

# 琉球大学学術リポジトリ

沖縄におけるサトウキビのカンガイ用水量決定に関  
係ある 2,3 の要素に関する研究(農業工学科)

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山城, 三郎, Yamashiro, Saburo メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/4003">http://hdl.handle.net/20.500.12000/4003</a>

沖縄におけるサトウキビのカンガイ用水量決定に  
関係ある2,3の要素に関する研究

山城三郎\*

Saburo YAMASHIRO : Studies on some elements con-  
cerned with determination of irrigation water for sugar  
cane in Okinawa

目 次

Summary	368
摘 要	375
はしがき	379
第I章 沖縄におけるサトウキビ栽培とその立地条件	379
第1節 概 説	379
第2節 サトウキビの立地条件	381
第3節 サトウキビに対する畑地カンガイ	382
第II章 サトウキビの蒸発散量	391
第1節 概 説	391
第2節 ホ場におけるサトウキビの蒸発散量	392
1 蒸発散量の測定方法および結果	392
2 累積蒸発散量および日蒸発散量のモデル化	398
第3節 月別平均日蒸発散量と気象要因との関係	407
1 推定曲線の計算	407
2 各気象要因からの推定値	417
第4節 考 察	418
第III章 サトウキビに対する一回のカン水量の決定	419
第1節 概 説	419
第2節 サトウキビの有効根群域	419
1 材料および調査方法	420
2 調査結果および考察	420
第3節 カンガイの上限値	425
1 実験方法および調査方法	425
2 結 果	426

\*琉球大学農学部農業工学科

3 考察	429
第4節 カンガイの下限値	433
1 ポット試験	434
2 現地調査	439
第5節 サトウキビの土壤水分消費型	443
1 測定方法	443
2 測定結果	443
3 考察	445
第6節 一回のカン水量および間断日数	446
1 一回のカン水量に関する諸元	446
2 一回のカン水量	447
3 間断日数	448
第IV章 カンガイの必要性	451
第1節 サトウキビの干バツ被害	451
1 干バツ被害状況	451
2 降雨量とサトウキビの干バツ被害	455
第2節 土壤水分とサトウキビの10アール当り収量	456
1 有効雨量および不足水量の計算	456
2 降雨量, 有効雨量および不足水量の平年値とその経年変化	458
3 降雨量, 有効雨量および不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量	464
4 不足水量の確率計算	471
第V章 総括	477
1 沖縄におけるサトウキビ栽培の重要性	477
2 サトウキビの消費水量	478
3 サトウキビに対する一回のカン水量	479
4 沖縄のサトウキビに対する畑地カンガイ	480

## Summary

### 1. Evapotranspiration rate for sugar cane

Equational modelling of changes in the evapotranspiration rate for summer planted sugar cane during its growing period has been done using crop data obtained between 1966 and 1971. Using the model, the monthly average daily evapotranspiration rate has been determined and its relationship with certain meteorological factors analyzed. Further, this average rate estimated by the application of meteorological factors has been compared with those obtained from the cumulative evapotranspiration rate curve. The sugar cane used in the study is N:Co, 310. Evapotraspira-

tion rates were measured with lysimeters, in the Subsidiary Farm of the Faculty of Agriculture of Ryukyu University. The results obtained are as follows :

1) As was described in Chapter II, Section 2, the changes in the cumulative evapotranspiration rate for summer planted sugar cane in Okinawa are presented by a logistic curve of second degree expressed by the following equation:

$$Y = C + \frac{D - C}{1 + e^{\phi(t)}} \dots\dots\dots(2.5)$$

where  $\phi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$

Y = cumulative evapotranspiration (cm)

t = the number of terms after plantation  
(one term = 30 days)

C = initial value (constant)

D = asymptotic value (constant)

$a_0, a_1$  and  $a_2$  = constants

2) Differentiation of equation (2.5) establishes the average daily evapotranspiration curve. Changes in the monthly average rate for summer planted sugar cane in Okinawa are generally presented by a curve with the following features: it has its peak in the period from July to September the year after planting, and gradually descends in the periods before and after that period to approach a fixed value (the asymptotic value). The monthly average rate reaches a high of 5 - 6 mm/day at the height of growth (July - September) and sometimes drops to about 1 mm/day during other growth periods.

3) The relationships between the monthly average daily evapotranspiration rate and the monthly averages of the following meteorological factors have been examined (Chapter II, Section 3): daily mean air temperature, daily maximum air temperature, daily minimum air temperature, daily solar radiation, and daily evaporimeter - evaporation rate. The relationships thus elucidated can be presented by an exponential curve expressed by the following equation:

$$\overline{ET} = a x^n \dots\dots\dots(2.8)$$

where  $\overline{ET}$  = monthly average of daily evapotranspiration rate  
(mm/day)

x = meteorological factors: air temperature (°C), solar radiation (Cal/cm<sup>2</sup>·day), evaporimeter - evaporation rate (mm/day)

a, n = constants

The equations representing one of the relationships have been obtained by applying to equation (2.8) the values of the monthly average of daily evapotranspiration rate and those of corresponding meteorological factors. They have been linearized by taking logarithms in order to examine their coefficients of correlation. The coefficients of correlation obtained are 0.92, 0.75 and 0.67 for the relationships between the monthly average of evapotranspiration rate and the air temperatures, the daily solar radiation, and the daily evaporimeter - evaporation rate, respectively (degree of confidence 99%).

4) Using the equations obtained in 3), the monthly averages of daily evapotranspiration rate for 1967, 1968, and 1970 have been estimated. Of these estimated values, those obtained by use of air temperatures (mean, maximum, and minimum) showed an approximate agreement. These estimated values conform to a curve resembling that for the monthly average of daily evapotranspiration rate obtained from the curve for the cumulative evapotranspiration rate. However, the daily evapotranspiration rates estimated from the monthly averages of daily solar radiation and those from the monthly averages of evaporimeter - evaporation rate showed poor agreement; this can be conjectured from the coefficients of correlation mentioned in 3). Therefore, of the meteorological factors examined here, the three kinds of air temperatures should be utilized in estimating the monthly average of daily evapotranspiration rate for summer planted sugar cane.

## 2. Amount of water for one irrigation for sugarcane.

The appropriate amount of water for one irrigation for sugar cane in the calcium soil zones in Okinawa has been studied in connection with the following influential factors: the depth of effective root zone of the fields in the calcium soil zone, the maximum and minimum limits of available soil moisture for irrigation, and the soil moisture consumption pattern of the crop. The results obtained have been used, with those of previous studies, to examine the appropriate amount of water for one irrigation for sugar cane fields in the limestone soil zones and the marl zones.

### 1) Effective root zone for sugar cane

Changes in the cumulative percentage of the air-dry weight of roots and of the length of roots, as related to increase in the depth of soil, form almost identical curves. The curves have revealed that in the fields in the calcium zones in Okinawa, the effective root zone for sugar cane is identical to a zone where the cumulative percentage of air-dry weight of roots attains 95%, that is about 40-50 cm from the surface (Chapter III, Section 2). As was reported in Chapter I,

Section 3, this calcium soil generally has a shallow horizon formed from a highly porous limestone (the parent rock), the rock bassetting in some places. In certain spots of a rather deep soil horizon, the distinction between the plow layer (about 30–40cm from the surface) and the sub-soil was clear, and the plow layer contained most of the roots. Therefore, for a practical irrigation plan, a depth of about 40cm can be recommended as an effective root zone for sugar cane in the fields in the limestone soil zones.

On the other hand, Kugai<sup>26)</sup> recommends a depth of about 50cm as an effective root zone for marl zones; the soil generally has a deep soil horizon from a highly impermeable marl (the parent rock).

Sugar cane in the limestone soil zones in Okinawa is vulnerable to drought (Chapter IV, Section 1). This can partly be attributed to the peculiarities of the effective root zone and of the construction of the soil horizon.

#### 2) Maximum limit of available soil moisture for irrigation

Designing irrigation plans usually involves a survey of field capacity which will be used as the maximum limit of available soil moisture for irrigation. However, on some occasions, field capacity is estimated by use of a pF–soil moisture curve, without conducting a field survey. As was described in Chapter III, Section 3, a field capacity usually corresponds to pF values of 1.8–2.0. Here, attempts have been made to elucidate the relationship between field capacities and pF values in the sugar cane fields in limestone soil zones in Okinawa. It has been revealed that in designing irrigation plans for the fields in these zones, estimating the field capacity by use of a pF–soil moisture curve indicates utilization of a soil moisture corresponding to pF 1.9 (Chapter III, Section 3).

#### 3) Minimum limit of available soil moisture for irrigation

As described in Chapter III, Section 1, ordinary upland field irrigation plans in mainland Japan set the available water range between the field capacity (pF 1.8–2.0) and the water equivalent (pF 3.0, growth inhibition point of moisture). However, in designing field irrigation for Nansei (or southeast) islands such as Okinawa, where water resources are scarce, a special scheme should also be examined in which priority is placed on maintaining the least physiological functions of the crop by setting the soil moisture control range wider than the available water range for normal growth. In this connection, the minimum limit of available soil moisture for irrigation for sugar cane in Okinawa has been examined by both pot experiments and field surveys. The pot experiments studied the relationships between the soil moisture and the following items: the evapotranspiration rate, leaf temperature, dry matter weight, plant water content, and photosynthesis (Chapter III, Section 4). It appears that the appropriate minimum limit of available soil moisture for irrigation is the soil

moisture corresponding to a pF value about 3.8. On the other hand, the field surveys show that the crop starts wilting when the soil moisture in the upper layer of soil becomes slightly lower than that corresponding to pF 3.8 (the first wilting point). These results recommend adoption of soil moisture corresponding to pF 3.8 (first wilting point) as the minimum limit of available soil moisture for irrigation of sugar cane in Okinawa. This also means that, in order to keep the roots fully functional, sugar cane fields should be irrigated before the soil moisture at any point of the effective root zone becomes lower than that corresponding to pF 3.8.

#### 4) Soil moisture extraction patterns of sugar cane

Sugar cane exhibits different soil moisture extraction patterns according to its stage of growth (Chapter III, Section 5). The pattern at the height of growth, which is evaluated on the basis of the quadrisection of the effective root zone, is different from the conventional pattern. In this pattern the crop absorbs a considerable amount of water from the second and third sections. Since the soil moisture extraction pattern usually varies according to the cultivational conditions in the field, designing a fixed irrigation plan requires a field survey of each field concerned.

#### 5) Amount of water for one irrigation

The soil moisture values corresponding to the pF values 1.9 and 3.8 are recommended to be adopted as the maximum and minimum limits, respectively, of available soil moisture for irrigation of sugar cane in limestone soil zones in Okinawa (2), (3))

Both the limestone soil (commonly called "Maji soil") and the marl soil ("Jagaru soil") are heavy clay soils and almost equal in soil particle size, true specific gravity, bulk density, and rate of solid phase (Chapter I, Section 3).

However, the limestone soil has a smaller rate of liquid phase corresponding to pF 1.9 and a greater liquid phase rate corresponding to pF 3.8 than the marl soil.

In other words, the limestone soil evidently has a smaller differential (amount of usable water) between the maximum and minimum limits of available soil moisture for irrigation. The amount of water for one irrigation of the limestone soil zone (represented by Miyako) and the marl soil zone (represented by Haebaru) has been calculated by the T.R.A.M. method (Chapter III, Section 6). The net amount of water for thus calculated was 25 mm for the limestone soil and 40 mm for the marl soil.

This indicates that without irrigation, sugar cane is more vulnerable to drought in the limestone soil than in the marl soil.

### 3. Requirement for irrigation

In 1963 and 1971, sugar cane in Miyako was severely hit by droughts with respective damage rates of 60% and 90% (Chapter IV, Section 1). This chapter describes a survey which examined the irrigation requirements in the two soil zones, the limestone soil zone (frequently hit by droughts) and the marl soil zone (rarely hit by droughts).

The irrigation requirements in Miyako and Haebaru have been discussed with respect to the amount of rainfall, the amount of effective rainfall, amount of deficient water, the percentage of drought-damaged sugar cane, and the yield of sugar cane per 10a. Requirement for irrigation in the following growing periods has been examined: the entire growing period, the January-December period in the next year of planting, the July-September period in next year of planting.

1) In Miyako (limestone soil zone), the rates of drought damage scarcely related to the yearly amount of rainfall but were strongly related to the amount of rainfall during the July-September period in the next year of planting.

2) The normal year's values of the following factors for Miyako and for Haebaru are listed in the table below (previously presented in Chapter V, Section 4): the amount of rainfall, amount of water consumption by sugar cane, amount of effective rainfall, efficiency rate of rainfall, and amount of deficient water. The table indicates that in both zones the absolute amount of rainfall is sufficient for sugar cane during any of the three growing periods.

However, the small efficiency rate of rainfall apparently results in a substantial deficiency in water in both zones.

In Miyako, all of the growing periods examined had a greater amount but a smaller efficiency rate of rainfall than Haebaru, thus causing a greater amount of deficient water. This can be attributed to the differences in the soil types and in the construction of the soil horizons. It also explains the fact that sugar cane is more vulnerable to drought in limestone soil than in marl soil zones.

3) The efficiency rates of rainfall for normal years are greatest in the July-September period in the next year of planting, with all values smaller than 45% in the growing periods examined.

A linear relation (with a negative gradient) between the amount and the efficiency rate of rainfall was found in each growing periods, each relation having a fairly strong correlation. The gradients of the lines varied according to the growing period, exhibiting especially greater val-



ues in the July – September period in the next year of planting. Therefore, estimating the effective rainfall for a certain period from the amount of rainfall in the same growing period should be based not on a fixed efficiency rate but on the efficiency rate corresponding to the amount of rainfall in the same period.

Table 5.4 Normal values of factors concerning water consumption by sugar cane

place	Growing period	Amount of rainfall mm	Amount of water consumption mm	Amount of effective rainfall mm	Efficiency rate of rainfall %	Amount of deficient water mm
Miyako (limestone soil zone)	Total	3,600	1,476	950	26.39	482
	January–December in next year of planting	2,150	1,200	720	33.49	467
	July–September in next year of planting	590	442	230	38.98	249
Haebaru (marl soil zone)	Total	3,450	1,476	1,020	29.57	421
	January–December in next year of planting	2,100	1,200	770	36.67	408
	July–September in next year of planting	580	442	245	42.24	220

4) In normal years, summer –planted sugar cane has a sufficient amount of soil moisture during the year of planting.

But the crop suffers from water deficiency in the following year, mostly in the July–September period when it is at its height of growth.

5) Little relationship was observed between the amount of rainfall in any of the three growing periods and the yield of summer–planted sugar cane per 10 a.

In Haebaru (marl soil zone), neither the efficient rainfall nor the amount of deficient water in any growing period showed a relationship to the yield of summer –planted sugar cane per 10 a. As was referred to in Chapter IV, Section 2 and Chapter I, Section 3, this can be attributed to the fact that the soil in Haebaru generally has a deep horizon developed on the marl, a parent rock of very little permeability; the par-

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

ent rock prohibits permeation of rainwater and the deep soil provides the effective root zone with an appropriate supply of water from the layer below. In the sugar cane in Miyako, the amount of effective rainfall and the amount of deficient water in each growing period are in a linear relationship with the yield per 10 a, with a positive and a negative gradient, respectively, and with a fairly strong correlation for each relation.

These gradients of the linear relations are especially greater in the June-September period in the next year of planting.

6) An examination of the relationship between the recurrence period for the amount of deficient water and the rate of damage on sugar cane by drought revealed that in Miyako sugar cane suffers from drought about once in two years, with the rate of damage about 20%.

7) Sugar cane in Okinawa does not often suffer from drought in the marl zones but very often in the limestone soil zones.

Therefore, in the latter, irrigation is indispensable to prevent both the decrease in yield of the crop, which occurs almost every year on account of soil moisture deficiency, and crop damage during drought years. Also confirmed is the particular significance of irrigation in the June-September period in the next year of planting.

8) The conclusions described above are based only on the studies of natural conditions. Therefore, further studies should examine the economical aspects of irrigation.

## 摘 要

## 1 サトウキビの蒸発散量

1966年～1971年に測定した夏植サトウキビの累積蒸発散量記録に基づき、蒸発散量の時期的変化をモデル化した。また、その結果得られた夏植サトウキビの月別平均日蒸発散量と気象要因との関係を解析した。さらに、これらの関係に基づき、気象要因によって推定した月別平均日蒸発散量と累積蒸発散量曲線から求めた月別平均日蒸発散量とを比較検討した。以下にその結果を示す。なお、供試品種としてはN:Co, 310を採用し、蒸発散量を琉球大学農学部附属農場でライシメータによって測定した。

1) 第II章第2節で述べたように、沖縄における夏植サトウキビの累積蒸発散量は次式で示されるような二次のロジステック曲線に適合することが明らかとなった。

$$Y = C + \frac{D - C}{1 + e^{-\phi(t)}} \dots\dots\dots (2 \cdot 5)$$

ここで

$$\phi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

Y: 累積蒸発散量 (cm)

t: 30日を期間単位とした植付け後の期間数

C : 初期値

D : 漸近値

C, D,  $a_0, a_1, a_2$  は定数

である。

2) (2・5) 式を微分することによって平均日蒸発散量曲線を求めることができる。本研究結果によると、沖縄における夏植サトウキビの月別平均日蒸発散量は一般に植付け翌年の7月～9月にピークを示し、その前後においては次第に減少し、ある一定の値に漸近する曲線で表わされる。つまり、沖縄では夏植サトウキビの月別平均日蒸発散量はその生育最盛期(7月～9月)に約5～6mm/dayとなり、少ない時には1mm/day程度まで減少する。

3) 第II章第3節では、沖縄における夏植サトウキビの月別平均日蒸発散量と月平均気温、日最高気温の月平均値、日最低気温の月平均値、月別平均日射量および月別平均蒸発計蒸発量との関係を究明した。その結果、夏植サトウキビの月別平均日蒸発散量とこれらの気象要因との関係も(2・8)式で示すようなべき曲線で表わされることが明らかとなった。

$$ET = ax^n \dots\dots\dots (2 \cdot 8)$$

ここで

ET : 月別平均日蒸発散量 (mm/day)

x : 各気象要因 (気温 $^{\circ}$ C, 日射量 Cal/cm $^2$ ・day, 蒸発計蒸発量 mm/day)

a, n : 定数

である。なお、月別平均日蒸発散量とこれに対応する気象要因を(2・8)式に適用して得られた各関係式をその両辺の対数をとることによって直線化しその相関係数を検討した。その結果、月別平均日蒸発散量と気温との関係では0.92、日射量および蒸発計蒸発量との関係ではそれぞれ0.75、0.67の相関係数が99%の信頼度で得られた。

4) 3)の各関係式を用いて1967年度、1968年度、および1970年度の月別平均日蒸発散量を推定した結果、気温による推定値はほぼ一致した。この気温からの推定値は、累積蒸発散量曲線から求めた月別平均日蒸発散量曲線に近似した曲線で示される。しかしながら、月別平均日射量および月別平均蒸発計蒸発量からの推定値はばらつきが大きい。これは3)の各関係式の相関係数からも推察されることである。したがって、本研究で検討した気象要因から夏植サトウキビの月別平均日蒸発散量を推定する場合は、気温による方法を採用した方がよいと考える。

## 2 サトウキビに対する一回のカン水量

沖縄の石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビに対する一回のカン水量の諸元について究明した。すなわち、同地帯のホ場におけるサトウキビの有効根群域、カンガイの上限値、下限値およびサトウキビの土壤水分消費型について試験研究を行った。その結果と既応の研究結果に基づき、石灰岩土地帯と泥灰岩土地帯におけるサトウキビに対する一回のカン水量についても比較検討した。

### 1) サトウキビの有効根群域

サトウキビの根の風乾重量および長さの累計百分率は、地表面からの深さに対し、ほぼ同一曲線を描く。この曲線によると、沖縄の石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビの有効根群域は、根の累計百分率が約95%になる深さに当り、およそ40cm～50cmであることが明らかとなった(第III章第2節)。第I章第3節で述べたように、この土壤は極めて多孔質な石灰岩を基岩とし、一般に土層が浅く、場所によっては基岩が地表に露頭している。また土層が深い所でも、地表より約30cm～40cmの作土層と心土層がはっきり区別され、サトウキビの根はほとんど作土層内に分布している。実際のカンガイ計画に際しては、石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビの有効根群域として、約40cmを採用した方がよいと考える。久貝<sup>26)</sup>によると泥灰岩土地帯におけるサトウキビの有効根群域はほぼ50cmである。この

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

土壌は一般に土層が深く、きわめて不透水性の泥灰岩を基岩としている。第IV章第1節によると、石灰岩土壌地帯におけるサトウキビは干バツ被害を受けやすい。これはサトウキビの有効根群域および土層構造の違いにも起因していると考えられる。

## 2) カンガイの上限值

カンガイ計画に際し、カンガイの上限值として、ホ場容水量を調査する必要がある。しかし、現地調査を行わずpF-水分曲線によってこれを推定する場合もある。第III章第3節で述べたように、一般にホ場容水量に対応するpF値は1.8~2.0である。沖縄の石灰岩土壌地帯のサトウキビ栽培ホ場におけるホ場容水量がいかなるpF値に対応しているかについて解析を試みた。その結果、沖縄の石灰岩土壌地帯におけるカンガイ計画に際し、ホ場容水量をpF-水分曲線によって推定する場合は、pF 1.9に対応する土壌水分を採用すべきであることが明らかとなった(第III章第3節)。

## 3) カンガイの下限值

第III章第1節で述べたように、通常内地での畑地カンガイ計画では、有効水分領域をホ場容水量(pF 1.8~pF 2.0)から水分当量(生長阻害水分点pF 3.0)の範囲に設定している。しかしながら、水資源に乏しい南西諸島の畑地カンガイ計画を立てるに当たっては、水分調節の範囲を正常生育有効水分の範囲よりも大きく取り、最低限、生理機能に障害を起ささないことを前提とした計画についても検討を試みる必要がある。このような観点から、沖縄におけるサトウキビに対するカンガイの下限值についてポット試験および現地調査を行った。第III章第4節で述べたように、ポット試験によって、土壌水分とサトウキビの蒸発散量、葉温、乾物重量、含水率および光合成との関係について試験研究を行った。その結果、サトウキビに対するカンガイの下限值としては、大略pF 3.8に対応する土壌水分が適当であると推察される。また現地調査によると、サトウキビのシオレ現象が現われ始める時には、上層部の土壌水分がpF 3.8(初期シオレ点)に対応する土壌水分よりやや少なくなっていることが明らかとなった。以上、ポット試験および現地調査の結果、沖縄におけるサトウキビに対するカンガイの下限值としてはpF 3.8(初期シオレ点)に対応する土壌水分を採用した方が好ましいと考える。すなわち、根の機能を十分発揮させるためには、有効根群域の全土層にわたって、土壌水分がpF 3.8に対応する土壌水分以下にならない前にカンガイすべきであると思ふ。

## 4) サトウキビの土壌水分消費型

第III章第5節で述べたように、サトウキビの土壌水分消費型はその生育時期によって異なることが明らかとなった。また、サトウキビの有効根群域を4等分した場合、生育最盛期における土壌水分消費型は一般に用いられている土壌水分消費型とは異なり、第2層および第3層から水分をかなり多く吸収する型となっている。この土壌水分消費型は現地ホ場における栽培条件によって変動するのが通例である。したがって、具体的なカンガイ計画の策定に際しては、当該地区ごとに現地試験を実施する必要がある。

## 5) 一回のカン水量

2), 3)によると、沖縄におけるサトウキビに対するカンガイの上限值および下限値として、それぞれpF 1.9, pF 3.8に対応する土壌水分を採用した方が好ましい。第I章第3節で述べたように、沖縄の石灰岩土壌(島尻マーチ土壌)および泥灰岩土壌(ジャーガル土壌)はいずれも重植土で、土壌の粒径組成、真比重、仮比重および個相率に大差はない。しかしながら、石灰岩土壌は泥灰岩土壌に比べ、pF 1.9に対応する液相率が小さく、pF 3.8に対応する液相率が大きくなっている。すなわち、カンガイの上限值と下限値の差(利用可能水分量)が小さいことが明らかである。第III章第6節で述べたように、石灰岩土壌地帯として宮古、泥灰岩土壌地帯として南風原を例にとり、両土壌地帯におけるサトウキビに対する一回のカン水量をT・R・A・M法によって計算した。その結果、一回の純カン水量として、石灰岩土壌地帯で25.0mm、泥灰岩土壌地帯で40.0mmが得られた。これは、カンガイを実施しないならば、泥灰岩土壌地帯に比べ石灰岩土壌地帯においてはサトウキビが干バツ被害を受けやすいことを示唆している。

### 3 カンガイの必要性

第IV章第1節で述べたように、1963年と1971年の大干バツ年には、宮古におけるサトウキビの干バツ被害率はそれぞれ60%および90%となっている。本章では、沖縄でサトウキビがしばしば干バツ被害を受けている石灰岩土地帯と干バツ被害をあまり受けていない泥灰岩土地帯を対象にして、サトウキビに対するカンガイの必要性について調査研究を行った。すなわち、石灰岩土地帯として宮古、泥灰岩土地帯として南風原を例にとり、降雨量、有効雨量、不足水量、サトウキビの干バツ被害率および10アール当り収量の面から論じた。なお、サトウキビの生育期間を全生育期間、植付け翌年の1年間、植付け翌年の7月～9月の3期間に分けて検討した。

1) 宮古(石灰岩土地帯)においてはサトウキビの干バツ被害率と年降雨量とはあまり関係がないが、植付け翌年の7月～9月の降雨量との間には深い関係があることが明らかとなった。

2) 第V章第4項にまとめたように、宮古(石灰岩土地帯)と南風原(泥灰岩土地帯)における降雨量、サトウキビの消費水量、有効雨量、有効率および不足水量の平年値は次表のとおりである。この表によると、両地区におけるサトウキビにとって、平年には各生育期間の降雨量の絶対量は不足しない。しかしながら降雨の有効率が小さく、かなり多くの水分不足をきたすことが明らかである。また、宮古(石灰岩土地帯)では南風原(泥灰岩土地帯)に比べ、どの生育期間においても、降雨量が大きいかかわらずその有効率が小さく、不足水量が大きくなっている。これは前述したように、両地区の土壌および土層構造の違いに起因するものであると考える。つまり、泥灰岩土地帯に比べ、石灰岩土地帯においてはサトウキビは干バツ被害を受けやすいことを明らかにしている。

表5・4 サトウキビの水分消費に関する諸元(平年値)

地区名	項目 期間	降雨量	消費水量	有効雨量	有効率	不足水量
		mm	mm	mm	%	mm
宮古 (石灰岩土地帯)	全生育期間	3,600	1,476	950	26.39	482
	植付け翌年1月～12月	2,150	1,200	720	33.49	467
	植付け翌年7月～9月	590	442	230	38.98	249
南風原 (泥灰岩土地帯)	全生育期間	3,450	1,476	1,020	29.57	421
	植付け翌年1月～12月	2,100	1,200	770	36.67	408
	植付け翌年7月～9月	580	442	245	42.24	220

3) 平年における降雨の有効率は、サトウキビ植付け翌年の7月～9月(生育最盛期)に最大値を示すが、どの生育期間においても45%以下の小さい値となっている。

サトウキビの全生育期間、植付け翌年の1年間、翌年の7月～9月の各生育期間における降雨量とその有効率との間には、それぞれ負のコウ配を持つ直線関係があり、かなり高い相関が認められた。これらの関係直線のコウ配は、各生育期間ごとに異なり、とくに植付け翌年の7月～9月に大きな値を示している。したがって、ある期間の降雨量からその期間の有効雨量を概算する場合は、その期間の降雨量に対応する有効率を用いるべきで、有効率を一定に仮定することは好ましくない。

4) 平年的に考えるならば、夏植サトウキビにとって、土壌水分は植付け初年度には不足せず翌年不足し、その大半を翌年の7月～9月の生育最盛期で占めている。

5) 各生育期間における降雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との間にはあまり関係がない。南風原(泥灰岩土地帯)では、各生育期間における有効雨量および不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との間にも関係が認められなかった。このことは第IV章第2節と第I章第3節で述べたように、この土壌はきわめて不透水性の泥灰岩を基岩とし、一般に土層が厚く、深部の土層からサトウキビの有効根群域に土壌水分が補給されるためであると推察される。

宮古（石灰岩土地帯）では、これらの各生育期間における有効雨量および不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との間には、それぞれ正および負のコウ配を持つ直線関係があり、かなり高い相関が認められた。これらの関係直線のコウ配も、植付け翌年の7月～9月に大きい値を示している。

6) 不足水量の再現期間とサトウキビの干バツ被害率との関係を検討した結果、宮古（石灰岩土地帯）におけるサトウキビはほぼ2年に一度の割合で約20%の干バツ被害を受けていることが明らかとなった。

7) 以上、沖縄のサトウキビは泥灰岩土地帯においてはあまり干バツ被害を受けていないが、石灰岩土地帯においてはしばしば干バツ被害を受けていることが明らかである。ほとんど毎年起っている土壤水分欠乏によるサトウキビの減収と干バツ年における被害の解消を図るために、沖縄の石灰岩土地帯においてはカンガイが必要である。とくに、同地帯の夏植サトウキビに対する植付け翌年7月～9月（生育最盛期）におけるカンガイの重要性が明らかとなった。

8) 上記の結論は自然条件のみに着目して検討した結果得られたものである。今後、経済的な側面からも研究を試みる必要がある。

## は し が き

サトウキビは沖縄においては、基幹となる作物であるため、その土地生産性および労働生産性の向上が強く期待されている。しかしながら、サトウキビのカンガイを実施するに当っては、今日なお土壤水分の変動その他カンガイ工学上の基礎となる諸問題が明らかにされていない。著者はこれらの諸点に着目し、サトウキビ栽培を対象とした畑地カンガイの工学的な諸元の解明とカンガイ手法の確立を目的として本研究に着手した。以下に各章ごとの内容を掲げる。

第I章では沖縄におけるサトウキビの基幹作物としての重要性と立地条件からみた沖縄のサトウキビ栽培について検討した。第II章ではホ場におけるサトウキビの蒸発散量の時期的変化をモデル化し、月別平均日蒸発散量と気象要因との関係を論じた。第III章では沖縄の石灰岩土地帯におけるサトウキビの有効根群域とカンガイの上限值について調査解析した。また試験ホ場および現地ホ場での測定結果から、サトウキビに対するカンガイの下限值とその土壤水分消費型について述べた。さらに上記の結果と筆者らの既往の研究結果に基づき、石灰岩土地帯として宮古、泥灰岩土地帯として沖縄本島南部の南風原町を例にとり、両地帯におけるサトウキビに対する一回のカン水量についても検討した。第IV章では石灰岩土地帯におけるサトウキビの干バツ被害について調査解析した。また第II章および第III章の結果と降雨記録に基づき、石灰岩土地帯と泥灰岩土地帯における土壤水分とサトウキビの10アール当り収量との関係を調べ、カンガイの必要性について論じた。第V章では第I章～第IV章をとりまとめ、沖縄農業との関連について検討を試みた。その結果、沖縄におけるサトウキビ栽培に関する畑地カンガイの重要性を明らかにするとともに、カンガイ計画の基礎となる各要素の取り扱いについて新たな知見を得た。最後に、この研究結果の大部分は計画基準概定調査報告書沖縄畑地かんがい（案）<sup>45)</sup>に採用され、現在八重山石垣市の国営宮良川土地改良事業地区を始め数多くの土地改良事業地区で利用されている。

## 第I章 沖縄におけるサトウキビ栽培とその立地条件

### 第1節 概 説

サトウキビは熱帯地方のみならず、亜熱帯および温帯地方でも広く栽培されてきた。池原<sup>16)</sup>、岡出<sup>38)</sup>および永井<sup>32)</sup>によると、その栽培の起源はインドのガンジス、ブラマプトラ両河川の中下流域である

と推定されている。サトウキビの沖縄への渡来については定かな立証はないが、これは住民の生食用としてかなり以前から栽培されていたようである。

1623年には沖縄に初めて製糖法が渡来し、サトウキビが本格的に栽培されるようになった。以来、その作付面積は年ごとに増大し、1640年ごろにはサトウキビは主要な農作物となるに至った。しかし1693年に、主食用作物の確保その他社会的背景から、サトウキビ作付面積の制限令がしかれた。そのため1693年から1888年の195年間にわたり、サトウキビ栽培の制約がなされた<sup>16, 31)</sup>。その後沖縄糖業は基幹産業として積極的に推進され、1938～1939年期のサトウキビ生産高は戦前の最高値に達した。

第二次大戦中サトウキビの栽培は一時とだえたが、1947年ごろから栽培が再開され、再び基幹作物となるに至った。現在沖縄で最も多く栽培されているサトウキビ「N: Co, 310」は1951年に台湾から導入されたものである。この品種は1957年に「POJ 2725」および「H 44 - 3098」とともに奨励品種として決定され、沖縄全土に普及された。1959年の砂糖関税率の引上げおよび砂糖消費税引下げの措置によって、沖縄糖業は最高潮に達したものの、1963年に実施された砂糖貿易自由化の影響を受けてサトウキビの作付面積および収量ともにやや減少するに至った<sup>42, 56)</sup>。図1・1は戦前戦後におけるサトウキビの栽培状況を示すもので、上記の歴史をよく表わしている。図の戦前の数値は池原<sup>17)</sup>により、戦後のものは琉球政府<sup>55)</sup>および沖縄県農林水産部<sup>41, 42)</sup>の資料に基づいた。

戦前戦後における沖縄県の輸出総額に占める砂糖およびパインの輸出額の割合を同様の資料<sup>18, 39)</sup>に基づき作成して図1・2に示す。この図によると、沖縄の農業および経済において砂糖がいかに重要であるかがわかる。丸杉<sup>29)</sup>も沖縄経済におけるサトウキビ栽培の重要性について述べている。

以上のように、歴史的、社会的、経済的背景と農家経済を考慮して、サトウキビは今後も沖縄の基幹作物として重要な意味を持つものであると考える。参考までに日本および世界の砂糖の消費量の増加傾向を表1・1に示す<sup>63)</sup>。

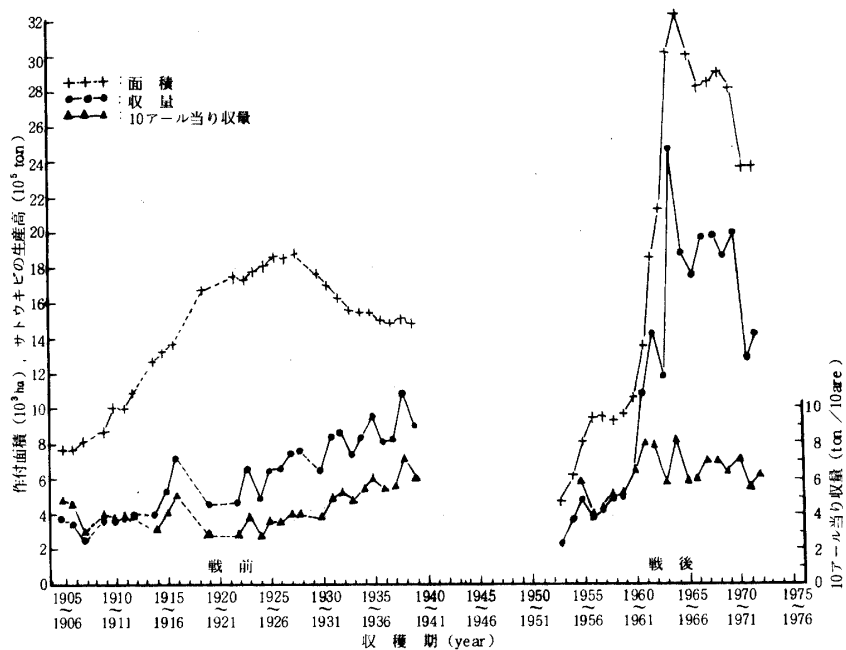


図1・1 サトウキビの生産実績

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

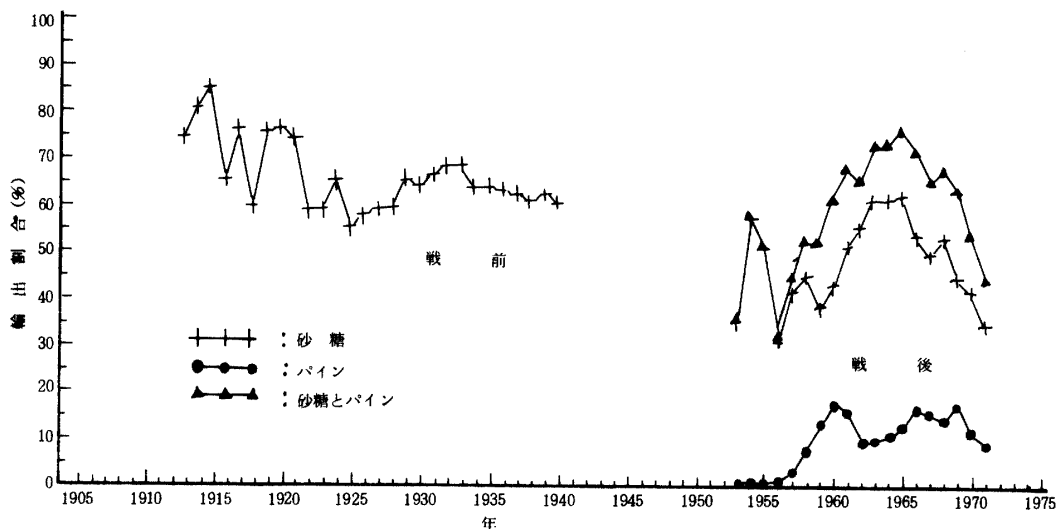


図1・2 沖縄の輸出総額に占める砂糖およびパインの輸出割合

表1・1 日本および世界の砂糖消費量(メートルトン)

年	日 本	世 界
1959	1,325,346	46,927,589
1960	1,412,890	49,298,638
1961	1,553,980	53,759,453
1962	1,602,270	53,799,389
1963	1,686,861	53,129,929
1964	1,666,965	55,654,128
1965	1,969,230	59,622,976
1966	2,063,962	61,125,848
1967	2,295,167	63,066,488
1968	2,408,256	66,291,794
1969	2,644,028	68,403,669
1970	3,028,594	72,092,758
1971	3,101,093	74,386,987
1972	3,248,843	76,003,561
1973	3,293,713	78,730,952
1974	3,336,060	80,132,015
1975	2,796,390	77,333,030
1976	3,181,989	81,977,382
1977	3,300,215	84,315,304
1978	2,886,618	86,183,833
1979	3,199,797	89,861,972
1980	2,981,623	87,620,835

## 第2節 サトウキビの立地条件

## 1 サトウキビと水分

Dillewijn<sup>75)</sup>は生産されたサトウキビの乾物に対し、これによって吸収された水分は約250倍である



としている。またサトウキビの根圧は1,800cm以上もあり、クチクラ蒸散が大きいと指摘している。田先ら<sup>21)</sup>によると、一般に根圧は1気圧(1,034cm)以上になることは少なく、ミズキの根圧は540cm~680cmとなっている。

作物の生育期間中の全蒸散量を作物の全乾物重量で割った値は蒸散係数であると定義されているが、これはほぼ200~600である<sup>19)</sup>。Dillewijn<sup>75)</sup>によるとサトウキビの蒸散係数は約250であり、他の作物に比べそれほど大きな値とは言えない。著者らが1976年12月に糸満市喜屋武の石灰岩土地帯で調査した結果によると、同地帯における収穫時の夏植えサトウキビの10アール当り乾物重量は約3tonである。その結果と上記の蒸散係数を用いて蒸散量を計算すると750m<sup>3</sup>/10a(750mm)となり、蒸散量そのものはかなり大きな値となる。

第Ⅲ章で述べるように、著者らは土壌水分とサトウキビの生育状況との関係について試験研究を行った。その結果、サトウキビの蒸発散量、葉温、光合成速度、乾物重量および含水率は土壌水分によって大きく影響されることが明らかとなった。サトウキビの生育は後述する気温の他土壌温度によっても大きく影響される。八幡<sup>77)</sup>によると、土壌の熱伝導率は乾燥土壌の場合にはその間ゲキ率によって、湿潤土壌ではさらにその含水率によってかなり変動する。つまり土壌温度は土壌水分状態によって変る。この土壌温度の調節のためにも十分な水分管理が必要である。したがって、サトウキビの栽培に当っては、土壌水分を適切に調節しその生理機能を十分発揮させることに留意しなければならないことが重要事項である。

したがって、降雨の絶対量が小さい場合、またはその量が十分な場合でも降雨の時期的分布に偏りがある地方においては、生産性をさらに高めるためにサトウキビに対してはカンガイ問題を勘案することが必要となる。

## 2 サトウキビの立地条件

一般に作物の蒸発散量および土壌水分は気象条件および気象状態によって支配される。したがって作物の生育、成熟および品質はその栽培地域の気候・気象に大きく影響される。このため、品種の選定に当っては、その品種生態と気候・気象との対応を考慮しなければならない。一般に、サトウキビの栽培適温は年平均気温で20℃~30℃、最適気温は24℃~25℃の範囲であり、年平均気温17℃~18℃の地方においてもその栽培は可能ではある。また、サトウキビは約1,500mm~2,000mmの年平均降雨量を必要とし、降雨量の大部分が生育最盛期に集中し、成熟期および収穫期の降雨量は少ない方が好ましい。その他サトウキビ栽培では湿度および日射量などの気象要因によっても影響される。

なお、サトウキビは土壌のPH値が6.1~7.7において正常な生長をする。土壌のPH値が酸側に傾く方がアルカリ側に傾く時より害は大きく影響されることが知られている。

## 第3節 サトウキビに対する畑地カンガイ

### 1 サトウキビに対するカンガイの重要性

沖縄の月平均気温、年平均気温、月平均降雨量および年平均降雨量を表1・2に示し、一例として那覇の月平均気温と月平均降雨量の分布を図1・3に示す。表1・2によると、那覇、平良および石垣の年平均気温は22.1℃、23.2℃、23.6℃で、年平均降雨量はそれぞれ2,177mm、2,337mm、2,197mmである。したがって、沖縄は気温の面からはサトウキビの栽培適地であると言えるし、沖縄の年平均降雨量の絶対量はサトウキビ栽培に必要な降雨量として十分である。しかし、沖縄におけるサトウキビ栽培で最も多量の水分を必要とする夏期には降雨量が多いにもかかわらず、その実態はむしろしばしば水分不足をきたし、サトウキビ栽培の大きな障害となっている。これは図1・3に示すように、夏期の降雨の大部分が5月~6月の梅雨と8月~9月の台風による集中的な降雨によるもので、土層が浅く地中で

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

の保蔵能力が少なく降雨の大部分が表面流出水となり、有効雨量としては極めて少ないためである。

一方、沖縄における農地の土壌は、沖縄総合事務局<sup>44)</sup>によると、島尻マーチ土壌（重植土）、国頭マーチ土壌（重植土）、ジャーガル土壌（重植土）および沖積土壌（軽植土）に大別される。図1・4に沖縄の主な土壌分布を示し、表1・3にその物理性を例示する。さらにこれらの土壌の3相分布を図1・5に示す。以下これらの図表に基づき、各種土壌の分布および土性について述べ、サトウキビ栽培の面から検討する。ここに、表1・3は上記4種類の土壌を1例ずつあげ、その物理性を比較検討したものである。後述するように、沖縄におけるサトウキビに対するカンガイの上限値および下限値としては、それぞれpF 1.9、pF 3.8に対応する土壌水分が適当であると考えられる。また従来、畑地カンガイの下限値としてpF 3.0に対応する土壌水分が用いられている。したがって、これら4種類の土壌の固相率とpF 1.9、pF 3.0およびpF 3.8に対応する液相率と気相率を求めて比較検討した。

表1・2 沖縄の月平均気温、年平均気温、月平均降雨量および年平均降雨量

項目	地区名	月												年
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
月平均 気温	那覇市	16.1	16.5	17.9	20.4	23.4	25.9	27.9	27.4	26.7	24.1	21.2	18.1	22.1
	平良市	17.7	18.0	19.6	21.8	24.8	26.7	28.1	27.6	27.1	24.7	22.3	19.4	23.2
	石垣市	17.9	18.4	19.9	22.4	25.4	27.5	28.8	28.3	27.5	24.9	22.4	19.6	23.6
	平均	17.2	17.6	19.1	21.5	24.5	26.7	28.3	27.8	27.1	24.6	22.0	19.0	23.0
月平均 降雨量	那覇市	126	131	155	158	236	310	192	275	157	157	153	127	2,177
	平良市	147	152	137	178	247	298	219	269	166	184	174	166	2,337
	石垣市	140	118	157	170	240	230	174	215	233	171	197	152	2,197
	平均	138	134	150	169	241	279	195	253	185	171	175	148	2,237

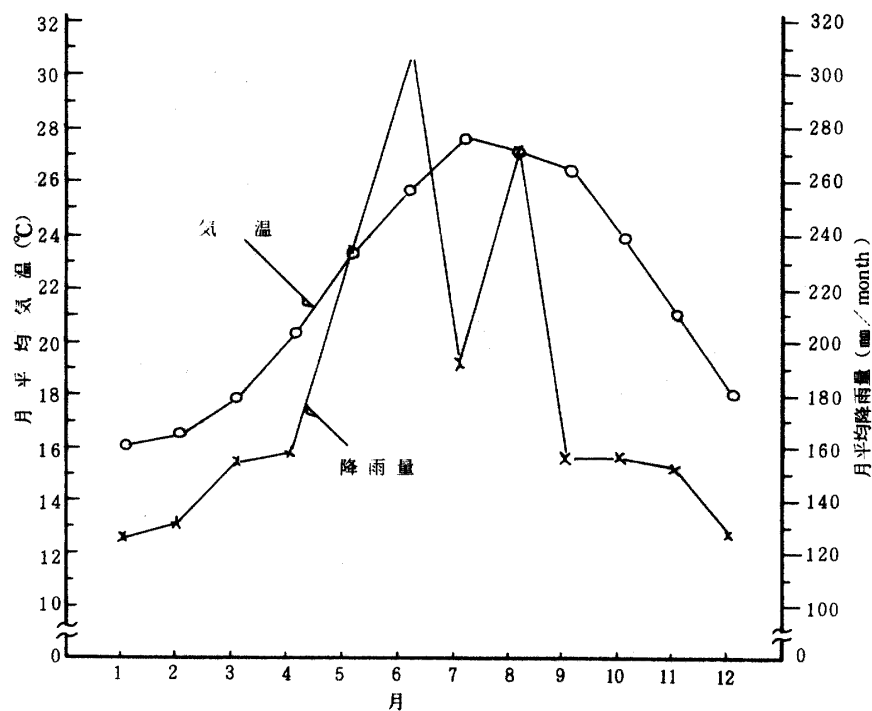


図1・3 月平均気温および月平均降雨量（那覇）

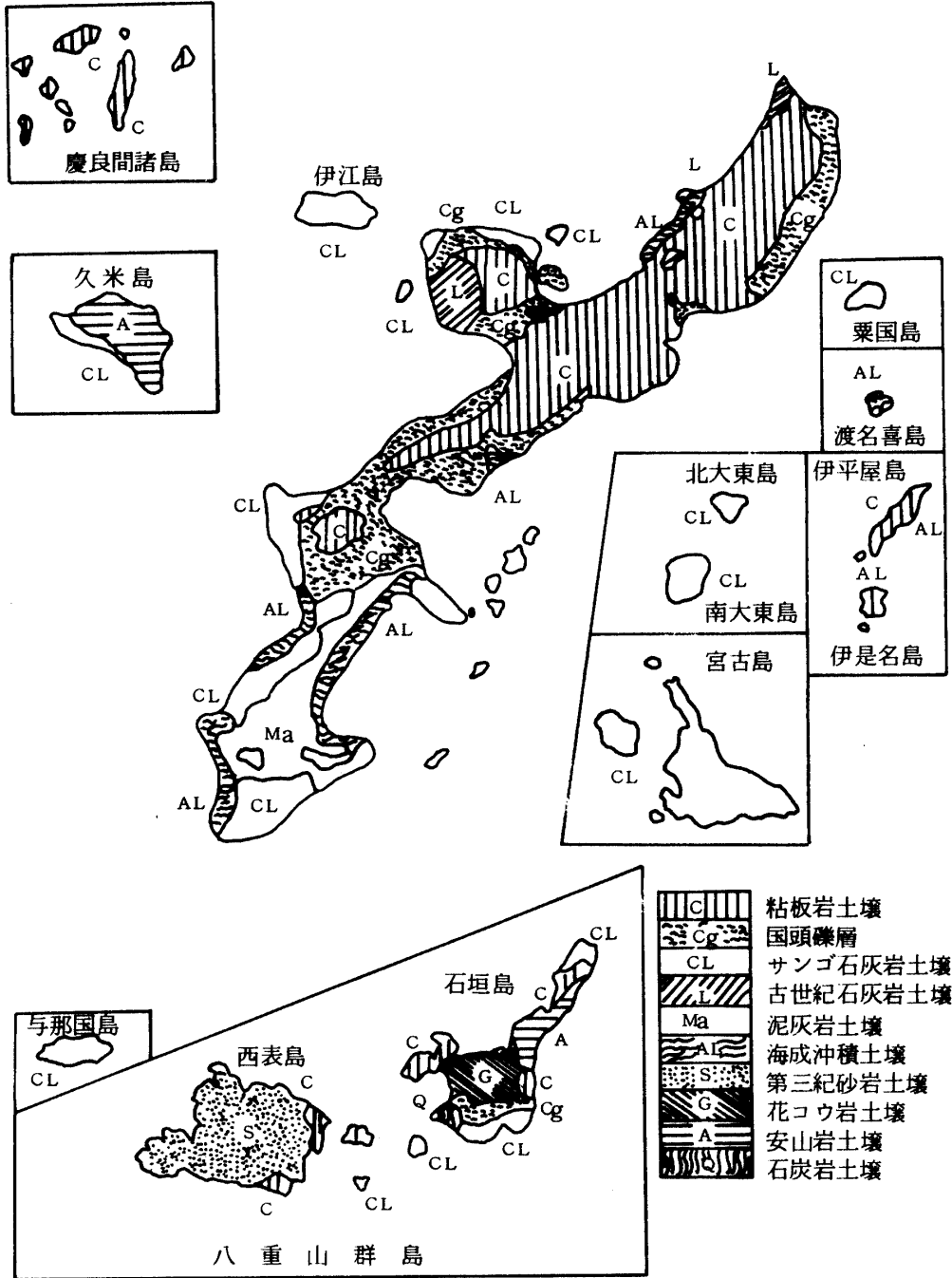


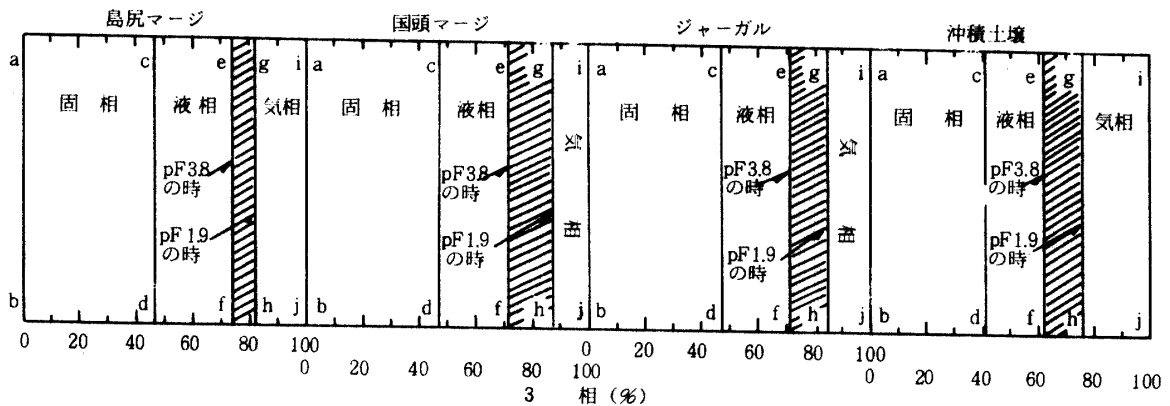
図1・4 沖縄の土壤分布 (縮尺1:750,000)

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表 1・3 沖縄の農地における主な土壌の物理性 (例)

