

水稻水利用効率の地域・年度間比較

第2報 島根県下3地域間・2品種間の比較*

足立文彦**・小葉田 亨・有本雅幸・今木 正

(島根大学農学部***)

1994年12月20日受理

要 旨 : イネの水利用効率 (WUE) は、水消費と物質生産量との関係を知る上で重要であるにも関わらず、温帯湿潤地域での立地条件、品種による WUE の違いについては、ほとんど明らかにされていない。そこで、前報¹⁾によって確立した改良 Penman-Monteith 法を用いて、島根県下の生育環境が大きく異なる3地域において、日本晴とコシヒカリの2品種間で群落蒸散量 (T) を推定し、採取調査によって得た乾物重とともに WUE を算出し、水稻の WUE の地域・年度・品種間差の有無を明らかにしようとした。1991 年は島根県内の松江、出雲、赤名の3地域で日本晴、コシヒカリの2品種を、1992 年には松江のみで日本晴を供試し、T と乾物生産量との関係を求めた。両者の関係は、両品種とも3地域を込みにしてほぼ同一の直線で近似できた。しかし、両品種とも赤名では他地域に比べ近似直線の傾きが高かった。このことは山間地のため、赤名の湿度が高かったことによると見なされた。さらに、近似線の傾きから、地域を込みにして品種毎に WUE を求めると、日本晴では 4.0 g kg^{-1} 、コシヒカリでは 4.6 g kg^{-1} で、コシヒカリの方がやや高い効率を示した。なお、松江の日本晴では、1991 年と 1992 年の年次間差はほとんど認められなかった。

以上から、山間地と平地のように湿度条件が比較的大きく異なると推定される地域間では飽差による補正が必要となるものの、類似した気象環境にある地域では、水稻の WUE は品種によりほぼ一定であり、その値は年度や栽培地域に関わらず、ほとんど変化しないものと見なされた。

キーワード : イネ, 湿度, 蒸散量, 品種間差, 飽差, 水利用効率。

Comparison of Water Use Efficiency of Paddy Rice (*Oryza sativa* L.) among Locations and Interannual Variation in Humid Areas II. Comparison among three locations and two cultivars in Shimane Prefecture : Fumihiko ADACHI, Tohru KOBATA, Masayuki ARIMOTO and Tadashi IMAKI (*Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, Matsue 690, Japan*)

Abstract : Water Use Efficiency (WUE) is a very important concept to indicate the relationships between crop production and water use. However there are few reports of WUE of rice in humid regions. Our objectives were to compare the WUE among three different locations and cultivars of paddy rice (*Oryza sativa* L.). Field experiments were conducted at three locations, Matsue (in 1991, '92), Izumo ('91) each less than 20m above sea level, and Akana ('91) at 444m in eastern region of Shimane Prefecture using the two rice cultivars, Nipponbare and Koshihikari. WUE was calculated from estimated canopy transpiration (T)¹⁾ and crop top dry matter. The relationship between the top dry matter and accumulated T was well fitted by a linear regression for each location and cultivar. The WUE at Akana was slightly higher than those at the other locations. It was considered that the lower saturation deficit in the mountainous location caused the high WUE, because the differences among the WUE decreased by correction of the saturation deficit. The WUE values of two cultivars were 4.0 g kg^{-1} (cv. Nipponbare) and 4.6 g kg^{-1} (cv. Koshihikari), respectively. There were no between-year differences in WUE at Matsue. We concluded that WUE of rice is almost constant for a given cultivar under humid conditions with similar meteorological profiles, although correction for the saturation deficit is required when there is a large difference in humidity between cultivated regions and years.

Key Words : Humidity, Rice, Saturation deficit, Transpiration, Varietal difference, Water use efficiency.

作物の乾物生産量と、その生育期間の積算蒸散量とが直線的な関係にあることが多くの作物で明らかにされている^{4,14,22)}。この直線の傾きである水利用効率 (WUE) は、作物個体群の物質生産のための水消費の指標として、極めて重要な概念であると考えら

