

琉球大学学術リポジトリ

沖縄におけるパイナップル作の農業気象学的研究(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: 城間, 理夫, Shiroma, Michio メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/4246

沖縄におけるパイナップル作の
農業気象学的研究

城 間 理 夫 *

Michio SHIROMA : Agro-meteorological studies on pineapple
culture in Okinawa

目 次

I 緒 言	284
II 沖縄におけるパイナップル作と気温及び地温	285
1 パイナップル作と気温	285
2 パイナップル作と地温	295
3 気温及び地温についての要約	304
III 沖縄におけるパイナップル作と降水量	304
1 主なパイナップル栽培地における降水量の比較	305
2 渇水時の降水量	310
3 降水量についての要約	318
IV 沖縄におけるパイナップル作と日射量	318
1 沖縄におけるパイナップル作と日射量	319
2 沖縄におけるパイナップル畑の2, 3の熱収支特性	329
3 日射量及び熱収支特性についての要約	340
V 沖縄におけるパイナップル畑の蒸発散量	341
1 蒸散量, 及びそれと気象要素との関係	341
2 蒸発散量, 及びそれと気象要素との関係	358
3 蒸散量及び蒸発散量についての要約	372
VI 沖縄におけるパイナップル作と気象災害	375
1 資料及び調査の方法	375
2 パイナップル作に与える気象災害	376
3 気象災害についての要約	399
VII 研究の要約と総括的考察	400
謝 辞	403
引用文献	403

* 琉球大学農学部農業工学科

I 緒 言

パイナップル (*Ananas comosus* (L.) Merr.) は熱帯アメリカ原生のアナナス科植物で、熱帯と亜熱帯地域で栽培される作物である。日本周辺では台湾においてかなり古くから栽培されているが、わが国では近年になって主に鹿児島県の南西諸島の一部と沖縄県で栽培されるようになった。鹿児島県の年間パイナップル生産量は約150トン(1975年)程度であるが、沖縄県では最近5年平均で7万6千トンに達しており、サトウキビに次いで県の主要作物の一つになっている。このように両県で生産量にかなりの差があるのは、パイナップル栽培北限が南西諸島付近にあり、気象的に制約を受ける立地条件にあるためであろう。

沖縄県におけるパイナップルの栽培は歴史が浅く、安定した栽培は果実生産高の推移からも分かるように1960年代の半ばからようやく軌道に乗ったと見られる。沖縄は亜熱帯の中でも暖かい地域に属しているが、冬季に比較的低温になってパイナップルの栽培北限に近く、必ずしも栽培のために好適地とは言い難い。特に低温の冬には低温による被害を被ることさえ報告されている。また、沖縄を襲う台風や豪雨などはパイナップルを初め各種の農作物に被害を与えている。これに加えて、ほとんど毎年のように一時的な渇水が何回か起こっており、これが農作物の生育に好ましくない影響を与えている。

このような気象環境下において、まだ栽培歴史の浅いパイナップルが、将来も安定した主要作物となり得るか否かは、沖縄農業の将来を展望する上で極めて重要な課題である。1972年沖縄の本土復帰に伴い、農林省では果樹農業振興基本方針の一つの柱として、1981年にはパイナップル果実の生産量を10万トンにする目標を立てている。

本研究は、このような時において、沖縄のパイナップル作を農業気象学的に研究してその適地性を検討し、更に、栽培技術改善に対して基礎的情報を提供せんとしたものである。従来沖縄におけるパイナップル作に関する研究⁴⁸⁾は、畑地における栽培技術の改善、ホルモン処理による収穫期調節や果実肥大促進、優良系統増殖選抜及び施肥改善などであって、農業気象学的な面からの研究はほとんど無く、わずかに気象感応試験、冬季の肥効調査及び植物体の月別肥大率調査などに限られている。

筆者は、沖縄の気象環境及び気候資源から見たパイナップル栽培の適地性を明確にすることを第1の目的とし、さらに、沖縄におけるこの作物の栽培技術向上のために農業気象学的な知見を広げることが第2の目的としてこの研究を行なった。

この研究はパイナップルの栽培に当たって重要である気温、地温、降水量、日射量、蒸発散、その他の気象要素についての研究を含む。以下各章(ローマ数字見出し)の内容の概要は次のとおりである。

II 気温がパイナップルの栄養生長に及ぼす影響を、野外及びフェイトロンの実験によって研究した結果を示す。次に地温の連続観測結果と地温に関する解析結果を示す。これらに基づき、気温及び地温から見た沖縄における適地性を、他の栽培地である台湾やハワイと比較した結果を述べる。

III これら三つの栽培地における降水量の時間的及び平面的分布を示し、水資源から見た適地性を比較する。更に、沖縄における干ばつの統計的解析に基づいて、この作物に対するかんがいの必要性を検討した。

IV 日本付近各地の日照率から求めた日射量とパイナップルの光飽和点の資料を用いて、沖縄における日射の特性を研究し、沖縄の日射量がパイナップルの栽培に十分であるか否かを検討した。次に、沖縄におけるパイナップル畑地の熱収支を支配する要素としての日射の2、3の特性を併せて示す。

V この作物の蒸散量及び蒸発散量の推移を、植え付けから収穫までの全期間にわたる野外測定結果により示す。また、フェイトロンと野外とにおける実験により、気温や日射量などの気象要素が蒸散量と蒸発散量に及ぼす影響を示し、水分消費量が沖縄の降水量で十分に補給され得るか否かを検討した。

VI 沖縄における各種の気象災害によってパイナップルが受ける被害の規模と被害率を調査し、災

害に対する抵抗性を他の主要作物と比較した。また、パインアップルが冬期の低温障害により減収する程度を統計的に解析した。以上の結果に基づき、気象災害の多い沖縄におけるこの作物の将来性を検討した。なお、干ばつの被害の軽減やかんがい計画の基礎資料に供するために、水不足による生育の遅れを研究した結果も併せて示した。

II 沖縄におけるパインアップル作と気温及び地温

パインアップルは熱帯及び亜熱帯で栽培される作物である。自然条件下では緯度が高くなるにつれて栽培は困難になり、高緯度ではガラス室などに栽培されている。このように、パインアップルの生育には気候要素が大きく影響する。気候要素としては、気温、地温、日照及び降水量などのほかにも多くの要素が挙げられるが、そのうち気温と地温が特にパインアップルの生産に大きい影響を及ぼすと考えられる。

沖縄はわが国唯一の集団的パインアップル栽培地であるが、冬期の気温と地温は必ずしも十分とはいえない。

従来、沖縄における温度環境から見たパインアップルの研究はあまり行なわれていない。数少ない例として、沖縄県農業試験場におけるパインアップル気象感応試験、植物体の月別肥大調査及び冬期の肥効調査などがある。しかし、これらの試験研究では、温度は月平均値を使って定性的に解析されているに止まっている。

筆者は沖縄における温度環境条件を見るために室内実験と野外実験を行ない、沖縄、台湾及びハワイ各地の温度環境から見た栽培適地性を比較した⁶¹⁾。

1. パインアップル作と気温

1) 実験方法

実験には、パインアップル供試体としてスムースカイエンのえい（裔）芽の苗を使用し、これをライシメーターまたは2,000分の1aワグネルポットに栽培した。施肥は液体肥料の200倍液により行なった。

(1) 出葉数の測定

パインアップルの出葉数を知るため、ポットを使って栽培し、2期にわたって実験を行なった。実験場所は琉球大学構内である。

期 間	供試株数	土 壤
1970年1月 — 1971年2月	5	砂
1971年4月 — 1972年1月	5	壤土

この実験では、1か月間の平均出葉数と同期間の平均気温との関係を調べた。栽培土壌は、沖縄島源河川の川砂と、名護市宮里の国頭れき層（沖縄島北部、第4系）の壤土を使い、かん水は10日に1回、施肥は1か月半に1回行なった。各ポットは、農学ビル南側の日当りの良い場所に置いた。

(2) 植物体の生長の測定

1) ファイトロン内における実験

測定実験は、1971年8月—9月に九州大学ファイトロン内で行なった。植物体の生長の指数として葉面積を使用した。供試体はポットを使い砂栽培によった。この砂は九州大学構内から採取したもので、pHは6.1であった。植えつけた苗は、ガラス室内で4か月間生長させた後、各ポットを1個ずつファイトロンの各室に搬入した。各室の気温は昼夜ともそれぞれ15℃、20℃、25℃及び30℃であった。

葉面積は、葉長と、葉の幅の最も大きい部分の葉幅との積に係数0.762を乗じて求めた。この係数は、葉長葉幅の積と、プランニメーターによる実測面積との相関により求めた。図1には両者の関係を示す。

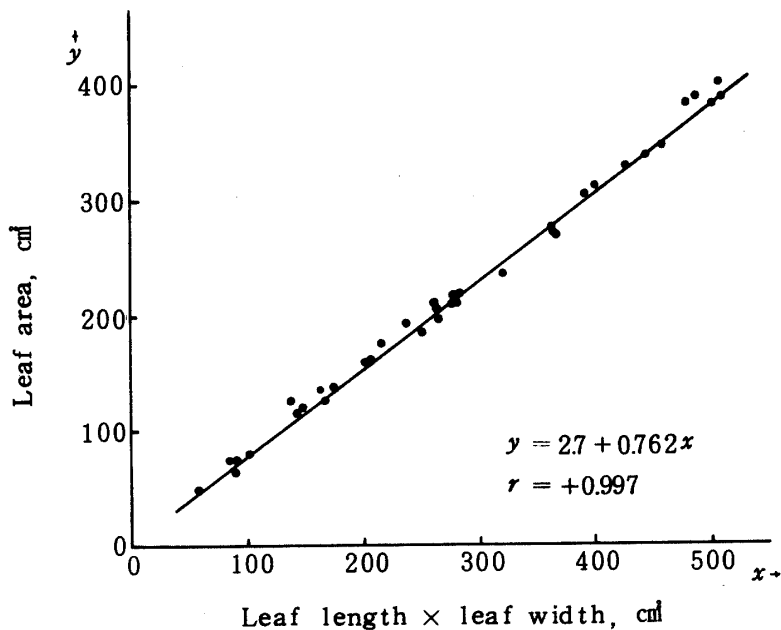


Fig. 1. Relationship between leaf area and leaf length times leaf width of pineapple, Smooth Cayenne cultivar

土壌含水量は、各ポットとも間ゲキの飽和度を54%~57%に保ち、毎日夕方には前1日間の蒸発水分量を補給した。施肥は毎月1回行なった。

ファイトトロン内の日射量は屋外の約60%で、実験期間中の最大は346 ly/dayであった。

ii) ライシメーターによる野外実験

この実験では、ライシメーター栽培の10本の供試株の葉面積を測定した。実験は琉球大学構内の日当りの良い場所で行なった。使用したライシメーターは面積165×150 cm²、深さ60 cmである。栽植密度は、沖縄の標準植え付け方法⁵⁾により10a当たり4,000本とした。土壌には国頭れき層の土壌を使い、かん水は10日に1回、施肥は2か月半に1回行なった。

iii) ポット栽培による野外実験

実験は、上記(1)の項の出葉数測定実験に使用した5本の供試体により、葉面積を測定して行なった。

2) 実験結果及び考察

(1) 出葉数と気温との関係

図2には1か月間平均出葉数と月平均気温との関係を示す。

図によると、出葉数Nは気温T(°C)の対数関数として、良い近似で次のように表せる。

$$N = 18.13 \times \log_{10} \frac{T}{11.67} \quad (1)$$

この式の適合度を χ^2 検定によって見ると、有意水準0.05で差が認められない。

この式によると、栄養生長期のパイナップルは、月平均気温約11°C(この式では11.67°C)以下では出葉が非常に緩慢になる。

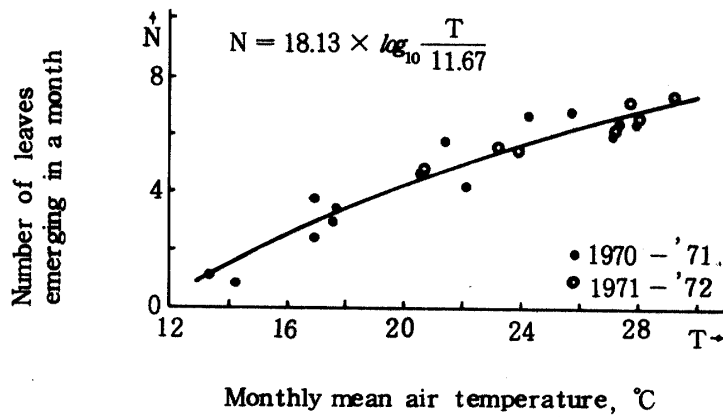


Fig. 2. Relationship between the mean number of leaves emerging in one month and monthly mean air temperature

(2) フェイトロン内における植物体の生長と気温

作物の生長量を測る指数としては、乾物重を使うことが望ましい。しかし、パインアップルの果実の大きさは植物体の大きさと正の相関がある⁷⁸⁾。このため、この実験では生長の指数として葉面積をとった。図3には1か月間の葉面積増加量と気温との関係を示す。

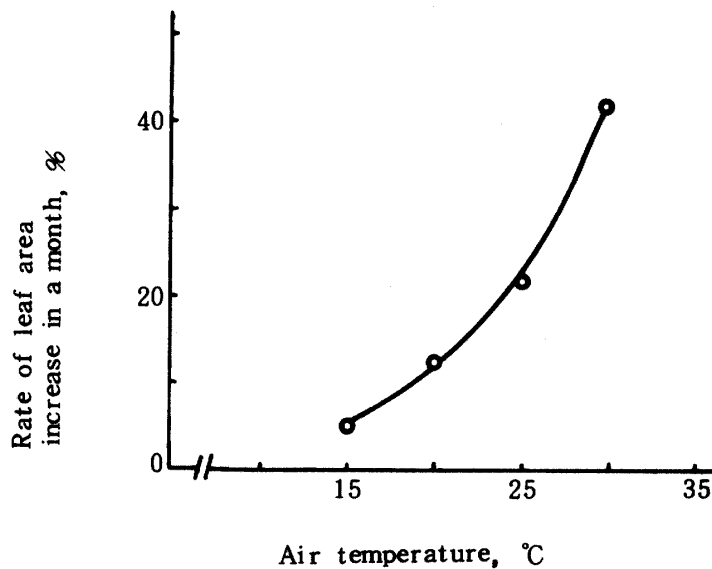


Fig. 3. Relationship between the rate of leaf area increase in one month and air temperature

図では葉面積の増加量を1か月前の葉面積に対する百分率で示す。

図3によると、栄養生長期の生長は気温に大きく影響される。この実験のような温度範囲ならば、生

長は気温が高いほど早い。

(3) 野外における植物体の生長と気温

i) ライシメーター栽培による結果

図4にはライシメーター内における葉面積指数 (LAI) 及び月平均気温の推移を示す。

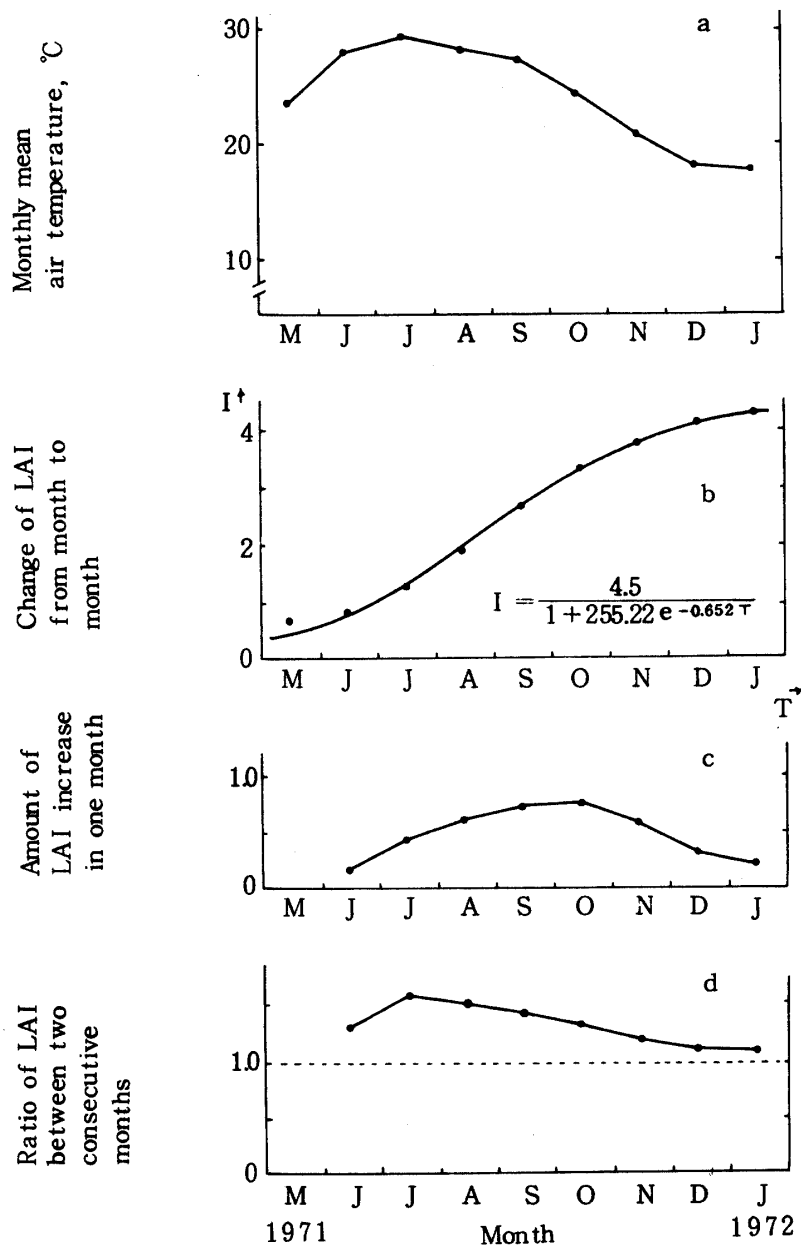


Fig. 4. Month to month march of LAI and monthly mean air temperature

図4bに見られるとおり、葉面積の増加が生長曲線で良く表わされる。
次に図4cによると、葉面積の1か月間増加量最大は10月に現われている。この月は気温の最高月(7月)と一致しない。しかし、図4dを見ると、前月とのLAIの比は7月に最大である。したがって、単位葉面積当たり月間葉面積増加量は7月に最大である。図4aと図4dによると、LAIの前月比と気温と推移がよく一致している。

ii) ポット栽培による結果

図5は5個の供試体の平均葉面積の推移を示す。

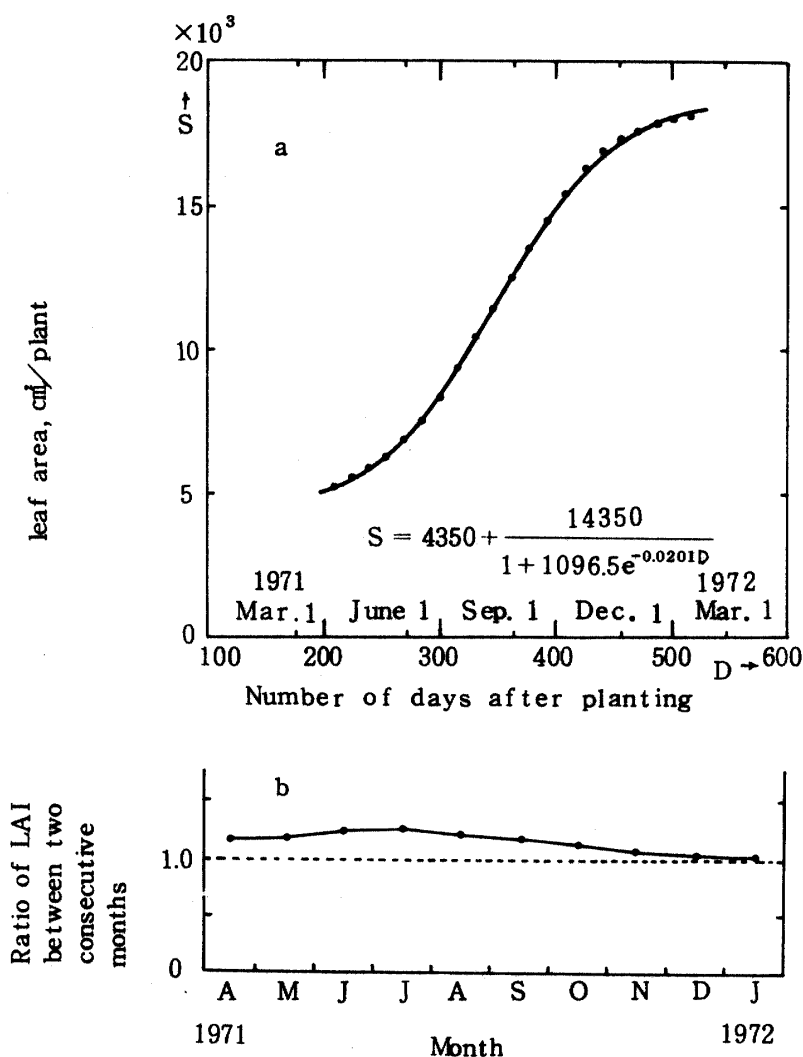


Fig. 5. Month to month march of leaf area, planted Sept. 1970

これらの各株は、植え付け約3か月後に冬を迎えたため、春までの生長はかなり遅れた。しかし、図によると、生長が上記のライシメーターにおける同一期間の推移(図4b, 図4d)とほとんど同じである。図5もまた、この実験の温度範囲ならば気温が高いほどよく生長することを示す。

日射量が生長に及ぼす影響を見るために、上記のライシメーター栽培の資料により、生長の盛んな7月-翌年1月における月別葉面積増加量と気温及び水平面日射量との相関を表1に示す。

Table 1. Correlation coefficients between the increase of leaf area and meteorological elements

Simple correlation coefficients	Partial correlation coefficients	Statistical significance
$r_{12} = + 0.99$	$r_{12.3} = + 0.86$	Yes
$r_{13} = + 0.97$	$r_{13.2} = + 0.50$	No
$r_{23} = + 0.96$		

表中添字1, 2, 3はそれぞれ1か月間の葉面積増加量, 月平均気温, 月間水平面日射量を示す。

この表に見られるように, 単相関係数はいずれも大きい。偏相関係数は葉面積増加量と気温とでは十分大きい値を示す。この値はt分布検定(有意水準0.05)によれば有意である。しかし, 葉面積増加と水平面日射量との偏相関係数は小さく, 有意性が認められない。これは, この実験におけるような日射条件下では栄養生長は日射量より気温に大きく影響されることを示すものである。

以上の事から見て, パインアップル植物体の生長も出葉数と同様に気温の影響を受け, 30℃以内までは高温なほどよく生長する。

これらの実験では, 気温の上限は30℃であったために生長最適温度を知ることはできなかった。村田ら³³⁾によると, 南方型の植物では光合成の適温が高い。また, 渡辺⁷⁶⁾によるとパインアップルの根の生長適温は29℃~30℃である。したがって, 地上部の生長適温も, 恐らく, この温度範囲に近いと思われる。

3) 気温から見た沖縄のパインアップル栽培適地性

(1) 沖縄の生育適地性

式(1)を利用し, 各地の月平均気温からその地の月間出葉数が計算できる。栄養生長の一つの指数として出葉数をとるならば, 上のようにして求めた1年間出葉数からその地における1年間の生長程度を知ることができる。沖縄の生育適地性を見るために, 式(1)により各地の出葉数を計算して比較した。結果を表2に示す。

Table 2. Number of leaves emerging in one month, and the ratio of the number of leaves emerging in one year to that in Hawaii, calculated using formula (1)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	year	Ratio (%)
Honolulu, Hawaii	5.2	5.1	5.2	5.5	5.8	6.2	6.3	6.4	6.4	6.2	5.8	5.4	69.5	100.0
Hengchum, Taiwan	4.5	4.7	5.3	6.0	6.6	6.8	6.8	6.8	6.6	6.2	5.6	4.9	70.8	101.9
Taichung "	2.3	2.3	3.5	5.0	6.1	6.5	6.8	6.7	6.5	5.6	4.4	3.1	58.8	84.6
Ishigaki	3.4	3.6	4.2	5.1	6.1	6.8	7.1	7.0	6.8	6.0	5.1	4.1	65.3	94.0
Naha	2.5	2.7	3.5	4.6	5.6	6.3	6.9	6.7	6.6	5.7	4.8	3.5	59.4	85.5
Naze	1.6	1.6	2.0	3.9	4.9	6.0	6.7	6.7	6.3	5.2	4.0	2.5	51.4	74.0
Yakushima	0.0	0.0	1.3	3.0	4.4	5.5	6.5	6.5	6.1	4.8	3.3	1.1	42.5	61.2
Kagoshima	-	-	-	2.2	3.8	5.1	6.4	6.6	5.7	3.8	1.3	-	34.9	50.2

表にはハワイの年間出葉数に対する百分率も示す。

表2によると、沖縄島での生育は台湾中部と大差なく、八重山群島では台湾中部より良い。したがって、気温に関する限り、沖縄各地のパインアップル栽培条件は台湾に劣らず、八重山群島ではむしろ台湾中部より良い。しかし、ハワイと比べると八重山群島も及ばず、台湾南部においてようやくハワイ並となる。

一般に、石垣島と沖縄島を比べると、パインアップルの生育は1か月くらいの差があるといわれている。表2でも両地の年間出葉数には約6枚の差があり、これは盛夏のほぼ1か月差に相当する。更に、北の奄美大島では年間出葉数は沖縄島より約8枚少なく、生育が沖縄島より盛夏の約1か月以上遅れる。極東の中緯度以南各地の年間出葉数を計算し、その値のハワイの値に対する割合を図6に示す。

