplanting, drought treatment was commenced and pF in the soil showed high values in a short time. Top dry weight at harvest relative to that in flooded plot decreased greatly in the intense water stress levels. In the intense water stress level, Dular 1 which is one of the drought resistant cultivars maintained high leaf water potential, and relative top dry weight was high. On the other hands, in Akihikari and Nipponbare that are japonica lowland cultivars, leaf water potential decreased greatly, and relative top dry weight decreased. And cultivar differences in relative top dry weight at harvest could be detected by the differences in leaf water potential. By stair-type simulated field, intense water stress could be created in a short time. And there was great cultivar differences in leaf water potential.

植物体が水ストレス環境に遭遇した場合、その影響を軽減し、生長の低下を抑える機能として、乾燥回避性 (drought avoidance) と乾燥耐性 (drought tolerance) の2種のメカニズムが考えられている^{12,13,14,17,19,24}。乾燥回避性は、水ストレス環境条件下で深根性などにより葉身の水ポテンシャルをより高く保つ反応であり、乾燥耐性は葉身の水ポテンシャルが低下した状態においても浸透調節や細胞壁の弾性の変化などを通じて生理機能を維持する反応である^{1,18}。植物体の実際の反応はこの2種類が複合したものであるが、どちらのメカニズムが主要因となるかは環境条件によって異なる¹。一般に圃場条件下では、乾燥回避性が主要因となっていると考えられている¹⁹。

圃場を用いたこれまでの研究報告では、スプリンクラーからの距離^{5,21,29,30}、灌水の回数²²

および、生体情報による自動灌水制御装置を用いた方法⁶⁾などにより、土壤乾燥程度を設定している。しかし、このような方法で段階的な土壤乾燥程度を設定するには、広い圃場面積や大がかりな灌水設備を必要とする。また、土壤の乾燥は降雨や多湿などの気象条件の影響を大きく受け、土壤の乾燥に時間を要するために、短期間に強度の水ストレス条件を設定することは容易ではない。

段階的な土壤乾燥程度の設定方法としては、これまでも、吸湿体としてのレンガ上に土壤を配置し、地下水位を10cmから90cmまで任意に設定できる自動灌水式苗床の例がある^{25,26)}。しかし、この装置ではレンガ上に厚さ15cmの土壤を配置し²⁵⁾、基本的に土壤層内でほぼ均一な乾燥状態を設定するものである。このため、乾燥回避性が十分に発揮されないと考えられる。また、この装置では地下水位をさらに低下させるのは容易ではない。本研究では、自由水面は一定として、水面から土壤表面までの高さに170cmまでの段階を設けた階段型模擬圃場を用いて、灌水条件から強度の水ストレス条件までの段階的な土壤乾燥程度を設定した。また、長さ81mの傾斜圃場で、自由水面からの高さに30cmから140cmまで差を設けた例がある¹¹⁾が、本研究でははるかに小規模な装置でストレス条件を設定できる。

これまで、ポット栽培した水ストレス条件下で、イネの葉身水ポテンシャルと光合成速度の品種間差異との間に相関のあることが報告されている²⁷⁾。この報告で測定された光合成速度は瞬間値であり、それが乾物生産に反映されているかどうかは明らかにされていない。これに対し、Turnerらは、圃場で短期間ではあるが土壤乾燥処理を行い、葉身水ポテンシャルには品種間差異がみられたが、乾物生産には反映しなかったと報告している^{29,30)}。一方、著者らは圃場における長期間の水ストレス条件下で、イネの品種間における葉身水ポテンシャルの差と乾物生産との間に相関関係を認めた⁷⁾。しかし、土壤の乾燥に時間を要したため、短期間に強度の水ストレス条件を設定した場合の、葉身水ポテンシャルと水ストレス条件下の乾物生産の品種間差異との関係は十分に明らかになっていない。

本研究では、ポットと比べ圃場条件に近く、また段階的な土壤乾燥程度を容易に設定する目的とした、階段型模擬圃場を用いて、イネの品種間の乾燥回避性の差異が乾物生産に反映されるかの検討を行った。

材料と方法

1. 栽培方法

供試品種として、日本型とインド型の水稲と陸稲から、日本晴（日本型の水稲）、IR30（インド型の水稲）、戦捷（日本型の在来型陸稲）、Dular 1（インド型の在来型水陸両用稲²³⁾、ハタキヌモチ（日本型の改良型陸稲）、アキヒカリ（日本型の水稲）の計6品種を用いた。1989年5月19日に、ペーパーポットを用いて育苗箱に播種し、6月12日に京都大学農学部京都農場の降雨を遮断したビニルハウス内で、後に述べる階段型模擬圃場に移植を行った。各品種は1列に移植し、栽植密度は15×10cmで、1株1本植えとした。

施肥は元肥として10a当りN2kg、P₂O₅4kg、K₂O2kg、追肥として6月28日と8月8日にN1kg、K₂O1kg、8月19日にN1kg、P₂O₅1kg、K₂O1kgを与え、計N5kg、P₂O₅5kg、K₂O5kgとした。倒伏を防ぐために、慣行栽培より比較的少肥条件とした。

