

干ばつ時における限界かん水量に関する研究

I. 畑作物の限界必要水量に関する研究

鴨田福也・坂田公男*・伴 義之

農林省東海近畿農業試験場畑作物

Characteristics of Consumptive Use of Water, Irrigation Method and Water Behavior in Desiccated Soil Condition

I. Water Consumption, Metabolic and Growth Rates of Various Crops in Desiccated Soil Condition

By

Fukuya Kamota, Kimio Sakata* and Yoshiyuki Ban

Tokai-Kinki National Agricultural Experiment Station, Tsu

Abstract

The experiments here presented were carried out in an attempt to clarify the water consumption and the metabolic and growth rates of various crops in desiccated soil condition. The annual transpiration amount of orange was 330 mm (in water depth) for young trees and 690 mm for mature trees, the percentage of transpiration to evapotranspiration being 31 % for the former and 73 % for the latter, respectively. Orange tree transpiration is closely correlated with leaf number ($r = 0.99$) and pan evaporation ($r = 0.88$).

In experiments with a device for drought warning and irrigation timing, the yields of dry-land rice and soybean are larger when the evapotranspiration ratio is high. At the ratio of 2.0 the rice yield is maximum and from the ratio of 1.5 the tendency of yield increase becomes weaker. Soybean yield is maximum at the ratio of 1.0 in 1969 and at the ratio of 1.5 in 1970. In both the years the tendency of yield increase became weaker when the ratio became higher than about 0.7.

The economic amount of irrigation water estimated from the production cost and sale price of the crop per kg, which may be considered as the water amount of critical requirement from the viewpoint of cultivation, is 440-500 mm for rice, and 200-300 mm for soybean.

As soil moisture decreases, the photosynthetic rate and the transpiration rate decrease, but the gradient of decreasing differs, depending on the kinds of crops. Growth rates of crop height and stem diameter are larger at night than in the daytime, but that of fruit diameter increases with time. Stem diameter is contracted with decreasing of water content of crop, and the rate of recovering in stem diameter of the crops of severe wilting is more rapid when they are rewatered.

目

次

1. はしがき	47	での作物の生育反応	52
2. 供試作物および試験方法	48	(3) 土壌水分変動にともなう作物の蒸散・	
3. 試験結果および考察	51	光合成の変化および生育反応	55
(1) ミカン園の水分消費特性	51	4. 摘 要	59
(2) 蒸発散比を異にしたかんがい栽培下		参考文献	60

1. はしがき

干ばつ被害をうける危険性の高い地域において、かんがい効率をより高める問題は、水利費および施設費の低減をはかる面からばかりでなく、より効率的な用水利用による作物生産を期する上から

も大きな問題である。

干ばつ時において、限られた用水をより効率的に利用するにあたって、とくに作物の栽培面からみた場合、つぎの点を考慮し検討する必要がある。

* 現在：農林省熱帯農業研究センター

* Present address : Tropical Agricultural Research Center, Ministry of Agriculture and Forestry, Tokyo.

まず第1に、作物の種類ごとおよび生育時期別に、その消費水量を明らかにすることであり、なかでも作物の生育に不可欠な蒸散量について、その推移を明らかにすることである。またこれらと並行して、用水節減の面から作物の生育に直接関係のない土面蒸発量をできるだけ少なくする対策を検討することであろう。

第2に、作物に対するかんがい水量と作物の生育あるいは収量との関係、すなわち、水-収量曲線から作物に対する効率的な水利用のあり方、あるいは作物の生理作用や生育の面からみた作物の限界必要水量を確定することである。

以上のような観点から、本試験ではとくに干ばつ条件を対象に、畑作物の限界必要水量を明らかにすることを目的に実施した。従来、作物の耐干性の問題あるいはかんがい栽培による作物の増収、品質向上などに関する研究は数多くあるが¹⁾、作物生産の面から水の効率的利用といった観点にたった検討例は少ない。

なお、本研究は昭和44年度から46年度までの3か年間にわたり実施したものであり、年度ごとの試験課題は表1のとおりである。

表1. 試験課題

試験年度	試験区分	試験課題
昭和44年度	試験Ⅰ	ミカン園の水分消費特性
	試験Ⅱ	蒸発散比を異にしたかんがい栽培下での作物の生育反応
昭和45年度	試験Ⅱ	同上
	試験Ⅲ	土壌水分変動にともなう作物の生理作用および生育反応
昭和46年度	試験Ⅲ	同上

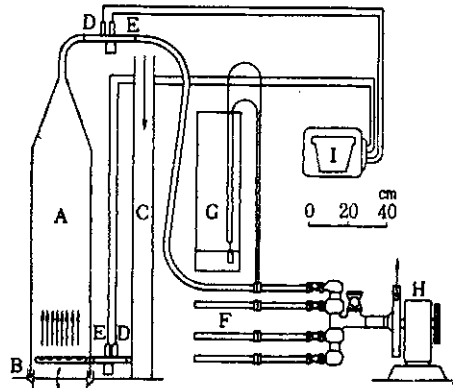
2. 供試作物および試験方法

試験Ⅰ ミカン園の水分消費特性

ミカンの幼木園(大岩5号、7年生)および成木園(尾張普通温州、30年生)について、蒸散量と土面蒸発量を年間を通じ測定した。蒸散量の測定は、ミカンの枝葉を透明塩化ビニル板製の蒸散室(直径70cm、高さ220cm、容積641ℓ)で覆い、これに通気を行ない蒸散室通気出入口における絶対湿度を計測し、出入口の差に通気量を乗じて求めた。また、園地内の土面蒸発量は土面を蒸散室で覆い、蒸散量測定の場合と同様な手法により土面蒸発量を求めた⁽⁷⁾。

測定装置の概略図は図1のようであり、蒸散量および土面蒸発量の算出は、次式により計算した。

$$T \text{ または } E_s = \sum (X_2 - X_1) Q \dots\dots(1)$$



- A. Chamber
- B. 圃場埋設管
- C. 吸気筒
- D. 乾球温度計
- E. 湿球温度計
- F. オリフィス流量計
- G. マノメータ
- H. ブローア
- I. 温度記録計
- J. 環状分配管

図1. 蒸発散量測定装置

ここで、 T は蒸散量(g)、 E_s は土面蒸発量(g)、 $X_{1,2}$ は蒸散室通気入口および出口における絶対湿度(g/m^3)、 Q は通気量(m^3)を示す。なお、絶対湿度の計測は乾・湿球示度からANGOTの公式により水蒸気張力を求め次式により算出した。

$$X = \frac{1.293 \times 10^3 \times 0.622}{1 + 0.00367t} \cdot \frac{e}{760} \dots\dots(2)$$

ここで、 1.293×10^3 (g/m^3)は乾燥空気の比重量、 0.622 は水蒸気の空気に対する比重、 e は水蒸気張力($mmHg$)、 0.00367 は温度 t ℃に対する空気の膨張率、 t は気温(℃)、 760 は気圧($mmHg$)を示す。

なお、ミカンの蒸散量、土面蒸発量の測定とあわせて、土壌水分、蒸発計蒸発量、日射量など、またミカンの葉数および樹冠投影面積などの測定を行なった。

試験Ⅱ 蒸発散比を異にしたかんがい栽培下での生育反応

イネおよびダイズを用い、かんがい警報器⁽⁸⁾を利用して蒸発散比(対蒸発計蒸発量蒸発散比)を人為的に変え、かんがい水量を異にした場合における作物の生育反応について検討した。