れている^{13,17)}。このため、多くの地域や作物で WUE が測定され、長期間の WUE には同一種内で変異が見られず²³⁾、群落レベルでの WUE は、干ばつや塩類、土壌条件にはほとんど影響されない非常に安定した量であることが明らかにされた¹³⁾。現在では、作物の物質生産や水消費を律速している物理的・生理的プロセスが数学的モデルとして組み込まれ²⁾、WUE のモデル的解析もすすめられている^{18,22,23)}。

de Wit⁴⁾ や Bierhuizen and Slatyer²⁾ は、蒸散量

* 一部は、第 194 回講演会 (1992 年 10 月) において発表。

** 日本学術振興会特別研究員。

*** 現 島根大学生物資源科学部。

を飽差や、その近似値である水面蒸発計蒸発量で除して、大気湿度の影響を除いた WUE を求めると、この係数が湿度に関わらず、作物毎にほぼ一定であることを明らかにし、WUE を高めるには湿潤な地域や作期の栽培が有利であることを示唆した¹⁷⁾。日本でも、畑作物を中心に水消費と物質生産との関係が研究されてきた¹⁷⁾。例えば、九州地方で施肥処理を異にした、複数年度にわたる飼料作物を用いたライシメーター試験¹⁵⁾では、各年の WUE に処理間差はなく、ほぼ同一とみなされたものの、飽差で WUE を補正しない場合に年次間差が認められた。また、青刈トウモロコシにおいて、CRAE モデルによる蒸発散量推定値を用いた WUE では、WUE を飽差で補正することにより年次間差は小さくなり、ほぼ一定の値をとった¹⁷⁾。しかし、これら研究は同一地点での年次間の比較であり、湿潤地域の圃場条件下において、WUE の地域や作期間差に言及した研究は極めて乏しい。

一方、WUE は種ごとに一定の値をとるとされているものの、品種間あるいは生態型間でも差が認められている⁶⁾。例えば、日本型とインド型イネを用いたポット実験では、両者の要水量に違いが認められた¹⁴⁾。ただし、大気の飽差を考慮していないことから、品種間差があるかどうかについては疑問視されている¹³⁾。また、畑状態で栽培されたイネ 28 品種で WUE を比較すると、日本型品種と AUS 型を除くインド型品種では差が認められないものの、バングラディシュ在来の AUS 型品種では、他品種の WUE よりも低い値を示した⁵⁾。これら研究は、生態型や栽培地の異なる品種間について、短時間の WUE を比較したものであり、実際の栽培条件下で群落レベルの WUE を、一般的な栽培品種を用い、地域を変えて品種間比較した研究は極めて少ない。

そこで、本研究では島根県の低地(標高 17~20 m)にある島根大学圃場と島根県農業試験場水田、山間高冷地(標高 444 m)にある同赤名分場水田の 3 カ所において 2 品種の水稻を栽培した。そして、前報¹⁾で確立した推定蒸散量の式を用いて求めた WUE の値が、実際の栽培条件下の水稻品種間で異なるのか、また、地域間あるいは年次間で異なるのか否かを明らかにすることを目的とした。

材料と方法

1. 栽培概要

供試品種は、1991 年は日本晴とコシヒカリを、

1992 年は日本晴のみを用いた。1991 年には松江市にある島根大学農学部の水田(以降松江、北緯 35°27′, 東経 133°04′, 標高 17 m 以下)と出雲市の島根県農業試験場(以降出雲、北緯 35°20′, 東経 132°44′, 標高 20 m)、松江から約 80 km 離れた中国山地中央部に近い赤名町赤名の島根県農業試験場赤名分場(以降赤名、北緯 35°00′, 東経 132°42′, 標高 444 m)の 3 カ所で、1992 年には松江のみで実験を行った。松江では、8.2 m×22.0 m の水田の長辺に 2 分割したものにそれぞれ 2 品種を割り付け、それらを 3 等分して 3 反復とした。出雲と赤名では、各品種につき 10.0 m×4.5 m の水田を 3 反復に分けた。各地とも実験区の周囲は水稻圃場で囲まれていた。

移植は、松江では両年とも 5 月 13 日に 1 株 2 本植えて、出雲(5 月 10 日移植)、赤名(5 月 8 日移植)は 1 株 3 本植えて行った。栽植密度は松江が 26.7 株 m⁻²(15×25 cm 間隔)、出雲と赤名はともに 22.2 株 m⁻²(15×30 cm 間隔)であった。なお、施肥は第 1 表のように施した。

2. 群落蒸散量の推定

群落蒸散量(T)を前報¹⁾の方法により推定した。このために気孔伝導度(g_s)と気象条件を測定した。g_sはイネの各生育時期毎の晴れた日の日変化(日中 6 点)を 5 回、最上位完全展開葉を定常型ポロメーター(Li-Cor 社製 LI-1600 型)で測定した。気象条件については、1991 年は 3 地域すべてで全生育期間を通して日射量(HAENNi 社製日射センサー SOLAR130)をデータロガー(コーナースステム社製アナログ電圧積算器)で、松江では 91, 92 年とも気温、相対湿度、風速、日射量を測定し、92 年のみ純放射量も打点式記録計により連続記録した。なお、出雲と赤名の気温、風速については試験場内で測定されている気象庁のアメダスデータを用いた。ただし、出雲、赤名の地域観測所では連続的な湿度計測が行われていない。そこで、出雲、赤名における大気飽差を群落面でのポロメーターの外気設定値から推定した。まず、大気飽差の測定値のある松江において、ポロメーターで測定した大気飽差(x)と百葉箱内の大気飽差(y)との関係を見ると、両者には密接な相関があった($y = -1.694 + 0.978x$ $r = 0.978$ 相関係数は 5%水準で有意)。次に、この松江の関係式を用いて、ポロメーターの測定値から出雲、赤名の大気飽差を推定した。また、近接した地域内では、飽差は日射との経験的關係から推定できるとされているように²¹⁾、出雲、赤名での日射量と推定飽差との