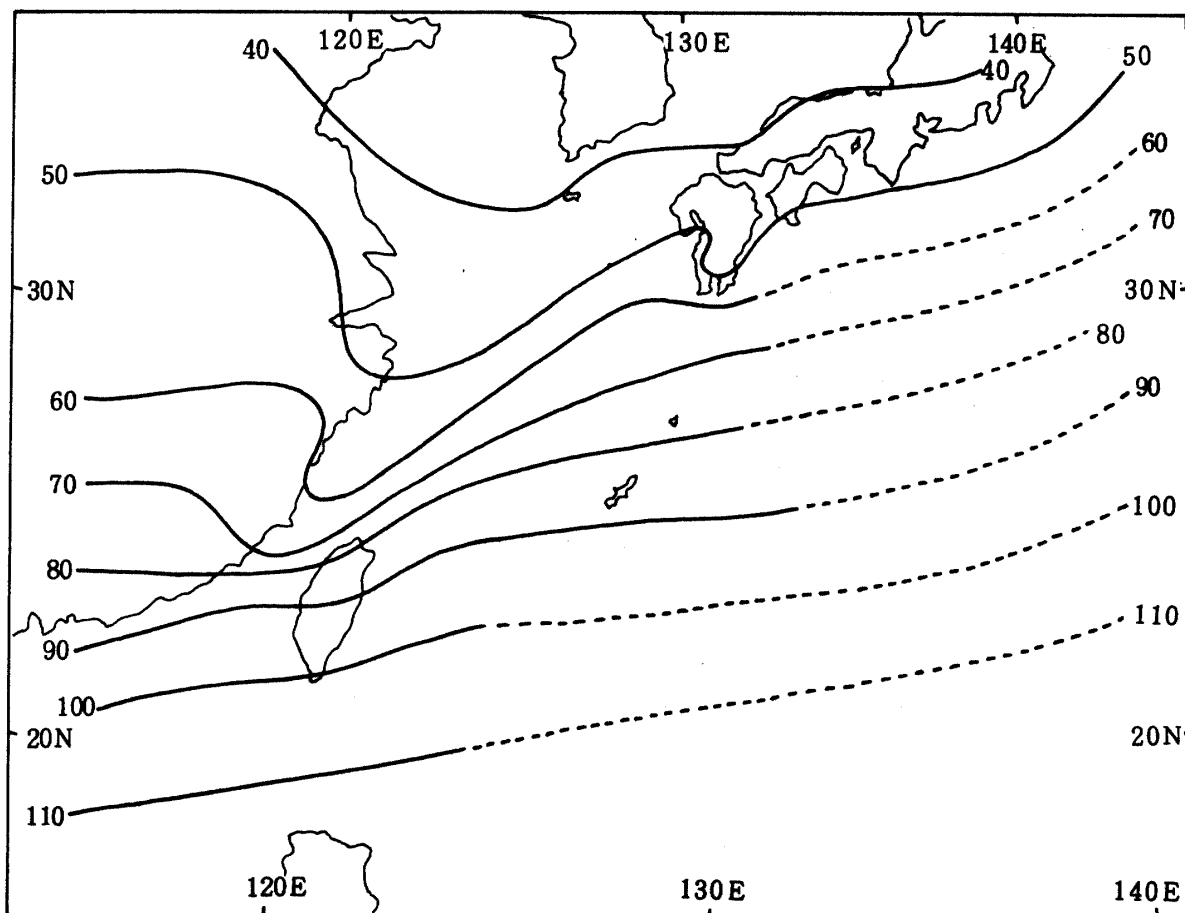


Fig. 6. Isolines of the ratio of the number of leaves emerging in one year to that in Hawaii, calculated using formula (1), (%)

図によると、南西諸島各地は、気温に関する限り、ほぼ等緯度の台湾や中国本土各地より生育条件は良い。九州南西沿岸から南沿岸及び四国南沿岸までは、年間出葉数計算値はハワイの約50%で非常に少ない。

以上のように、パイナップルの生育は気温に大きく影響される。比較のために主な各地の平均気温の年間推移を図7に示す。

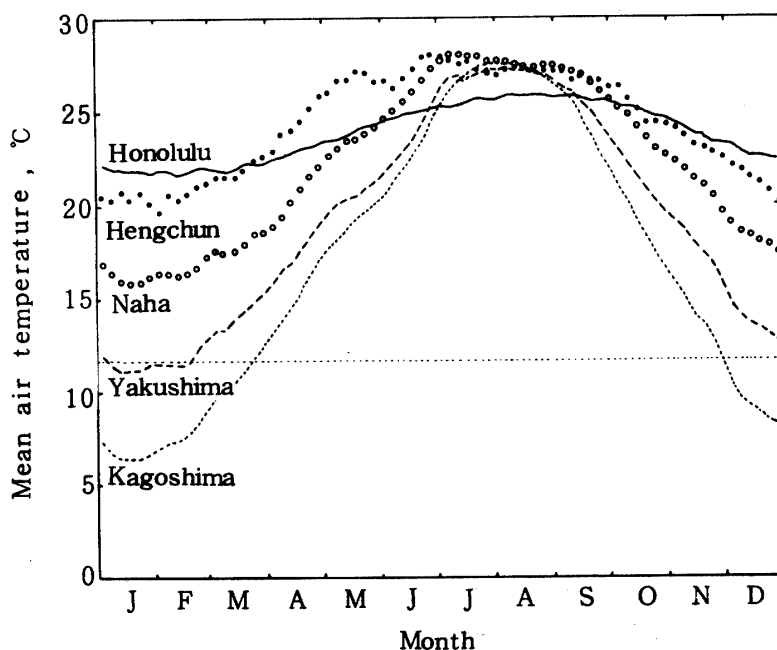


Fig. 7. Annual march of mean air temperature for several locations

図によると、盛夏には各地間の差が小さい。しかし、他の季節には高緯度ほど急に低くなる。この図と式(1)によると、屋久島付近はパイナップルが1年中、中断せずに新葉を出す北限になる。

上に示した各地の出葉数は月平均気温を使って計算したものである。しかし、月平均気温は等しくても、気温の月較差が異なると出葉数は若干差があると思われる。この差の傾向を見るために、代表的な土地における気温の月較差を表3に比較してみた。

この表によると、台中 (Taichung, 台湾) 及び鹿児島では月較差が比較的に大きい。したがって、これら各地の出葉数は、図6や表2に示した値より若干大きいものと思われる。

(2) 沖縄周辺におけるパイナップルの栽培北限について

図6に見られるように、パイナップルの年間出葉数は高緯度ほど小さい。したがって高緯度では植え付けから花芽分化期までは長期間を要する。西日本の暖地でもパイナップルは栽培されているが、自然栽培環境条件は十分でない^{11,78)}。

Table 3. Monthly and annual range of air temperature at several locations

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	year	Period
Honolulu, Hawaii	7.4	7.1	7.1	6.7	6.6	6.6	6.4	6.2	6.7	6.7	6.8	6.3	6.7	1931-60
Hengchun, Taiwan	6.1	7.2	7.2	7.3	7.2	6.1	6.1	6.1	6.6	6.1	5.5	5.5	6.7	1897-35
Taichung, "	10.3	9.6	9.1	8.8	8.5	8.3	8.5	8.4	9.0	10.1	10.3	10.3	9.3	1897-40
Ishigaki	5.2	5.3	5.4	5.6	5.5	4.9	5.4	5.6	5.7	5.6	5.2	4.9	5.4	1941-70
Naha	5.3	5.3	5.5	5.5	5.1	4.8	5.2	5.1	5.3	5.2	5.2	5.0	5.2	1941-70
Naze	6.1	6.1	6.7	6.9	6.7	6.4	7.3	7.1	7.1	6.7	6.4	6.3	6.6	"
Yakushima	5.3	5.5	6.4	6.7	6.3	5.9	6.2	6.1	6.0	5.3	5.6	5.5	6.0	"
Kagoshima	10.0	10.3	10.7	10.2	9.3	7.7	7.4	8.8	8.9	10.7	11.2	10.7	9.7	"

(C)

パイナップルは霜に弱いといわれている。したがって、年により強い降霜のある地域では栽培は制約を受ける。

図8にはわが国周辺における年間無霜期間の分布を示す。

図に見られるとおり、無霜地帯は屋久島及び種子島付近が北限である。

図9には中国南部における年間無霜期間²⁶⁾の分布を示す。

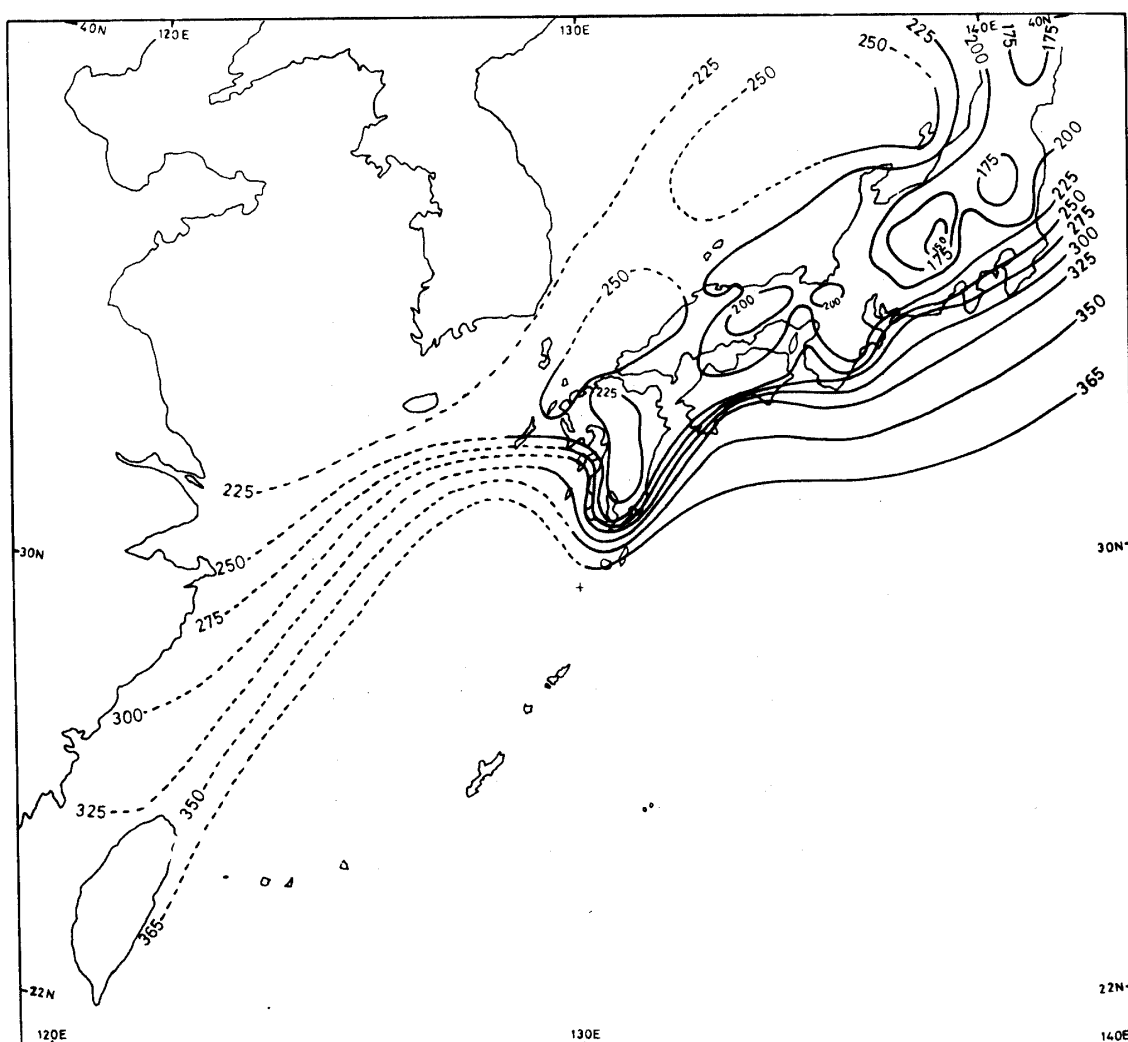


Fig. 8. Isolines of the annual number of frost-free days in the vicinity of Okinawa

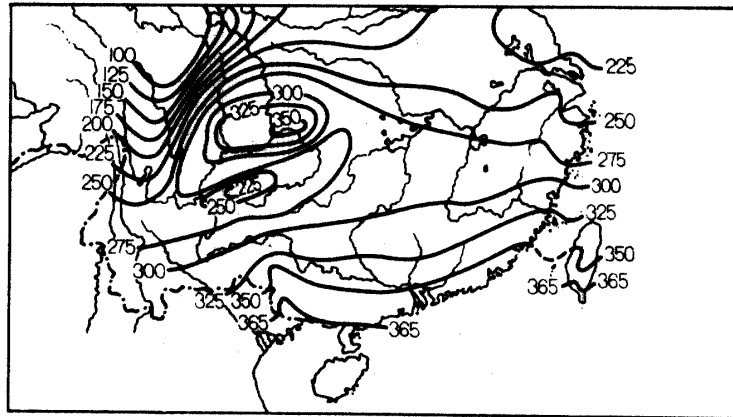


Fig. 9. Isolines of the annual number of frost-free days in the southern part of China Mainland and Taiwan²⁶⁾

中国本土では無霜地帯は華南沿岸地方に限られ、台湾では南部のみである。

上に示した図7、図8、及び図9によると、沖縄周辺におけるリンナップルの栽培北限は、恐らく、無霜期間が340日ないし350日の地域付近であると考えられる。

Bakerら¹⁾によると、南米におけるリンナップルと同科の2、3種の植物の南限がほぼ南緯29度付近である。緯度を示す数値から見ると、わが国の無霜地帯北限の屋久島（北緯30°27'）付近にかなり近い。

沖縄各地は無霜地帯に入っているが、台湾では中部平地まで霜が降りる。したがって栽培は、霜から見ても台湾より有利である。沖縄が無霜地帯に入っている主な理由は、広い海上の島で黒潮の影響を受けていること、冬に低温の大陸からは台湾より遠く離れているためである。

2. リンナップル作と地温

リンナップルの栽培では、適当な地中温度を与えることが根の生長及び栄養分と水分の吸収のために必要である。しかし、沖縄では観測資料が少なく、地温の状況がよく分っていない。筆者は沖縄において2年間余り、栽培地と裸地の地温について連続観測を行なった。更に、台湾やハワイの栽培地の地温とも比較することができた。その結果を次に示す。

1) 地温の観測

地温の観測は、那覇市、琉球大学構内で深さ10cmについて行なった。リンナップルの根の垂直分布は地表より深さ10cmまでに50%、20cmまでに95%がある⁷⁷⁾ことから考えて、この深さは妥当であろう。裸地の地温は琉球石灰岩土壌（沖縄島南部、第3系）内で観測し、リンナップル植被下では、国頭れき層土壌中の値を観測した。観測方法は、L型ガラス温度計を毎日午前9時に読み取り、更に、自記地中温度計により長期間連続記録をとった。地中観測期間中の地被条件をリンナップルの葉面積指数で示すと表4のとおりである。

Table 4. Variation of leaf area index for the lysimeter where soil temperature observations were done

1971										
Date	May 11	June 2	July 2	Aug. 2	Sept. 2	Oct. 2	Nov. 2	Dec. 2	1972	
LAI	0.61	0.63	0.94	1.48	2.12	2.89	3.60	3.98	Jan. 3	
									Feb. 2	
									4.20	
									4.20	
1972										
Date	Mar. 9	Apr. 7	May 16	July 2	Aug. 1	Sept. 16	Nov. 16			
LAI	4.00	3.73	3.66	4.27	4.20	{ 5.22 3.93 }	3.99			

(1) 地温の平均値

図 10 a から図 10 c には観測した地温及び気温の旬平均値（日平均値の旬平均）の推移を示す。

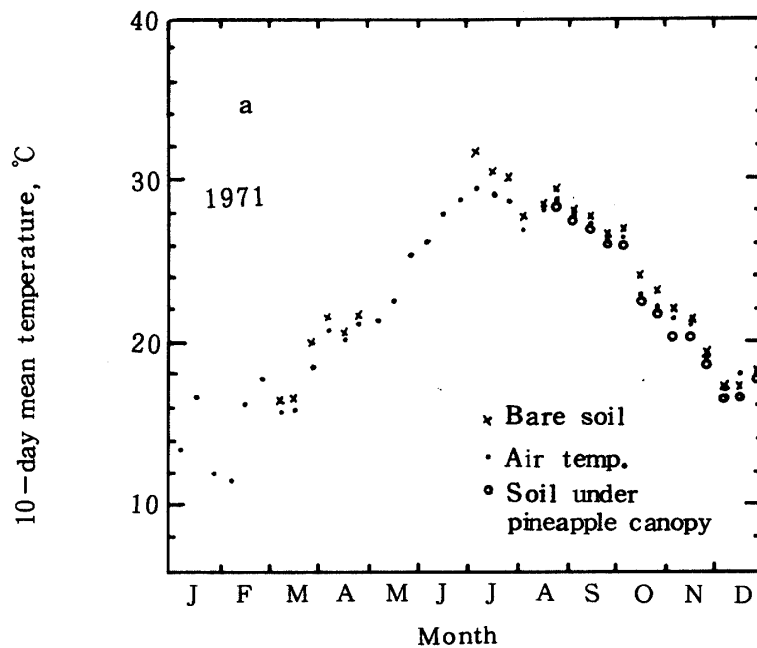


Fig. 10 a. Annual march of 10-day mean soil temperature at depth 10 cm and air temperature, Naha

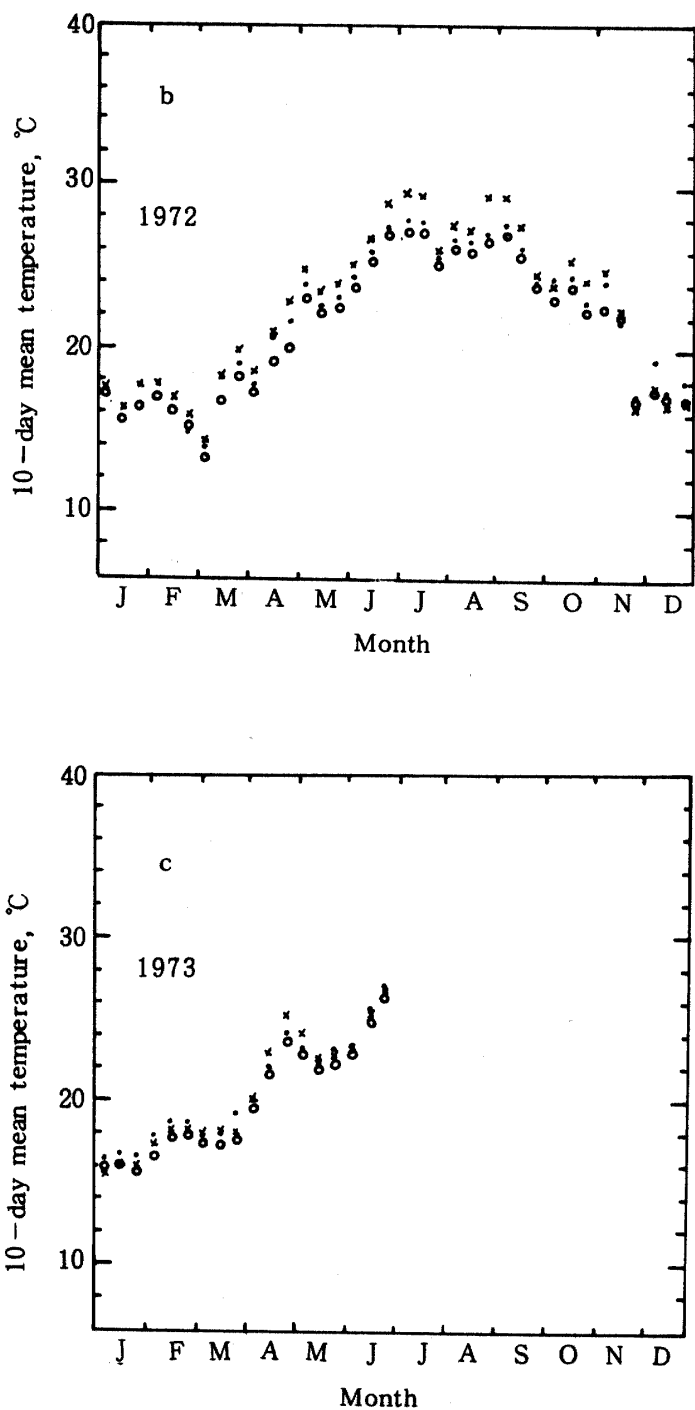


Fig. 10b-c. Annual march of 10-day mean soil temperature at depth 10 cm and air temperature, Naha

図によると裸地では旬平均地温は、冬季は14℃～16℃まで下がるが夏季は30℃～32℃に達する。パイナップルの根の生長は温度に大きく左右され、およそ30℃で最も盛んである⁷⁶⁾。これより高温または低温になると生長は遅くなる。また、Platts⁴⁵⁾によれば根の付近の温度は21℃を下らないことが必要である。沖縄では11月半ばから翌年の3月まで地温旬平均値は21℃以下になるので、この期間には根の生長がかなり遅れることが推定される。

図10aから図10cによると、裸地地温、植被下地温及び気温の相互間には多少の差がある。各月平均値の相互間の差を表5に示す。

Table 5. Difference between monthly mean soil temperature and monthly mean air temperature, soil temperature at depth 10 cm; Naha

a : Bare soil temperature minus air temperature (°C)												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1971	-	-	+0.8	+0.6	-	-	+1.5	+0.5	+0.3	+0.9	+0.2	-0.2
1972	-0.5	+0.5	+0.4	+0.8	+1.0	+1.1	+1.2	+1.4	+1.4	+0.6	+0.2	-0.2
1973	-0.8	-0.5	-0.2	+0.6	+0.2	±0.0						

b : Soil temperature under pineapple canopy minus air temperature (°C)												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1971	-	-	-	-	-	-	-	+0.1	-0.2	-0.4	-0.9	-0.8
1972	-1.1	-0.3	-1.0	-0.8	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4	-0.4	-0.9	-0.5	-1.0
1973	-0.7	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.6						

表5aによると裸地平均地温は冬季は平均気温よりわずかに低い、他の季節には気温よりわずかに高く、夏は約1.5℃高い。この結果から一般に、沖縄付近では深さ10cmの裸地地温平均値は気温平均値にかなり近く、盛夏は地温が1.0℃～1.5℃高い。

表5bによると十分に生長したパイナップル植被下地温は気温よりわずかに低い。冬には差は大きく、約1℃低い。

(2) 地温の較差及び極値

表6には、沖縄における裸地地温、植被下地温及び気温の変動幅を示す。

Table 6. Monthly range of air temperature and soil temperature at depth 10 cm, Naha

a : Air temperature

(C)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Normal year	5.3	5.3	5.5	5.5	5.1	4.8	5.2	5.1	5.3	5.2	5.2	5.0

b : Bare soil temperature

(C)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1971	-	-	6.5	4.7	-	-	5.5	3.9	3.3	3.2	3.1	2.1
1972	2.7	2.3	4.5	3.8	4.5	5.0	5.1	5.2	6.6	7.2	4.9	3.9
1973	3.8	4.3	4.3	4.4	3.6	3.4						

c : Soil temperature under pineapple canopy

(C)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1971	-	-	-	-	-	-	-	3.8	2.7	1.8	1.9	1.7
1972	1.8	1.5	2.3	1.7	2.0	2.1	1.4	1.5	1.9	2.2	1.7	1.7
1973	1.8	2.0	2.0	2.1	1.9	1.7						

表中の値はいずれも日最高値月平均値と日最低値月平均値の差である。この表によると、裸地地温と気温の変動幅は春と夏にはほぼ等しいが、秋と冬は裸地地温のほうが小さい。十分に生長したパインアップル植被下の地温変動は非常に小さく、年間を通じてせいぜい2℃である。

(3) 裸地地温の最高及び最低値

表7には沖縄における深さ10cmの裸地地温月最高値及び月最低値を示す。

Table 7. Monthly extremes of soil temperature in bare soil at depth 10 cm, Naha

a : Monthly highest soil temperature (C)												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1971	-	-	26.8	27.6	-	-	37.8	35.1	32.7	30.9	25.5	21.6
1972	21.5	20.6	25.1	27.8	31.2	34.0	35.5	35.7	35.7	31.7	33.5	23.7
1973	21.4	24.3	25.7	31.2	29.9	31.5						

b : Monthly lowest soil temperature (C)												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1971	-	-	12.3	16.5	-	-	27.1	25.6	25.1	19.5	16.2	14.3
1972	13.7	12.6	11.0	15.0	18.9	21.1	24.1	24.6	20.0	19.1	13.4	12.7
1973	11.6	13.4	13.4	15.8	18.6	19.7						

これらの表によると地温の月最高値は盛夏には37.8℃に達している。一方、最低値は11.0℃であって、沖縄では深さ10cmの地温が10℃以下になるひん度はかなり小さいと思われる。

2) 各地における地温の比較

(1) 地温の平均値の比較

表8には各地の裸地地面温度月平均値を示す。

この表でワヒアワ(Wahiawa, ハワイ)の値は深さ76cmの値である。しかし、月平均値をとると、地面から深さ10cmまでは各深さの平均値が1℃以上差が出ることはまれである。したがって、この表で各地間の比較が可能である。

この表によるとワヒアワ及び恒春(Hengchun, 台湾)などでは、地温はほとんど1年中根の生長に必要な21℃以上である。しかし沖縄では冬から春先にかけて21℃以下になり、鹿児島では更に長く秋から春まで21℃以下になる。

(2) 適温期間の長さの比較

パイナップル栽培の地温条件を比較するために、地温21℃以上の年間期間を求めた。この期間は、各地の地温の月平均値を利用して、内挿法により求めた。表9にはこの期間の初日、終日及び日数を示す。

図11には地温21℃以上の期間の地理的分布を示す。

Table 8. Monthly and annual mean temperature on the surface of soil; values for Wahiawa Hawaii at depth 7.6 cm

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	Period
Japan:														
Sendai	0.5	0.9	4.0	9.0	14.5	19.1	23.5	25.1	21.0	14.3	8.2	2.9	11.9	1887-1940
Niigata	1.6	1.6	4.5	10.4	16.2	21.8	26.4	28.0	22.6	15.4	9.4	4.3	13.5	1886- "
Tokyo	2.7	4.0	7.7	13.6	18.8	22.6	27.3	28.9	23.8	16.9	10.6	4.9	15.2	1886- "
Osaka	3.9	4.9	8.6	14.4	20.0	24.6	30.0	30.7	25.2	17.8	11.4	6.4	16.5	1886- "
Fukuoka	6.1	6.6	9.7	14.6	19.8	23.6	28.1	28.9	24.6	18.6	13.1	8.7	16.9	1891- "
Miyazaki	7.3	8.8	12.2	17.2	21.9	24.8	29.6	29.7	26.3	20.2	14.6	9.7	18.5	1886- "
Kagoshima	7.3	8.7	11.7	16.8	21.2	24.3	29.9	29.9	25.8	20.0	14.1	9.4	18.3	1886- "
Naze	13.6	14.2	16.1	20.1	24.0	26.7	30.6	29.7	27.6	23.3	19.0	15.7	21.7	1897- "
Naha	15.7	16.1	17.8	21.9	25.5	28.3	30.8	30.2	28.3	24.4	20.3	17.2	23.0	1891- "
Ishigaki	18.6	19.0	20.6	24.0	28.1	30.6	32.0	31.5	29.6	26.1	22.7	19.8	25.2	1897- "
Taiwan:														
Taipei	16.5	16.5	18.4	21.8	26.2	28.2	30.2	29.9	28.3	24.6	21.1	18.0	23.3	1897- "
Taichung	19.4	19.8	21.6	25.0	29.2	29.7	31.2	31.3	30.8	27.7	24.2	20.6	25.9	1897- "
Tainan	21.5	22.3	24.5	28.2	32.3	31.5	31.7	31.3	31.4	28.8	25.5	21.9	27.6	1897- "
Hengchun	22.5	23.5	26.2	29.8	31.1	30.5	29.9	29.8	29.0	26.6	24.9	22.7	27.2	1901- "
Hawaii:														
Wahiawa	20.8	22.6	22.8	26.1	26.4	29.2	29.8	29.7	28.1	26.2	25.2	21.6	25.7	1962-1963

Table 9. First day, last day, and duration of the temperature above 21 °C on the surface of soil. Data for Wahiawa, Hawaii were obtained from soil temperature at depth 7.6 cm.