試験区の構成および蒸発散比の値は、表2のとおりであり、試験は昭和44、45年度に実施した。栽培法は表3のようで、は種はイネで5月上旬、

表2. 試験区の構成

作物名	年度	蒸 発 散 比			試 験 区	
		0.5	1.0	2.0	無かんがい	水田(灌水)
イネ	44	0.5	1.0	2.0	無かんがい	水田(灌水)
	45	0.5	1.0	2.0	無かんがい	水田(蒸水)
ダイズ	44	0.5	1.0	1.5	無かんがい	—
	45	0.37	0.75	1.5	無かんがい	—

ダイズで6月上旬に行ない、かんがい処理は夏季乾燥期の7月下旬から9月下旬にわたり実施した。かんがい時期の決定はかんがい警報器を利用し、次式により算出し決定した。

$$E_p = (F_C - M_L) \times D \times a \times 1 / K \dots (3)$$

ここで、 E_p はかんがい開始時を示すかんがい警報器蒸発槽の蒸発減水深(mm)、 F_C は供試ほ場にお

表3. 供試作物、耕種法および施肥量

供試作物 (品種名)	年度	は 種 (月・日)	畦間・株間 (cm・cm)	施 肥 量 (成分量Kg/a)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
イネ (ヨモヒカリ) (ホウヨク)	44	5.6	40.10(複条)	2.0	1.5	1.8
	45	5.7	"	"	"	"
ダイズ (玉作) (玉作)	44	6.10	60.40	0.7	0.8	0.6
	45	6.9	"	"	"	"

けるほ場容水量で、本試験ではpF1.5時における水分量(mm)、 M_L は作物の生長阻害水分点で、本試験ではpF3.0における水分量(mm)、 D は有効根群域の深さ(mm)、 a は有効根群域内における

有効水分量に対する消費水量の割合で、イネで0.65、ダイズで0.90とした。 K は蒸発散比を示す。なお、供試ほ場の土性、pF-水分率などは表4のとおりである。(3)式のうち、 $(F_C - M_L) \times D \times a$

表4. 供試ほ場の土の物理性およびpF-水分率

層位 (cm)	土性	容 積 量 (g/100 ml)	24時間容水量における			pF - 水分率 (容積%)							
			固相(%)	液相(%)	気相(%)	pF 0.1	1.0	1.3	1.5	2.0	2.3	3.0	3.5
10	CL	163	65.2	27.1	7.7	30.5	30.0	29.1	28.6	27.2	26.3	25.5	24.7
20	CL	158	62.4	29.3	8.3	32.0	31.4	30.3	30.0	28.8	27.9	25.8	24.9
30	CL	160	63.1	33.5	3.4	33.1	33.0	32.9	32.9	32.0	31.1	29.1	28.8
40	CL	157	60.9	31.1	8.0	33.7	33.4	33.0	32.7	31.4	30.4	28.5	28.0

の値、すなわちかんがいされ次回のかんがいまでに作物に利用される有効水量は、イネで10mm、ダイズで15mmとした。したがって表5にみるよう

に、蒸発散比を異にした区でかんがい開始時の警報器蒸発槽減水深が異なる。たとえば、イネでは蒸発散比が0.5とした場合、警報器蒸発槽の減水

表5. 各試験区のかんがい開始時におけるかんがい警報器蒸発槽の蒸発減水深

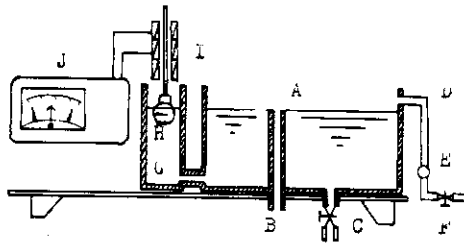
作物	作物が利用可能な消費水量 ($F_C - M_L$) × D × a (mm)	かんがい開始時のかんがい警報器蒸発槽の減水深 (mm)					
		蒸 発 散 比 (K)					
		0.37	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0
イネ	1.0	—	2.0	—	1.0	—	5
ダイズ	1.5	4.0	3.0	2.0	1.5	1.0	—

深が20mmに達した時にかんがいされ、1.0区では10mm、2.0区では減水深が5mmに達した時にかんがいされる。すなわち、蒸発散比の値が小さい区ほどかんがい回数は少なく、乾燥条件で栽培され

るが、イネおよびダイズとも無かんがい区を設け、かんがい程度を異にした各区と比較した。なお、イネでは多水分条件の栽培区として、水田作水稲についてもあわせて検討した。

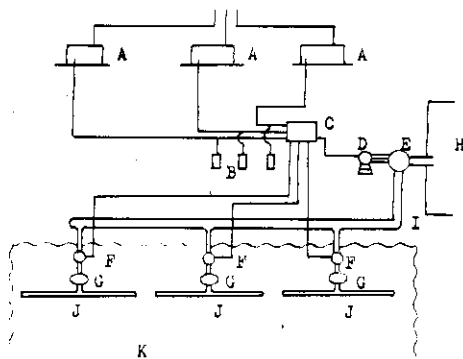
1回当りのかんがい水量は、上記した有効水量 $((F_C - M_L) \times D \times a)$ に相当するイネで10mm、ダイズで15mmになるよう配慮した。

イネに用いたかんがい警報器の概略図は、図2のようで、またこれを利用した自動かんがい装置の略図は、図3のようであり、かんがいの開始および停止などすべて自動的に行なった。ダイズに用いたかんがい警報器は図4にみるような指示計を利用し、指示計の蒸発減水深が規定のかんがい開始水位に達した時に、手動によりバルブ開閉でかんがいた(5)。かんがいはイネ、ダイズとも畦間かんがいとした。



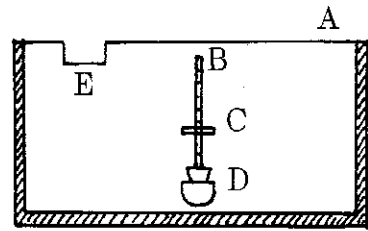
- | | |
|------------|------------|
| A. 蒸発槽 | F. ストップバルブ |
| B. 余水口 | G. 浮子室 |
| C. 排水口 | H. 浮子 |
| D. 掃遣パイプ | I. 差動トランス |
| E. ニードルバルブ | J. 水位指示リレー |

図2. かんがい警報器概略図



- | | |
|----------------|---------------|
| A. かんがい警報器 | G. 水道メーター |
| B. 度数計 | H. ファームポンド |
| C. 切換スイッチ | I. 送水管 |
| D. モーター (2.5巾) | J. かん水用穴あきパイプ |
| E. ポンプ | K. 試験は場 |
| F. 電磁弁 | |

図3. かんがい警報器を利用した自動かんがい装置の概略図



- | |
|-----------------|
| A. 蒸発槽 |
| B. 水位指示目盛管 |
| C. 遊尺 (かん水開始水位) |
| D. 連通管 |
| E. 余水口 |