Table 1. Design of fertilizer application (gm^{-2}) to two cultivars.

Location (Year)		cv. Koshihikari				cv. Nipponbare			
		B	T	PF	HD	B	T	PF	HD
Matsue (1991)	N	4	3	2	2	4	3	4	3
	P ₂ O ₅	12	—	—	—	12	—	—	—
	K ₂ O	12	—	—	—	12	—	—	—
Matsue (1992)	N					4	3	3	3
	P ₂ O ₅		———				13	—	—
	K ₂ O					13	—	—	—
Izumo (1991)	N	3.5	—	2.5	—	3.5	1.5	3	2
	P ₂ O ₅	7	—	—	—	7	—	—	—
	K ₂ O	3.5	3	—	—	3.5	1.5	3	2
Akana (1991)	N	6	1.5	2.2	2.2	6	1.5	2.2	2.2
	P ₂ O ₅	9	—	—	—	9	—	—	—
	K ₂ O	7	1.8	2.6	2.6	7	1.8	2.6	2.6

B, basal dressing; T, topdressing at tillering stage; PF, at panicle formation stage; HD, at heading stage.

間には密接な直線関係があった ($r=0.707$ 相関係数は5%水準で有意)。そこで、これらの関係を用いて、出雲と赤名の生育期間中の大気飽差を日射量から経験的に推定した。

3. 水利用効率の算出

1991年は幼穂形成期、出穂期、完熟期の3回、1992年には、これに加えて栄養生長初期、最高分げつ期、穂孕期、登熟中期の7回、各反復から連続した6株の地上部を抜取り根部を除いた。中庸な3株の葉面積を自動葉面積計(林電工社製 AAM-7型)で測定し、全株を80℃通風乾燥器で48時間以上乾燥後、秤量して地上部乾物重(Wt)を求めた。Wtは1株当りの平均値に栽植密度を乗じて平方メートル当たり3反復の平均で表した。このWtの値と蒸散量の積算値(ΣT)からWUEを以下の式により算出した⁴⁾。

$$WUE = Wt / \Sigma T \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、 ΣT を飽差(SD)で除することでTに対するSDの影響を除いた飽差補正水利用効率(WUE_c)を次の式により求めた²⁾。

$$WUE_c = SD \cdot Wt / \Sigma T \quad \dots\dots\dots (2)$$

結果と考察

1. 地域間差

ΣT とWtとの関係は、各地域・品種ともに ΣT を変数とする一次回帰直線でよく近似できた(第1-(1)図) ($r^2=0.980\sim0.996$)。3地域間でWUEを比較すると、両品種とも赤名が高い値を示し、松江と

出雲はほぼ同じとみなされた。そのため、直線の傾きで表されるWUEは赤名で比較的大きな値をとった。飽差の影響を除外するために、 ΣT を飽差で除して関係を求めた(第1-(2)図)。その結果、無補正の場合には、地域間でWUEの値に比較的大きなばらつきがみられたが、補正後には、両品種とも地域間の差が縮まった。3地域を込みにした場合、相関係数は補正後の方が高まった ($r^2=0.990\sim0.993$)。すなわち、 ΣT を飽差で補正し WUE_c を求めると、地域間差が消去されて、品種毎に一定の WUE_c 値に近づいた。ここで飽差とWUEとの関係を求めると、WUEは飽差に比例して減少しており(第2図)、赤名の高いWUEは大部分が低い飽差によるものと推察された。すなわち、半乾燥地のみならず^{2,4)}、日本のような湿潤地域においても、平地、山間地のように、湿度条件が著しく異なる地域間のWUE、あるいは、年次間のWUEを比較する場合には、飽差によるWUEの補正が必要であるとみなされる。また、このことにより湿潤地域でもWUEを高めるためには、飽差の小さい条件下での栽培が有利であることが確認された。すなわち、WUEは湿潤な地域や作期での栽培、あるいは微気象の改良¹⁷⁾によって改善可能であると示唆される。