階段型模擬圃場の概要は以下の通りである。Fig.1のように、厚さ18mmの合板を用い、地表から処理区の土壤表面までの高さが60cmのW1区、120cmのW2区、180cmのW3区を設けた。各

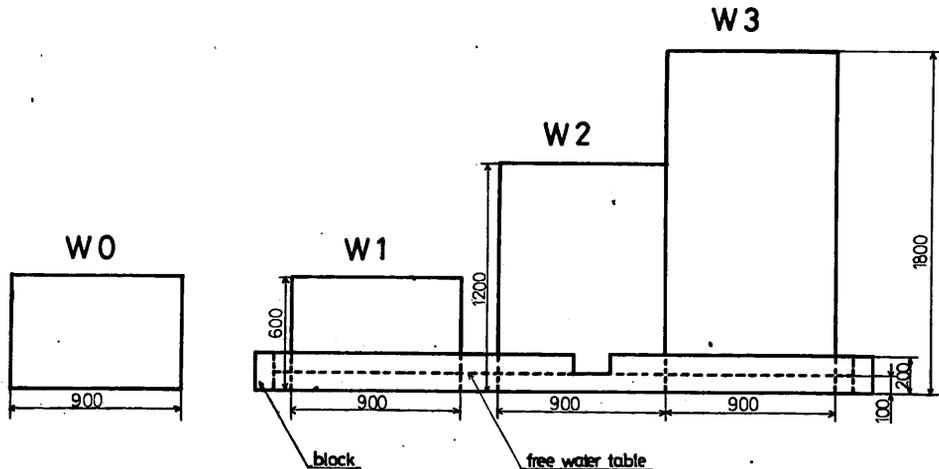


Fig.1. Diagram of stair-type simulated "field".

The size of each plot is 90×90cm.

処理区の面積は90×90cmとした。W2区とW3区は一体型としたが、W1区は分離した。W2区とW3区では、地際と地表から高さ60cmごとに、1辺9cmの角材で合板の周囲に補強を行った。階段型模擬圃場の周囲はビニルで覆ったブロックで堀状に囲って水を蓄え、オーバーフローさせて水深は10cmに保った。

自由水面から各処理区の土壌表面までの高さは、W1区で50cm、W2区で110cm、W3区で170cmに保った。各処理区内の水分を均一に保つために、各区の地表10cmの位置に18cm間隔で、多数の穴の開いた径5cmの暗渠用パイプを通した。また、W1区、W2区、W3区のセットに隣接して、合板の内側にビニルを敷いて高さ60cmの湛水区を設け、W0区とした。最初に、W1区からW3区について十分に灌水を行った。また、移植後は活着させるため、各処理区の土壌表面に灌水したが、移植翌日の6月13日以降は灌水を停止し、土壌乾燥処理を行った。

2. 測定方法

1) pFの測定

土壌乾燥処理期間中の6月23日から9月5日までに計8回、およびW3区の収穫を行った11月14日に、テンシオメーター（大起理化工業社製）を用いて、各処理区の土壌のpFを測定した。測定は、W1区の土壌表面からの深さ10cm、W2区の深さ10cmと20cm、W3区の深さ10cmと100cmについて行った。なお、W2区の深さ20cmでは8月6日、14日、31日、またW3区の深さ10cmでは7月4日と9月5日は、テンシオメーターの不調により測定値が得られなかった。

2) 葉面積と乾物重の測定

6月12日の移植時には各品種15個体、各品種の収穫時には各区反復7個体で、乾物重と葉面積の測定を行った。葉面積は自動葉面積計（林電工社製）で測定し、葉・茎・穂・枯葉の部位別の乾物重は、80℃で48時間以上通風乾燥させた後に測定した。

収穫時のサンプリングは、W0区とW1区では9月6日から10月30日に行った。また、W2

区のDular 1を除くと出穂が大きく遅延したために、W2区では11月13日に、W3区では11月14日に収穫時のサンプリングを行った。ただし、出穂の早かったW2区のDular 1は9月28日に行った。

3) 葉身水ポテンシャルと葉気温差の測定

葉身水ポテンシャルは、最上位の完全展開葉について、プレッシャーチェンバー (3000-40、Soil Moisture社製) を用いて測定した^{15,28)}。なお、測定は3反復で行った。日中の葉身水ポテンシャルの測定は、移植後40日目の7月22日と58日目の8月9日に行った。両日ともに、天候はほぼ晴天であった。また、夜明け前の葉身水ポテンシャルの測定は、移植後42日目の7月24日と60日目の8月11日に行った。

葉気温差は、日中の葉温と気温の測定値から求めた。葉温は放射温度計 (TR-0510b、ミノルタ社製) で測定し、葉温の測定の前後にはアースマン温度計で気温を測定した。測定に用いた放射温度計は1×0.5cmの狭い範囲について測定可能であるため、葉身のみを対象に測定することができた。測定は晴天日の7月23日、8月8日、8月12日、8月13日に行った。