図4. かんがい警報指示計

調査項目としては作物要因(草丈、茎数、根系、収量など)、土壤水分の変化および降雨、蒸発、かんがい回数・水量などについて計測した。

試験Ⅲ 土壤水分変動にともなう作物の蒸散・光合成の変化および生育反応

土壤水分の変動にともなう、作物の蒸散および光合成がどのような変化を示すか、また、草丈の伸長や茎の肥大などの生育反応について検討する。

作物はいずれもポット栽植とし、イネ(コモヒカリ)、グレンソルガム(NK 265)、ダイズ(十勝長葉)は1/5000アールポットに、トウモロコシ(交1号)、サトイモ(愛知早生)は1/2000アールポットに、またナス(千両)、ピーマン(平安栄光)、キュウリ(四葉近成)、トマト(福寿)は直径30cm素焼鉢に栽培した。ミカン(大岩5号)はドラム缶半載の容器(径58cm、深さ45cm)に栽植した幼木(6年生)を供試した。肥培管理は慣行法にしたがって行ない、土壤水分処理は適湿区(容水量から $P^F 2.2$ 程度の範囲に維持した区)を対象とし、一方、かん水を停止し次第に土壤水分を減少させる乾燥区を設け、両区における蒸散、光合成・呼吸および生育反応について測定した。

蒸散量および光合成・呼吸量の測定はChamber法により行ない、蒸散量の測定は乾・湿球示度から絶対湿度を求める方法により(7)、また光合成・呼吸量の測定は赤外線ガス分析計(日立・堀場、ASSA-2)による CO_2 濃度測定から求めた。

土壤水分処理にともなう草丈の伸長、茎や果実肥大の測定は、差動トランスを用いた作物生長記

録解析装置により時刻別、処理別に記録し計測した。なお、土壌水分の測定はテンシオメーターおよびガラスフィルターブロックにより計測した。

3. 試験結果および考察

1) ミカン園の水分消費特性

供試樹の生育程度は成木が最大葉数およそ 36,000 枚、葉面積約 89m² で幼木の14倍程度であった。

年間を通じてのミカンの蒸散量の月別推移をみると、成木とも夏期7～8月に最も多く、冬期に少ない推移を示した。夏期乾燥時の蒸散量を樹令別にみると、幼木では1樹1日当たり2.5ℓ、成木ではおよそ100ℓの蒸散量がみられた。また、冬期における蒸散量は幼木で1樹1日当たり0.5ℓ、成木で5～10ℓ程度であった。

これら蒸散量の水深換算値については、1樹当たりの占有面積との関係から幼木、成木間に大きな差はなく夏期において幼木で2.6mm/日、成木で3.4mm/日程度であった。

蒸散量の多少は葉面積、土壌水分および気象条件に影響されるが、土壌水分が著しく乾燥した場合は例外として、蒸散量は気象条件に大きく左右される。葉数や葉面積など作物要因と蒸散量との関係を明らかにするには、蒸散に関与する気象条件を一定にして検討する必要がある。そこで気象条件を等しくする便法として、蒸散に関与する気象要素の総合指標として蒸発計蒸発量をとり、この蒸発量で蒸散量を除した値、すなわち蒸散比について検討すると便利である。

蒸散比の月別推移をみると、蒸散量のような季節変化はみられず、同年を通じ幼木で0.31、成木で0.44前後の値である。なお幼木では新梢発生期の5月、7月、9月に葉数増加により、蒸散比に若干の増大がみられた。

つぎに着葉全体の平均的な蒸散能力をみるために〔蒸散量(ℓ)/葉面積(dm²)・蒸発計蒸発量(mm)〕を算出してみた。その結果によれば幼木では0.5～2.0ℓ/dm²・mmの範囲に分布し、新梢伸長期の5月、7月、10月に蒸散能力が大きくなる傾向がみられた。一方、成木では1.0～3.7ℓ/dm²・mmの範囲で、8～10月に蒸散能力が大きくなる結果を示した。

ミカンの蒸散量、土面蒸発量および蒸発散量と気象要素との相関係数は、表6のようである。蒸

表6 ミカン蒸散量、土面蒸発量および蒸発散量と気象要素との相関関係

		蒸発計蒸発量	気温	飽差	日射量
幼木	蒸散量	0.79	0.76	0.86	0.62
	土面蒸発量	0.38	0.83	0.56	0.42
	蒸発散量	0.64	0.52	0.79	0.56
成木	蒸散量	0.88	0.79	0.76	
	土面蒸発量	0.53	-0.04	0.20	
	蒸発散量	0.93	0.64	0.69	

散量と正相関の高いのは、幼木では蒸発計蒸発量や飽差であり、成木では蒸発計蒸発量や気温であった。土面蒸発量については幼木園では気温、成木園では蒸発計蒸発量が比較的高い正相関がみられた。

また、蒸発散量の場合は幼木、成木園とも蒸発計蒸発量と最も高い正相関を示した。

蒸発散比については表7にみるとおりであり、対蒸発計蒸発量との比についてみると幼木園で0.81～0.95、成木園で0.77～0.81であり、対日射量比で0.50～0.57であった。

表7 期間および樹令別の蒸発散比

期間	対蒸発計蒸発量蒸発散比		対日射量蒸発散比
	幼木	成木	幼木
4～9月	0.81	0.81	0.50
10～3月	0.95	0.77	0.57
周年	0.85	0.79	0.52

ミカン園における年間の蒸散量、土面蒸発量および蒸発散量を算出するには次式によるものが多い。

$$ET = T_r + E_s \dots\dots\dots(4)$$

$$T_r = E_w \cdot K_t \dots\dots\dots(5)$$

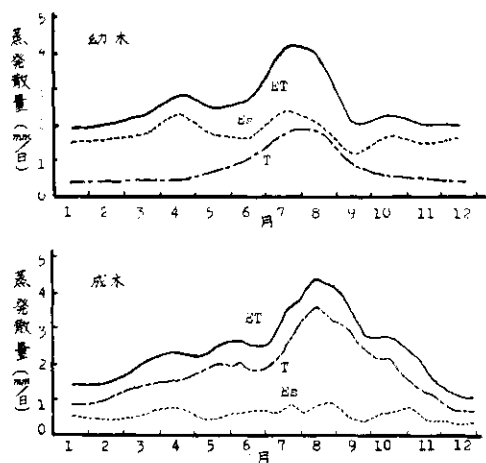
$$E_s = E_w \cdot K_s \dots\dots\dots(6)$$

ここで、ETは蒸発散量(mm)、E_sは土面蒸発量(mm)、E_wは蒸発計蒸発量(mm)、K_t K_sは蒸発計蒸発量に対する蒸散比および土面蒸発比。

この方式で算出した結果によれば、幼木園では年間およそ1050mmが樹体からの蒸散であり、720mm程度が土面から蒸発として消費されていた。一方、成木園では年間およそ940mmで、このうち690mmが蒸散であり、250mmが土面蒸発となっていた。

なお、蒸発散量のうちに占める蒸散量の割合は、幼木で約30%、成木で70%程度であった。

ミカン園水分消費の平均的な推移を図示したものが図5であり、幼木および成木園の間で、蒸発散量の推移にそれほど大差はないが、その内訳としての蒸散量と土面蒸発量の推移にかなりの差異