2. 品種間差

3地域を込みにして品種間のWUEを比較した(第3-(1)図)。その結果、日本晴のWUEは 4.0 g kg^{-1} 、コシヒカリは 4.6 g kg^{-1} で、コシヒカリの方がやや

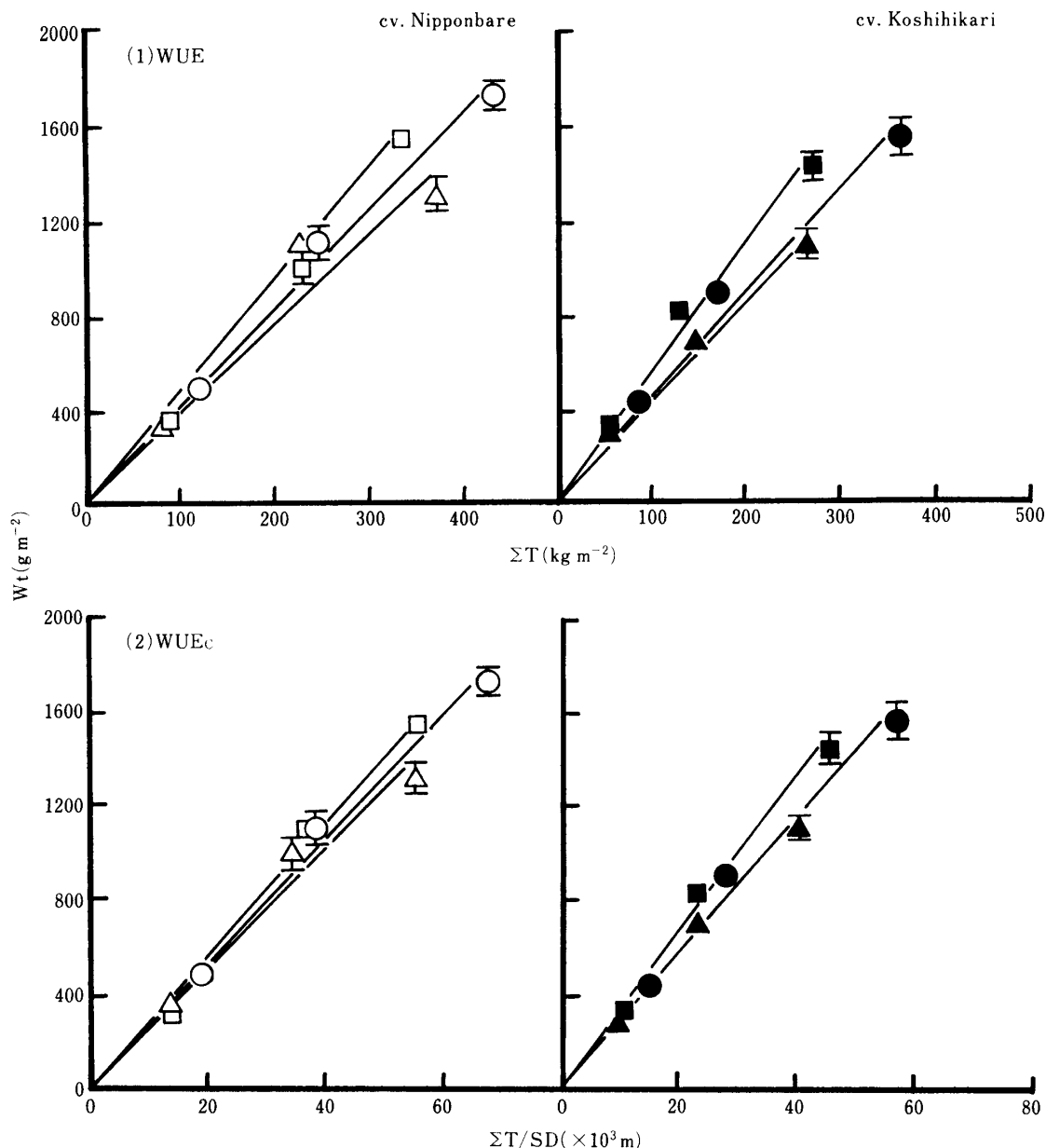


Fig. 1. Relationships between top dry matter (Wt) and (1) accumulated transpiration (ΣT), (2) ΣT divided by saturation deficit (SD) at three locations during 1991 rice growing season. Open and closed symbols indicate cv. Nipponbare and cv. Koshihikari, respectively. The three locations were Matsue (\circ , \bullet), Izumo (\triangle , \blacktriangle) and Akana (\square , \blacksquare). Means \pm standard errors are presented. Standard errors less than 50 g m^{-2} in Wt are omitted for clarity.