結果

1. 出穂日

各区における出穂日をTable 1に示す。ここでは、50%の出穂をもって出穂日とした。W0区の出穂日は、Dular 1の8月5日から日本晴の8月24日まで、W1区ではDular 1の8月8日から日本晴の8月29日までであった。土壤乾燥程度が強度になると出穂は大きく遅延し、W2区ではDular 1の8月14日からハタキヌモチでは8月31日であったが、日本晴とIR30ではごくわずかに出穂したものの、出穂日には達しなかった。また、W3区の出穂日はDular 1で8月31日、戦捷で9月12日であったが、他の品種では出穂は認められなかった。

Table 1. Heading dates of cultivars investigated in each treatment.

Cultivar No.	Cultivar	Treatment			
		W0	W1	W2	W3
①	Nipponbare	8/24	8/29	-	-
②	IR30	8/21	8/29	-	-
③	Sensho	8/10	8/15	8/21	9/12
④	Dular 1	8/5	8/8	8/14	8/31
⑤	Hatakinumochi	8/14	8/19	8/31	-
⑥	Akihikari	8/10	8/10	8/23	-

Bars show heading dates were not attained.

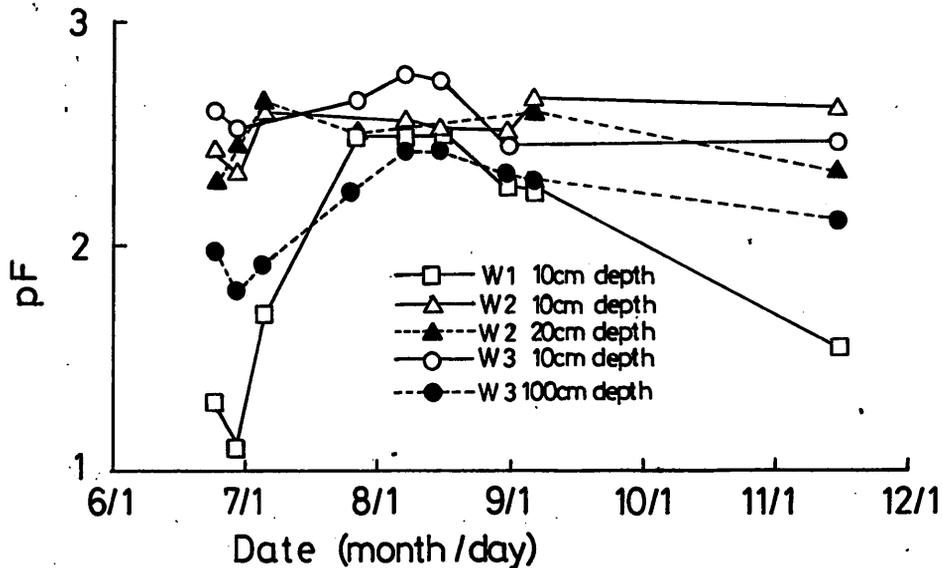


Fig.2. Daily changes in pF.

2. pF

水ストレス処理期間中の6月23日から11月14日におけるpFをFig.2に示す。W2区とW3区では、移植11日後で土壤乾燥処理開始10日後の6月23日から、深さ10cmにおけるpFはほぼ2.5以上の高い値を示し、非常に乾燥していた。一方、W1区では初期のpFは2以下であったが、7月末以降は急激に乾燥し、約2.5の値を示した。またW2区で、深さ20cmの値は深さ10cmの値とほぼ等しく、W2区では深さ20cm以下まで乾燥が進行していることが分った。W3区の深さ100cmにおけるpFでも、7月初めまでは2以下であったが徐々に高くなり、8月初めにはほぼ2.5となり、W3区では深さ100cmの深層まで徐々に乾燥したことを示した。W1区のpFは、9月以降急激に低下したが、その他のpFの値はほぼ一定していた。

3. 乾物重

収穫時の地上部乾物重は、W0区・W1区と比べ、W2区・W3区では大きく低下したが、各処理区内で品種間差異がみられた (Table 2)。

W0区では、ハタキヌモチが他の品種よりもやや高かった。W1区でも、ハタキヌモチが最も高く保たれたが、品種によりW0区よりも高い値を示すものがあった。W2区では、ハタキヌモチとIR30の地上部乾物重は重く、W0区に対する相対値でも90%以上であった。これに対し、アキヒカリと日本晴では地上部乾物重は大きく減少し、W0区に対する相対値でもそれぞれ28.9%、45.6%と大きく低下した。

土壤乾燥程度の最も強度なW3区の地上部乾物重は、W0区のほぼ50%以下に低下したが、顕著な品種間差異がみられ、ハタキヌモチの地上部乾物重が最も重く、アキヒカリが最も軽かった。一方、W0区に対する相対値では、Dular 1と戦捷ではそれぞれ54.5%、51.3%とハタキヌモチよりも高く、アキヒカリと日本晴ではそれぞれ7.1%、21.0%と著しく低下した。

Table 2. Top dry weight at harvest, midday and predawn leaf water potential, leaf temperature and leaf-air temperature difference in each plot.