ET 蒸発散量 T 蒸散量 Es 土面蒸発量
図5 ミカンの蒸発散、蒸散、土面蒸発量の平均月別推移

がみられた。なお、土面蒸発量については後記する「果樹園における土面蒸発量とその防止に関する研究」において詳述する。

ミカンの消費水量について、倉岡は幼木の蒸散量を測定し年間およそ 560mm だとし、また蒸発散量については鳥潟ら¹⁵⁾は年間 980mm、加藤らは 900~1000mm 程度であることを明らかにしている。本試験におけるミカンの蒸発散量は、表8にみるように、幼木および成木園とも相似た値で年間およそ 940~1050mm 前後とみれる。

しかし、蒸散量(水深換算値)については幼木で年間約 300mm、成木で約 700mm であり、2倍以上の差があり樹令によって差がみられる。この差は葉面積の大小によるものであり、樹令、栽植密度および仕立方などにより異なるものと推察される。

作物の生育にとって蒸散は不可欠のものであり、作物に対する1次的な限界必要水量は、蒸散量に匹敵する水量であると考えられる。つまり、蒸散量が土壌水分の減少により、好適土壌水分のものにくらべ低下する時点が、かん水の時期であり好適土壌水分条件に戻す水量が必要水量と考えられる。

干ばつ時において、少ない水をより効率的に利

用するには、蒸発散量をできる限り蒸散量に近づけ、作物の生育に直接関係のない土面あるいは草地面からの蒸発を少なくする必要がある。また、かん水法についてはほ場全面にかんがいをするより、ミカン株もとに蒸散量に見合った水量だけかん水するなど、かん水法についても考慮する必要がある。

2) 蒸発散比を異にしたかんがい栽培下での作物の生育反応

生育および収量：処理開始は梅雨あけの7月20日(出穂30日前)からで、それ以前は水田作水稻を除き、畑作水稻各区とも同じ管理のもとで栽培したが、処理後における草たけ伸長の差はかなりのはっきりした形で現われた。蒸発散比0.5区ではしばしば軽い萎ちょうがみられ、とくに無かんがい区では水分補給を自然降雨だけに依存することから、無降雨日の続いた8月上~中旬では日中かなり強度の萎ちょうがみられ、草たけの伸びは抑制された。

茎数については、処理区間にあまり差がみられず、収かく期における茎数(穂数)では最も少ないのが蒸発散比0.5区で 410本/m²、最も多いのは水田作水稻で 455本/m²で、その差は10%程度であった。

出穂期や成熟期については、水田および蒸発散比2.0区など多水分条件のものにくらべ、無かんがい区や蒸発散比0.5区など少水分条件で栽培したものは3~6日の遅れがみられた。また収量構成要素についてみると、表8に示すごとく少水分条件で栽培した区ほど1穂粒数、稔実歩合、千粒重の低下がみられ、44年度の収量で最も低いのは無かんがい区で 13Kg/a、ついで蒸発散比0.5、1.0、2.0区の順に収量が多く、最も高い収量は水田作水稻で 66Kg/a で、無かんがい区にくらべおよそ5倍の収量であった。

また、ダイズの収かく物の調査した結果によると、地上部重や茎長など作物体の大きさは、45年度の測定例では蒸発散比0.75区が最も大きく、無かんがい区や蒸発散比1.5区では作物体がやや小さくなることのみられた。

子実収量では無かんがい区が最も低く a 当り 12~13Kg で、蒸発散比 0.37、0.5 などかんがい回数が多くなるにつれ収量は増加し、多収を示した区は44年度の場合は蒸発散比1.0区、45年度では蒸発散比1.5区で a 当り 29.5~21.5Kg であった。

表8 イネの各実験区における収量構成要素

区	項目 年度	m ² 当り穂数		平均1穂粒数		稔実歩合(%)		登熟粒歩合(%)		千粒重(g)		玄米重(Kg/a)		精玄米重(Kg/a)	
		44	45	44	45	44	45	44	44	45	44	45	44	45	
無かんがい		425	410	48	50	70.9	49.8	45.4	17.7	17.6	16.4	14.4	13.1	11.2	
無発散比0.5		410	430	67	66	88.8	77.2	61.0	19.2	18.2	32.2	26.0	29.7	23.7	
" 1.0		415	420	76	80	94.2	85.3	67.7	19.9	19.1	42.5	39.2	40.4	36.9	
" 2.0		450	422	80	74	93.4	89.0	71.1	20.7	20.2	53.0	42.0	49.2	39.1	
水田		455	430	93	90	93.9	90.2	77.1	20.9	20.6	68.2	47.1	66.4	45.3	

かんがい回数, 水量および土壌水分: イネ(畑作水稻)の場合について処理期間内の降雨量, 有効降雨日, 蒸発計蒸発量の推移および各処理区におけるかんがい日を図示したのが, 図6である。ま

た, 処理期間中における各区のかんがい回数, 水量, 有効雨量および平均日消費水量などについて表9に示した。

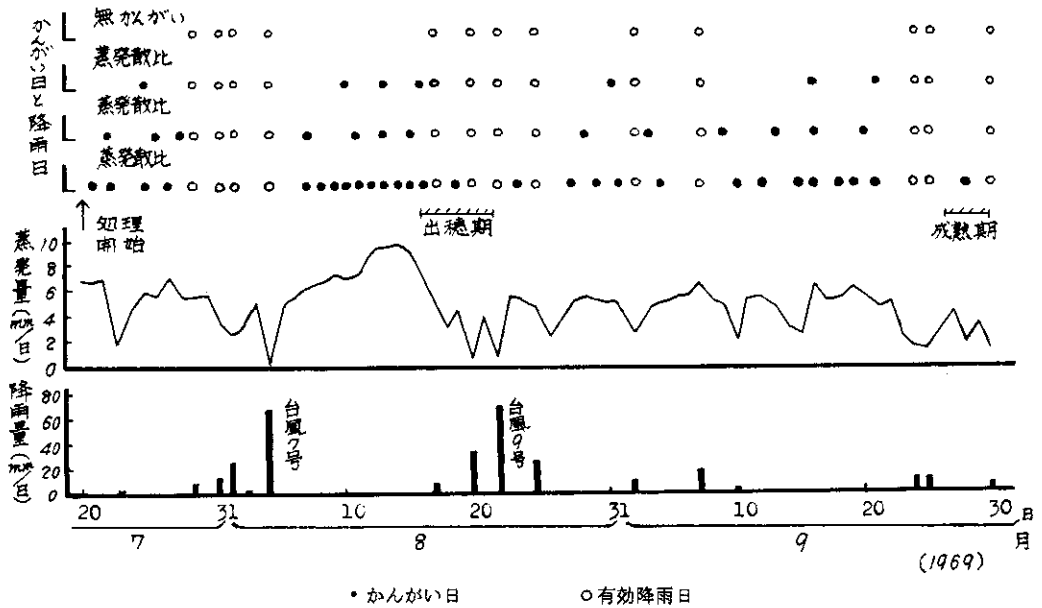


図6. 畑作水稻の処理期間中の降雨量, 蒸発量およびかんがい回数

表9 イネ(畑作水稻)におけるかんがい回数, 水量および有効雨量, 日消費水量

区	項目 年度	かんがい				平均1回当りかん水量(mm)		有効雨量(mm)		有効降雨日の回数		かんがい水量と有効雨量の合計(mm)		平均日消費水量(mm)
		回数	水量(mm)	回数	水量(mm)	44	45	44	45	44	45	44	45	
無かんがい		0	0	00	0	0	0	190	168	13	19	190	168	1.9
蒸発散比0.5		7	7	93	78	13	11	187	158	13	16	280	236	2.7
" 1.0		13	16	203	170	16	11	181	154	13	16	384	324	3.7
" 2.0		28	38	473	392	17	10	72	116	13	13	545	512	5.8