高い WUE を示した。飽差で補正した関係でも同様の傾向が認められ、品種毎の定数とみなされている WUE_c は、それぞれ $25.6 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-3}$ と $29.7 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-3}$ であった (第 3-(2) 図)。

そこで、このような品種間差の生じる原因を吸収日射量の利用効率から分析した。すなわち、捕捉日射から乾物への転換効率(RUE)⁹⁾を、日射量の実測値と透過日射量、反射日射量の推定値⁹⁾から吸収日射量を計算し求めた(第 4 図)。その結果、コシヒカリが日本晴よりもやや高い効率を示し、両品種間の

WUE の差が、物質生産ひいては光合成効率の違いに起因するものであることが示唆された。

しかし、どのような機作がコシヒカリと日本晴の WUE に差を生じさせたのかは、本研究では明確にはできない。RUE は純光合成速度(Pn) にもなって増加することから¹⁹⁾、前述したように、光合成活性の違いによって品種間差が生じた可能性がある。さらに、個葉のガス交換における生理的パラメータの差異が、群落の長期間にわたる WUE に影響を与えていたことも考えられる。すなわち、WUE の品種間

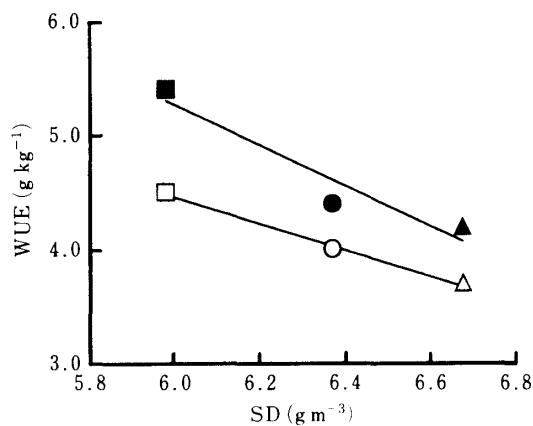


Fig. 2. Relationship between WUE and SD at three locations in 1991. See Figure 1 for symbols.

(cv. Nipponbare: ○, △, □) $WUE = 11.941 - 1.245SD$ $r^2 = 0.996$

(cv. Koshihikari: ●, ▲, ■) $WUE = 16.223 - 1.820SD$ $r^2 = 0.918$

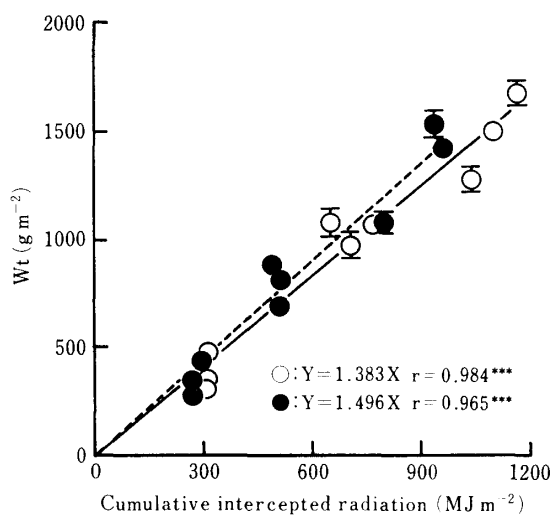


Fig. 4. Relationship between Wt and cumulative intercepted short wave radiation by the crop canopy in 1991. The slope of the regression line between both variables show radiation-use efficiency (RUE). See Figure 3 for symbols.

差は以下によって生じると考察される。

まず、個葉レベルでは、WUEが大気中と葉内のCO₂濃度差によって変化する可能性が指摘されている¹⁶⁾。すなわち、個葉レベルのWUEは次式によって表される¹²⁾。

$$WUE = \frac{0.64(c_a - c_i)}{SD} \frac{r_s + r_a}{r_s + r_a} = \frac{0.64(c_a - c_c)}{SD} \frac{r_s + r_a}{r_s + r_a + r_m} \dots (3)$$