Treatment	Cultivar	Top dry weight		Average	Average	Average	Average	Average
		at harvest	(%)	Midday leaf	Predawn leaf	Leaf	Air	Leaf-air
		(g/plant)		water potential	water potential	temperature	temperature	temperature
				(MPa)	(MPa)	(°C)	(°C)	difference(°C)
W0	Nipponbare	13.61	(100)	-0.47	-0.07	30.63	32.55	-1.92
	IR30	13.62	(100)	-0.47	-0.07	30.02	32.55	-2.53
	Sensho	12.82	(100)	-0.39	-0.07	29.92	32.55	-2.70
	Dular 1	12.70	(100)	-0.34	-0.04	29.85	32.55	-2.70
	Hatakinumochi	16.61	(100)	-0.32	-0.05	30.05	32.55	-2.50
	Akihikari	13.70	(100)	-0.43	-0.07	30.15	32.55	-2.40
W1	Nipponbare	16.53	(136.2)	-0.56	-0.10	31.06	32.62	-1.56
	IR30	13.67	(101.6)	-0.49	-0.09	30.70	32.62	-1.92
	Sensho	16.46	(144.2)	-0.43	-0.06	30.81	32.62	-1.81
	Dular 1	11.37	(89.5)	-0.50	-0.06	30.91	32.62	-1.71
	Hatakinumochi	21.22	(127.7)	-0.44	-0.09	30.50	32.62	-2.12
	Akihikari	10.51	(76.6)	-0.49	-0.10	31.02	32.62	-1.60
W2	Nipponbare	6.20	(45.6)	-1.25	-0.26	33.08	32.69	0.39
	IR30	12.54	(92.1)	-0.68	-0.24	32.62	32.69	-0.07
	Sensho	10.74	(83.8)	-0.76	-0.13	32.69	32.69	0
	Dular 1	6.18	(44.4)	-0.69	-0.07	33.12	32.69	0.43
	Hatakinumochi	15.77	(95.0)	-0.69	-0.14	32.86	32.69	0.17
	Akihikari	3.85	(28.9)	-1.10	-0.19	33.10	32.69	0.41
W3	Nipponbare	2.85	(21.0)	-2.08	-0.65	34.11	32.63	1.46
	IR30	5.46	(40.1)	-1.90	-0.28	33.37	32.63	0.74
	Sensho	6.57	(51.3)	-1.58	-0.22	32.95	32.63	0.32
	Dular 1	6.92	(54.5)	-1.28	-0.13	33.46	32.63	0.83
	Hatakinumochi	7.31	(44.0)	-1.75	-0.41	33.45	32.63	0.82
	Akihikari	0.88	(7.1)	-2.15	-1.02	33.95	32.63	1.32

Values in parantheses are the percentage of top dry weight to those in W 0 plots.

4. 葉身水ポテンシャル

各品種の日中の葉身水ポテンシャルの平均値は、W 0 区では -0.32MPa から -0.47MPa 、W 1 区では -0.43MPa から -0.56MPa と高く保たれ、品種間差異も小さかった(Table 2)。W 2 区ではDular 1は -0.69MPa と高かったのに対し、日本晴は -1.25MPa と低下した。W 3 区では品種間差異はさらに拡大し、Dular 1は -1.28MPa と高く保たれたが、アキヒカリと日本晴はそれぞれ -2.15MPa 、 -2.08MPa と著しく低下し、差は約 0.9MPa であった。

夜明け前の葉身水ポテンシャルの平均値は、W 0 区とW 1 区ではわずかの差はみられるものの、0 近くに保たれていた(Table 2)。W 2 区ではDular 1は -0.07MPa と高く保たれたが、日本晴では -0.26MPa と低かった。W 3 区では顕著な品種間差異が認められ、Dular 1と戦捷ではそれぞれ -0.13MPa 、 -0.22MPa と高く保たれたが、アキヒカリと日本晴はそれぞれ -1.02MPa 、 -0.65MPa と著しく低く、最大値と最小値の差は約 0.9MPa であった。

5. 葉気温差

W0区とW1区における葉気温差の平均値は、W0区では -1.9°C から -2.7°C 、W1区では -1.6°C から -2.1°C で負の値を示し、葉温は気温より低下していた(Table 2)。しかし、W2区、W3区へと土壤乾燥程度が強度になるに従い、葉温は上昇した。W3区の葉気温差は、戦捷では 0.3°C と低かったが、日本晴とアキヒカリではそれぞれ 1.5°C 、 1.3°C と高く、品種間差異は大きかった。