Location	First day with soil temperature above 21 °C	Last day with soil temperature above 21 °C	Duration of soil temperature above 21 °C (day)
Sendai	June 28	Sept. 15	80
Niigata	June 11	Sept. 22	104
Tokyo	June 2	Sept. 29	118
Osaka	May 22	Oct. 2	134
Fukuoka	May 25	Oct. 3	132
Miyazaki	May 10	Oct. 12	156
Kagoshima	May 14	Oct. 10	150
Naze	Apr. 22	Nov. 1	194
Naha	Apr. 4	Nov. 10	217
Ishigaki	May 19	Dec. 3	260
Taipei	Apr. 4	Nov. 16	223
Taichung	May 6	Dec. 12	282
Tainan	all year round	all year round	365
Hengchun	all year round	all year round	365
Wahiawa	Jan. 19	Jan. 7 (next year)	354

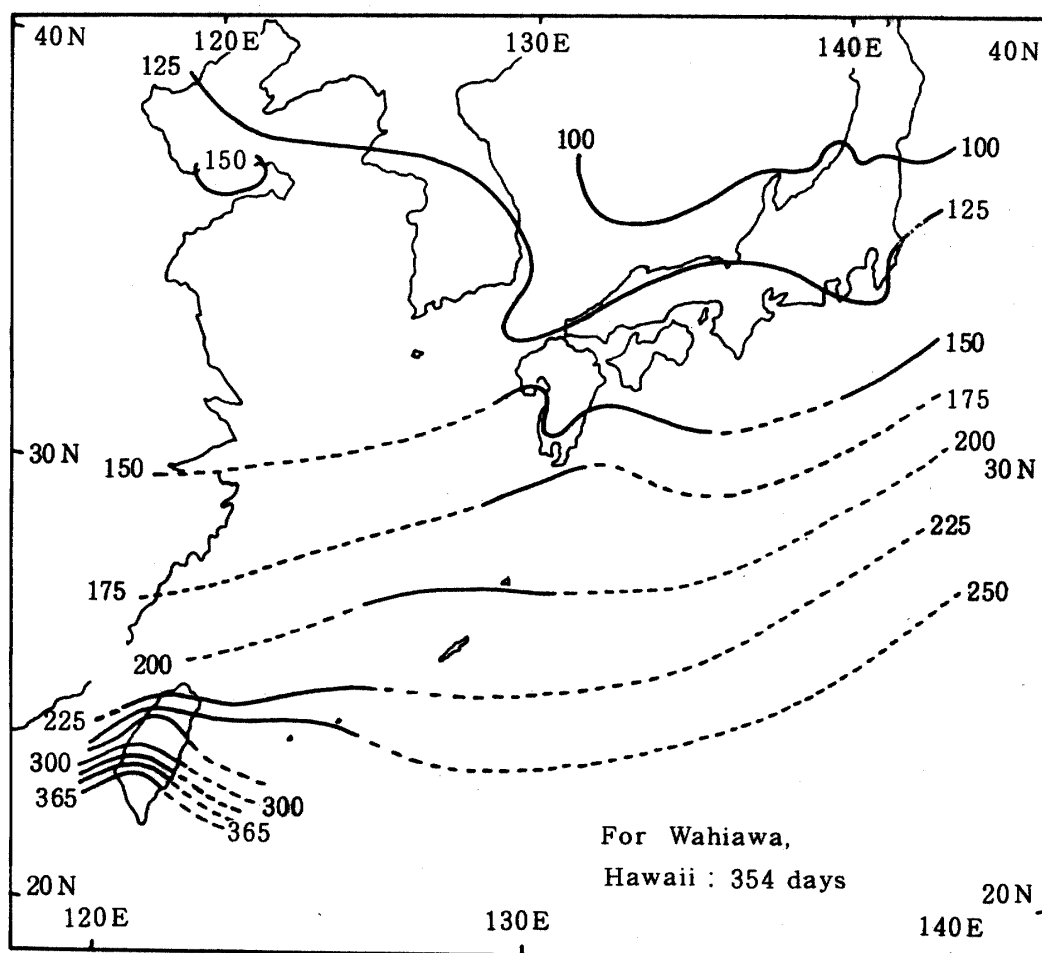


Fig. 11. Annual number of days with daily mean temperature above 21°C on the surface of soil. Data for Wahiawa, Hawaii were obtained from soil temperature at depth 7.6 cm

これらの図と表によると、期間は高緯度ほど短い。台湾では緯度による差は著しいが、南西諸島と九州間では差は台湾におけるほど大きくない。

パインアップル栽培地間で地温 21°C 以上の期間の長さを比べると、石垣島は台湾中部よりおよそ20日ないし1か月短く、沖縄島は台湾南部より約60日短い。台湾南部とハワイは地温はほとんど1年中21°Cを超える。

上に述べたように、根の生長や植え付けた苗の活着を考えると、パインアップルの適地性は台湾南部とハワイでは最も恵まれており、台湾中部、石垣島及び沖縄島ではこの順に条件がより不十分になる。地温の低い期間が長い地域は苗の植え付け時期の長さにも制約を受ける。

3) 考察

裸地地温は、それを観測する土壌の土性、含水量及び地形などによって多少の差があるが、上に示した観測結果は気候的には十分意味を持つ。

この研究では日当たりのよい平たん地における一般的傾向を示した。実際のパインアップル畑地は、沖

縄では山腹や丘陵の斜面を利用したものが多く、地温には局地性があることは注意を要する。沖縄では果実成熟の日が、同一地区内でもある特定の畑地で常に早いことが知られている。これは恐らく、植え付け当時から苗の発根や植物体の生長が地温に影響されることが一つの原因であろう。このような早い畑地は南向きの斜面、または冬の季節風のあまり当たらない風下の日当たりの良い場所であると考えられる。

3. 気温及び地温についての要約

気温についての実験結果と、各地における気温資料の比較結果から次の事が明らかになった。

(1) パインアップルの月間出葉数 N と月平均気温 $T(^{\circ}\text{C})$ の関係は、気温 30°C 以下では次の式で表わし得る。

$$N = 18.13 \times \log_{10} \frac{T}{11.67}$$

(2) 上の式を使って各地の月平均気温から年間出葉数を計算した結果、表2または図6に示す結果が得られた。これによると、気温に関する限り、沖縄島付近のパインアップル生育環境条件は台湾中部に匹敵し、八重山(石垣)ではむしろ台湾中部より良い。しかし、沖縄各地ともハワイには及ばず、台湾南部においてハワイ並となる。

(3) 栄養生長期における植物体の生長も気温と関係が深く、葉面積の増加は気温 30°C 以下では高温なほど速い。

(4) 台湾では中部平たん地まで霜が降りるが、沖縄は無霜地帯に入っている。パインアップルは霜に弱いので、この点から見て沖縄は中部以北の台湾各地より有利な条件を備えている。

次に、那覇市、琉球大学構内における2年間余の地温観測と、各地の資料の比較から次の事が明らかになった。

(1) 那覇における気温と深さ10cmの裸地地温を比較すると、両者の月平均値差はかなり小さく、1年を通じて $\pm 14^{\circ}\text{C}$ 以内である。

(2) 那覇における深さ10cmの裸地地温最高値は 37.8°C 、最低値は 11.0°C である。

(3) 十分に生長したパインアップル植被下深さ10cmの地温は、那覇では次のようである。

i) 月平均値は1年を通じて気温より $0.1^{\circ}\text{C} \sim 1.1^{\circ}\text{C}$ 低い。

ii) 地温の較差が小さく、月較差は1年を通じて $1.4^{\circ}\text{C} \sim 2.3^{\circ}\text{C}$ である。

(4) 地温がパインアップルの根の生長に必要な値 21°C 以上の年間期間を求めると、石垣島は台湾中部よりおよそ20日ないし1か月短く、沖縄島は台湾中部より約60日短い。台湾南部とハワイではほとんど1年中 21°C を超える。これらの事は、台湾中部、八重山及び沖縄の順で地温条件が劣っていくことを示す。

III 沖縄におけるパインアップル作と降水量

パインアップルは耐干性のかなり強い作物であるが、順調な生育のためには苗の活着時期から栄養生長期及び結実期までのほとんど全生長期にわたり適当な水分を必要とする。渡辺⁷⁸⁾によるとパインアップルは、畑地の排水さえ良ければ降水量が多いことは障害にならず、問題は一時的に雨が偏ることである。

筆者は一つの気候要素である降水量について沖縄における年間の特性を調べ、これを他のパインアップル栽培地の台湾及びハワイと比較し、降水量から見た沖縄のパインアップル作の適地性を検討した。更に、これまで研究がなかったパインアップル作に関して、沖縄の渇水の特徴についても統計解析を行

なった。

1. 主なパインアップル栽培地における降水量の比較

1) 各地における月間降水量の推移

表10には沖縄、台湾及びハワイの各栽培地付近における降水量を示す。

Table 10. Monthly and annual rainfall at several locations

	(mm)													
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	Period
Naha	124	116	154	142	244	320	174	253	152	149	151	140	2119	1941-'70
Taichung, Taiwan	33	64	114	126	221	359	297	336	136	23	16	25	1750	1897-'42
Ping-Tung "	13	20	43	63	179	487	602	578	284	74	19	15	2377	1929-'68
Wahiawa, Hawaii	164	163	160	91	63	63	70	91	57	105	123	157	1307	1931-'60
Lanai City, "	117	95	110	74	68	36	44	45	58	75	73	95	890	1931-'60

この表に見られるとおり、年間降水量は那覇や屏東（Ping-Tung，台湾）のように2,000mmを超えるものからラナイシティ（Lanai City，ハワイ）のように800mm余りの所とがあり、地域差が大きい。

月間降水量は、那覇では各月とも100mmを超え年間を通して偏りなく分布している。しかし台中や屏東では秋から冬にかけて非常に少なく、年間降水量の大部分がほぼ4月-9月に集中している。一方、ハワイの各地では7月-10月は月間降水量は100mmに達しないが、年間の分布は台中や屏東ほど季節的な偏りはない。

季節的な雨の降り方の特徴を知るため、各地の降水量の季節変動を調べてみた。図12は那覇における半旬降水量の推移を示す。

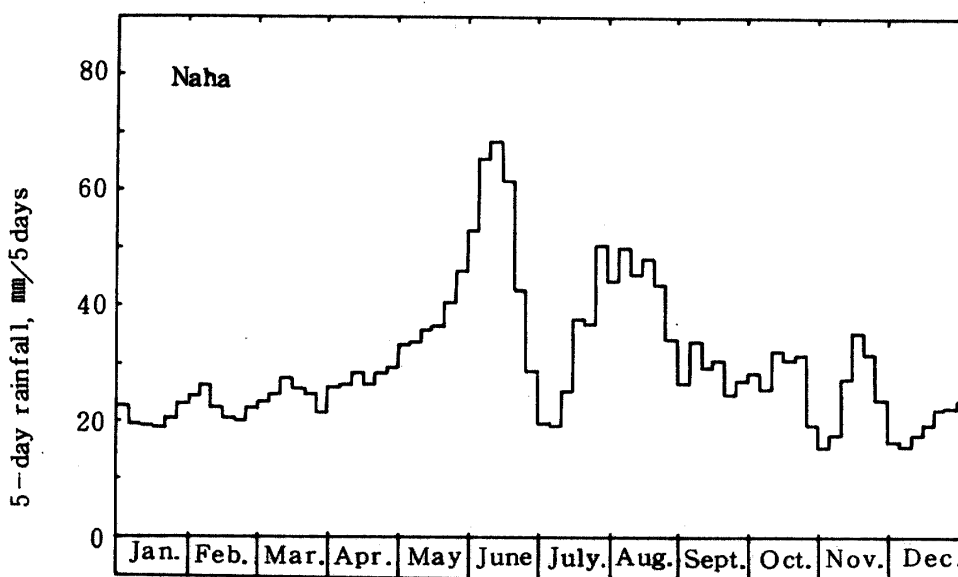


Fig. 12. Annual march of 5-day mean rainfall for Naha, 1931-1960

6月前半に降水量が多いことと7月前半に少なくなるほかに一般に季節変動はあまり大きくない。図13は屏東における降水量の推移を示す¹⁹⁾。

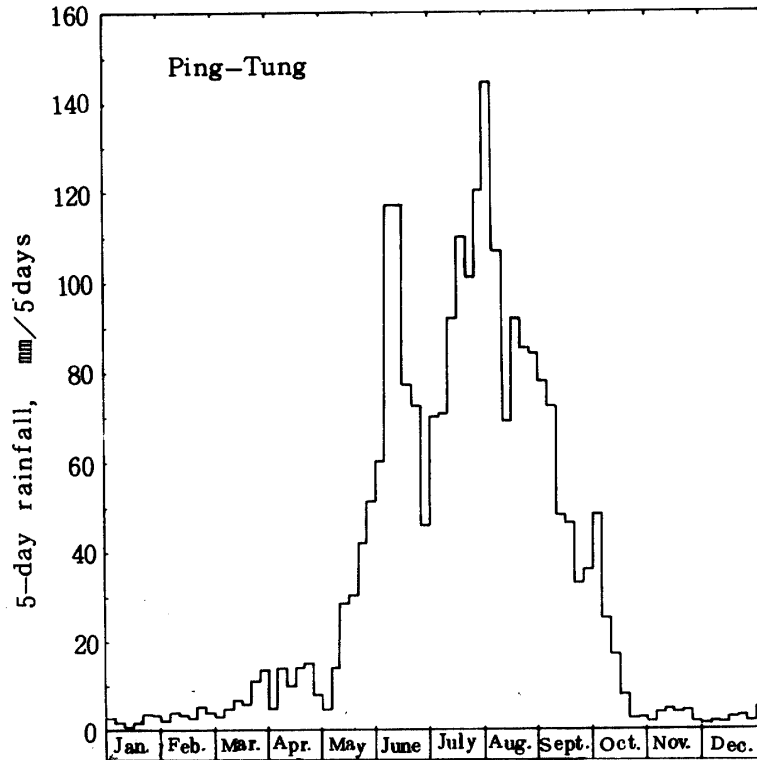


Fig. 13. Annual march of 5-day mean rainfall for Pingtung, Taiwan, drawn using Hsu's data¹⁹⁾, 1929-1968

図に見られるとおり雨期と乾期の差が著しい。10月下旬から3月下旬までは雨はほとんどないと言ってもよい。

次に図14にはワヒアワ及びピライシティにおける降水量の推移を示す⁴⁾。

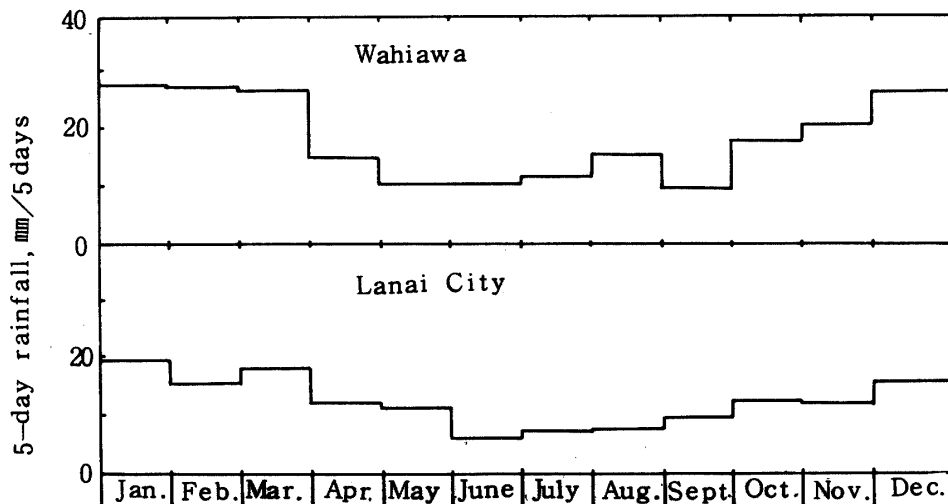


Fig. 14. Annual march of 5-day mean rainfall for Wahiawa and Lanai City, Hawaii; drawn using Blumenstock and Price's data⁴⁾, 1931-1960

図によると5月から9月までの降水量が少ない。

ハワイのパインアップル栽培地では季節によりこのように降水量の少ない地域があるので、パインアップル畑に対するかんがいが行なわれている所が多い^{7,40)}。

ハワイ諸島における降水量の分布は、一般に冬多く夏少ない傾向を示す。Blumenstockら⁴⁾によると、このようなrainer winter seasonとdrier summer seasonにおける降水量の差は、年間降水量の少ない低地において著しい。

2) 各地における降水量の平面的分布

図15には沖縄本島付近の降水量の平面的分布を示す。

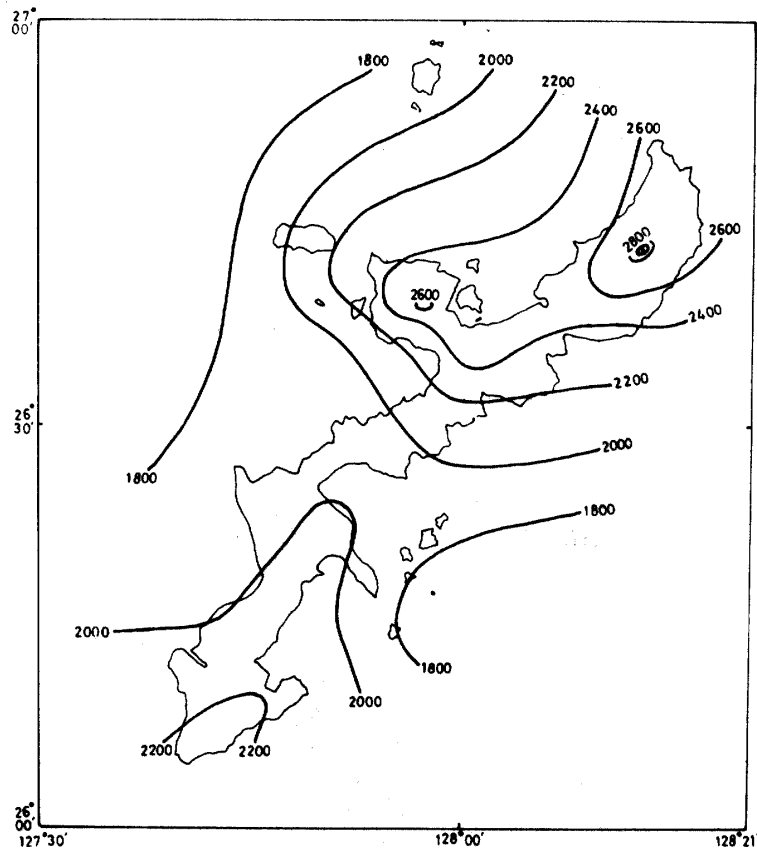


Fig. 15. Annual rainfall in the vicinity of Okinawa Island, from the file of Okinawa Meteorological Observatory, (mm)

島の北部で降水量が多いのは高地が多いためである。しかし島内各地域とも年降水量は2000mm以上あり、極端に少ない所はない。

図16は沖縄の主な栽培地の一つである八重山群島の年降水量分布を示す。島の中央部でやや多くなっているが、各地域とも年降水量はほとんど2000mmを超えている。

図17には台湾の分布を示す²⁶⁾。

図によると年降水量は、ほぼせきりょう山脈に沿った地域で最も多い。一方、西部における降水量は少なく、年間1500mmに達しない所がある。

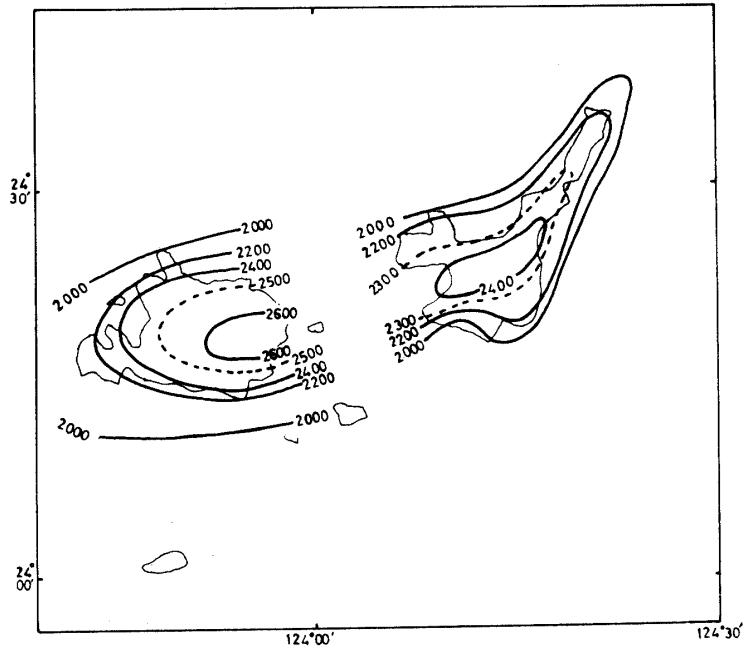
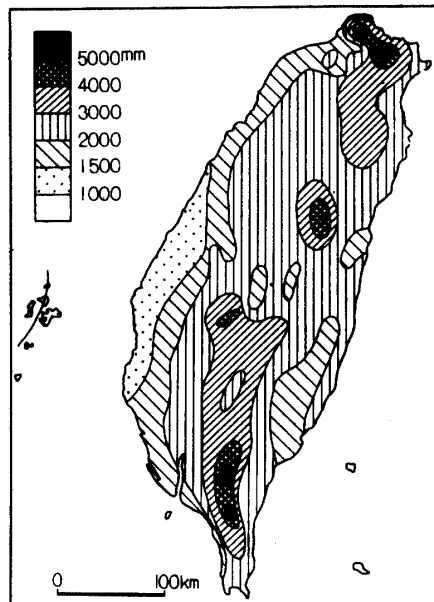


Fig. 16. Annual rainfall in the vicinity of Yayeyama, from the file of Okinawa Meteorological Observatory, (mm)



Annual rainfall in Taiwan, after Ochiai²⁶⁾

図18には、それぞれ、台湾における8月と12月の分布を示す²⁶⁾。

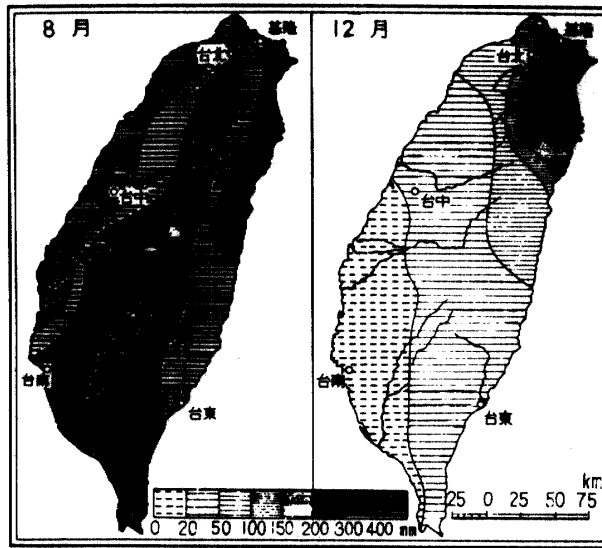


Fig. 18. Monthly rainfall in Taiwan for August and December, after Ochiai²⁶⁾

8月はせきりょう山脈に沿った地域が特に多い。全地域とも月降水量は200mmを超えている。しかし、12月には地域差が著しく、北東部から南西部に向かってしだいに減少し、南西部一帯では月間20mmにも達しない。