図表にみるように, 蒸発散比の値が大きい区ほどかんがい回数, 水量とも多く, 有効雨量も加算

し作物に与えられる水量が多くなり, 無かんがい区では有効雨量だけが作物に与えられる水量であ

った。表9に示すように、44年度測定例において蒸発散比2.0区では、かんがい回数が28回、有効降雨日が13回で合計41回の水分給与を受けたことを示し、また水量としてはかんがい水量が473mm、有効雨量が72mmで合計545mmの給与水量であった。かんがい回数および給与水量などについて、蒸発散比の値が小さい区ほど少なくなり、無かんがい区での給与水量は有効雨量のみで190mmであった。日消費水量については45年度に検討したが、無かんがい区で平均1.9mm/日、蒸発散比が大きくなるにつれ消費水量は多くなり、蒸発散比2.0区では5.8mm/日であった。

給与水量を異にした各処理区における土壌水分の変化について、その一例を図示したのが図7である。給与水量の多い蒸発散比2.0区では、pF1.5~2.0(株間5cm深さ)の範囲内で経過するが、蒸発散比0.5区ではpF1.5~3.0の範囲内で経過し、土壌水分の変動巾が大きかった。

ダイズにおけるかんがい回数、水量および有効雨量は表10のとおりであり、蒸発散比1.5区がか

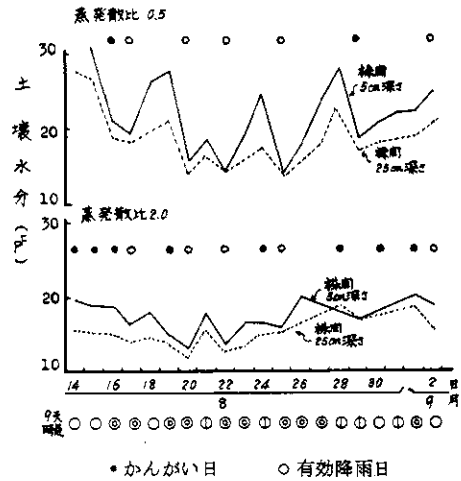


図7 畑作水稲の蒸発散比を異にしたかんがい区の土壌水分推移

表10 ダイズにおけるかんがい回数、水量および有効雨量

区および年度	かんがい		平均1回当りかん水量(mm)	有効雨量(mm)	かんがい水量と有効雨量の合計		
	回数	水量(mm)			(mm)	区および年度	(mm)
無かんがい (45)	0	0	—	104	104	無かんがい (44)	220
蒸発散比 0.37 (45)	2	30	15	99	129	蒸発散比 0.5 (44)	275
〃 0.75 (45)	4	60	15	99	159	〃 1.0 (44)	310
〃 1.5 (45)	9	135	15	94	229	〃 1.5 (44)	350

処理期間 44年度 7月20日~9月30日
45年度 8月4日~9月18日

かんがい回数、給与水量とも最も多く、蒸発散比が小さくなるにつれかんがい回数、給与水量とも少なくなり、無かんがい区の給与水量は220mm(44年度)~104mm(45年度)であった。

蒸発散比および給与水量と収量：無かんがい区を含め、蒸発散比と収量との関係を見ると、イネ(畑作水稲)では年度により収量は異なるが、兩年とも蒸発散比が大きくなるにつれ収量は増大し、増大の傾向は蒸発散比1.5付近から緩慢になることがうかがわれた。

ダイズについては、イネとほぼ同様な傾向がみられたが、収量増大は蒸発散比1.0付近までであることがみられた。

つぎに、かんがい水量に有効雨量を加えた水量すなわち、作物への給与水量と収量との関係を図8に示した。これによればイネ(畑作水稲)では

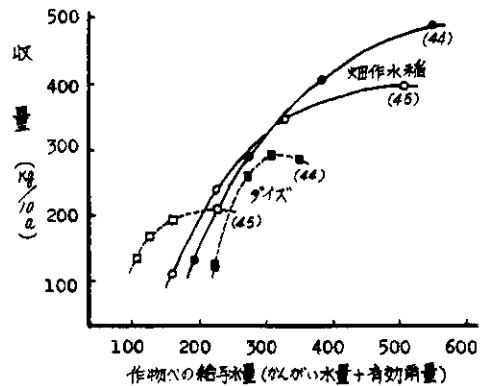


図8 作物への給与水量と収量との関係

給与水量が多くなるにつれ収量は増大するが、給与水量がおよそ400mmをこえると収量増大は緩慢

になる傾向がみられた。

ダイズでは給与水量が年度により異なり、給与水量が多くなるにつれ収量は増大するが、44年度では 300mm、45年度では 230mm 付近に最大収量がみられた。

作物ごとの水の効率的な利用を考える場合、まず第1に図8にみるように、水-収量曲線について検討する必要があるが、第2に作物の生育時期別における水の生育効果について明らかにする必要があるが、これについては従来、生育時期別に干ばつ処理を行なうなどの方法で、いくつかの作物について検討されてきた(2, 14)。しかし、第1の問題である水量と作物収量との関係についての資料は少なく、水之江(9)、鴨田(5)らにより経済的用水量の観点からとりまとめられている程度である。

畑作物の限界必要水量について考える場合、作物に与える水量を減少させていくにつれ収量がどのような変化を示すかを明らかにし、これにもとづいて限界必要水量を決める必要がある。なお、イネ、ダイズのような一年生作物とミカンのような永年生作物とでは、限界必要水量のとり方に差がみられよう。つまり、一年生作物ではその年の収かきが皆無であることは大きな問題であるが、永年生作物では収かきをある程度犠牲にしても、枯死させない程度に樹体を維持させるような考え方である。

イネ、ダイズなど一年生作物についての関係は、図8にみるようであり、この図からはどこに限界必要水量を求めるかは、かなり困難な問題である。そこで、限界必要水量を求める一つの方法として、CLYDE(3)らが指摘しているように、水-収量曲

線から経済的用水量について検討し、作物生産の面から限界必要水量をきめるやり方である。すなわち、最大収量を得るための必要水量ではなく、労力費、水利費、ほ場の規模、作物の生産価格などを考慮し、ある程度の収量を得るための用水量を、一年生作物の限界必要水量とみなす方法である。

このような観点から、イネおよびダイズの限界必要水量を試算するとつぎのようである。イネについては、10アール当りの第1次生産費(水利費を除く)は、およそ4万円(b)で、価格1Kg当り133円(a)とすると⁽¹⁰⁾、 b/a は300となりこの値を図8のy軸上にとり、これより曲線に接線を引き、その切点に対応するx軸上の用水量を求めると、440mm(45年度)~500mm(44年度)程度である。一方、ダイズでは10アール当りの生産費が8千円(b)、1Kg当りの価格を77円(a)とすると⁽¹⁰⁾、用水量は200mm(45年度)~300mm(44年度)である。つまり、イネについては440~500mm、ダイズでは200~300mmが作物生産の面からみた限界必要水量とみられる。もちろん、これら必要水量のうち自然降雨によって補給される部分があり、かん水により補給を必要とする水量は限界必要水量をこえないことはない。