考察

日本の栽培条件下でイネの水ストレスの圃場実験を行う場合、土壤乾燥処理開始後1カ月以上経過しても、日中の葉身水ポテンシャルは -1.5MPa ^{7,16)}程度、夜明け前のそれは -0.2MPa 程度⁷⁾以下に低下しないことも多い。本研究で用いた階段型模擬圃場では、最も乾燥程度の著しいW3区の、深さ10cmにおける土壤のpFは、処理開始10日後に2.61の値まで上昇した(Fig. 2)。そして、土壤乾燥程度の最も強度なW3区では、処理開始後約1カ月で日中の葉身水ポテンシャルは -2.2MPa まで、夜明け前の葉身水ポテンシャルは -1.0MPa までの低下を示した(Table 2)。梅雨明けは7月19日で、7月22日に行った処理開始40日後の葉身水ポテンシャルの測定までに、約15日間降水がみられたが、階段型模擬圃場を用いることにより、強度の水ストレス条件までの段階を短期間に設定することができた。フィリピンの国際稲研究所(IRRI)では、日中の葉身水ポテンシャルが -2MPa 以下まで低下する例が多くみられるが、それらは圃場での測定である^{10,20,29)}。これらの結果と比較すると、階段型模擬圃場を用いることにより、東南アジアで対象となる程度の土壤乾燥程度を、比較的容易に設定できたと考えられる。

葉身水ポテンシャルの低下に伴う生理機能の低下は多くの植物について知られている^{3,8)}。一方、水ストレス条件下における葉身水ポテンシャルの品種間差異が、生理機能に反映する例も知られており、コムギの気孔抵抗²⁾やイネの光合成²⁷⁾と葉身の水分状態との間に相関関係がみられている。また、イネの葉身水ポテンシャルは、外観によって判定した耐乾性のスコアと相関がみられている^{10,20)}。しかし、水ストレス条件下の葉身水ポテンシャルの品種間差異と乾物生産の品種間差異との関係については、十分に解明されていない。KobataとTakami¹⁶⁾は、登熟期において、葉身水ポテンシャルと乾物生産の関係に品種間差異は認められず、葉身水ポテンシャルを高く保つ能力が重要だとしているが、水ストレス区のみについての乾物生産の品種間差異と葉身水ポテンシャルの品種間差異との関係は十分に明らかにされていない。また、イネの葉身水ポテンシャルの品種間差異が乾物生産に反映されなかったという報告もある²⁹⁾。

W0区の収穫時地上部乾物重の値には、品種間差異がみられ、ハタキヌモチでは 16.61g と大きかったが、Dular 1では 12.70g と小さかった。湛水条件においても、光合成速度、葉面積、草型などの違いによって、イネの乾物生産には品種間差異がみられ¹³⁾、湛水条件におけるこれらの差が、水ストレス区の地上部乾物重の差に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、湛水区における水ストレス以外の要因を除去して、地上部乾物重に及ぼす水ストレスの影響を明らかにするために、本研究では各処理区の地上部乾物重を各品種のW0区の値に対する相対値で表すことにした(Table 2)。

日中の葉身水ポテンシャルの平均値と、W0区に対する相対値で表した収穫時の地上部乾物重には、処理区間および品種間で顕著な差異が認められた(Fig.3, Table 2)。

土壤乾燥程度が最も強度のW3区では、日中の葉身水ポテンシャルの品種間差異は 0.87MPa

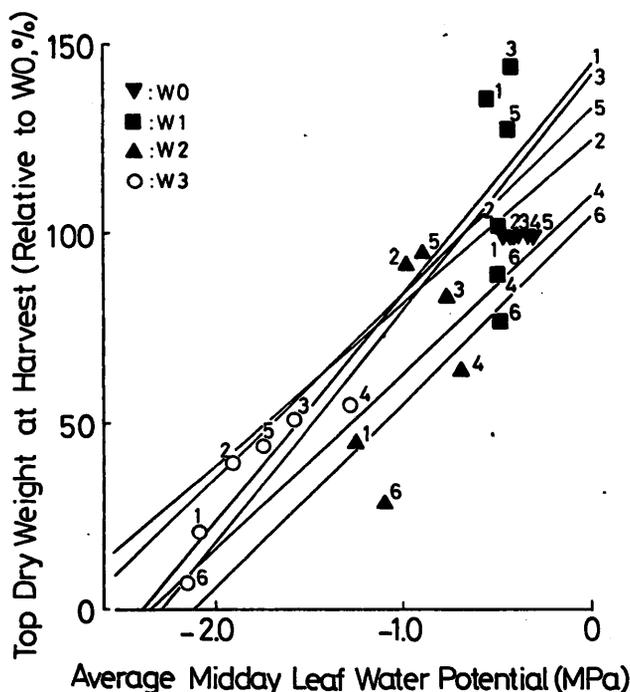


Fig.3. Relationship between average midday leaf water potential and top dry weight at harvest relative to W0. Numerals in this figure show the cultivar numbers shown in table 1.