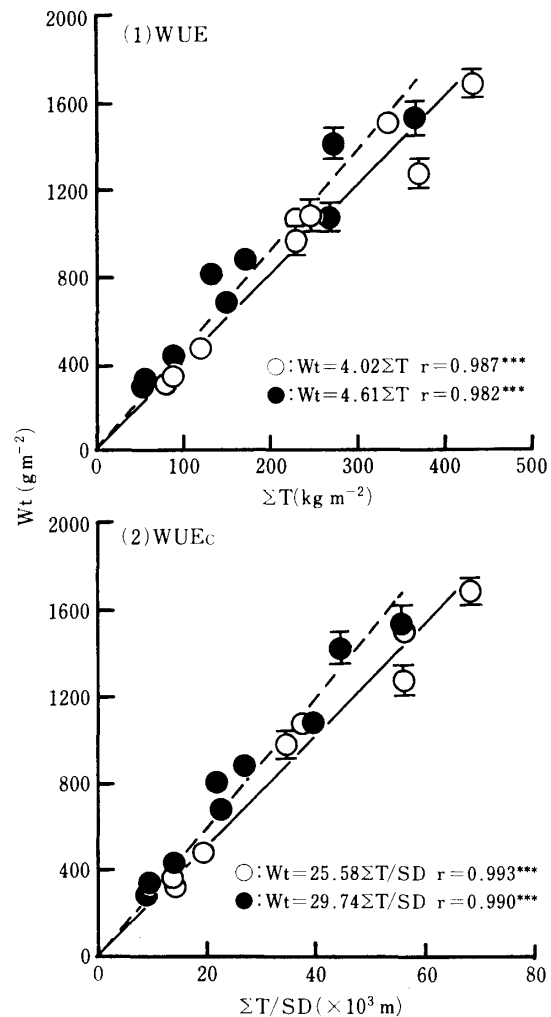


Fig. 3. Varietal differences of WUE including three locations. Open and closed circles indicate the values of cv. Nipponbare and those of cv. Koshihikari, respectively. See Figure 1 for symbols. ***Statistically significant at 0.1% level.

ここで、 c_a は大気中のCO₂濃度、 c_i は細胞間隙のCO₂濃度、 c_c はクロロプラスト中のCO₂濃度、 r_a は水蒸気輸送についての葉面境界層抵抗、 r_s は気孔抵抗、 r_m は葉肉抵抗である。 r_m は厳密には葉肉細胞内でのCO₂の物理的な拡散抵抗に加えて、光合成の光化学反応に関係した光刺激抵抗と暗反応に関係した炭酸固定抵抗の合成抵抗であり、CO₂の物理的な拡散と光合成の生化学的な抵抗を包括する⁸⁾。(3)式から、WUEは光合成と蒸散とのバランスに依存し、定常条件下では主に c_i によって決定づけられている⁷⁾。従来、 c_i 値が変化せず、一定であるとみなされていたため¹³⁾、WUEは変化しないとされていた。しかし、 c_i 値は、あたえられた r_s に対してPnが相対的に増加すれば、換言すると、相対的に r_m が低下す

ると減少し、その結果、WUE は向上する。

実際、 c_i 値の差によって、コムギ⁶⁾やイネ⁵⁾の品種間で個葉の短時間の WUE に差の生じることが指摘されている。生態型や原生地の異なる多数の陸稲間で短時間の WUE である蒸散効率を比較すると、バングラディシュ在来種 AUS 種は、他の品種に比較して WUE が低かった⁵⁾。これは、AUS 種が他のイネ品種よりも高い CO_2 補償点を持つことで P_n が低いこと、すなわち、 P_n 値が同じ条件で品種間比較をすると、AUS 種が高い c_i 値を持つことで WUE が低下している可能性があると考えられている。

次に、光合成活性の影響だけでなく、 r_s によっても WUE は変化する¹²⁾。Maruyama et al.¹⁴⁾ は、飽差を考慮していないという問題はあるものの¹³⁾、インド型イネの要水量が日本晴よりも大きいことを挙

げ、これを r_s の差によるものとした。個葉レベルでは、一般に r_s が増大すると WUE は高まる²⁰⁾。なぜなら、蒸散と光合成とは、それぞれに対する r_s の寄与が異なるからである。蒸散に対する r_m は無視できる値であるが、 CO_2 のとりこみに対する r_m は、 $r_a + r_s$ とほぼ同じか、イネでは r_m の方が幾分大きい⁹⁾。 r_s と r_m とは完全には独立ではないものの^{3,20)}、(3) 式から、 r_s の増加は光合成よりも蒸散を大きく減少させることで、WUE を高めていることが推定できる。

3. 年次間差

松江の日本晴において 91 年度と 92 年度の WUE を比較した (第 5-(1) 図)。その結果、 ΣT との関係では、両年度の WUE は若干異なったが、飽差補正後の関係を求めると、両年度の WUE_c は極めて高い一致をみた (第 5-(2) 図)。このことから、同一地域における WUE の年次間差は、その年々の作物生育期間の大気飽差の大小によって左右され、 ΣT を飽差で除して求めた WUE_c では、年次間の差はほとんど無いものと推察された。