土 壤 名	調 査 地 区	粘 土 含有率 %	シルト 含有率 %	細 砂 含有率 %	粗 砂 含有率 %	土 性 類	真比重	仮比重	固相率	pF 1.9		pF 3.0		pF 3.8	
										液相率 %	気相率 %	液相率 %	気相率 %	液相率 %	気相率 %
島尻マーヅ	糸満市	48	42	9	1	重植土	2.72	1.29	47.4	35.0	17.6	30.9	21.7	26.4	26.2
国頭マーヅ	石川市	57	30	11	2	重植土	2.79	1.30	46.6	40.2	13.2	33.3	20.1	24.8	28.6
ジャーガル	南風原町	47	46	6	1	重植土	2.76	1.28	46.4	38.2	15.4	32.5	21.1	25.2	28.4
沖積土壌	中城村	30	22	13	35	軽植土	2.78	1.14	41.0	34.5	24.5	27.8	31.2	20.9	38.1

注：国際法によって粒土分積を行なった。



addc: 固相                      dhgc: pF 1.9における液相                      hjig: pF 1.9における気相  
 dfec: pF 3.8における液相                      fjie: pF 3.8における気相                      fhge: 利川可能水分

図 1・5 各土層の 3相分布 (表層)

島尻マーヅ土壌は沖縄本島中南部と北部の本部半島、宮古諸島、八重山諸島、南北両大東島、伊江島、久米島などに広く分布している黄褐色で弱酸性ないし中性のサンゴ石灰岩土壌である。その基岩は極めて多孔質な石灰岩で、一般に表土は浅く、場所によっては基岩が地表に露頭している。表 1・3 によると、島尻マーヅ土壌、国頭マーヅ土壌およびジャーガル土壌はいずれも重植土で、土壌の粒径組成、真比重、仮比重および固相率がほぼ同じ値となっている。しかしながら、図 1・5 で明らかのように、島尻マーヅ土壌の場合、国頭マーヅ土壌およびジャーガル土壌に比べ、pF 1.9 に対応する液相率が小さく、pF 3.8 に対応する液相率が大きくなっている。すなわちカンガイの上限値と下限値の差 (利用可能水分量) が小さいことがわかる。なお、上記の理由で基岩の状態および土層深度などを考慮すると、有効根群域より下部の土層からの水分補給はあまり期待できない。この土地帯には一般にサトウキビが栽培されているが、これはしばしば干バツ被害を受けているのが実状であることが以上の理由で理解できる。

国頭マーヅ土壌は鮮赤色ないし黄色を呈する強酸性の国頭礫層土壌と赤褐色ないし黄褐色を呈する酸性の粘板岩土壌とに分けられる。この土壌は本島中北部、石垣島、伊平屋島、伊是名島、慶良間諸島に分布するが、酸性であるため、主にパインが栽培されている。この土壌は国頭礫層または粘板岩を基岩とし、一般に表土が深い。また図 1・5 に示すように利用可能水分量も大きい。したがって、この土地帯においては作物の干バツ被害は少ない。しかし、この土壌は一般に細砂を多く含み急傾斜地を形成

しているため、土砂流亡を起しやすく、土壤保全が大きな問題となっている。

ジャーガル土壤は本島中南部に分布する泥灰岩土壤で、灰色を帯びた弱アルカリ性の土壤である。この土壤は極めて不透水性の強い泥灰岩を基岩とし、一般に土層が深く、利用可能水分量が大きい。この土壤地帯には一般にサトウキビが栽培されているが、この土壤地帯ではほとんど干バツ被害を受けることなく、むしろ排水が大きな問題となっている。

沖積土壤は、本島中南部の海岸地帯に分布する海成沖積土壤と河川の河口部周辺に分布する河口沖積土壤とに分けられる。この土壤は表1・3に示すように、粘土分は少ないが粒子の配合がよく、利用可能水分量も大である。ただし、一般に平坦な地形をなし、地下水位が高く、排水不良地帯となっている。この土壤地帯には主に水稲とサトウキビが栽培されている。

現在沖縄でサトウキビが最も多く栽培されているのは石灰岩土壤地帯で、泥灰岩土壤地帯がこれについている。しかしながら、この石灰岩土壤地帯においては、前述のように、サトウキビは干バツ被害を受けやすい。この事から著者は石灰岩土壤と泥灰岩土壤について吸水試験および乾燥試験を行った。また、吸引法によってこれらの土壤の最大毛管高の測定を行った。試験方法と結果を図1・7～図1・14と表1・4および表1・5に示す。図1・6は上記の試験における土壤の仮比重をできるだけ現地のものに近似させる目的で、著者が沖縄本島南部の石灰岩土壤地帯の表層土について調査した仮比重の度数分布を示すものである。

図1・7は最大毛管高を測定している状況を示すものである。直径3.3cm、高さ4cmのグーチルツボに石灰岩土壤および泥灰岩土壤を図1・6に基づき仮比重が1.1になるように詰め、この吸引装置にセットしてインダクションモータアスピレータ(図の後方のボックス)で吸引し、水銀マンオメータ(図の右手前)で吸引圧を測定した。すなわち、吸引圧を徐々に増大させ毛管水が切れ吸引圧が急減する直前の値を読み取り、この吸引圧から最大毛管高を求めた。表1・4にその結果を示す。

吸水試験では、図1・8に示すように、直径14.5cm、高さ100cmの亚克力円筒に深さ5cm間隔でガラスブロックを組立てた装置を用いた。この円筒に図1・6に基づいて仮比重が1.1になるように供試土壤を詰め、ガラスブロックを土中に埋設して吸水させ、電気抵抗法によって土壤水分動態を調べた。

図1・9は乾燥試験の状況を示すもので、直径14.5cm、高さ50cmの亚克力円筒に吸水試験の場合と同じように供試土壤を詰め、土壤表面から5cm、15cm、25cm、35cm、45cmの深さにガラスブロックを埋設した。この試料に十分吸水させ、ビニールハウス内で土壤を乾燥させ、電気抵抗法によって各土層の土壤含水比の変動を調べた。

表1・4によると石灰岩土壤の最大毛管高は約80cm、泥灰岩土壤の最大毛管高は約430cmで泥灰岩土壤の値ははるかに大きい。図1・10および図1・11はそれぞれ吸水開始後初期と全試験期間における毛管移動状況を示すものである。これらの結果に基づき、各毛管高に対する毛管速度を求め、その値と土壤の間ゲキ率によって毛管補給水量を求めて表1・5と図1・12および図1・13に示した。これらの図表によると、石灰岩土壤においては泥灰岩土壤に比べ、初期の毛管速度および毛管補給水量は特に大きい。毛管高に対するこれらの値の減少率も大きい。そのため毛管高40cmにおいては、泥灰岩土壤の毛管速度および毛管補給水量がそれぞれ8mm/day、5mm/dayとなっているのに対し、石灰岩土壤の値は7mm/day、4mm/dayとなり、泥灰岩土壤の値より小さくなっている。給水試験で最後に測定した毛管高は、石灰岩土壤で60cm、泥灰岩土壤で75cmである。表1・4における最大毛管高をHcmとすると、これらの毛管高は石灰岩土壤で約 $\frac{2}{3}H$ の値に位置し、泥灰岩土壤では $0 \sim \frac{1}{3}H$ の範囲に属している。表1・5によるとこれらの毛管高より高い毛管高における毛管補給水量は1mm/day未満であり問題とならないが、石灰岩土壤では50cm、泥灰岩土壤では60cm程度まで約2mm/dayの水分補給が可能であることがわかる。しかし、石灰岩土壤地帯では、一般に土層が浅く基岩が極めて多孔質な石灰岩からなっているため、このような深さにおける地下水位は期待できない。

図1・14は石灰岩土壤と泥灰岩土壤の乾燥過程における土壤水分動態を示すものである。これらの図

で明らかなように、土壌が乾燥する場合、石灰岩土壌では表層の土壌が急激に乾燥し、内部土層では含水比が徐々に低下する。すなわち下層土から表層土への水分移動が行われにくいことを示している。一方泥灰岩土壌では、全土層の土壌水分が一体となって変動しており、各土層間の土壌水分移動が容易であることを示唆している。つまり、石灰岩土壌では下層土からの水分供給量が少なく作物は干バツ被害を受けやすいが、泥灰岩土壌では下層土からの水分供給量が多く作物は干バツ被害を受けにくいことが推察される。また、このことから作物の消費水量の検討に際しても石灰岩土壌地帯においては従来の土壌水分減少法を採用してもよいが、泥灰岩土壌地帯での場合には有効土層より下の土層からの水分供給を考慮すべきであると考えられる。

以上のような気象条件と土壌条件から、沖縄におけるサトウキビ栽培においては畑地カンガイが重要な意味を持ち、生産性向上に有効な手法となることが期待される。本研究では、主として石灰岩土壌地帯についてカンガイの工学的な諸元の解明を試み、泥灰岩土壌地帯についても比較検討を行った。

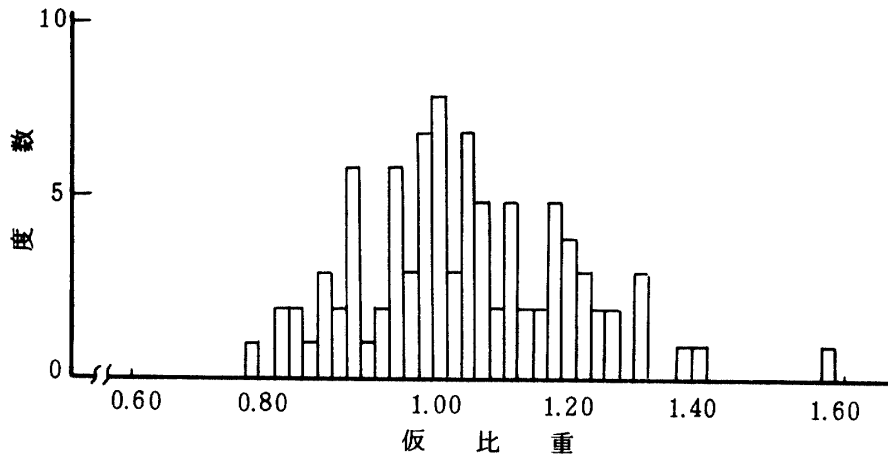


図1・6 土壌の假比重大の度数分布 (石灰岩土壌)

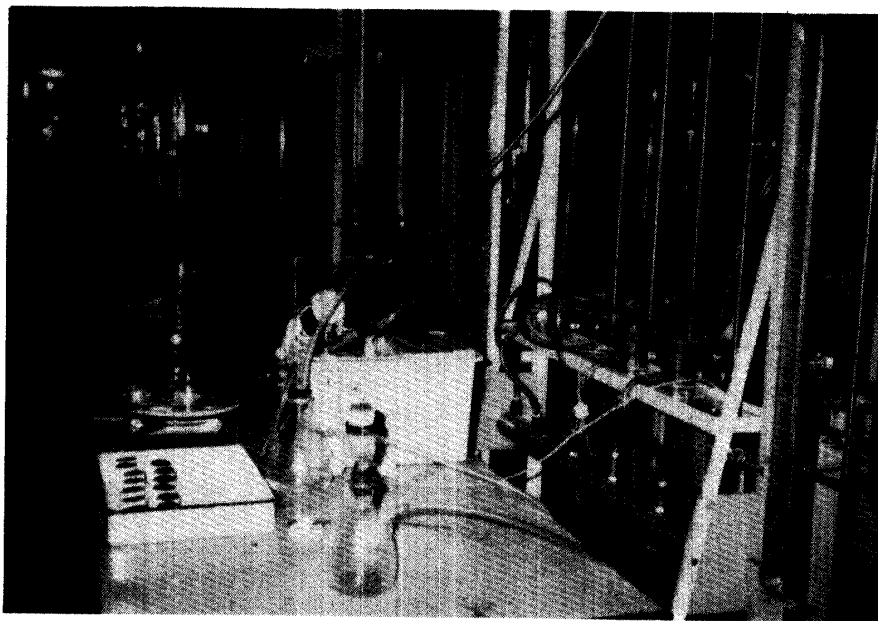


図1・7 土壌の最大毛管高に関する試験

表1・4 土壤の最大毛管高

項目 No.	石灰岩土壤		泥灰岩土壤	
	水銀柱(cm)	水柱(cm)	水銀柱(cm)	水柱(cm)
1	5.2	70.7	30.8	418.9
2	5.0	68.0	31.4	427.0
3	6.2	84.3	32.2	437.9
4	6.6	89.8	31.6	429.8
5	6.6	89.8	30.4	413.4
6	5.8	78.9	32.4	440.6
平均	5.9	80.3	31.5	427.9



図1・8 土壤の給水試験

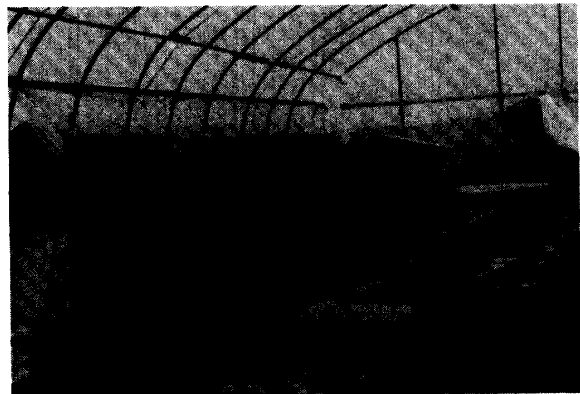


図1・9 土壤の乾燥試験

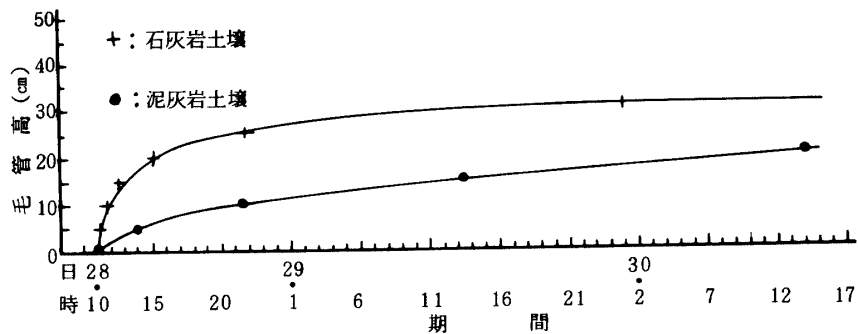


図1・10 吸水過程における土壤水分動態 (給水開始後初期)

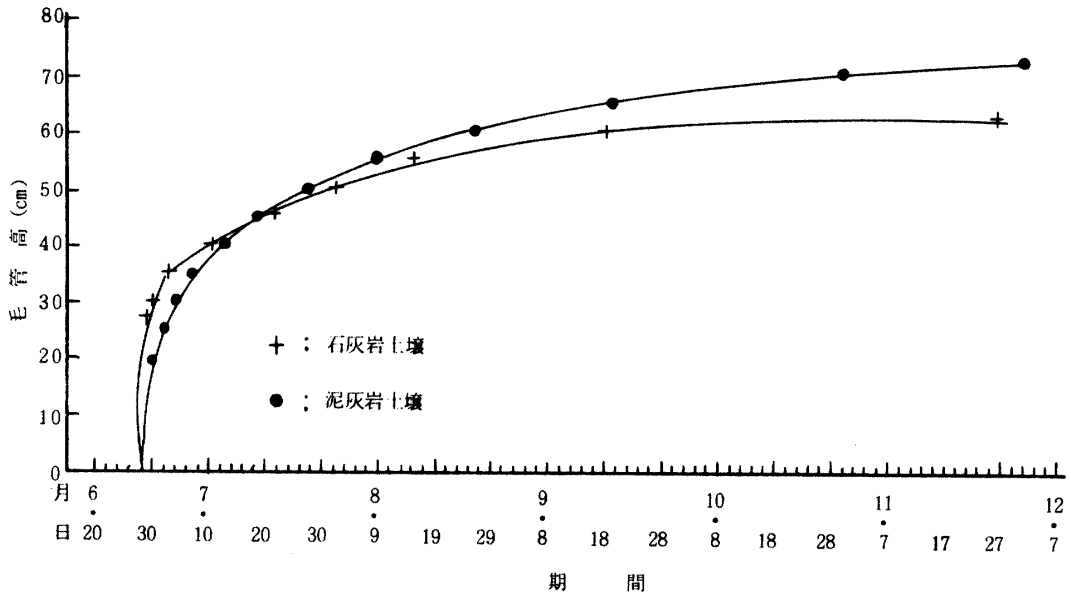


図1・11 吸水過程における土壌水分動態（全試験期間）

表1・5 毛管高と毛管補給水量との関係

項 目 毛管高 (cm)	石灰岩土壤（真比重 2.72, 仮比重 1.1, 間ゲキ率 0.596）		泥灰岩土壤（真比重 2.76, 仮比重 1.1, 間ゲキ率 0.601）	
	毛管速度 (mm/day)	毛管補給水量 (mm/day)	毛管速度 (mm/day)	毛管補給水量 (mm/day)
5	4,480	2,627	214	129
10	1,327	791	100	60
15	665	396	64	38
20	404	241	47	28
25	275	164	23	14
30	27	16	15	9
35	13	8	11	7
40	7	4	8	5
45	4	2	6	4
50	3	2	5	3
55	2	1	4	2
60	1	1	3	2



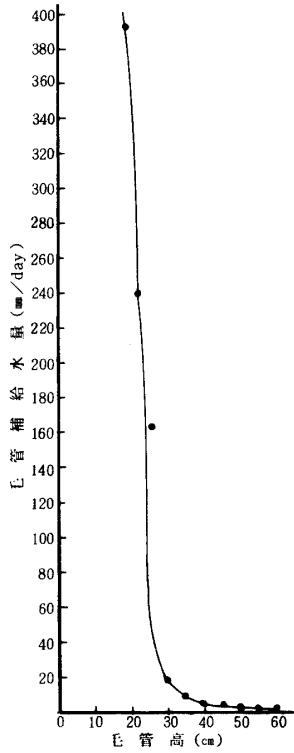


図1・12 毛管高と毛管補給水量との関係(石灰岩土壤)

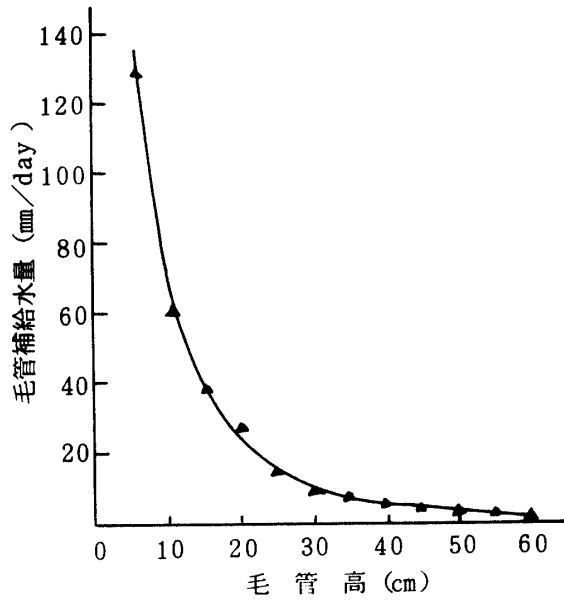


図1・13 毛管高と毛管補給水量との関係(泥灰岩土壤)

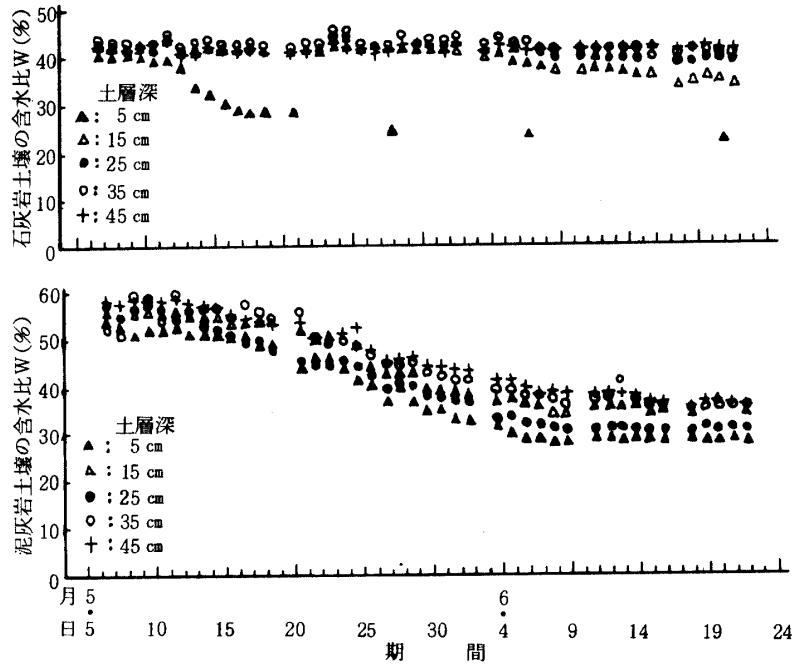


図1・14 乾燥過程における土壤水分動態

## 2 畑地カンガイの概況

沖縄のサトウキビに対するカンガイ試験は、沖縄県糖業改良事務局において、すでに1912年ごろには着手されていた。その後、沖縄県立農事試験場、琉球農業研究指導所および琉球農業試験場において、主に作物栽培の面から研究が続行されている<sup>25, 27, 54, 57, 58, 59</sup>。

一方、わが国における畑地カンガイの研究は数多く行われているが、このうちサトウキビに関するものは極めて少ない。サトウキビに関する農業土木的研究には田辺および伊郷<sup>66)</sup>の研究がある。この研究は1947年に宮崎県で行われたサトウキビに対するカンガイ試験に基づくものである。この研究によると、カンガイの効果は気象要因とくに降雨量に大きく影響され、この実験年次には7月～9月のサトウキビの生育最盛期に大きなカンガイ効果がみられたが、これは8月と9月における干バツに対する補助カンガイの効果の現われであると指摘されている。台湾のサトウキビに対するカンガイについては玉井<sup>61)</sup>の研究がある。この研究によると、サトウキビの吸水量はその地上部の作がらの大きさによって支配され、サトウキビは植付け翌年の7月～9月の3ヶ月間に全消費水量の50%の水量を消費することが指摘されている。さらに、サトウキビの根の吸水量は気象要因とくに日射量と深い関係があり、吸水量と気温および蒸発計蒸発量との間にも大きな相関係数が認められている。

サトウキビ以外の他作物の蒸散量に関する研究としてはBriggs and Shantz<sup>4, 5, 6)</sup>内藤<sup>34)</sup>などの研究がある。これらの研究によると、作物の蒸散量は気温、日射量、湿度などの気象要因および作物の生育状況によって影響される。種田<sup>72, 73)</sup>は実験的解析に基づき、作物の蒸通発量と気温との関係がベキ曲線で示されることを明らかにした。田辺および野村<sup>68, 69)</sup>は作物の蒸発散量の時期的変化をモデル化している。その他容水量に関する研究<sup>11, 12)</sup>、土壌面蒸発に関する研究<sup>22, 47)</sup>、カンガイ方法に関する研究<sup>8, 33)</sup>など数多くある。

しかし気候、土壌および作物が他府県と異なる沖縄においては、それらの結果に基づきカンガイ計画を立てるには困難が伴い不合理な場合が多く生ずる。したがって前述のように、沖縄におけるサトウキビの栽培においてその有効根群域、カンガイする場合の有効土壌水分の上限値と下限値および消費水量、水分消費型などの基礎的な研究を行い、組織的なカンガイ計画の諸元を確立することが望まれている。また不足水量の生起確率の推定を行う必要がある。

## 第II章 サトウキビの蒸発散量

### 第1節 概 説

作物の蒸発散量は畑地カンガイ計画を立てるに当って、重要な要素の一つである。カンガイまたは降雨によって土壤中に保留された有効水分は、晴天が続くと次第に減少していく。実験室内ではこの消費される水分量から蒸散量を分離して測定することが可能であるが、ホ場でこれを分離して測定することは困難を伴う場合が多い。しかし、カンガイ工学の側面からは、土壌面蒸発量と作物の蒸散量とを分離して測定するよりは、むしろこれらを合わせて取り扱う方法がカンガイ計画上実用的価値が大きいと考えられる。

ホ場におけるサトウキビの蒸発散量は気温、日射量などの気象要因、作物の生育状況および土壌水分などによって支配されるものであり、作物の蒸発散量と蒸発計蒸発量との間にも高い相関がある<sup>19)</sup>。

著者は1966年から、琉球大学農学部附属農場で夏植サトウキビの蒸発散量を測定した。その測定結果に基づき、サトウキビの蒸発散量の期別変化をモデル化して、月別平均日蒸発散量と気象要因との関係を検討し、沖縄におけるサトウキビの月別平均日蒸発散量を推定する方法を確立することが本章の目的である。

## 第2節 ホ場におけるサトウキビの蒸発散量

## 1 蒸発散量の測定方法および結果

玉井<sup>61)</sup>の研究によると根の吸水は当然のことながら、地上空間の気象的变化に著しく影響されることが指摘されている。しかし、著者は改めてサトウキビの蒸発散量を図2・1および図2・2に示すように、琉球大学農学部附属農場のホ場内に埋設したライシメータによって測定した。夏植サトウキビは通常ウネ間1.2 m, 株間0.3 mの間隔で植え付けを行っている。したがって、ホ場内に埋設したライシメータの面積は、沖縄における慣行法に従って、3株のサトウキビを植え付けることを前提として1.2 m × 0.9 mとした。このライシメータを設置したホ場に、サトウキビ「N:C<sub>o</sub>, 310」を図2・1に示すようにウネ間1.2 m, 株間0.3 mで栽培した。測定装置の構造はサトウキビを植え付けるライシメータと測定室からなり、両者は硬質塩化ビニールパイプによって連結されている。ライシメータは図2・3に示すように、不透水性コンクリートタンクに粟石、碎石および砂でフィルタ部分を設けたものである。供試土壌としては、沖縄でサトウキビが最も干バツ被害を受けている石灰岩土壌(島尻マージ土壌)を使用した。すなわち、1号ライシメータに糸満市米須、2号および3号ライシメータには具志川市地荒原の石灰岩土壌を入れてサトウキビを栽培した。第Ⅲ章で述べるように、沖縄の石灰岩土壌地帯のホ場におけるサトウキビの有効根群域はほとんど地表から60cm以内である。それゆえ、ライシメータの土層の厚さを60cmとした。試験中での土壌水分については、石膏ブロック法によってモニタリングした。実験番号とそれに関連する測定期間および使用ライシメータを表2・1に示す。実験4 (1969年8月～1971年2月)のライシメータにおけるサトウキビの生育状況は図2・5に示す通りで、その収量はライシメータ1基(1.08 m<sup>2</sup>)当り10.60 kg (9.81 ton / 10 a)であった。また、ホ場におけるサトウキビの10アール当り収量は10.24 tonで、ライシメータ内におけるそれとの間に大差は認められなかった。琉球政府農林局<sup>55)</sup>によると、1970/1971年収穫期のサトウキビの平均収量は沖縄本島南部10.01 (ton / 10 a), 宮古本島7.23 (ton / 10 a), 全琉で7.87 (ton / 10 a)である。したがって、実験4におけるサトウキビの10アール当り収量は全琉平均値よりは大きく、沖縄本島南部の平均値にほぼ等しい。他の実験年次においてもほぼ同じようなサトウキビの生育状況が認められた。なお、全琉平均値が小さい値となっているのは、土壌水分欠乏による被害が大きい、低生産性の石灰岩土壌地帯におけるサトウキビの収量がかかなり大きな割合を占めるためである。

一般に、ライシメータにおける水収支は次式で示される。

$$P + I_{ir} = ET + M + G \dots\dots\dots (2 \cdot 1)$$

ここで

- P : 降雨量
- I<sub>ir</sub> : カン水量
- ET : 蒸発散量
- M : 土壌保有水量
- G : ライシメータからの流出量

である。以上の各項は水柱(mm)で示される。まとめる時のライシメータ内の残留水が一定ならばMを消去して考えることができる。したがって上式は(2・2)式となる。

$$ET = P + I_{ir} - G \dots\dots\dots (2 \cdot 2)$$

$$\Sigma ET = \Sigma (P + I_{ir}) - \Sigma G \dots\dots\dots (2 \cdot 3)$$

このΣETが累積蒸発散量であり、累積流入量と累積流出量を用いて(2・3)式で計算することができる。ただし、この関係は前述のようにライシメータ内の残留水が一定であるという条件下で成立する。ここでは、ライシメータからの水の流出が止った時限での土壌水分はほぼこの条件を満たすものとしてまとめ、その結果を表2・2・1～表2・2・6に示した。ライシメータにおける水の流入量および流

出量を次の方法で測定した。

Ⅰ ライシメータへの水の流入量の測定

ライシメータへの水の流入量は降雨量とカン水量である。毎日午前9時に測定した降雨量を前日の降雨量とした。カン水量を土壤の乾燥度合およびホ場容水量からあらかじめ何mmと定め、カン水を行った。第Ⅲ章第2節で述べるように、著者<sup>87)</sup>はポット試験によってサトウキビのシオレ点について試験研究を行った。その結果、石灰岩土壤（島尻マーチ土壤）においては土壤含水比が約0.2になると、サトウキビは初期シオレ現象を起こすことを明らかにした。したがって、各土層中、いずれかの層の土壤含水比が約0.2になった場合をカン水の時期とした。

Ⅱ ライシメータからの水の流出量

流入量と同様、毎日午前9時に測定したライシメータからの水の流出量を前日の流出量とした。

上記の方法で測定した結果に基づき(2・3)式で累積蒸発散量を求め、各実験年次ごとにまとめて表2・2・1～表2・2・6に示す。

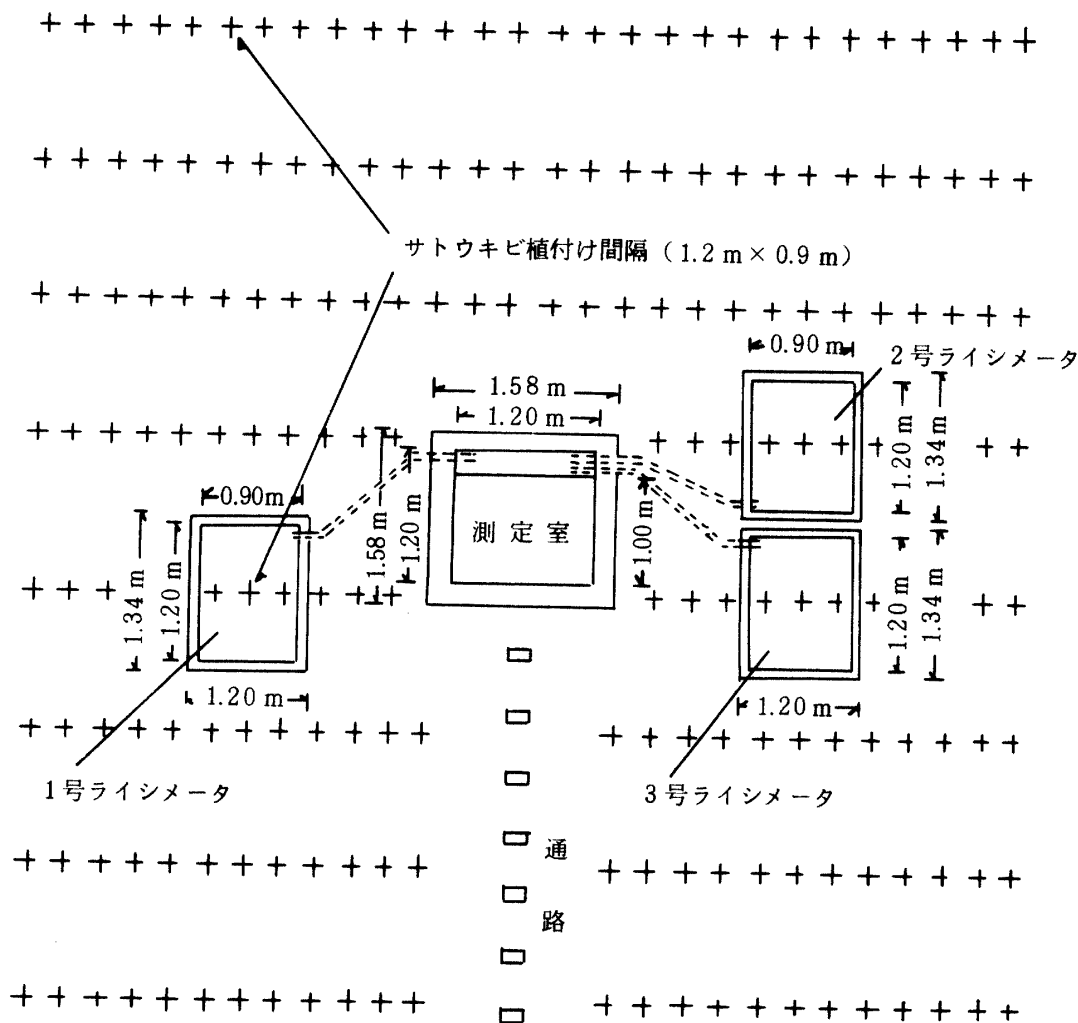


図2・1 蒸発散量測定装置

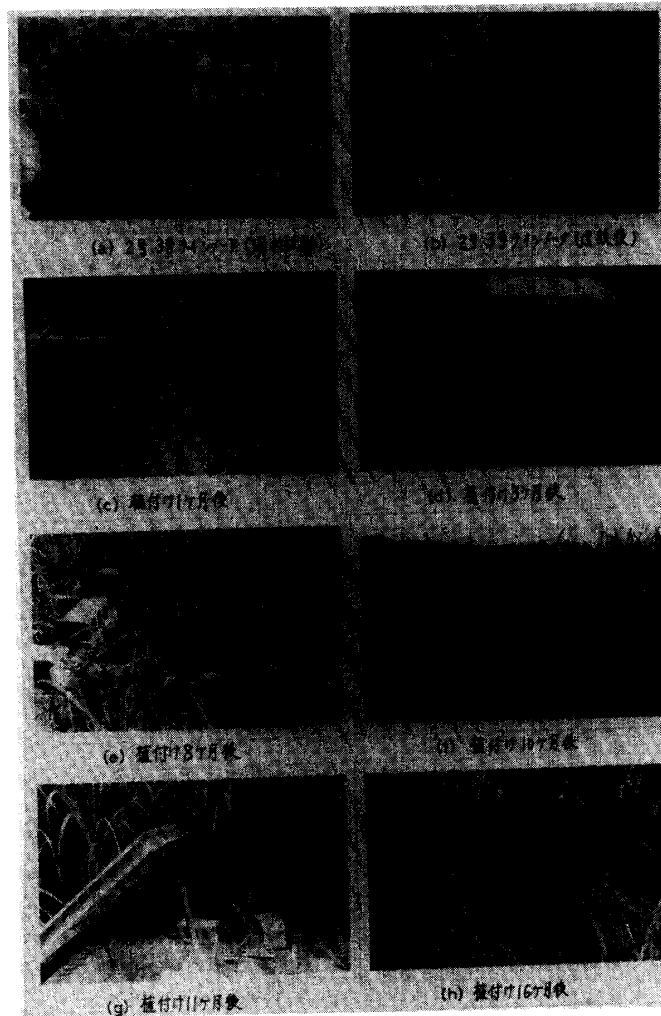


図2・2 ライシメータとサトウキビの生育過程

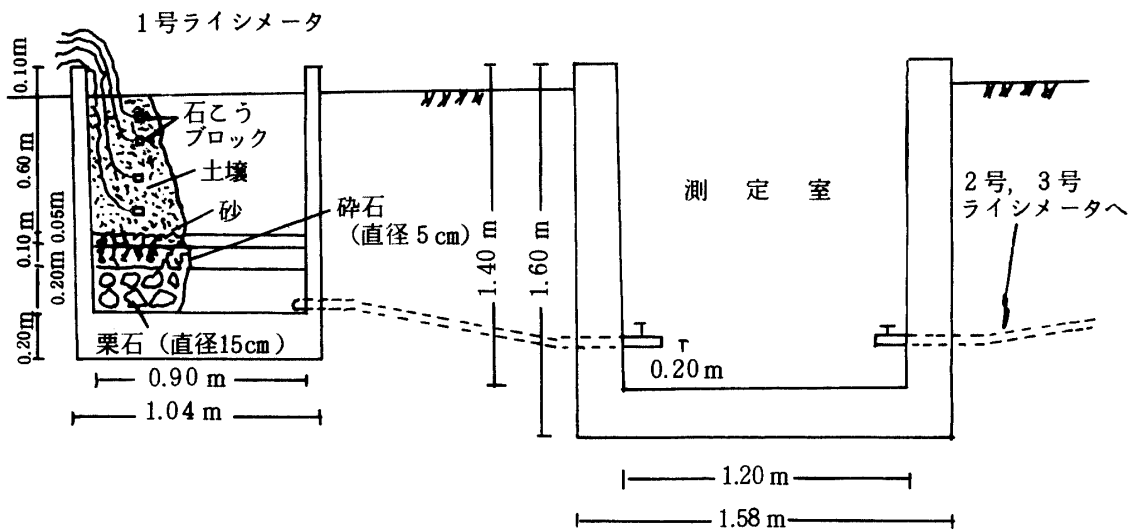


図2・3 ライシメータの断面図

表2・1 実験仕様

実験番号	試料名	ライシメータ番号	測定期間	解析期間
1	Y <sub>1</sub>	1	1966年11月～1968年2月	1967年1月～1968年2月
2	Y <sub>2</sub>	2,3	1967年9月～1969年2月	1968年1月～1969年2月
3	Y <sub>3</sub>	1	1968年9月～1970年4月	1969年1月～1970年2月
4	Y <sub>4</sub>	2,3	1969年8月～1971年2月	1970年1月～1971年2月

表2・2・1 水収支とライシメータにおける累積蒸発散量 (実験1,1号ライシメータ)

期日	日数	降雨量 mm	累積降雨量 mm	カン水量 mm	累積カン水量 mm	流出量 mm	累積流出量 mm	累積蒸発散量 mm
1966								
11. 22								
12. 5	13	60.9	60.9	40.0	40.0	66.3	66.3	34.6
1967								
1. 20	46	361.0	421.9		40.0	276.3	342.6	119.3
3. 6	45	144.0	565.9		40.0	20.6	363.2	242.7
4. 27	52	144.9	710.8		40.0	7.7	370.9	379.9
5. 8	11	76.4	787.2		40.0	39.7	410.6	416.6
5. 25	17	103.5	890.7		40.0	42.5	453.1	477.6
6. 13	19	403.0	1,293.3		40.0	309.2	762.3	571.4
6. 25	12	165.4	1,459.1		40.0	133.2	895.5	603.6
7. 11	16	12.8	1,471.9	110.0	150.0	0.2	895.7	726.2
7. 23	22	70.9	1,542.8		150.0	1.2	896.9	795.9
8. 13	21	80.4	1,623.2	60.0	210.0	1.3	898.2	935.0
9. 2	20	81.1	1,704.3	80.0	290.0	23.6	921.8	1,072.5
9. 24	22	60.1	1,764.4	80.0	370.0	1.0	922.8	1,211.6
10. 6	12	81.0	1,845.4		370.0	34.9	957.7	1,257.7
10. 29	23	247.8	2,093.2	80.0	450.0	267.0	1,224.7	1,318.5
12. 10	42	129.1	2,222.3		450.0	7.5	1,232.2	1,440.1
12. 19	9	22.5	2,244.8		450.0	2.8	1,235.0	1,459.8
1968.								
1. 3	15	36.9	2,281.7		450.0	14.9	1,249.9	1,481.8
1. 17	14	43.5	2,325.2		450.0	29.2	1,279.1	1,496.1
2. 13	27	97.8	2,423.0		450.0	57.2	1,336.3	1,538.7

表2・2・2 水収支とライシメータにおける累積蒸発散量 (実験2,2ライシメータ)

期 日	日 数	降雨量 mm	累積降雨量 mm	カン水 量 mm	累積カン 水量 mm	流出量 mm	累積流出量 mm	累積蒸発 散量 mm
1967								
9. 14		23.5	23.5			9.5	9.5	14.0
9. 25	11	21.0	44.5	13.9	13.9	4.4	13.9	44.5
10. 14	19	76.7	121.2	7.6	21.5	53.1	67.0	75.7
11. 10	27	268.5	389.7	18.5	40.0	237.5	304.5	125.2
11. 27	17	23.2	412.9		40.0	15.4	319.9	133.0
12. 14	17	101.8	514.7		40.0	43.0	362.9	191.8
1968								
1. 5	22	43.9	558.6		40.0	29.6	392.5	206.1
1. 26	21	52.1	610.7		40.0	30.9	423.4	227.4
2. 27	32	123.0	733.7		40.0	84.7	508.1	265.6
3. 14	16	56.5	790.2		40.0	40.0	548.1	282.1
4. 14	31	243.1	1,033.3		40.0	197.2	745.3	328.1
5. 2	18	96.5	1,129.3		40.0	55.2	800.5	369.3
5. 31	19	142.6	1,272.4		40.0	38.1	838.6	473.3
6. 29	29	294.3	1,566.7		40.0	216.2	1,054.8	551.9
7. 15	16	7.6	1,574.3	100.0	140.0	6.5	1,061.3	653.0
7. 31	16	16.2	1,590.5	100.0	240.0	11.1	1,072.4	758.1
8. 24	24	152.2	1,742.7		240.0	2.0	1,074.4	908.3
9. 5	12	130.0	1,872.7		240.0	54.1	1,128.5	984.2
10. 2	27	98.9	1,971.6		240.0	0.0	1,128.5	1,083.1
10. 20	18	8.5	1,980.1	80.0	320.0	1.2	1,129.7	1,170.4
11. 8	19	81.1	2,061.2		320.0	0.0	1,129.7	1,251.5
12. 4	26	62.9	2,124.1		320.0	0.0	1,129.7	1,314.4
12. 23	19	55.7	2,179.8		320.0	12.2	1,141.9	1,357.9
1969								
1. 27	35	106.3	2,286.6		320.0	0.0	1,141.9	1,464.7
2. 19	23	124.1	2,410.7		320.0	101.2	1,243.1	1,487.6

表2・2・3 水収支とライシメータにおける累積蒸発散量 (実験2,3号ライシメータ)

期 日	日 数	降雨量 mm	累積降雨量 mm	カン水 量 mm	累積カン 水量 mm	流出量 mm	累積流出量 mm	累積蒸発 散量 mm
1967								
9. 14		23.5	23.5			7.6	7.6	15.9
10. 3	19	36.2	59.7	13.9	13.9	11.9	19.5	54.1
10. 14	11	61.5	121.1	7.0	20.9	52.5	72.0	70.1
11. 10	27	268.5	389.7	18.5	39.4	244.9	316.9	112.2
11. 27	17	23.2	412.9		39.4	15.6	332.5	119.8
12. 24	27	112.7	525.6		39.4	55.6	387.5	177.5
1968								
1. 25	32	85.1	610.7		39.4	48.0	435.5	214.6
2. 27	33	123.0	733.7		39.4	84.1	519.6	253.0
3. 15	17	68.8	802.5		39.4	37.8	557.4	284.5
4. 13	29	231.0	1,033.5		39.4	203.1	760.5	312.2
5. 1	18	96.3	1,129.8		39.4	55.7	816.2	353.0
6. 7	37	178.4	1,308.2		39.4	46.0	862.2	485.0
6. 28	21	258.5	1,566.7		39.4	208.4	1,070.6	535.3
7. 14	16	7.6	1,574.3	100.0	139.4	10.1	1,080.7	633.0
7. 30	16	16.2	1,590.5	100.0	239.4	11.5	1,092.2	737.7
8. 29	30	228.3	1,818.8		239.4	35.6	1,127.8	930.4
9. 5	7	53.9	1,872.7		239.4	35.5	1,163.3	948.8
10. 18	43	107.4	1,980.1	80.0	319.4	2.8	1,166.1	1,133.4
11. 9	22	81.8	2,061.9		319.4	0.0	1,166.1	1,215.2
12. 15	36	109.8	2,171.7		319.4	0.0	1,166.1	1,325.0
1969								
1. 26	42	108.4	2,280.1		319.4	0.0	1,166.1	1,433.4
2. 15	20	121.2	2,401.3		319.4	50.5	1,216.6	1,504.1

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表2・2・4 水収支とライシメータにおける累積蒸発散量 (実験3,1号ライシメータ)

期 日	日 数	降雨量 mm	累積降雨量 mm	カン水 量 mm	累積カン 水量 mm	流出量 mm	累積流出量 mm	累積蒸発 散量 mm
1968								
9. 4		197.0	197.0			171.8	171.8	25.2
9. 27	23	17.6	214.6	2.7	2.7	6.3	178.1	38.2
10. 28	1	90.9	305.5		2.7	43.6	221.7	86.5
11. 23	26	87.3	392.8	1.0	3.7	50.4	272.1	124.4
12. 10	17	56.3	449.1		3.7	19.8	291.9	160.1
12. 28	18	55.5	504.6		3.7	36.3	328.2	180.1
1969								
1. 13	16	35.4	540.0		3.7	3.2	331.4	212.3
1. 24	11	44.7	584.7		3.7	28.8	360.2	228.2
2. 7	14	124.1	708.8		3.7	111.9	472.1	240.4
2. 19	12	26.7	735.5		3.7	8.5	480.6	258.6
3. 21	30	268.8	1,004.3		3.7	252.5	733.1	274.9
4. 14	24	101.2	1,105.5		3.7	47.7	780.8	324.8
5. 12	23	189.2	1,294.7		3.7	83.8	864.1	434.3
5. 26	14	196.9	1,491.6		3.7	145.8	1,009.9	485.4
6. 17	22	461.7	1,953.3		3.7	352.4	1,362.3	594.7
7. 4	17	328.5	2,281.8		3.7	288.4	1,650.7	634.8
8. 29	56	494.1	2,775.9		3.7	319.9	1,970.6	809.0
9. 16	18	84.4	2,860.3		3.7	1.1	1,971.7	892.3
9. 30	14	15.2	2,875.5		3.7	0.0	1,971.7	907.5
10. 20	20	384.9	3,260.4		3.7	332.8	2,304.5	959.6
11. 17	27	67.8	3,328.2		3.7	14.3	2,318.8	1,013.1
12. 5	18	79.6	3,407.8		3.7	63.3	2,382.1	1,029.4
12. 15	10	15.1	3,422.9		3.7	3.3	2,385.4	1,041.2
1970								
1. 22	38	118.0	3,540.9		3.7	72.4	2,457.8	1,086.8
2. 9	18	60.2	3,601.1		3.7	42.6	2,500.4	1,104.4
3. 22	41	295.3	3,896.4		3.7	275.2	2,775.6	1,124.5
4. 12	21	110.2	4,006.6		3.7	98.0	2,873.6	1,136.7
4. 30	18	141.5	4,148.1		3.7	124.5	2,998.1	1,153.7

表2・2・5 水収支とライシメータにおける累積蒸発散量 (実験4,2号ライシメータ)

期 日	日 数	降雨量 mm	累積降雨量 mm	カン水 量 mm	累積カン 水量 mm	流出量 mm	累積流出量 mm	累積蒸発 散量 mm
1969								
8. 31		498.5	498.5			378.3	378.3	120.7
10. 29	59	481.6	980.1	77.9	77.9	530.9	909.2	148.8
11. 8	10	2.3	982.4	9.5	87.4	1.4	910.6	159.2
12. 5	27	143.2	1,125.6	5.6	93.0	81.0	991.6	277.0
12. 27	22	24.4	1,150.0		93.0	10.6	1,002.2	240.8
1970								
2. 13	48	180.5	1,330.5		93.0	104.5	1,106.7	316.8
2. 23	10	9.6	1,340.1		93.0	300.7	1,407.4	325.7
4. 2	38	364.5	1,704.5		93.0	15.4	1,422.8	374.8
5. 6	34	163.2	1,867.8		93.0	144.8	1,567.6	393.2
5. 20	24	89.8	1,957.6		93.0	20.5	1,588.1	462.5
6. 26	37	391.4	2,349.0		93.0	316.3	1,904.4	537.6
7. 16	42	173.6	2,522.6	90.0	183.0	185.8	2,090.2	615.4
7. 28	12	21.0	2,543.6	80.0	263.0	6.5	2,096.7	709.9
8. 27	30	200.6	2,744.2		263.0	0.0	2,096.7	910.5
9. 24	28	152.9	2,897.1		263.0	0.0	2,096.7	1,063.4
10. 25	31	154.8	3,051.9		263.0	30.4	2,127.1	1,187.8
11. 13	19	91.4	3,143.3		263.0	0.0	2,127.1	1,279.2
12. 26	43	179.5	3,322.8		263.0	20.3	2,147.4	1,438.4
1971								
1. 16	21	75.2	3,398.0		263.0	29.0	2,176.4	1,484.6
2. 21	36	96.5	3,494.5		263.0	21.0	2,197.4	1,560.1



表2・2・6 水収支とライシメータにおける累積蒸発散量 (実験4, 3号ライシメータ)

期 日	日 数	降雨量 mm	累積降雨量 mm	カン水 量 mm	累積カン 水量 mm	流出量 mm	累積流出量 mm	累積蒸発 散量 mm
1969								
8. 31		498.5	498.5			376.1	376.1	122.4
10. 13	43	451.7	950.2	75.8	75.8	479.1	855.2	170.8
11. 9	27	32.2	982.4	16.9	92.7	23.9	879.1	196.0
12. 5	26	143.2	1,125.6	5.6	98.3	97.4	976.5	247.4
12. 24	19	23.5	1,149.1		98.3	10.8	987.3	260.1
1970								
1. 22	29	109.6	1,258.7		98.3	62.3	1,049.6	307.4
2. 22	31	81.4	1,340.1		98.3	53.0	1,102.6	335.8
4. 2	39	364.6	1,704.7		98.3	328.0	1,430.6	372.4
4. 12	10	19.7	1,724.4		98.3	1.0	1,431.6	391.1
5. 1	19	141.5	1,865.9		98.3	133.6	1,565.2	399.0
5. 20	19	91.8	1,957.7		98.3	28.1	1,593.3	462.7
6. 12	23	162.0	2,119.7		98.3	125.7	1,719.0	499.0
6. 25	13	229.4	2,349.1		98.3	202.1	1,921.1	526.3
7. 15	20	173.6	2,522.7	90.0	188.3	160.9	2,082.0	629.0
7. 26	11	21.0	2,543.7	80.0	268.3	10.2	2,092.2	719.8
8. 14	19	114.7	2,658.4		268.3	0.0	2,092.2	834.5
8. 27	13	85.9	2,744.3		268.3	0.0	2,092.2	920.4
10. 25	59	307.7	3,052.0		268.3	22.2	2,114.4	1,205.9
11. 21	27	92.6	3,144.6		268.3	14.2	2,128.6	1,284.3
12. 23	32	163.4	3,308.0		268.3	87.1	2,215.7	1,360.6
1971								
1. 18	26	90.1	3,398.1		268.3	68.0	2,283.7	1,382.7
2. 26	39	99.5	3,497.6		268.3	63.9	2,347.6	1,481.3

## 2 累積蒸発散量および日蒸発散量のモデル化

沖縄における夏植サトウキビは、一般に7月下旬から8月上旬に植え付けられ、植え付け翌年の12月からその次の年の2月にわたって収穫される。

著者の実験によると、植え付け初年度にはサトウキビの蒸発散量の変化が少なく、その値も小さい。宮里<sup>31)</sup>によると、サトウキビの初期生育においては主茎の下位節には全く根が出現せず、茎根の発達と比較的遅いため、独立栄養への転換期には草丈の伸長が一時抑制されることが指摘されている。したがって、サトウキビの初期生育においてはその蒸散量も一時抑制されると考えられる。その他冬に向けての気温低下などのために、植え付け初年度には蒸発散量の変化が少なくその値も小となっていると推察される。ここでは植え付け翌年の1月以後における夏植サトウキビの累積蒸発散量について検討を試みた。またこれまでの実験結果では、同一年次に測定した2号および3号ライシメータにおけるサトウキビの累積蒸発散量はほぼ同じ曲線を示す。(肥培管理とカン水は同一条件で行った。)したがって、表2・2・1～表2・2・6のデータを各実験年次ごとにまとめて使用した。

各期間ごとの実験番号および実験から得られたデータ番号の分類を表2・1に示す。ここではこの表の仕様による実験から得られたデータ $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  および  $Y_4$  について解析を行った。