と大きかったが、W2区での品種間差異は0.56MPaとW3区における差異よりも小さかった。W1区では0.13MPaと、W2区の差異よりもさらに小さかった。W0区でも、品種間差異は0.15MPaと小さく、W1区の差異とほぼ等しかった。このように、日中の葉身水ポテンシャルでは、W0区からW3区へと土壤の乾燥程度が強度になるにしたがい、品種間差異が拡大する傾向が認められた。

夜明け前の葉身水ポテンシャルの平均値では、W3区の品種間差異は0.89MPaと大きかったが、W2区では0.19MPaと急激に縮小し、W1区とW0区では、それぞれ0.04MPa、0.03MPaと、品種間差異はほとんど認められなかった(Fig.4, Table 2)。このように、夜明け前の葉身水ポテンシャルにおいても、土壤の乾燥程度が強度になるにしたがい、品種間差異は拡大し、W3区では日中の葉身水ポテンシャルの品種間の差とほぼ等しかった。しかし、W2区では夜明け前の葉身水ポテンシャルの品種間差異は小さかった。

一方、W0区に対する相対値で表した収穫時の地上部乾物重において、W3区では47.4%と顕著な品種間差異がみられた(Table 2)。W2区では、品種間差異は66.1%とW3区よりやや拡大した。W1区では、品種間差異は67.4%とW2区とほぼ等しかった。W0区では定義から全品種100%であったが、W1区からW3区では、いずれの区においても、地上部乾物重の相対値に大きな品種間差異が認められた。

Turnerらは、7品種のイネについて土壤乾燥の進行に伴う葉身水ポテンシャルの推移を測定

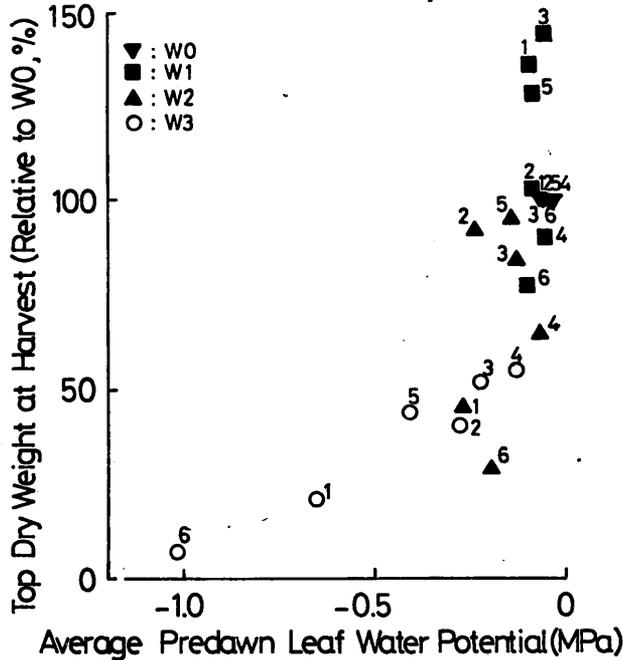


Fig.4. Relationship between average predawn leaf water potential and top dry weight at harvest relative to W 0. Numerals in this figure show the cultivar numbers shown in table 1.

しているが、夜明け前の葉身水ポテンシャルでは、処理開始前にも処理期間中にも品種間差異を認めなかった²⁹⁾。しかし、日中の葉身水ポテンシャルでは、処理開始前においても水稲の方が陸稲より約0.7MPa高く保たれ、その差は植物体内の通導抵抗の差によると推定している。本研究でも、W 0 区の日中の葉身水ポテンシャルは、水稲の日本晴、IR30、アキヒカリの方が陸稲よりもやや高い傾向がみられたが、差は約0.1MPaと非常に小さかった。根圏土壌の水ポテンシャルと葉身水ポテンシャルとの差は通導抵抗と蒸散速度の積で表される^{1,14)}ため、蒸散速度が高いほど、通導抵抗の差は葉身水ポテンシャルの大きな差となる。このため、土壌水分の十分な条件下での日中の葉身水ポテンシャルの品種間差異に、Turner らと本研究とで差がみられた原因は、気温、湿度、日射量などの環境条件の違いにより蒸散速度が異なることによる可能性がある。本研究では、土壌乾燥程度の進行に伴って、葉身水ポテンシャルの品種間差異は拡大したが、W 3 区において日中の葉身水ポテンシャルと夜明け前の葉身水ポテンシャルの品種間差異の値はそれぞれ約0.9MPaとほぼ等しく、日中と夜明け前の品種間差異には対応がみられる (Table 2)。このため、W 3 区における日中の葉身水ポテンシャルの品種間差異は、夜明け前の葉身水ポテンシャルの差を反映していると考えられる。

土壌乾燥程度が最も強度なW 3 区において、日中の葉身水ポテンシャルが-1.28MPaと最も高く保たれたDular 1は、国際稲研究所 (IRRI) において耐乾性の高いとされている品種である^{4,20)}。また、-1.58MPaと次に高く保たれていた戦捷は、日本型の在来型陸稲である。両品種の地上部乾物重の相対値は、それぞれ54.5%、51.3%と高かった。一方、日本型の水稲であるアキヒカリと日本晴は、日中の葉身水ポテンシャルが-2.15MPa、-2.08MPaと大きく低下し、収穫時の地上部乾物重の相対値も、それぞれ7.1%、21.0%と著しく低かった。