3) 土壌水分変動にともなう作物の蒸散・光合成の変化および生育反応

蒸散と光合成におよぼす土壌水分の影響：前述の各作物毎に蒸散および光合成に対し土壌水分減少が、どのような影響をおよぼすかについて検討した。なお一部の作物について、萎ちょうした時点でかん水をし、蒸散および光合成の回復過程について検討した。

表11 各種作物の蒸散・光合成速度とP/T比

供試作物	項 目	蒸 散 速 度 (T)		光合成速度(P)	P / T 比
		$g/dm^2 \cdot hr$	$g/dm^2 \cdot cm Hg \cdot hr$	$mg/dm^2 \cdot hr$	
普通作物	イ ネ	2.7	1.64	19	6.5
	トウモロコシ	2.2	1.13	38	18.5
	グレインソルガム	2.2	1.38	39	21.9
	ダ イ ズ	3.6	1.57	21	9.1
そ 菜	ナ ス	2.7	1.42	15	5.7
	ピ マ ン	2.8	2.50	16	7.4
	キ ュ ウ リ	1.6	0.80	20	17.6
	ト マ ト	2.0	1.43	27	16.9
	サ ト イ モ	2.8	1.80	17	9.3
果 樹	ミ カ ン	1.6	1.07	15	12.0

表11は蒸散および光合成の速度について、測定中の最大値を一覧表にしたものであり、P/T比は日中の光合成が正である時間内での平均値で表示した。

蒸散・光合成速度およびP/T比は、作物の種類により異なり、蒸散速度の大きい作物にはサトイモ、イネなどがあり、小さい作物にはキュウリ、ミカンなどがあつた。光合成速度では供試作物のうち大きいものにグレインソルガム、トウモロコシがあり、小さい作物にはミカンがみられた。

P/T比では高い値を示す作物にはグレインソルガム、トウモロコシなどがあり、低い値を示すものにはイネ、ダイズなどがみられた。

土壌水分がしだいに減少していく過程において、ある範囲内までは蒸散および光合成ともに正常に行なわれるが、土壌水分がある値をこえて減少すると蒸散および光合成ともに、かなり急激に低下する。表12は供試各作物の蒸散・光合成が適湿区にくらべ低下し始める時点の土壌水分および蒸散と光合成低下の差異などについて、概括的に表示

表12 各作物の蒸散・光合成が低下し始める時点の土壌水分および低下の差異

供試作物		蒸散・光合成が低下し始める時点の土壌水分 (pF)	蒸散・光合成がゼロになる時点の土壌水分 (pF)		蒸散(T)と光合成(P)の低下の差異
			蒸散	光合成	
普通作物	イネ	2.2 ~ 2.3	—	3.0	Pの低下が著しい
	トウモロコシ	2.2 ~ 2.3	—	2.9	同上
	グレインソルガム	2.7 ~ 2.9	—	3.5	同上
	ダイズ	2.4 ~ 2.6	—	2.9	同上
そ 菜	ナス	2.4 ~ 2.5	3.0	2.7	同上
	ピーマン	2.4 ~ 2.5	3.0	2.7	同上
	キュウリ	2.3 ~ 2.3	2.9	2.9	PとTの低下がほぼ等しい
	トマト	2.3 ~ 2.4	2.9	2.9	同上
	サトイモ	2.4 ~ 2.6	—	2.9	Pの低下が著しい
果 樹	ミカン	2.7 ~ 3.0	4.0	—	Tの低下が著しい

土壌水分は深さ10cm位置（ミカンの場合は20cm深さ）での測定値で、ポット中央付近やや器壁よりで測定

したものである。

蒸散・光合成の低下し始める時点の土壌水分は、作物により多少異なり、土壌水分が比較的多い時点で低下し始める作物はイネ、トウモロコシ、キュウリ、ナス、ピーマンなどがみられ、土壌水分がかなり乾いた状態で低下し始める作物にはグレインソルガム、ミカンなどがあつた。また、光合成が日中でもゼロ（呼吸への転換）になる状態の土壌水分は、普通作物やそ菜ではpF 3.0付近にみられたが、ミカンではpF 4.0（20cm深さ）前後であつた。

蒸散と光合成の低下の差異については、イネ、トウモロコシ、グレインソルガム、ダイズ、サトイモ、ピーマン、ナスなどは蒸散の低下にくらべ光合成の低下が著しく、キュウリ、トマトでは蒸散・光合成の低下の度合がほぼ等しく、ミカンでは蒸散の低下にくらべ光合成の低下が少なかった。

蒸散および光合成の日変化について、供試作物

のうち代表的な例としてナスの場合を図示したのが図9である。

適湿区の蒸散・光合成の時刻別推移についてみると、日出と共に蒸散および光合成ともに増大し12時前後に最大に達し、午後に低下する変化がみられる。しかし、土壌水分が少ない乾燥区では、蒸散および光合成とも適湿区にくらべ低く、光合成については日中でもCO₂吸収（光合成）からCO₂放出（呼吸）に転ずることがみられた。

また、乾燥区でかなり土壌水分が減少し、萎ちょうを示す時点でかん水した場合の蒸散および光合成の回復は図9のうち8月3日の例にみるように、蒸散は比較的速やかに回復するが、光合成の回復は蒸散にくらべ遅れる傾向がみられた。

図10は土壌水分と蒸散・光合成との関連を、代表的な作物について図示したものである。蒸散および光合成速度は、土壌水分がある範囲内においては図9にみるような日変化（8月1日の例）を