著者はこれらのデータに基づき蒸発散量のモデル化を試みた。すなわち、蒸発散量の時期的変化に(2・4)式で示すGompertz曲線、(2・5)式で示すLogistic曲線などの式を適用してみた。Logistic曲線については1次式～3次式の適用を試みた。そして表2・3・1～表2・3・4に示すように適合度について $\chi^2$ 検定を行った。これらの表によると、どの実験結果においても、各式を用いて得られた $\chi^2$ の値は $\chi^2_f$ より小さくなり、これらの式は一応採用される。しかしながら、これらの $\chi^2$ の値はGompertz曲線の場合が最も大きく、3次のLogistic曲線の場合が最も小さくなっており、この曲線がよく適合することになる。

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

一方, Hoel<sup>10)</sup>によると, 期待値  $y$  に対し  $f_1$  および  $f_2$  の二つの式で表わした場合,  $(f_2 - f_1)$  と  $(y - f_1)$  との関係を示す直線が有意でその勾配が正ならば  $f_2$  の方が採択される。また Williams and Kloot's<sup>76)</sup>によると,  $(f_2 - f_1)$  と  $\{y - \frac{1}{2}(f_1 + f_2)\}$  との関係直線が有意でその勾配が正ならば  $f_2$  が採用される。ここでは1次, 2次および3次のLogistic 曲線を  $L_1, L_2, L_3$  とし, Gompertz 曲線を  $G$  として, 上記の二つの方法で, Exp.1 ~ Exp.4 の4試料について検討した。表2・4に1次のLogistic 曲線と2次のLogistic 曲線を比較検討する計算例を示す。この表によると, どの方法によっても関係直線は有意でその勾配は正となっている。したがって, 2次のLogistic 曲線がよいことになる。全実験結果について同様な計算を行い, 直線の勾配と相関係数を表2・5のようにまとめた。この表によると,  $L_1$  と  $L_2$  の比較においてはほとんどの試料について直線は有意で勾配は正である。すなわち  $L_2$  の方がよいことになる。 $L_2$  と  $L_3$  の比較ではほとんど有意でない。つまりどちらを採択してもよいということになるが, 式の煩雑さをさけるためには  $L_2$  を採択した方がよい。 $G$  と  $L_2$  の比較においてはすべて有意で勾配は正となっており  $L_2$  が採択される。したがって全体を比較した場合  $L_2$  すなわち2次のLogistic 曲線を採用した方がよいことになる。すなわち累積蒸発散量の時期的変化には2次のLogistic 曲線を適用し, それを微分して平均日蒸発散量を求める方法が最もよいことがわかった。

## a) Gompertz 曲線

$$Y = Kab^t \dots\dots\dots (2 \cdot 4)$$

ここで

$Y$  : 累積蒸発散量 (cm)

$t$  : 30日を期間単位とした植え付け後の期間数

$k, a, b$  は定数

である。この定数  $k, a, b$  を次の方法で求めた。(2・4)式の両辺の対数をとると,

$$\log Y = \log k + (\log a) \cdot bt$$

$$\log Y = y, \log k = K, \log a = A \text{ とすると,}$$

$$y = K + Ab^t$$

となり, 修正指数曲線と全く同型になる。したがって, 時系列変数の総和  $N$  を3等分し,  $N = 3n$  とする(3等分できなければデータをヘラス)。各区分系列の変数の総和  $\Sigma_1 y, \Sigma_2 y, \Sigma_3 y$  を計算し次式から各係数を求めた。

$$b^n = \frac{\Sigma_3 y - \Sigma_2 y}{\Sigma_2 y - \Sigma_1 y}$$

$$a = (\Sigma_2 y - \Sigma_1 y) \frac{b - 1}{(b^n - 1)^2}$$

$$k = \frac{1}{n} \left\{ \Sigma_1 y - a \frac{b^n - 1}{b - 1} \right\}$$

## b) Logistic 曲線

$$Y = C + \frac{D - C}{1 + e^{\phi(t)}} \dots\dots\dots (2 \cdot 5)$$

ここで

$$\phi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$Y$  : 累積蒸発散量 (cm)

$t$  : 30日を期間単位とした植え付け後の期間数

$C$  : 初期値

D : 漸近値

C, D,  $a_0, a_1, a_2, a_3$  は定数

である。これらの定数を次の方法で求めた (3次式の例)。(2・5)式より,

$$Y - C = \frac{D - C}{1 + e^{\phi(t)}}$$

$$1 + e^{\phi(t)} = \frac{D - C}{Y - C}$$

$$e^{\phi(t)} = \frac{D - C}{Y - C} - 1$$

ここで  $D - C = K$ ,  $Y - C = y'$  とすると,

$$e^{\phi(t)} = \frac{K}{y'} - 1$$

$$\phi(t) = \ln \left( \frac{K}{y'} - 1 \right)$$

また,  $\phi(t) = y$  とすると,

$$y = \ln \left( \frac{K}{y'} - 1 \right) \dots\dots\dots(a)$$

$$y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \dots\dots\dots(b)$$

測定結果から C, D を推定し K と各 t における  $y'$  を計算して, それらの値と (a) 式から y を求める。その y の値と (b) 式から最小二乗法によって  $a_1, a_2, a_3$  を計算した。1次式, 2次式においても全く同じ方法で計算した。

なお, 表 2・2・1 ~ 表 2・2・6 に示すように, 累積蒸発散量をまとめる期間は実験の都合上ランダムにとられた。しかしながら, 累積蒸発散量のモデル化に際しては, 計算上期間を30日ごとの等間隔として取り扱いうるようになり, 内挿法によって実験値を整理して使用した。累積蒸発散量の単位も cm で示した。

前述の4個のデータに基づく累積蒸発散量のモデル化に際し, 最もよい結果が得られた2次の Logistic 曲線は, 以下に示すとおりである。

$$\text{Exp. 1 } Y_1 = 3.50 + 153.40 \left\{ 1 + e^{(5.173 - 0.409 t - 3.358 \times 10^{-3} t^2)} \right\}^{-1}$$

$$\text{Exp. 2 } Y_2 = 14.10 + 152.70 \left\{ 1 + e^{(5.691 - 0.475 t + 3.153 \times 10^{-3} t^2)} \right\}^{-1}$$

$$\text{Exp. 3 } Y_3 = 10.30 + 103.80 \left\{ 1 + e^{(4.264 - 0.363 t - 2.158 \times 10^{-3} t^2)} \right\}^{-1}$$

$$\text{Exp. 4 } Y_4 = 23.50 + 134.30 \left\{ 1 + e^{(6.059 - 0.489 t + 1.628 \times 10^{-3} t^2)} \right\}^{-1}$$

図 2・4・1 ~ 図 2・4・4 における実線はそれぞれ上式の曲線を示す。これらの図においても, 曲線が実測値とよく適合することがわかる。

(2・5) 式を微分すると (2・6) 式となる。

$$\frac{dY}{dt} = - \frac{(Y - C)(D - Y)}{D - C} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} \dots\dots\dots(2 \cdot 6)$$

t の単位は30日, Y の単位は cm であるので任意の t における平均日蒸発散量は  $\frac{10}{30} \cdot \frac{dY}{dt}$  (mm/day) となる。各実験年次における平均日蒸発散量を図 2・4・1 ~ 図 2・4・4 に破線で示す。

図 2・5 は著者が1970年1月から1971年2月に琉球大学農学部附属農場のライシメータによって測

定したサトウキビの累積蒸発散量とその茎長との関係を示すものである。この図によると、累積蒸発散量の増加の様相には生長との平行性がみられる。このことについて玉井<sup>61)</sup>もサトウキビの吸水量と茎長がほぼ正比例関係にあることを認めている。作物の生長曲線は一般にLogistic 曲線で示される<sup>30, 49)</sup>。累積蒸発散量と生長との間に平行性がみられる関係上、累積蒸発散量の時期的変化がLogistic 曲線で示されることは理解されることである。

表 2・3・1 累積蒸発散量曲線の適合度の検定 (EXP 1)

項目 t	式名 Y	Gompertz		Logistic (1 次 式)		Logistic (2 次 式)		Logistic (3 次 式)	
		$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$
5	8.5	8.4	0.00	9.8	0.17	10.5	0.38	9.5	0.11
6	15.5	14.3	0.10	13.6	0.27	14.1	0.14	13.9	0.18
7	23.0	22.4	0.02	19.3	0.71	19.6	0.59	20.5	0.30
8	31.5	32.4	0.03	27.7	0.52	27.5	0.58	29.7	0.11
9	40.5	44.2	0.31	39.4	0.03	38.5	0.10	41.6	0.03
10	51.5	57.3	0.59	54.6	0.18	52.9	0.04	55.9	0.35
11	66.5	71.1	0.30	72.4	0.48	70.1	0.18	71.9	0.41
12	87.0	85.2	0.04	91.1	0.18	88.7	0.03	88.6	0.03
13	106.5	99.1	0.55	108.5	0.04	106.5	0.00	104.8	0.03
14	121.5	112.5	0.72	123.1	0.66	121.8	0.00	119.3	0.04
15	132.5	124.9	0.46	134.3	0.02	133.7	0.01	131.3	0.01
16	141.0	136.4	0.16	142.2	0.15	142.1	0.01	140.6	0.00
17	147.0	146.9	0.00	147.6	0.00	147.7	0.00	147.2	0.00
18	151.5	156.1	0.14	151.0	0.00	151.4	0.00	151.5	0.00
19	154.0	164.4	0.66	153.3	0.00	153.6	0.00	154.1	0.00
$\Sigma \chi^2_c$		4.08		3.41		2.06		1.60	
検 定		自由度 n = 11 有意水準 20% $\chi^2_t = 14.63$ $\chi^2_c < \chi^2_t$		n = 11 有意水準 20% $\chi^2_t = 14.63$ $\chi^2_c < \chi^2_t$		n = 10 有意水準 20% $\chi^2_t = 13.44$ $\chi^2_c < \chi^2_t$		n = 9 有意水準 20% $\chi^2_t = 12.24$ $\chi^2_c < \chi^2_t$	

表2・3・2 累積蒸発散量曲線の適合度の検定 (EXP 2)

項目 t	式名 Y	Gompertz		Logistic (1次式)		Logistic (2次式)		Logistic (3次式)	
		$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$
5	19.0	15.5	0.79	19.5	0.01	19.1	0.00	19.5	0.01
6	22.5	20.5	0.20	22.1	0.01	21.7	0.03	21.8	0.02
7	26.5	26.6	0.00	25.7	0.02	25.5	0.04	25.1	0.08
8	30.0	33.7	0.34	30.7	0.02	30.8	0.02	30.0	0.00
9	35.5	41.9	0.98	37.6	0.12	38.2	0.19	36.9	0.05
10	48.0	51.1	0.19	46.7	0.04	47.9	0.00	46.5	0.05
11	56.0	61.3	0.46	58.0	0.07	59.8	0.24	58.9	0.14
12	75.0	72.4	0.09	71.5	0.17	73.6	0.03	73.6	0.03
13	93.0	84.6	0.83	86.3	0.52	88.5	0.23	89.5	0.14
14	107.5	97.1	1.11	101.5	0.35	103.2	0.18	105.1	0.05
15	119.5	109.9	0.84	115.8	0.12	116.8	0.06	118.9	0.00
16	129.5	123.9	0.25	128.3	0.01	128.6	0.01	130.3	0.00
17	138.0	137.7	0.00	138.7	0.00	138.2	0.00	139.0	0.01
18	145.0	151.8	0.30	146.7	0.02	145.7	0.00	145.5	0.00
19	150.5	165.9	1.43	152.7	0.03	151.4	0.01	150.1	0.00
$\Sigma x_c^2$		7.81		1.51		1.04		0.58	
検定		自由度 n=11 有意水準 20% $x_t^2 = 14.63$ $x_c^2 < x_t^2$		自由度 n=11 有意水準 20% $x_t^2 = 14.63$ $x_c^2 < x_t^2$		自由度 n=10 有意水準 20% $x_t^2 = 13.44$ $x_c^2 < x_t^2$		自由度 n=9 有意水準 20% $x_t^2 = 12.24$ $x_c^2 < x_t^2$	

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表 2・3・3 累積蒸発散量曲線の適合度の検定 (EXP 3)

項目 t	式名 Y	Gompertz		Logistic (1次式)		Logistic (2次式)		Logistic (3次式)	
		$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$
5	19.5	14.5	1.72	18.5	0.05	19.0	0.01	19.3	0.00
6	23.5	21.6	0.16	22.2	0.08	22.6	0.04	22.6	0.04
7	26.5	28.8	0.13	27.3	0.02	27.5	0.04	27.2	0.02
8	31.5	37.3	0.90	34.0	0.18	33.9	0.17	33.4	0.11
9	39.5	46.3	1.00	42.4	0.20	41.9	0.14	41.3	0.08
10	51.0	55.4	0.35	52.2	0.03	51.5	0.00	50.8	0.00
11	64.0	64.4	0.00	62.9	0.02	61.9	0.07	61.5	0.10
12	74.5	72.9	0.04	73.5	0.01	72.5	0.06	72.4	0.06
13	83.5	81.0	0.08	83.1	0.00	82.3	0.02	82.5	0.01
14	91.5	88.3	0.12	91.3	0.00	90.8	0.01	91.2	0.00
15	98.0	94.9	0.10	97.9	0.00	97.6	0.00	98.0	0.00
16	102.5	100.8	0.03	102.8	0.00	102.7	0.00	103.0	0.00
17	106.0	106.0	0.00	106.3	0.00	106.4	0.00	106.5	0.00
18	108.5	110.5	0.04	108.8	0.00	109.0	0.00	109.0	0.00
19	111.0	114.5	0.11	110.6	0.00	110.8	0.00	110.6	0.00
$\Sigma x_c^2$		4.83		0.59		0.56		0.42	
検 定		自由度 n=11 有意水準 20% $x_c^2 = 14.63$ $x_c^2 < x_t^2$		n = 11 有意水準 20% $x_c^2 = 14.63$ $x_c^2 < x_t^2$		n = 10 有意水準 20% $x_c^2 = 13.44$ $x_c^2 < x_t^2$		n = 9 有意水準 20% $x_c^2 = 12.24$ $x_c^2 < x_t^2$	

表2・3・4 累積蒸発散量曲線の適合度の検定 (EXP 4)

項目 t	式名 Y	Gompertz		Logistic (1次式)		Logistic (2次式)		Logistic (3次式)	
		$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2 / \hat{Y}$
5	26.0	23.6	0.24	27.1	0.04	26.9	0.03	26.7	0.02
6	30.0	28.4	0.09	29.0	0.03	28.8	0.05	28.8	0.05
7	34.0	33.9	0.00	31.9	0.14	31.8	0.15	32.0	0.13
8	38.0	40.0	0.10	36.2	0.09	36.3	0.08	36.7	0.05
9	42.5	47.2	0.47	42.5	0.00	42.7	0.00	43.3	0.01
10	53.0	55.1	0.08	51.0	0.08	51.6	0.04	52.1	0.02
11	63.0	63.9	0.01	61.7	0.03	63.0	0.00	63.4	0.00
12	75.0	73.6	0.03	75.6	0.00	76.6	0.03	76.6	0.03
13	94.0	84.2	1.14	90.5	0.14	91.4	0.07	91.0	0.10
14	108.5	95.8	1.68	105.3	0.10	106.1	0.05	105.3	0.10
15	120.5	108.5	1.33	118.8	0.02	119.3	0.01	118.3	0.04
16	130.0	122.0	0.52	130.0	0.00	130.1	0.00	129.4	0.00
17	138.0	136.6	0.01	138.6	0.00	138.5	0.00	138.2	0.00
18	144.5	152.2	0.39	144.9	0.00	144.6	0.00	144.7	0.00
19	149.0	168.6	2.28	149.3	0.00	148.9	0.00	149.3	0.00
$\Sigma x_c^2$		8.37		0.67		0.51		0.55	
検 定		自由度 n=11		n=11		n=10		n=9	
		有意水準 20%		有意水準 20%		有意水準 20%		有意水準 20%	
		$x_c^2 = 14.63$		$x_c^2 = 14.63$		$x_c^2 = 13.44$		$x_c^2 = 12.24$	
		$x_c^2 < x_c^2$		$x_c^2 < x_c^2$		$x_c^2 < x_c^2$		$x_c^2 < x_c^2$	

表2・4 Hoelの方法およびWilliams and Klootsの方法による1次のLogistic曲線と2次のLogistic曲線の比較検討

(例 EXP 1)

Y	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>1</sub> + L <sub>2</sub>	$\frac{L_1 + L_2}{2}$	Y - L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub> - L <sub>1</sub>	$Y - \frac{L_1 + L_2}{2}$
8.5	9.8	10.5	20.3	10.15	-1.3	0.7	-1.65
15.5	13.6	14.1	27.7	13.85	1.9	0.5	1.65
23.0	19.3	19.6	38.9	19.45	3.7	0.3	3.55
31.5	27.7	27.5	55.2	27.60	3.8	-0.2	3.90
40.5	39.4	38.5	77.9	38.95	1.1	-0.9	1.55
51.5	54.6	52.9	107.5	53.75	-3.1	-1.7	-2.25
66.5	72.4	70.1	142.5	71.25	-5.9	-2.3	-4.75
87.0	91.1	88.7	179.8	89.90	-4.1	-2.4	-2.90
106.5	108.5	106.5	215.0	107.50	-2.0	-2.0	-1.00
121.5	123.1	121.8	244.9	122.45	-1.6	-1.3	-0.95
132.5	134.3	133.7	268.0	134.00	-1.8	-0.6	-1.50
141.0	142.2	142.1	284.3	142.15	-1.2	-0.1	-1.15
147.0	147.6	147.7	295.3	147.65	-0.6	0.1	-0.65
151.5	151.0	151.4	302.4	151.20	0.5	0.4	0.30
154.0	153.3	153.6	306.9	153.45	0.7	0.3	0.55

Hoelの方法

$$Y - L_1 = 0.4554 + 1.8186 (L_2 - L_1)$$

$$r = 0.728^{***}$$

Williams and Klootsの方法

$$Y - \frac{L_1 + L_2}{2} = 0.4554 + 1.3186 (L_2 - L_1)$$

$$r = 0.610^*$$

表2・5 各曲線の適合度の比較検定

項目 試料名	方 法	L <sub>1</sub> とL <sub>2</sub> の比較		L <sub>2</sub> とL <sub>3</sub> の比較		GとL <sub>2</sub> の比較		備 考
		勾配	相関係数	勾配	相関係数	勾配	相関係数	
EXP 1	H	1.82	0.73***	0.33	0.29	0.87	0.94***	H: Hoelの方法 W: Williams and Klootsの方法
	W	1.32	0.61*	-0.17	-0.16	0.37	0.75**	
EXP 2	H	1.72	0.68**	1.40	0.73**	1.25	0.97***	
	W	1.22	0.55*	0.90	0.57*	0.75	0.92***	
EXP 3	H	0.04	0.02	1.60	0.44	1.22	0.94***	
	W	-0.43	-0.17	1.10	0.32	0.72	0.86***	
EXP 4	H	1.34	0.51*	-0.43	-0.17	1.03	0.99***	
	W	0.84	0.33	1.23	0.45	0.50	0.94***	



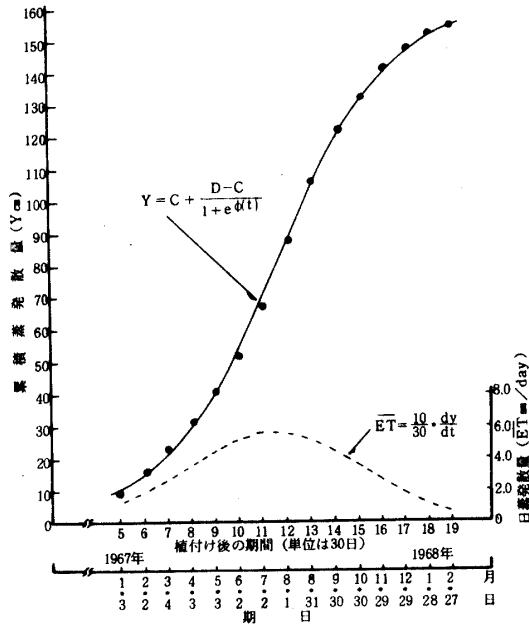


図 2・4・1 蒸発散量の期別変化

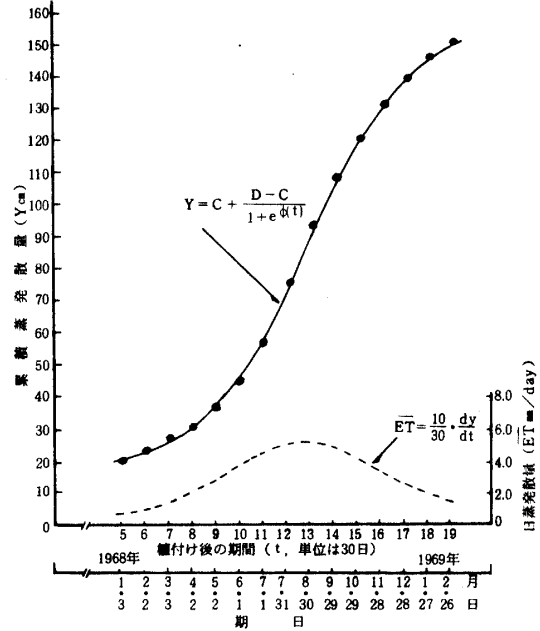


図 2・4・2 蒸発散量の期別変化

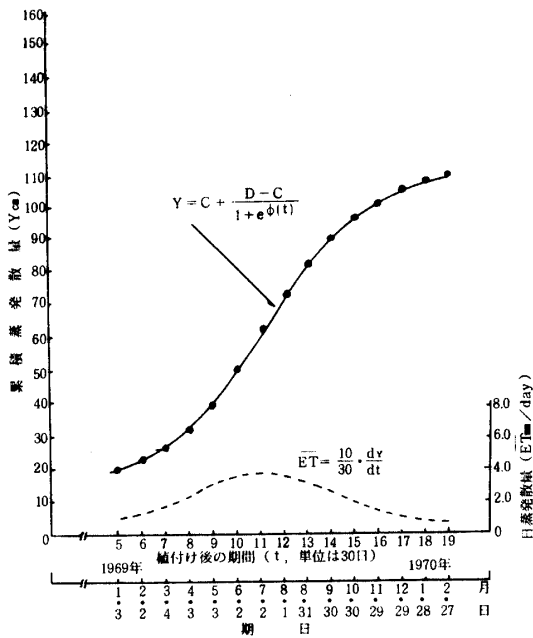


図 2・4・3 蒸発散量の期別変化

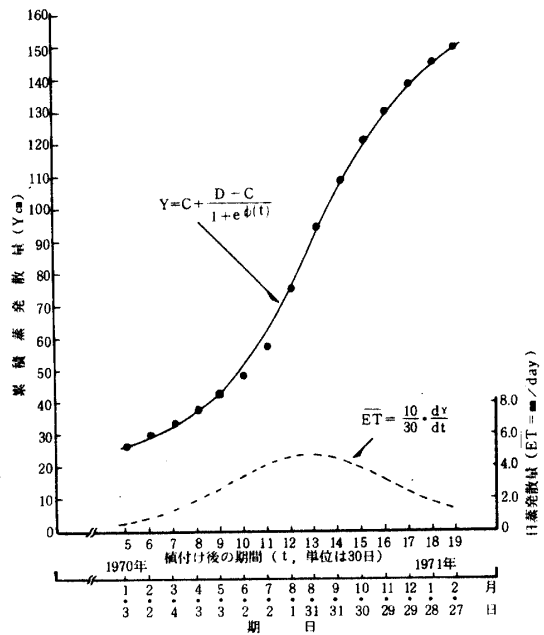


図 2・4・4 蒸発散量の期別変化

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

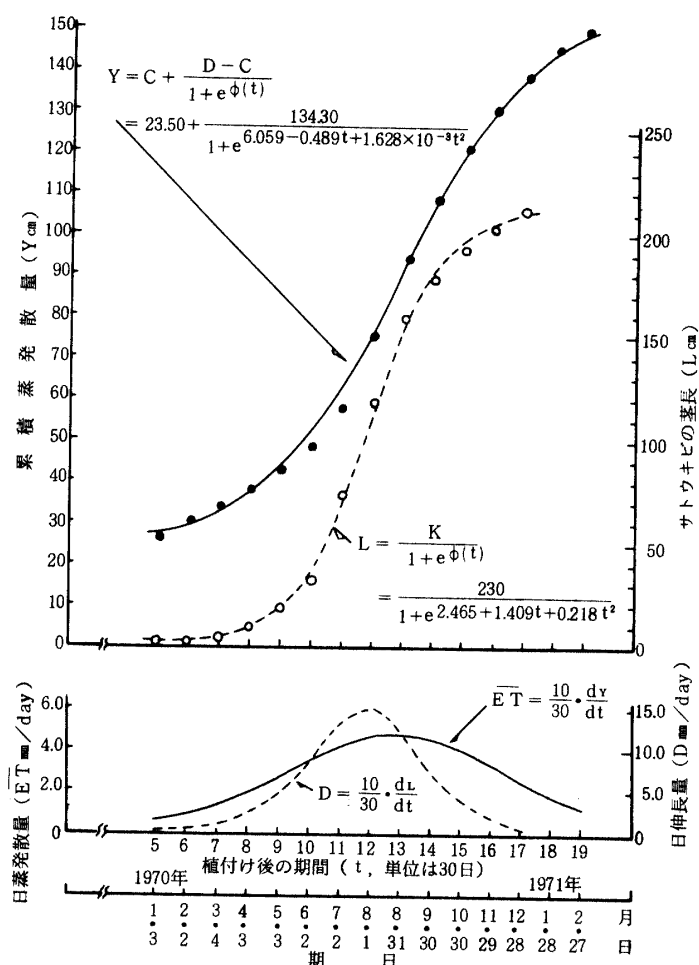


図2・5 サトウキビの累積蒸発散量と茎長との関係(1970年1月～1971年2月)

### 第3節 月別平均日蒸発散量と気象要因との関係

#### 1 推定曲線の計算

第I章第3節で述べたように、サトウキビの吸水量はその生育状況および気象要因とくに気温、日射量、蒸発計蒸発量などによって影響される。作物の蒸散速度(1時間当り蒸散量)および日蒸散量とこれらの気象要因との間にもかなり高い相関関係が認められる<sup>5,6)</sup>。著者ら<sup>90)</sup>はガラス室内でサトウキビをポット栽培し、土壌水分を一定にしておいて、サトウキビの蒸散量と気温、日射量および蒸発計蒸発量との関係を調べた。その結果、生育状況がほぼ同じである単期間においては、蒸散量とこれらの気象要因との関係が直線で示されることを明らかにした。さらに、ほぼ同程度の生育状況をしているサトウキビに、土壌水分を変えて試験を行い、蒸散量と土壌水分との関係を調べた。その結果、土壌水分を減少させると初期シオレ点あたりから蒸散量は急減することを明らかにした。

以上、作物の蒸散量は気温、日射量、蒸発計蒸発量などの気象要因、作物の生育状況および土壌水分状態によって影響されることがわかる。

第I章第3節で述べたように、著者はアクリル円筒を用いて石灰岩土壌と泥灰岩土壌について乾燥試

験を行った。その際、重量法によって土壌面蒸発量を測定し、これと気温、日射量および湿度との関係を検討した。その結果を図2・6～図2・8に示す。これらの図によると、いずれの土壌においても、土壌面蒸発量と気温、日射量および湿度との間にはかなり高い相関関係が認められる。

以上の結果から、蒸散量と土壌面蒸発量の和として与えられる蒸発散量も上記の気象要因、作物の生育状況および土壌水分状態によって影響されることが推察される。

本節ではこれらの関係を明らかにし、気象要因からサトウキビの月別平均日蒸発散量を推定する方法を確立する目的で解析を試みた。つまり、サトウキビの月別平均日蒸発散量と日最高気温の月平均値、月平均気温、日最低気温の月平均値、月別平均日射量および月別平均蒸発計蒸発量との関係を検討した。

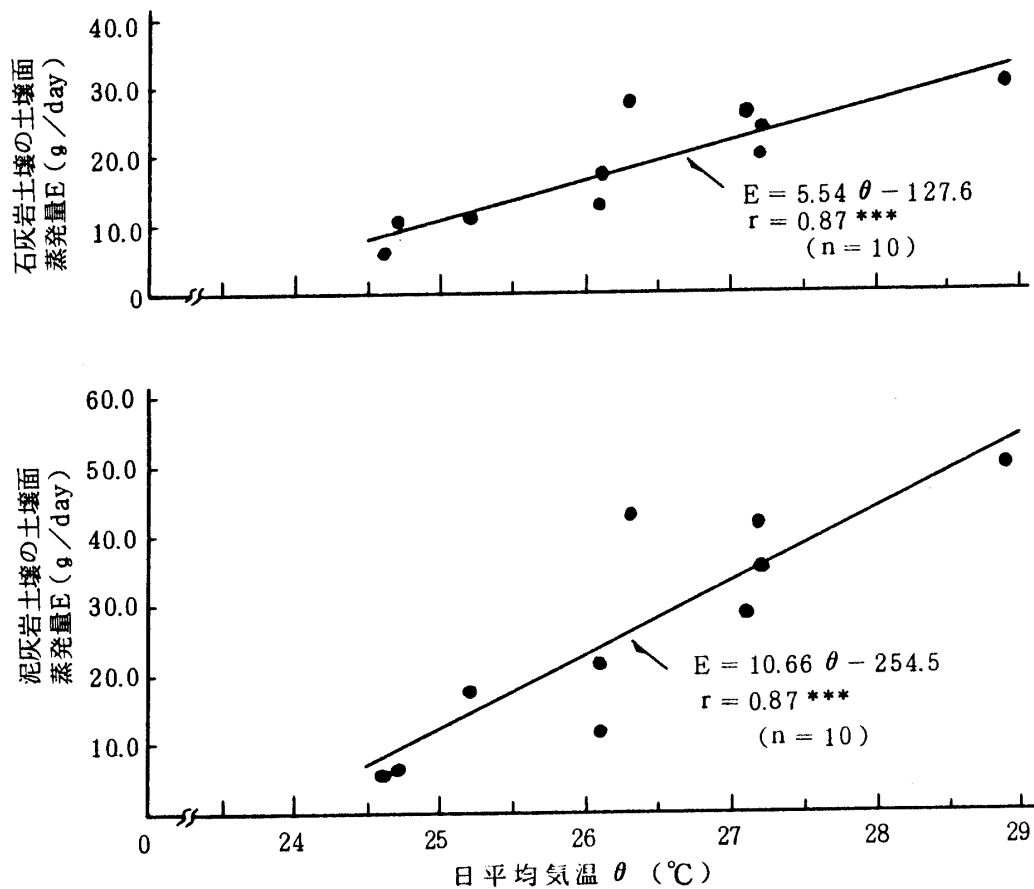


図2・6 土壌面蒸発量と日平均気温との関係  
(1979年6月4日～6月14日)

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

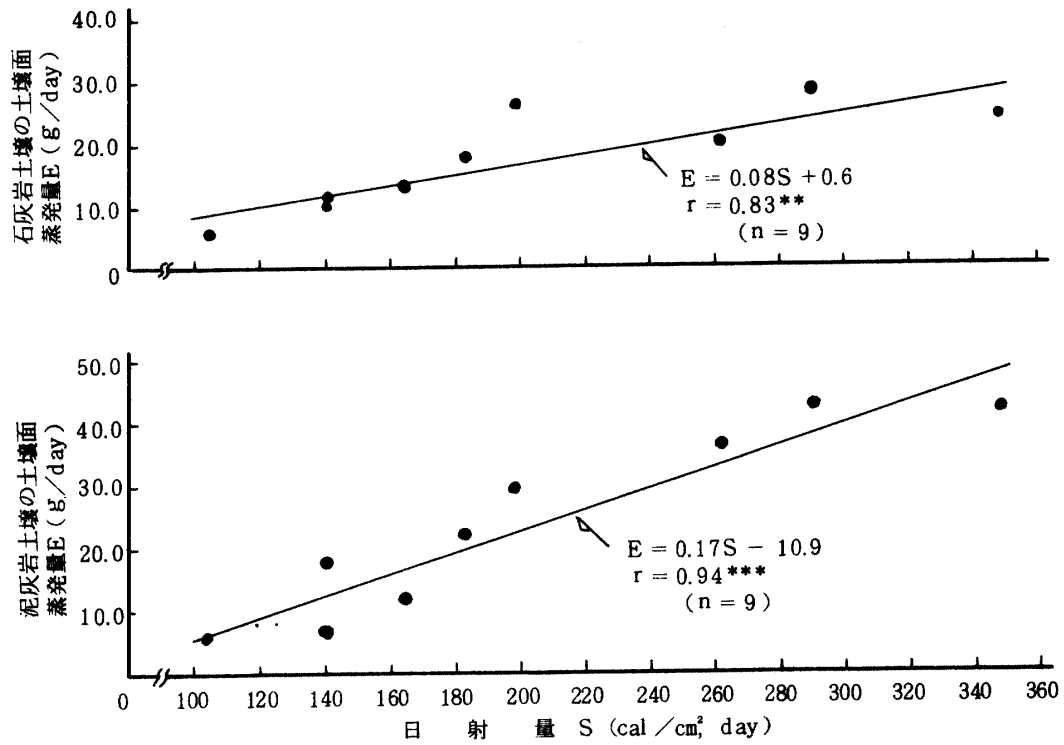


図2・7 土壌面蒸発量と日射量との関係 (1979年6月4～6月14日)

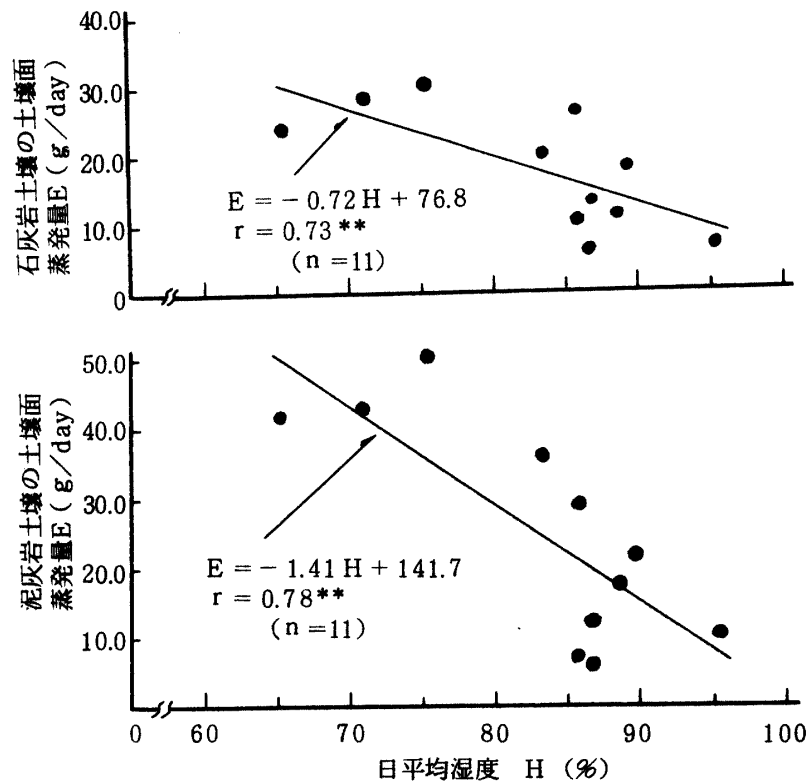


図2・8 土壌面蒸発量と日平均湿度との関係 (1979年6月4日～6月14日)

月別平均日蒸発散量は図2・4・1～図2・4・4の各実験年次における蒸発散量曲線から求めた。図2・9に蒸発散量曲線を用いて任意の期間における平均日蒸発散量を計算する方法を示す。この図で  $ET = \frac{dY}{dt}$  であるから

$$\begin{aligned} \overline{ET} &= \frac{10}{T} \int_{t_{i-1}}^{t_i} ET dt = \frac{10}{T} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{dY}{dt} dt \\ &= \frac{10}{T} \int_{Y_{i-1}}^{Y_i} dY = \frac{10}{T} (Y)_{Y_{i-1}}^{Y_i} = \frac{10}{T} (Y_i - Y_{i-1}) \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 7) \end{aligned}$$

ここで

- ET : 任意期間における平均日蒸発散量 (mm/day)
- Y : 累積蒸発散量 (cm)
- t : 30日を期間単位とした植え付け後の期間数
- T : 任意期間 ( $t_i - t_{i-1}$ ) の日数

である。

(2・7)式に(2・5)式から得られた累積蒸発散量Yを代入して、月別平均日蒸発散量を求めた。その結果を表2・6に示す。この場合任意期間の日数はその月の日数である。

図2・10に実験年次別の蒸発散量曲線を示す。この図で実験3 ( $Y_3$ )の結果は累積蒸発散量および平均日蒸発散量ともに、他の実験結果に比べて小さい値を示している。これは図2・11に示すように、実験3を行った1969年には5月、6月、8月および10月に超過確率の再現期間がそれぞれ34年、26年、6.5年および22年の異常降雨があったためであると考えられる。それゆえ実験3のデータ  $Y_3$  (1969年～1970年の蒸発散量曲線)を異常値とみなして除くことにした。したがって、実験1 ( $Y_1$ )、実験2 ( $Y_2$ )、実験4 ( $Y_4$ )の値について検討した。

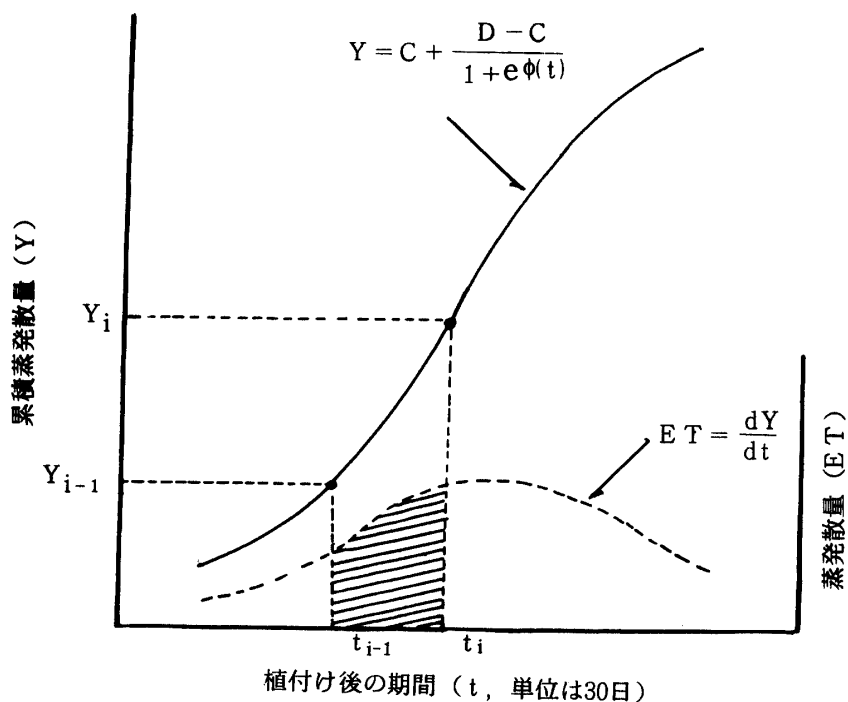


図2・9 任意期間における平均日蒸発散量の計算法

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表2・6 月別平均日蒸発散量 ( $\overline{ET}$  mm/day)

実験番号と解析期間 月	実験 1 1967年～1968年	実験 2 1968年～1969年	実験 3 1969年～1970年	実験 4 1970年～1971年
1	1.2	0.8	1.2	0.6
2	1.8	1.2	1.6	1.0
3	2.5	1.8	2.1	1.4
4	3.6	2.4	2.6	2.1
5	4.7	3.2	3.1	3.0
6	5.7	4.0	3.5	3.8
7	6.2	4.6	3.5	4.5
8	6.0	4.9	3.3	4.9
9	5.1	4.9	2.8	4.9
10	3.9	4.5	2.3	4.4
11	2.8	3.9	1.7	3.6
12	1.9	3.1	1.2	2.8
1	1.2	2.4	0.8	2.0
2	0.7	1.9	0.6	1.4

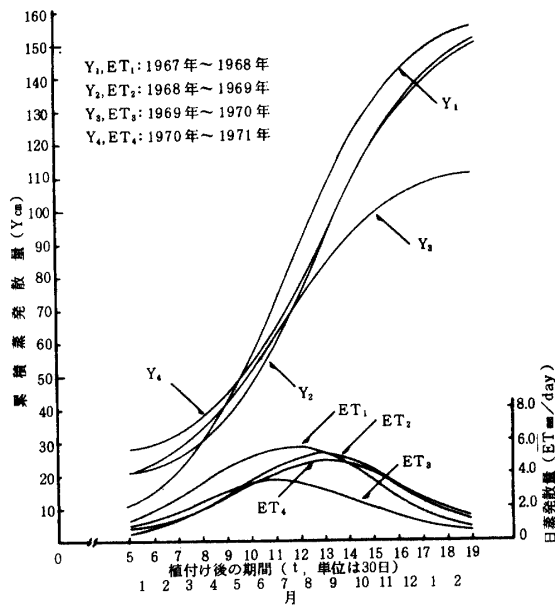


図2・10 蒸発散量の期別変化

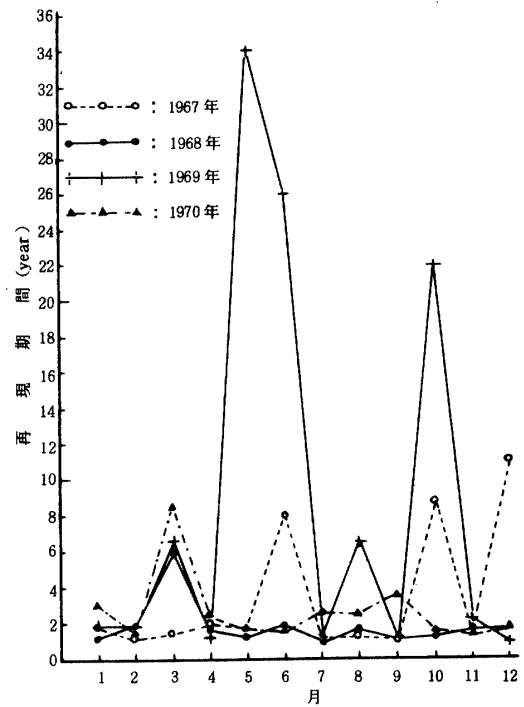


図2・11 月降雨量の超過確率の再現期間

図2・12・1～図2・12・3は(2・7)式によって計算した月別平均日蒸発散量と前述の気象要因との関係を対比したものである。これらの図によると、月別平均日蒸発散量と各気象要因とはかなりよく対応して増減している。著者はこの月別平均日蒸発散量とこれらの気象要因との関係を対数方眼紙にプロットして検討した。その結果、いずれの場合でも直線関係が認められた。したがって、月別平均日蒸発散量( $\overline{ET}$ )と各気象要因( $x$ )との関係が(2・8)式で表わされるものとして定数 $a$ 、 $n$ を最小二乗法で算出した。

$$\overline{ET} = ax^n \dots\dots\dots (2 \cdot 8)$$

次に先ず、月別平均日蒸発散量と月平均気温との関係を(2・8)式によって求める。すなわち、実験年次別に得られた月別平均日蒸発散量( $\overline{ET}$ )とそれに対応する月平均気温( $\theta_m$ )を用いて、(2・8)式の定数 $a$ 、 $n$ を求めると(2・9)式が得られた。

$$\overline{ET} = 0.00160 \theta_m^{2.44} \dots\dots\dots (2 \cdot 9)$$

同様に $\overline{ET}$ と各要因との関係を求めると、(2・10)式～(2・13)式となる。

$$\overline{ET} = 0.000444 \theta_{\max}^{2.75} \dots\dots\dots (2 \cdot 10)$$

$$\overline{ET} = 0.00549 \theta_{\min}^{2.13} \dots\dots\dots (2 \cdot 11)$$

$$\overline{ET} = 0.000374S^{1.52} \dots\dots\dots (2 \cdot 12)$$

$$\overline{ET} = 0.536 E^{1.36} \dots\dots\dots (2 \cdot 13)$$

ここで

$\overline{ET}$  : 月別平均日蒸発散量 (mm/day)

$\theta_m$  : 月平均気温 (°C)

$\theta_{\max}$  : 日最高気温の月平均値 (°C)

$\theta_{\min}$  : 日最低気温の月平均値 (°C)

$S$  : 月別平均日射量 (Cal/cm<sup>2</sup>·day)

$E$  : 月別平均蒸発計蒸発量 (mm/day)

である。図2・13～図2・17に、このようにして求められた式と実測値との関係を示す。これらの曲線式をその両辺の対数をとることによって直線化し、相関係数を求めてその有意性の検定を行った。その結果、どの関係式においても99%の信頼度で以下に示すような相関係数 $r$ が得られた。

$$(2 \cdot 9) \text{ 式} : r = 0.92, \quad (2 \cdot 10) \text{ 式} : r = 0.92, \quad (2 \cdot 11) \text{ 式} : r = 0.92,$$

$$(2 \cdot 12) \text{ 式} : r = 0.75, \quad (2 \cdot 13) \text{ 式} : r = 0.67$$

すなわち、(2・9)式～(2・11)式は月別平均日蒸発散量の分布と気温分布との関係の特徴をよく示している。一方、(2・12)式では月別平均日蒸発散量の分布と月別平均日射量の分布との間に見られる関係が(2・9)式～(2・11)式ほどよく表現されていない。(2・13)式についても同様なことが言える。日射量および蒸発計蒸発量はサトウキビ栽培ホ場外で測定されたものであり、栽培ホ場内の値とでは、サトウキビの茎葉による日射の遮断その他の理由で、かなり異なるために上記のような結果が得られたと考える。なお、これらの関係を示す曲線式の両辺の対数をとることによって得られる直線における相関係数の99%信頼度区間を図2・13～図2・17に破線で示す。

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

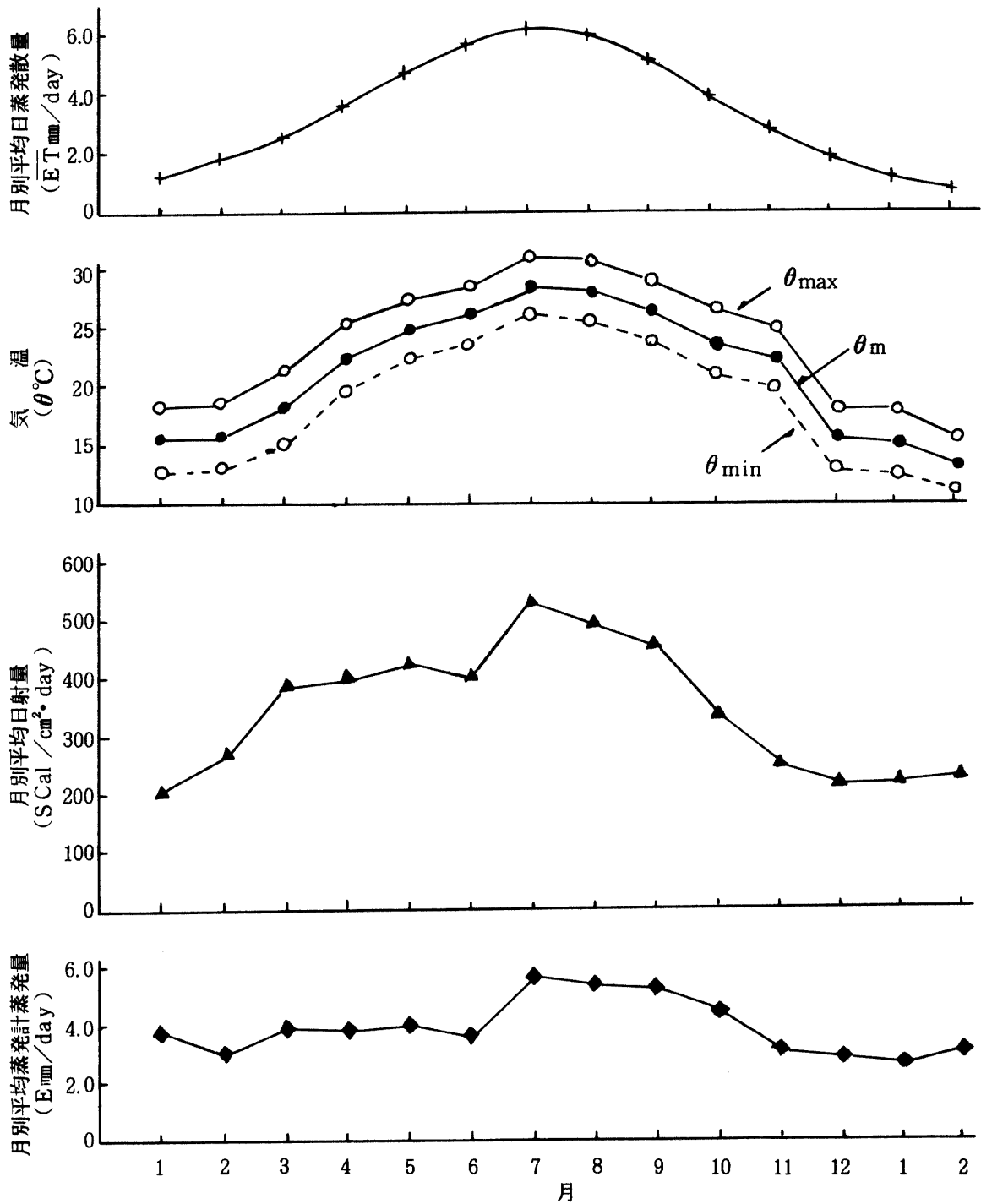


図 2・12・1 サトウキビの月別平均日蒸発散量と気温，月別平均日射量  
および月別平均蒸発計蒸発量との関係(1967年~1968年)

注  $\theta_{max}$  : 日最高気温の月平均値  
 $\theta_{min}$  : 日最低気温の月平均値  
 $\theta_m$  : 月平均気温



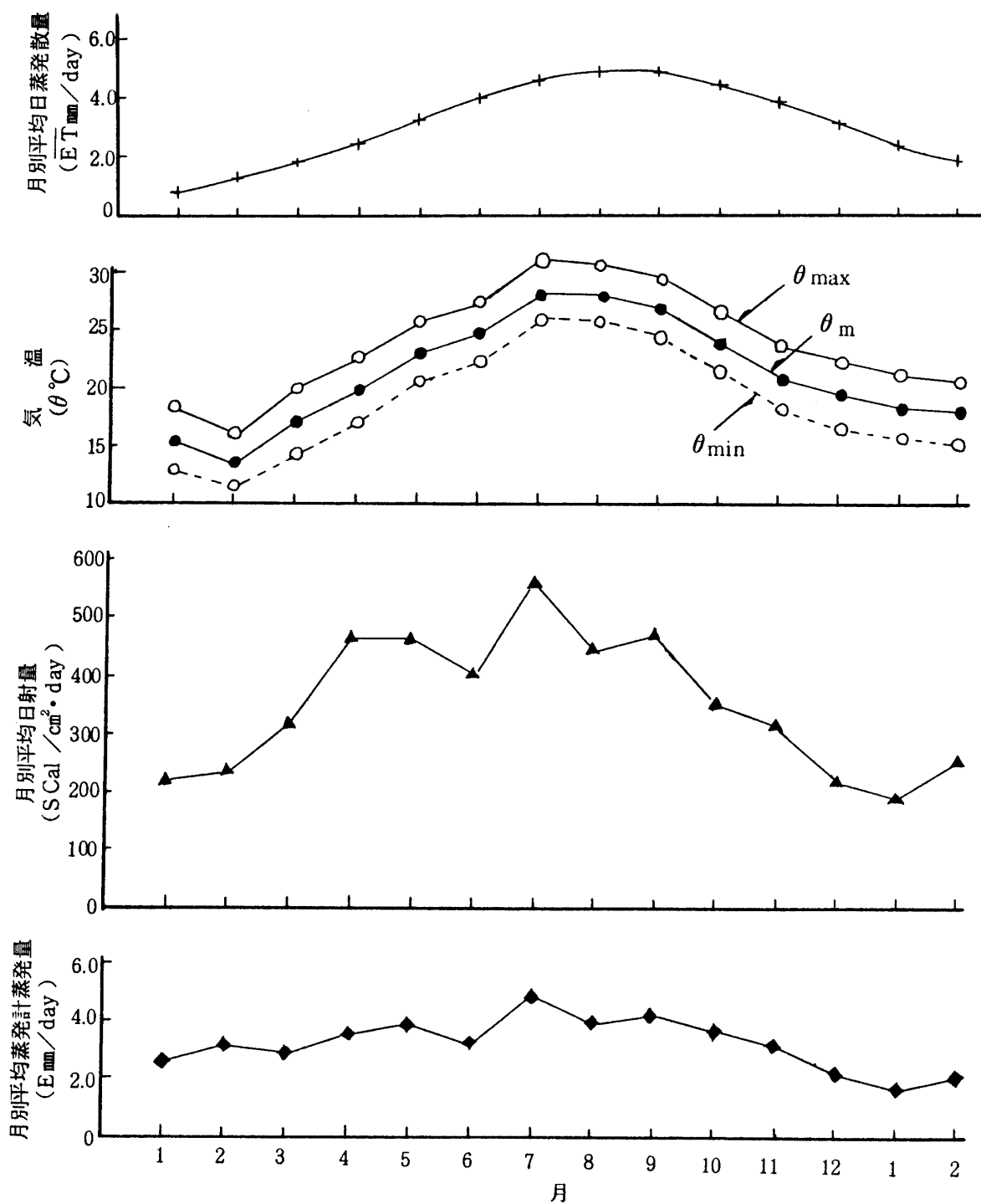


図2・12・2 サトウキビの月別平均日蒸発散量と気温，月別平均日射量  
および月別平均蒸発計蒸発量との関係(1968年~1969年)