図19には、ハワイ諸島中のパインアップル栽培地域の年降水量分布を示す⁴⁾。

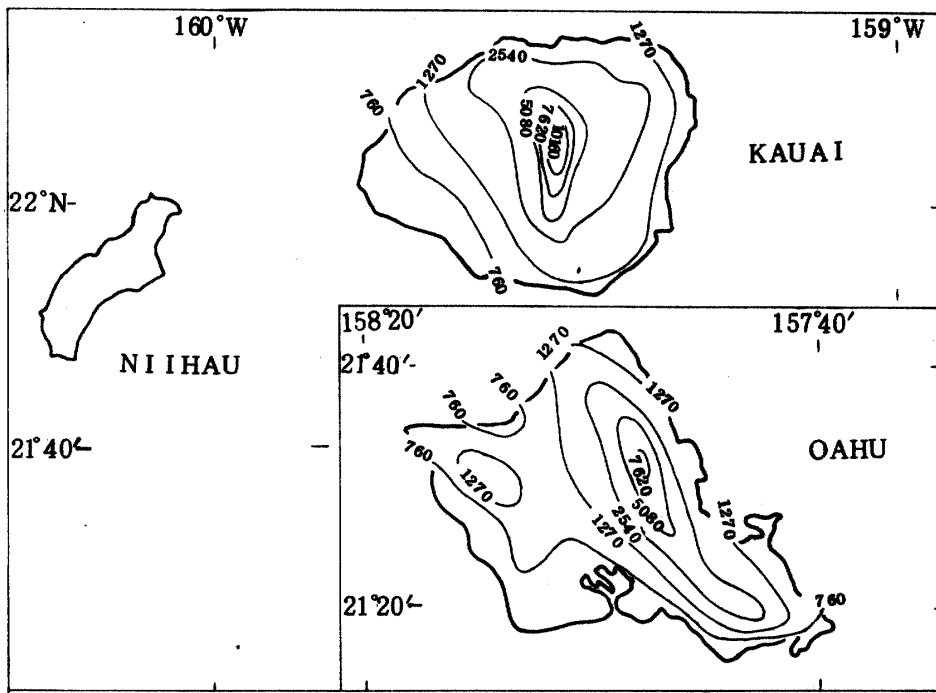


Fig. 19a. Mean of annual rainfall on the Islands of Hawaii, after Blumenstock and Price⁴⁾, (mm)

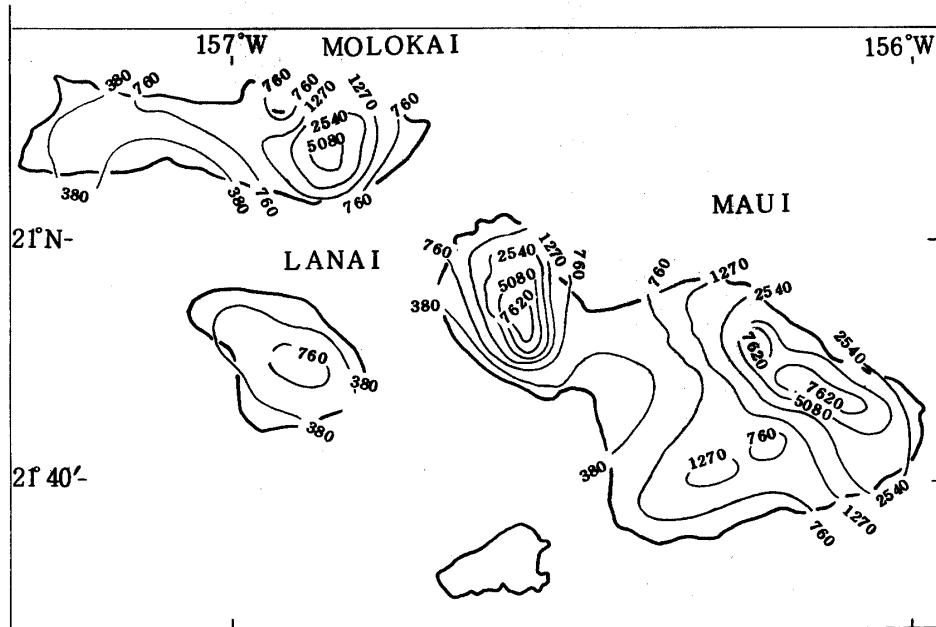


Fig. 19b. Mean of annual rainfall on the Islands of Hawaii, after Blumenstock and Price⁴⁾, (mm)

この地方では著しく地形の影響を受けており、各島とも山脈の西側で少なくなっている。マウイ (Maui)、モロカイ (Molokai) 及びラナイ (Lanai) の各島では年間760mm に達しない所が多い。

上記の事から沖縄、台湾及びハワイのパインアップル栽培地の降水量の特徴をまとめると次のとおりである。沖縄では降水量は年中多いほうで、少ない月においてさえ月間100mmを超え季節別の配分がよい。台湾では夏は各地とも多いが、冬は西部及び南部で非常に少なく、雨期と乾期の差が著しい。ハワイでは台湾のように著しくはないが夏は降水量が少なく冬は多い。そのためかんがいによって栽培されている所が多い。更に、降水量の平面的分布も台湾とハワイでは地域差が大きいが、沖縄では地域差は小さい。

2. 渇水時の降水量

1) 沖縄における渇水⁵⁰⁾

(1) 渇水の季節

図20のa及びbは那覇における渇水の年間のひん度を示す。

図20aには、1年間の各半月を含んで前後30日間、45日間、60日間及び90日間の降水量が同期間の平年値の50%に達しなかったもののひん度を示したものである。連続30日間及び45日間について見れば、渇水のひん度は10月-11月に特に大きい。これに次いで6月-8月と4月も特に大きい。一方、2月から3月にかけては渇水のひん度は小さい。

次に、図20bには前記各期間の降水量が平年値の30%に達しないひん度を示す。30日間及び45日間について見れば、渇水のひん度は、やはり、10月-11月、7月及び4月ごろに大きい。60日間及

び90日間の場合はひん度はかなり小さく、また、ひん度の山も10月-11月に対するもののほかは明らかでない。

沖縄ではパインアップル苗の植え付けは、4月ごろに春植え、8月ごろに夏植えが行なわれる。植え付け直後の活着期には特に順調な降雨が望ましい。4月植えでは間もなく5月-6月の梅雨期を迎える

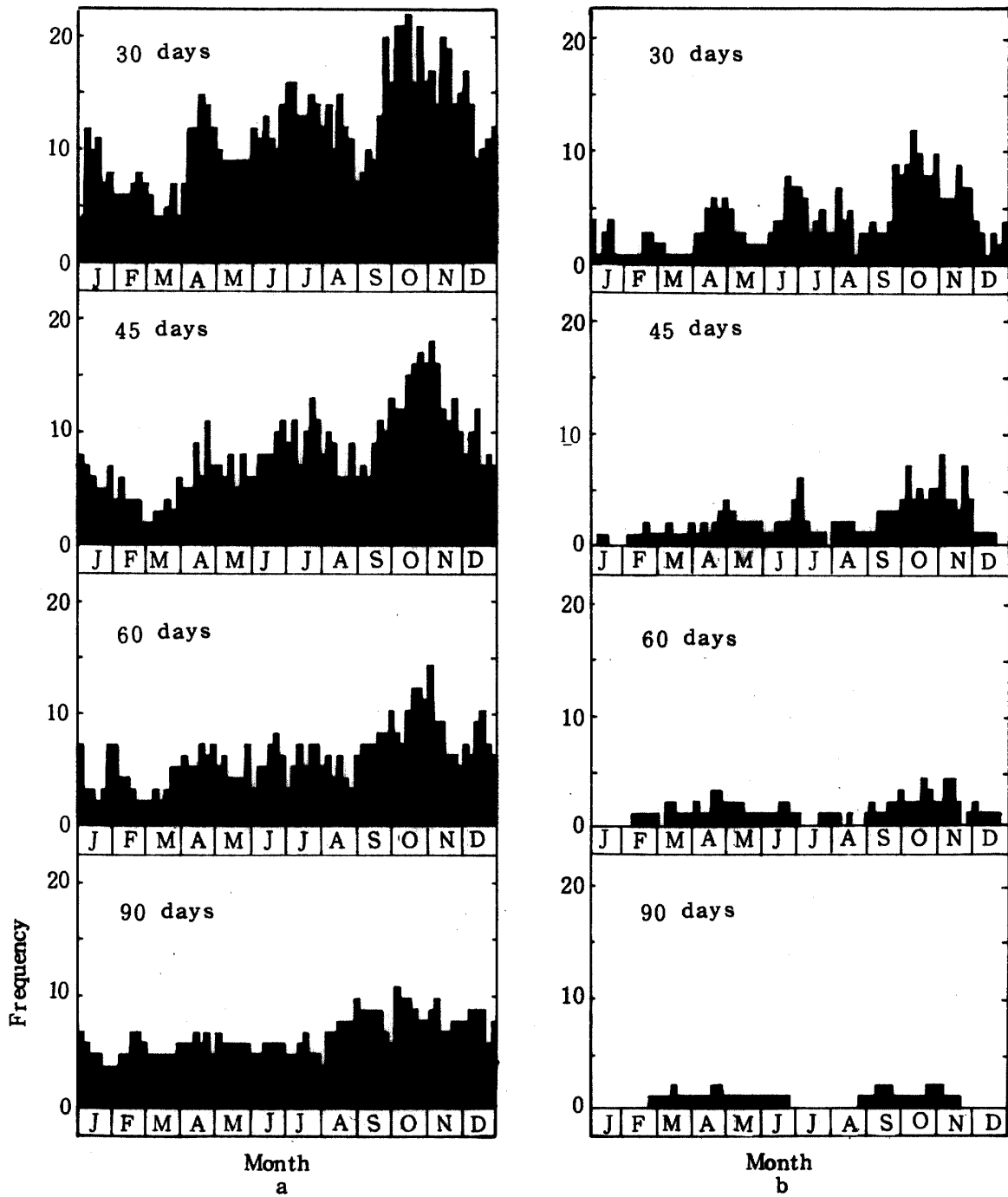


Fig. 20. Annual frequency of small rainfall, Naha, 1901-1964
 a: for small rainfall less than 50% of normal year
 b: " " 30% "

ので、4月ごろの渇水は通常強い影響は与えない。しかし、8月ごろに植え付けた苗は10月及び11月に長い渇水期間を迎えることが多く、更に、8月及び9月に台風の接近がなく寡雨が重なると、苗の活着や栄養生長に及ぼす影響は非常に大きい。このような年にはかんがいが必要となる。

(2) 渇水時の確率雨量

沖縄における渇水程度を知るために、降水量の量別ひん度分布から季節ごとの確率雨量を求めた。

i) 各季節の降水量量別ひん度分布

図21aと図21bには那覇における任意の連続30日間及び連続90日間降水量の量別ひん度分布を示す。

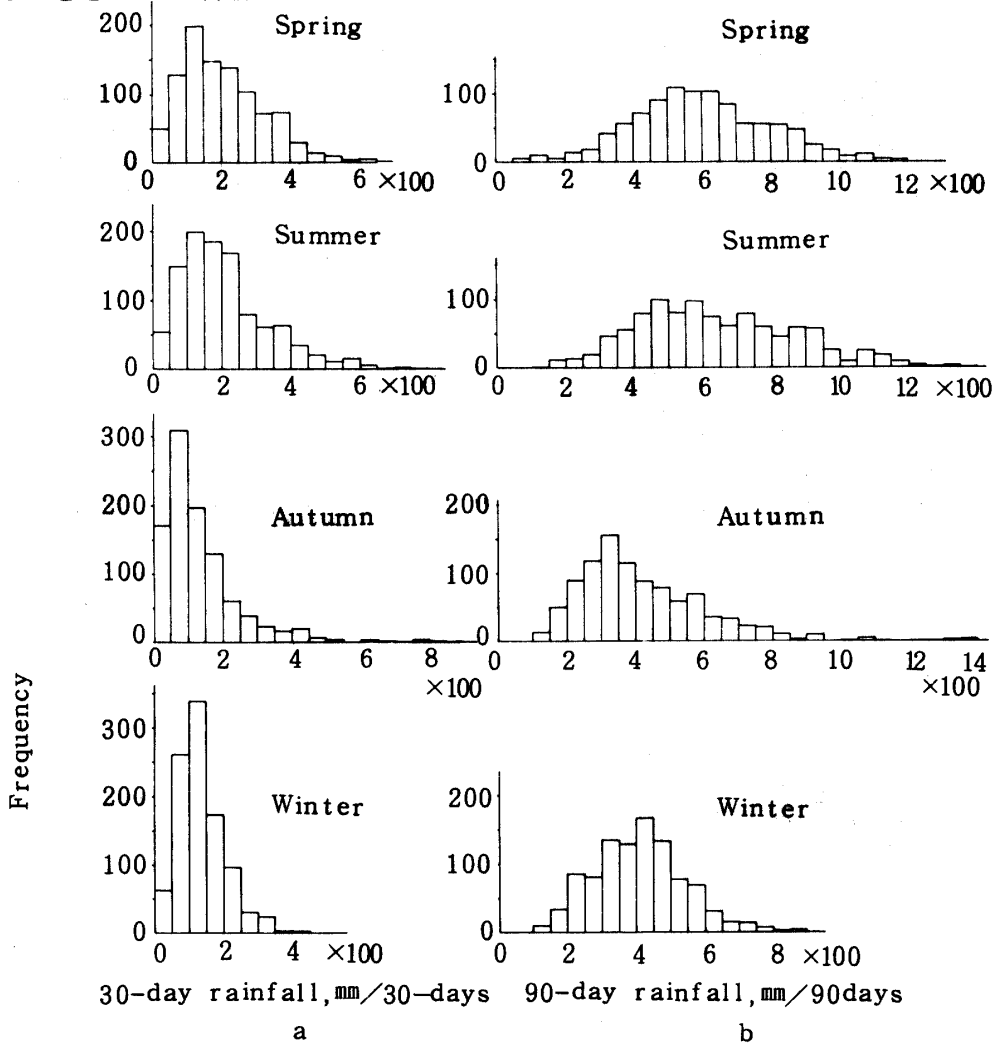


Fig. 21. Frequency by the amount of rainfall, Naha, 1901-1943 and 1952-1964

a: rainfall for arbitrary consecutive 30 days

b: " " " 90 "

すなわち、1年間の各半句を中心にして前後30日間または90日間の降水量を各年について求め、これを季節別に量別ひん度分布として示したもので、図21aは連続30日、21bは連続90日の降水量である。なお、季節の区分は、沖縄における雨の降り方と気温を考慮して次のようにした。

春 3月22日-6月19日
夏 6月20日-9月22日

秋 9月23日－12月21日

冬 12月22日－3月21日

これらの図によると、冬季の降水量はかなり安定していて変動幅は比較的小さい。しかし、春、夏及び秋には変動幅が大きく、年により多雨になったり寡雨になったりする。

なお、同様な計算を連続45日間及び連続60日間についても求めた。これら4個の連続期間の全資料は、次に示す非超過確率雨量とそのリターンピリオドの計算に使用した。

ii) 非超過確率雨量とリターンピリオド

渇水の程度を見るために、任意の連続30日間、45日間、60日間及び90日間の非超過確率雨量とそれに対するリターンピリオドを季節別に求めた。

計算の方法は、図21を作成するために使った資料を利用し、全統計年について各季節別に年最小30日間降水量、年最小45日間降水量、年最小60日間降水量、及び年最小90日間降水量を求めた。次にこれらの値を確率紙にプロットして、それぞれ、上記30日間降水量ないし90日間降水量の非超過確率を求めた。確率紙へのプロットは、次の式で示されるいわゆるヘーゼンプロットによって行なった。

$$S(x) = \frac{2i - 1}{2n}$$

ここで、

$S(x)$ ：降水量 x mmの非超過確率

n ：標本の大きさ（統計年数），ここでは55

i ：標本値を小さい順に並べたときの順位

次に、非超過確率雨量のリターンピリオドは次の式により求めた。

$$T = \frac{1}{S(x)}$$

ここで、 T は非超過確率雨量 x mmのリターンピリオド（年）である。

この計算に用いた確率分布は、図22のa-dに例示されるように平方根正規分布がよく適合した。連続30日間ないし90日間について、図に示されない他の季節についても同様に平方根分布がよく適合した。

上の方法で求めた各渇水期間の非超過確率雨量とそのリターンピリオドを表11に示す。この表によると降水量の絶対値に関する限り秋は特に小さい。冬は秋について小さい。春と夏は降水量の大きさはよく似ており、同一の期間とリターンピリオドに対しては冬より大きい。

表11を利用して沖繩における渇水時の降水量とリンアップルの生育との関係を考えてみたい。まず30日間程度の渇水については、その期間内の降水量は各季節ともかなり少ない。更に45日間については、例えば10年非超過確率雨量は、各季節とも37 mmないし72 mmである。実験によると、リンアップルは土壌含水量が不十分なときは栄養生長が遅れ、更に花芽分化期の長期間の渇水により果実の肥大も遅れる（Ⅴ章）。ただ、この作物は渇水に強いので、かなり長期間の渇水にも植物体が枯死することは少ない。しかし、蒸発散量から見ると渇水時には畑地の土壌含水量が不十分になり、生育はかなり遅れると思われるので、このような渇水時にはかんがいが必要である。

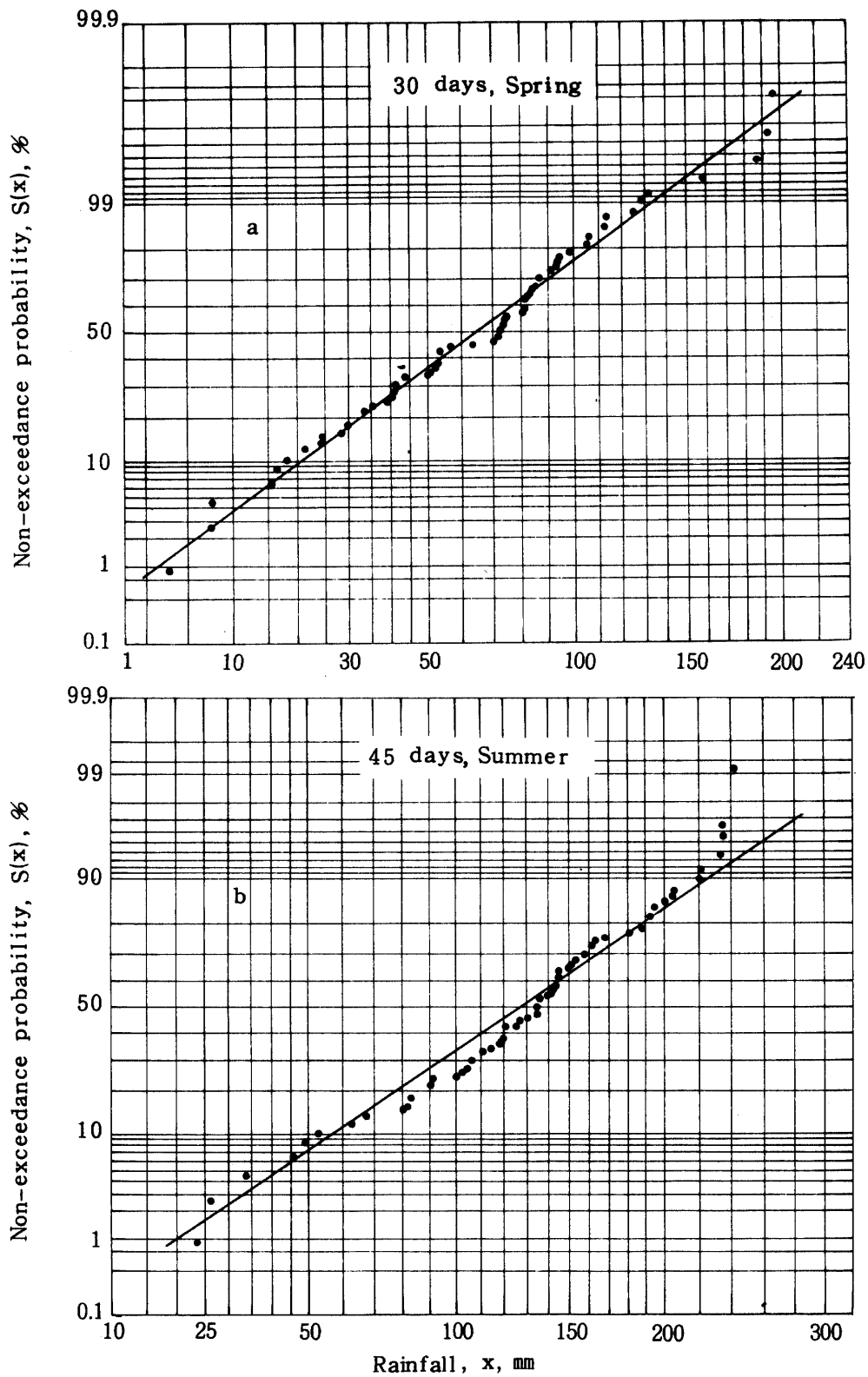


Fig. 22a-b. Examples of non-exceedance probability distribution of rainfall for each arbitrary period of length as indicated, Naha

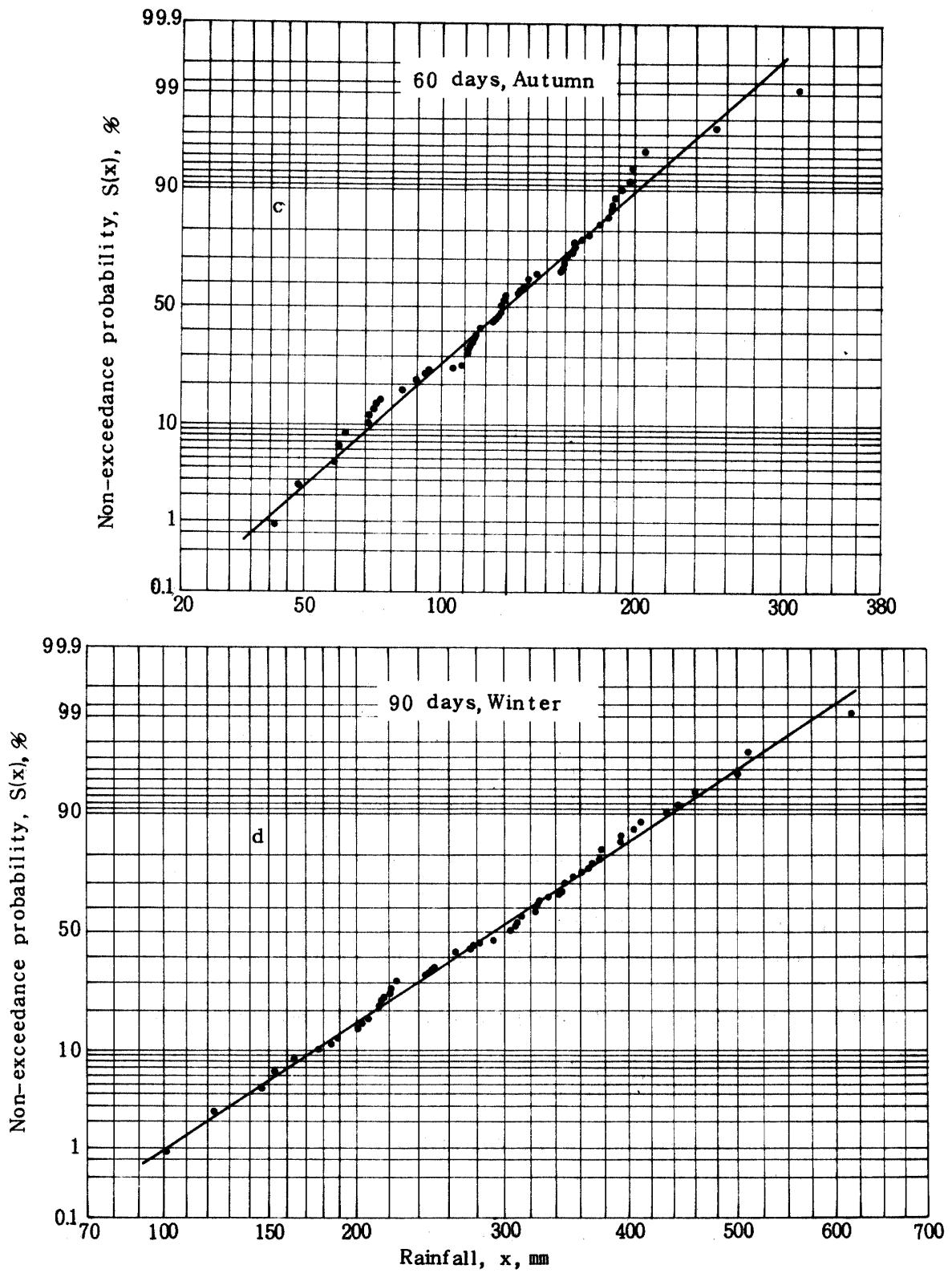


Fig. 22c-d. Examples of non-exceedance probability distribution of rainfall for each arbitrary period of length as indicated, Naha