ただし、本実験に用いた松江の圃場は、前年と同じ圃場を使用し、且つ同レベルの窒素施肥を行っている。 r_s と r_m は葉身窒素濃度 (N%) にともなって低下することから¹¹⁾、N% が r_m を介して c_i に影響し、WUE を変えていることも考えられる。そこで、各地域、品種、及び年度の N% を比較した (第 6 図)。日本晴では各地の N% はほぼ等しく、松江での年度間の N% を比較すると、その差はほとんど見られなかった。一方、コシヒカリの N% は赤名で高い値を

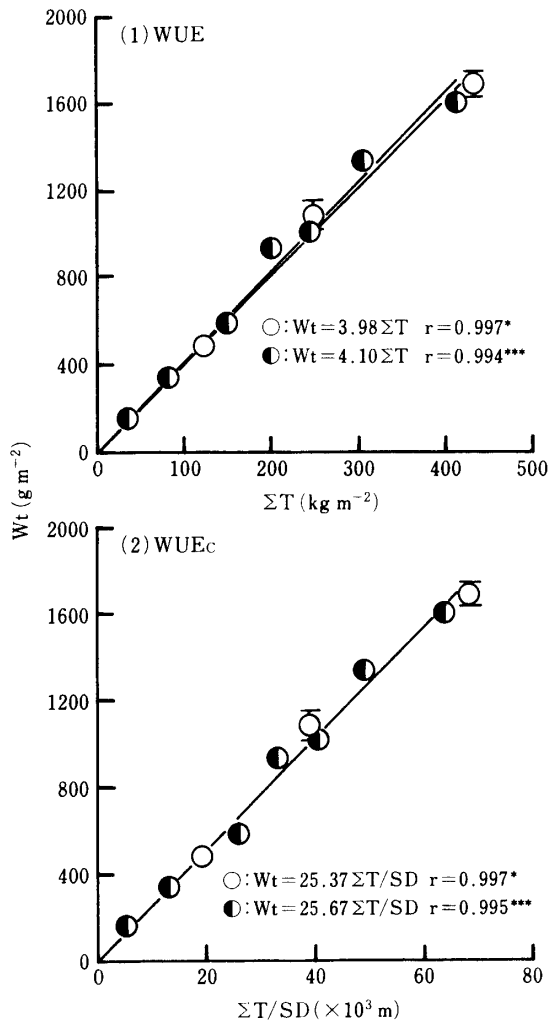


Fig. 5. Between-year differences in WUE of cv. Nipponbare grown at Matsue. Data are those in 1991 (○) and in 1992 (●). See Figure 1 for symbols. *Statistically significant at 5% level.

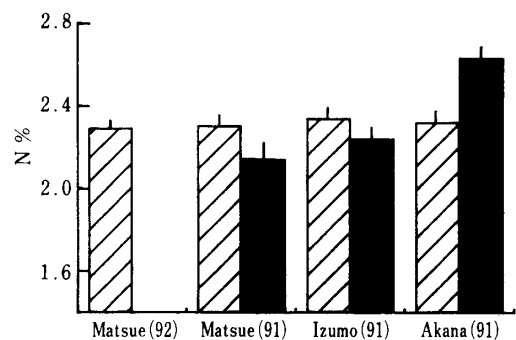


Fig. 6. Leaf nitrogen concentration (N%) for two cultivars (cv. Nipponbare: ▨, cv. Koshihikari: ■) at three locations. The experiment in 1992 was conducted using cv. Nipponbare at only Matsue. The N% value in 1992 was estimated with SPAD-501 (Minolta Co., Ltd.) chlorophyll meter. Vertical bars indicate standard errors of three observations.

示し、松江と出雲では類似した値であった。赤名のコシヒカリは比較的高い WUE_c 値を示しており、 $N\%$ が WUE の大きさに影響を及ぼしていた可能性もある。ただし、高い $N\%$ は P_n を高めるのと同時に g_s をも増大させる¹⁰⁾。本実験では、 P_n を測定していないので、なぜ WUE が高まったのかは明らかでない。ひとつには、 $N\%$ の高い葉は、飽差の低い午前中に高い気孔伝導度をとることで¹⁰⁾、 WUE が見かけ上高くなったことも考えられる。

このように、本実験ではイネの窒素含量が地域、年度で大きく違わなかったために、 WUE が異ならなかった可能性もある。今後、イネの WUE に対する窒素条件の影響を明らかにする必要がある。

4. 結論

WUE は飽差で補正するならば、品種毎に地域や年度を問わずほぼ一定であった。ただし、湿潤な日本でも WUE は飽差によって変動しており、水利用効率を高めるには、湿潤な地域や作期での栽培が有利であると考えられた。また、窒素条件によって WUE が群落レベルでも変化する可能性が示唆された。今後、 WUE が生育環境によってどの程度変化するのか、また、その変化はどのような理由で生じるのかを、ガス交換レベルから群落条件にわたって明らかにしてゆく必要がある。