注  $\theta_{max}$  : 日最高気温の月平均値  
 $\theta_{min}$  : 日最低気温の月平均値  
 $\theta_m$  : 月平均気温

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

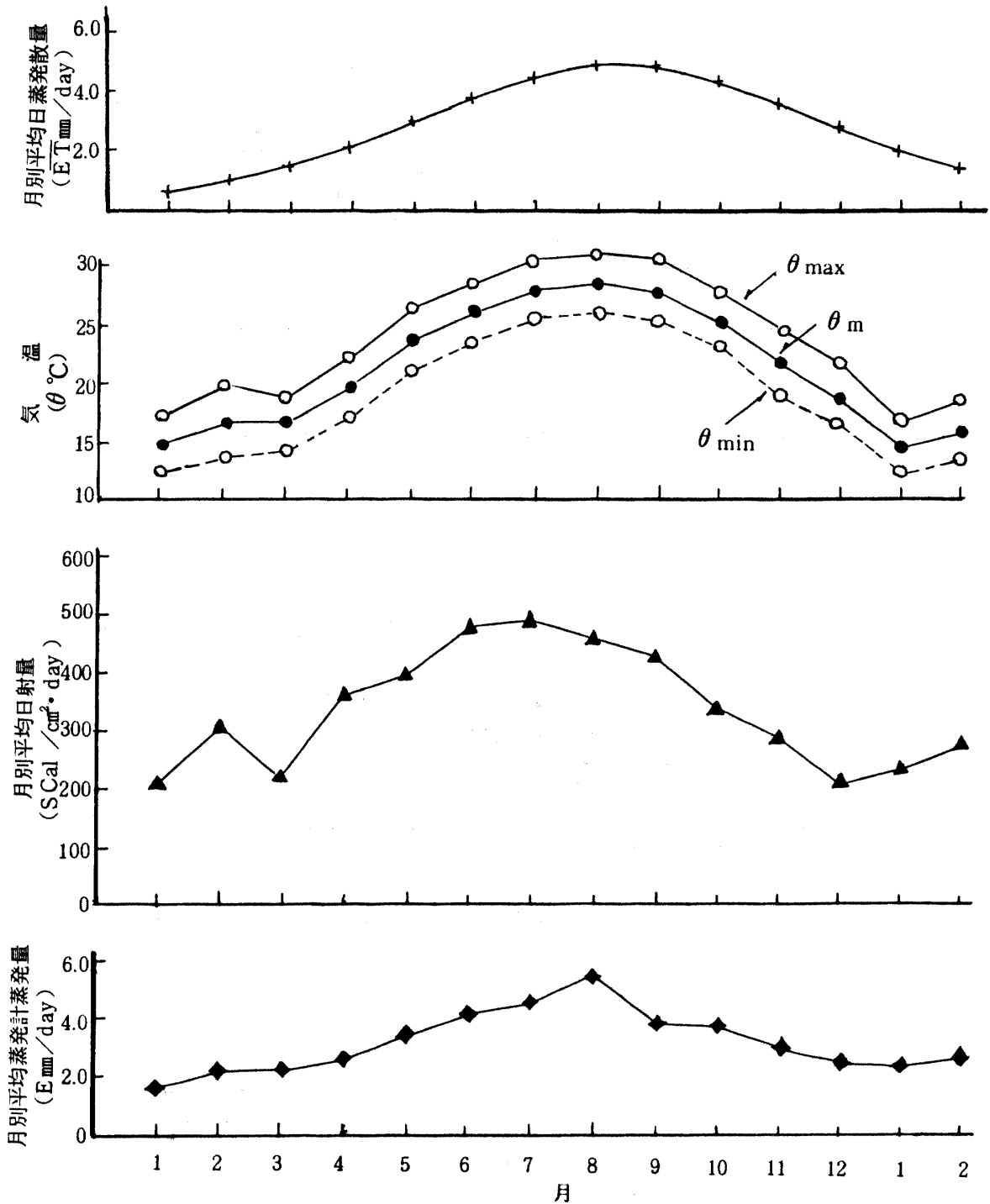


図2・12・3 サトウキビの月別平均日蒸発散量と気温，月別平均日射量および月別平均蒸発計蒸発量との関係(1970年~1971年)

注  $\theta_{max}$  : 日最高気温の月平均値  
 $\theta_{min}$  : 日最低気温の月平均値  
 $\theta_m$  : 月平均気温

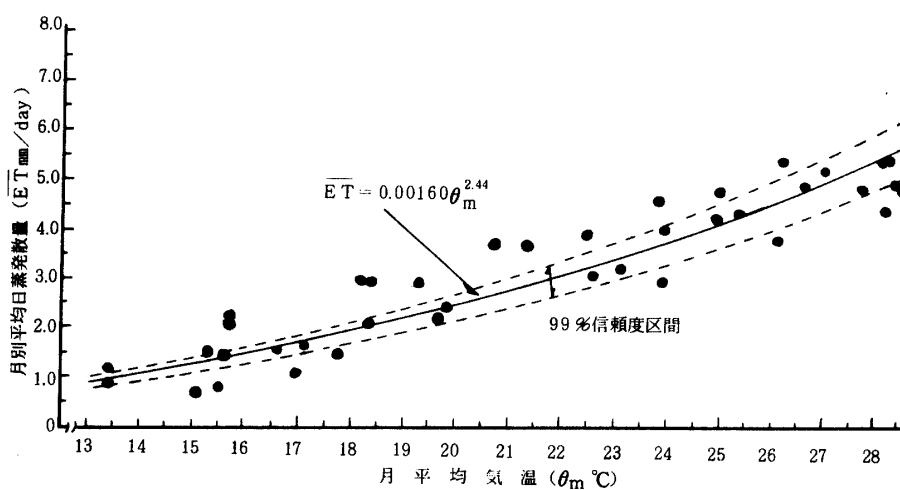


図2・13 サトウキビの月別平均日蒸発散量と月平均気温との関係

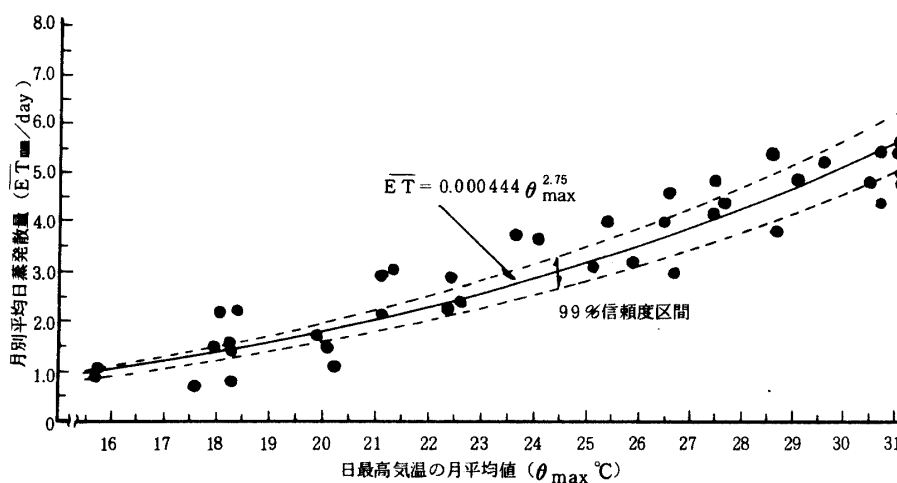


図2・14 サトウキビの月別平均日蒸発散量と日最高気温の月平均値との関係

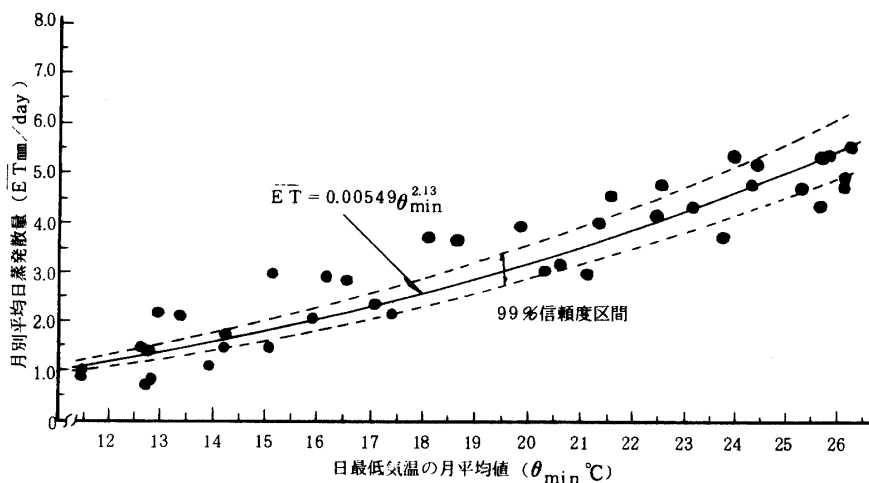


図2・15 サトウキビの月別平均日蒸発散量と日最低気温の月平均値との関係

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

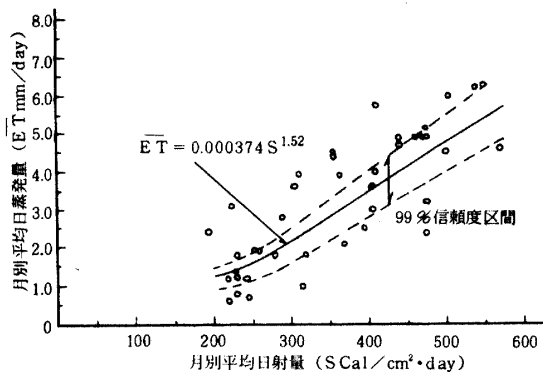


図 2・16 サトウキビの月別平均日蒸発散量と月別平均日射量との関係

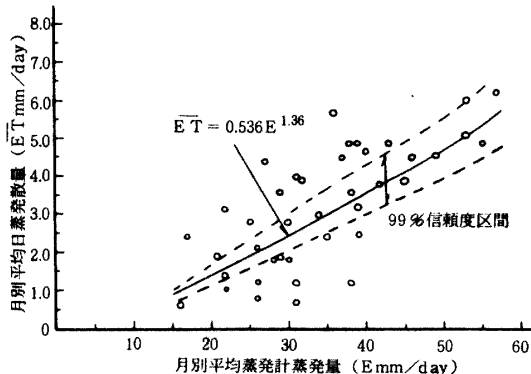


図 2・17 サトウキビの月別平均日蒸発散量と月別平均蒸発計蒸発量との関係

2 各気象要因からの推定値

図 2・18・1～図 2・18・3 に (2・9) 式～(2・13) 式を用いて推定したサトウキビの月別平均日蒸発散量を示す。これらの図における実線は (2・7) 式 (累積蒸発散量曲線) から求めた月別平均日蒸発散量曲線である。また月平均気温、日最高気温の月平均値および日最低気温の月平均値からの推定値はどの実験年次においてもほぼ同じ値となった。気温からの推定値を平均して、図 2・18・1～図 2・18・3 に破線で示した。これらの図によると、気象要因からの推定値が (2・7) 式によって求めた曲線にほぼ適合することがわかる。

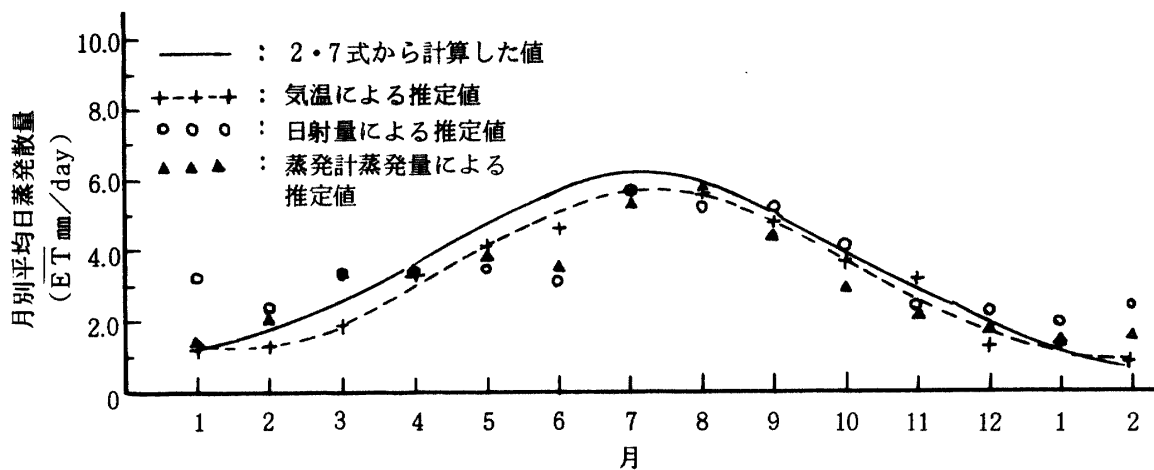


図 2・18・1 気象要因から推定したサトウキビの月別平均日蒸発散量 (1967～1968年)

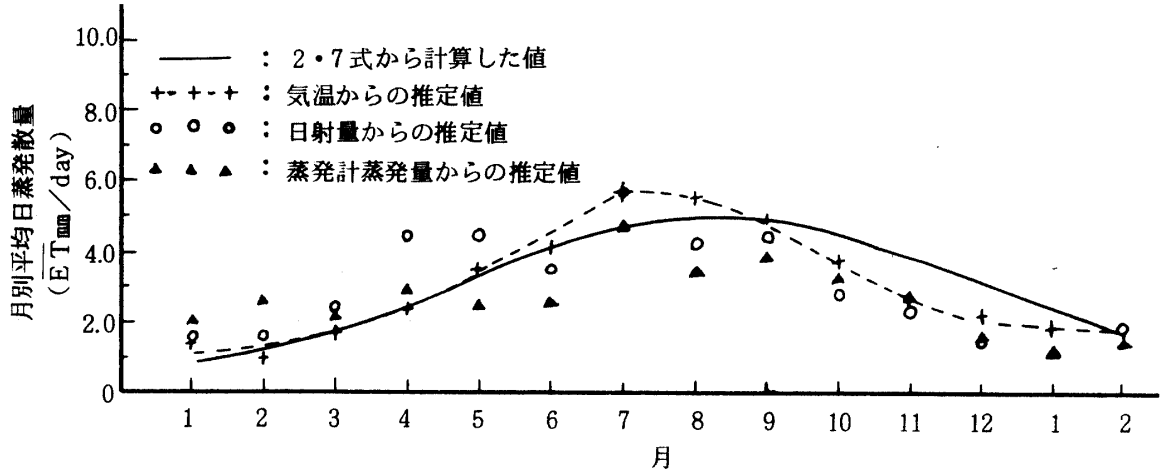


図2・18・2 気象要因から推定したサトウキビの月別平均日蒸発散量  
(1968年～1969年)

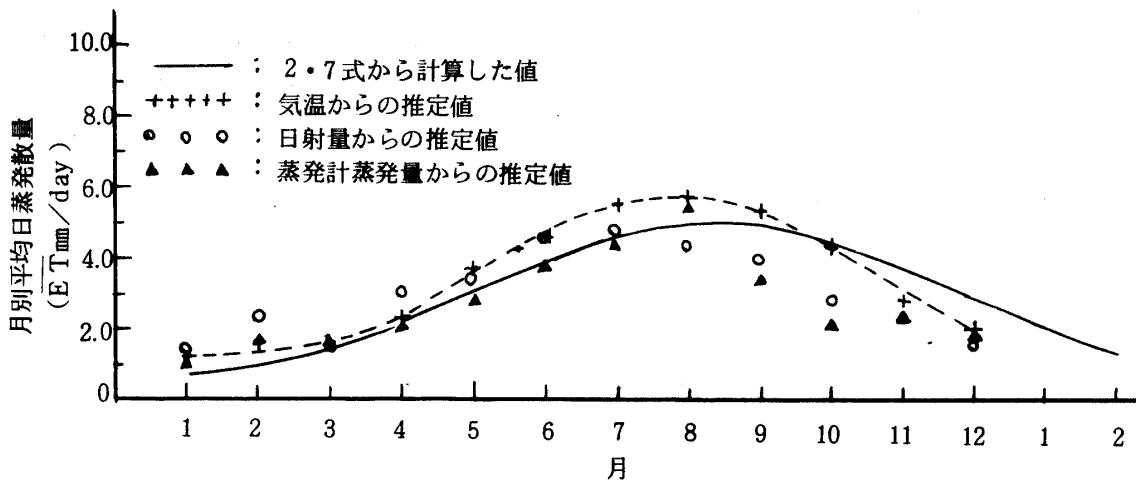


図2・18・3 気象要因から推定したサトウキビの月別平均日蒸発散量  
(1970年～1971年)

#### 第4節 考 察

図2・4・1～図2・4・4で明らかなように夏植サトウキビの累積蒸発散量は(2・5)式で表わされる。これを微分して得られる月別平均日蒸発散量曲線は一般に7月から9月にピークを示し、その前後においては次第に減少しある一定の値に漸近する。これらの曲線によると、ピーク時における月別平均日蒸発散量は約5～6mm/dayであり、最小値はほぼ1mm/dayである。ただし、1969年1月～1970年2月の実験で得られた曲線は、他の年次の実験結果に比べ、累積蒸発散量および月別平均日蒸発散量ともに小さい値を示している。このことは前述のように、この年は降雨量がとくに多かったためであると考えられる。

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

前述のように、作物の蒸散量は気温および日射量によって影響される。したがって、サトウキビの月別平均日蒸発散量もこれらの要因によって支配されると類推される。図2・12・1～図2・12・3は月別平均日蒸発散量と月平均気温、日最高気温の月平均値、日最低気温の月平均値、月別平均日射量および月別平均蒸発計蒸発量との関係を比較検討したものである。これらの図によると、各要因の変動に応じて、サトウキビの月別平均日蒸発散量が増減している。第3節で述べたように、サトウキビの月別平均日蒸発散量とこれらの要因との関係は、一般に次式で示されることが明らかとなった。

$$\overline{ET} = ax^n \dots\dots\dots (2 \cdot 8)$$

ここで

$\overline{ET}$  : 月別平均日蒸発散量

$x$  : 上記の気象要因

$a, n$  は定数

である。前述のように、(2・9)式～(2・13)式を両辺の対数をとることによって直線化し、99%の信頼度で得られた相関係数はそれぞれ0.92, 0.92, 0.92, 0.75, 0.67である。すなわち、月別平均日蒸発散量と気温との関係式においては、他の関係式の場合に比べて相関係数が大きい。このことは、(2・9)式～(2・13)式を用いて前述の各気象要因から推定した月別平均日蒸発散量と(2・7)式から求めた月別平均日蒸発散量とを比較検討した図2・18・1～図2・18・3においても推察されることである。なお、作物の蒸発散量に影響をおよぼす要因としては、さらに湿度、風速、土壌水分なども考えられるが、ここではこれらの要因との関係についての検討は行っていない。今後、各要因を細分化して、蒸発散量との関係を詳しく検討する必要があると考える。

### 第三章 サトウキビに対する一回のカン水量の決定

#### 第1節 概 説

一般に、土壌水分は化合水、吸着水、毛管水および重力水に大別され、このうち毛管水が最も作物に利用されうる水分である。作物の増産効果を最も期待できる有効土壌水分領域はホ場容水量から水分当量(生長阻害水分点)の範囲であることが明らかにされている<sup>11)</sup>、通常内地での畑地カンガイ計画に当たっても、有効土壌水分領域をホ場容水量(pF 1.8～pF 2.0)から水分当量(生長阻害水分点, pF 3.0)の範囲に設定している。

しかしながら、水資源に乏しい南西諸島の畑地カンガイ計画を立てるに当たっては、水分調節の範囲を正常生育有効水分の範囲よりも大きく取り、最低限、生理機能に障害を起こさないようにすることを前提とした計画についても検討を試みる必要がある。このような観点から、沖縄におけるサトウキビ栽培ホ場の有効土壌水分領域を決定するためにポット試験および現地調査を行い、純カン水量の検討を試みた。なお対象地区のホ場として、沖縄で干バツ被害がしばしば生ずる石灰岩土壌地帯のホ場を選定した。さらに、上記の結果と既往の研究結果に基づき、泥灰岩土壌地帯における純カン水量を計算し、石灰岩土壌地帯における純カン水量とを比較検討した。

#### 第2節 サトウキビの有効根群域

ホ場における有効水分の上限値および下限値が同じ値であっても、作物の根の活動範囲が大きいほど利用可能水分量は多くなる。したがって合理的なカンガイを行うためには、作物の有効根群域を把握する必要がある。著者は沖縄に広く分布する石灰岩土壌地帯のホ場におけるサトウキビの根の分布を明らかにするために、その根群域調査を行った。以下、その結果について検討する。

### 1 材料および調査方法

供試材料として石灰岩土地帯のホ場に栽培されたサトウキビ「N: Co, 310」を用いた。この品種は、現在沖縄で最も多く栽培されており、沖縄のサトウキビを代表するものである。調査を以下に述べる方法で行った。図3・1で示すように、まず根株を選定し、これを中心に半径60cm~70cmよりも外側の土壌をある程度掘り出し、そこに鉄骨および鉄筋で組み立てた根の固定装置を打ち込み、根株をこれに固定する。その後、鉄筋で作った針状の掘り取り器で土壌を取り除きながら、根が現われる度に、これを土壌中に存在していた時と同じ状態で固定装置に取り付ける。この要領で全根を掘り出し取り付けた後、固定装置ともに地上に引き上げ、根を地表面下10cmの深さごとに切り取る。煮沸と水洗によって土粒子その他を除去した根を自然乾燥させて、その風乾重量と長さを測定した。

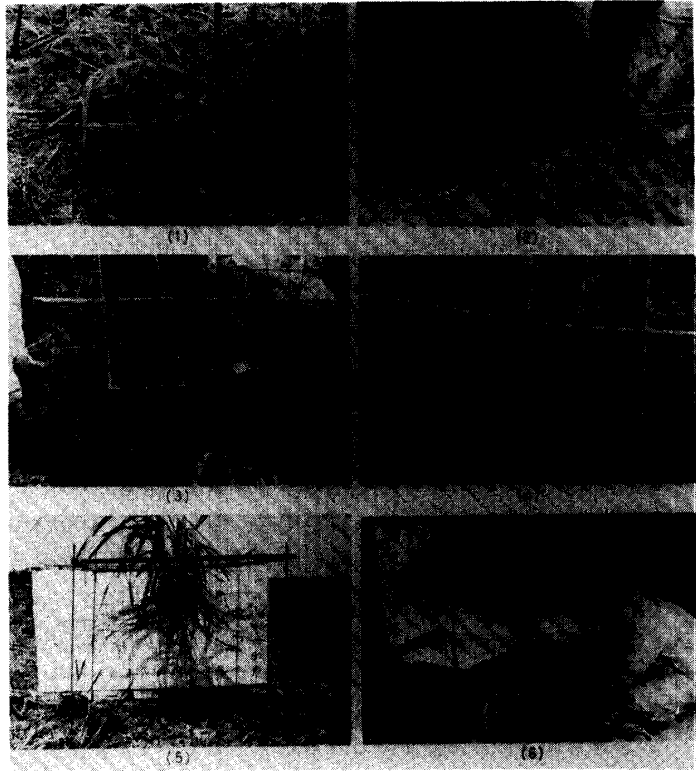


図3・1 サトウキビの根群域調査

### 2 調査結果および考察

著者は1968年2月以来、前述した方法で石灰岩土地帯のホ場、5地区において夏植サトウキビの根群域調査を行った。土壌中での根の状態を図3・2・1・1~図3・2・1・4(a)に示し、得られたデータに基づき、土壌表面を基準面として深さごとの根の風乾重量と長さの累計百分率を求めた結果を同図(b)に図示した。これらの図から明らかなように、風乾重量と長さの累計百分率はほぼ同じパターンを描いている。それゆえ、根群調査は根長または根の風乾重量のいずれかについて行えばその目的を果すことができる。図3・2・2は1973年3月に、国宮宮良川土地改良事業地区(八重山石垣市)で調査したデータを風乾重量の累計百分率によって示したものである。

これらの根群分布に基づき、深さに対する根の増加割合が急減している点を垂直方向の有効根群域の下限とした。すなわち、この点より下方に存在する根は、根の総量の5%程度であるので無視しても差し支えないとした。各測定地区におけるサトウキビの有効根群域を表3・1に示す。

根の分布は土壌の種類および土壌条件のみならず、耕耘条件および水分状態によっても変化する。表3・1によると、伊江村西崎と具志川市兼ヶ段におけるサトウキビの有効根群域は、とくに大きい値を示している。この理由は両地区のホ場がトラクタによって深耕されていることに起因すると推察される。また、久貝<sup>26)</sup>によると、カンガイ区におけるサトウキビの根も一般の場合と同様、無カンガイ区のそれと比べて、土層の浅い部分に多く分布する。

以上の調査から、沖縄の石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビの有効根群域は、大略40cm~50cmであることが明らかになった。

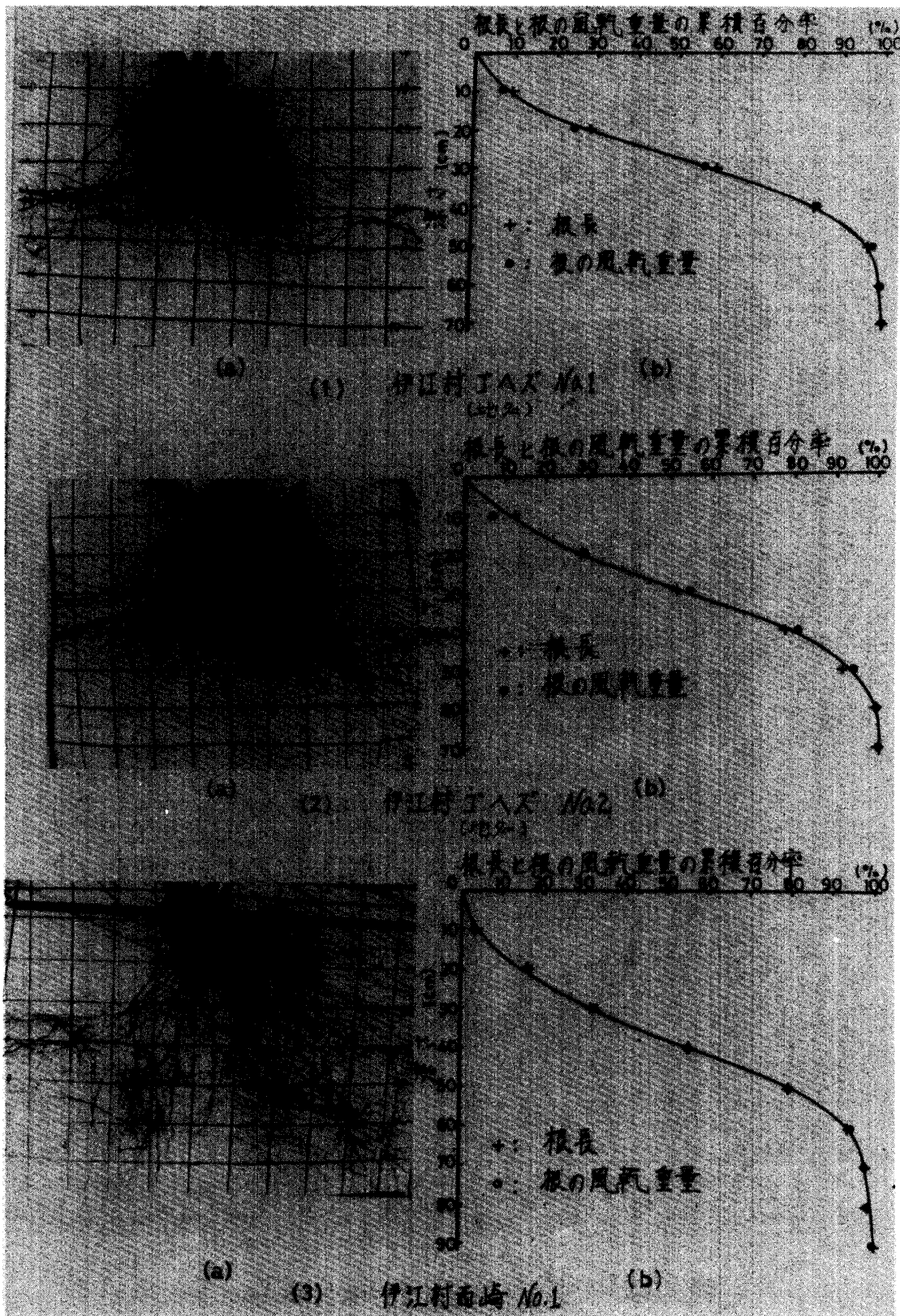


図3・2・1・1 サトウキビの根の垂直分布



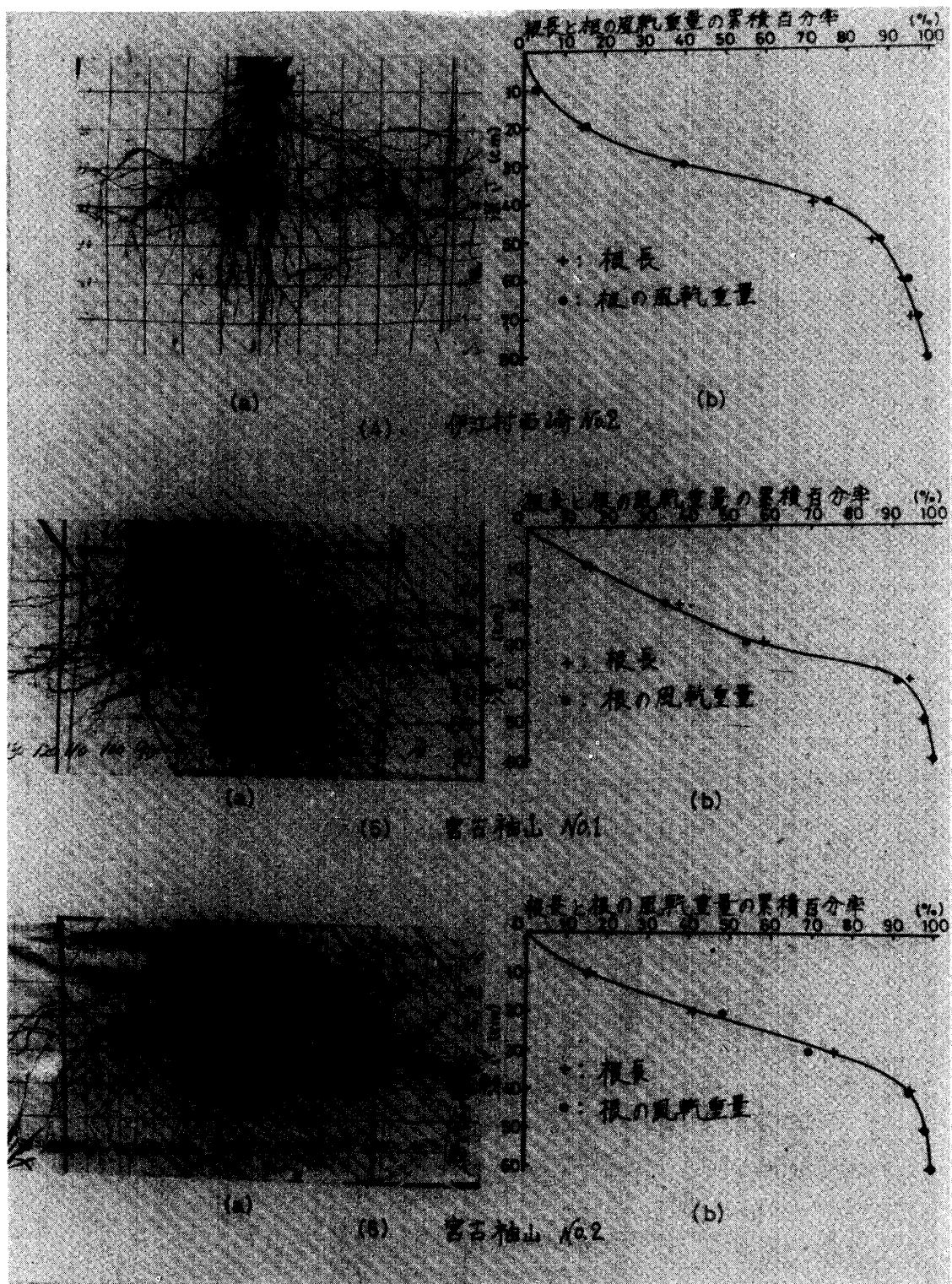


図3・2・1・2 サトウキビの根の垂直分布

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

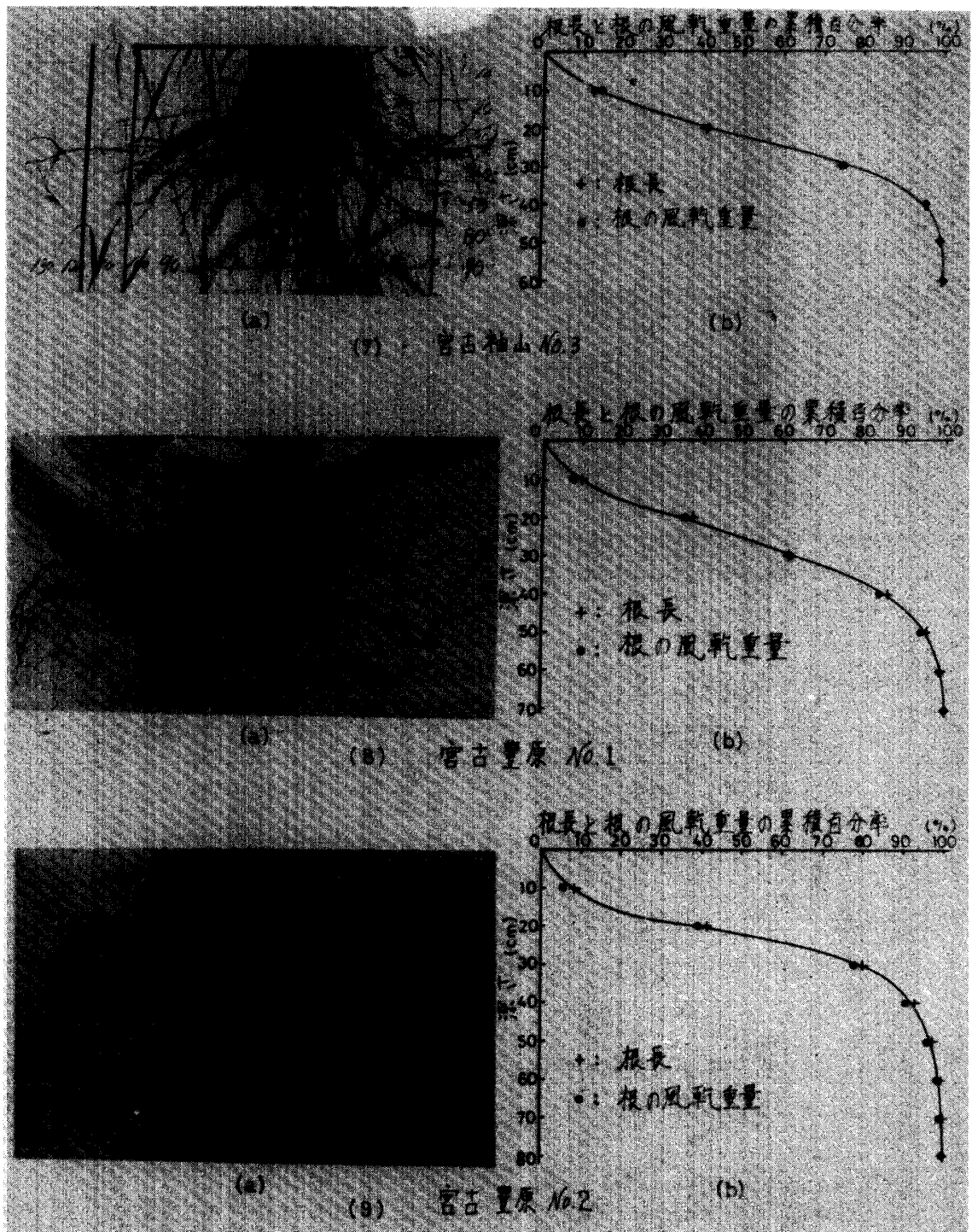


図3・2・1・3 サトウキビの根の垂直分布

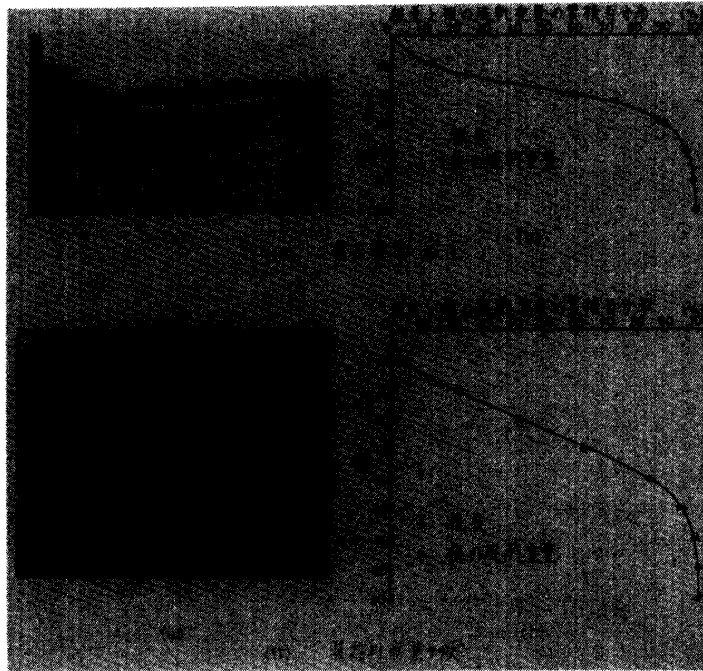


図3・2・1・4 サトウキビの根の垂直分布

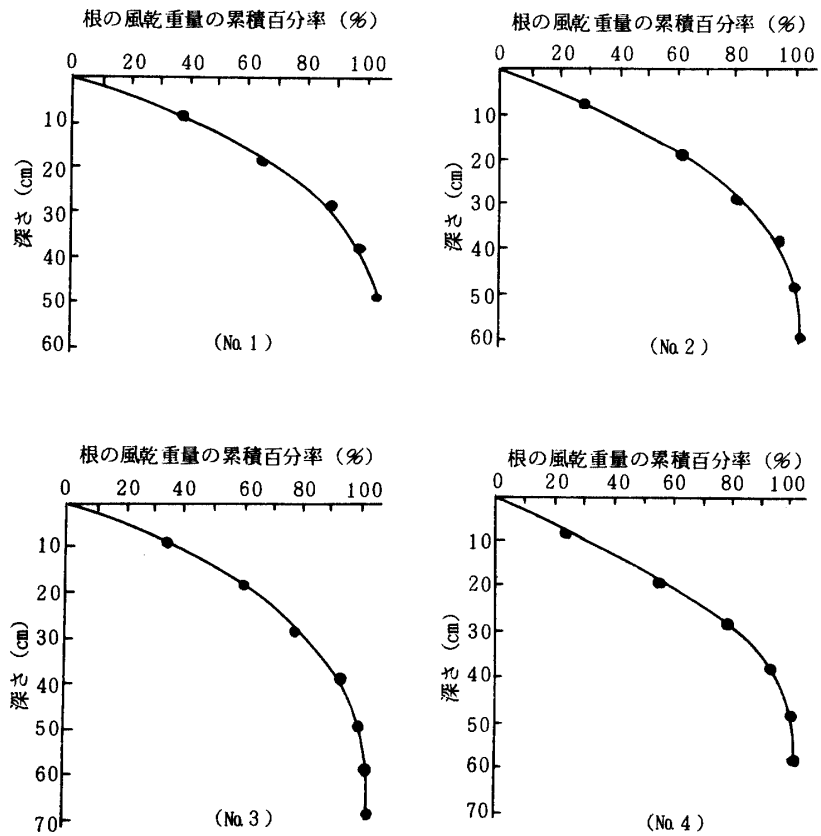


図3・2・2 サトウキビの根の垂直分布

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表3・1 サトウキビの有効根群域

地区名	No.	有効根群域 cm
伊江村	1	49
ゴヘズ	2	52
伊江村	1	60
西崎	2	54
宮古	1	45
平良市袖山	2	40
	3	40
宮古	1	45
上野村豊原	2	45
	3	36
具志川市兼ヶ段		60
八重山石垣市	1	40
	2	45
	3	47
	4	43

## 第3節 カンガイの上限値

カン水または降雨によって土壤中に保留された水分は、作物の蒸散作用および土壌面蒸発によって消耗される。土壌水分が過度に減少すると作物はシオレ現象を起こす。したがって、これを回避するために土壌水分を補給しなければならない。しかし、土壌の種類、有効土層の厚さ、有機質の有無などによって、土壌が保留しうる水分量には限界がある。そのため、過剰カン水は水の根群域外への浸透損失の増加を招き、水の有効利用の観点から不利となる。カンガイに際し、このような不利を避けるため、一般には有効土壌水分の上限値としてホ場含水量が採用される。ホ場含水量の定義は「過剰な重力水が排除されて水の下向き運動が著しく減じた後の土中残留水」であり、この場合、水に加わっている力はpF値で1.8～2.0である。畑地カンガイ計画では、一般に24時間含水量をホ場含水量とみなしている。著者は伊江村、今帰仁村、糸満市および八重山石垣市の石灰岩土壌地帯のホ場におけるホ場含水量を調査した。その結果に基づき、当該石灰岩土壌地帯のホ場におけるホ場含水量がいかなるpF値に対応しているかについて解析を試みた。

## 1 実験方法および調査方法

## i ホ場含水量に達する時間の検討

ホ場含水量以上の水分を土壌に補給した後、ホ場含水量に達する時間は土壌の種類によって異なる。山崎および長谷川<sup>79)</sup>によると、この時間は砂壤土で約5時間、ち密な粘質土壌では数日であると述べられている。著者は琉球大学農学部におけるビニールハウス内で、石灰岩土壌の水分変化過程を測定し、ホ場含水量に達する時間を検討した。地表面下10cm、20cmおよび30cmに埋設したテンションメータによって土壌水分を測定した。なお、重力水以外の水分（ここでは毛管水）の蒸発による水分減少を防止する目的で、実験開始後3日間はビニールシートで土壌表面を被覆して、土壌面蒸発を防止し、その後はこれを取り払い自由に土壌面蒸発を越こさせた。

図3・3に土壌水分の変化過程を示す。この図によると、土壌水分は初期の段階では急激に減少し、

次第にその減少率が小さくなっていく。この土壤水分が急激に減少している期間は、過剰な重力水が排除されるのに要する時間である。すなわち、これがホ場含水量に達する時間で、この図によると土層の深さによって異なるが、ほぼ20~40時間である。この図において、24時間含水量をホ場含水量とした場合の土壤含水比に対し、カン水20時間後または40時間後の土壤含水比は3%程度の差違しか認められない。したがって、沖縄の石灰岩土地帯のホ場においても24時間含水量をホ場含水量とみなしてよいと考えられる。

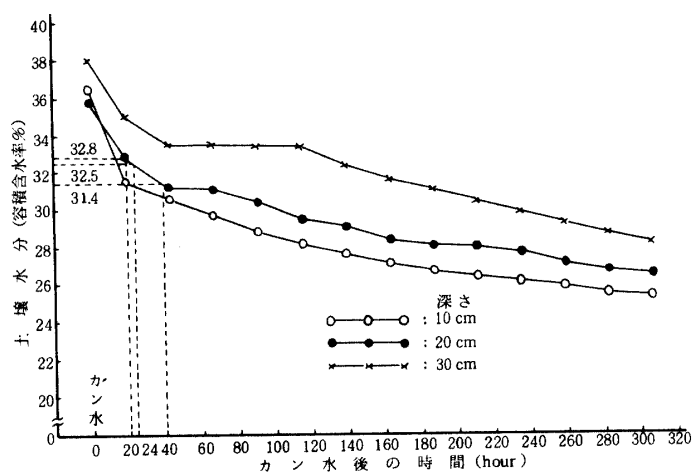


図3・3 土壤水分の変化過程

### ii 現地におけるホ場含水量の調査

前述の結果に基づき、十分カン水した後ホ場含水量に達する時間として24時間を用い、現地ホ場におけるホ場含水量を調査した。以下にその調査方法について説明する。

ホ場において、まず各測点とも約1m×1mの土壤表面をならし、その周囲は盛土して水が流出しないようにする。次に十分カン水し、ビニールシートで土壤表面を被覆しておく。約24時間経過した後、地表から10cmごとの深さで定容積採土を行い、含水比を測定してホ場含水量とした(表3・3・1~表3・3・4)。また一回のカン水量を計算するには、容積含水率が必要なので次式によって含水比および仮比重の測定値から容積含水率を求めてこれらの表に示した。

$$W_v = W_M \times S \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 1)$$

ここで

- $W_v$  : 容積含水率
- $W_M$  : 含水比
- $S$  : 仮比重

である。なお、調査対象地区は伊江村、今帰仁村、糸満市および八重山石垣市の石灰岩土地帯のホ場である。

### iii pF-水分曲線

ホ場含水量は重力に抗して土壤中に保持される水分量である。したがって、ホ場含水量は土壤の種類によって異なるが、ホ場含水量に対応している力はほぼ一定である。この力は一般の土壤ではpF 1.8~pF 2.0程度のものである。

一般に土壤水分を定義する場合、水分量そのもので定義するのではなく、土壤が水分を保持している力で定義される。つまり、この力を重力単位で表わし、水柱の高さ(cm)に換算してその対数値で示したpF値で土壤水分を定義している。このpF値と水柱および気圧との関係は表3・2に示すとおりである。pF値の測定法としては吸引法、加圧法、遠心法などがあるが、ここでは吸引法と遠心法を併用した。すなわち、pF 1.0~pF 2.0は吸引法、pF 2.0~pF 4.0は遠心法を用いて測定し、pF-水分曲線を作成した。このpF-水分曲線に基づき、ホ場含水量とpF値との関係を検討した。

## 2 結果

前述した方法で調査したホ場含水量を仮比重およびpF値とともにまとめると表3・3・1~表3・3・4

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

のようになる。これらの表におけるpF値は、各測点とも深さごとにpF-水分曲線を作成し、これからホ場含水量に対応する値を読みとったものである。

表3・2 pF値と水柱高および気圧との関係

pF	項目	水柱高 (cmm)	気 圧 (近似値)	備 考
0		1	1 / 1000	最大含水量
1.0		10	1 / 100	
1.9		79	1 / 13	石灰岩土壌におけるホ場含水量
2.7		501	1 / 2	
3.0		1000	1	水分当量
3.8		6310	6	サトウキビに対するカンガイの下限値
4.2		15849	15	永久シオレ点

表3・3・1 ホ場含水量とpF値との関係(石灰岩土壌)

測定地区 (年月)	項目	測 点	深 さ (cm)	ホ場含水量 (含水比%)	仮比重	ホ場含水量 (容積含水率%)	pF
伊 江 村 (1970年8月)	1		5	31.61	0.77	24.34	2.15
			15	33.68	0.94	31.66	1.95
			25	35.47	1.05	37.24	1.90
			35	33.56	0.91	30.54	2.00
	2		5	29.55	1.01	29.85	1.80
			15	31.50	0.95	29.93	1.80
			25				
	3		5	27.00	0.89	24.03	1.70
			15	26.89	0.92	24.74	2.00
			25	30.60	0.87	26.62	1.65
			35	38.00	0.94	35.72	1.90
	4		5	31.03	0.99	30.72	1.80
			15	33.45	1.02	34.12	1.70
			25				
	5		5	28.61	1.03	29.47	2.10
			15	32.50	0.85	27.63	1.80
			25	34.51	0.89	30.71	1.70
			35	31.86	0.87	27.72	2.00
	6		5	33.56	0.94	31.55	1.85
			15	33.72	0.94	31.70	1.95
			25				
	7		5	27.87	1.17	32.61	1.95
			15	27.04	1.39	37.59	2.30
			25	29.35	1.36	39.92	1.65
			35	29.97	1.07	32.07	1.95
	8		5	25.10	1.11	27.86	1.75
			15	24.66	1.11	27.37	1.85
			25	26.71	1.15	30.72	1.85
			35	24.16	1.08	26.09	1.75

表3・3・2 ホ場容水量とpF値との関係 (石灰岩土壌)

測定地区 (年月)	項目	測点	深さ (cm)	ホ場容水量 (含水比%)	仮比重	ホ場容水量 (容積含水率%)	pF
今 婦 仁 村 (1972年10月)	1		10	30.92	0.88	27.21	1.70
			20	29.42	0.85	25.01	1.81
			30	27.95	0.82	22.92	1.96
			40	27.99	0.93	26.03	2.06
	2		10	30.53	0.80	24.42	1.82
			20	39.87	0.71	28.31	1.76
			30	36.64	0.84	30.78	1.60
			40	39.12	0.83	32.47	1.55
	3		10	25.00	1.00	25.00	1.97
			20	27.67	0.88	24.35	1.78
			30	27.22	0.91	24.77	1.81
			40	37.50	0.79	29.63	2.15
	4		10	30.32	1.00	30.32	1.84
			20	38.72	0.75	29.04	1.50
			30	28.06	0.96	26.94	1.97
			40	32.08	0.82	26.31	2.18

表3・3・3 ホ場容水量とpF値との関係 (石灰岩土壌)

測定地区 (年月)	項目	測点	深さ (cm)	ホ場容水量 (含水比%)	仮比重	ホ場容水量 (容積含水率%)	pF
糸 満 市 (1972年7月)	1		10	26.26	0.93	24.42	2.04
			20	24.51	0.99	24.26	2.20
			30	24.78	0.91	22.55	2.19
			40	28.47	0.89	25.34	1.93
	2		10	28.11	0.86	24.17	1.80
			20	26.68	0.97	25.88	1.93
			30	26.87	0.88	23.65	1.91
			40	26.36	0.83	21.88	2.07
	3		10	25.65	0.89	22.83	2.03
			20	26.86	0.86	23.10	1.88
			30	38.18	0.76	29.02	2.13
			40	39.66	0.74	29.35	2.00
	4		10	32.93	0.91	29.97	1.80
			20	31.41	0.87	27.33	1.80
			30	40.02	0.79	31.62	1.85
			40	38.70	0.67	25.93	1.95
	5		10	28.38	0.88	24.97	1.80
			20	28.98	0.90	26.08	1.75
			30	28.73	0.91	26.14	1.76
			40	31.28	0.81	25.34	1.67
	6		10	31.27	0.77	24.08	1.97
			20	38.73	0.78	30.21	1.50
			30	39.85	0.76	30.29	1.70
			40	38.28	0.92	35.22	1.80

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表 3・3・4 ホ場容水量とpF値との関係（石灰岩土壌）