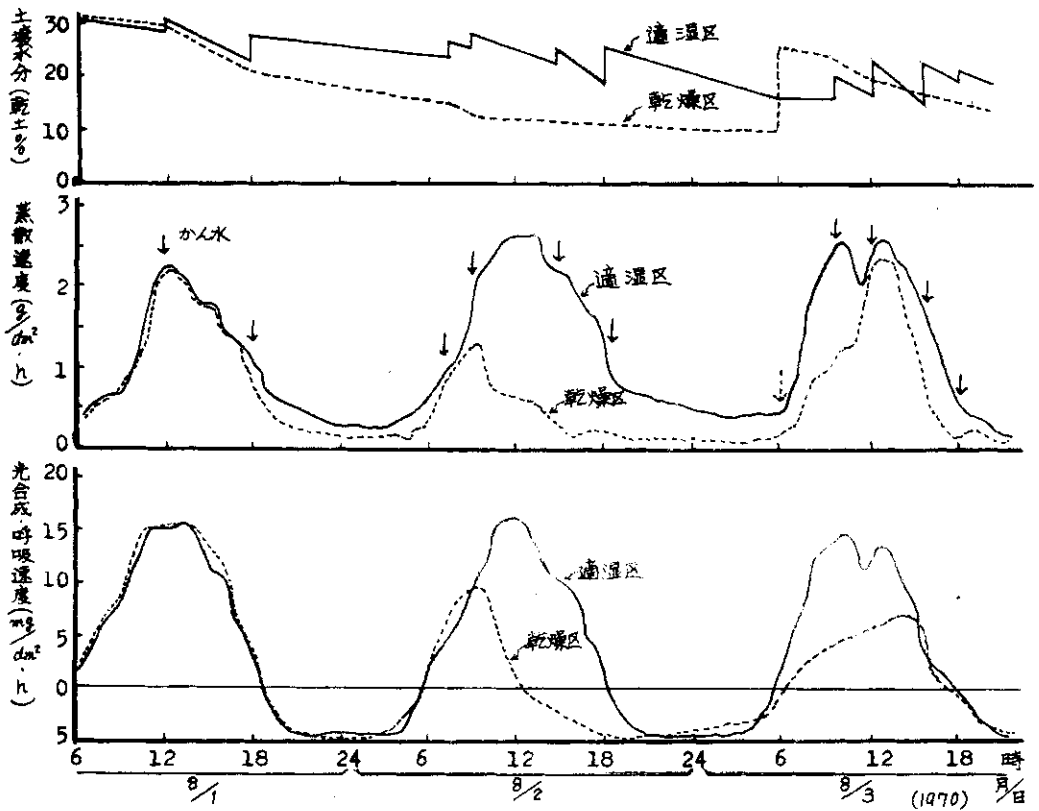
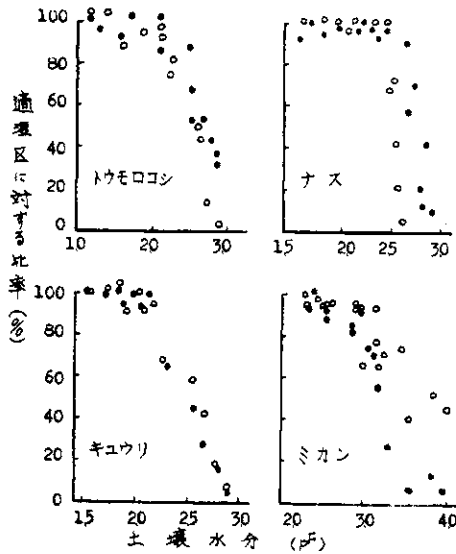


図9 ナスの蒸散・光合成および呼吸速度の処理別の時刻別推移



●蒸散 ○光合成

図10 適湿区に対する乾燥区の蒸散および光合成と土壌水分との関係

示し、適湿区、乾燥区ともほぼ等しいが、土壌水分がある値をこえて減少すると、各作物とも蒸散および光合成がかなり急激に低下することがわかる。蒸散および光合成が低下し始める時点の土壌水分は、前記した表11にみるようであった。さらに、蒸散および光合成の低下の様相は、作物により多少異なることがうかがわれた。なお、これら作物間差がどのような機作によるものか証明する実験を行っていないが、El-Sharkawy⁽²⁾、田崎⁽⁴⁾が指摘するように気孔開度の差、葉内細胞へのCO₂拡散速度の差などが、主たる原因であると考えられる。これらの問題については、今後さらに生理および生態学的に詳しく検討する必要がある。

作物の生育反応と土壌水分：土壌水分の変化にともなう作物の生育に関し、草たけの伸長、茎および果実肥大を時刻別に測定した。トマトの結果を、図11に示した。

図にみるように、トマトの草たけ伸長には日変

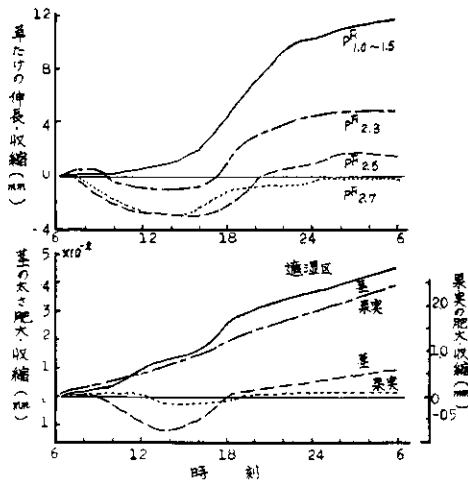


図11 トマトの草たけ、茎の太さ、果実の肥大・収縮の時刻別推移

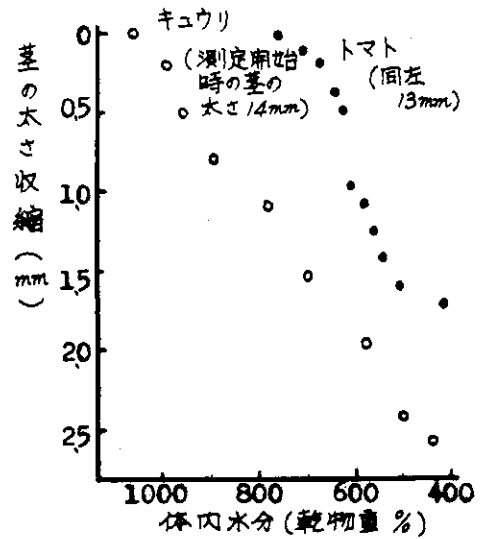


図12 体内水分と茎の太さとの関係

化がみられ、日中の草たけ伸長は少なく、午後4～5時ごろから夜半までの間に急速な伸びを示し、さらに夜半から朝方までの伸びはあまり大きくないなどの時刻別推移がみられた。草たけ伸長は土壌水分が減少するにつれ、停滞抑制され日中に収縮する結果がみられ、pF 2.5～2.7程度に土壌水分が減少すると草たけ伸長はほとんど見られなかった。

茎の太さ変化は、土壌水分が多い条件ではほぼ草たけ伸長と似た経過を示し、夕方から夜半にかけて肥大が大ききようであった。一方、土壌水分が少ない条件では肥大はほとんどみられず、日中に収縮し夜間に回復する経過を示した。

トマト果実(幼果)の横径変化についてみると、土壌水分が多い条件下では時間推移と共に、ほぼ直線的に肥大していく結果を示し、草たけ伸長の経過とは異なる傾向がみられた。また、土壌水分が少ない条件(pF 2.5)では肥大はほとんどみられず、日中に収縮する結果を示した。

体内水分減少と茎の太さ変化との関係は、図12にみるようで、体内水分が減少するにつれ茎は収縮し、永久萎凋に近い状態の茎の太さは、正常状態の太さにくらべキュウリで18%、トマトで14%程度の収縮を示した。また、かん水による茎の太さ肥大回復は、図13にみるようで、土壌水分減少が大きく収縮程度の著しいものほど、回復速度が早くpF 2.7ではかん水後1時間ほどで回復が最大に達し、土壌水分が多く収縮が少ないものほど回

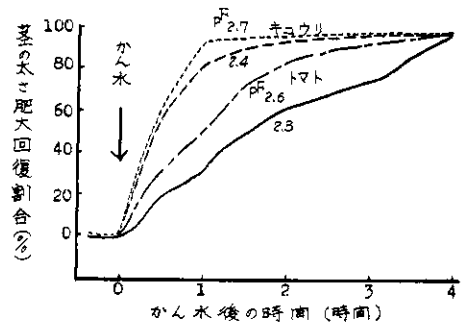


図13 かん水による茎の太さ肥大回復推移

復速度は遅くなった。

作物生育の時刻別変化と土壌水分、体内水分および気象条件との関係について、玉井⁽¹³⁾、岡本⁽¹²⁾、門屋⁽⁶⁾らがそれぞれメロン、ミカンについて計測し、各要因と生育との間に密接な関連があることを指摘している。著者らの測定結果においても、草たけ伸長、茎や果実の肥大と土壌および体内水分と密接な関係がみられ、前項で述べたように、土壌水分の減少にともなって光合成や蒸散の低下とあわせ、上記したように、作物の生育肥大が抑制される。⁽¹⁾