Table 11. Non-exceedance probability rainfall for each period and season, Naha; original data: 1901-1943 and 1952-1964

		(mm)								
Period	Season	Return period (Year)								
		2	5	10	20	30	40	50	75	100
30 days	Spring	65	33	20	13	9	7	6	4	3
	Summer	54	29	19	12	9	8	6	4	3
	Autumn	36	19	13	9	7	5	4	3	2
	Winter	57	33	24	16	14	12	11	9	8
45 days	Spring	143	95	72	58	50	45	42	35	33
	Summer	128	78	57	42	34	31	28	22	20
	Autumn	78	49	37	28	24	22	20	17	15
	Winter	105	76	62	52	48	44	42	38	36
60 days	Spring	223	148	116	92	79	72	67	57	53
	Summer	222	156	126	103	92	84	80	70	66
	Autumn	129	90	72	59	53	49	47	41	39
	Winter	169	119	97	78	71	65	62	54	52
90 days	Spring	405	296	247	210	190	177	170	152	146
	Summer	432	310	254	212	192	177	170	150	143
	Autumn	266	192	157	130	117	109	105	93	88
	Winter	292	212	176	148	135	125	120	108	102

iii) 連続干天日数のリターンピリオド

渇水の度合を示す他の一つの尺度として連続干天日数のリターンピリオドがあるが、これについての検討も行なった。

日降水量5mm未満の日を干天日として、連続干天日数の超過確率を正務らの方法²⁹⁾で次の式により求めた。

$$P = \frac{1}{N T}$$

ここで、

P: 連続干天日数の超過確率 (P = 1 - W, Wは非超過確率)

N: 連続干天期間の1年間の個数の平均値

T: 連続干天日数のリターンピリオド

こうして求めた連続干天日数の確率分布は、図23のa及びbに例示するように、平方根正規分布でよく表わすことができる。

表12にはこれらの確率紙を使って求めた任意のリターンピリオドに対する連続干天日数を示す。この表によると、干天日が20日以上も続くことは各季節にかなりひんばんで、特に夏と秋には著しい。

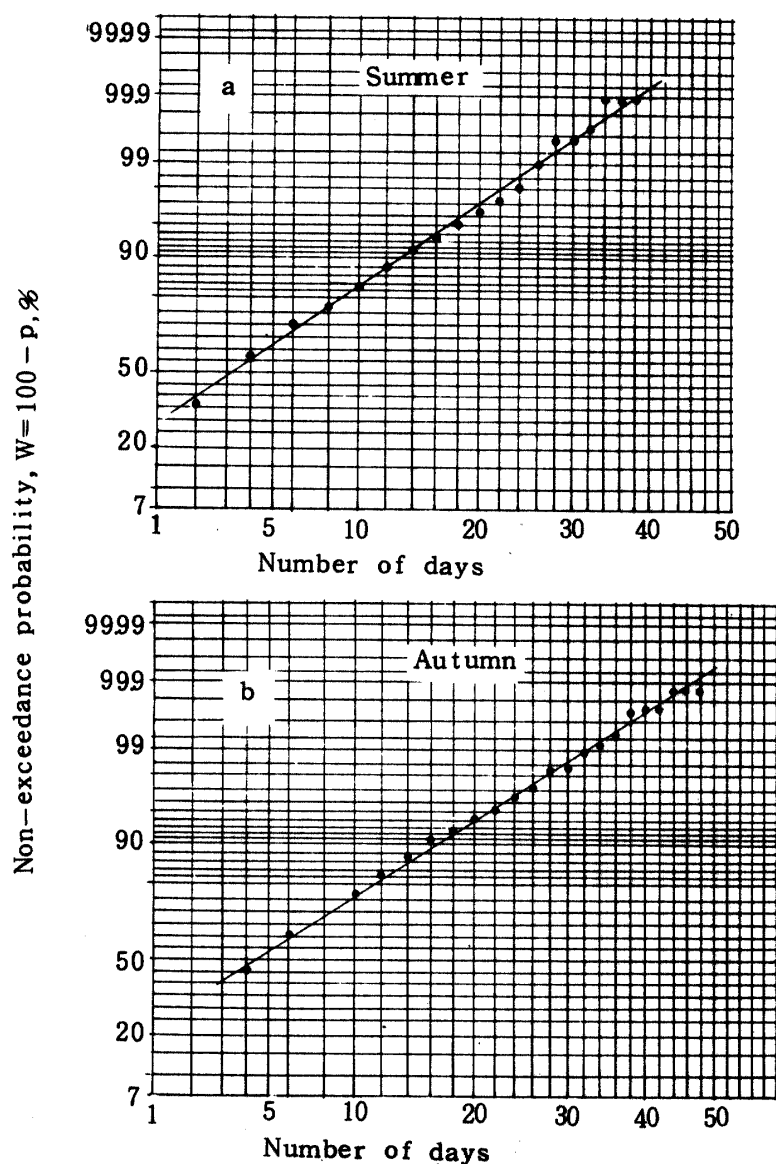


Fig. 23. Probability distribution of the number of days continued dry in summer and autumn, Naha

Table 12 Return period of the number of days continued dry, Naha; original data: 1898-1943 and 1952-1972 (day)

Season	Return period (years)									
	2	5	10	20	30	40	50	75	100	200
Spring	15	20	23	26	28	29	30	32	33	36
Summer	18	23	27	30	33	34	35	37	38	42
Autumn	22	27	32	36	39	41	42	45	46	51
Winter	17	22	26	30	32	34	34	36	38	41

この事は、パインアップルの蒸発散量から見て、夏と秋には畑地の土壌含水量が不十分なために生育の遅れる年がかなりあることを示す。

2) 他のパインアップル栽培地域における渇水状況との比較

落合ら²⁶⁾は、台湾の中部以南では台風や熱雷による雨が多く、特に台風の雨は1時間に300mm～400mmに達することを示している。しかし、このような強雨地域にある台湾西部では冬に乾燥が著しく、更に台湾南部では冬季には風も強く蒸発量が大いことを挙げている。徐¹⁹⁾は、屏東では5月から9月までの降水量は年降水量の90%に当たることを示している。したがって、秋から春にかけての降水量は非常に少ない。

これらの事から見ると、台湾では年降水量が多い点ではよいが、雨の分布が時期的に著しく偏り、特に南西部では秋～春の長い渇水期間はパインアップルの生育にかなりの障害になっていると考えられる。

ハワイでは、特に雨期に当たる冬季の降水量の変動が大きく、年間を通して水の供給の大部分を冬季の雨に頼っている地域では、冬季の降水量が少ない年には大きな打撃を受ける⁴⁾。1925年-1926年にはホノルルでは11月-翌年5月の各月の降水量はいずれも平均値に達せず、1月-5月の合計降水量はわずかに76mmであった。ハワイは低緯度において日射量は年中大きく(IV章)、しかも貿易風帯内において湿度は低い。仮に、ハワイでかんがい施設が不備であったならば、渇水の影響は沖縄におけるよりも厳しかったであろう。

3. 降水量についての要約

パインアップルの栽培地である沖縄、台湾及びハワイの降水量を、季節的分布と平面的分布で比較すると次の結果が得られる。

沖縄では、平均的に見て雨は季節的分布も平面的分布も偏りがなく降っている。

台湾では季節的分布が非常に偏っている所が多く、特に南西部ではその傾向が著しい。この地域では秋から春まで長期間にわたり渇水が起りやすい状態になっている。

ハワイでは地形の影響で降水量の平面的分布は非常に偏っている。更に季節的分布も偏りが大きく、冬に雨が多く夏に少ない。このためにパインアップルはかんがいによって栽培されている所が多い。年降水量の少ない地域では特に冬季の雨が期待されており、これが1年間の必要水分量の大きな供給源になっている。それにもかかわらず冬季の降水量の変動が大きい。

上に述べたことから見て、降水量に関する限りパインアップル作の条件は沖縄が最も恵まれている。台湾では秋から春にかけては降水量も少ない上に日射量は大きく、また春と秋には気温も比較的高いので渇水は厳しい。ハワイは低緯度において気温は年中高いほうであり、また日射量も大きい。この点でハワイにおける降水量の条件は台湾にさえも及ばない。このような条件下でハワイのパインアップル産業が盛んな理由の一つは、かんがいによって不利な条件を克服しているためである。

沖縄における降水量は、平均値から見ると恵まれている。しかし、個々の年について、降水量の非超過確率と連続干天日数の超過確率、及びこれらのリターンピリオドから見ると、20日程度の渇水はかなりひんぱんで、この傾向は夏と秋に著しい。このような渇水ではパインアップルの植物体が枯死することは極めてまれであるが、実験の結果(VI章)によると生育はかなり遅れる。したがって、一般に夏から秋にかけては渇水時のかんがいは必要である。

IV 沖縄におけるパインアップル作と日射量

パインアップル栽培にはある適度の日射が必要なが従来栽培経験から知られている。日当たりが良くないと果実は小さく、品質も低下する⁶⁾。Groszmannは、オーストラリアのクィーンズラン

ドでは直射日光が最もよく当たる方位の斜面で生育が良い旨報告している⁹⁾。しかし、品種によっては熱帯のように強い直射光線下では葉が紅色または黄色になり、密植や木蔭栽培で減光すると生育が良くなるものがある⁷⁸⁾。これらの事実は、パインアップル栽培には品種によって適度の日射強度があることを示す。しかし、適度の日射強度がどのくらいであるかは十分明らかでない。パインアップルは沖縄の主要作物の一つであるが、日照率は12月から翌年5月ごろまでかなり小さく、この期間の月平均値はほとんど30%台である。このような日照条件が栽培に十分か否かはまだ明らかにされていないが、これの解明は栽培技術改善や適地判定のために重要である。この研究はその基礎資料を提供するために行なった。ここでは沖縄付近における日射量の気候学的特性を述べ、更に、最近野瀬ら³⁸⁾がパインアップルのCO₂収支から求めた光飽和点の資料に基づき、光合成に直接利用可能とみなされる日射量について一つの検討を行なった結果も併せて述べる。

この研究に用いた気候資料は、気象庁の日本気候表、累年気候表、東亜気象資料、各気象官署の観測結果、及びLandsbergら²⁷⁾の文献を主とし、米国ESSAとタイ国気象局の各資料、Haurwitzら¹²⁾、及び倉嶋ら²⁶⁾の文献から得られた日照率または雲量の資料である。

一方、日射量に関連して、パインアップル畑地の熱の収支は畑地の接地気層の物理的特性を知るための重要な要素である。このために、この研究では日射の影響が特に大きい夏季において2,3の熱収支項の大きさを求めたので、その結果を併せて述べる。

1. 沖縄におけるパインアップル作と日射量⁶⁴⁾

1) 沖縄付近の日射量の気候学的特性

(1) 日射量の地理的分布

長期にわたる均質な日射量観測値が得難いため、本項では日射量は各地の日照率累年平均値を使い次の式により推算した。

$$R = RA \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

ここで、R: 月平均水平面日射量の推算値、RA: 月平均大気外日射量 (Angot value); n, N: それぞれ月間日照時間平均値と月間可照時間; a, b: 実験常数である。RAはMilankovitchの値とBenjaminの値より求めた。a, bはいずれも各月で異なる値を使ったが、これらは関原ら⁵⁸⁾がわが国6カ所の気象台観測資料より求めたものである。

図24は各季節の水平面日射量と年間水平面日射量推算直の極東における地理的分布を示す。

図24の精度を推定するために、各月の推算直を陸上について他の研究者の結果と比較すると、多田ら⁷⁰⁾の結果とは約10%以内で一致し、内嶋⁷⁸⁾とは12月はよく一致し、6月は10%~15%内嶋の値が小さい。

沖縄付近における日射量の特徴として図24から次の事が挙げられる。

12月-2月 (冬)

日射量は九州中部程度であり、九州から関東に至る太平洋沿岸各地に及ばない。

3月-5月 (春)

日射量は九州南部及び北海道中部程度であり、中国、四国、近畿、中部の各地方及び奥羽太平洋沿岸各地に及ばない。

6月-8月 (夏) 及び9月-11月 (秋)

日射量は日本各地のうち最大である。

全年

日本各地のうち最大で約130 k ly/yearに達する。

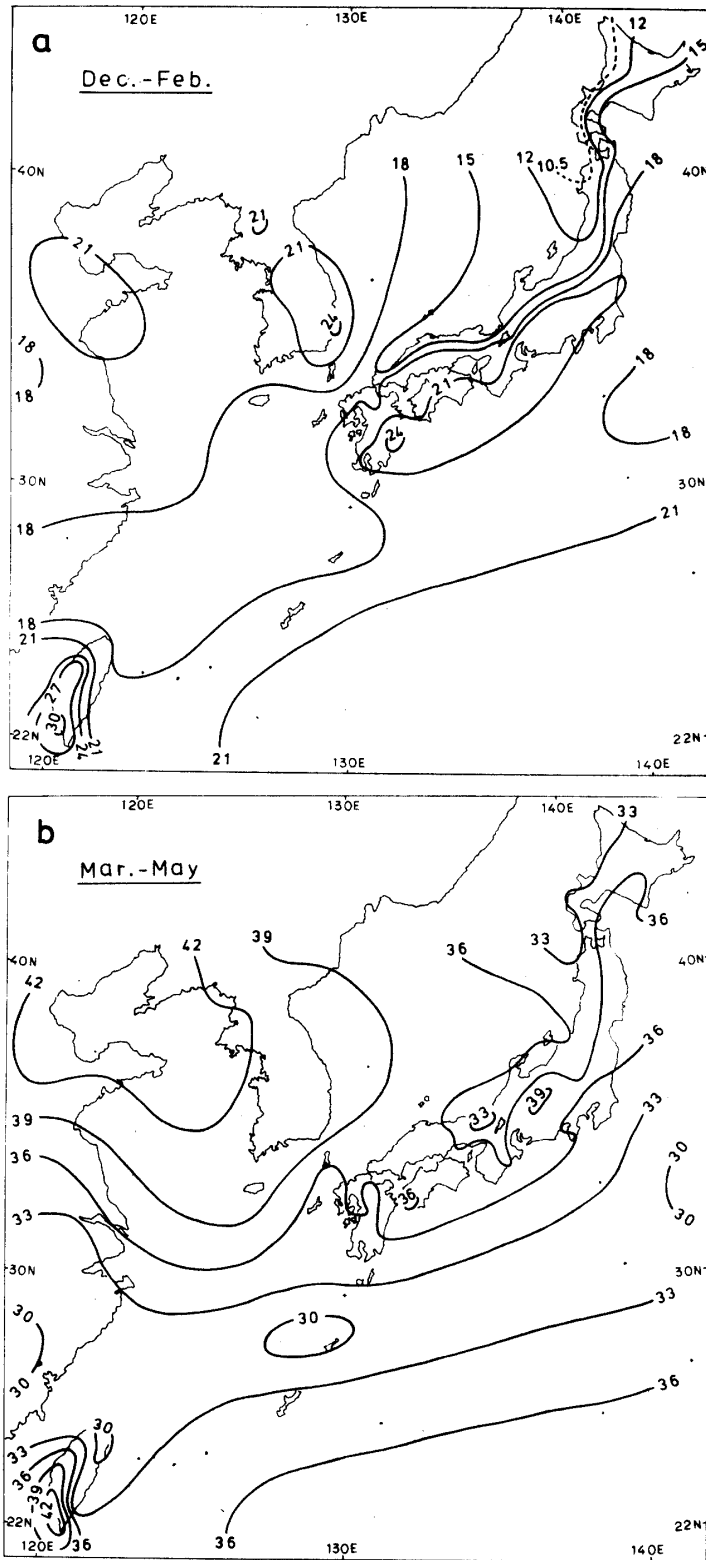


Fig. 24a-b. Geographical distribution of calculated values of trimonthly short-wave radiation on horizontal surface, (k ly/3 months)

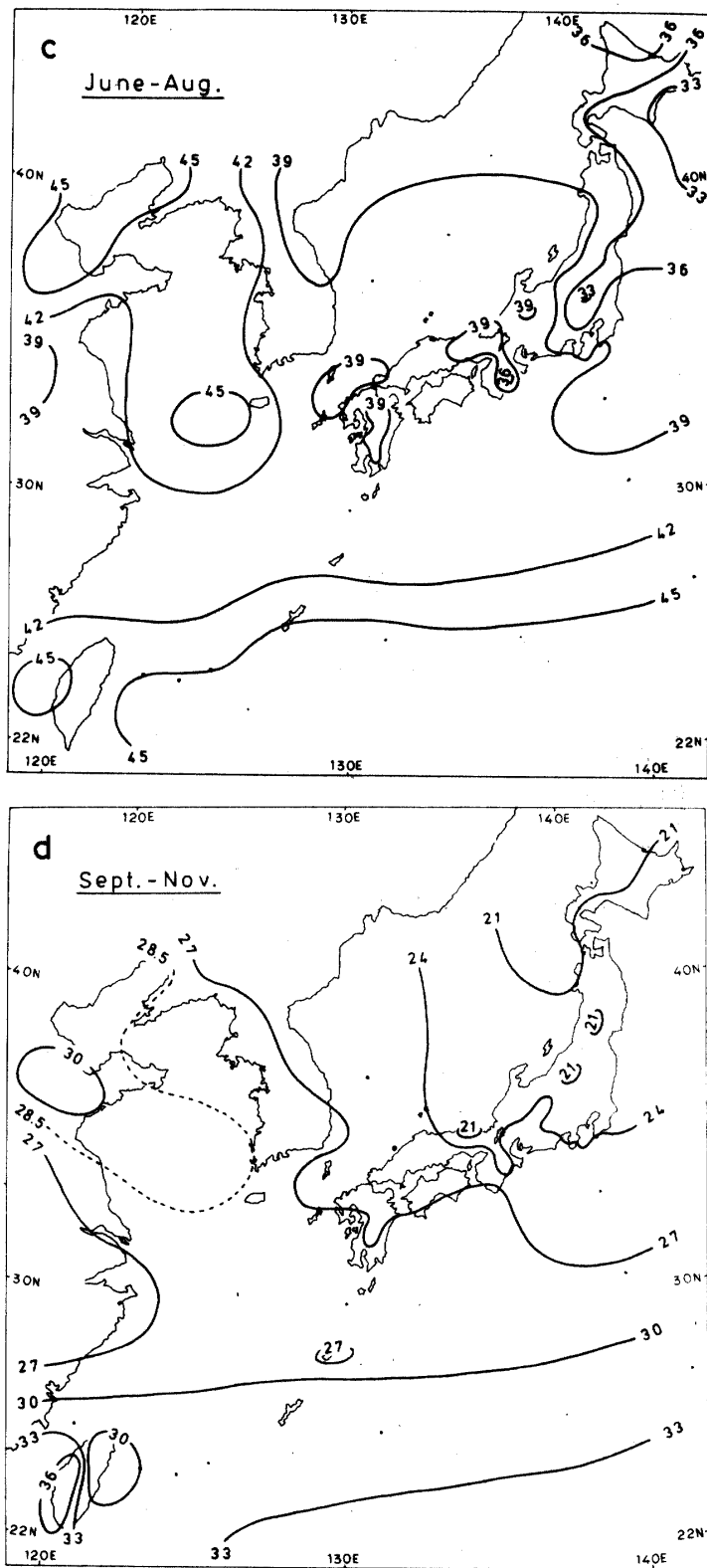


Fig. 24c-d. Geographical distribution of calculated values of trimonthly short-wave radiation on horizontal surface, (k ly/3 months)

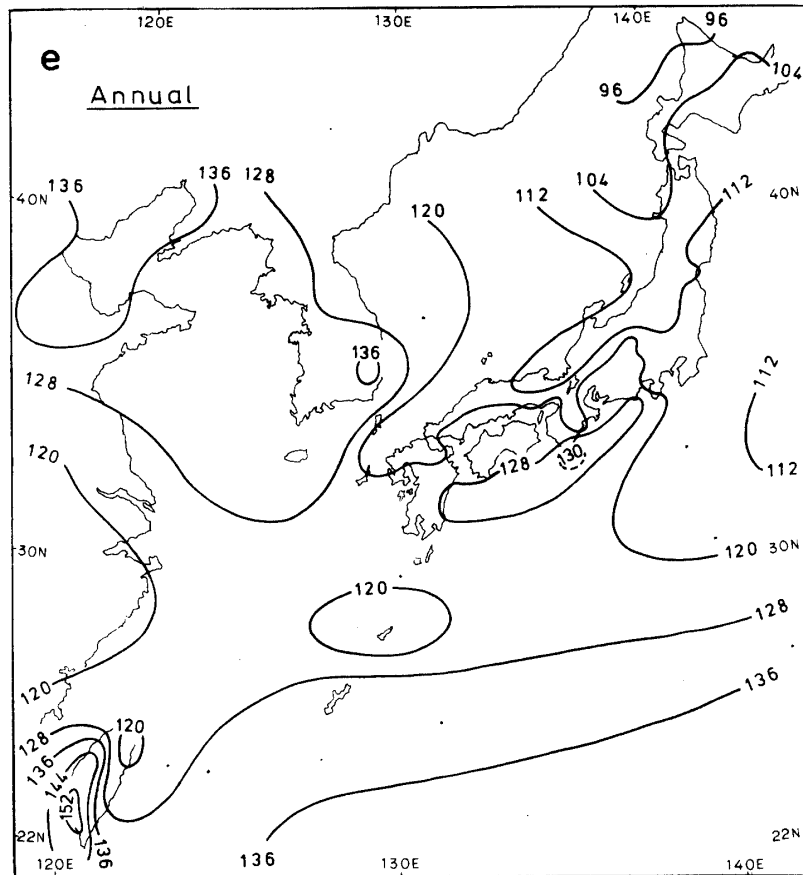


Fig. 24e. Geographical distribution of calculated values of annual short-wave radiation on horizontal surface, (k ly/year)

図24の分布は、各季節の気圧配置、前線帯の位置、風系及び海陸配置から考えられる傾向とよく一致する。沖縄付近の春と冬の日照量は緯度が低い割には小さい。これは、これらの季節に海上を吹いて来る北風により雲が出来やすく、前線停滞や低気圧通過がひんぱんなためである。夏と秋は沖縄付近はいわゆる太平洋高気圧の範囲に入る期間が長く日照量が多い。

(2) 日照量の月別分布

表13には日本各地の月別水平面日照量推算値を示す。比較のために世界の主なリンナップル栽培地である台湾及びハワイにおける値も併せて示す。

表13によると那覇では暖候期と寒候期の日照量の差が大きい。4月と5月は表中各地のうちで最小を示している。台中、ホノルルと比べると、那覇はほとんど各月ともこれら両地点より小さく、春と冬は差が著しい。

(3) 世界のリンナップル栽培地域との比較

本項における日照量は、平均雲量を使い、Berljandの次の式により計算した。

$$R = (Q + q)_0 \{ 1 - (0.36 + 0.38n)n \}$$

ここで、R: 月平均水平面日照量推算値、 $(Q + q)_0$: Berljand³⁾の可能全短波放射量月平均値。
n: 月平均雲量(0.1~1.0)である。

Table 13. Calculated short-wave radiation on horizontal surface for several locations in Japan, Taiwan and Hawaii

	(k ly/month, k ly/year)												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
Naha	6.8	7.4	10.1	11.5	12.1	13.1	16.6	15.3	13.6	10.1	7.6	6.3	130.5
Kagoshima	7.0	7.9	11.1	11.6	12.5	11.6	14.0	14.4	11.6	9.6	7.4	6.4	125.1
Miyazaki	8.2	8.8	11.4	11.8	12.9	12.1	14.6	14.6	11.4	9.2	7.3	7.0	129.3
Fukuoka	5.7	6.9	10.7	12.0	13.5	12.4	13.5	14.3	10.6	9.1	6.6	5.0	120.3
Shizuoka	7.8	8.6	11.2	11.9	13.0	11.5	12.6	13.3	9.9	8.1	6.6	6.5	121.0
Tokyo	7.1	8.0	10.5	11.6	13.0	11.4	12.5	12.6	8.9	7.4	6.1	5.9	115.0
Niigata	4.1	5.4	9.4	12.1	14.5	13.6	13.8	14.5	10.0	7.4	5.1	3.4	113.3
Sapporo	4.0	5.6	9.1	11.7	14.0	13.6	13.2	11.9	9.7	7.0	4.3	3.3	107.4
Taichung	9.5	8.7	11.3	11.5	14.2	13.7	15.4	14.9	14.4	12.5	10.0	9.1	145.2
Honolulu	10.9	11.5	15.1	15.9	17.5	17.0	17.6	17.7	16.0	12.6	9.7	9.4	170.9

表 14 は世界の主なパインアップル栽培地域付近における水平面日射量推算値を示す。表中各地について 4 個の月の合計値を見ると、ナイジェリア、タイ国及びケニアの一部の地域では那覇より小さいが、他の各地では那覇より大きい。表 14 によると沖縄の日射量は世界の栽培地域の中でかなり小さいほうに属する。

2) パインアップル栽培と日射量

(1) パインアップルの光飽和点と日射量

パインアップルは CAM (Crassulacean Acid Metabolism) 植物の持つ特性を有し^{18,34)}、光合成の機構に特徴があって、従来光飽和点は明らかにされていなかったようである。最近野瀬ら³⁸⁾は植付後 5 か月ないし 8 か月のスムースカイエンの個体株を使い、CO₂収支の測定実験を行った。明期 11.5 時間、明期葉温 29℃～31℃、暗期葉温 26℃～27℃に保ち、明期照度を一定にして 1 日間の CO₂ 収支を測定した結果、光飽和点は 30k lux ないし 50k lux の範囲内にあることを見いだした。