測定地区 (年月)	項目	測点	深さ (cm)	ホ場容水量 (含水比%)	仮比重	ホ場容水量 (容積含水率%)	pF	
石垣市 (1975年10月)	1		5	25.74	1.15	29.60	1.85	
			15	25.40	1.27	32.26	1.85	
			25	22.08	1.35	29.81	1.90	
			35	25.61	1.33	34.06	1.80	
	2			5	22.16	1.24	27.48	1.75
				15	22.00	1.25	27.50	1.90
				25	23.53	1.36	32.00	1.85
				35	21.24	1.53	32.50	1.95
	3			5	21.80	1.13	24.63	1.50
				15	24.42	1.29	31.50	1.90
				25	17.96	1.42	25.50	2.00
				35	21.67	1.29	27.95	1.95
	4			5	16.78	1.43	24.00	2.05
				15	18.31	1.42	26.00	1.95
				25	18.94	1.47	27.84	1.60
				35	21.89	1.45	31.74	1.90
	5			5	19.18	1.46	28.00	1.85
				15	20.53	1.51	31.00	1.75
				25	19.35	1.43	27.67	2.00
				35	20.91	1.35	28.23	2.00
	6			5	25.48	1.20	30.58	1.70
				15	26.29	1.25	32.86	2.00
				25	26.81	1.34	35.93	1.85
				35	32.96	1.15	37.90	2.10
	7			5	28.10	1.21	34.00	1.85
				15	27.31	1.30	35.50	1.85
				25	34.40	1.25	43.00	1.70
				35	36.81	0.94	34.60	1.90
	8			5	28.57	1.05	30.00	1.95
				15	31.58	1.13	35.69	1.60
				25	28.95	1.33	38.50	1.85
				35	24.48	1.22	29.87	1.85
	9			5	31.33	1.02	31.96	1.50
				15	23.53	1.19	28.00	1.90
				25	28.91	1.28	37.00	1.85
				35	24.89	1.18	29.37	1.90

## 3 考察

表 3・3・1～表 3・3・4 に示すように、同じ石灰岩土壌地帯のホ場でも、ホ場容水量は測点および土層によって多少異なった値を有する。これは各測点の土壌構造が全く同じではないために当然のことである。したがって、ホ場容水量を論ずるに当っては、土壌水分量そのもので定義するのではなく、土壌が水分を保持し得る力を要因として定義することを新しく検討した方がよいと考えられる。このよ



うな理由から、当該石灰岩土地帯のサトウキビ栽培ホ場におけるホ場含水量がいかなるpF値に対応しているかについて解析を試みた。

図3・4は表3・3・1～表3・3・4に基づき、ホ場含水量に対応するpF値の度数分布図を地区別にまとめたものである。この図によると、各地区の度数分布図はほぼ同じ型を示しており、pF値は1.8～2.0に最も多く分布しているし、pF値の平均も約1.9でほぼ同じ値となっている。すなわち、石灰岩土地帯におけるホ場含水量に対応するpF値の地区による差はほとんどないと推察される。したがって、各地区の全データを用いて度数分布図をまとめて図3・5に示した。図3・6はこのpF値と土層の深さとの関係を全データを用いて検討したものである。この図によると、pF値は大略1.5～2.2の範囲で変動しているが、pF値と土層の深さとの間に定かな関係は見られない。すなわち、土層の深さによるpF値の差はほとんどないものと考えられる。以上の結果、ここでは図3・5を用いてホ場含水量とpF値との関係を解析した。

ホ場含水量に対応するpF値の度数分布曲線が正規分布をするものと仮定し、正規分布関数を当てはめ、 $\chi^2$ 分布によって適合度の検定を行った。

正規分布関数は正規密度関数の $x$ の変域を $-\infty \sim x$ にとった累加相対密度に相当する関数で次の式によって示される<sup>24)</sup>。

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \\ = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \dots \dots \dots (3 \cdot 2)$$

ここで

$$-\infty < x < +\infty$$

$\mu$ : 母平均

$\sigma^2$ : 母分散

である。標本数が102あり、その大きさは各種検定を行うに際し十分であると考えられる。したがって、母平均 $\mu$ および母分散 $\sigma^2$ をそれぞれの統計量 $X$ および $S^2$ に等しいとみなして計算すると、

$$\mu \doteq \bar{X} = \sum f_i X_i / N$$

$$\sigma^2 \doteq S^2 = \sum f_i (X_i - \bar{X})^2 / N \quad (N = \sum f_i)$$

級上限の変量を $X_i$ 、級下限のそれを $X_{i-1}$ とし、この級間の期待度数を $F_i$ とすると(3・2)式から

$$F_i = N \int_{X_{i-1}}^{X_i} \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-\bar{X})^2}{2S^2}} dx \dots \dots \dots (3 \cdot 3)$$

正規偏差 $Z$ の変域を

$$\alpha = (X_{i-1} - \bar{X}) / S$$

$$\beta = (X_i - \bar{X}) / S$$

とおくと(3・3)式は(3・4)式となる。

$$F_i = N \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Z^2}{2}} dx \dots \dots \dots (3 \cdot 4)$$

この期待度数 $F_i$ は正規確率表 $\Phi(Z)$ を用いて、(3・5)式で計算することができる。

$$F_i = N \{ A(\beta) - A(\alpha) \} \dots \dots \dots (3 \cdot 5)$$

以下、表3・4・1および表3・4・2によって平均値、分散および期待度数を計算し、表3・5に示すように $\chi^2$ 分布によって適合度の検定を行った。表3・5で階級数が8であるから、自由度を $n$ とすると $n = 8 - 3 = 5$ 、危険率 $\alpha = 0.20$ とすると $n = 5$ の $\chi_{0.20}^2$ の値は $\chi^2$ 表によると7.29である。表3・5

によると  $\chi^2_c = 4.41$  である。すなわち、 $\chi^2_c < \chi^2_{\alpha}$  となり、この分布を正規分布とみなしてよいことがわかった。したがって、測定結果の分布は正規分布であるとみなして、母平均値の区間推定を行った。標本平均値、母平均値、不偏分散をそれぞれ  $\bar{X}$ 、 $\mu$ 、 $S$  として危険率  $\alpha$  に対する  $t$  の値を  $t_{\alpha}$  とすると、(3・6) 式によって  $1 - \alpha$  の信頼度で  $\mu$  の区間を推定することができる。

$$\bar{X} - t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots (3 \cdot 6)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N f_i (X_i - \bar{X})^2}{N - 1} \dots\dots\dots (3 \cdot 7)$$

表 3・4・1 から  $\sum_{i=1}^N f_i \bar{X} = 192.60$ 、 $\sum_{i=1}^N f_i (X_i - \bar{X})^2 = 2.8302$  であるので、

$$\bar{X} = \frac{\sum f_i \bar{X}}{N} = \frac{192.60}{102} = 1.89$$

$$S^2 = \frac{\sum f_i (X_i - \bar{X})^2}{N - 1} = \frac{2.8302}{102 - 1} = 0.0280, S = 0.1674$$

$\alpha = 0.20$ 、自由度  $N - 1 = 102 - 1 = 101$  であるから  $t$  分布表によって  $t_{\alpha} = t_{0.20} = 1.289$  となる。ゆえに (3・6) 式から

$$1.89 - 1.289 \times \frac{0.1674}{\sqrt{102}} \leq \mu \leq 1.89 + 1.289 \times \frac{0.1674}{\sqrt{102}} \quad 1.87 \leq \mu \leq 1.91$$

したがって、 $\mu$  の区間は (1.87 ~ 1.91) となる。このことは母平均が (1.87 ~ 1.91) の間に 80 % の信頼度で存在することを意味する。すなわち、本地区のような石灰岩土壌地帯のホ場におけるホ場容量は  $pF$  値で示すと約 1.9 であることが明らかとなった。

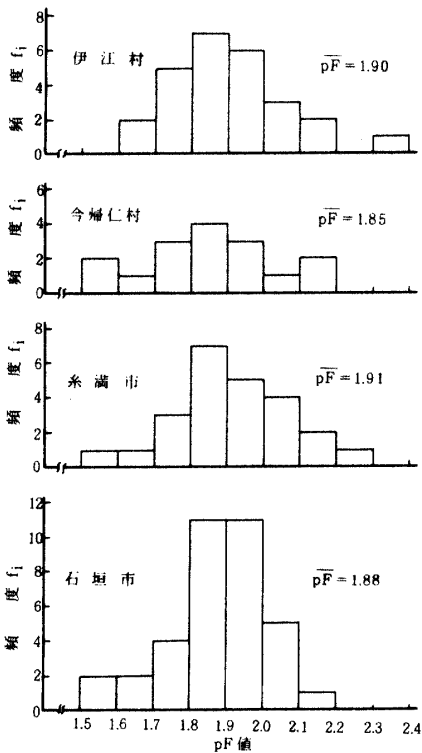


図 3・4 ホ場容量に対応する  $pF$  値の度数分布 (地区別)  
注  $p\bar{F}$ :  $pF$  の平均値

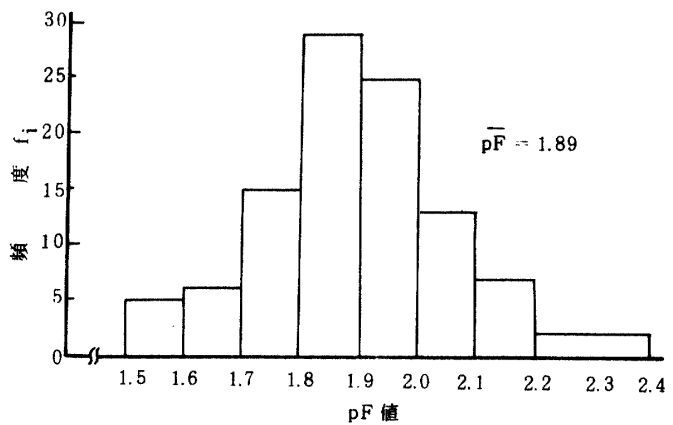


図 3・5 ホ場容量に対応する  $pF$  値の度数分布 (全体)  
注  $p\bar{F}$ :  $pF$  の平均値

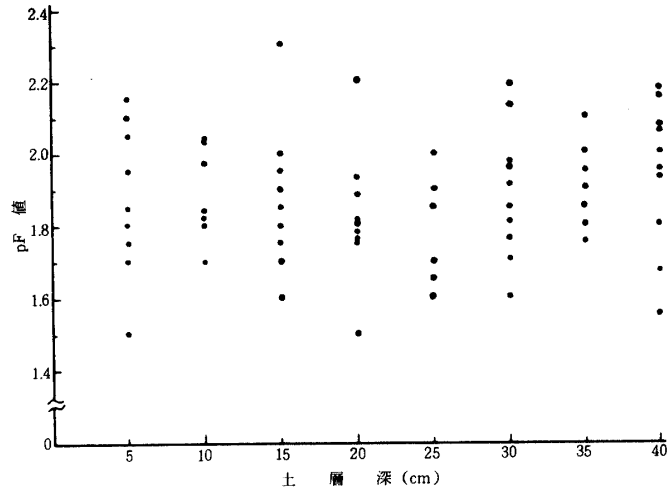


図3・6 ホ場含水量に対応するpF値と土層の深さとの関係

表3・4・1 ホ場含水量に対応するpF値の度数計算(1)

区 間 $X_{i-1} \sim X_i$	中央値 $\dot{X}$	度数 $f_i$	$f_i \cdot \dot{X}$	下 限 値			上 限 値		
				$X_{i-1}$	$X_{i-1} - \bar{X}$	$f_i(X_{i-1} - \bar{X})^2$	$X_i$	$X_i - \bar{X}$	$f_i(X_i - \bar{X})^2$
1.50 ~ 1.60	1.55	5	7.75	1.50	-0.39	0.7605	1.60	-0.29	0.4205
1.60 ~ 1.70	1.65	6	9.90	1.60	-0.29	0.5046	1.70	-0.19	0.2166
1.70 ~ 1.80	1.75	15	26.25	1.70	-0.19	0.5415	1.80	-0.09	0.1215
1.80 ~ 1.90	1.85	29	53.65	1.80	-0.09	0.2349	1.90	0.01	0.0029
1.90 ~ 2.00	1.95	25	48.75	1.90	0.01	0.0025	2.00	0.11	0.3025
2.00 ~ 2.10	2.05	13	26.65	2.00	0.11	0.1573	2.10	0.21	0.5733
2.10 ~ 2.20	2.15	7	15.05	2.10	0.21	0.3087	2.20	0.31	0.6727
2.20 ~ 2.40	2.30	2	4.60	2.20	0.31	0.1922	2.40	0.51	0.5202
計		102	192.60			2.7022			2.8302

$$\mu \doteq \bar{X} = \sum f_i \cdot \dot{X} / N = 192.60 / 102 = 1.89$$

$$\sigma_{i-1}^2 \doteq S_{i-1}^2 = \sum f_i (X_{i-1} - \bar{X})^2 / N = 2.7022 / 102 = 0.0265$$

$$\therefore S_{i-1} = 0.1628$$

$$\sigma_i^2 \doteq S_i^2 = \sum f_i (X_i - \bar{X})^2 / N = 2.8302 / 102 = 0.0277$$

$$\therefore S_i = 0.1666$$

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表 3・4・2 ホ場含水量に対応するpF 値の度数計算(2)

区 間 $X_{i-1} \sim X_i$	下 限 値		上 限 値		$F = N\{A(\beta) - A(\alpha)\}$
	$\alpha = \frac{(X_{i-1} - \bar{X})}{S_{i-1}}$	$A(\alpha)$	$\beta = (X_i - \bar{X})/S_i$	$A(\beta)$	
1.50 ~ 1.60	-2.3956	-0.49170	-1.7407	-0.45913	3.32
1.60 ~ 1.70	-1.7813	-0.46257	-1.1405	-0.37296	9.14
1.70 ~ 1.80	-1.1671	-0.37841	-0.5402	-0.20547	17.64
1.80 ~ 1.90	-0.5528	-0.20980	0.0600	0.02392	23.84
1.90 ~ 2.00	0.0614	0.02448	0.6603	0.24547	22.54
2.00 ~ 2.10	0.6757	0.25038	1.2605	0.39626	14.88
2.10 ~ 2.20	1.2899	0.40145	1.8607	0.46861	6.85
2.20 ~ 2.40	1.9042	0.47155	3.0612	0.49889	2.79
計					101.00

表 3・5  $\chi^2$ 分布による適合度の検定

区 間 $X_{i-1} \sim X_i$	観察度数 f	期待度数 F	f - F	$(f - F)^2 / F$
1.50 ~ 1.60	5	3.32	1.68	0.85
1.60 ~ 1.70	6	9.14	-3.14	1.08
1.70 ~ 1.80	15	17.64	-2.64	0.40
1.80 ~ 1.90	29	23.84	5.16	1.12
1.90 ~ 2.00	25	22.54	2.46	0.27
2.00 ~ 2.10	13	14.88	-1.88	0.24
2.10 ~ 2.20	7	6.85	0.15	0.00
2.20 ~ 2.40	2	2.79	-0.79	0.22
計	102	101.00		$4.18 = \chi^2_c$

## 第 4 節 カンガイの下限値

カンガイは一般に、根系層でのある土壌区分層内の土壌水分が作物の有効土壌水分領域の下限値に達する前に行われなければならない。第1節で述べたように、水資源に乏しい南西諸島のカンガイ計画を立てるに当っては、有効水分の範囲を作物がその生存を保証される範囲に拡大して考える必要がある。この観点から、沖縄におけるサトウキビに対するカンガイの下限値を決定するために、ポット試験およびホ場試験を行った。

ポット試験では、まずハウス外で土性の異なる5種類の土壌を用いて、サトウキビのシオレ現象発現時点における土壌水分の状態を明らかにした。さらにビニールハウス内で石灰岩土壌を用いて土壌水分

を調整して、土壌水分とサトウキビの生育状況との関係について検討を試みた。一方ホ場試験では、サトウキビが実際に初期シオレ現象を起こしているホ場における土壌水分とそのpF値との対応を検討した。なお、初期シオレ時の判定に際しては、サトウキビの葉に巻き込み現象が現われ始めた時をその発現時点とし、その時点における土壌水分を測定した。ポット試験およびホ場試験の結果は次のとおりである。

## 1 ポット試験

### i 初期シオレ発現時点における土壌水分

この試験に用いたポットは砂、碎石および礫石で作成したフィルター層を持つ6ケのコンクリート製ポットであり、直径75cm、深さ60cmのものを用了。これらのポットに表3・6に示す5ヶ地区の土壌を入れ、サトウキビ「N:Co, 310」を栽培した。耕土層を第2節の結果に基づき40cmとし、1971年8月3日に1ポット当り2株のサトウキビを植付けた。生育初期においては通常の肥培管理および水管理を行い、サトウキビを順調に生育させた。その後、一般にサトウキビが一番被害を受けると考えられる7月にシオレ現象を起こさせるため、6月下旬からカン水を停止した。図3・7・1にサトウキビがシオレ現象を起こしている場合の葉の状態を示す。この写真によると、サトウキビの葉先は大部分が巻き込まれ針状になっている。図3・8・1および図3・8・2に正常な生育をしているサトウキビ(左)と初期シオレ現象を起こしているサトウキビ(右)を示した。この初期シオレの状態までは、カン水するとサトウキビは正常生育にもどるが、土壌水分がさらに減少すると、図3・7・2のように巻き込みの度合いが大きくなり葉は黄化し、ついに枯死状態へと変っていく。

サトウキビの初期シオレが生じた時点の土壌水分を採土法によって測定した。ここでは各ポットとも2点ずつ測点を設け、地表から2.5, 10, 20, 30, 35cmの各深さに採土管の中心を合わせて採土した。この時の採土管は直径5cm、高さ5cmの円筒であり、その容量は100ccである。一回の採土が済むとカン水しサトウキビを正常生育にもどして、これに再度シオレ現象を起こさせ土壌水分を測定し、その結果を表3・7のようにまとめた。この表の値は各深さととも2ヶのデータの平均値で示した。この表に示す結果に基づき、1回目のデータと2回目のデータについて、別々に分散分析を行った結果、いずれの場合にもシオレ時における土壌水分の土壌の種類による有意性は認められたが、耕土層内の各土層深による有意性は認められなかった。また、1回目と2回目のデータをまとめて多変量分散分析を行った結果でも同様な結果が得られた。すなわち、サトウキビがシオレ始める時の土壌含水比は土壌の種類によって異なるが、耕土層内の土層の深さによってはその差は認められないことになる。

表3・6 ポット試験に用いた土壌

ポットNo	土 壤 名	採 取 地
1	砂 質 土	美 里 村
2	泥 灰 岩 土 壤	那 覇 市 石 嶺
3	石 灰 岩 土 壤	宜 野 湾 市
4	石 灰 岩 土 壤	宜 野 湾 市
5	国頭マージ土壌	名 護 市
6	ニ ー ビ 土 壤	那 覇 市 久 場 川

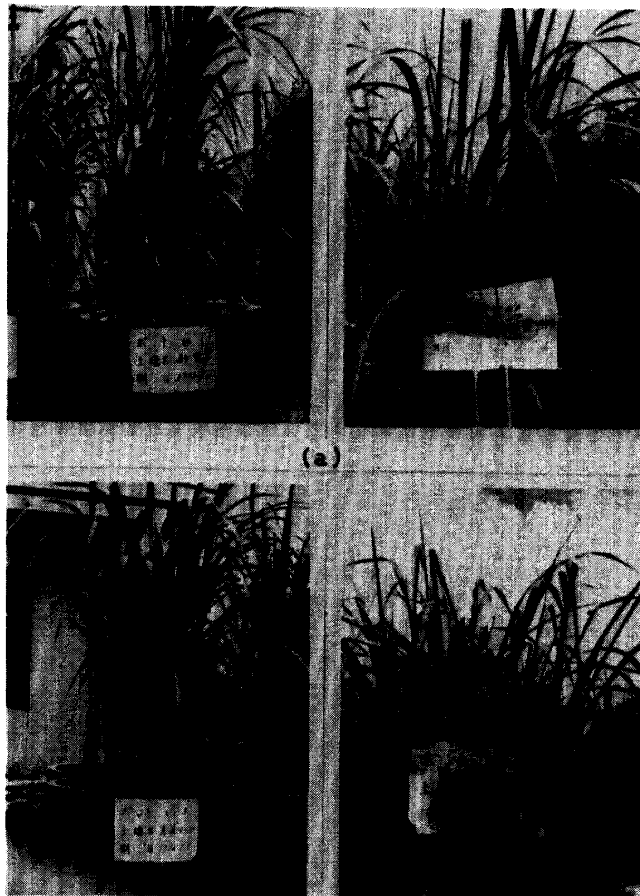
山城：サトウキビに対する畑地カンガイ



図3・7・1 シオレ現象を起こしているサトウキビの葉の状態 (1)

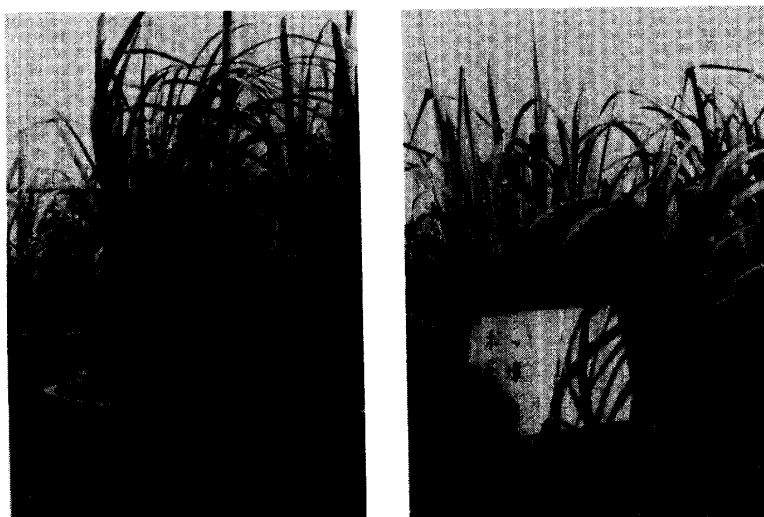


図3・7・2 シオレ現象を起こしているサトウキビの葉の状態 (2)



(b)

図3・8・1 ポットによるサトウキビのシオレ試験



(c)

図3・8・2 ポットによるサトウキビのシオレ試験

表3・7 カンガイ目標のためのサトウキビの初期シオレ発現時点における各土層の土壤水分

ポット No.	土 壤 名	深 さ cm	土 壤 水 分 (含 水 比) %			
			1 回 目	2 回 目	最 小 値	備 考
1	砂 質 土	2.5		8.35	7.1	1 回 目 7 月 5 日 2 回 目 7 月 18 日
		10	7.89	8.59		
		20	7.12	8.16		
		30	6.92	7.63		
		35		7.26		
2	泥 灰 岩 土 壤	2.5	20.10		20.1	7 月 8 日
		10	21.67			
		20	21.97			
		30	21.27			
		35				
3	石 灰 岩 土 壤	2.5		21.83	20.3	1 回 目 7 月 3 日 2 回 目 7 月 15 日
		10	21.47	21.25		
		20	21.53	22.49		
		30	20.93	20.77		
		35	20.21	20.30		
4	石 灰 岩 土 壤	2.5		18.34	19.0	1 回 目 7 月 3 日 2 回 目 7 月 15 日
		10	19.72	19.80		
		20	19.99	20.62		
		30	20.33	20.38		
		35	20.26	20.11		
5	国 頭 マ ー ジ 土 壤	2.5		15.84	15.4	1 回 目 7 月 5 日 2 回 目 7 月 18 日
		10	16.22	16.36		
		20	16.05	17.05		
		30	15.00	17.06		
		35				
6	ニ ー ビ 土 壤	2.5	10.16		7.8	7 月 18 日
		10	9.27			
		20	9.15			
		30	8.74			
		35	7.81			

## II 土壌水分とサトウキビの生育状況との関係

著者は、1976年にビニールハウス内においてサトウキビをポット栽培し、土壌水分とサトウキビの生育状況との関係を検討した。その結果を図3・9～図3・13に示す。なお供試土壌としては石灰岩土壌を用い、重量法によって土壌水分を制御した。

図3・9は制御した土壌水分に対応するpF値とサトウキビの日蒸発散量との関係を示すものである。この図によるとpF 2.8（水分当量付近）、pF 3.2およびpF 3.9におけるサトウキビの日蒸発散量の變動に相互の間で類似した傾向が見られ、何れもその値が大きい。しかし、これに反し、pF 4.2（萎凋係数）においては日蒸発散量の變動範囲が小さく、その値も小となっていることが明らかに観察できる。

作物の蒸散量は葉面における蒸気圧と大気中の蒸気圧に影響されるので、葉温と気温によって蒸散量は変化すると考えられる。したがって、作物の水分生理に影響を与える土壌水分と葉温および気温の間に何らかの関係があると推察される。図3・10に著者がこれらの関係を明らかにする目的でサトウキビについて行った実験結果を示す。この図は土壌水分とサトウキビの葉温と気温の差との間に深い関係があることを示している。すなわち土壌水分に対応するpF値の増加にともない、葉温と気温の差は増加し、pF値がある一定の値に達するとこれは減少傾向を示すと考えられる。この図によると、pF 3.8（初期シオレ点）内外の土壌水分において、葉温と気温の差のピークが現われると推察される。一般に土壌水分が減少し、土壌が水分を保持している力が大きくなるにしたがって、植物が水分を吸収するには大きな力が必要となり、蒸散量は少なくなってくる。植物が正常な生育をしており、植物体内から葉面への水分移動が十分行われている間は、外部から葉面に与えられる熱量が一定であるならば、単位時間に葉面から外部へ出て行く水分量（蒸散量）が少なくなるにしたがって、葉温は上昇すると考えられる。しかしながら、蒸散量が極端に少なくなると、葉における水収支のバランスがとれなくなり、葉自体の水分が減少し、植物の生理機能に障害をきたし、葉温も次第に低下してくると推論される。本実験によると、pF 3.8内外の土壌水分でサトウキビはその生理機能に障害をきたし始めると考えられる。

図3・11で示すようにpF 2.8、pF 3.2およびpF 3.9におけるサトウキビの乾物重量は時間の経過とともに増大している。しかしこれに反しpF 4.2においてはこれは減少していることが明らかである。

図3・12によると、サトウキビの地上部の含水率はpF 2.8、pF 3.2およびpF 3.9において同様な變動を示し、その値に類似性が認められる。しかしながら、pF 4.2の場合のみは含水率が小さく異なった傾向を示している。

さらに図3・13によると、pF 2.8、pF 3.2およびpF 3.9におけるサトウキビの光合成速度は同様な増加傾向を示し、その値もほぼ同じである。しかし、pF 4.2においては光合成速度は光の強度が約30 Kluxまでは増加傾向にあり、その後はほとんど変化しない。またpF 4.2における光合成速度は極端に小さい値となっている。光合成速度は、着生葉を用いて、通気式の同化箱法により赤外線炭酸ガス分析計（Beckman-Tōshiba 315-A）を用いて測定した。すなわち、赤外線炭酸ガス分析計を用いて、同化箱の入口と出口の炭酸ガス濃度を測定し、その濃度の差によって炭酸ガス交換速度を求めた。

以上、土壌水分とサトウキビの蒸発散量、葉温、乾物重量、含水率および光合成速度との関係について検討した。その結果、サトウキビに対するカンガイの下限値としては、初期シオレ点すなわちpF 3.8前後における土壌水分が適当であると結論した。なお、ここで用いた資料は著者と琉球大学農学部教授宮里清松、同助教授村山盛一、同助手野瀬昭博の共同研究に基づくものである。



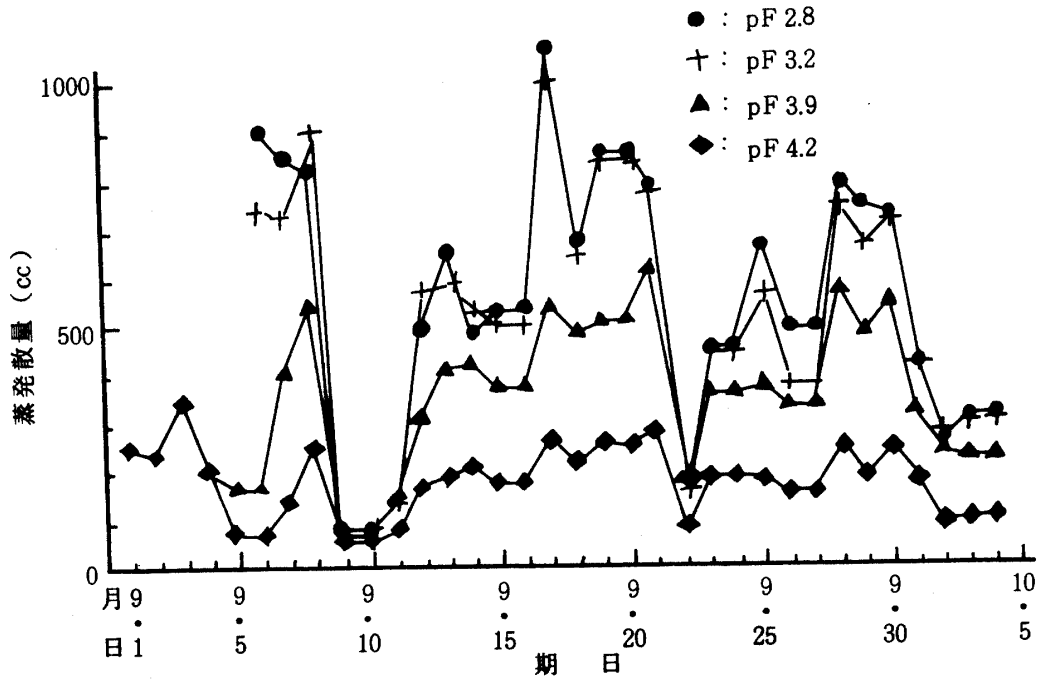


図3・9 各pF値における日蒸発散量の変化 (pot栽培, 1976年)

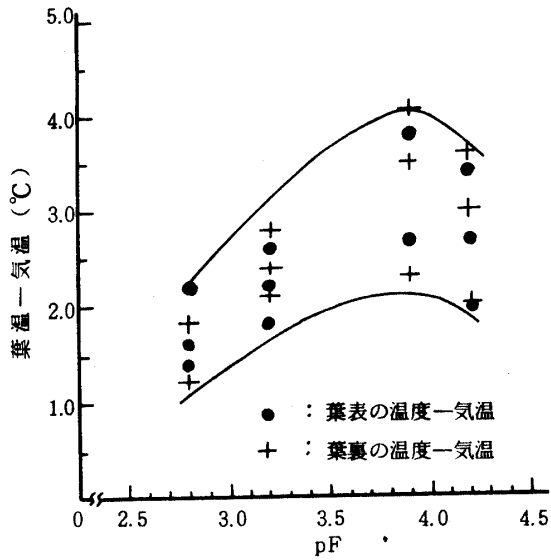


図3・10 pFと葉温との関係 (pot栽培)

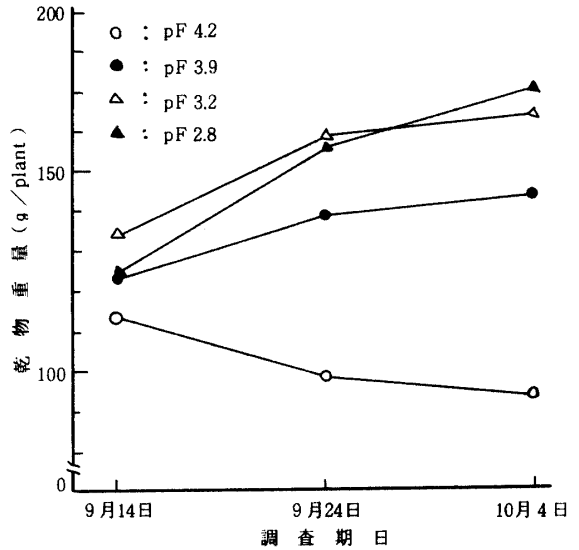


図3・11 地上部乾物重量の経時変化

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

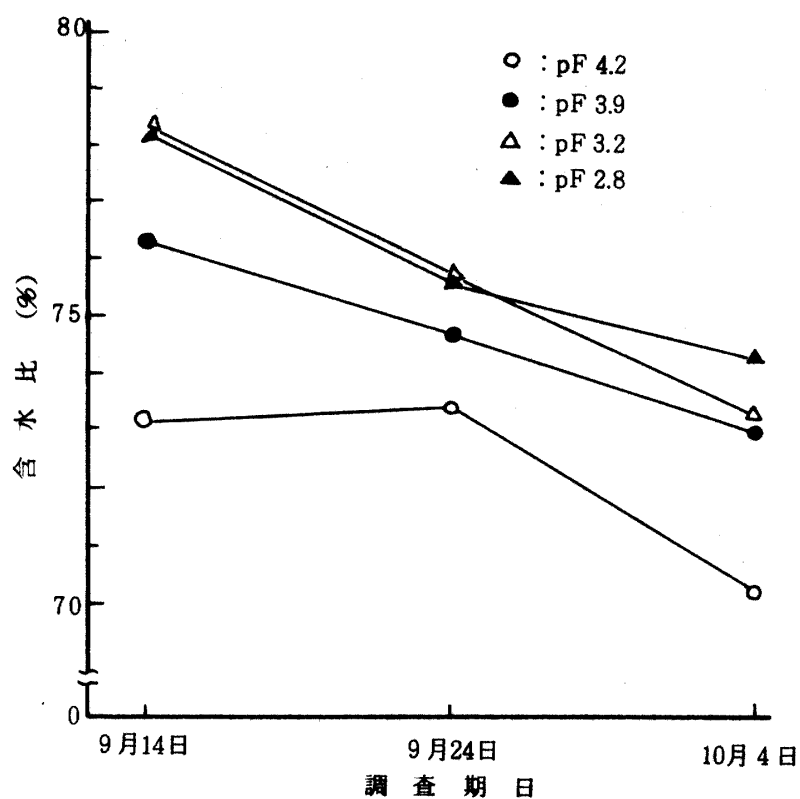


図3・12 地上部の含水率の経時変化

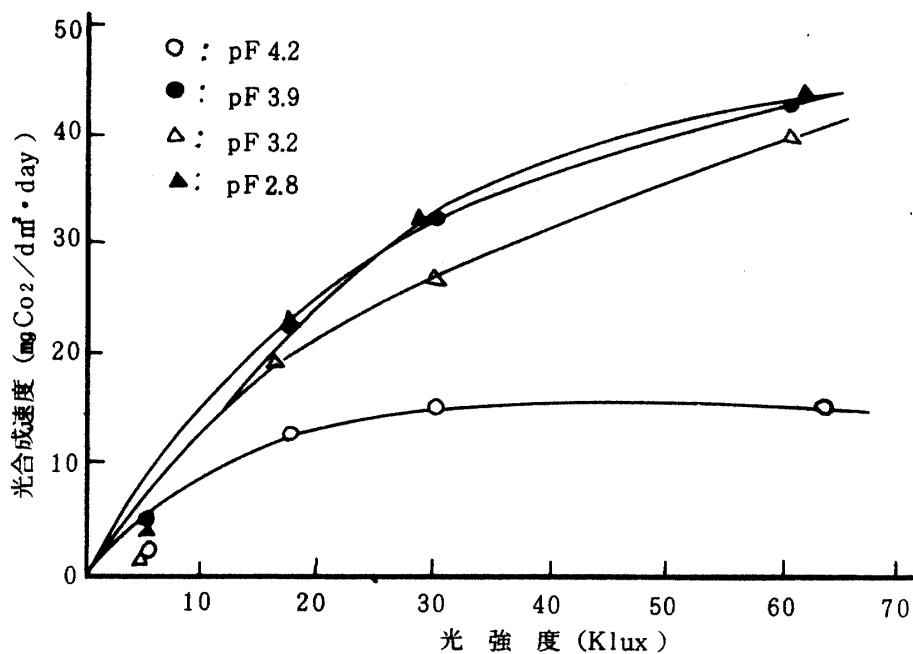


図3・13 各区における光・光合成速度曲線

## 2 現地調査

第IV章で述べるように、宮古におけるサトウキビはほぼ1年おきに干バツ被害を受けているが、とく

に1963年と1971年には大干バツにみまわれた。また、八重山諸島、沖縄本島中南部と北部の本部半島、伊江島、久米島、南北両大東島などに分布する石灰岩土地帯におけるサトウキビはほぼ同程度の干バツ被害を受けている。これらの石灰岩土地帯においては、サトウキビの初期シオレ現象は夏期にほとんど毎年現われている。琉球政府農林局耕地課の調査によると、1971年の大干バツ年の宮古におけるサトウキビ栽培ホ場の土壌含水比は表3・8に示すとおりである。また、この表には著者が独自で1970年に伊江村西部土地改良事業地区で調査したデータをまとめて添付した。なお、伊江村のデータは当時同地区でのサトウキビのとくにひどいシオレ現象を起こしていたホ場での調査結果である。図3・14はサトウキビのシオレ現象を示す1例である。この写真は1972年に琉球大学農学部附属農場のサトウキビ栽培ホ場で撮影されたものである。(1)は著者がサトウキビの蒸発散量測定を継続しているホ場であり、カンガイを実施しているため、サトウキビが正常に生育していることを示している。(2)、(3)および(4)はカンガイを実施していないため、サトウキビがシオレ現象を起こしている状態を示している。

さらに、著者は1973年7月に糸満市山城でサトウキビのシオレ点調査を行った。すなわち、サトウキビの葉のシオレ現象が始まってまもない三つのホ場 (No. 1, No. 2, No. 3) を選び、採土法によって土壌水分調査を行った。

前述のポット試験に基づくと、サトウキビに対するカンガイの下限値としては、pF 3.8 前後における土壌水分が適当であると考えられる。以下、この土壌水分と現地ホ場においてサトウキビがシオレ始める時の土壌水分とについて比較検討を試みた。

図3・15に示す土壌のpF - 水分曲線は、先にサトウキビのシオレ点調査を行った糸満市山城の試験ホ場No. 1について作成したものである。試験ホ場No. 2およびNo. 3についても同様な傾向が得られた。これらのpF - 水分曲線から各深さごとにpF 1.9とpF 3.8における土壌水分を読みとり、これとサトウキビの初期シオレ時におけるホ場の土壌水分とを対比したのが図3・16・1および図3・16・2である。図3・16・1から、サトウキビのシオレ現象が現われ始める時には、上層部の土壌水分はカンガイの下限値であるpF 3.8に対応する土壌水分(容積含水率、No. 1ホ場で25.8%, No. 2ホ場で22.8%)より小さくなっていることが明らかである。この図に比べ、図3・16・2はシオレ現象がさらに進み、深部の土層においてもサトウキビが土壌水分欠乏をきたしている状態を示している。

表3・8 干バツ時のホ場における土壌水分(石灰岩土壌)

期 日	地 区 名	深 さ cm	土 壌 水 分 ( 重 量 含 水 比 ) %			
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
1970年 8月10日	伊 江 村	5	16.91	18.38	14.85	12.38
		15	16.50	21.18	16.82	18.15
		25	20.13	21.62	18.86	20.00
		35	18.62	25.09	27.59	22.28
1971年 9月18日	上野村大嶺	2.5	10.62	19.63	18.34	
		10	23.08	25.06	23.02	
		20	23.52	33.71	23.91	
		30	37.07	35.22	36.27	
		40	30.85	40.65	29.88	

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

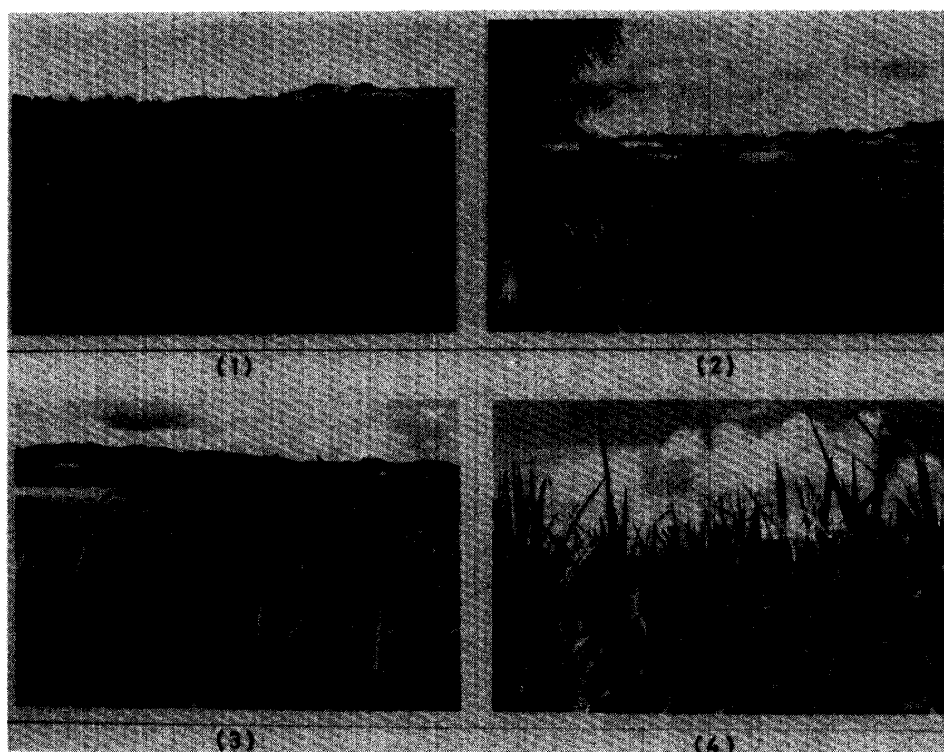


図3・14 ホ場におけるサトウキビのシオレ現象

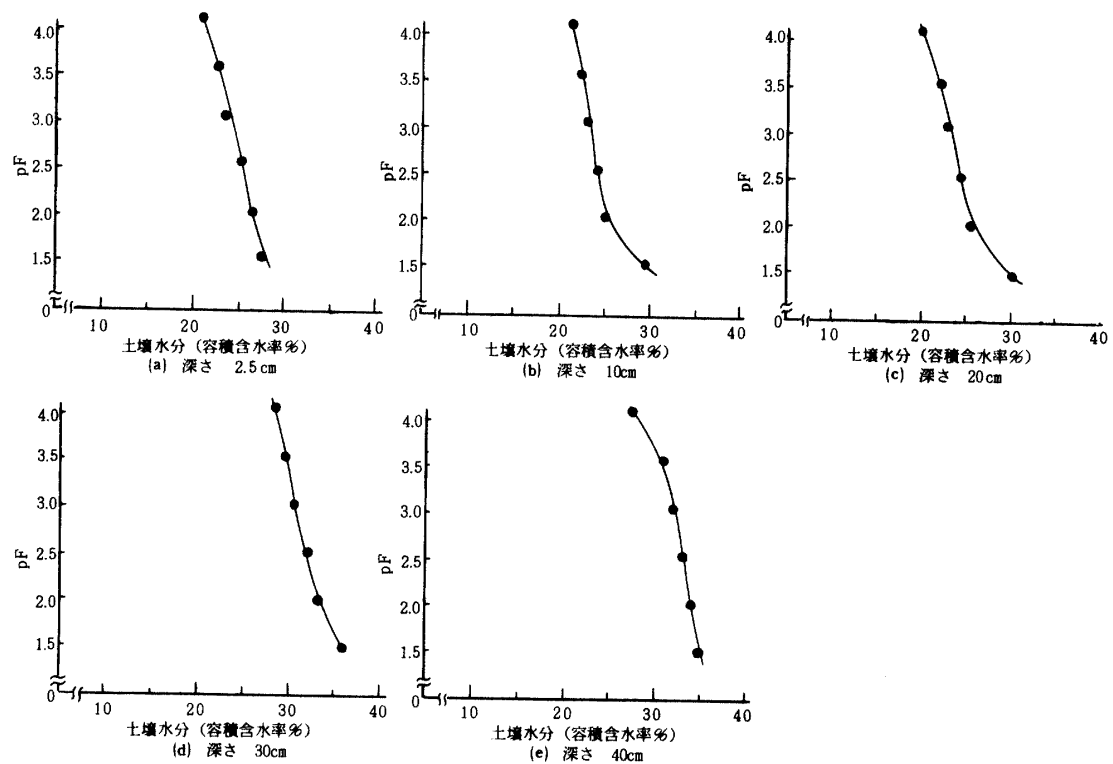


図3・15 pF-水分曲線(糸満市山城No.1)

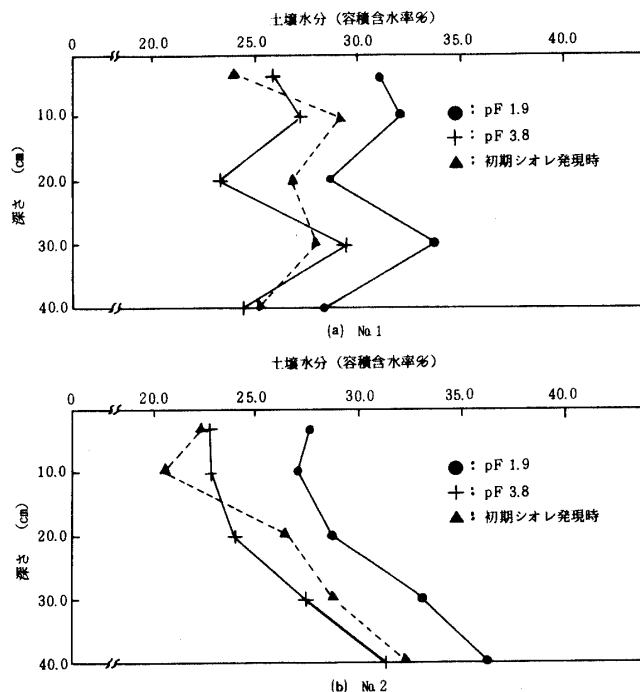


図3・16・1 利用可能水分量の範囲とサトウキビの初期シオレ発現時における土壌水分の分布 (糸満市山城)

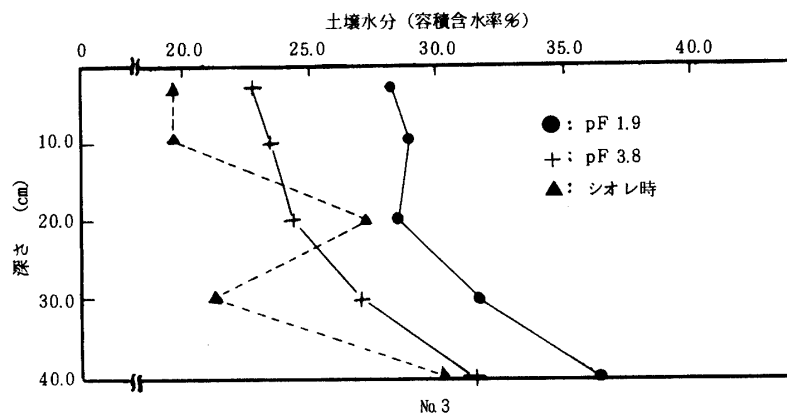


図3・16・2 利用可能水分量の範囲とサトウキビのシオレ時における土壌水分の分布 (糸満市山城)

このようにポット試験および現地調査の結果から、サトウキビに対するカンガイの下限値としてpF 3.8に対応する土壌水分が適切であると考えられる。また前節で述べたように、カンガイの上限値はpF 1.9に対応する土壌水分である。したがって、有効土壌水分領域はホ場容水量 (pF 1.9) から初期シオレ点 (pF 3.8) までの範囲の土壌水分領域である。この水分領域は土壤物理性測定法委員会<sup>9)</sup>による易効性有効水分領域と偶々一致する。

後述するように、サトウキビの土壌水分消費型は生育時期によって異なり、生育とともに深い土層から水分が多く吸収される消費型となる。したがって上層部の土壌水分が初期シオレ点以下に減少しても、

サトウキビが他の土層から水分を多く吸収し、時にはシオレ現象が現われないこともある。また、上層部の根の機能が低下するため、可能な環境に置かれている場合には、根はますます下方に伸延し多く分布するようになる。このような実態の環境に置かれた時はともかくとして、多くの場合にはこの上層部の根の機能を十分発揮させるために、各土層の土壌水分が初期シオレ点（ $pF$  3.8）以下にならない前にカンガイをすることが必要となる。

### 第5節 サトウキビの土壌水分消費型

第2節で明らかのように、サトウキビの根の分布は土層の深さによって異なる。したがって、水分吸収の割合も異なる。一回のカン水量を求めるに当り、土壌面蒸発量を含めた土壌水分減少の割合、すなわち土壌水分消費型の把握が必要である。著者は沖縄におけるサトウキビの土壌水分消費型について、琉球大学農学部附属農場の試験ホ場における試験結果に沖縄総合事務局<sup>43)</sup>の資料を加えて検討考察を行った。

#### 1 測定方法

ホ場における土壌区分層の含水比を一定時刻に測定し、各土層の水分減少の割合を求めることによって土壌水分消費型の実験を行った。ここでは、水分の浸透流動および地下水位の変動を考慮する必要がないように土壌水分が安定した時期を選び、カン水または降雨後の重力水の排除装置を備えたライシメータを用いて実験を行った。すなわち、図3・17に示すように、ライシメータにおける土層60cmを沖縄の畑地カンガイにおける慣行法に従い4層に等分し、各区分層のほぼ中央にテンションメータを1本ずつ埋設して土壌水分を測定した。測定は1972年8月24日から同年11月29日の98日間にわたって行われた。

#### 2 測定結果

前述と同様の方法で毎日午前9時に土壌水分の測定を行った。このようにして得られた土壌含水比を降雨量およびカン水量とともにまとめて図3・18に示した。この図は土壌含水比の経日変化を示すもので、水分消費、カン水および

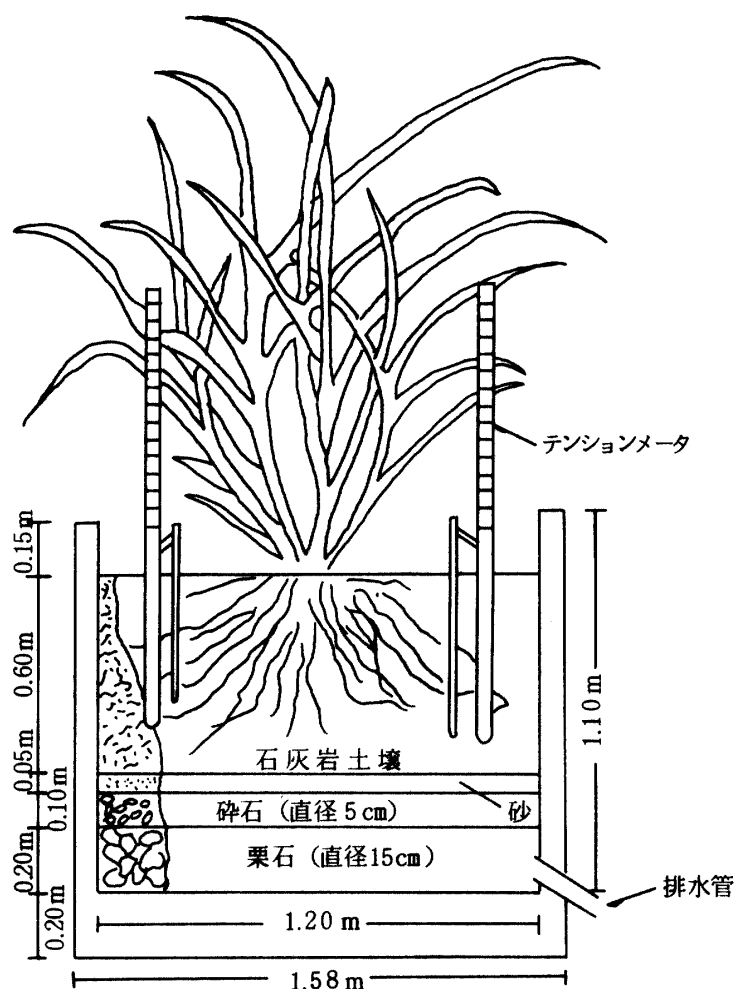


図3・17 ライシメータの断面図

降雨による土壌水分の変化を明らかにしている。多量の降雨またはカン水によって土壌含水比は急増し約35%~38%でおちつき、その後各区分層の土壌含水比は直線的に減少する。そして土壌含水比が20%程度になると、その減少率が小さくなっている。これらの含水比と仮比重および各区分層の厚さから土壌の保有水分量を求めて図3・19に示した。

図3・18および図3・19で土壌水分が直線的に減少している期間について、各土層の土壌水分減少量すなわち消費水量を求めた。これによって日消費水量および水分消費率を計算し表3・9および図3・20・1に示した。この値と現地の調査結果を検討して一回のカン水量の算定に供した。