謝辞：島根県農業試験場の山本 朗氏、同赤名分場の高橋真二氏をはじめ、試験場の皆さんには多くの御協力とご援助をいただいた。島根県立女子短期大学の勝部朋之氏には窒素分析に御協力をいただいた。特に近畿大学農学部の高見晋一教授には論文の取りまとめにあたり御助言と御校閲を賜った。調査にあたっては島根大学農学部作物学研究室の皆さんに多大の協力をいただいた。以上の方々に感謝する。

引用文献

1. 足立文彦・小葉田亨・有本雅幸・今木 正 1995. 水稻水利用効率の地域・年度間比較. 第1報 気象および植物体要因を組み入れた群落蒸散量の推定. 日作紀 64: 509—515.
2. Bierhuizen, J.F. and R.O. Slatyer 1965. Effect of atmospheric concentration of water vapor and CO_2 in determining transpiration and photosynthesis relationships of cotton leaves. *Agric. Meteorol.* 2: 259—270.
3. Cowan, I.R. 1977. Stomatal behavior and environment. *Adv. Bot. Res.* 4: 117—228.
4. de Wit, C.T. 1958. Transpiration and crop yields. Institute of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage. Wageningen, The Netherlands. 1—88.
5. Dingkuhn, M., S.K. De Datta, K. Dörffling and C. Javellana 1989. Varietal differences in leaf water potential, leaf net CO_2 assimilation, conductivity and water use efficiency in upland rice. *Aust. J. Agric. Res.* 40: 1183—1192.
6. Farquhar, G.D. and R.A. Richards 1984. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Aust. J. Plant Physiol.* 11: 539—552.
7. ———, K.T. Hubick, A.G. Condon and ——— 1988. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency. In Rundel, P.W., J.R. Ehleringer and K.A. Nagy eds., *Stable Isotopes in Ecological Research*. Springer-Verlag, New York. 68: 21—40.
8. 堀江 武 1981. 気象と作物の光合成, 蒸散そして生長に関するシステム生態学的研究. 農技研報 A28: 1—161.
9. ———・桜谷哲夫 1985. イネの生産の気象的評価・予測法に関する研究. (1) 個体群の吸収日射量と乾物生産の関係. 農業気象 40: 331—342.
10. 石原 邦・江原宏昭・平沢 正・小倉忠治 1978. 水稻葉における気孔の開閉と環境条件との関係. 第7報 葉身のチッソ濃度と気孔開度との関係. 日作紀 47: 664—673.
11. ———・飯田 修・——— 1979. 水稻葉身の窒素濃度と光合成速度との関係. 気孔開度・気孔伝導度に着目して. 日作紀 48: 543—550.
12. Kramer, P.J. 1986. 水環境と植物. 石原 邦・倉石晋・田崎忠良・橋本 康訳. 養賢堂, 東京. 421—432.
13. Ludlow, M.M. and R.C. Muchow 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.* 43: 107—153.
14. Maruyama, S., N. Kabaki and K. Tajima 1985. Water consumptions in Japonica and Indica rice varieties. *Jpn. J. Crop Sci.* 54: 32—37.
15. 大嶋秀雄・諸岡 稔・小浜節雄 1981. 飼料作における水収支 (ライシメーター試験). 九農試年報 25—28.
16. Passioura, J.B. 1983. In Stone, J.F. and W.O. Willis eds., *Plant Production and Management under Drought Conditions*. Elsevier, Amsterdam. 265—280.
17. 桜谷哲夫 1987. 畑地の蒸発散と生産力. 農及園 62: 7—12.
18. Sinclair, T.R., C.B. Tanner and J.M. Bennett 1984. Water-use efficiency in crop production. *Bio-science* 34: 36—40.
19. ——— and T. Horie 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency. *Crop Sci.* 29: 90—98.
20. 高見晋一 1986. ストレス耐性資源作出におけるバイオテクノロジーと遺伝資源. 農業技術 41: 547—553.
21. ———・菅谷 博・鳥山和伸 1989. 水田水・地温

- の簡易推定法. 農業気象 45 : 43—47.
22. Tanner, C.B. 1981. Transpiration efficiency of Potato. Agron. J. 73 : 59—64.
23. ——— and T.R. Sinclair 1983. Efficient water use in crop production : Research or re-search? In Taylor, H.M., W.R. Jordan and T.R. Sinclair eds., Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin. 1—27.
-