一方、太陽水平照度と水平面日射量との関係を筆者が実験により求めたところ、両者の間には相関係数 0.99 以上で 1 次式で表わし得る関係が得られた。両者の関係は季節によりわずかの差があって、1 ly は 77k lux ないし 84k lux に相当し、パインアップル光飽和点下限 30k lux は 0.35 ly～0.36 ly で、光飽和点上限 50k lux は 0.59 ly～0.63 ly に相当する。

(2) パインアップル栽培と日射量

前記の光飽和点についての実験結果及び照度 (k lux) と日射強度 (ly) との関係に基づき、スムースカイエンを主とする沖縄のパインアップル栽培で光合成に直接利用可能とみなされる日射量の割合を検討してみた。

日射量の資料は、沖縄気象台 (那覇) におけるエプリー型日射計による 4 年間のアナログ記録を利用し、光合成に直接利用可能な日射量として次の値を記録紙から読み取った。すなわち、例えば光飽和点を 30k lux とするとき、この照度に相当する日射強度までの日射量を読み取り、これを直接利用可能日射量とする。ここで、この日射強度を超える日射量は、光合成に直接利用できないものとして棄てる。光飽和点を 50k lux とするときも同様にして読み取る。

Table 14. Calculated short-wave radiation on horizontal surface expected for various locations in the vicinity of major pineapple growing areas in the world

Location	Country	Lat.	Long.	(k ly/month, k ly/4 months)				
				Jan.	Apr.	July	Oct.	Total
Toowoomba	Australia	27° 33' S	151° 58' E	19.8	13.2	10.8	17.8	61.6
San Juan	U. S. A.	18 23 N	66 07 W	13.0	16.9	16.5	15.2	61.6
Recife	Brazil	8 01 S	34 51 W	16.0	13.9	11.4	17.4	58.7
Kahului	U. S. A.	20 54 N	156 26 W	11.2	13.1	17.1	13.0	54.4
Brisbane	Australia	27 28 S	153 02 E	16.1	11.9	9.9	16.1	54.0
Honolulu	U. S. A.	21 20 N	157 55 W	10.7	13.3	16.4	12.6	53.0
Tampico	Mexico	22 12 N	97 51 W	8.5	13.8	16.9	13.3	52.5
Singapore	Singapore	1 18 N	103 50 E	11.8	13.3	13.1	13.2	51.4
Miami	U. S. A.	25 48 N	80 16 W	10.7	14.6	14.5	11.4	51.2
Umtata	South Africa	31 35 S	28 47 E	15.8	10.4	9.4	13.2	48.8
Hua Hin	Thailand	12 34 N	99 48 E	14.2	14.8	9.2	10.6	48.8
Coatzacoalcas	Mexico	18 N	94 W	9.2	15.4	12.8	10.8	48.2
Lagos	Nigeria	6 27 N	03 24 E	14.8	11.8	10.8	10.8	48.2
East London	South Africa	33 02 S	27 52 E	15.8	10.1	9.0	13.0	47.9
Surigao	Philippines	9 48 N	125 30 E	9.9	13.6	12.1	11.9	47.5
Rio de Janeiro	Brazil	22 54 S	43 10 W	13.4	10.6	9.8	11.9	45.7
Naha	Japan	26 14 N	127 41 E	7.2	11.2	14.5	11.4	44.3
Prachin Buri	Thailand	14 10 N	101 10 E	13.3	11.7	8.4	10.4	43.8
Enugu	Nigeria	6 28 N	07 33 E	14.0	10.7	8.1	10.8	43.6
Voi	Kenya	3 24 S	38 34 E	11.0	10.2	9.7	11.2	42.1
Nairobi	"	1 18 S	36 45 E	13.0	10.3	7.5	11.2	42.0

表 15 はこうして求めた 4 年間の平均値と、それらの 7 月に対する割合を示す。

表 15 によると、光合成に直接利用可能な日射量は 3 月から 10 月まではいずれも最大月 7 月の 70% を超えて比較的大きいが、11 月から翌年 2 月まではかなり小さい。年間の利用可能日射量は暖候期に偏って大きい。

表 16 は直接利用可能日射量的那覇における最大可能量を示す。

表中の値は、光飽和点を 30klux または 50klux として求めてある。この表の計算では、Angot value に対する地上の水平面日射量透過率として式(2)中の a, b の値に関原らが求めたものを使い、FACOM 230-35 電子計算機により行なった。

那覇における光合成利用可能日射量の年による変動の様子を、最大可能量に対する割合として表 17 に示す。

Table 15. Average of observed short-wave radiation on horizontal surface integrated up to the radiation intensity equivalent to 30 k lux and 50 k lux illumination, and the rate of the radiation to the amount for July, 1966-1969, Naha (k ly/month, k ly/year and %)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
30 k lux	4.4	4.4	5.4	6.1	6.2	5.9	7.0	6.6	6.0	5.6	4.6	4.4	66.6
	63	63	77	87	89	84	100	94	86	80	66	63	
50 k lux	5.8	5.9	7.5	8.7	8.7	8.0	10.3	9.7	8.8	8.0	6.2	5.9	93.5
	56	57	73	84	84	78	100	94	85	78	60	57	

Table 16. Maximum possible amount of short-wave radiation on horizontal surface integrated up the radiation intensity equivalent to 30 k lux and 50 k lux illumination, Naha (k ly/month, k ly/year)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
30 k lux	6.3	6.0	7.2	7.4	8.1	7.8	7.9	7.7	7.0	6.7	5.9	6.1	84.1
50 k lux	9.9	9.7	11.3	11.8	12.8	12.3	12.5	12.1	11.0	10.3	9.0	9.5	132.2

Table 17. Rate of observed short-wave radiation on horizontal surface integrated up to the radiation intensity equivalent to 30 k lux and 50 k lux illumination to maximum possible radiation, Naha (%)

		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
30 k lux	1966	70	75	76	76	73	75	83	83	84	90	74	67
	1967	74	76	85	82	80	78	90	88	87	84	78	71
	1968	72	68	74	83	82	79	89	83	86	85	85	80
	1969	65	71	68	84	69	70	90	92	88	80	72	-
	Mean	70	72	76	81	76	76	88	87	86	85	77	73
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
50 k lux	1966	60	65	67	66	66	67	77	77	78	86	65	54
	1967	63	65	77	75	72	68	85	81	81	77	69	61
	1968	60	55	64	76	75	69	85	75	80	75	78	70
	1969	52	61	57	77	59	58	83	88	81	73	63	-
	Mean	59	62	66	74	68	66	83	80	80	78	69	62

この表によると、光飽和点を30kluxとするとき、4月-10月は80%を超える月が多いが、その他の月はこれより小さい。全般に夏は変動が小さく、安定して利用可能日射量が多いが、冬、春及び梅雨期は年による変動がやや大きい。

光飽和点を50kluxとしても、傾向は30kluxの場合と類似しているが、割合は50%台まで落ちる月があり注目に値する。

3) 考察

沖縄では春と冬は水平面日射量平均値が緯度の低い割にやや小さく、大きさは九州地方とほぼ同程度であることは既に述べた。図25は沖縄及び九州各地の水平面日射量推算値の変動度を示す。

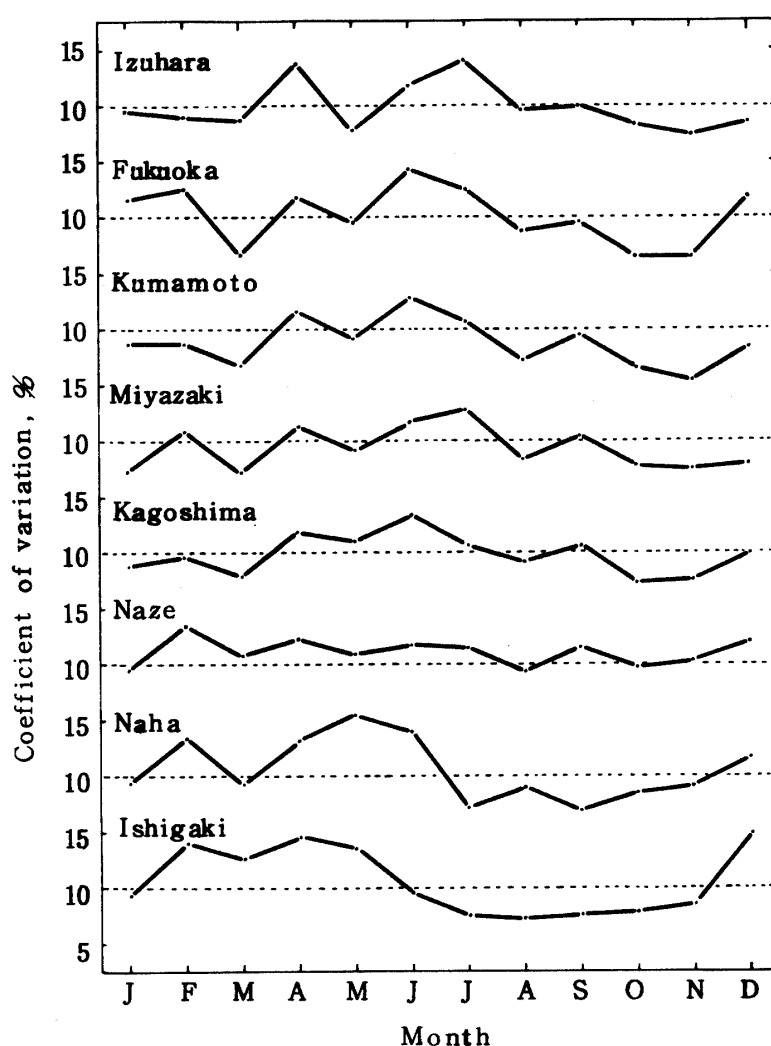


Fig. 25. Annual change of the coefficient of variation of calculated monthly short-wave radiation on horizontal surface

この図は式(2)を使い、1941-1970の各月の日照率を使って求めた。

図25によると、沖縄では日射量は春と冬の各月、及び梅雨期には年による変動が大きい。これは日

射量平均値が比較的小さい月に変動が大きいことを示すものである。

沖縄でパイナップルの光合成に直接利用可能とみなされる日射量の割合を、他の栽培地であるハワイ、台湾と比較してみた。いま、那覇の水平面日射量観測値と照度 30klux または 50klux 相当日射強度までの水平面日射量との関係を図 26 に示す。

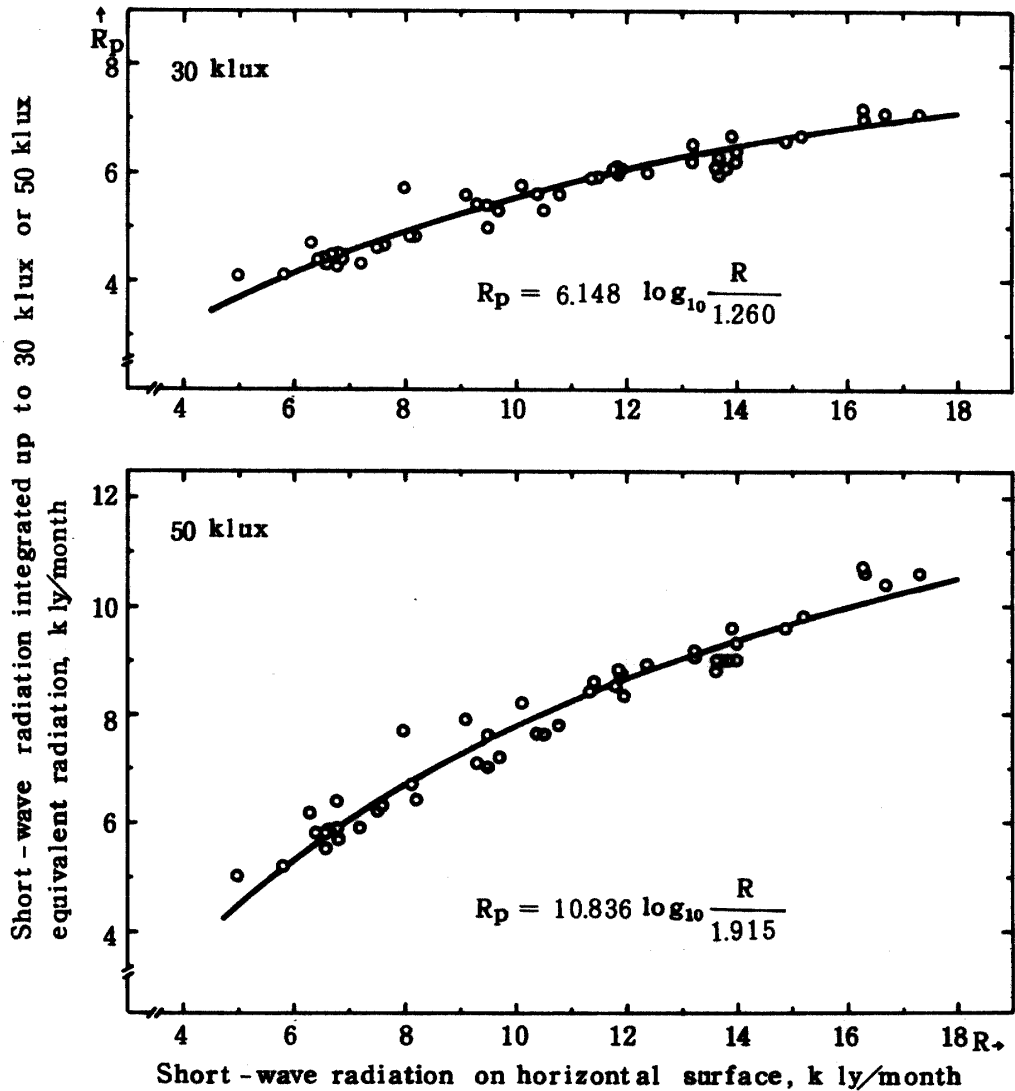


Fig. 26. Relationship between short-wave radiation on horizontal surface and the radiation integrated up to radiation intensity equivalent to 30 klux and 50 klux illumination, Naha

図に見られるように、後者は前者の対数関数として良い近似で次の形で表わし得る。

$$R_p = a \log_{10} \frac{R}{b}$$

ここで、 R_p ：光飽和点相当日射強度までの水平面日射量，k ly/month， R ：水平面日射量，

klx/month; a, b: それぞれ実験常数である。a, bの値は、光飽和点を30kluxとすると沖縄ではそれぞれ6.148及び1.260であり、光飽和点50kluxの場合はそれぞれ10.836及び1.915になる。

上に述べた関係がホノルルと台中でも同様に成り立つと仮定し、表13に示した水平面日射量推算値を利用して、那覇とこの2地点について光合成に直接利用可能とみなされる日射量平均値の割合を推定すると表18のとおりである。

Table 18. Comparison of the expected rate of short-wave radiation on horizontal surface integrated up to the radiation intensity equivalent to 30 k lux and 50 k lux illumination, numerals in the table denote percentage of expected radiation to maximum possible amount for Honolulu.

	(%)											
	30 k lux											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Naha	69	76	78	80	76	83	88	88	91	82	79	67
Taichung	83	84	82	80	82	84	86	87	93	90	90	83
Honolulu	89	95	92	92	89	91	90	93	97	90	89	84

	50 k lux											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Naha	58	64	68	72	69	75	84	82	84	74	69	55
Taichung	72	71	74	72	75	78	80	82	86	83	83	72
Honolulu	79	84	85	85	83	86	85	88	91	84	81	74

表中の数字はホノルルにおける最大可能日射量に対する割合(%)を示す。

光飽和点を30kluxとすれば、ホノルルと台中では各月とも80%以上出現し利用可能日射量は大きい。那覇では80%に達しない。

光飽和点を50kluxとするとき、那覇では11月から翌年5月までほとんどの月が70%以下で1月と12月は60%にも達しない。

本研究では個体株による実験で得られた光飽和点を使って光合成に直接利用可能な日射量を評価した結果、パイナップル畑地で群落をなしている植物体の光飽和点は、恐らく30kluxないし50kluxよりは大きいと考えられる。したがって、沖縄の日射量は、冬、春及び梅雨期には栽培に十分でない年がかなりあると推定される。パイナップルの植え付けから最初の収穫までの期間をハワイにおける長さ²⁰⁾と沖縄とで比較すると、いずれも21か月ないし22か月で差がない。しかし、この期間内の両地の日射量の差は、表13と表18から明らかかなようかなり大きい。果実収穫は沖縄約4ton/10a(新植)ハワイ9ton/10aで差が著しい。この原因には栽培技術、温度環境の差をはじめ多くの理由があるが、日射量の差も一つの原因と考えられる。このように気象環境の不利な点は新品種の育成、導入及び栽培

技術改善などによって補う必要がある。

野瀬らの実験から得られた光飽和点は、葉温を明期、暗期ともにかなり高温に保って得られたものである。このような光飽和点を使った日射量が、月平均気温が約16℃まで下る沖縄の冬に適用できるか否かは一応の疑問が残る。しかし、冬でも日中の気温は20℃以上になる日はかなりあり、また、日中のリンナップルの葉温は気温より高い傾向にある³⁶⁾ので、上に示した冬季における日射量も信頼性があると考えられる。

2. 沖縄におけるリンナップル畑の2,3の熱収支特性

1) 実験方法

沖縄のリンナップル畑の熱収支特性を知るための実験を1972年7月上旬から8月上旬まで行なった。測定は那覇市、琉球大学構内に設置した面積165×150cmのライシメーター内に植え付けたリンナップル株を使って行なった。ライシメーターの周囲には芝生を植えてあった。測定場所は日当たりが良く風通しが良かったが、大学構内であるために畑地の面積は狭く、測定条件は必ずしも十分ではなかった。測定は主に7時から19時までの昼間に行ない、夜間の測定は随時に行なった。

実験期間中のかん水は各旬1回行ない、かん水量は50mmとした。V章で示されるように、このようなかん水を行えば土壌含水量は十分であった。

実験に使用した株はスムースカイエンで、植え付け後15か月～16か月たったものを使った。生育が早かったため結実期の後期に入っており、葉面積指数は4.1～4.3あって土壌面の約85%は葉で覆われていた。

(1) 測定機器の配置状況

図27には鉛直方向の測定機器配置を示す。

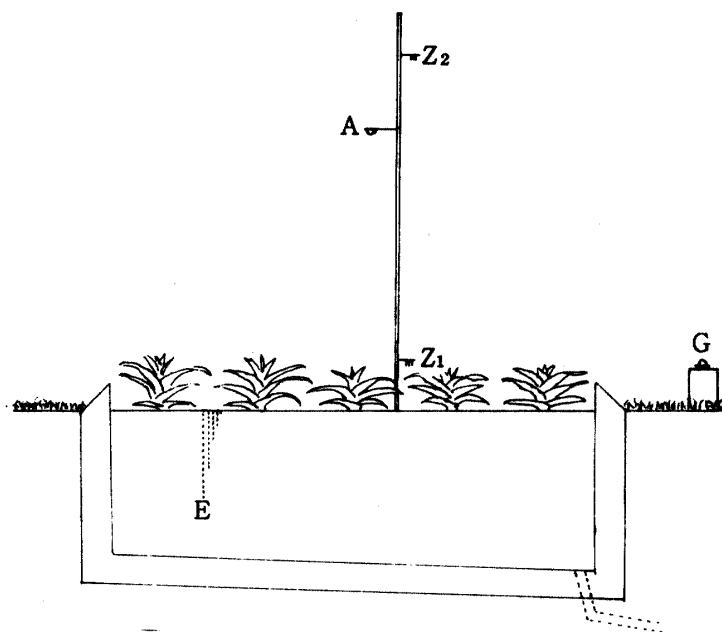


Fig. 27. Vertical instrumentation

- A: Albedometer
- E: Soil thermometers
- G: Gorchynski pyr heliometer
- Z₁ and Z₂: Thermocouples

(2) 気温及び水蒸気圧の測定

i) 気温

気温の測定には直径0.6mmの銅-コンスタンタン熱電対を使った。

ii) 水蒸気圧力

水蒸気圧力を求める湿球は、熱電対の受感部を固形パラフィンで包みガーゼで覆ったものを使用した。この湿球の大きさ及び形を図28に示す。

図29は、熱電対の起電力と標準のガラス水銀温度計による乾湿球の湿度との比較を示す。

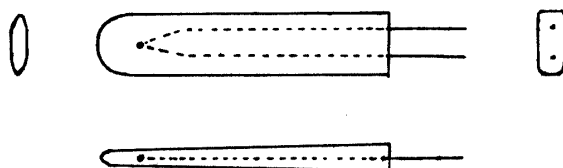


Fig. 28. Thermocouple for vapor pressure measurement, enclosed in molded solid paraffin, full-size

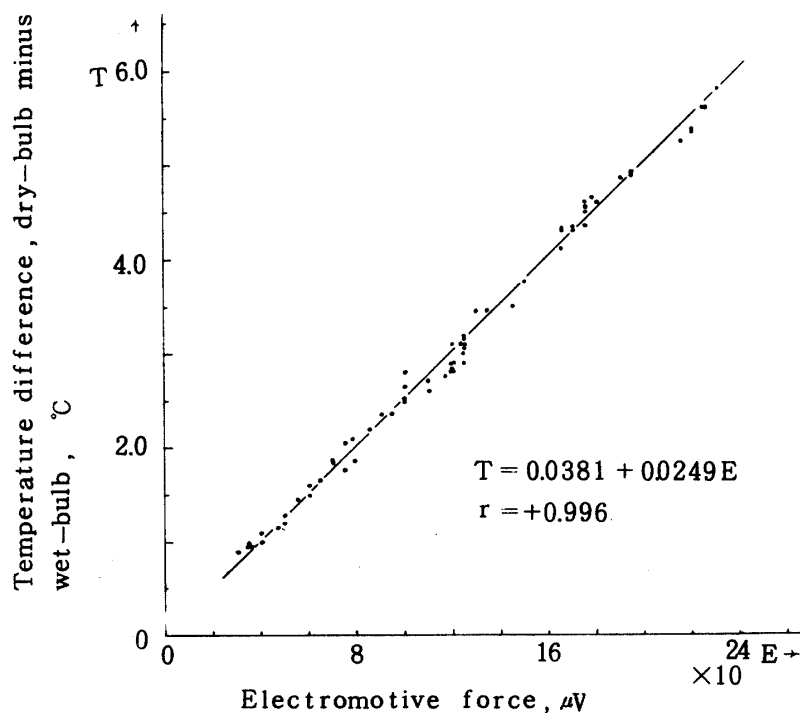


Fig. 29. Result of the test of the thermocouple-made wet-bulb

冷接点用魔法びんの数の都合上、湿球温度の代わり乾球-湿球温度差を測定した。このため乾球-湿球温度差は、乾球と全く同じ太さの銅-コンスタンタン線の一方の接点を高温部とし、湿球を冷接点とする回路を用いた。Photo. 1はこれら各受感部を示す。

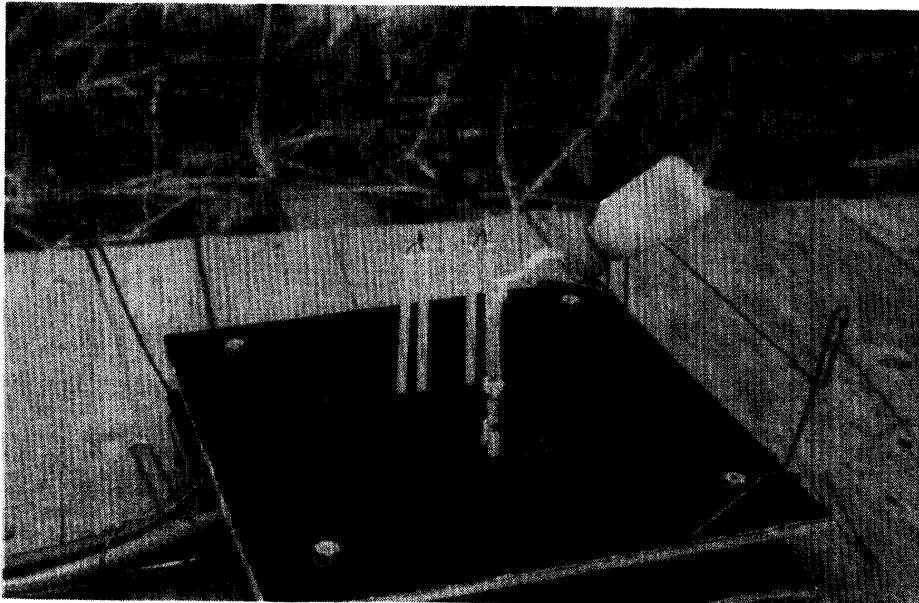


Photo. 1. Assemblage of thermocouples for air temperature and vapor pressure measurement

iii) 記録紙から気温及び湿球温度の求め方

この実験では主な熱収支項の大きさを30分の時間単位で求めた。このため気温及び湿球温度も30分間ごとの平均値を使用した。このような平均値を求めるために、記録紙の読み取りは3.75分ごとに行なった。Berger-Landefeldt²⁾のアルファルファ上での測定によると、昼間の気温及び水蒸気圧力の時間変動は晴天にはかなり大きい。この観測では気温及び乾球-湿球温度差の変動周期は3分ないし4分までのものが認められた。Suomi⁶⁹⁾はSampling frequencyをこの最小周期とほぼ同一ひん度にとれば十分であることを示しており、このため3.75分ごとに記録紙の読み取りをした。

(3) 純放射及び有効放射の測定

全天短波放射の測定はゴルチンスキー日射計を用いた。アルベドはアルベドメーターで測定した。高さによってアルベドに差があるか否かを知るための測定を行ったが、その結果は図30のとおりである。