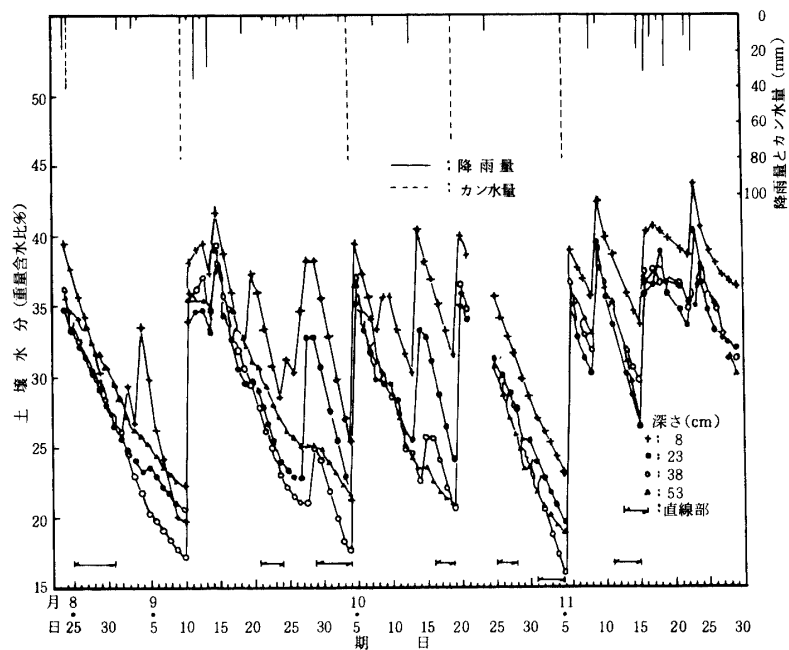


図3・18 降雨量およびカン水量と土壌水分との関係

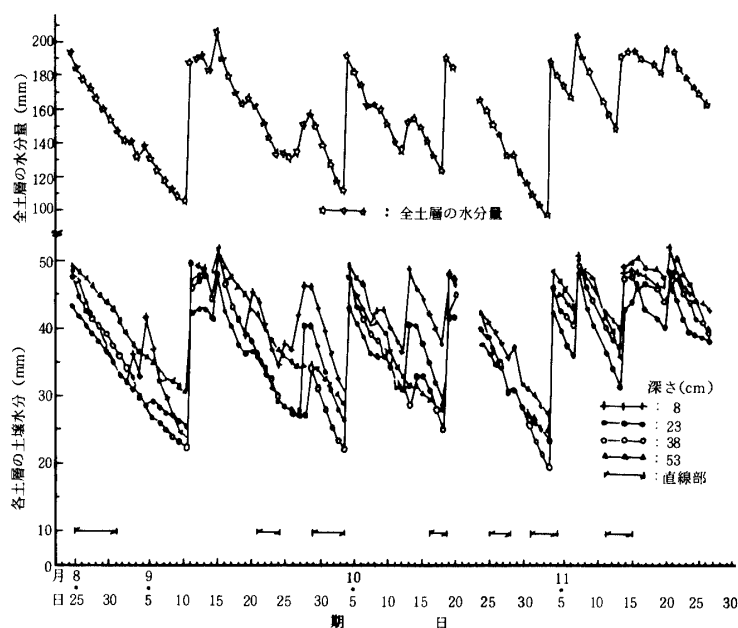


図3・19 土壌水分の変化過程

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表3・9 ライシメータにおけるサトウキビの土壤水分消費型と日消費水量

項 目 深 さ cm 期間 (月・日)	消 費 水 量 mm					土 壤 水 分 消 費 型 %				日消費水量 mm/day
	0 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 45	45 ~ 60	計	0 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 45	45 ~ 60	
8・28 - 8・31	13.2	8.4	8.6	7.2	37.4	35.29	22.46	23.00	19.25	6.2
9・21 - 9・24	9.0	6.1	6.2	5.0	26.3	34.22	23.19	23.58	19.01	8.8
9・29 - 10・4	15.3	13.5	9.7	5.4	43.9	34.85	30.75	22.10	12.30	8.8
10・16 - 10・19	6.4	8.5	7.6	2.4	24.9	25.70	34.14	30.52	9.64	8.3
10・25 - 10・28	4.8	4.0	5.0	6.6	20.4	23.53	19.61	24.51	32.35	6.8
10・31 - 11・4	4.8	5.6	8.7	3.7	22.8	21.05	24.56	38.16	16.23	5.7
11・11 - 11・15	5.8	8.9	6.6	11.4	32.7	17.74	27.22	20.18	34.86	8.2

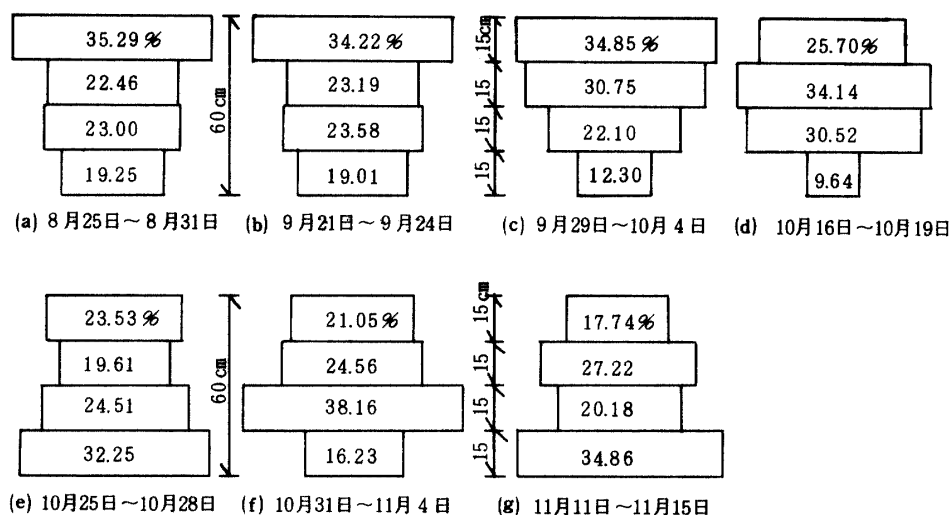


図3・20・1 ライシメータにおけるサトウキビの土壤水分消費型

## 3 考 察

水分消費量は作物の蒸散量と土壤面蒸発量からなるので、土壤面の条件による蒸発量の大小によって水分消費型は影響される。また各土層から根によって吸水される水分量は、根の分布状態および土壤水分の多少によって影響される。図3・20・1によると、水分消費の割合は期日の経過とともに下層の方へ増加していく傾向がある。第1層の消費率は期日の経過にともなって明らかに小さくなってきている。この原因は、8月～9月に比べ10月～11月には気温が低下し日射量も小さくなる一方、サトウキビの倒伏によって土壤面蒸発量が次第に小さくなるためである。また、第1層では土壤面蒸発があり土壤水分が不安定であるのに対し、第2層以下ではこれは最も安定しているため、サトウキビの根が第2層以下に多く分布するようになることもその原因であると考えられる。今後、倒伏の有無、マルチの有無、根群分布、培土の高低などと土壤水分消費型との関係を明らかにする必要がある。第2節で述べたように、石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビの有効根群域は深度約40cmである。図3・20・1は深さ60cmの石灰岩土壤を充填したライシメータにおける調査結果であるため、そのまま現地ホ場におけるサトウキビの土壤水分消費型として用いることはできない。



沖縄総合事務局<sup>43)</sup>によると、沖縄本島南部の石灰岩土地帯のホ場において、サトウキビは7月28日～8月4日の7日間で表3・10に示すような土壌水分を消費している。このサトウキビの水分消費の割合については、八重山石垣市においてもほぼ類似した結果を得ている。前述したように、石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビの有効根群域としては、40cmを採用した方がカンガイ計画上安全側になる。したがって、図3・20・1および表3・10を検討した結果、本論文においては石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビの土壌水分消費型のモデルとして図3・20・2を採用することにする。しかしながら、現地ホ場における栽培条件によって水分消費型は当然変動することが十分推測できる。したがって、具体的なカンガイ計画の策定に際しては、当該地区ごとに現地試験を実施する必要があることはいうまでもない。

表3・10 1974年7月28日～同8月4日の7日間にわたるサトウキビ栽培ホ場の消費水量

深 さ(cm)	0～10	10～20	20～30	30～40	40～50	計
消費水量(mm)	11.9	11.6	10.3	7.6	5.1	46.5

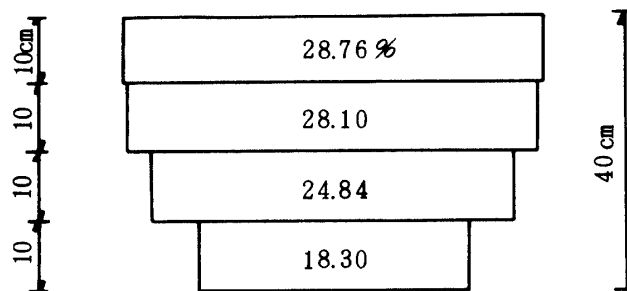


図3・20・2 石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビの土壌水分消費型のモデル

## 第6節 一回のカン水量および間断日数

一回のカン水量を計算する方法としてTAM (Total Available Moisture, 全利用可能水分量) 法およびTRAM (Total Readily Available Moisture, 全容易利用可能水分量) 法がある。以下第2節～第5節の結果と既往の研究結果に基づき、宮古上野村の石灰岩土地帯のホ場と沖縄本島南部南風原町の泥灰岩土地帯のホ場を例にとり、一回のカン水量の算定を試みる。さらに間断日数についても考察する。

### 1 一回のカン水量に関する諸元

#### 1 有効根群域

第2節表3・1によると、トラクタによって特別に深耕を行った伊江村西崎と具志川市兼ヶ段の両地区を除くと、石灰岩土地帯におけるサトウキビの有効根群域は大略40～50cmである。前述のようにカンガイを実施することにより、サトウキビの根は上層部に多く分布するようになる。このことと、同様の宮古上野村および平良市のデータを検討した結果、この計算では上野地区におけるサトウキビの有効根群域として40cmを採用する。一方久貝<sup>26)</sup>の研究によると、培土の有無によっても多少異なるが、泥灰岩土地帯におけるサトウキビの有効根群域は約50cmであることが指摘されている。したがって、南風原町の泥灰岩土地帯におけるサトウキビの有効根群域として50cmを採用する。

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

## ii カンガイの上限値および下限値

第3節および第4節で記述したように、カンガイの上限値および下限値をそれぞれpF1.9, pF 3.8に対応する土壌水分とする。図3・21は上野地区における石灰岩土壌のpF-水分曲線であり、これは各深さともそれぞれ4個のデータの平均値を示している。さらにこの図に基づき、pF 1.9およびpF 3.8に対応する土壌水分の分布を図3・22に示す。つまり、上野地区におけるホ場の有効水分はこの図の2曲線間の土壌水分となる。同様に、南風原地区における泥灰岩土壌のpF-水分曲線とpF 1.9およびpF 3.8に対応する土壌水分の分布をそれぞれ図3・23, 図3・24に示す。

## iii 土壌水分消費型

実際のカン水は主にサトウキビの生育最盛期に行う。前述のように、沖縄総合事務局<sup>43)</sup>によると糸満市と石垣市の石灰岩土壌地帯におけるサトウキビの土壌水分消費型は類似している。上野地区の石灰岩土壌地帯においても大差はないものとみなし、第5節図3・20・2に示す土壌水分消費型を採用した。南風原地区の泥灰岩土壌地帯におけるサトウキビの土壌水分消費型としては、久貝<sup>26)</sup>の研究に基づき表3・14に示す値を使用した。

## 2 一回のカン水量

前記諸元に基づき、上野地区の石灰岩土壌地帯におけるホ場の各土壌区分層の利用可能水分量(AM)および全利用可能水分量(TAM)と全容易利用可能水分量(TRAM)を求め、表3・11および表3・12に示す。さらに南風原地区の泥灰岩土壌地帯のホ場についても同様な計算を行い、表3・13および表3・14に示す。

一般に作物の有効根群域を幾つかの層に分け、表層から第1層, 第2層……………第n層とすると、各層の利用可能水分量  $AM_1, AM_2, \dots, AM_n$  は次の式で計算される<sup>19)</sup>。

$$\left. \begin{array}{l} \text{第1層 } AM_1 = \frac{1}{100} (FC_1 - WP_1) D_1 \quad (\text{mm}) \\ \text{第2層 } AM_2 = \frac{1}{100} (FC_2 - WP_2) D_2 \quad (\text{mm}) \\ \dots\dots\dots \\ \text{第n層 } AM_n = \frac{1}{100} (FC_n - WP_n) D_n \quad (\text{mm}) \end{array} \right\} (3 \cdot 8)$$

ここで

$D_1, D_2, \dots, D_n$  : 各層の深さ (mm)

$FC_1, FC_2, \dots, FC_n$  : 各層におけるカンガイの上限値 (容積含水率%)

$WP_1, WP_2, \dots, WP_n$  : 各層におけるカンガイの下限値 (容積含水率%)

当該各層の水分消費を基準とした場合の有効根群域内の全消費水分量は、このAMを土壌水分消費型(SMEP, Soil Moisture Extraction Pattern)で割ることによって求められる。TRAMはこれらの値のうち最も小さい値である。すなわち、十分カン水した後、どれか一つの区分層の土壌水分が最初にカンガイの下限値に達した場合、それまでに有効根群域内で消費された水分量の合計がTRAMである。また、最初に土壌水分がカンガイの下限値に達する層が制限層であり、制限層以外の層には利用可能水分が残っている。

TAMはすべての区分層で土壌水分がカンガイの下限値に達するまでのAMを計算し、その合計を一回のカン水量として採用する方法である。

表3・12によると宮古上野地区の石灰岩土壌地帯のホ場におけるTAMは31.5mm, TRAMは27.8mmである。また表3・14によると南風原地区の泥灰岩土壌地帯のホ場におけるTAMは55.3mm, TRAMは41.3mmである。一回の純カン水量としては、水の有効利用の面からこのTRAMを上まわらない値を採用すべきである。したがって、ここでは両地区のホ場における純カン水量としてそれぞれ25.0mm, 40.0mmを採用する。

### 3 間断日数

一回のカン水量を作物の日消費水量で割ることによって間断日数が得られる。ここではサトウキビの生育最盛期について間断日数を求めてみる。第II章第2節によると、サトウキビの生育最盛期における月別平均日蒸発散量は5~6mm/dayである。ここでは5mm/dayを生育最盛期におけるサトウキビの日消費水量として計算すると次のようになる。

a) 宮古上野地区 (石灰岩土地帯)

$$N = \frac{\text{一回の純カン水量}}{\text{日消費水量}} = \frac{25}{5} = 5$$

b) 南風原地区 (泥灰岩土地帯)

$$N = \frac{\text{一回の純カン水量}}{\text{日消費水量}} = \frac{40}{5} = 8$$

したがって、石灰岩土地帯のホ場でサトウキビの生育最盛期においては、一回の純カン水量25mmに損失水量を加えた水量を5日おきにカン水すればよい。また、泥灰岩土地帯のホ場においては、純カン水量40mmに損失水量を加えた水量を8日ごとにカン水すればよいことになる。

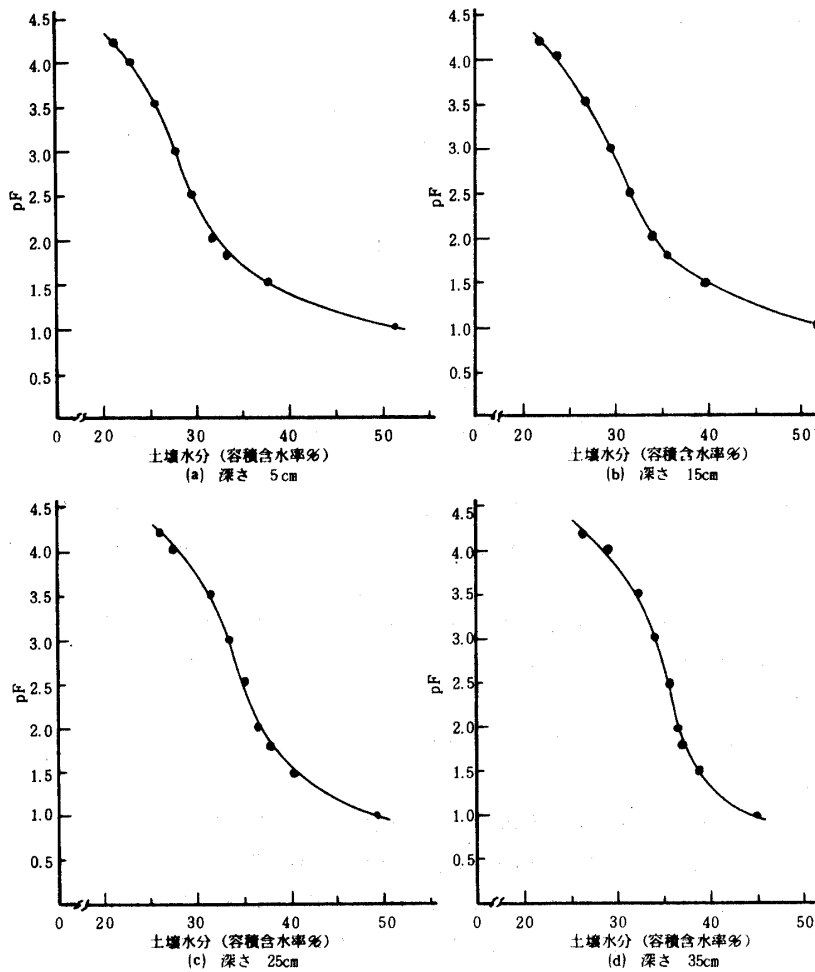


図3・21 pF-水分曲線 (宮古上野村, 石灰岩土壌)

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

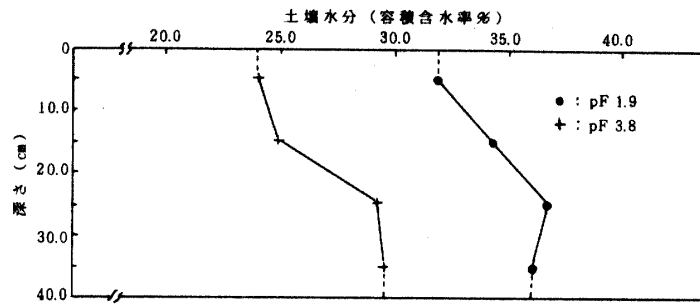


図 3・22 利用可能水分量の範囲 (宮古上野村, 石灰岩土壌)

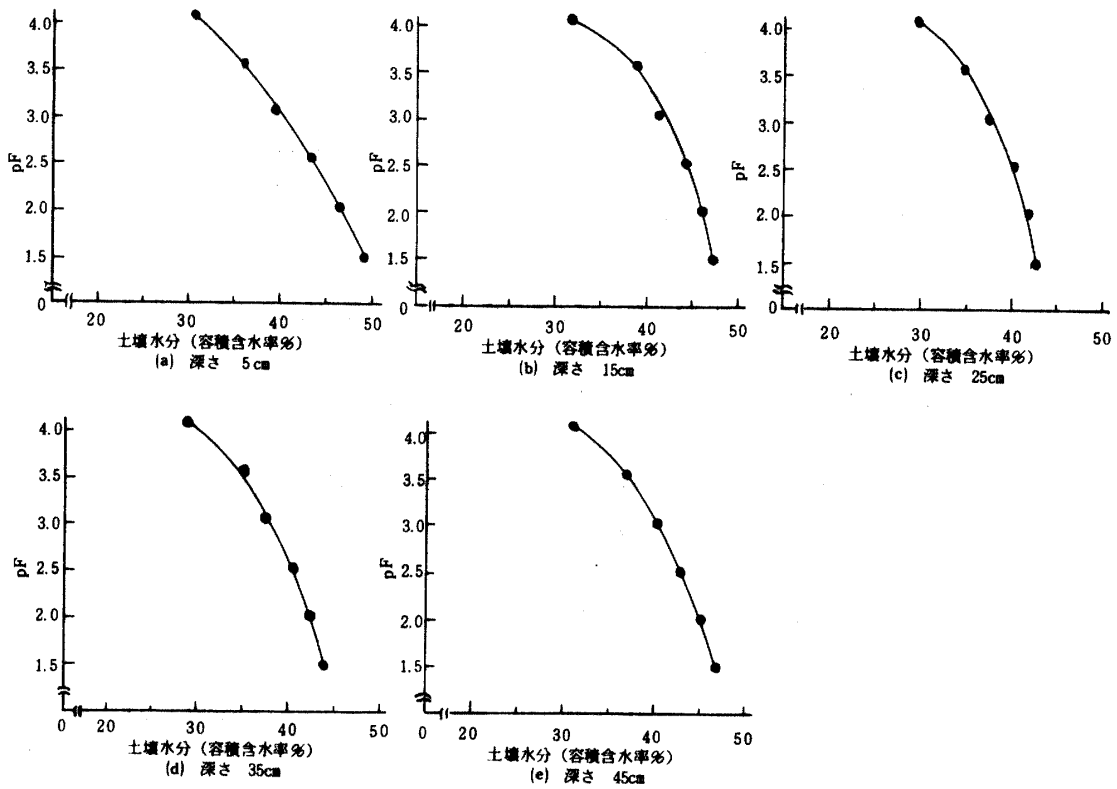


図 3・23 pF - 水分曲線 (南風原町, 泥灰岩土壌)

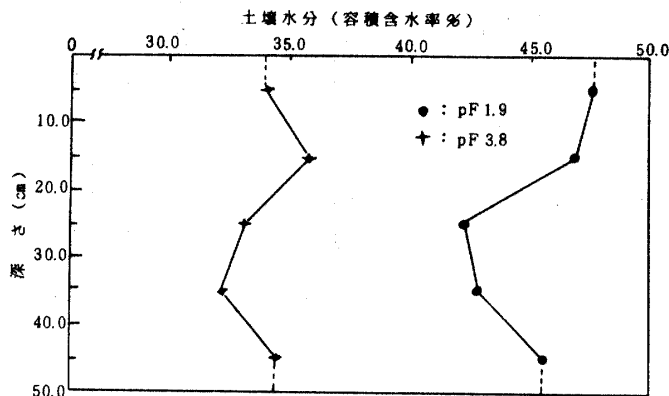


図 3・24 利用可能水分量の範囲 (南風原町, 泥灰岩土壌)

表3・11 利用可能水分量 (AM) の計算 (宮古・石灰岩土壌)

層別	深さ cm	カンガイの上限値 (容積含水率) %	カンガイの下限值 (容積含水率) %	利用可能水分量 AM mm
1	0 ~ 10	32.0	24.0	8.0
2	10 ~ 20	34.5	25.0	9.5
3	20 ~ 30	37.0	29.5	7.5
4	30 ~ 40	36.5	30.0	6.5

表3・12 全容易利用可能水分量 (TRAM) の計算 (宮古・石灰岩土壌)

層別	深さ cm	土壌水分 消費型 SMEP %	利用可能 水分量 AM mm	当該各層の水分消費 を基準とした場合 の全消費水量 mm	全容易利用 可能水分量 TRAM mm
1	0 ~ 10	28.76	8.0	27.8	27.8
2	10 ~ 20	28.10	9.5	33.8	
3	20 ~ 30	24.84	7.5	30.2	
4	30 ~ 40	18.30	6.5	35.5	
計			31.5		

表3・13 利用可能水分量 (AM) の計算 (南風原町・泥灰岩土壌)

層別	深さ cm	カンガイの上限値 (容積含水率) %	カンガイの下限值 (容積含水率) %	利用可能水分量 AM mm
1	0 ~ 10	47.6	34.0	13.6
2	10 ~ 20	47.0	36.0	11.0
3	20 ~ 30	42.5	33.5	9.0
4	30 ~ 40	43.2	32.5	10.7
5	40 ~ 50	46.0	35.0	11.0

表3・14 全容易利用可能水分量 (TRAM) の計算 (南風原町・泥灰岩土壌)

層別	深さ cm	土壌水分 消費型 SMEP %	利用可能 水分量 AM mm	当該各層の水分消費 を基準とした場合 の全消費水量 mm	全容易利用 可能水分量 TRAM mm
1	0 ~ 10	32.9	13.6	41.34	41.34
2	10 ~ 20	26.3	11.0	41.83	
3	20 ~ 30	20.4	9.0	44.12	
4	30 ~ 40	11.7	10.7	91.45	
5	40 ~ 50	8.7	11.0	126.44	
計			55.3		

## 第IV章 カンガイの必要性

### 第1節 サトウキビの干バツ被害

#### 1 干バツ被害状況

1963年は70年来の大干バツ年で、当時の宮古におけるサトウキビの干バツ被害率は60%であると言われている。その後も宮古は1965年、1967年に干バツを受け、さらに1971年には再び大干バツにみまわれた。宮古地方気象台および宮古支庁の資料によると、同年の3月から8月にかけて降雨が少なく(表4・1)、7月31日でのサトウキビの干バツ被害率は90%に達したと述べられている。この年には、八重山石垣島においてもサトウキビはほぼ同じ程度の干バツ被害を受けた。また1972年には、沖縄本島およびその周辺離島においても6月20日から7月19日の30日間はほとんど雨がなく、各地で土壤水分欠乏をきたし、サトウキビのシオレ現象が見られたが、この年は7月20日から7月24日の台風7号によってもたらされた約480mmの降雨量で一時解消されたもののその後降雨が少なく、サトウキビは再びシオレ現象を起こした。とくに、沖縄本島南部の石灰岩土地帯のホ場においては、枯死寸前のサトウキビが見られるようになった。さらに、1974年には宮古において6月17日以後の降雨が少なく、9月19日でのサトウキビの干バツ被害率は平均30%程度であったと報告されている。図4・1～図4・4・2に1963年、1971年および1974年のサトウキビの干バツ被害状況を示す。これらの図はサトウキビの干バツ被害がいかに大きいものであるかを示唆している。図4・1は1963年の沖縄本島南部における干バツ被害状況を示すもので、サトウキビは枯死している。図4・2・1と図4・2・2は1971年の宮古における干バツ被害状況を示しており、図4・1におけると同様にサトウキビは枯死している。図4・3・1と図4・3・2は1971年の八重山におけるサトウキビの干バツ被害状況を示している。図4・3・2および図4・2・2(b)はそれぞれ石垣市および平良市のホ場におけるカンガイ試験の状況を示すもので、サトウキビに対するカンガイの有効性を示す一例である。図4・4・1と図4・4・2は1974年9月の宮古におけるサトウキビの干バツ被害状況を示している。これらの図においても、上記の干バツ年と同様にサトウキビはほとんど枯死している。図4・4・1(a)は下地町洲鎌の土壤水分が十分なホ場におけるサトウキビである。当該ホ場は水田跡で、地表面下20cmよりも深い土層では土壤水分が多く、9月19日での地下水位は地表面下約1mであり、かなり高く位置していた。図4・4・2(c)は城辺町保良のホ場におけるサトウキビの干バツ被害状況を示すものである。この状態よりさらに悪化すると同図(d)のように茎の水分にまで影響し、サトウキビは完全に枯死する。これらの図を比較検討すると、サトウキビの干バツ被害がいかにおそろべきものであるかがわかる。以上の干バツ被害は主に石灰岩土地帯で見られたものである。

沖縄本島およびその周辺離島においてとくにサトウキビの干バツ被害が大きい地域は、北部の伊江島、本部半島、中部の読谷村、沖縄市、具志川市、南部の具志頭村、糸満市、久米島具志川村などである。これらの地域の土壤は主に石灰岩土壌であり、サトウキビはほとんど毎年のように土壤水分欠乏による被害を受けている。

表4・1 宮古における月降雨量

年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	降雨量の計	
													7月~9月	1月~12月
1960	188.2	27.4	270.9	55.7	184.7	171.9	163.8	403.7	193.2	19.4	119.1	165.7	760.7	1963.7
1961	65.5	131.7	174.3	165.7	151.0	62.5	207.0	188.4	225.6	145.9	78.7	251.3	621.0	1847.6
1962	139.0	38.1	153.4	57.7	56.7	446.9	299.3	200.0	143.3	111.1	95.7	123.5	642.6	1864.7
1963	58.9	51.1	54.6	8.2	5.0	266.1	19.3	59.9	337.3	30.8	84.1	323.5	416.5	1298.8
1964	178.6	88.3	124.0	29.7	301.1	294.6	204.2	242.2	153.0	220.1	54.2	148.3	599.4	2038.3
1965	98.1	116.0	111.8	124.7	229.3	523.6	62.0	162.3	66.4	126.1	155.2	97.4	290.7	1872.9
1966	172.4	207.0	108.1	325.7	376.6	533.4	414.3	211.9	452.0	20.5	163.5	256.4	1078.2	3241.8
1967	97.4	50.7	100.7	259.9	179.9	209.2	49.4	136.1	138.6	134.0	207.4	131.0	324.1	1694.3
1968	99.0	202.1	266.0	68.4	41.0	193.5	256.5	190.5	339.0	178.5	81.5	67.0	786.0	1983.0
1969	98.0	121.0	171.5	11.0	416.0	320.5	109.0	84.0	248.0	212.5	317.0	150.5	441.0	2259.0
1970	197.5	49.5	213.0	340.5	115.5	337.5	291.0	146.0	237.0	228.0	89.0	360.0	674.0	2604.5
1971	126.0	131.5	40.5	24.0	16.0	13.5	41.5	54.5	212.0	170.5	272.5	220.0	308.0	1322.5
1972	206.5	109.0	93.5	43.5	313.5	131.5	420.0	279.5	46.0	26.5	129.5	185.0	745.5	1984.0
平均	132.7	101.8	144.8	116.5	183.6	269.6	195.2	181.5	214.7	124.9	142.1	190.7	591.4	1998.1

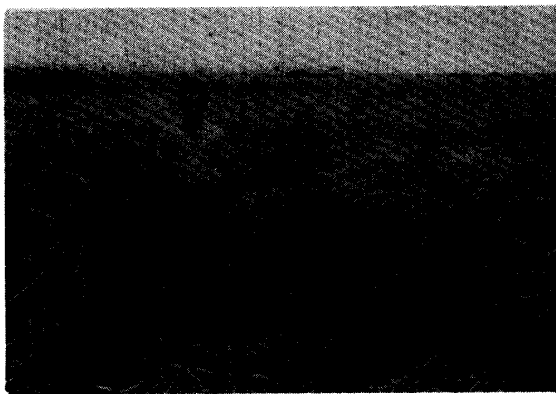


(a) 糸満市



(b) 具志頭村

図4・1 沖縄本島南部におけるサトウキビの干バツ被害状況 (1963年)



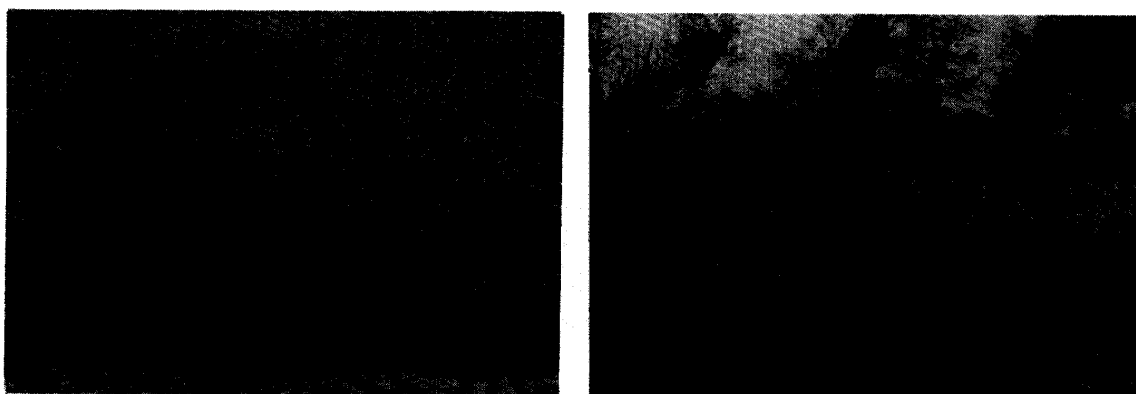
(a) 下地町



(b) 下地町

図4・2・1 宮古におけるサトウキビの干バツ被害状況 (1971年)

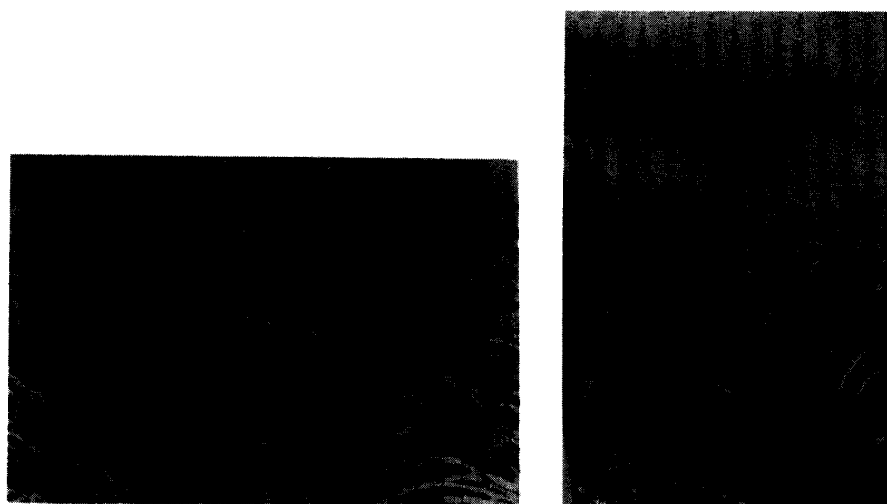
山城：サトウキビに対する畑地カンガイ



(a) 平良市

(b) 平良市

図4・2・2 宮古におけるサトウキビの干バツ被害状況（1971年）



石垣市

図4・3・1 八重山におけるサトウキビの干バツ被害状況（1971年）

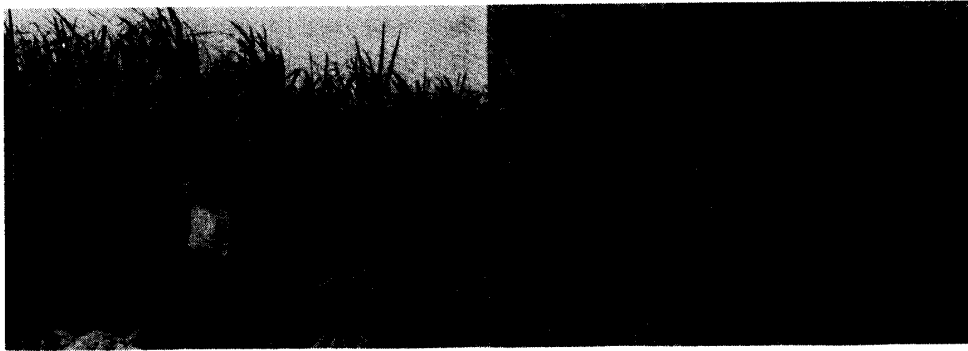


無カンガイ区

カンガイ区

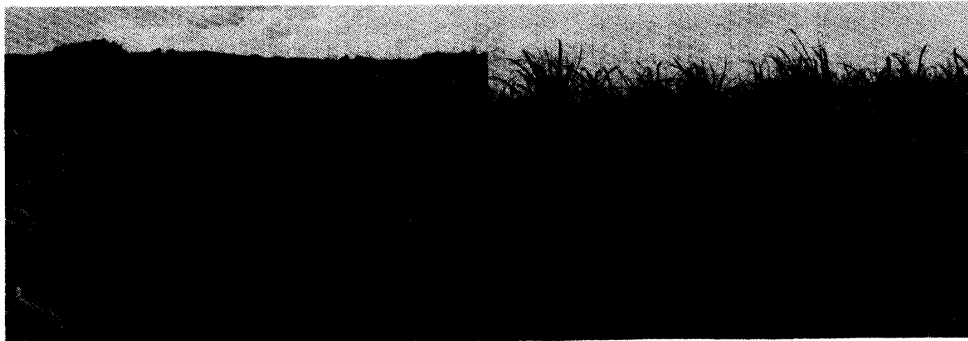
図4・3・2 八重山におけるサトウキビの干バツ被害状況（1971年）





(a) 下地町

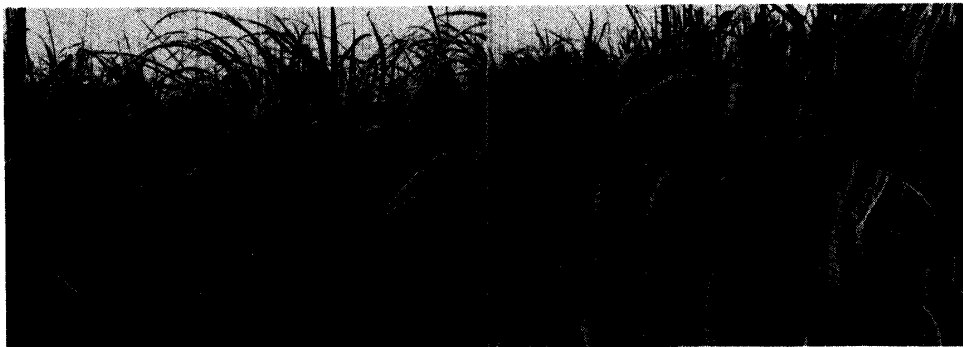
(b) 下地町



(c) 城辺町

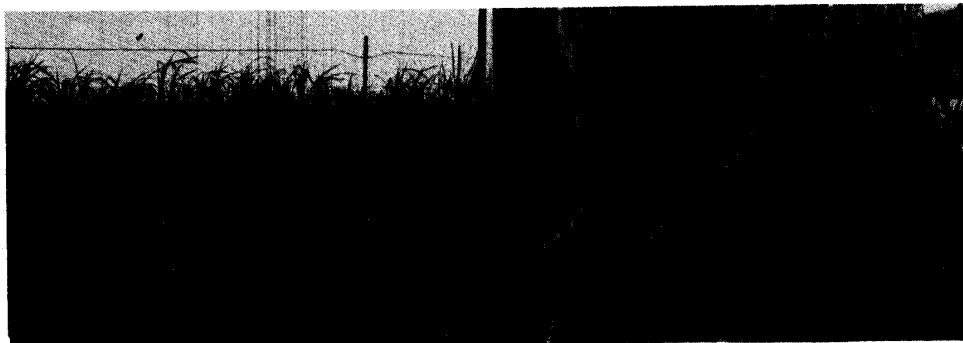
(d) 城辺町

図4・4・1 宮古におけるサトウキビの干バツ被害状況(1974年)



(a) 城辺町

(b) 城辺町



(c) 城辺町

(d) 城辺町

図4・4・2 宮古におけるサトウキビの干バツ被害状況(1974年)

## 2 降雨量とサトウキビの干バツ被害

前述のように、沖縄の石灰岩土地帯のホ場におけるサトウキビは干バツ被害を受けることが多い。一般に石灰岩土地帯は地下水位が低く、この地帯の無カンガイホ場における土壌水分の唯一の供給源は雨水である。ここでは上記の石灰岩土地帯の一例として、宮古本島をとり、この地帯のホ場における降雨量とサトウキビの干バツ被害について考察する。

宮古における1960年～1972年の月降雨量の平均値を図4・5に示す。この図によると、6月の梅雨と9月の台風による雨が多い。第1章で述べたように、台風による雨は集中的に降るためその有効性は小さい。したがって、サトウキビが干バツ被害を受ける可能性が大きい月は、伸長のため土壌水分を多く必要とし、蒸発散量が最も大きな値を示す7月～9月と伸長後期に当る降雨の少ない10月である。しかし、10月には7月～9月の生育最盛期ほど、土壌水分欠乏がサトウキビの生育に大きな影響を与えない。

図4・6に宮古における1960年～1972年の年降雨量を示す。この図によると、1963年と1971年以外はどの年が干バツの年であるかはっきりしない。これはデータにサトウキビが水分をあまり必要としない月の降雨量も含まれているからである。したがって、サトウキビの生育最盛期であり、それが水分を最も多く必要とする7月～9月の合計降雨量を図4・7に示す。この図で明らかなように、1963年、1965年、1967年、1969年および1971年の7月～9月には降雨が少ない。

表4・2に1960年～1972年に宮古を襲った主なサトウキビの干バツ被害と台風被害を示す。これによると、前述の1963年、1965年、1967年および1971年にサトウキビは干バツ被害を受けている。とくに1963年には4月～5月に、1971年には3月～6月にも降雨量が少なかった。このため、サトウキビは生育初期において痛められている上に、さらに最も重要な7月～9月の生育最盛期に降雨量が少なく、とくに大きな干バツ被害を受けたものと考えられる。琉球政府農林局<sup>55)</sup>によると、1969年にはサトウキビの干バツ被害はなく、ただ台風エルシーのみによる被害があったと報告されている。表4・1によると、前述の7月～9月の合計降雨量の少ない年のうち、1969年だけは7月に100mmを越す降雨量があった。この7月の降雨量がサトウキビの干バツ被害の解消に大きな役割を果たしたものと考えられる。

以上、サトウキビの干バツ被害と年降雨量との関係では明らかではないが、7月～9月の合計降雨量を取り上げれば、その間にはかなり深い関係があることが推察される。また表4・2に示すように、サトウキビの台風被害と干バツ被害を比較すると干バツ被害の方がはるかに大きいことがわかる。

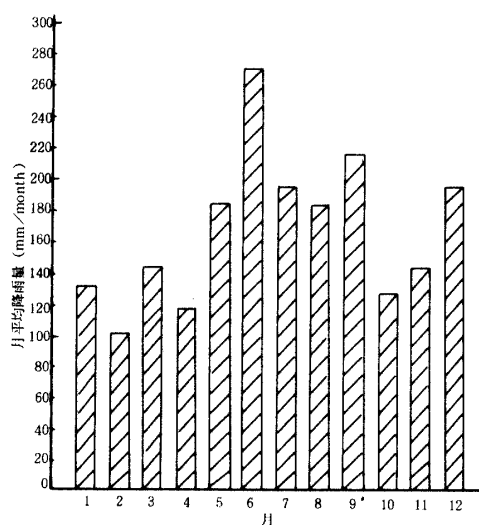


図4・5 宮古における月平均降雨量 (1960年～1972年)

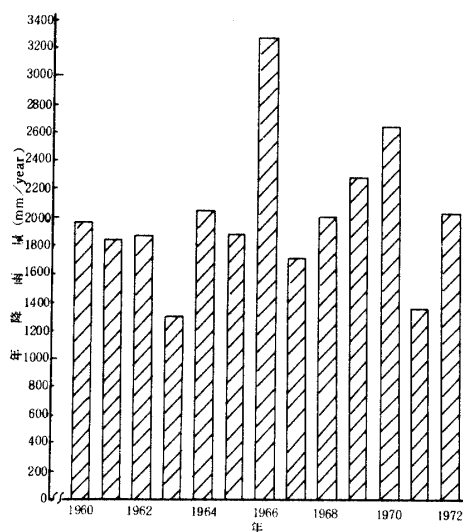


図4・6 宮古における年降雨量 (1960年～1972年)

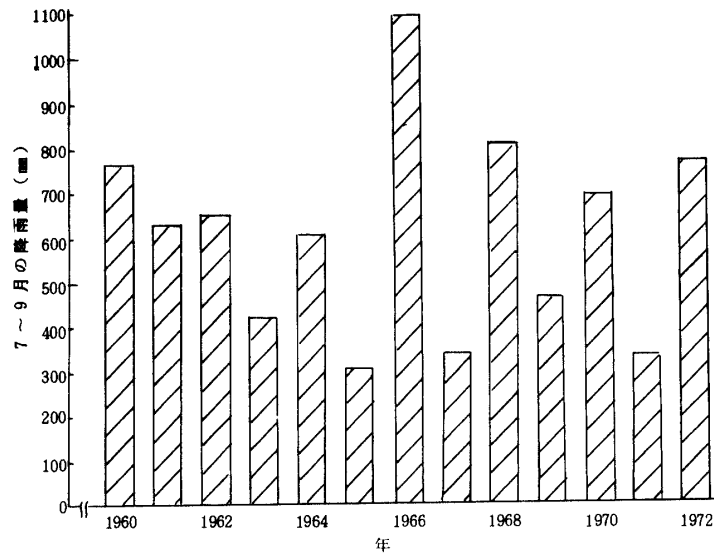


図4・7 宮古における7～9月の降雨量  
(1960年～1972年)

表4・2 宮古におけるサトウキビの干バツ被害と台風被害

項目	年	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
干バツ被害%					60		21		15				90	
台風被害 % と台風名			3 1		1 10	15		40		13	7	9		5
			パメラ, テイル ダ		シャー リー, グロー リア	ペテー		コ ラ		デ ラ	エル シー	オルガ		クララ

## 第2節 土壤水分とサトウキビの10アール当り収量

### 1 有効雨量および不足水量の計算

サトウキビの消費水量は気象要因の影響を受けるので、これは年ごとに異なった値を示す。しかし長期の詳細な資料がないため、本節の計算に用いるサトウキビの日消費水量としては表4・3に示すデータを用いてみた。このデータは表2・6に示すように、1968年～1969年にわたって行ったライシメータ試験によって得られたサトウキビの月別平均日蒸発散量である。すなわちこれは図2・11に示すように、1968年は他の実験年次に比べて月降雨量の再現期間が1に近く、平年的な降雨分布の年と考えられるので、上記のデータを用いることとした。なお、サトウキビの月別平均日蒸発散量は、第二章第2節で述べたように、植付け初年度においてはその数値および変化量が小さい。このため植付け初年度のサトウキビの日消費水量は表2・6における1968年1月の値と同じであるとみなして差支えないと考えた。

このサトウキビの日消費水量と宮古における1938年～1973年の降雨記録および石灰岩土地帯のホ場における全容易利用可能水分量を用いて、水収支法によって有効雨量および不足水量の計算を試みた。また、泥灰岩土地帯である南風原町のホ場を対象に、降雨記録、サトウキビの日消費水量および

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

全容易利用可能水分量を用いてこれらの計算も行った。(但し、南風原町には長期の降雨記録がないため、この計算では隣接地の那覇における1938年～1973年の降雨記録を用いた。)なお、計算法は土地改良事業計画設計基準<sup>37)</sup>に準拠して、5mm未満の降雨量を無効、それ以上については降雨量の80%を有効とした。

全容易利用可能水分量は第Ⅲ章で述べたように土壌の種類、作物の有効根群域、土壌水分消費型などによって異なる。つまり、これはたとえ作物が同じであっても、土壌の種類および土層の厚さなどによって影響を受けることを意味する。宮古本島はほとんど同じ石灰岩土壌からなっており、一般に排水は良好で耕土が浅く、ほぼ同じ状態であると考えられる。したがって、宮古のホ場における水収支計算に用いる全容易利用可能水分量としては、第Ⅲ章第6節表3・12に基づき27.8mmを採用した。また南風原町のホ場は、一般に耕土の深い泥灰岩土壌からなっており、本地区における水収支計算には表3・14に基づき泥灰岩土壌地帯のホ場における全容易利用可能水分量41.3mmを使用した。表4・4に有効雨量および不足水量の計算例を示す。この表で(有効雨量)+(前日の残留水量)-(消費水量)がその日の残留水量に当り、この値が負になると不足水量になる。また、(有効雨量)+(前日の残留水量)が全容易利用可能水分量を越える場合には、これは無有効の水分となる。

表4・3 サトウキビの月別平均日消費水量

月	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
日消費水量mm/day	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.2	1.8	2.4
月	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
日消費水量mm/day	3.2	4.0	4.6	4.9	4.9	4.5	3.9	3.1	2.4	1.9

表4・4 有効雨量および不足水量の計算例(宮古, 1968年6月)

期日	項目	降雨量 mm	有効雨量 mm	消費水量 mm	不足水量 mm	残留水量 mm	備考
1		14.0	11.2	4.0		8.4	
2		0.0	—	—		4.4	
3		0.0	—	—		0.4	
4		0.0	—	—			
5		—	—	—	3.6		
6		0.0	—	—	4.0		
7		5.0	4.0	—	4.0		
8		—	—	—			
9		49.5	27.8	—	4.0		
10		11.0	4.0	—		23.8	
小計		79.5	47.0	40.0	15.6	23.8	
11		5.0	4.0	4.0		23.8	
12		0.0	—	—		19.8	
13		0.0	—	—		15.8	
14		—	—	—		11.8	
15		—	—	—		7.8	
16		—	—	—		3.8	
17		0.0	—	—	0.2		
18		0.0	—	—	4.0		
19		5.5	4.4	—			
20		81.0	27.4	—		0.4	
小計		91.5	35.8	40.0	4.2	23.8	
21		5.0	4.0	4.0		23.8	
22		1.5	—	—		19.8	
23		—	—	—		15.8	
24		0.0	—	—		11.8	
25		—	—	—		7.8	
26		—	—	—		3.8	
27		0.5	—	—	0.2		
28		13.0	10.4	—			
29		2.5	—	—		6.8	
30		—	—	—		2.8	
小計		22.5	14.4	40.0	1.6		
計		193.5	97.2	120.0	21.6		

5月31日の  
残留水量  
= 1.2mm

## 2 降雨量、有効雨量および不足水量の平年値とその経年変化

1938年～1973年の降雨記録に基づき、宮古（石灰岩土壌地帯）と南風原（泥灰岩土壌地帯）における有効雨量および不足水量を前述の方法で計算した。これらの結果から、両地区について降雨量、有効雨量、消費水量および不足水量をサトウキビの全生育期間に渡って月別に加算し、各年度の月降雨量、月有効雨量、月消費水量、月不足水量を求めた。降雨量は年ごとの変動があるものの、その分布は一般に対数正規分布となる。したがって、月降雨量、月有効雨量および月不足水量の平年値を対数正規確率紙を用いて求め、図4・8と図4・9に示した。

図4・8で明らかなように、平年的に考えると10月以外の月には、宮古におけるサトウキビにとって、月降雨量の絶対量が不足することはまずなく、また図4・9によると、南風原のサトウキビにとっても、平年における月降雨量の絶対量は7月、9月および10月以外の月では不足しないと料する。またこれらの図によると、これらの降雨量はその50%も利用されていない。そして、サトウキビを植付けた翌年すなわち2年次での、とくに7月～10月の不足水量が大きく、且つその影響も大きい。しかしながら、前述のように10月はサトウキビの伸長後期に当り、7月～9月の生育最盛期ほど土壌水分欠乏がサトウキビの生育に大きな影響を与えてはいない。このことから、サトウキビの生育期間を全生育期間、植付け翌年の2年次における1年間、特に翌年の7月～9月との3期間にわけて、各生育期間における降雨量、有効雨量および不足水量の平年値とその経年変化について検討した。

すなわち、宮古における上記の各生育期間における降雨量の平年値はそれぞれ3600 mm, 2150 mm, 590 mmであり、またこれらの各生育期間における有効雨量の平年値は950 mm, 720 mm, 230 mmで、不足水量の平年値は482 mm, 467 mm, 249 mmである。南風原では、これらの各生育期間における降雨量の平年値は3450 mm, 2100 mm, 580 mmで、有効雨量の平年値は1020 mm, 770 mm, 245 mm, 不足水量の平年値は421 mm, 408 mm, 220 mmである。このことは、宮古では南風原に比べ平年雨量が多いにもかかわらず、有効雨量は少なく不足水量が多いことを示唆している。

宮古におけるサトウキビの各生育期間の降雨量、有効雨量および不足水量の経年変化を図4・10～図4・12に示す。これらの図によると降雨量の有効率が小さく、有効雨量は全生育期間で650 mm～1150 mm、植付け翌年の1年間で400 mm～900 mm、植付け翌年の7月～9月には100 mm～350 mmとなっている。南風原における降雨量、有効雨量および不足水量の経年変化を図4・13～図4・15に示す。これらの図によると、各生育期間における有効雨量はそれぞれ820 mm～1170 mm, 640 mm～940 mm, 150 mm～350 mmとなっている。すなわち、経年変化を考えても、宮古における各生育期間の有効雨量は南風原のそれに比べて小さい値を示していることが明らかである。

なお、図4・16～図4・18と図4・19～図4・21はそれぞれ宮古および南風原における各生育期間の降雨量とその有効率との関係を示したものである。これによると、いずれの地区においても、降雨量とその有効率は負の勾配を持つ直線関係にあり、かなり高い相関が認められた。すなわち、ある期間の降雨量が大きければ大きいほど無効雨量が大きく、有効雨量が占める割合が小さくなるということである。カンガイは必要水量から有効雨量を差し引いた分だけ水分を補給するものである。したがって、畑地カンガイ計画において計画年次を定める場合、降雨量そのものの確率計算でこれを決定するのは妥当でないことになる。またある期間の降雨量からその期間の有効雨量を概算する場合にも、その降雨量に相応する有効率を用いるべきであり、またこの際、有効率を一定として仮定することは不適切である。すなわち、サトウキビの生育過程における各ステージを作物学的に勘案して、それぞれの期間の降雨量にそれに相応する有効率を乗じて、その期間の有効雨量を求めるべきであることを明らかにした。