Dular 1は、W 3区において日中の葉身水ポテンシャルと地上部乾物重の相対値がいずれも最も高かったが、W 2区でも日中の葉身水ポテンシャルは最も高かった。しかし、W 2区における地上部乾物重の相対値では、Dular 1はハタキヌモチ、IR30、戦捷よりも低い値を示した。またW 1区では、Dular 1の日中の葉身水ポテンシャルは他品種とほとんど差がなかったが、地上部乾物重の相対値は低かった。一方、アキヒカリはW 3区において、日中の葉身水ポテンシャルと地上部乾物重の相対値がいずれも最も低かったが、W 2区でも地上部乾物重の相対値は最も低く、日中の葉身水ポテンシャルも2番目に低かった。

日中の葉身水ポテンシャルと、収穫時の地上部乾物重の相対値との関係には、品種によりやや異なったが、差は大きくなかった (Fig.3)。日中の葉身水ポテンシャルと地上部乾物重の反応性に品種間差異がみられたものの、W 3区で、日中の葉身水ポテンシャルの品種間に約0.9 MPaと大きな差がみられたために、日中の葉身水ポテンシャルの差が地上部乾物重の差に反映されたものと考えられる。

次に、夜明け前の葉身水ポテンシャルと地上部乾物重の関係を検討すると、Dular 1と戦捷ではW 3区で夜明け前の葉身水ポテンシャルが高かったが、地上部乾物重の相対値も高く保たれていた (Fig.4)。一方、夜明け前の葉身水ポテンシャルが低かったアキヒカリと日本晴では、地上部乾物重の相対値は大きく低下した。Dular 1と戦捷では、W 2区の夜明け前の葉身水ポテンシャルも高く保たれていた。

W 0区とW 1区では、日中の葉身水ポテンシャルはほぼ-0.5MPa以上に高く保たれ、W 2区、W 3区の値との間に大きな差がみられた (Table 2)。葉気温差についてみると、W 0区とW 1区では-1.5℃以下のマイナスの値で、蒸散が盛んであると予想されたが、W 2区とW 3区ではプラスとなり蒸散は抑えられていると予想され、W 1区とW 2区との間に差がみられた。一方、各処理区内で葉気温差の品種間差異が認められ、W 3区において日中の葉身水ポテンシャルが-1.58MPaと高く保たれていた戦捷では、葉気温差は0.32℃と比較的低かったのに対し、日中の葉身水ポテンシャルが-2.08MPaと低かった日本晴では、葉気温差は1.48℃と高く、蒸散が大きく抑制されていると予想された。W 3区で、葉気温差の低かった戦捷では乾物重の相対値は高く保たれていた。一方、葉気温差の高かった日本晴とアキヒカリでは、乾物重の相対値は大きく低下した。

このように、階段型模擬圃場を用いた水ストレス条件下における乾物重の品種間差異を、葉身水ポテンシャルと葉気温差の品種間差異からとらえることができた。Turner らは圃場で7品種のイネを栽培し、10日間の水ストレス処理を与えた結果、葉身水ポテンシャルと葉気温差には水稲と陸稲間で品種間差異が認められたが、乾物生産や光合成速度および気孔コンダクタンスには差を認めなかったと報告している^{29,30)}。本研究の結果は、著者らが圃場で長期間の水ストレス処理を行った結果⁷⁾と、基本的には同じ傾向であった。本研究では、階段型模擬圃場を用いることにより、葉身水ポテンシャルが大きく低下し、水ストレスが強度であったために、葉身水ポテンシャルと乾物重の品種間差異が大きくなったと考えられる。また、Turner らの実験では日中の葉身水ポテンシャルは-2MPa以下にまで低下し、約1MPaの大きな品種間差異がみられているが、地下水位が高かったために夜明け前の葉身水ポテンシャルでは約-0.2MPaと高く保たれ、夜明け前の葉身水ポテンシャルの品種間差異は認められなかった^{1,29)}。これに対し、階段型模擬圃場を用いた本研究では、自由水面からの高さを170cmに保ったW 3区では、日中および夜明け前の葉身水ポテンシャルに、いずれも約0.9MPaの顕著な品種間差

異を認めた (Figs.3,4)。これらを比較して、本研究で夜明け前の葉身水ポテンシャルにも顕著な差がみられたことが、乾物生産に品種間で差がみられた原因と考えられる。

夜明け前の葉身水ポテンシャルは、根圏土壤の水ポテンシャルの推定値とされている²²⁾。陸稲品種は水稲品種よりも深層へ根を伸長させる傾向にあるが³¹⁾、W3区において、夜明け前の葉身水ポテンシャルに顕著な差異が認められたことから、根の深層土壤への伸長に大きな品種間差異があったと予想される。土壤も圃場と比較して柔軟で深層まで根が伸長しやすく、乾燥回避性を発揮しやすいと予想されることも、一因と考えられる。さらに、階段型模擬圃場では、植物体への水の供給は深層土壤からのみで、土壤表層からの水の供給は皆無である。このため、土壤表面に灌水を行う条件^{5,21,29,30)}と比較して、吸水における深根性の利点がより顕著になると考えられる。