これらの結果をもとに、干ばつ時における限界必要水量をきめる上で、光合成や生長肥大が適湿条件のものにくらべ、低下し始める時点がかん水必要時期であり、適湿条件に戻すに足る水量が作

物生産の面からみた一次的な限界必要水量といえるであろう。たとえば、トマトでは表12, 図11にみるように光合成や生長が低下し始める土壤水分はpF2.3~2.4であり、この時点がかん水必要時期であり、これ以上に土壤水分が減少した場合は少なくともpF2.3~2.4に戻すに足る水量が、トマトに対する限界必要水量とみることができる。もちろん、この場合の限界必要水量は最高収量に近い結果を期待しての必要水量であり、干ばつ時において水量をどこまで減らし得るかは、試験Ⅱにおいて論じたように水-収量曲線から検討しなければならない問題であろう。

4. 摘 要

干ばつ時において、限られた用水をより効率的に利用することは重要な問題であり、その一つに栽培面からみた作物の限界必要水量を明らかにする必要がある。

本試験では、これら作物の限界必要水量を明らかにすることを目的に、昭和44年から3カ年にわたり各種作物を対象に試験を実施した。試験の内容は、作物の蒸散量(ミカン)、水-収量曲線(イネ、ダイズ)、土壤水分と作物の蒸散・光合成および生長(そ菜、普通作物、果樹)について検討した。その概要はつぎのとおりである。

試験Ⅰ

1. ミカン園の蒸発散量は、年間940~1050mm程度で幼木園と成木園とにあまり大きな差はなかった。

2. ミカン樹の蒸散量は、幼木で年間およそ330mm、成木で約690mmであり、蒸発散量に占める割合は幼木で31%、成木で73%、両者間にかなりの差があった。

3. 土面蒸発量は幼木園で年間約720mm、成木園で250mmで3倍近い差がみられた。

4. ミカン園の蒸発散量は、蒸発計蒸発量や飽差などと高い正相関がみられ、また蒸散量とは葉数、飽差、蒸発計蒸発量と正相関を示した。

5. 蒸発散比については、対蒸発散比では幼木園で0.85、成木園で0.79、対日射量比では幼木園で0.52であった。

試験Ⅱ

1. イネの収量は水田、蒸発散比2.0区など多水分条件のものほど多く、収量構成要素のうち一穂粒数、千粒重、稔実歩合が少水分条件の区にく

らべ大きかった。

2. 畑作水稻で最も低い収量は、無かんがい区で、蒸発散比の値が大きい区ほど収量は多く、蒸発散比2.0区が最高収量を示し、蒸発散比1.5程度から収量増加の傾向が緩慢になった。

3. 蒸発散比の値が大きい区ほどかんがい回数は多く、土壤水分は多く、株間5cm深さ位置での土壤水分張力は蒸発散比2.0区でpFl.3~2.0、蒸発散比0.5区でpFl.3~3.3程度で経過した。

4. ダイズはイネにくらべ収量は低く、44年度では蒸発散比1.0区が多収であり、45年度では蒸発散比1.5区が多収で、両年度を通じ蒸発散比0.7前後から収量増加の傾向は緩慢になった。

5. 作物への給与水量(かんがい水量+有効降雨量)と収量との間には、指数曲線的な関係がみられた。また、作物の生産費および価格から推定される経済的用水量(栽培面からみた限界必要水量とも考えられるもの)は、イネで440~500mm、ダイズで200~300mmであった。

試験Ⅲ

1. 蒸散速度の大きい作物にはイネ、サトイモ、ピーマンがあり、小さい作物にはミカン、キュウリなどがみられた。また、光合成速度の大きい作物にはグレインソルガム、トウモロコシがあり、小さい作物にはミカン、ナスなどがあった。

2. P/T比(光合成/蒸散比)の大きい作物には、グレインソルガム、トウモロコシがあり、小さい作物にはナス、ピーマンなどがみられた。

3. 蒸散および光合成が適湿区にくらべ低下し始める時点の土壤水分は、作物の種類により異なり、イネ、トウモロコシ、キュウリなどは比較的多水分条件で低下が始まり、ミカンやグレインソルガムはかなり乾燥した条件になるまで低下がみられなかった。

4. 蒸散と光合成の低下様相の差は、イネ、トウモロコシ、ダイズ、ナス、サトイモなどでは蒸散の低下にくらべ光合成の低下が著しく、キュウリ、トマトでは蒸散と光合成の低下がほぼ等しく、また、ミカンでは光合成にくらべ蒸散の低下が大きかった。

5. 干ばつ時にかん水を行ない、蒸散および光合成の回復過程についてみると、蒸散の回復は比較的速やかであるが光合成の回復は遅かった。

6. 供試作物(トマト、ナス、キュウリ)の草たけ伸長、茎の太さ肥大には時刻別変化がみられ

夕方から夜半にかけての生長が著しかった。

7. 土壤水分が減少するにつれ、草たけ伸長、茎の太さ肥大(頂位に近い節間)は抑制され、pF 2.3~2.5 付近から日中に収縮することがみられた。

8. 果実(トマト幼果)の肥大は、時間の経過と共に大きくなり、草たけ伸長や茎の肥大とは多少異なる日変化を示した。また、土壤水分の減少につれ肥大は抑制され、pF 2.5 付近では日中に収縮することがみられた。

9. 体内水分の減少につれ茎の太さは収縮し、両者間に密接な関連がみられた。また、かん水による収縮の肥大回復は、収縮程度の大きいものは速やかに回復し、かん水後はほ1時間ほどで元に復し、収縮の軽微な場合は4~5時間で回復する結果を示した。

引用文献

1. BOYER, J.S.(1970): Plant Physiol, 46
2. El-Sharkawy M.A. and J.A. Hesketh (1964): Crop Scie, 4
3. HARRY S. CLYDE, WILLARD GARDNER and ORSON W. ISRAEISEN(1923): Engi. News-Records, 91 (14)
4. 鴨田福也, 加藤一郎(1971): 日作紀 40 (別1)
5. _____, _____, 坂田公男, 伴義之 (1973): 東近研報25
6. 門屋一臣(1972): 園芸学会, 昭和47年度秋季大会研究発表要旨
7. KATO I, NAITO Y, TANIGUCHI R, and KAMOTA F (1960): 日作紀 28 (3)
8. 加藤一郎, 坂田公男, 鴨田福也, 谷口利策 (1970): 東近研報19
9. 水之江政輝(1970): 農土誌 39(5)
10. 農林省農林経済局統計調査部(1970): 第4次農林統計表
11. 農林省農林水産技術会議事務局(1972): 研究成果 59
12. 岡本 茂(1963): 園芸, 農業気象学会東海支部, 合同シンポジウム講演要旨
13. 玉井虎太郎(1956): 愛媛大学紀要, 第6部農学 2(2)
14. TAZAKI T. (1960): Jap Jour. of Bot 17(2)
15. 鳥瀧博高, 豊田一郎, 中条昭孝, 天野三千夫 (1963): 園学雑 32(1)