図4・10～図4・12によると、宮古における不足水量は全生育期間、植付け翌年ともに300 mm～750 mm程度で、翌年の7月～9月には140 mm～370 mmとなっている。また図4・13～図4・15によると、南風原における不足水量は全生育期間および植付け翌年には250 mm～610 mm、翌年の7月～9月には130 mm～320 mmである。すなわち、土壌水分はどの地区においてもサトウキビ植付け初年度には不足せず翌

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

年に不足し、不足水量の大半は翌年の7月～9月にあることが明らかにされた。これらの図によると、全生育期間および植付け翌年の1年における有効雨量と不足水量との間にはかなり差があるにもかかわらず、植付け翌年の7月～9月には両者はほぼ同じ値になっている。前述のように、夏植サトウキビは植付け初年度は作柄が小さく、日蒸発散量も1mm/day程度でその変化も小さい。しかしながら、植付け翌年すなわち2年次には草丈や茎長の伸長にともない日蒸発散量は次第に増加し、7月～9月の生育最盛期には約5～6mm/dayに達し、その後次第に減少し植付け翌々年の1月～2月すなわち収穫期には1～2mm/dayまで減少する。この生育時期による蒸発散量の変化のために、土壌水分は植付け翌年に不足し、不足水量の大半が翌年の7月～9月の生育最盛期に現われると考えられる。表4・3のデータに基づき計算すると、夏植サトウキビはその幼少期に当る植付け初年度の6ヶ月間で約150mm、植付け翌年の1年間で約1200mm、生育最盛期に当る植付け翌年の7月～9月の3ヶ月間だけで440mm程度の水分を消費する。つまり、生育最盛期の3ヶ月間で植付け翌年1年間の37%の水分を消費する。そのため、この期間には降雨量のうち、実際サトウキビに利用される水分量と同じ程度の土壌水分が不足することが明らかにされた。

また図4・12によると、宮古における1960年代のこの期間には、降雨量および有効雨量が1年おきに増減し、不足水量は1年ずれて増減している。前述のように、近年宮古におけるサトウキビはほぼ1年おきに干バツ被害を受けている。とくに干バツ被害が大きかった1963年と1971年の7月～9月には不足水量が340mmを越し、7月～9月の降雨量が最も小さい1965年の同期間における不足水量よりも大きな値を示している。このことからサトウキビの干バツ被害は降雨量そのものではなく、この不足水量すなわち土壌水分に起因するものであることが理解される。今後、耕土を厚くした場合、土壌改良をした場合、カンガイをした場合などについて、この土壌水分動態がどのように変化するかについて検討する必要がある。

図4・22は宮古（石灰岩土壌地帯）と南風原（泥灰岩土壌地帯）における月不足水量の平年値を比較したものである。この図によると、宮古における月不足水量の平年値は南風原における月不足水量の平年値に比べ大きな値を示し、とくに8月にその差が大きくなっている。前述のように、平年値を考えると宮古における降雨量は南風原の降雨量に比べ大きな値を示している。したがって両地区における不足水量の差は一つにそれぞれの土壌条件に起因するものと考えられる。このことは石灰岩土壌地帯においては泥灰岩土壌地帯に比べ、サトウキビの干バツ被害が起りやすいことを示唆している。

図4・22によると、南風原の泥灰岩土壌地帯においても植付け翌年5月以後においてかなり大きな不足水量がある。しかしながら、近年南風原においては、1963年と1971年を除くと、サトウキビは大きな干バツ被害を受けていない。第I章第3節で述べたように、泥灰岩土壌の最大毛管高は約4.3mもあり、地下水位から約60cm上の土壌面においても2mm/day程度の毛管補給が考えられる。また、同節で述べたように、泥灰岩土壌の乾燥過程においては各土層の土壌水分はほぼ一体となって変動する。つまり、各土層間の土壌水分移動が容易である。しかも、有効根群域よりも下の土層が一般に厚く、この土層に保留された土壌水分の毛管移動によって、根群域内に水分が補給されるため、サトウキビの干バツ被害が発生しにくい。したがって、この土壌地帯においてカンガイ計画を立てるに当たっては、有効根群域より下の土層からの水分補給を考慮に入れるべきであると考えられる。

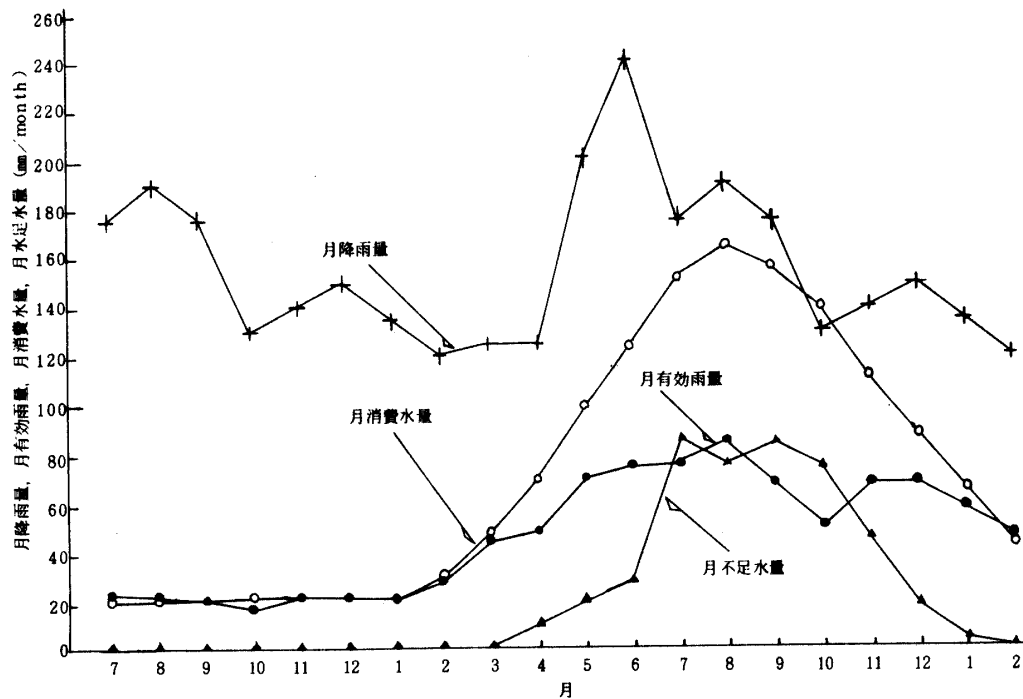


図4・8 月降雨量, 月有効雨量, 月消費水量および月不足水量の平年値の時期的変化(宮古, 石灰岩土壌)

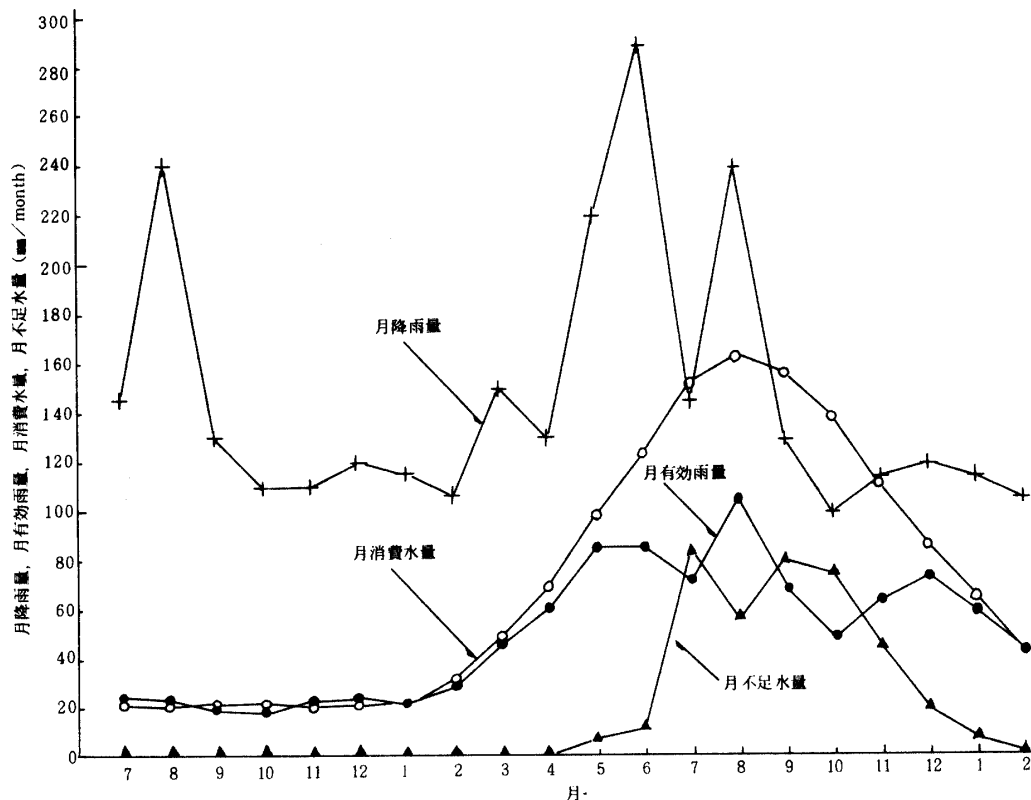


図4・9 月降雨量, 月有効雨量, 月消費水量および月不足水量の平年値の持期的変化(南風原, 泥灰岩土壌)

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

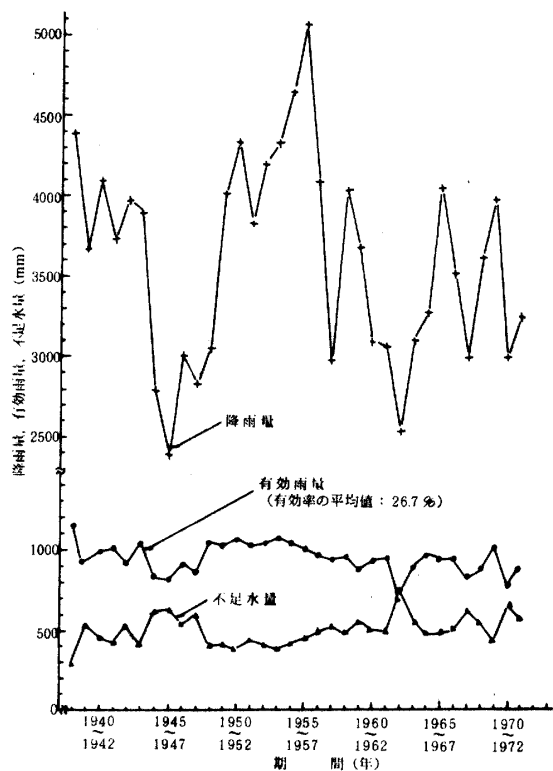


図 4・10 サトウキビの全生育期間における降雨量，有効雨量および不足水量の経年変化（宮古，石灰岩土壤）

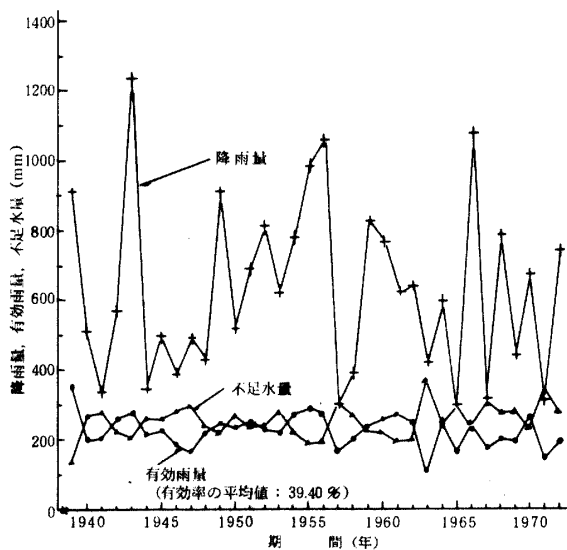


図 4・12 サトウキビ植付け翌年7月～9月における降雨量，有効雨量および不足水量の経年変化（宮古，石灰岩土壤）

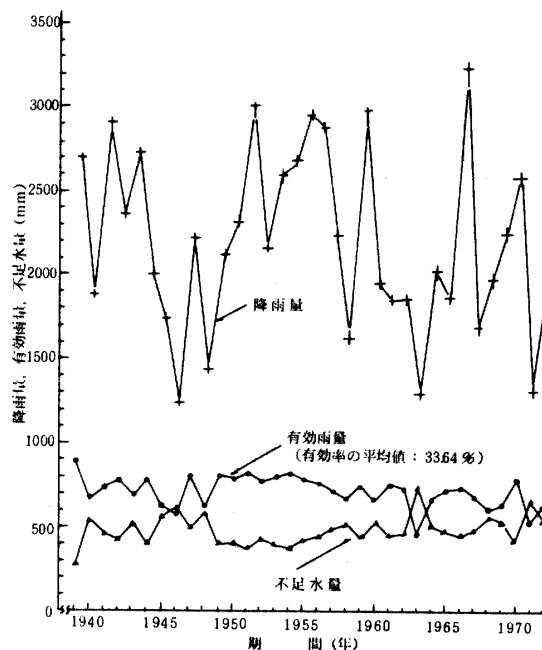


図 4・11 サトウキビ植付け翌年1月～12月における降雨量，有効雨量および不足水量の経年変化（宮古，石灰岩土壤）

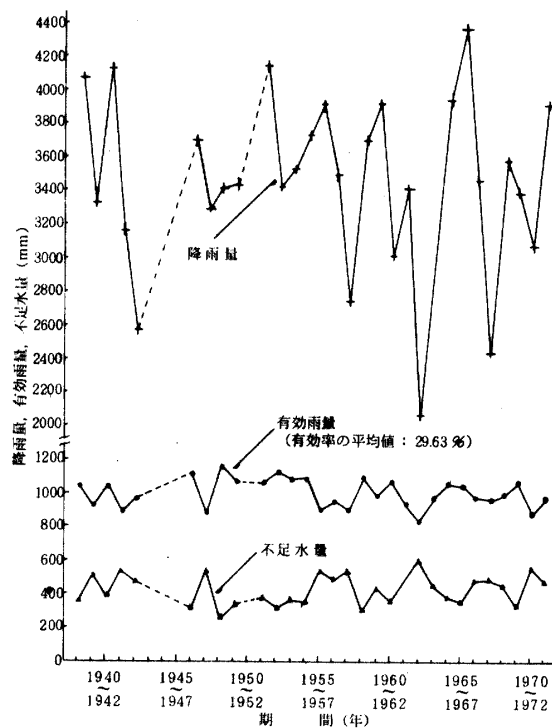


図 4・13 サトウキビの全生育期間における降雨量，有効雨量および不足水量の経年変化（南風原，泥灰岩土壤）



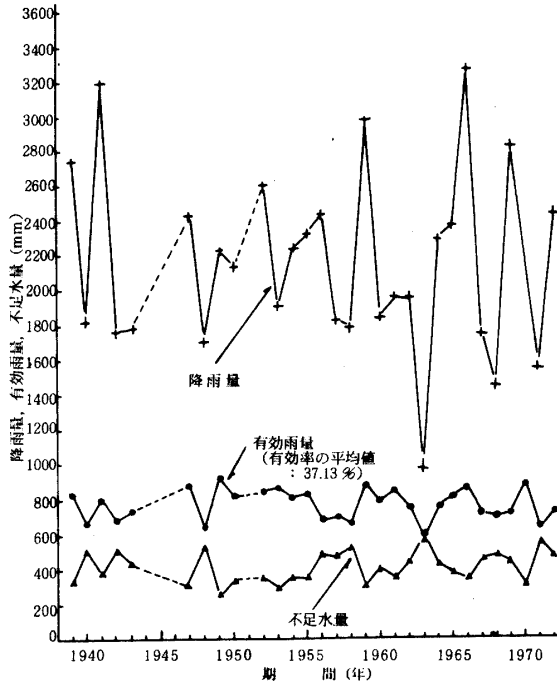


図4・14 サトウキビの植付け翌年1月～12月における降雨量, 有降雨量および不足水量の経年変化 (南風原, 泥灰岩土壤)

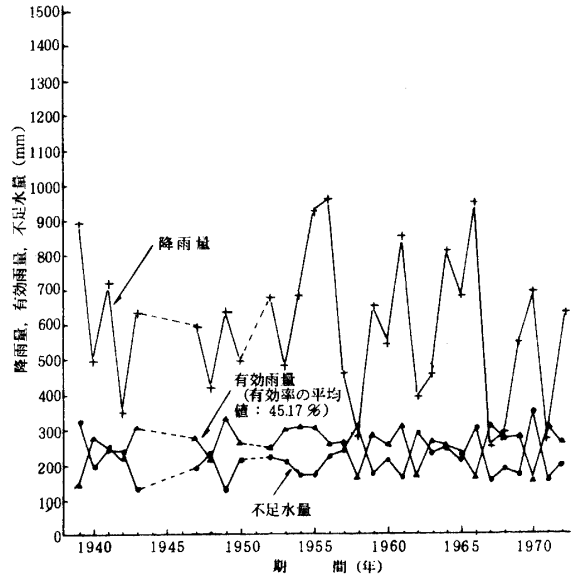


図4・15 サトウキビ植付け翌年7月～9月における降雨量, 有降雨量および不足水量の経年変化 (南風原, 泥灰岩土壤)

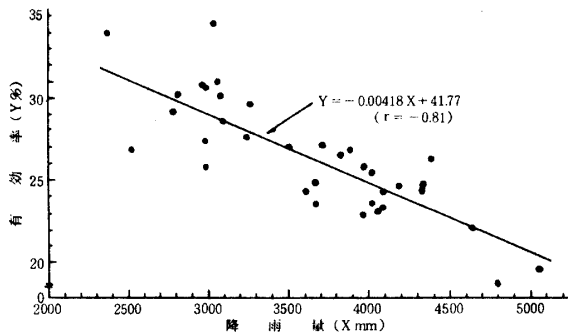


図4・16 サトウキビの全生育期間における降雨量とその有効率との関係 (宮古, 石灰岩土壤)

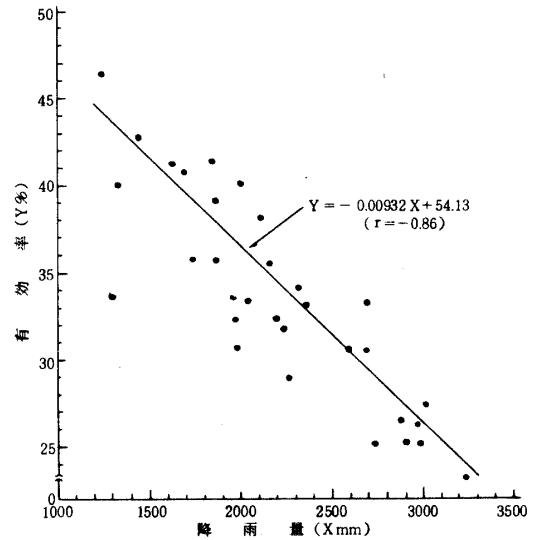


図4・17 サトウキビ植付け翌年1月～12月における降雨量とその有効率との関係 (宮古, 石灰岩土壤)

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

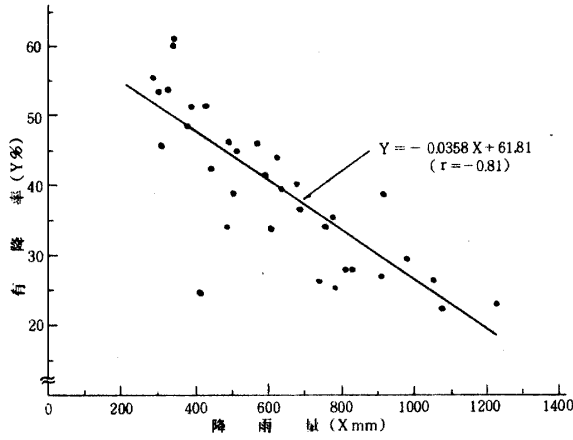


図4・18 サトウキビ植付け翌年7月～9月における降雨量とその有効率との関係 (宮古, 石灰岩土壌)

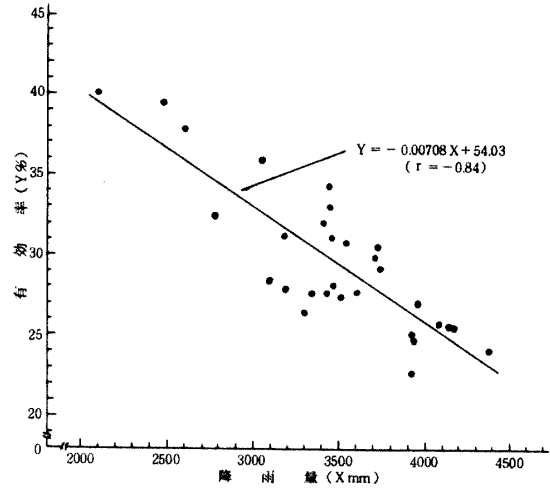


図4・19 サトウキビの全生育期間の降雨量とその有効率との関係 (南風原, 泥灰岩土壌)

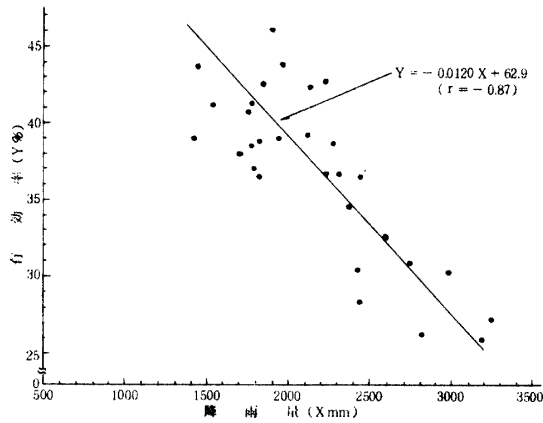


図4・20 サトウキビ植付け翌年1月～12月の降雨量とその有効率との関係 (南風原, 泥灰岩土壌)

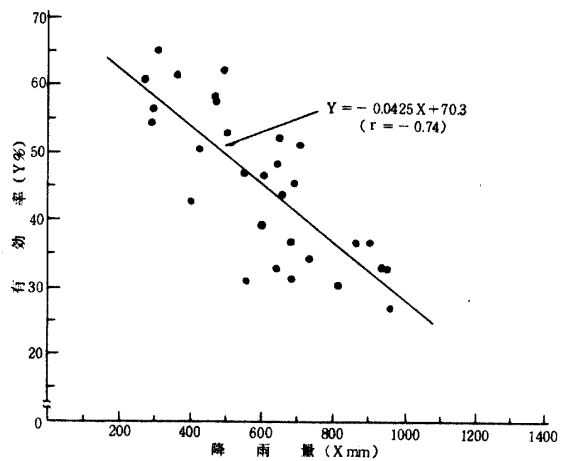


図4・21 サトウキビ植付け翌年7月～9月の降雨量とその有効率との関係 (南風原, 泥灰岩土壌)

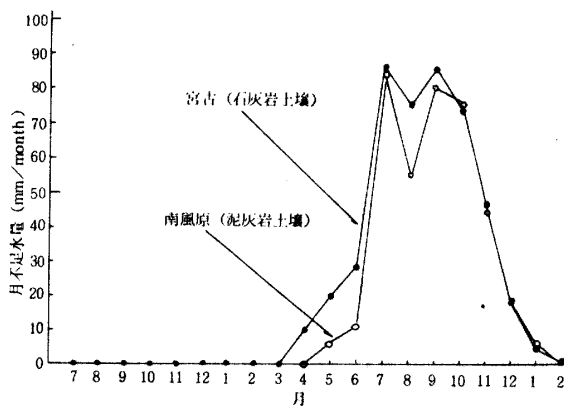


図4・22 宮古(石灰岩土壌地帯)と南風原(泥灰岩土壌地帯)における月不足水量の年平均値の比較

### 3 降雨量、有効雨量および不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量

前述したように、夏植サトウキビの水分不足は植付け翌年、とくに7月から9月に生ずる。このことは作物生育の面からも自然の降雨のみを頼ることなく、積極的にこの不足水量を人工的手法によって補給されるべきであると考え。ここでは宮古(石灰岩土地帯)における降雨量、有効雨量および不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係を論ずる。さらに南風原(泥灰岩土地帯)についてもこれらの関係を調べ比較検討した。なお、サトウキビの10アール当り収量は品種によって異なるものであるが、N:C<sub>0</sub>, 310が優良品種に決定された1957年以後についてこれらの関係を検討した。

まず宮古(石灰岩土地帯)の生産量について論ずる時、表4・5に示すように、サトウキビの台風被害率は極めて大きい。したがって、この検討に用いるサトウキビの10アール当り収量としては、同表の台風被害率で補正した値を採用した。次いで表4・6に1957年7月から1973年2月に宮古本島で栽培された夏植サトウキビの10アール当り収量とその間に宮古本島を襲った主な台風による被害率で補正したサトウキビの10アール当り収量を示した。台風デラ、エルシーおよびオルガによる被害率については正式のデータがないため、以下のように計算で求めてみた。

琉球気象庁<sup>52)</sup>によると台風デラ、エルシーおよびオルガによるサトウキビの被害高はそれぞれ64590 ton, 31188 ton, 46155 tonである。また琉球政府農林局<sup>55)</sup>によると、これらの台風が襲った年に栽培されていたサトウキビの生産高はそれぞれ440937 ton, 420145 ton, 452928 tonである。サトウキビの被害率は、これらの資料に基づき次のように計算した。

台風デラによる被害率

$$\frac{64590}{440937 + 64590} \times 100 \approx 13\%$$

台風エルシーによる被害率

$$\frac{31188}{420145 + 31188} \times 100 \approx 7\%$$

台風オルガによる被害率

$$\frac{46155}{452928 + 46155} \times 100 \approx 9\%$$

図4・23は全生育期間の降雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係を示すもので、両者の間に関係が認められない。図4・24と図4・25はそれぞれ全生育期間の有効雨量および不足水量と10アール当り収量との関係を示すものである。これらの図から、有効雨量と10アール当り収量との間には正、不足水量と10アール当り収量との間には負のコウ配を持つ直線関係が得られた。

次に図4・26は植付け翌年1年間の降雨量と10アール当り収量との関係を示すもので、この図においても関係は認められない。しかし、図4・27と図4・28はそれぞれ植付け翌年1年間の有効雨量および不足水量と10アール当り収量との関係を示すもので、これらの間の直線関係は全生育期間の場合に比べてはっきりしている。

図4・29に久目の調査結果に基づき、植付け翌年における夏植サトウキビの月平均伸長量を示す<sup>82)</sup>。この図と図4・8および図4・9は、サトウキビの伸長量、消費水量および不足水量が最大値を示すのは植付け翌年の7月から9月であり、この期間が生育最盛期であることを示唆している。図4・30~図4・32では、この期間の降雨量、有効雨量および不足水量と10アール当り収量との関係を求めた。図4・30においては、全生育期間および植付け翌年の場合と同様、降雨量と10アール当り収量との間には関係が認められないものの、図4・31と図4・32においてはもちろん直線関係が認められ、全生育期間に比

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

べてこの関係が明瞭である。

上記の3生育期間を通して、宮古（石灰岩土地帯）における降雨量と10アール当り収量との間には関係が認められない。しかしながら、同地帯における有効雨量および不足水量と10アール当り収量との間には、表4・7に示すようにそれぞれ正および負のコウ配を持つ直線関係があり、99%の信頼度で高い相関が認められた。

表4・7によると、夏植サトウキビの全生育期間、植付翌年の1年間および翌年の7月～9月の各生育期間における有効雨量とサトウキビの10アール当り収量との関係直線のコウ配はそれぞれ0.0165, 0.0170, 0.0338である。また、これらの各生育期間における不足水量と10アール当り収量との関係直線のコウ配はそれぞれ-0.0167, -0.0182および-0.0327である。すなわち、全生育期間と植付け翌年の1年間においては、有効雨量と10アール当り収量との関係直線のコウ配並びに不足水量と10アール当り収量との関係直線のコウ配は小さくほぼ同じである。しかしながら、植付け翌年の7月～9月におけるこれらの関係直線のコウ配はいずれも大きい。このことは全生育期間および植付け翌年の1年間よりは植付け翌年の7月～9月、すなわちサトウキビの生育最盛期におけるこれらの関係が大きいことを示唆している。有効雨量と不足水量を10アール当り収量との関係で各生育期間ごとに比較すると、関係直線のコウ配がいずれの生育期間においてもほぼ同じであることが認められる。したがって、両者は10アール当り収量との関係ではほぼ同じであると推察される。

次に南風原（泥灰岩土地帯）における降雨量、有効雨量および不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係についても検討した。すなわち、1957年～1973年の南風原における降雨量、有効雨量および不足水量と台風被害率によって補正した夏植サトウキビの10アール当り収量との関係について各生育期間ごとに調べた。図4・33に同地帯における不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係を各生育期間別に示す。この図によると南風原（泥灰岩土地帯）においては、不足水量とサトウキビの10アール当り収量との間には関係が認められない。同様に降雨量および有効雨量と10アール当り収量との間にも関係が認められなかった。これは前述のように、不透水性の基盤を有し、しかも土層の厚い泥灰岩土地帯においては、深部の土層からサトウキビの有効根群域に土壤水分が補給されるためである。

沖縄総合事務局<sup>43)</sup>および久貝ら<sup>25, 27)</sup>は糸満市と平良市の石灰岩土地帯と石垣市の名蔵礫層土地帯において長期にわたり、サトウキビのカンガイ試験を行った。沖縄のサトウキビ栽培には一般に7月～8月に植付け翌々年の1月～2月に収穫する夏植、3月～4月に植付け翌年の1月～2月に収穫する春植およびこれらを収穫した後の萌芽を生育させ翌年の1月～2月に収穫する株出栽培がある。この実験では夏植と株出しについて主に散水カンガイ試験を行っている。その主な結果をまとめて表4・8に示す。この表によると、実験年次によって異なるが、原料茎重および可製糖量ともに大きなカンガイ効果を示している。また、平良市と石垣市における試験結果によると、N:Co, 310に対しH 44-3098およびF146の方が大きなカンガイ効果を示すことがわかる。図4・34は表4・8に示す試験結果のうち糸満市のデータについて、有効水量（有効雨量+カン水量）とサトウキビの10アール当り収量との関係をまとめたものである。ただし、夏植と株出しとはサトウキビの収量の差が大きいので、この図では夏植のデータは削除されている。この図によると、両者の間には下記の式に示すような正の勾配を持つ直線関係があり、相関係数は大きい。

$$Y = 0.027 X - 2.06 \quad \text{相関係数 } r = 0.93$$

ここで

X：有効水量（mm）

Y：10アール当り収量（t/10a）

したがって、著者が行った石灰岩土地帯における有効雨量とサトウキビの10アール当り収量との関係を解析した結果と久貝らの行った試験結果がほぼ一致したことになる。

表4・5 主な台風によるサトウキビの被害率(宮古)

期 日	台 風 名	最大風速 m/s	地 区 名				摘 要
			平良市 %	城辺町 %	下地町 %	上野村 %	
1959年 9月	サ ラ	53.0	32	32	32	32	気象月報 No.57
1959年10月	シャーロット	32.0	10	10	10	10	気象月報 No.58
1959年11月	エ マ	34.2	15	15	15	15	気象月報 No.59
1961年 9月	パ メ ラ	32.3	3	3	3	3	異常気象報告 No.43, No.45
1961年10月	テ ル ダ	28.0	1	1	1	1	異常気象報告 No.15
1963年 6月	シャーリイ	37.7	2	—	1	—	気象月報 No.102
1963年 9月	グ ロ リ ヤ	38.8	10	10	10	10	気象月報 No.105
1964年 7月	ベ テ イ	38.3	12	17	16	13	異常気象報告 No.52
1966年 9月	コ ラ	60.8	40	40	40	40	異常気象報告 No.58
1968年 9月	デ ラ	54.3	13	13	13	13	異常気象報告 No.60
1969年 9月	エルシー	41.0	7	7	7	7	異常気象報告 No.61
1970年 6月	オ ル ガ	29.2	9	9	9	9	異常気象報告 No.62
1972年 8月	ク ラ ラ	30.5	5	5	5	5	沖縄における 異常気象調査 報告(その2)

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表4・6 夏植サトウキビの10アール当り収量(宮古)

生育期間	項目	地区名				計	平均
		平良市	城辺町	下地町	上野村		
1957年7月～1959年2月	A	382	680	210	283	1555	6.47
	Y	6.49	6.96	6.31	5.40		
	Ya	6.49	8.96	6.31	5.40		
1958年7月～1960年2月	A	604	774	251	284	1913	3.80
	Y	3.84	3.59	4.90	3.35		
	Ya	6.40	5.99	8.18	5.59		
1959年7月～1961年2月	A	663	747	318	288	1986	6.33
	Y	5.67	6.96	6.51	5.92		
	Ya	5.67	6.96	6.51	5.92		
1960年7月～1962年2月	A	808	1053	343	291	2495	8.20
	Y	7.98	8.18	8.94	8.00		
	Ya	8.30	8.51	9.30	8.32		
1961年7月～1963年2月	A	848	929	373	307	2457	8.58
	Y	7.87	8.97	9.34	8.40		
	Ya	7.87	8.97	9.34	8.40		
1962年7月～1964年2月	A	643	747	315	256	1961	2.27
	Y	2.78	1.68	2.93	1.89		
	Ya	3.12	1.85	3.26	2.08		
1963年7月～1965年2月	A	692	870	311	277	2150	7.50
	Y	7.60	7.66	7.50	6.76		
	Ya	8.51	8.96	8.70	7.64		
1964年7月～1966年2月	A	465	449	232	205	1351	6.28
	Y	6.45	6.31	6.09	6.03		
	Ya	6.45	6.31	6.09	6.03		
1965年7月～1967年2月	A	520	677	205	198	1600	5.59
	Y	5.87	5.52	5.05	5.64		
	Ya	8.22	7.73	7.05	7.90		
1966年7月～1968年2月	A	611	351	236	191	1389	5.61
	Y	5.51	5.79	5.40	5.88		
	Ya	5.51	5.79	5.40	5.88		
1967年7月～1969年2月	A	527	380	192	205	1304	7.02
	Y	7.13	7.24	6.83	6.53		
	Ya	8.06	8.18	7.72	7.38		
1968年7月～1970年2月	A	532	490	274	226	1522	7.05
	Y	7.04	7.45	6.72	6.58		
	Ya	7.53	7.97	7.19	7.04		
1969年7月～1971年2月	A	494	578	295	234	1601	7.23
	Y	6.70	7.75	7.20	7.10		
	Ya	7.30	8.45	7.85	7.74		
1970年7月～1972年2月	A	243	346	185	159	933	1.29
	Y	1.15	1.43	1.43	1.04		
	Ya	1.15	1.43	1.43	1.04		
1971年7月～1973年2月	A	616	1062	330	196	2204	5.88
	Y	5.52	6.05	5.97	5.90		
	Ya	5.80	6.35	6.27	6.20		

注 A：面積  
haY：10アール当り収量  
ton/10aYa：台風被害により補正した10アール当り収量  
ton/10a

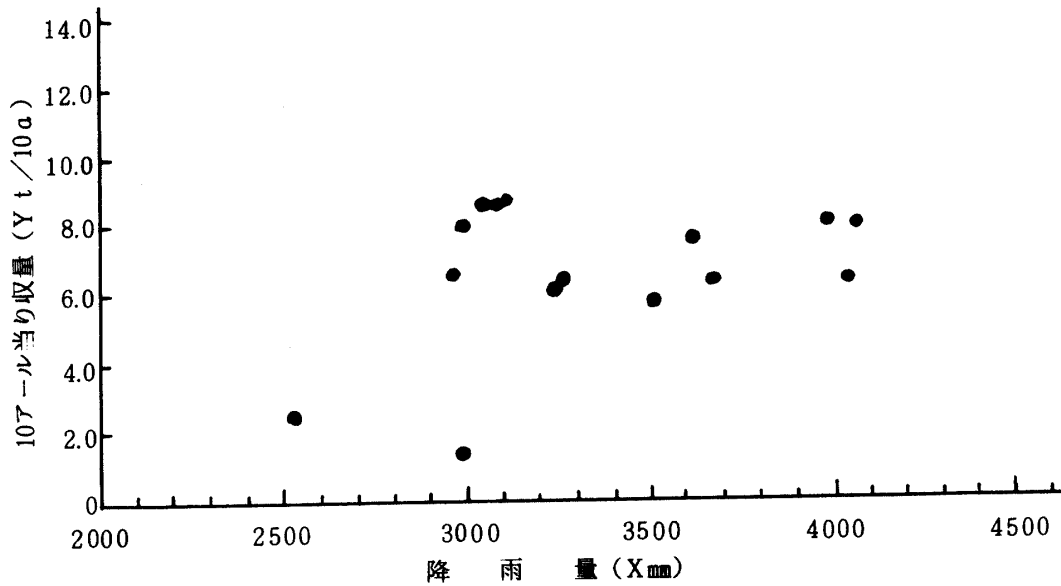


図4・23 全生育期事の降雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壤)

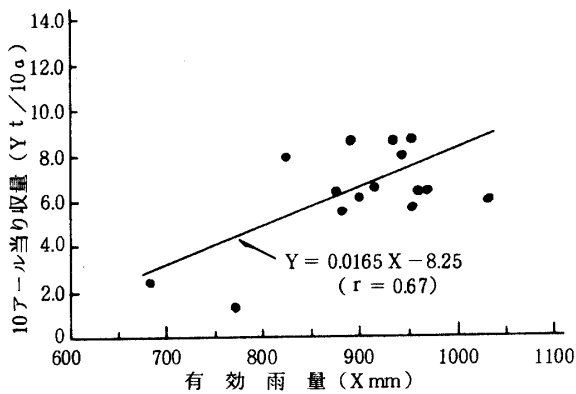


図4・24 全生育期間の有効雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壤)

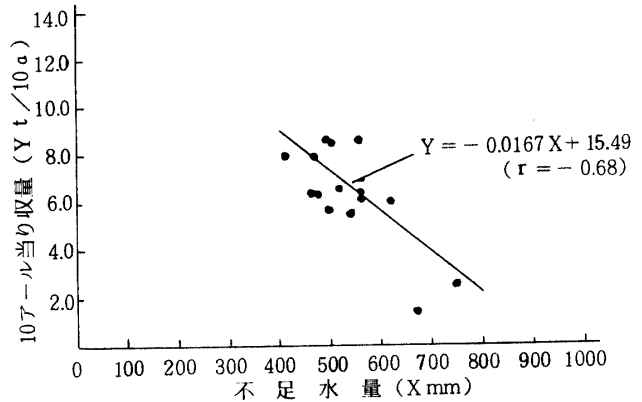


図4・25 全生育期間の不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壤)

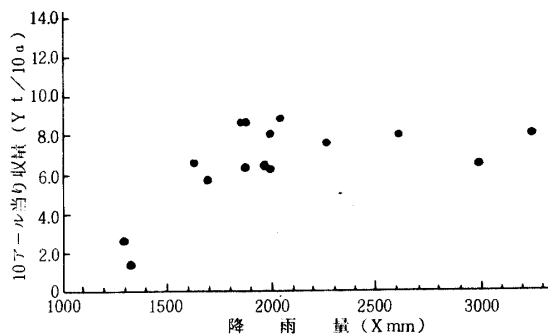


図4・26 植付け翌年1月~12月の降雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壤)

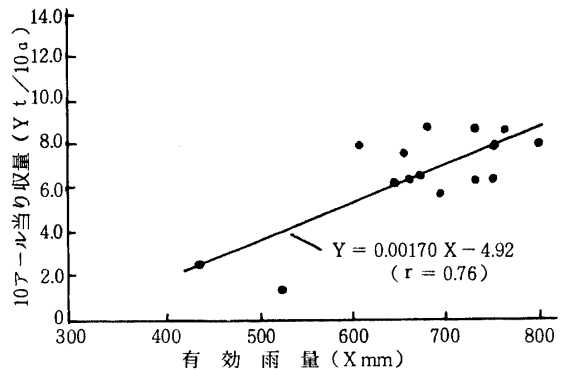


図4・27 植付け翌年1月~12月の有効雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壤)

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

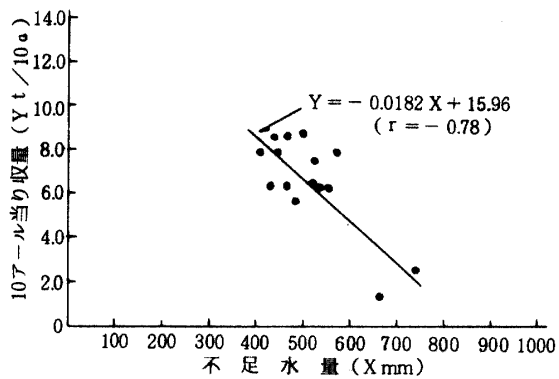


図4・28 植付け翌年1月～12月の不足量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壌)

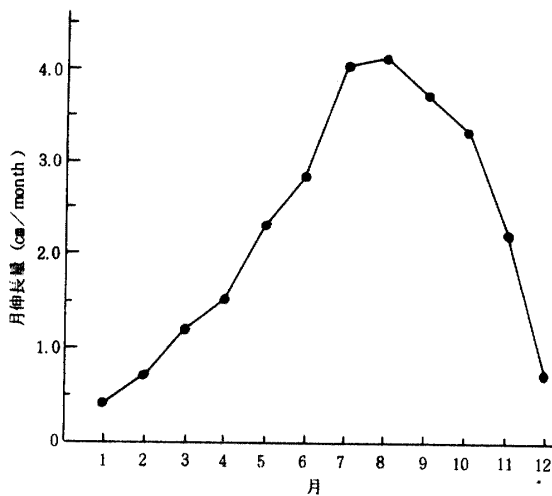


図4・29 夏植サトウキビの茎長の月伸長量

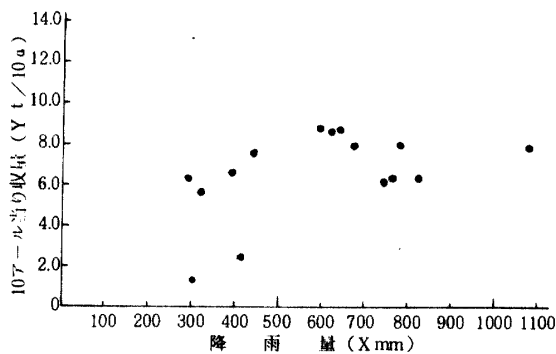


図4・30 植付け翌年7～9月の降雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壌)

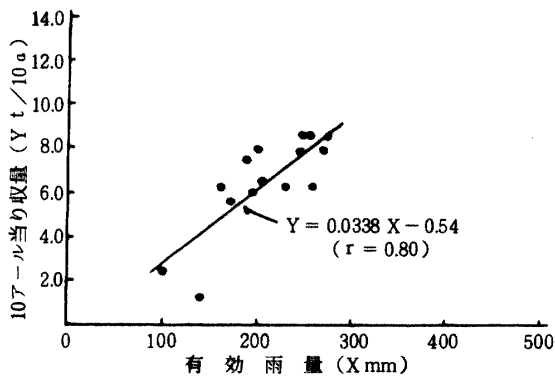


図4・31 植付け翌年7月～9月の有効雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壌)

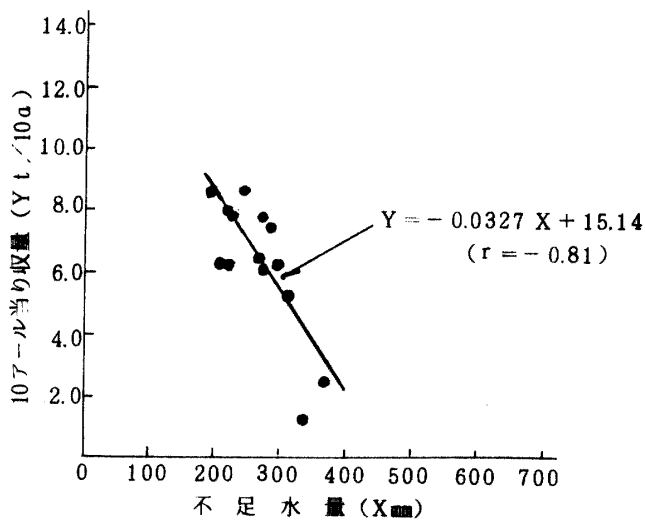


図4・32 植付け翌年7月～9月の不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係 (宮古, 石灰岩土壌)



表4・7 有効雨量および不足水量と10アール当り収量との関係

生育期間	項目	有効雨量(X)と収量(Y)との関係	相関係数(r)	不足水量(X)と収量(Y)との関係	相関係数(r)
全生育期間		$Y = 0.0165 X - 8.25$	0.67	$Y = -0.0167 X + 15.49$	-0.68
植付け翌年の1年間		$Y = 0.0170 X - 4.92$	0.76	$Y = -0.0182 X + 15.96$	-0.78
植付け翌年の7月~9月		$Y = 0.0338 X - 0.54$	0.80	$Y = -0.0327 X + 15.14$	-0.81

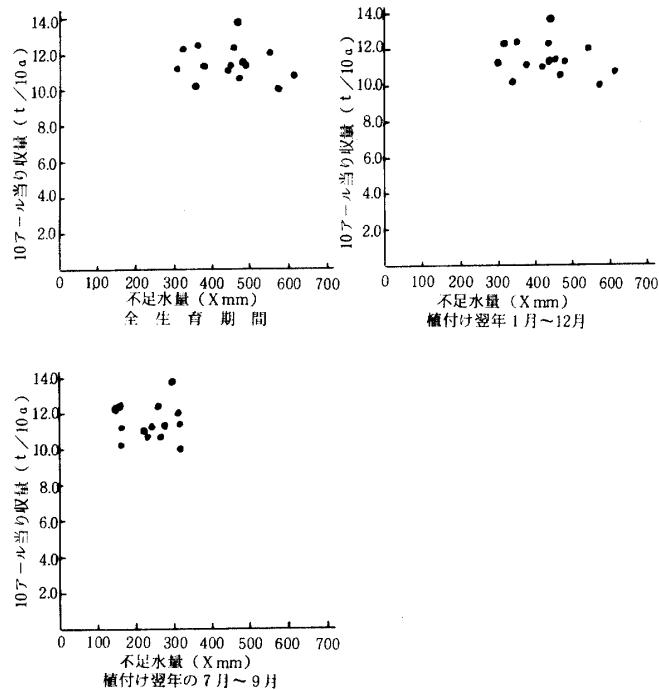


図4・33 不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係(南風原, 泥灰岩土壤)

表4・8 サトウキビに対するカンガイ効果

地区名	土壌名	試験期間	品 種	耕種別	カンガイ方法	1回のカン水量 mm	カン水回数	原料茎重 t/10a	増収率 %	可制糖量 t/10a	増収率 %		
糸満市	石灰岩土壤	1973年2月~1974年2月	N:Co, 310	株出し	散水カンガイ	無カン水 20, 10 40, 20	2 2	6.280 7.103 7.058	100 113 112	0.911 1.042 1.042	100 115 115		
		1974年2月~1975年1月	N:Co, 310	株出し	散水カンガイ	無カン水 20	3 3	6.185 8.403 9.023	100 136 146	0.900 1.144 1.121	100 127 125		
		1975年1月~1977年1月	N:Co, 310	夏植え	散水カンガイ	無カン水 20 40	1 1	10.865 13.060 13.000	100 120 120	1.588 1.806 1.856	100 114 117		
		1977年2月~1978年1月	N:Co, 310	株出し	ホースカンガイ	無カン水 40, 35	2	7.237 10.573	100 146	0.987 1.400	100 114		
		平良市	石灰岩土壤	1962年8月~1964年1月	N:Co, 310	夏植え	ウネ間カンガイ	無カン水 20	23	5.153 7.596	100 147	0.677 1.102	100 163
					H44-3098	夏植え	ウネ間カンガイ	無カン水 20	23	4.402 7.150	100 177	0.429 0.807	100 174
					N:Co, 310	夏植え	散水カンガイ	無カン水 20 40	15 15	10.425 13.010 13.315	100 125 128	1.198 1.749 1.830	100 146 153
石垣市	名蔵階層土壤	1973年8月~1975年1月	N:Co, 310	夏植え	散水カンガイ	無カン水 20 40	15 15	10.960 15.615 16.360	100 143 149	1.193 1.857 2.088	100 156 175		
			F146	夏植え	散水カンガイ	無カン水 20 40	15 15	10.960 15.615 16.360	100 143 149	1.193 1.857 2.088	100 156 175		
			N:Co, 310	夏植え	散水カンガイ	無カン水 20 40	15 15	10.960 15.615 16.360	100 143 149	1.193 1.857 2.088	100 156 175		

山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

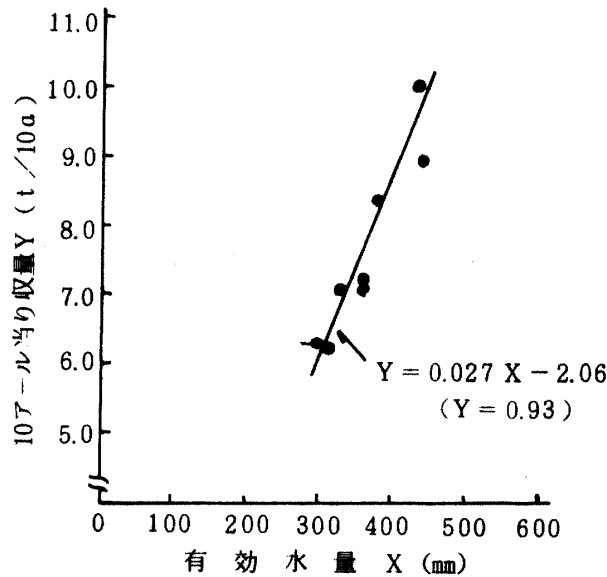


図4・34 生育旺盛期（6月～9月）の有効水量と10アール当り収量との関係（糸満市，1973年，1974年，1977年）

4 不足水量の確率計算

前述のように、宮古（石灰岩土地帯）においては、不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との間に負のコウ配を持つ直線関係が認められた。したがって、カンガイ計画の作成および干バツ被害の検討には、不足水量の生起確率を計算する必要がある。ここでは宮古における不足水量の生起確率の計算を試みた。

本節1および2の計算結果に基づき、宮古における夏植サトウキビの各生育期間別に不足水量の順位表を作成し表4・9に示す。この表のデータを用いて、各生育期間別に不足水量を正規確率紙および対数正規確率紙にプロットした。その結果を図4・35・1～図4・37・2に示す。これらの図から不足水量は対数正規分布をするものと判定される。したがって、岩井法によって不足水量の超過確率を計算した。

岩井法は、確率変数  $x$  が対数正規分布をなすものとして、すなわち  $x$  の対数値がガウスの正規分布をなすものとして超過確率  $W(x)$  を求めるものである。その継続曲線は次の式で表わされる。

$$W(x) = \frac{1}{2} \{ 1 - \phi(\frac{x}{\sigma}) \} \dots\dots\dots (4 \cdot 1)$$

ここで

$$\xi = C \log \frac{x_i}{x_0}$$

である。キンボールと岩井<sup>36)</sup> は次の式に示すように近似値を得ようとして下限値  $b$  のそう入を試みた。

$$\xi = C \log \{ (x_i + b) / (x_0 + b) \} \dots\dots\dots (4 \cdot 2)$$

$$\sqrt{2\xi} = \sqrt{2C} \log \{ (x_i + b) / (x_0 + b) \} \dots\dots\dots (4 \cdot 3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2C}} = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} \{ \log \frac{(x_i + b)}{(x_0 + b)} \}^2}} \dots\dots\dots (4 \cdot 4)$$

ここで

$x_i$  : 確率変数

$x_0$  :  $x_i$  の標本中央値

C : 非対称の程度を示す定数

b : 分布曲線の下限值

$\frac{1}{\sqrt{2C}}$  : 標準偏差

である。この方法によって計算した結果を表4・10に示す。この表を用いると(1)サトウキビの全生育期間、(2)植付け翌年の1年間および(3)植付け翌年の7月～9月の各生育期間における不足水量とその生起確率との関係を知ることができる。例えば10年確率の畑地カンガイ計画に際しては、前述の(1)、(2)および(3)の各生育期間の不足水量としてそれぞれ約623mm、605mm、317mmが得られるので、これに基づいて補給水量を定めることができる。