以上のように、階段型模擬圃場を用いて段階的な水ストレス条件を短期間に設定し、水ストレス条件下の乾物生産の品種間差異を、葉身水ポテンシャルと葉気温差の差異からとらえることができた。

本研究では、階段型模擬圃場を用いて、地上部乾物重の比較を行ったが、稔性には耐性に品種間差異が考えられ、収量については今後の課題である。また、自由水面からの高さが50cmのW1区の乾物重が、灌水条件のW0区よりも大きい場合がみられたが、W0区で水の移動がないことの影響と考えられ、検討課題である。

要旨

灌水区と、自由水面からの高さが50cm、110cm、170cmの区を設けた階段型模擬圃場を用い、段階的な土壤乾燥程度を設定し、イネの乾燥回避性と乾物生産の関係について検討した。日本型とインド型の水稲と陸稲から6品種を供試し、移植5日後から水ストレス処理を開始したが、土壤のpFは短期間に高い値を示し、葉身水ポテンシャルは大きく低下した。強度の土壤乾燥程度において顕著な品種間差異がみられ、耐乾性品種とされているDular 1と日本型陸稲の戦捷では、葉身水ポテンシャルが高く保たれ、灌水区に対する相対値で表した収穫時の地上部乾物重も高かった。一方、日本型の水稲のアキヒカリと日本晴では葉身水ポテンシャルは大きく低下し、地上部乾物重の相対値も顕著に低下した。水ストレス条件下の地上部乾物重の相対値の品種間差異は、葉身水ポテンシャルの品種間差異を反映していた。階段型模擬圃場を用いることにより、短期間に強度の段階的な水ストレス条件を設定でき、葉身水ポテンシャルの品種間差異は0.9MPaと大きかった。

謝辞

本研究を遂行し、研究を取りまとめるに当たり、京都大学農学部堀江武教授に御指導いただいた。また、論文の作成に当たり、静岡大学教育学部大河内信夫教授に懇切に御指導いただいた。ここに深く感謝する。また、現鳥取大学農学部の中野淳一助教授には実験装置の作製に当たり、助言かつ協力していただき、北陸農業試験場高見晋一室長と島根大学農学部小葉田亨助教授からは論文の作成に当たり貴重な助言をいただいた。実験装置の作製には、現富士通の玉城綾子氏と現野菜茶業試験場の濱野恵氏に協力していただいた。ここに感謝の意を表する。

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. Blum, A., G. Gozlan, and J. Mayer 1981. The manifestation of dehydration avoidance in wheat breeding germplasm. *Crop Sci.* 21:495-499.
3. Boyer, J.S. 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiol.* 46:233-235.
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. Cruz, R.T. and J.C. O'Toole 1984. Dryland rice response to an irrigation gradient at flowering stage. *Agron. J.* 76:178-183.
6. Fiscus, E.L., A.N.M.M. Alam, and T. Hirasawa 1991. Fractional integrated stomatal opening to control water stress in the field. *Crop Sci.* 31:1001-1008.
7. 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.
8. 平沢正・飯田幸彦・石原邦 1988. 水稻葉身の拡散伝導度、光合成速度に及ぼす葉の水ポテンシャルと空気湿度の影響の相互関係. *日作紀* 57:112-118.
9. 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.
10. International Rice Research Institute. 1978. Drought resistance. In Annual report for 1977, Los Banos. Phillipines. 83-112.
11. International Rice Research Institute. 1986. Climatic environment and rice. In Annual report for 1985, Los Banos. Phillipines. 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. 稲学大成第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. Kobata, T. and S. Takami 1989. Water Status and grain production of several japonica rices under grain-filling stage drought. *Japan Jour. Crop Sci.* 58:212-216.
17. Levitt, J. 1972. Responses of plants to environmental stress. Academic Press, New York.
18. Morgan, J.M. 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 35:299-319.
19. 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.
20. O'Toole, J.C. and T.B. Moya 1978. Genotypic variation in maintenance of leaf water potential

- in rice. *Crop Sci.*18:873-876.
21. 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.
22. 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.
23. Steponkus, P.L. and J.M. Cutler 1980. Adaptation to Water Stress in Rice. In *Adaptation of Plants to Water & Higher Temperature Stress*. (Ed.) N.C. Turner and P.J. Kramer, Wiley Interscience, New York. 401-418.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Tsunoda, S. and M.T. Fukushima 1986. Leaf properties related to the photosynthetic response to drought in upland and lowland rice varieties. *Annals of Botany* 58:531-539.
28. Turner, N.C. and M.J. Long 1980. Errors arising from rapid water loss in measurement of leaf water potential by the pressure chamber technique. *Aust. J. Plant Physiol.*7:527-537.
29. 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.
30. 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.
31. 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.