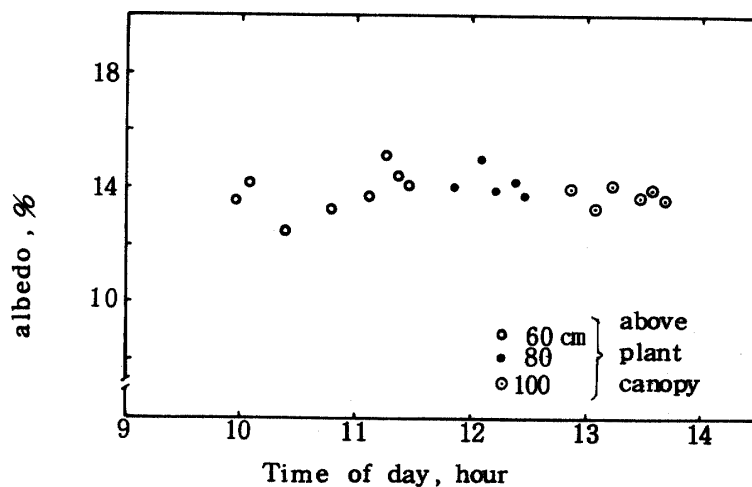


Fig. 30. Values of albedo measured at several heights

高さが草丈面上60cmないし100cmではアルベドの差はほとんど見られない。したがって、この実験では高さは常に80cmに保つことにした。

有効放射は、いわゆる Brunt タイプの式により、Berljandら³⁷⁾が求めた係数を使って計算し、これを雲量により補正した。補正は、Kondratev³⁷⁾が求めた値を使って行なった。これら補正の式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} R_e^* &= \sigma T^4 (0.39 - 0.058\sqrt{e}) \\ R_e &= n' R_e^* \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 R_e^* ：雲がないときの有効放射， R_e ：実際の有効放射， σ ：ステファン・ボルツマン 常数 8.26×10^{-11} ly/min/ $^{\circ}$ K， T ：パインアップルの草丈面上の気温 $^{\circ}$ K， e ：同じく草丈面上の水蒸気圧力 mm-Hg， n' ：雲量に対する補正係数で、値は表19のとおりである。

Table 19. Values of correction coefficient n' in formula (3)

Cloud amount	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n' = (R_e/R_e^*)$	1.00	0.96	0.90	0.84	0.78	0.70	0.61	0.52	0.42	0.30	0.17

以上の結果から純放射は次の式により計算できる。

$$S_0 = (1 - \alpha)(Q + q) - R_e$$

ここで、 S_0 ：純放射， α ：アルベド； Q ， q ：それぞれ太陽及び天空短波放射エネルギーである。

(4) 地中伝熱量の測定

この値は地中温度の時間変動を利用して温度積分法⁷⁴⁾により求めた。地中温度は通常のL型ガラス水銀温度計により、深さ1cm，5cm，10cm，20cm及び30cmにおいて測定した。地中伝熱量の計算にはこれら2点の平均値をとった。地中伝熱量は次の式により求めた。

$$\int_{t_1}^{t_2} B_0 dt = - \sum_{n=1}^m H_n \cdot \overline{C_{v,n}} \cdot \overline{\Delta T_n}$$

ここで、 B_0 ：地中から地表面への地中伝熱量 ly/min； t_1 ， t_2 ：初めと終りの時刻， H_n ：第n番目の土層の厚さcm， $\overline{C_{v,n}}$ ：第n番目の土層の平均体積熱容量 cal/cm³/ $^{\circ}$ C， $\overline{\Delta T_n}$ ：第n番目の土層における時刻 $t_1 - t_2$ 間の地温変化量平均値 $^{\circ}$ C， m ：1日周期で温度変化の認められる深さまでの土層の数である。

体積熱容量 C_v は次の Chudonovsky の式⁷⁴⁾により求めた。

$$C_v = 0.2 \rho_v + \frac{W_v}{100} \left(\frac{\text{cal}}{\text{cm}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}} \right)$$

ここで、 ρ_v ：土壌の仮比重， W_v ：土壌の容積水分含量(%)である。 C_v は毎日1回、深さ10cmまでの土層の ρ_v ， W_v を測定して求め、平均値として $0.475 \text{ cal/cm}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ を得た。実験期間中のかん水は常に十分であったので C_v の変動は小さく、また、パインアップル植被下の地温日変化も、図34に示されるように小さい。したがって、深さ10cmより深い所の熱の移動は小さく、 C_v の値は上記の平均値を使って全土柱の計算を行なった。表20には C_v の計算例と計算結果を示す。

表21は温度積分法による地中伝熱量の計算例を示す。

2) 実験結果及び考察

(1) 純放射

表 22 には純放射の測定結果を示す。測定を行なった日は晴天が多かったが、表に見られるとおり、純放射は日によりかなり差があった。しかし、全測定日合計量は太陽南中時の前後が最大で、太陽高度が低くなるにつれて小さくなっている。

(2) アルベド

実験期間中のパインアップルは結実期の後期に当たり、葉面積指数は 4.1 ~ 4.3 で、土壌面の約 85% は葉で覆われていた。この条件下で測定したアルベドの経時変動を図 31 に示す。

図には測定日全部についての平均と、晴れ及び曇りの日の例を示す。図によるとアルベドの経時変動は小さく、日射量の絶対値の小さい日の出及び日の入りのところを除いて約 15% を示している。これはアルベドが、太陽高度が低いときに大きく南中時のところに最小になる他の作物例³¹⁾に比べてかなりの差がある。

Table 20. Example of the computation of volume heat capacity C_v , and its value for each day

Example of computation of C_v :

July 14, 1972					
Sample No.	Weight of container (g)	Moist weight (g)	Dry weight (g)	Weight of soil W_s (g)	Weight of water W_w (g)
1	55.11	187.00	159.13	104.02	27.87
2	58.33	187.00	160.69	102.36	26.31

Sample No.	Dry density τ_d (g/cc)	Apparent specific gravity $\rho_v = \tau_d / \tau_w$	Volume water content $W_v = \rho_v \left(\frac{W_w}{W_s} \right)$ (%)	Volume heat capacity $C_v = 0.2\rho_v + \frac{W_v}{100}$ (cal/cc,°C)
1	1.0402	1.0402	27.87	0.4867
2	1.0236	1.0236	26.31	0.4678
				Mean: 0.477

C_v for each day:

Date	July, 1972			Aug.			Mean
	8	13	14	3	7	11	
C_v (cal/cc/°C)	0.485	0.477	0.477	0.471	0.471	0.470	0.475
Number of days after irrigation	5	10	1	1	5	9	-

Table 21. Example of the computation of heat conduction into soil

Initial time	t_1		7:00				
Final time	t_2		9:00				
Number of soil layer			1	2	3	4	5
Depth of thermometer		cm	1	5	10	20	30
Range of each layer and thickness	H	cm	0-3 3	3-7 4	7-15 8	15-25 10	25-30 5
Mean temperature of each layer at t_1		°C	26.30	26.35	26.40	26.80	27.35
Mean temperature of each layer at t_2		°C	27.15	26.70	26.40	26.70	27.25
Difference of mean temperature between t_1 and t_2	$\overline{\Delta T}$	°C	-0.85	-0.35	± 0.00	+0.10	+0.10
Heat capacity of each layer	$H \cdot C_v$	ly	1.425	1.900	3.800	4.750	2.375
Heat storage of each layer	$H \cdot C_v \cdot \overline{\Delta T}$	$\frac{\text{ly}}{2 \text{ hours}}$	-1.211	-0.665	± 0.000	+0.475	+0.238
Net heat storage of whole layers		$\frac{\text{ly}}{2 \text{ hours}}$	-1.163				
Net heat storage of whole layers		$\frac{\text{ly}}{\text{min}}$	-0.01				

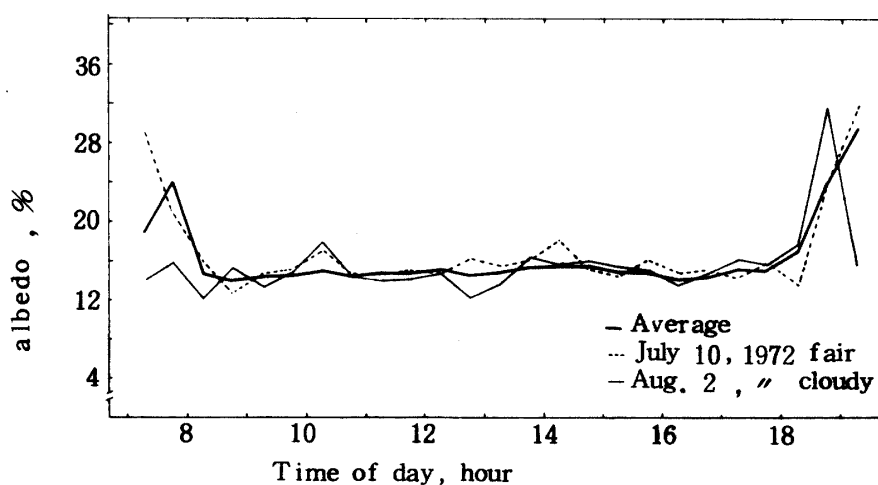


Fig. 31. Variation with time of the albedo of pineapple canopy

Table 22. Net radiation in the daytime (ly/min)

Time	July, 1972								Aug,	Mean
	3	4	5	8	10	11	18	19	2	
7:00- 7:30	0.03	0.09	0.06	0.04	0.01	0.00	0.03	0.08	0.07	0.05
7:30- 8:00	0.04	0.12	0.12	0.11	0.09	0.02	0.10	0.12	0.12	0.09
8:00- 8:30	0.44	0.17	0.18	0.32	0.35	0.26	0.16	0.21	0.30	0.27
8:30- 9:00	0.59	0.23	0.34	0.66	0.53	0.37	0.16	0.46	0.19	0.39
9:00- 9:30	0.48	0.25	0.27	0.69	0.60	0.81	0.53	0.48	0.21	0.48
9:30- 10:00	0.62	0.35	0.36	0.40	0.55	0.64	0.33	0.66	0.17	0.45
10:00- 10:30	0.66	0.45	0.44	0.45	0.75	0.75	0.34	0.77	0.11	0.52
10:30- 11:00	0.51	0.66	0.59	0.63	0.82	0.77	0.46	0.83	0.19	0.61
11:00- 11:30	0.80	0.78	0.74	0.72	0.73	0.82	0.66	0.70	0.21	0.68
11:30- 12:00	0.48	0.95	0.41	0.76	0.83	0.67	0.86	0.83	0.44	0.69
12:00- 12:30	0.89	0.68	0.69	0.95	0.69	0.51	0.78	0.70	0.25	0.68
12:30- 13:00	1.09	0.93	0.80	0.95	0.86	1.16	0.87	0.65	0.68	0.89
13:00- 13:30	1.09	0.67	0.61	0.97	0.89	1.00	0.52	0.73	0.86	0.82
13:30- 14:00	1.01	0.50	0.47	0.94	0.48	0.83	0.68	0.71	0.58	0.69
14:00- 14:30	1.04	0.73	0.61	0.87	0.24	0.47	0.70	0.64	0.51	0.65
14:30- 15:00	0.97	0.46	0.52	0.66	0.52	0.55	0.68	0.56	0.37	0.59
15:00- 15:30	0.77	0.35	0.42	0.66	0.38	0.54	0.60	0.71	0.34	0.53
15:30- 16:00	0.63	0.38	0.26	0.60	0.25	0.59	0.70	0.51	0.21	0.46
16:00- 16:30	0.47	0.17	0.38	0.55	0.29	0.27	0.30	0.30	0.19	0.32
16:30- 17:00	0.40	0.30	0.09	0.38	0.41	0.34	0.22	0.19	0.15	0.28
17:00- 17:30	0.13	0.20	0.09	0.13	0.25	0.30	0.13	0.16	0.12	0.17
17:30- 18:00	0.09	0.10	0.07	0.04	0.06	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07
18:00- 18:30	0.04	0.05	0.04	0.01	0.01	0.06	0.06	0.01	0.01	0.03
18:30- 19:00	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	0.00	-0.05	0.02	-0.01	-0.02	-0.01
Total:										
(ly/min)	13.25	9.56	8.54	12.47	10.59	11.76	9.96	11.07	6.32	10.39
(ly/daytime)	397.5	286.8	256.2	374.1	317.7	352.8	298.8	332.1	189.6	311.7

(3) ボーエン比

図 32 は実験期間を通して 30 分おきに求めたボーエン比の時刻別の傾向を示す。

図に見られるようにボーエン比はパインアップル植被上では変動の大きい量である。しかし、朝夕は変動が小さく、また値も小さい。朝夕及び夜間にはボーエン比が負になることがあったが、これは主に気温の逆転のためであった。

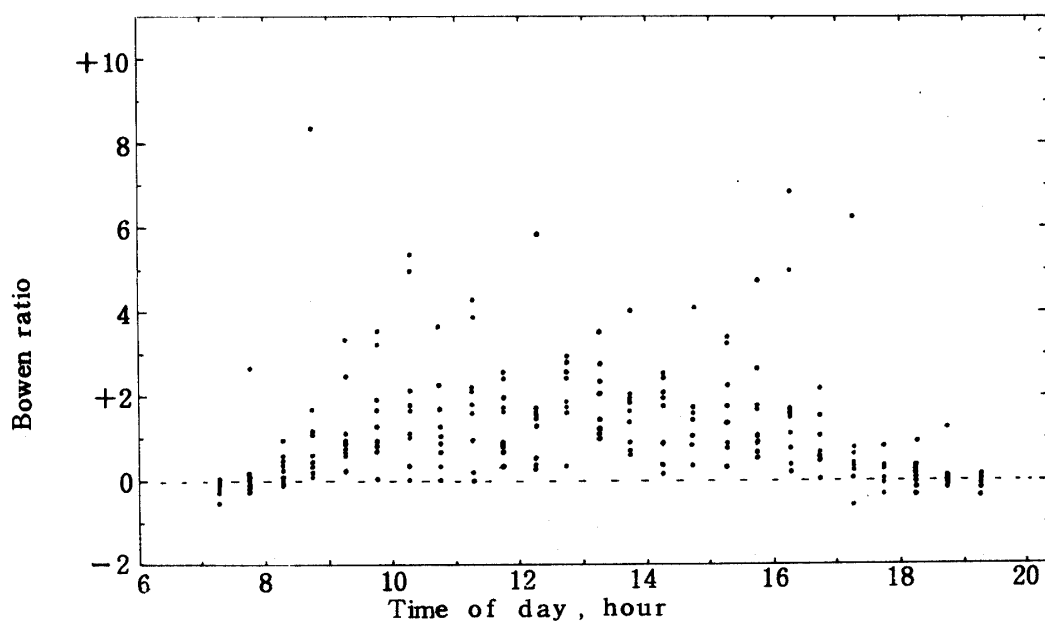


Fig. 32. Variation with time of Bowen ratio above pineapple canopy

パイナップル畑における日中のボーエン比は大きく、測定値の大部分は+1.0以上である。このような値は裸地面¹⁶⁾や水田³⁷⁾と比べてかなり大きい値である。パイナップル畑では土壤含水量が十分であっても、草丈面上の気層でのボーエン比はあたかも乾燥した裸地上におけるようになっていると推察される。

(4) 有効放射

表23には有効放射の測定結果を示す。

この表によると、晴れの日には昼間の有効放射は約40 ly/daytimeである。表中の各値は純放射の大きさと比べると小さい。

図33は夜間の有効放射量(夜間の純放射)と地中伝熱量の測定例で、雲量1~2以下の場合である。

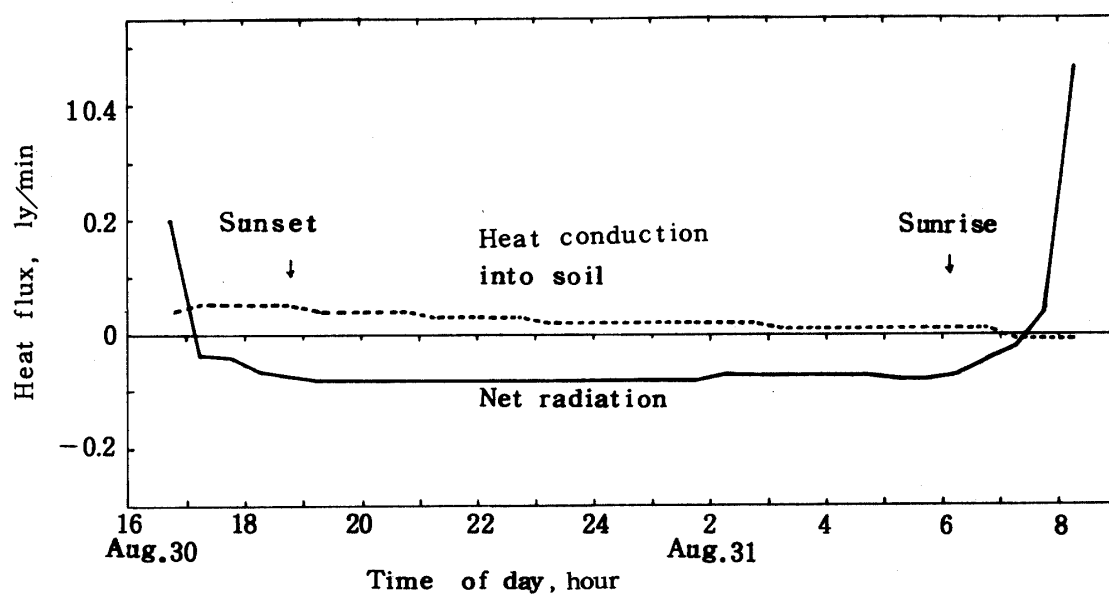


Fig. 33. Example of heat balance term measurement at night

Table 23. Effective long-wave radiation in the daytime (ly/min)

Time	July, 1972								Aug.	Mean
	3	4	5	8	10	11	18	19	2	
7:00- 7:30	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
7:30- 8:00	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
8:00- 8:30	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
8:30- 9:00	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
9:00- 9:30	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
9:30-10:00	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
10:00-10:30	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
10:30-11:00	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
11:00-11:30	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
11:30-12:00	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
12:00-12:30	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
12:30-13:00	0.06	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05
13:00-13:30	0.06	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05
13:30-14:00	0.07	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.03	0.04	0.03	0.05
14:00-14:30	0.07	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
14:30-15:00	0.07	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
15:00-15:30	0.07	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
15:30-16:00	0.07	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
16:00-16:30	0.06	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
16:30-17:00	0.06	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
17:00-17:30	0.06	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
17:30-18:00	0.06	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
18:00-18:30	0.06	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
18:30-19:00	0.06	0.04	0.04	0.04	0.02	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04
Total:										
(ly/daytime)	38.1	28.8	27.9	34.8	25.2	36.3	22.2	28.8	21.6	29.3

この例の有効放射は、沖縄の夏の夜間の値としては大きいほうで、また、地中伝熱量も植被下の値としては大きいほうであったと見てよい。このような条件にもかかわらず、夜間の有効放射は約0.08 ly/min (約43 ly/night), 地中伝熱量は約0.04 ly/min (約20 ly/night) 以下の値を示した。

(5) 地中伝熱量

図34には深さ10cmにおける裸地とパイナップル植被下の地温変動例を示す。

この図によるとパインアップル植被下では地温の変動が小さい。これは植被下の地中伝熱量もかなり小さいことを示す。表 24 には昼間の地中伝熱量の測定結果を示す。

この実験では地温の測定場所が畝の方向や太陽の動きに対して対象でなかったため、午後の地中伝熱量は実際よりもわずかに小さく計算されたものと考えられる。しかし、これを考慮に入れても表 24 の値はかなり小さい。

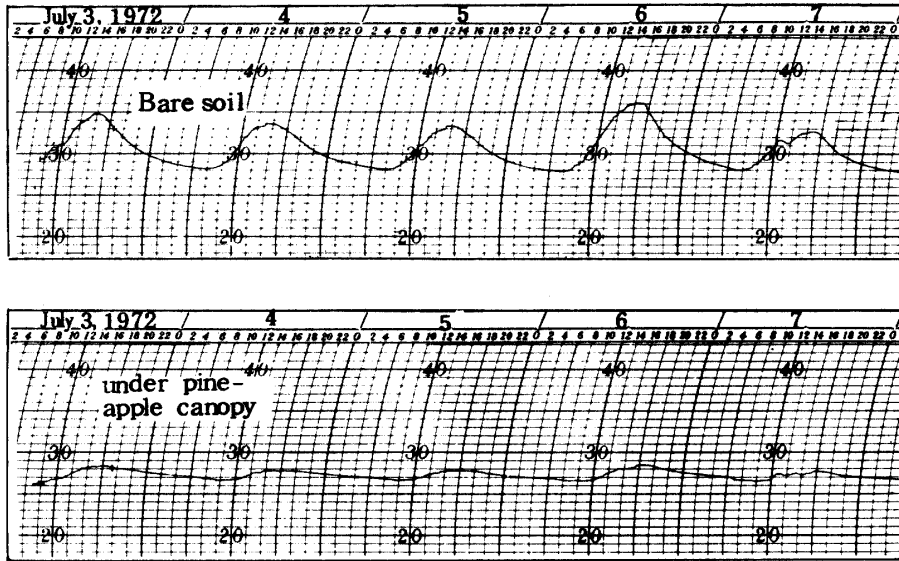


Fig. 34. Example of the variation with time of soil temperature (°C) at depth 10 cm for bare soil and soil under pineapple canopy

Table 24. Heat conduction into soil in the daytime (ly/min)

Time	July, 1972								Aug. 2	Me
	3	4	5	8	10	11	18	19		
7:00- 9:00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	-0.01	±0.00	-0.03	-0.03	-0.01	-0.02
9:00-11:00	-0.05	-0.05	-0.05	-0.06	-0.04	-0.08	-0.04	-0.10	±0.00	-0.05
11:00-13:00	-0.10	-0.08	-0.07	-0.07	-0.06	-0.05	-0.09	-0.07	-0.03	-0.07
13:00-15:00	-0.07	-0.01	-0.03	-0.05	±0.00	-0.03	-0.06	-0.04	-0.04	-0.04
15:00-17:00	+0.05	+0.03	+0.03	+0.03	+0.02	+0.04	+0.02	+0.02	+0.01	+0.03
17:00-19:00	+0.03	+0.03	+0.03	+0.06	+0.04	+0.04	+0.05	+0.06	+0.03	+0.04
Total (ly/daytime)	-18.0	-10.8	-12.0	-14.4	-6.0	-9.6	-18.0	-19.2	-4.8	-12.5

(6) 各熱収支項の大きさの比較

比較のために、表 25 は測定期間における昼間の熱収支項の大きさを示す。

Table 25. Values of some heat balance terms (ly/daytime) in the daytime and albedo

Heat balance term	Notation	July, 1972							Aug.		Mean
		3	4	5	8	10	11	18	19	2	
Incoming short-wave radiation	$Q+q$	512.4	369.6	334.5	482.7	405.3	459.3	376.8	420.9	248.2	401.1
Net incoming short-wave radiation	$(1-\alpha) \times (Q+q)$	436.2	315.9	284.7	409.5	342.9	390.6	321.0	361.2	211.8	341.5
Reflected short-wave radiation	$\alpha(Q+q)$	76.2	53.7	49.8	73.2	62.4	68.7	55.8	59.7	36.4	59.5
Albedo	α	0.149	0.145	0.149	0.152	0.154	0.150	0.148	0.142	0.147	0.148
Effective long-wave radiation	R_e	38.1	28.8	27.9	34.8	25.2	36.3	22.2	28.8	21.6	29.3
Net radiation for all wave-lengths	S_0	397.5	286.8	256.2	374.1	317.7	352.8	298.8	332.1	189.6	311.7
Heat conduction into soil	B_0	18.0	10.8	12.0	14.4	6.0	9.6	18.0	19.2	4.8	12.5

(7) 考察

この実験から得られたパインアップル植被のアルベドは約15%で、これは他の作物に比較して小さい³¹⁾。その上パインアップルの蒸発散量(V章)もイネ³⁹⁾やサトウキビ⁵⁾などに比べて小さい。これらはパインアップル畑地の昼間の顕熱伝達量がかなり大きいことを示すものである。Noffsinger³⁵⁾は、パインアップルの葉温は昼間には気温より平均1.5℃~3.5℃高く、直射日光の下では7.6℃高いときがあったが、パパイヤの葉温は常に気温より低かった旨報告している。これもパインアップルの植被上では顕熱伝達が盛んであることを示す。

3. 日射量及び熱収支特性についての要約

水平面日射量平均値を日照率累年平均値と平均雲量から推算した資料と、野瀬らが実験から得たパインアップルの光飽和点の資料とに基づいて解析した結果、沖縄の日射量について次の事が明らかになった。

- (1) 沖縄周辺の極東における水平面日射量推算値の地理的分布は図24に示すとおりである。
- (2) 沖縄の年間日射量推算値は130.5k lyでわが国最大であるが春と冬の日射量は九州地方とほぼ同程度で緯度が低い割に小さい。春、梅雨期及び冬の各月の日射量は年による変動が大きく、毎年安定した量が得難い。
- (3) 沖縄の日射量を世界の主なパインアップル栽培地における値と比較するとかなり小さい。
- (4) 水平面日射量の全量Rとパインアップルの光飽和点に相当する日射強度まで積算した水平面日射量 R_p との間には、月合計では次の形で表わし得る関係が認められる。

$$R_p = a \log_p \frac{R}{b}$$

ここで、a、bは光飽和点で決まる実験常数である。

(5) 前項の式を利用し、パインアップルの光飽和点を30kluxまたは50kluxとして、沖縄、台湾及びハワイの各地について光合成に直接利用可能な日射量の割合を求めると表18のとおりである。沖縄は、春と冬は日射量の得られる割合が小さく、台湾やハワイに及ばない。