表4・11は南風原(泥灰岩土地帯)における不足水量とその順位をサトウキビの各生育期間別に示したものである。この表に基づき、前述の方法で各生育期間における不足水量の生起確率を求めて表4・12に示す。表4・12によると、南風原では各生育期間における10年確率の不足水量はそれぞれ約557mm、543mm、299mmとなっている。これらの値は宮古(石灰岩土地帯)における10年確率の不足水量に比べると、各生育期間とも小さい値を示しているものの、かなり大きな不足水量と言える。しかしながら前述のように、深部土層からの土壌水分補給その他の理由で、泥灰岩土地帯においてはサトウキビはあまり干バツ被害を受けなくて済む。

第1節で述べたように、1960年代の宮古においては、サトウキビはほぼ1年おきに干バツ被害を受けている。表4・13は表4・9に基づき、これらの干バツ年における不足水量の超過確率の再現期間を計算し、これと表4・2によるサトウキビの干バツ被害率とを比較検討したものである。この表によると、一般に不足水量の再現期間が長い年にはサトウキビの干バツ被害率が大きくなっている。

しかしながら、1962年7月～1964年2月と1970年7月～1972年2月について、不足水量の超過確率の再現期間とサトウキビの干バツ被害を検討すると、この関係は逆になっている。これは図4・38に示すように、1971年には一般に沖縄で最も雨が多い6月にも約120mmの土壌水分が不足したためであると考えられる。図4・38は上記の両栽培期間における不足水量を比較したものである。この図から明らかのように、両栽培期間におけるサトウキビ植付け翌年の4月と5月の不足水量はほぼ同じ値であり、サトウキビは同じ程度の干バツ被害を受けていると考えられる。1963年6月には、土壌水分欠乏が一時解消された後、サトウキビは7月～10月の土壌水分欠乏に遭遇している。しかしながら、1971年には6月にも約120mmの土壌水分が不足し、サトウキビはさらに7月～9月の土壌水分欠乏に遭遇している。前述のように、10月はサトウキビの伸長後期に当り、7月～9月の生育最盛期ほど土壌水分欠乏がサトウキビの生育に大きな影響を与えない。表4・13に示すように、1962年7月～1964年2月には、全生育期間、植付け翌年の1年間および翌年の7月～9月の各生育期間において不足水量の絶対値は大きい。しかしながら、6月に水分欠乏が一時解消されたために、サトウキビの干バツ被害率は小さくなったと推察される。すなわち、サトウキビの生育は各生育期間における不足水量の絶対量のみならず、その分布状態によっても影響されると考えられる。

計画年次の決定に際しては、土壌水分が作物の生育に最も影響を与える期間の不足水量について検討することが必要であろう。表4・13によると、植付け翌年の1年間の不足水量を考えるならば、宮古における夏植サトウキビの干バツ被害率が20%程度になるような土壌水分欠乏は約2年に1度の確率で現われることになる。このような土壌水分欠乏を解消するために、宮古(石灰岩土地帯)においては結局はカンガイが必要となると言える。

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表4・9 サトウキビの各生育期間における不足水量とその順位表  
(宮古, 石灰岩土壌)

期間 順位	全生育期間 mm	植付け翌年の1月～12月 mm	植付け翌年の7月～9月 mm
1	747.6	746.4	370.2
2	673.2	669.5	343.6
3	631.7	612.9	315.6
4	617.6	589.9	310.2
5	616.4	573.5	305.8
6	589.9	553.0	295.5
7	559.9	552.7	285.4
8	559.1	536.9	284.7
9	553.2	536.3	281.4
10	540.6	528.1	279.3
11	536.3	516.1	277.4
12	525.5	515.3	204.2
13	521.0	500.9	271.9
14	516.1	484.8	271.8
15	497.0	481.1	264.7
16	495.4	481.1	264.2
17	492.2	470.7	254.7
18	481.1	464.4	242.5
19	470.7	454.8	242.1
20	470.3	450.3	233.1
21	462.2	440.5	232.5
22	454.8	437.9	228.6
23	440.8	433.8	227.7
24	427.8	426.6	225.2
25	415.8	415.8	221.5
26	411.5	407.0	214.6
27	405.7	405.7	212.7
28	401.4	401.4	212.3
29	394.8	389.8	204.6
30	389.8	385.0	197.7
31	386.7	380.2	194.4
32	369.9	369.9	191.3
33	366.9	363.6	182.5
34	295.3	283.4	138.2

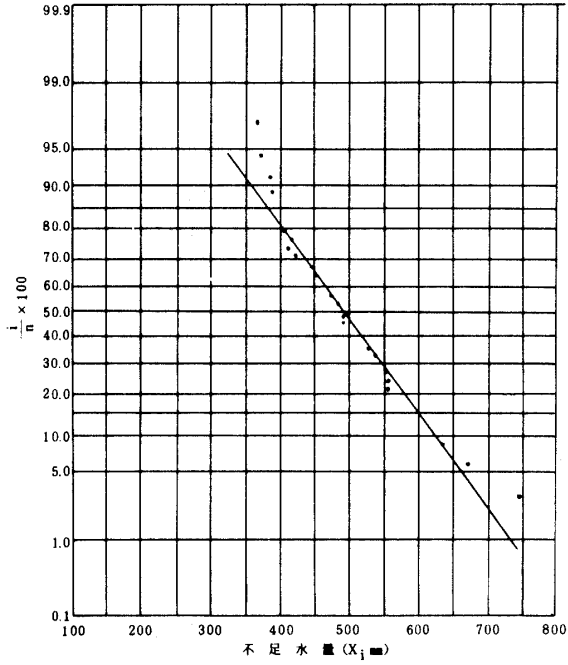


図4・35・1 サトウキビの全生育期間における不足水量の生起確率 (正規確率紙による方法, 宮古, 石灰岩土壌)

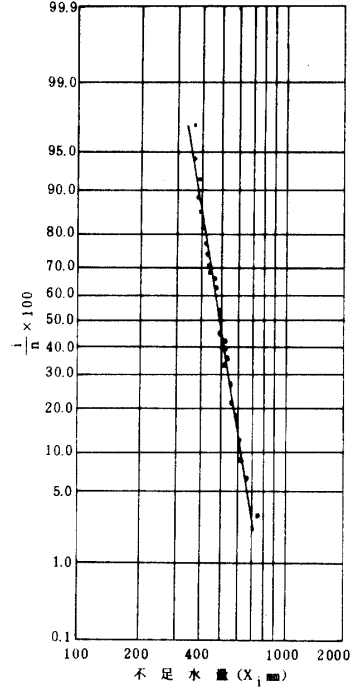


図4・35・2 サトウキビの全生育期間における不足水量の生起確率 (対数正規確率紙による方法, 宮古, 石灰岩土壌)

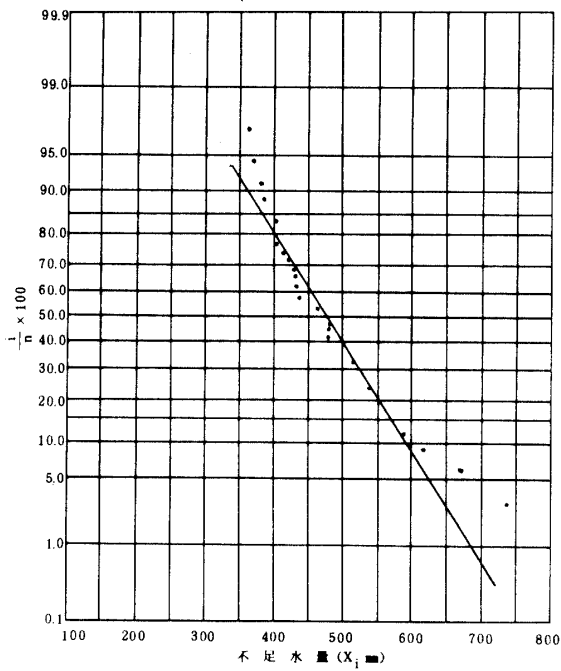


図4・36・1 サトウキビ植付け翌年1月~12月における不足水量の生起確率 (正規確率紙による方法, 宮古, 石灰岩土壌)

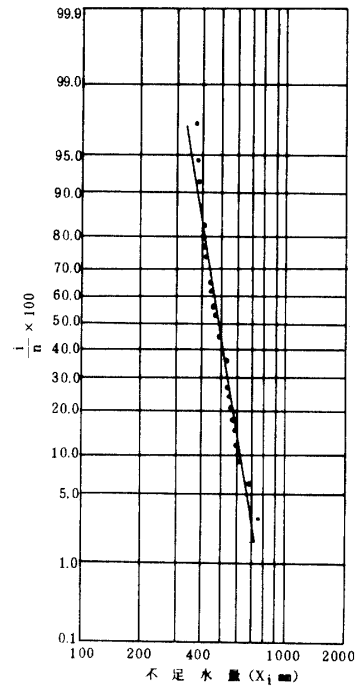


図4・36・2 サトウキビ植付け翌年1月~12月における不足水量の生起確率 (対数正規確率紙による方法, 宮古, 石灰岩土壌)

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

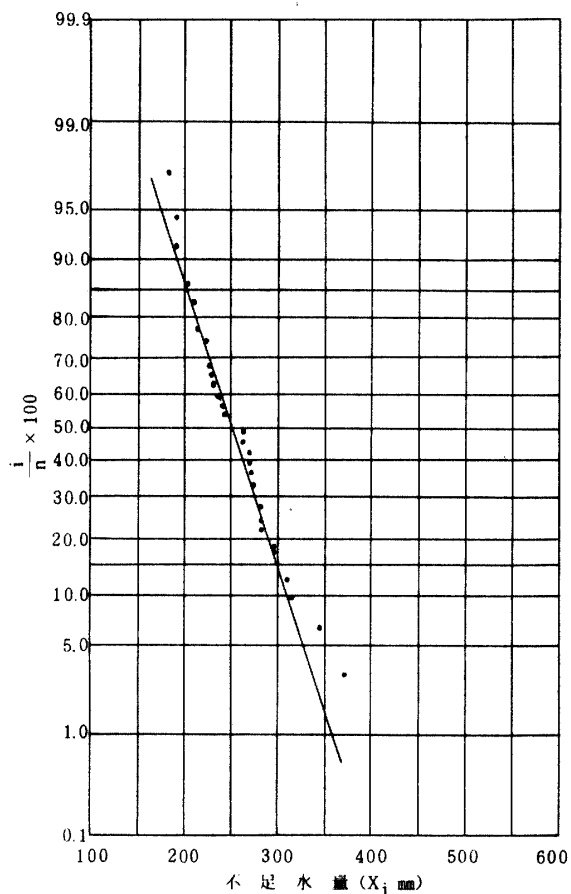


図 4・37・1 サトウキビ植付け翌年7月～9月における不足水量の生起確率  
(正規確率紙による方法, 宮古, 石灰岩土壌)

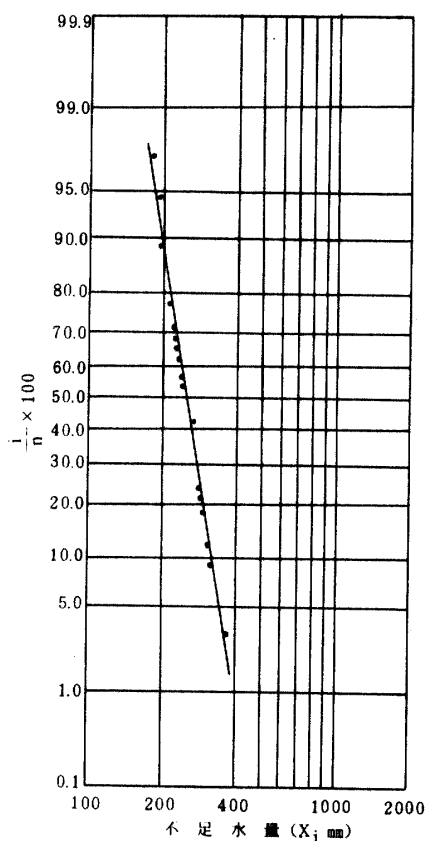


図 4・37・2 サトウキビ植付け翌年7月～9月における不足水量の生起確率  
(対数正規確率紙による方法, 宮古, 石灰岩土壌)

表 4・10 各生育期間における不足水量の生起確率  
(宮古, 石灰岩土壌)

確 率		全生育期間 mm	植付け翌年の1月～12月 mm	植付け翌年の7月～9月 mm
T 年	W(x)			
1000	0.00100	899.3	889.3	429.1
500	0.00200	861.3	849.0	414.8
300	0.00333	834.0	820.3	404.3
200	0.00500	809.9	795.1	394.9
100	0.01000	770.0	753.6	379.0
50	0.02000	728.5	711.0	362.0
20	0.05000	670.7	652.2	337.5
10	0.10000	623.2	604.7	316.6
8	0.12500	606.9	588.5	309.2
5	0.20000	570.4	552.6	292.4
4	0.25000	551.6	534.3	283.5
2	0.50000	482.0	467.3	249.0

表4・11 サトウキビの各生育期間における不足水量とその順位表  
(南風原, 泥灰岩土壌)

順位	期間	全生育期間 mm	植付け翌年1月～12月 mm	植付け翌年7月～9月 mm
1		611.9	611.9	316.8
2		570.6	570.6	315.6
3		549.0	549.0	311.2
4		543.1	543.1	296.8
5		539.7	524.6	281.9
6		537.3	522.2	279.5
7		524.6	486.9	273.9
8		487.1	477.6	264.7
9		482.2	468.7	254.4
10		481.7	468.3	249.0
11		468.7	459.1	242.8
12		466.5	443.1	236.9
13		462.9	441.5	235.6
14		454.4	439.0	234.0
15		447.4	433.7	232.9
16		440.2	411.4	223.2
17		378.7	378.6	221.5
18		378.6	376.0	220.5
19		376.0	364.8	213.5
20		361.2	356.6	210.3
21		356.6	349.4	194.1
22		353.7	348.1	172.4
23		350.1	340.0	169.1
24		349.4	337.6	168.7
25		343.3	333.1	161.5
26		320.1	312.9	158.4
27		312.9	312.5	149.5
28		306.0	297.8	136.9
29		304.8	291.3	130.6
30		254.6	254.6	128.4

表4・12 各生育期間における不足水量の生起確率 (南風原, 泥灰岩土壌)

T 年	確 率	全生育期間 mm	植付け翌年1月～12月 mm	植付け翌年7月～9月 mm
	W(X)			
1000	0.00100	795.0	799.4	428.9
500	0.00200	763.9	764.4	412.4
300	0.00333	741.2	739.0	400.1
200	0.00500	721.1	717.0	389.3
100	0.01000	687.1	680.0	370.9
50	0.02000	651.2	641.4	351.3
20	0.05000	600.1	587.4	322.8
10	0.10000	556.9	542.7	298.7
8	0.12500	541.7	527.4	290.0
5	0.20000	507.3	492.7	270.5
4	0.25000	489.4	474.8	260.1
2	0.50000	420.9	408.1	220.1

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表4・13 不足水量の再現期間とサトウキビの被害率との関係（宮古，石灰岩土壌）

年月	生育期間	全 生 育 期 間		植付け翌年の1月～12月		植付け翌年の7月～9月		干バツ 被害率 %
	項目	不足水量 mm	再現期間 年	不足水量 mm	再現期間 年	不足水量 mm	再現期間 年	
1962.7～1964.2		740.6	68.5	746.4	88.5	370.2	69.9	60
1964.7～1966.2		470.7	1.8	470.7	2.1	295.5	5.4	21
1966.7～1968.2		495.4	2.3	484.8	2.4	310.2	8.3	15
1970.7～1972.2		673.2	20.6	669.5	26.0	343.6	24.9	90

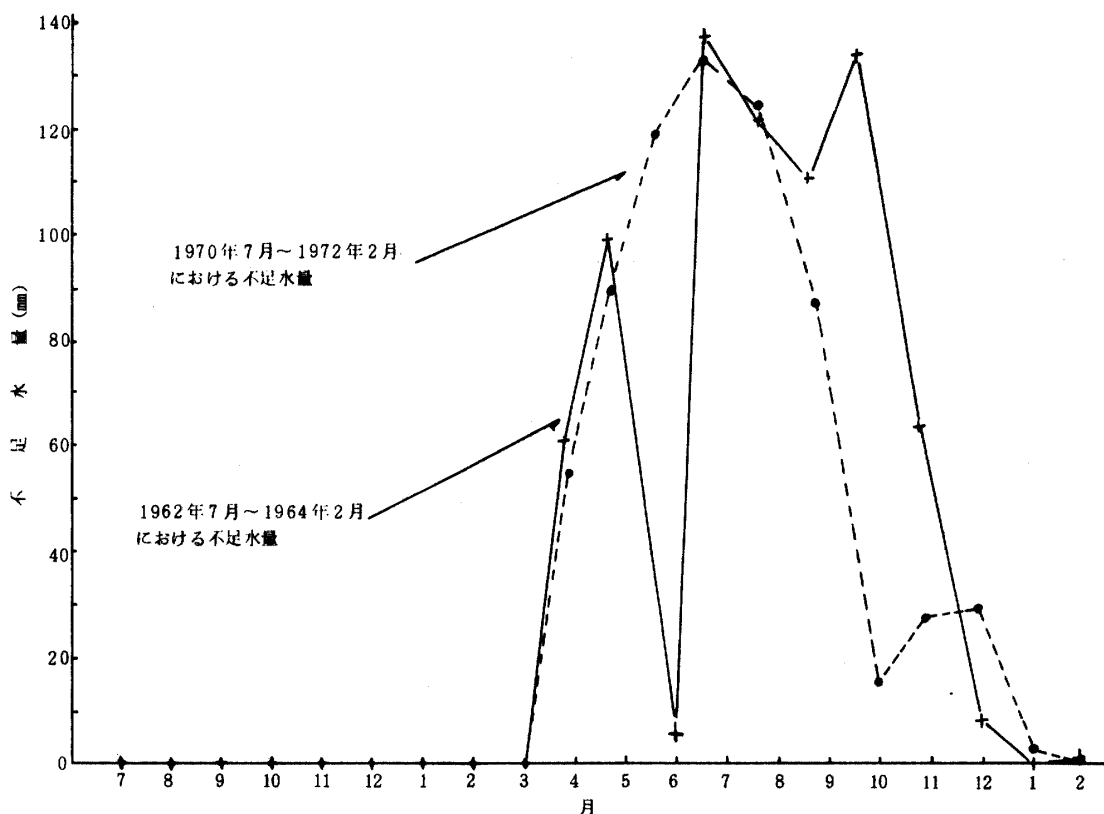


図4・38 1962年7月～1964年2月における不足水量と1970年7月～1972年2月における不足水量との関係（宮古，石灰岩土壌）

## 第V章 総 括

## 1 沖縄におけるサトウキビ栽培の重要性

わが国においては、農業所得と他産業における所得の差が近年縮ってきたがまだ格差がある。また、農業も片手間として季節賃金所得の道があるため収入はかなりよくなる。しかし農村生活の向上はあるものの都市生活に憧れる思想はやまない。そして農地の売却、転用および農業人口の他産業への流出がかなり広範囲に行われている。とくに祖国復帰後まもない沖縄においては、急激な社会・経済変動によって、農業は危機に瀕している感がある。古来から沖縄で住民の生食用として栽培されていたと言われ



ているサトウキビは、製糖法の導入以来、本格的に栽培されるようになった。このサトウキビ栽培は、主食用作物の確保その他の理由で盛衰はあったが、戦前戦後を通じて沖縄の基幹産業として最も重要な地位を占めてきた。このことは第I章で述べたサトウキビの栽培状況、輸出総額に占める砂糖の輸出額の割合などから明らかである。サトウキビの栽培適温は年平均気温で $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ で、最適気温は $24^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ の範囲である。これに対し、沖縄の年平均気温は地域による多少の差はあるが $22^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ であり、沖縄は気温の面からはサトウキビの栽培適地である。サトウキビは約 $1500\text{mm}\sim 2000\text{mm}$ の年平均降雨量を必要とするが、沖縄の年平均降雨量は $2000\text{mm}\sim 2400\text{mm}$ もあり、その絶対量はサトウキビ栽培に必要な降雨量として十分である。しかし、降雨の時期的分布に偏りがあり、夏期にはしばしば土壌水分欠乏をきたす。一方、沖縄でサトウキビが最も多く栽培されている石灰岩土壌（島尻マーチ土壌）と泥灰岩土壌（ジャーガル土壌）について、土壌の物理性と3相分布を調べ、さらに最大毛管力の測定、吸水試験および乾燥試験を行った。その結果、特に石灰岩土壌地帯が土壌水分欠乏をきたしやすい地帯であることを明らかにした。すなわち、この石灰岩土壌地帯にカンガイを行えば沖縄はサトウキビの栽培適地であると思われる。ただし、サトウキビはPH 6.1～PH 7.7の土壌において正常な生育をするものであり、沖縄本島北部に分布する強酸性または酸性の国頭マーチ土壌はあまり適していないことになる。

以上、サトウキビは元来熱帯作物であるが、沖縄における歴史、その他立地条件および沖縄経済に占める地位などから、やはり基幹作物として重要な意味を持つものである。したがって沖縄農業の生産性の向上をはかるために、沖縄のサトウキビ栽培においては、畑地カンガイが重要な意味を持つことになる。

## 2 サトウキビの消費水量

自然的条件からだけ考えると、沖縄においてもサトウキビに対する畑地カンガイは必要である。そのため、沖縄におけるサトウキビの消費水量について検討を試みた。一般に、作物の消費水量はその蒸散量と土壌面蒸発量からなるとみなされる。畑地カンガイの立場でこの消費水量を考える場合は、蒸散量と土壌面蒸発量をそれぞれ独立して取り扱うわけではない。これらの和すなわち蒸発散量として取り扱う方が、カンガイ計画に実用的価値が大きい。

第II章において、サトウキビの月別平均日蒸発散量と気温、日射量および蒸発計蒸発量との関係を究明した。すなわち、夏植サトウキビの累積蒸発散量の時期的変動をモデル化し、その曲線から求めた月別平均日蒸発散量と上記の気象要因との関係について調べた。その結果、サトウキビの累積蒸発散量はロジステックカーブで示され、月別平均日蒸発散量と上記の気象要因との関係はいずれもべき関数で示されることが明らかとなった。

さらにこの研究によると、次のことが言える。すなわち、沖縄における夏植サトウキビの月別平均日蒸発散量は植付け翌年の7月～9月にピークを示し、その値は $5\sim 6\text{mm/day}$ 程度である。この月別平均日蒸発散量はピーク時の前後において次第に減少し、やがてある一定の値に漸近する曲線で示される。すなわち、サトウキビは各生育時期ごとに異なった消費水量を持ち、少ない時には約 $1\text{mm/day}$ まで減少する。最も平年の値と考えられる1968年の数値によると、夏植サトウキビは植付け翌年の1年間で約 $1200\text{mm}$ 、植付け翌年の7月～9月の生育最盛期だけで約 $440\text{mm}$ の水分を消費している。すなわち、7月～9月の生育最盛期には、サトウキビは年間消費水量の約37%を消費していることが明らかである。カンガイ計画に当っては、サトウキビが水分を最も多く必要とする夏期の生育最盛期とその他の生育期間に分けて、消費水量を検討すべきであると考えられる。

沖縄におけるサトウキビの蒸発散量を前述の気象要因から推定する場合は、次のことに注意しなければならない。すなわち、月別平均日蒸発散量は気温から推定した方がよい。また気温による場合は月平均気温、日最高気温の月平均値および日最低気温の月平均値のいずれによる方法を採用してもさしつかえないことが明らかとなった。

サトウキビの消費水量は、気象要因に支配される関係上、毎年異なった値になるはずである。そのため、計画年次におけるサトウキビの消費水量は長期の資料に基づき確率計算によって求めるべきものである。しかしながら、沖縄においてサトウキビの消費水量に関する資料は皆無に等しかったのが現状である。著者は1966年～1971年にわたってサトウキビの蒸発散量を測定し、各生育期別の消費水量の変化とその数値を明らかにした。これらの結果を用いて、第IV章第2節では水収支計算を試みた。すなわち、第II章第3節の月別平均日蒸発散量(表2・6)のうち、月降雨量の再現期間(図2・11)が最も1に近く、平年的な値と考えられる1968年の数値を上記の水収支計算に用いた。

### 3 サトウキビに対する一回のカン水量

沖縄の石灰岩土壌地帯においては、サトウキビはしばしば干バツ被害を受けている。第III章第2節で述べたように、著者がこの石灰岩土壌地帯6ヶ地区にわたってサトウキビの根群域調査を行った結果、その有効根群域は約40cm～60cmであることが明らかとなった。この有効根群域が60cmとなっているホ場はトラクタによって深耕したホ場である。また前述のように、カンガイすることによって、作物の根は上層部に多く分布するようになる。したがって、沖縄の石灰岩土壌地帯におけるサトウキビに対するカンガイ計画に際しては、約40cm～50cmを有効根群域として採用した方がよいと思考する。

第III章第3節によると、同じ石灰岩土壌地帯のホ場においても、ホ場含水量は地区あるいはホ場によって異なる。したがってカンガイ計画に際し、ホ場含水量は現地調査によることを原則とすべきである。一般に土壌水分を定義する場合、水分量そのもので定義するのではなく、土壌が水分を保持している力で定義される。上記の石灰岩土壌地帯のホ場含水量に対応するpF値が約1.9になることは、第III章第3節で述べたとおりである。したがって、この石灰岩土壌地帯におけるホ場含水量をpF-水分曲線によって推定する場合は、pF 1.9に対応する土壌水分を採用すべきであると考えられる。

第III章第4節で述べたように、水資源に乏しい南西諸島のカンガイ計画を立てるに当たっては、有効水分の範囲を広げて考える必要がある。このような観点から、沖縄におけるサトウキビに対するカンガイの下限值についてポット試験および現地調査を行った。ポット試験では、サトウキビを栽培したポットの土壌水分をpF 2.8, pF 3.2, pF 3.9およびpF 4.2に対応する土壌水分に制御して、土壌水分とサトウキビの生育状況との関係を究明した。すなわち、制御した土壌水分に対応するpF値とサトウキビの日蒸発散量、葉温と気温の差、乾物重量、含水率および光合成速度との関係を検討した。その結果、pF値といずれの要因との関係においても、pF 2.8～pF 3.9ではこれらの要因はほぼ類似した傾向変動を示し、pF 4.2においてはかなり異なった変動を示した。つまりサトウキビに対するカンガイの下限值としては、大略pF 3.8に対応する土壌水分(作物の初期シオレ点)が適当であると推察される。現地調査では、このpF 3.8に対応する土壌水分とサトウキビがシオレ始める時の土壌水分との対応について検討した。その結果、サトウキビのシオレ現象が現われ始める時には、上層部の土壌水分がpF 3.8に対応する土壌水分よりやや小さくなっていることが明らかとなった。以上、ポット試験および現地調査の結果、沖縄におけるサトウキビに対するカンガイの下限值としては、pF 3.8に対応する土壌水分を採用した方が好ましいと考える。第III章第5節で明らかなように、サトウキビの土壌水分消費型は生育時期によって異なり、生育とともに深い土層から水分を多く吸収するようになる。このため上層部の土壌水分が初期シオレ点以下に減少しても、サトウキビは他の土層から水分を多く吸収し、実際にはシオレ現象が現われないことになる。それゆえ上層部の根の機能が低下し、根はますます下方に多く分布するようになる。この上層部の根の機能を十分発揮させるためには、土層全域にわたって土壌水分が初期シオレ点(pF 3.8)以下にならない前に、カンガイすべきであると考えられる。

T・R・A・M法によって一回のカン水量を求める場合は、作物の土壌水分消費型が必要である。第III章第5節によると、この土壌水分消費型は生育時期によって異なる。すなわち、水分消費の割合は期日の経過とともに下層の方へふえていく傾向がある。したがってカンガイ計画に当たっては、各生育期間に

対応する土壌水分消費型を用いるべきである。著者は前述のように、実験ホ場で土壌水分の追跡によって求めた各土層の水分消費割合と沖縄総合事務局の資料を検討して、本論文においては石灰岩土壌地帯のサトウキビの生育最盛期における土壌水分消費型のモデルとして図3・20・2を採用した。しかしながら、土壌水分消費型は現地ホ場における栽培条件によって変動するのが通例である。したがって、具体的なカンガイ計画の策定に際しては、当該地区ごとに現地試験を実施する必要があるのは言うまでもない。

第Ⅲ章第6節で述べたように、同章第2節～第5節の結果と既往の研究結果に基づき、宮古上野村(石灰岩土壌地帯)のホ場と沖縄本島南部南風原町(泥灰岩土壌地帯)のホ場を例にとり、一回のカン水量の算定を試みた。その結果、石灰岩土壌地帯のホ場における一回のカン水量として25.0mm、泥灰岩土壌地帯のホ場における値として40.0mmが算出された。すなわち、一回のカン水量は石灰岩土壌地帯のホ場に比べて泥灰岩土壌地帯のホ場においてははるかに大きな値を示すことが明らかとなった。

#### 4 沖縄のサトウキビに対する畑地カンガイ

第Ⅰ章第3節で述べたように、沖縄の基幹作物であるサトウキビが水分を最も多く必要とする夏期の降雨量の大部分は6月の梅雨と8月～9月の台風による集中的な降雨に依存している。このため無効降雨が多く、土壌水分の欠乏をきたしやすい。とくに、土層が浅く、全容易利用可能水分量(T・R・A・M)が小さい石灰岩土壌地帯においては、サトウキビはしばしば干バツ被害を受けている。

第Ⅳ章第1節によると、1963年と1971年の大干バツ年には、宮古におけるサトウキビの干バツ被害率はそれぞれ60%および90%となっている。そして1960年代の宮古は1年おきに干バツ年に遭遇している。また、サトウキビの干バツ被害率と年降雨量とはあまり関係がなく、植付け翌年の7月～9月の降雨量と深い関係があることが明らかになった。すなわち宮古におけるサトウキビは、1年おきに雨の少ない7月～9月に遭遇し、干バツ被害を受けていることである。

著者は、第Ⅳ章第2節で述べたように、1938年～1973年の降雨記録に基づき、宮古(石灰岩土壌地帯)と南風原(泥灰岩土壌地帯)における有効雨量および不足水量を計算した。この結果に基づき、両地区における降雨量と有効率との関係を究明し、さらに降雨量、有効雨量および不足水量とサトウキビの10アール当り収量との関係について研究した。また、両地区における不足水量の確率計算を行った。表5・1と表5・2はこれらの諸元について各生育期別にまとめたものである。

表5・1第1項によると、宮古では夏植サトウキビの全生育期間、植付け翌年および翌年の7月～9月の各生育期間における降雨量の平年値は、それぞれ3600mm、2150mm、590mmである。また同表第2項によると、これらの各生育期間におけるサトウキビの消費水量はそれぞれ1476mm、1200mmおよび442mmである。したがって平年においては、降雨量の絶対量は各生育期間ともに不足しない。表5・2第1項および第2項によると、南風原についても同様なことが言える。

表5・1第3項および第4項によると、宮古における有効雨量および有効率の平年値は全生育期間で950mm(26.4%)で、植付け翌年の1年間と翌年の7月～9月ではそれぞれ720mm(33.5%)、230mm(39.0%)となっている。また表5・2第3項および第4項によると、南風原における各生育期間の有効雨量と有効率の平年値はそれぞれ1020mm(29.6%)、770mm(36.7%)、245mm(42.2%)である。すなわち、有効率の平年値は45%以内で、いくら雨が降ってもサトウキビに利用されるのは限られており、無効降雨が多いことを示している。上記のように、降雨の有効率は各生育期間および地区によって異なっている。宮古と南風原における降雨の有効率を比較すると、いずれの生育期間でも南風原における降雨の有効率が高いことが明らかである。これは土壌条件に起因するものであると考えられる。

表5・1と表5・2の第5項は、各生育期間における降雨量とその有効率の間にはそれぞれ負のコウ配を持つ直線関係があることを示している。これらの関係直線のコウ配を比較検討する。宮古では、

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

夏植サトウキビの全生育期間、植付け翌年の1年間および翌年の7月～9月における関係直線のコウ配は、それぞれ $-0.00418$ 、 $-0.00932$ 、 $-0.0358$ である。また南風原では、これらの各生育期間における関係直線のコウ配は、それぞれ $-0.00708$ 、 $-0.0120$ 、 $-0.0425$ となっている。すなわち、各生育期間における降雨量の有降率は、その期間における降雨量の大きさによって異なり、とくに植付け翌年の7月～9月の有効率は降雨量の大きさに支配されやすいことが明らかである。したがって、ある期間の降雨量からその期間の有効雨量を概算する場合は、その期間の降雨量に対応する有降率を用いるべきで、有効率を一定に仮定することは好ましくないことになる。

表5・1第6項によると、宮古では夏植サトウキビの全生育期間、植付け翌年の1年間および翌年の7月～9月の各生育期間における不足水量の平年値は、それぞれ482mm、467mm、249mmである。また表5・2第6項によると、南風原ではこれらの各生育期間における不足水量の平年値は、それぞれ421mm、408mm、220mmとなっている。すなわちどの地区においても、土壌水分は植付け初年度には不足せず、植付け翌年に不足し、その不足水量の大半を7月～9月の生育最盛期で占めていることが明らかである。このことから、サトウキビにとって植付け翌年の7月～9月の降雨がいかに重要であるかわかる。宮古と南風原における不足水量の平年値を各生育期間ごとに比較すると、どの期間でも宮古における不足水量が大きい。また表5・1第9項と表5・2第7項によると、両地区における10年確率の不足水量についても平年値と同様なことが言える。このことは宮古（石灰岩土地帯）においては、南風原（泥灰岩土地帯）に比べて、サトウキビの干バツ被害が起りやすいことを示唆している。前述のように、宮古で1960年～1971年に起きた干バツ年における各生育期間別の不足水量の再現期間を求め、これとサトウキビの干バツ被害率との関係についても検討した。その結果、宮古におけるサトウキビはだいたい2年に1度の割合で約20%の干バツ被害を受けていることが明らかとなった。

第IV章第2節によると、両地区ともに、各生育期間における降雨量とサトウキビの10アール当り収量との間にはあまり関係がないと言える。南風原（泥灰岩土地帯）では、各生育期間における有効雨量および不足水量とサトウキビの10アール当り収量との間にも関係が認められなかった。このことは前述したように、サトウキビの有効根群域内にこれより下層から土壌水分の補給があると考えられるからである。表5・1第7項と第8項によると、宮古ではこれらの各生育期間における有効雨量および不足水量と夏植サトウキビの10アール当り収量との間には、それぞれ正および負のコウ配を持つ直線関係があり、かなり高い相関が認められた。宮古における有効雨量と夏植サトウキビの10アール当り収量との関係直線のコウ配は、全生育期間と植付け翌年の1年間でそれぞれ $0.0165$ および $0.0170$ であるのに対し、植付け翌年の7月～9月には $0.0338$ となっている。また不足水量と10アール当り収量との関係直線のコウ配も、全生育期間と植付け翌年の1年間でそれぞれ $-0.0167$ 、 $-0.0182$ であるのに対し、植付け翌年の7月～9月には $-0.0327$ となっている。つまり、いずれの関係直線のコウ配も、植付け翌年の7月～9月においてとくに大きい値を示している。このことから、植付け翌年の7月～9月の生育最盛期における有効雨量および不足水量が、夏植サトウキビの10アール当り収量にとくに大きな影響を与えることが明らかである。したがって、宮古（石灰岩土地帯）においては、この不足水量を補給し生産性の向上を図るためにカンガイは必要である。近年行われた久貝ら<sup>25,27)</sup>の研究によると、サトウキビに対するカンガイ効果はかなり大きく、カンガイの必要性が指摘されている。

以上、ほとんど毎年起っている土壌水分欠乏によるサトウキビの減収と干バツ年における被害の解消を図るために、沖縄においてもサトウキビに対するカンガイが必要である。また、植付け適期の確保および機械化農業の推進のためにもカンガイは必要である。とくに、石灰岩土地帯における夏植サトウキビに対する、植付け翌年7月～9月のカンガイの重要性が明らかとなった。しかし、これは保険的なカンガイの意味が強く、カンガイなくして作物栽培が考えられないような乾燥地帯におけるカンガイとは本質的に異なるものである。

上記の結論は自然的条件のみに着目して検討した結果得られたものである。今後、沖縄におけるサト

ウキビ栽培の発展を考える場合、自然的条件のみならず、経済的な立場からも研究ないし検討を試みる事が不可欠である。

前述のように、この研究結果の大部分は計画基準概定調査報告書沖繩畑地かんがい(案)<sup>45)</sup>に採択され、現在八重山石垣市の国営宮良川土地改良事業地区を始め数多くの土地改良事業地区で使用されているので、同計画基準(案)における採択項目とそのページをまとめて表5・3に示した。なお、この表中、サトウキビの有効根群域は石灰岩土地帯の基盤整備における石礫除去の対象深および客土により確保する耕土深の基準としても用いられている。

表5・1 サトウキビの水分消費に関する諸元(宮古、石灰岩土壌)

番号	項目	期間	全生育期間	植付け翌年1月～12月	植付け翌年7月～9月
1	降雨量の平年値 mm (1938年～1973年)		3600	2150	590
2	消費水量の平年値 mm (1938年～1973年)		1476	1200	442
3	有効雨量の平年値 mm (1938年～1973年)		950	720	230
4	有効率の平年値 % (1938年～1973年)		26.39	33.49	38.98
5	降雨量(X mm)とその有効率(Y %)との関係 (1938年～1973年)		$Y = -0.00418X + 41.77$ ( $r = -0.81$ )	$Y = -0.00932X + 54.13$ ( $r = -0.86$ )	$Y = -0.0358X + 61.81$ ( $r = -0.81$ )
6	不足水量の平年値 mm (1938年～1973年)		482	467	249
7	有効雨量(X mm)とサトウキビの10アール当り収量(Y ton/10a)との関係 (1957年～1973年)		$Y = 0.0165X - 8.25$ ( $r = 0.67$ )	$Y = 0.0170X - 4.92$ ( $r = 0.76$ )	$Y = 0.0338X - 0.54$ ( $r = 0.80$ )
8	不足水量(X mm)とサトウキビの10アール当り収量(Y ton/10a)との関係 (1957年～1973年)		$Y = -0.0167X + 15.49$ ( $r = -0.68$ )	$Y = -0.0182X + 15.96$ ( $r = -0.78$ )	$Y = -0.0327X + 15.14$ ( $r = -0.81$ )
9	10年確率の不足水量 mm (1938年～1973年)		623	605	317

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

表5・2 サトウキビの水分消費に関する諸元（南風原，泥灰岩土壌）

番号	項目	期間	全生育期間	植付け翌年1月～12月	植付け翌年7月～9月
1	降雨量の平年値 mm (1938年～1973年)		3450	2100	580
2	消費水量の平年値 mm (1938年～1973年)		1476	1200	442
3	有効雨量の平年値 mm (1938年～1973年)		1020	770	245
4	有効率の平年値 % (1938年～1973年)		29.57	36.67	42.24
5	降雨量(X mm)とその有効率(Y % )との関係 (1938年～1973年)		$Y = -0.00708X + 54.03$ ( $r = -0.84$ )	$Y = -0.0120X + 62.92$ ( $r = -0.87$ )	$Y = -0.0425X + 70.30$ ( $r = -0.74$ )
6	不足水量の平年値 mm (1938年～1973年)		421	408	220
7	10年確率の不足水量 mm (1938年～1973年)		557	543	299

表5・3 実際に現地で使用されている研究結果

項 目	ペ ー ジ
サトウキビに対するカンガイ効果	3
生育旺盛期の有効水量とサトウキビの10アール当り収量との関係	4
サトウキビの消費水量	11, 47, 56
サトウキビの有効根群域	9, 41
サトウキビに対するカンガイの下限值	8
サトウキビの土壤水分消費割合	13
一回のカン水量と間断日数	13, 15

本研究を行うに当り，懇切な御指導と御校閲を頂いた東京大学名誉教授東京農業大学教授杉二郎博士，東京農業大学教授金木良三博士，同教授鱈木翠博士，同教授川谷豊彦博士，同田中弥寿男教授，同助教教授田邊猛博士に対し心から感謝の意を表します。また，本研究継続の間たえず並ならぬ御助言，御指導，御協力を下さった九州大学名誉教授田辺邦美博士，同教授長智男博士，同助教教授黒田正治博士，鳥取大学教授野村安治博士，琉球大学教授宮里清松博士に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1 Baver, L. D. 1948 Soil physics. 2nd. Ed. 1 - 386, New York, London, John Wiley and Sons Inc.
- 2 Bouyoucos, G. J. 1929 A New, Simple and rapid method for determining the moisture equivalent of soil, and the role of soil colloids on this moisture equivalent. Soil Sci. 27:233 - 241
- 3 Briggs, L. J. and Mclane J. W. 1907 The moisture equivalent determinations and their applications. pro. Amer. Soc. Agron. 2:138 - 147
- 4 Briggs, L. J. and Shantz, H. L. 1914 Relative water requirement of plants. J. Agr. Res. 3:1 - 63
- 5 Briggs, L. J. and Shantz, H. L. 1916 Hourly transpiration rate on clear days as determined by cyclic environmental factors. J. Agr. Res. 5:583 - 646
- 6 Briggs, L. J. and Shantz, H. L. 1916 Daily transpiration during the normal growth period and its correlation with the weather. J. Agr. Res. 7:155 - 212
- 7 長智男 1964 砂丘地におけるオーチャドのかんがい消費水量について, 砂丘研10, No. 2: 1 - 4
- 8 長智男, 山本太平 1971 トリクルかんがいについて, 砂丘研18, No. 1: 82 - 90
- 9 土壤物理性測定法委員会 1972 土壤物理性測定法1 - 495, 東京, 養賢堂
- 10 Hoel, P. G. 1947 On the choice of forecasting formulas. J. Amer. Stat. Assoc., 42: 605 - 611
- 11 富士岡義一, 西出勤 1963 畑地用水量決定の合理化に関する研究 (I), 有効土壌水分の下限界について, 農土研別冊5: 10 - 16
- 12 富士岡義一, 西出勤 1965 畑地用水量決定の合理化に関する研究 (II), 水分当量について, 農土論集12: 20 - 24
- 13 福田仁志訳 1963 Siline - Bekchourine, A., 灌漑地の水収支1 - 113, 東大出版会
- 14 Gardner, W. R. 1960 Dynamic Aspects of water availability to plants. Soil Sci. 89:63 - 73
- 15 Gardner, W. R. and Ehlig, C. F. 1963 The influence of soil water on transpiration by plants. J. Geophys. Res. 68:5719 - 5724
- 16 池原真一 1968 沖縄における甘蔗作経済の研究, 琉大農報15: 1 - 164
- 17 池原真一 1969 沖縄糖業論1 - 280, 琉球分蜜糖工業会
- 18 池原真一 1973 沖縄糖業統計1 - 506, 東京, 農林統計協会
- 19 石橋豊, 内藤利貞, 田辺邦美, 林弘宣 1971 かんがい1 - 151, 東京, コロナ社
- 20 Israelson, O. W. and Hansen, V. E. 1962 Irrigation principles and practices, 3rd. Ed. 1-434 New York, London, John Wiley and Sons Inc.
- 21 田崎忠良, 田口亮平 1970 実験植物生理生態学実習53 - 55, 東京, 養賢堂
- 22 桂山幸典 1950 土壌面蒸発, 農土研18: 1 - 14
- 23 吉良芳夫, 白井清恒 1971 蒸発散量と気象因子との関係, 農土論集38: 7 - 12
- 24 岸根卓郎 1970 理論応用統計学1 - 594, 東京, 養賢堂
- 25 久貝晃尋 1969 さとうきびに対するかんがい効果試験, 糖業振興会報13: 36 - 55
- 26 久貝晃尋 1972 沖縄のサトウキビかんがい栽培における土壌水分, 畑地農業No. 166: 322 - 326

## 山城：サトウキビに対する畑地カンガイ

- 27 久貝晃壽, 荷川取勝永 1965 甘蔗に対する畦間かんがい試験, 沖縄農業 4, No 1 : 6 ~ 15
- 28 Kozlowski, T. T. 1968 Plant water consumption and response. water Deficits and plant growth 2 : 1-22, New York, London, Academic press.
- 29 丸杉孝之助 1971 沖縄農業の基礎条件と構造改善 1 ~ 324, 沖縄, 模範農場
- 30 松井健, 江口弘美, 浜古賀道男 1973 植物生育シミュレーションに関する研究 I, 温度 Step 入力に対するキュウリ胚軸伸長応答の数学的モデル, 日本生物環境調節学会第11回講演要旨集14 ~ 15
- 31 宮里清松 1965 甘蔗の初期生育相に関する研究, 琉大農報 12 : 1 ~ 86
- 32 永井威三郎 1956 作物栽培各論 3 : 1 ~ 370, 東京, 養賢堂
- 33 長浜謙吾, 加納利博, 杉原征郎 1958 畑地カンガイに関する研究 (I), 牧草地におけるカンガイ方法についての一考察, 農土研 25 : 495 ~ 496
- 34 内藤文男 1965 作物の蒸散量および蒸発散量に関する研究, 東海近畿農試報 18 : 49 ~ 151
- 35 中川徳郎 1950 畑地灌漑に関する基礎的研究 (第1報), 畑土壌の容水量と水分当量との関係, 農土研 17 : 113 ~ 116
- 36 農業土木学会 1958 農業土木ハンドブック 1 ~ 1090, 東京, 丸善
- 37 農林省構造改善局 1973 土地改良事業計画設計基準 1 ~ 208
- 38 岡出幸男 1941 気象と甘蔗品種に関する研究, 創立十周年記念論文集 1 ~ 16, 台湾総督府糖業試験場
- 39 沖縄県企画部 1973 第16回沖縄県統計年鑑 1 ~ 399
- 40 沖縄県土木部 1973 沖縄における異常気象調査報告 (その2)
- 41 沖縄県農林水産部 1972, 1973 さとうきび及び甘しゅ糖生産実績昭和 46 / 47, 47 / 48 年期
- 42 沖縄県農林水産部 1973 糖業年報 No 13
- 43 沖縄総合事務局農林水産部 1974 畑地かんがい調査報告書 1 ~ 37
- 44 沖縄総合事務局農林水産部 1975 沖縄県の農業と農業基盤整備事業 1 ~ 101
- 45 沖縄総合事務局農林水産部 1980 計画基準概定調査報告書沖縄県畑地かんがい (案)
- 46 大島一志 1963 畑地かんがいの計画と設計 1 ~ 219, 東京, 畑地農業研究会
- 47 大田更一 1950 土壌面蒸発と土壌水分との関係について, 農土研 18 : 18 ~ 25
- 48 Pair, C. H., Hinz, W. W., Reid, C. and Frost, K. R. 1969 Sprinkler irrigation 3rd. Ed. 1-435, Washington, D. C., Sprinkler Irrigation Association.
- 49 Richards, F. J. 1969 Analysis of growth, Behavior of plants and their organs. Plant physiology 54 : 1-77
- 50 琉球気象庁 1956 ~ 1968 琉球気象要覧 No 13 ~ No 123
- 51 琉球気象庁 1969 ~ 1970 琉球気象月報 No 124 ~ No 141
- 52 琉球気象庁 1961, 1961, 1966, 1969, 1970, 1971 異常気象報告 No 43, No 45, No 58, No 60, No 61, No 62
- 53 琉球気象庁 1969 琉球の産業気象資料 No 3
- 54 琉球農業試験場 1963 甘蔗に対する灌水試験, 1961 年度業務工程 (糖業) 120 ~ 122
- 55 琉球政府農林局 1963 ~ 1971 さとうきび及び砂糖生産高 1962 / 1963 ~ 1970 / 1971 年期
- 56 琉球政府農林局 1965 ~ 1972 糖業年報 No 5 ~ No 12
- 57 琉球中央農業研究指導所 1957 甘蔗に対する灌漑試験, 1957 年度業務工程 157 ~ 158
- 58 琉球中央農業研究指導所 1958 甘蔗に対する灌漑試験, 1958 年度業務工程 (甘蔗・甜蔗) 53 ~ 55
- 59 砂川浩一, 田名広助 1967 気象要素がさとうきびの生長に及ぼす影響について, 糖業振興会報



11:8~18

- 60 城間理夫 1970 沖縄におけるパインナップルの蒸散量について 第36回農業土木学会九州支部講演集127~128
- 61 玉井虎太郎 1956 畑作用水法の合理化に関する研究, 愛媛大紀第6部2:157~317
- 62 田辺邦美 1950 畑地灌漑に関する基礎的研究(第2報), 我国の畑地灌漑における用水量決定の一方法について, 農土研17:106~109
- 63 日本精糖工業会 1966, 1973, 1979, 1982 砂糖統計年報1966年, 1973年, 1978年, 1981年
- 64 田辺邦美 1957 水田における水稻蒸散力の浸透速度に及ぼす影響(I), 農土研25:205~210
- 65 田辺邦美 1958 水田における水稻蒸散力の浸透速度に及ぼす影響(II), 農土研25:275~278
- 66 田辺邦美, 伊郷健一郎 1948 畑地灌漑に関する基礎的研究(第1報), 宮崎県の甘蔗栽培における昭和22年度の灌漑効果について, 農土研16:29~35
- 67 田辺邦美, 黒田正治, 田中明, 舟越保 1974 畑作物の土壌水分管理に関する考察, とくに九州地方を対象にして, 九大農芸誌28:167~175
- 68 田辺邦美, 野村安治 1964 作物の蒸発散量曲線について, (I) 水稻(タンク栽培)の蒸発散量曲線, 農土研別冊9:21~24
- 69 田辺邦美, 野村安治 1964 作物の蒸発散量曲線について, (II) ラジノクローバの蒸発散量曲線, 農土研別冊9:25~30
- 70 田辺邦美, 野村安治, 坂東孜郎, 長勝史, 舟越保 1970 サトウキビの蒸散量と気象要素との関係についてのファイトトロンによる実験的研究, 第36回農業土木学会九州支部講演集129~132
- 71 田辺邦美, 野村安治, 舟越保, 山城三郎 1971 サトウキビの蒸散量と気象要素との関係について, (II) ファイトトロンによる実験的研究, 第38回農業土木学会九州支部講演集173~176
- 72 種田行男 1956 蒸通発量に関する実験的研究(II), 農土研24:145~147
- 73 種田行男 1958 畑地かんがい1~220, 東京, 理工図書
- 74 Thornthwaite, C. W. and Holzman, B. 1939 The determination of evaporation from land and water surfaces. Monthly Weather Rev. 67:4-11
- 75 内原彪訳 1971 Dilewijn, C. V., 甘蔗植物学1~271, 琉球分蜜糖工業会
- 76 Williams, E. J. and N. H. Kilot's 1953 Interpolation in a series of correlated observations. Aust. J. Appl. Sci. 4:1-17
- 77 八幡敏雄 1975 土壌の物理1~175 東京大学出版会
- 78 山田茂喜 1943 台湾土壌の農業工学的研究(第1報), 水分当量および容水量について, 農土研15:251~260
- 79 山崎不二夫, 長谷川新一 1959 畑地かんがい1~359, 東京, 農山漁村文化協会
- 80 山城三郎 1968 沖縄における甘蔗の蒸発散量(第1報), 琉大農報15:193~198
- 81 山城三郎 1968 サトウキビの有効根群域について(第1報), 沖縄農業7, No.2:1~12
- 82 山城三郎 1969 沖縄における甘蔗の蒸発散量(第2報), 琉大農報16:207~217
- 83 山城三郎 1970 沖縄におけるサトウキビに対するかんがいの必要性, 琉大農報17:458~472
- 84 山城三郎 1971 沖縄におけるサトウキビの蒸発散量(第3報), 琉大農報18:109~119
- 85 山城三郎 1972 沖縄におけるサトウキビの蒸発散量(第4報), 琉大農報19:343~362
- 86 山城三郎 1973 石灰岩土壌の圃場容水量(第1報), 琉大農報20:145~157
- 87 山城三郎 1974 サトウキビのシオレ点について, 琉大農報21:189~197

- 88 山城三郎 1974 沖縄におけるサトウキビの蒸発散量(第5報), 琉大農報 21:199~215
- 89 山城三郎, 吉永安俊 1978 サトウキビのカンガイにおける有効土壌水分の下限値について(1), 琉大農報 25:257~263
- 90 山城三郎, 吉永安俊 1979 サトウキビのカンガイにおける有効土壌水分の下限値について(2), 琉大農報 26:273~285
- 91 山城三郎, 吉永安俊 1980 サトウキビのカンガイにおける有効土壌水分の下限値について(3), 琉大農報 27:203~211