以上の事から、スムースカイエンが主に栽培されている沖縄では新しい品種の導入、育成及び栽培技術改善などによって日射量の不十分さを補う必要があると考えられる。

次に沖縄のパインアップル畑の熱収支に関する2、3の測定実験結果から次の事が明らかになった。

- (1) パインアップル植被上の日中のアルベドは0.15程度で、日の出及び日の入りのころを除いてはほぼ一様である。
- (2) 沖縄における夏季のパインアップル植被上の有効放射は、晴天時には昼間夜間ともに合計量はそれぞれ約40lyになっている。
- (3) 十分に生長したパインアップル植被下の地中伝熱量は昼間夜間ともに合計量はそれぞれ20ly以下になっている。

V 沖縄におけるパインアップル畑の蒸発散量

パインアップルは葉の組織の中に貯水層を持ち²⁵⁾、耐干性が強い。しかし、土壌含水量が十分でない
と栄養生長が遅れ、渇水の起こる時期によっては果実も小さくなる。これは、パインアップルも生育の
ためには適度の水分が必要であることを示すものである。沖縄は年降水量は多いが時には長期間渇水が
続くことがある。このため気象環境と、気候学的な水収支とに関連して、パインアップルの蒸発散量の
年間の推移を知る必要がある。

パインアップルの水分消費についての研究は必ずしも多くはない。蒸散量についてはSiderisら⁶⁵⁾
の研究、蒸発散量についてはEkern^{7,8)}の研究が主なもので、これらはいずれもハワイで行なわれた
ものである。しかし、これらの研究では蒸発散量と気象要素との関係や植物体の生育段階との関係を十
分解明したとは言い難い。

筆者は沖縄におけるパインアップルの蒸散量と畑地からの蒸発散量の測定実験をかなり長期間にわた
って行ない、これらの問題の解明を試みた。

1. 蒸散量、及びそれと気象要素との関係

1) 蒸散量の年間推移

(1) 実験方法

蒸散量の測定は琉球大学構内で行ない、供試品種はスムースカイエンを用いた。

i) 水収支法による測定

苗は図35に示すように、ポットを用いて砂栽培した。砂は沖縄北部源河川から採取した川砂で、粒
度は粒径0.25mm以下6%、0.25mm~2.0mm70%、2.0mm以上24%になっている。土壌面蒸発を除く
ために、ポットの上縁を図のように板で密封し、かん水は一定量の水を一定の日数ごとに与えた。かん
水後重力水として浸透した水を排水口から取り出して量を測定し、かん水量との差を蒸散量とした。

ポット内の地温を自然の値に近づけるために、ポットの上縁まで地中に埋めた。供試試料栽培状況を
Photo. 2に示す。

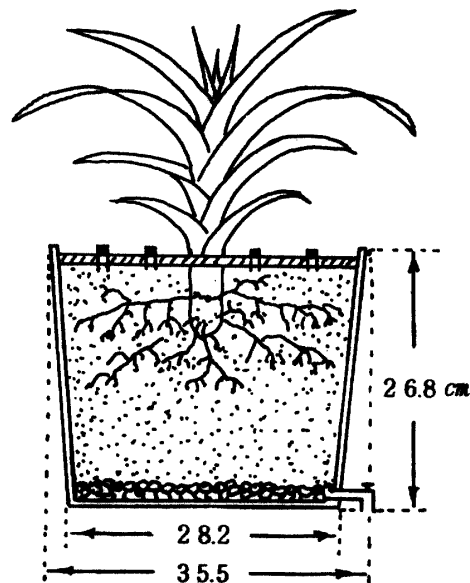


Fig. 35. Sketch of a plant for transpiration measurement by water balance method



Photo. 2. Plants in the field for transpiration measurement by water balance method

この実験では次のようにポットごとにかん水の間隔を変えた。

ポット	No.1	毎日1回
	No.2	3日に1回
	No.3	3日に1回
	No.4	5日に1回

施肥は液体肥料で2か月に1回行なったが、ポットNo.1には毎月1回行なった。

ii) 重量法による測定

ポットの蒸散量を台ばかりにより重量の差で測定する方法である。ポットは上縁の直径27.5cm, 底の直径23.0cm, 深さ24.0cmのものを使用した。かん水は2日に1回行なった。測定回数は1日2回, 8時30分と18時に行ない, この間の減少量をもってその間の蒸散量とした。ポット内の温度を自然の状態に近づけるために, Photo. 3に示すようにポットを地中に埋め込んだ木わくの中に置いた。

(2) 測定結果及び考察

i) 水収支法による測定結果

図36a及び図36bには測定した蒸散量の推移を示す。

これらの図にはかん水間隔の異なる4個のポットのうちで蒸散量が最大のポットNo.2(3日に1回かん水)の値を示す。他のポットも推移はほぼ同じ傾向をたどった。

図36によると, 栄養生長期の蒸散量は7月後半-10月の暖候期に大きく, 冬-春は小さい。1970年3月-4月と翌1971年2月-3月を比べると, 同じ季節であるが1971年のほうが蒸散量は大きい。これは生長によって植物体の葉面積に差があるためである。



Photo. 3. Plants in the field for transpiration measurement by weighing method

表 26 には図 36 の資料を整理したものを示す。この表で下限値は 4 個のポット中蒸散量最小のもので、上限値は図 36 に示した値である。

表 26 及び図 36 によると、蒸散量の最大値は苗を植え付けた翌年の夏に現われており、 1.0 mm/day でかなり小さい値である。この値は、沖縄における畑地からの蒸散量の最大可能値に近いと思われる。その理由は、沖縄では栄養生長が完了するのは秋から冬であるが、そのころはすでに気温も低く日射量も小さいからである。

図 37 には栄養生長期以後の蒸散量と気温の関係を示す。

図は表 26 の資料で描いたもので、蒸散量は各月とも単位葉面積 (1.0 m^2) 当たりの値である。

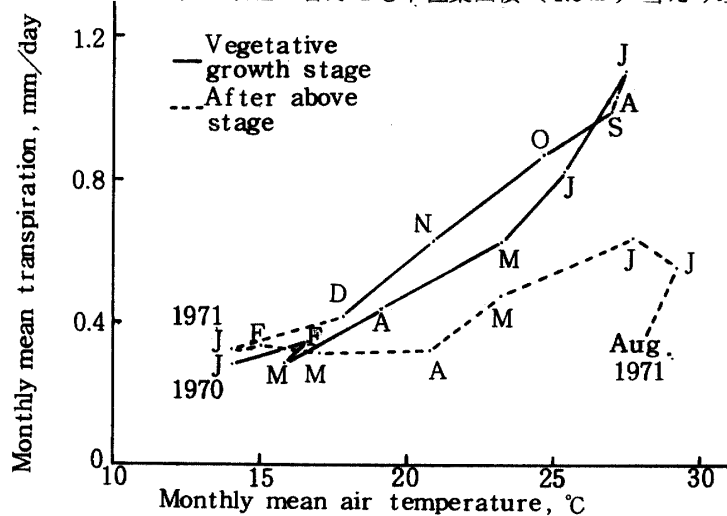


Fig. 37. Relationship between the transpiration and air temperature in vegetative growth stage and afterwards

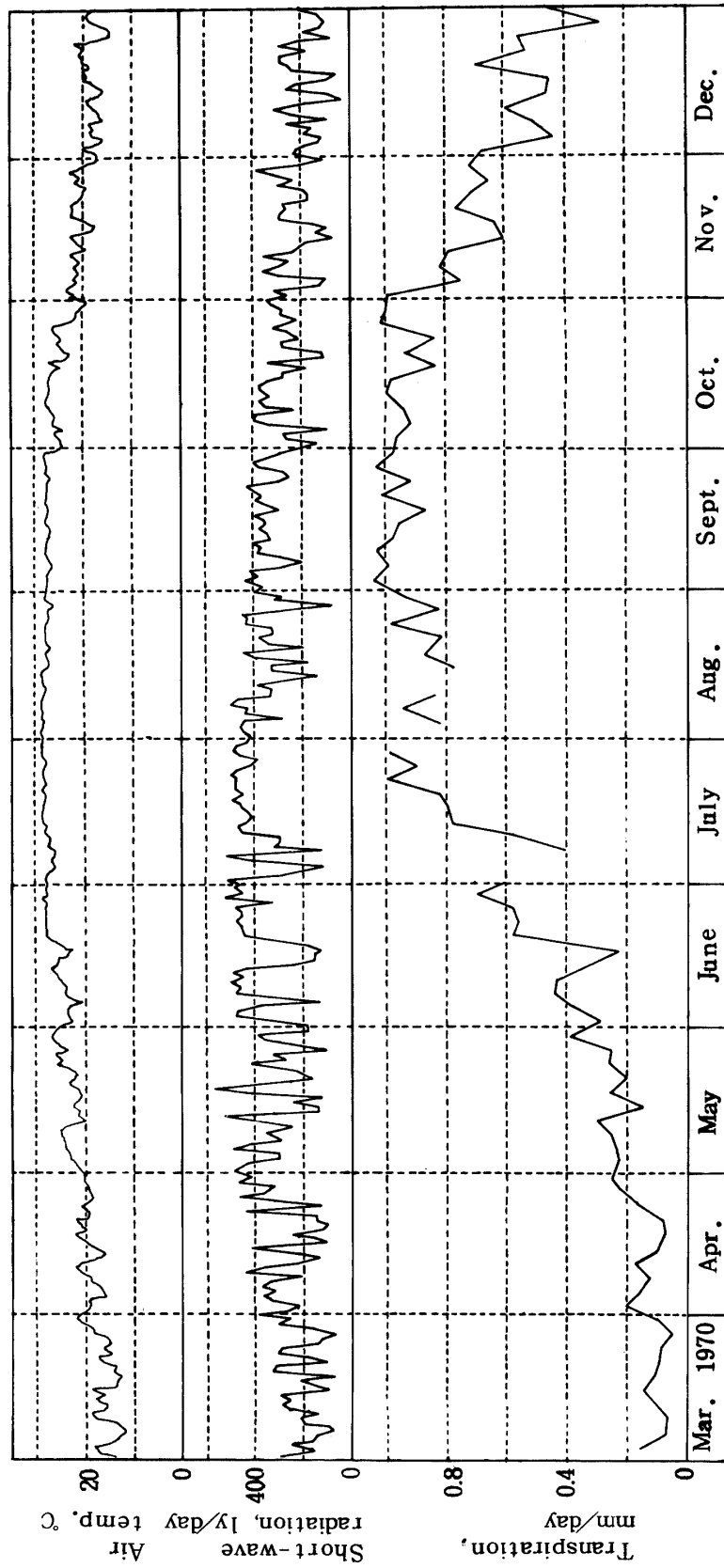


Fig. 36a. Month to month march of the transpiration and meteorological elements
The plant for measurement was planted in Sept. 1969, Naha

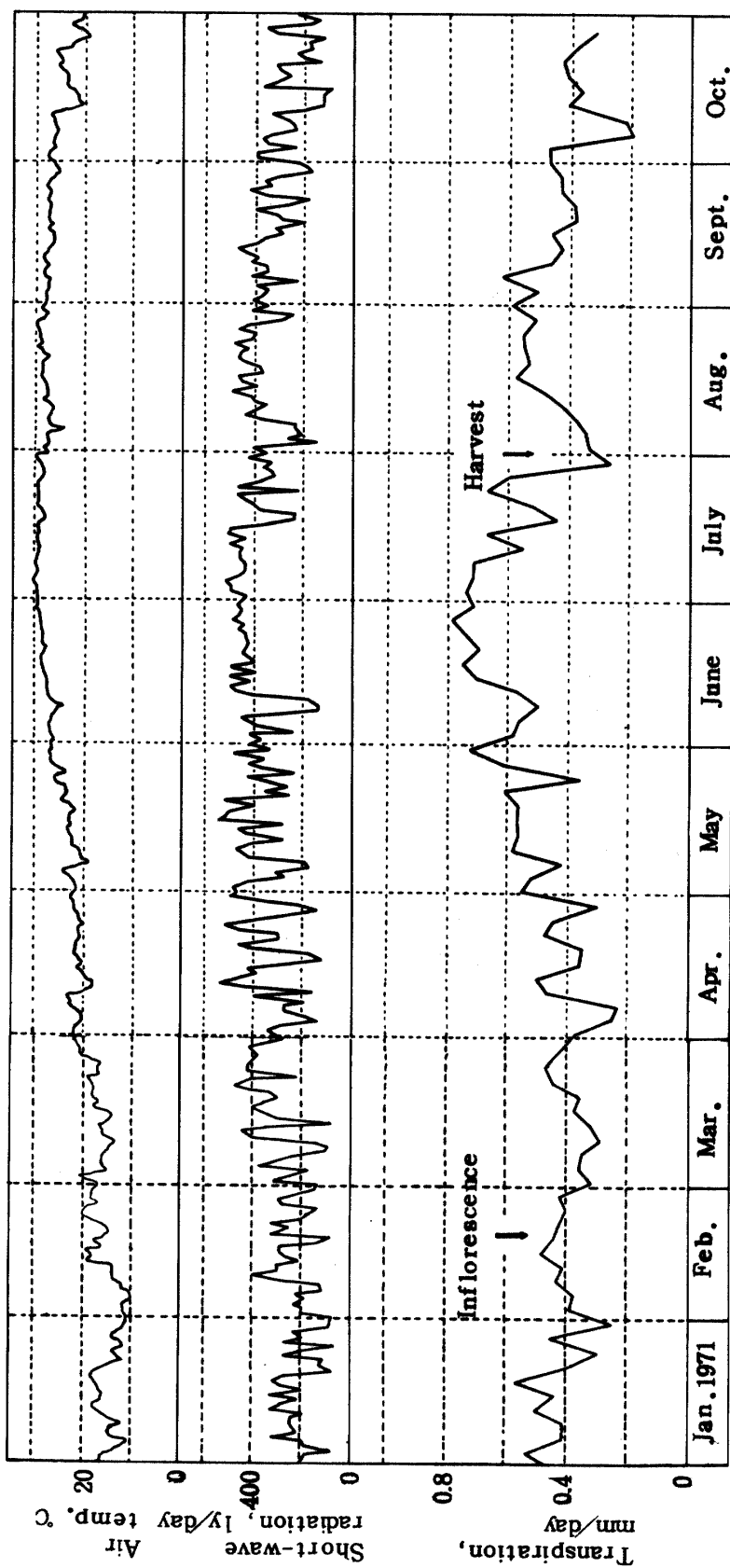


Fig. 36b. Continued from Fig. 36a
Month to month march of the transpiration and meteorological elements

Table 26. Transpiration and meteorological elements. The plants for measurement were planted in Sept. 1969 Naha

Month	Monthly mean of transpiration (mm/day)	Monthly mean of daily mean air temperature (°C)	Monthly mean of short-wave radiation on horizontal surface ($\frac{ly}{day}$)	Monthly mean of soil temperature at depth 10 cm at 09:00 (°C)	Remarks
1970					
January	(0.06-0.10)	14.0	—	(13.8)	
February	0.09-0.12	16.6	—	15.5	
March	0.06-0.10	15.8	198	15.5	
April	0.10-0.15	19.1	282	19.6	
May	0.17-0.25	23.2	309	23.1	
June	0.30-0.45	25.4	382	26.4	
July	0.56-0.76	27.5	399	27.8	
August	0.56-0.87	27.2	343	27.6	
September	0.67-0.98	27.0	340	27.0	
October	0.65-0.95	24.7	263	24.4	
November	0.45-0.75	20.9	224	19.8	
December	0.52	17.8	176	17.1	
1971					
January	0.43	14.0	198	13.5	
February	0.43	15.0	219	14.0	Inflo-
March	0.38	17.0	308	15.9	rescence
April	0.38	20.7	318	20.4	
May	0.54	23.2	374	22.9	
June	0.69	27.7	396	27.8	
July	0.63	29.2	406	29.0	Harvest
August	0.44	28.0	373	27.6	
September	0.48	27.2	328	26.9	
October	0.38	23.9	243	23.9	

図 37 によると、栄養生長期の蒸散量は気温の昇降に従って増減する傾向がある。これら両者の相関係数は+0.97 である。これは相関に関する t 分布検定で、有意水準を 0.05 とするとき有意であり、沖縄の気象環境条件下では両者の間に高い相関があることを示す。

一方、図 37 によると出蕾期以後の蒸散量は著しく低下する。このような蒸散量低下の傾向は、生長過程の違った 1970 年と 1971 年 (図 36a, 図 36b) の二つの夏の蒸散量の相違にも表われている。これは恐らく、出蕾期以後は蒸散量が減少するためであると推察される。

図 38 には蒸散量と水平面日射量の関係を示す。

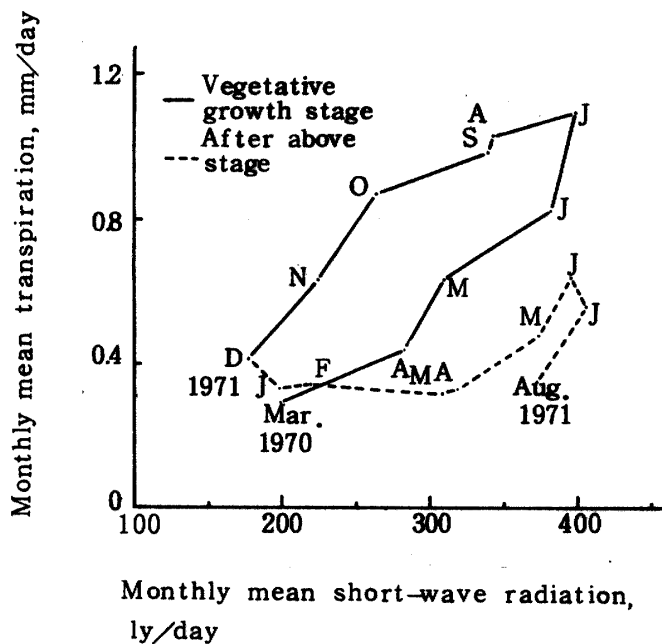


Fig. 38. Relationship between the transpiration and short-wave radiation on horizontal surface in vegetative growth stage and afterwards

この図によると、栄養生長期の蒸散量は、また、水平面日射量に従って増減する。これら両者の間の相関係数は+0.84 である。これは統計的有意性が認められるが、蒸散量と気温の相関係数より小さい。この点から見ると、沖縄の気象環境条件下では、栄養生長期の蒸散量は水平面日射量よりむしろ気温との相関が大きい。その主な理由は次の四つが考えられる。すなわち、後に述べるように、パインアップルの蒸散量は気温が 15°C ~ 30°C の範囲では気温が高いほど大きい。更に、気候資料によると、沖縄では秋、冬及び初春は大気中の飽差は気温が高いほど大きい傾向にあり、また、春から初春までは飽差はほとんど一定である。一方、パインアップルの葉は茎から空間に向かって斜め上方に伸びているために、太陽高度が高いときの強い日射は減殺されて入射する。更に気孔の開閉と日照との関係がそれほど大きくないことも考えられる。

ii) 重量法による測定結果

水収支法では短時間の蒸散量測定が困難であるので、昼間と夜間の蒸散量を別々に知るために重量法を用いた。結果を図 39 に示す。

この図から昼間の蒸散量を見ると、9月-10月は他の月より大きい。11月-翌年2月は小さくなっ

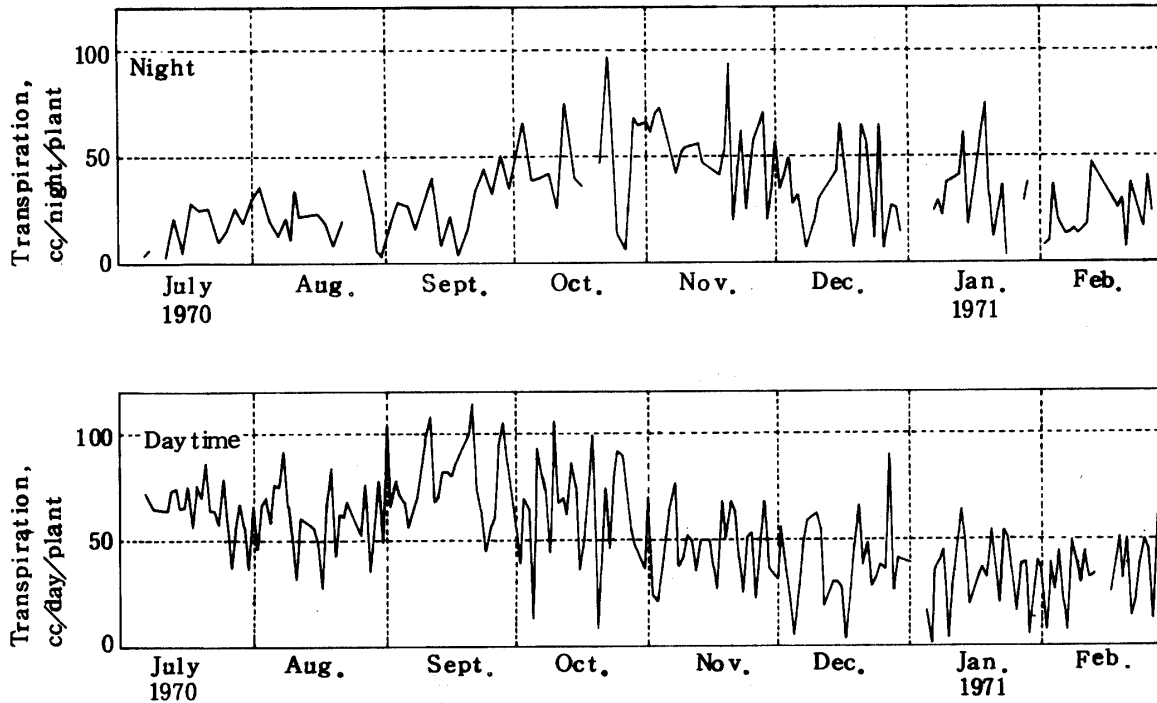


Fig. 39. Month to month march of nocturnal and diurnal transpiration. The plant for measurement was planted in Apr. 1970

ているが、これは主に気温の降下や日射量の減少によるものである。7月-8月に蒸散量が小さいのは、植え付け後日が浅く葉面積が小さかったためである。

夜間の蒸散量を見ると、7月-9月前半は小さいが10月-11月は大きい。12月以降の変動は複雑であるが、夜間にもかなりの値を示す時がある。夜間変動を詳しく見るために資料を整理した結果を表27に示す。

Table 27. Nocturnal and diurnal transpiration. The plant was planted in Apr. 1970 (cc/plant)

	1970						1971
	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan. and Feb.
Daytime	62.0	61.7	77.4	65.0	53.5	40.0	29.9
Night	14.1	20.2	26.6	50.0	47.5	28.6	22.3
Ratio: Night Daytime	0.23	0.33	0.34	0.77	0.89	0.72	0.75

この表によると、10月以降は夜間蒸散量比率の増加が見られる。

一般に植物の蒸散量は昼間は大きく夜間は小さい。それは、日中は通常気温が高く光が強く、また、風もある上に気孔もよく開くためであって、水さえ十分に与えられると蒸散量は日中に最大となる²⁴⁾。しかし、サボテンのように気孔が夜開くものでは蒸散量は夜間に最大を示すといわれている。リンナップの蒸散量が夜間になりに大きくなることは注目に値する。

今度の測定で夜間蒸散量が10月と11月に大きかった一つの原因として、これらの月に夜間湿度が小さかったことが考えられる。図40はこのころの夜間平均湿度の推移を示す。図によると7月と8月は夜間湿度が高かったが、10月初めから下りだしている。

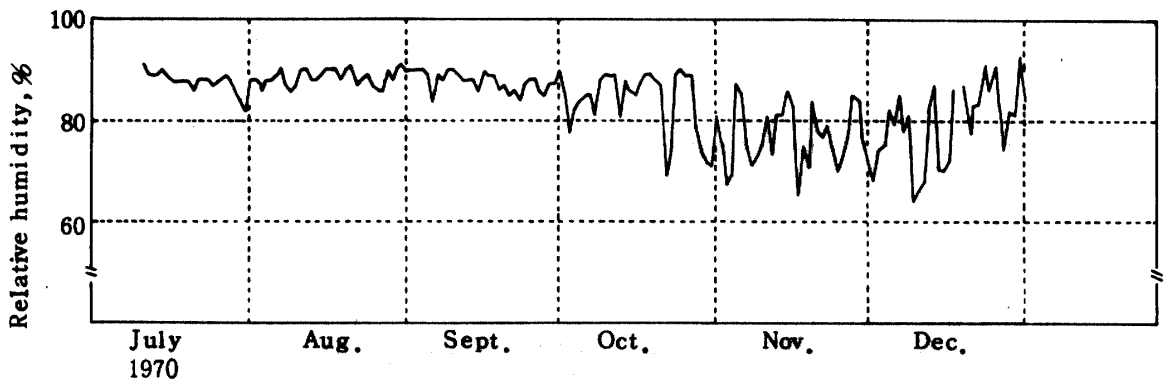


Fig. 40. Month to month march of relative humidity at night

2) 蒸散量と気象要素との関係の実験的研究⁶⁰⁾

(1) 実験方法

実験は九州大学ファイトロンで1971年8月と9月に行なった。この時期には供試体は栄養生長期の中期の初めごろに当たっていた。

供試体はスムースカイエンのえい芽をポットに1本ずつ砂栽培したものを使った。苗は1971年4月10日に植え付け、実験開始まで約4か月間九州大学農学部ガラス室で生育させた。解析に使ったデータは、供試体をファイトロンに搬入してから15日以上たったものを使用した。ポットは面積2,000分の1a、容積13ℓの白色ワグネルポットを使用した。砂は九州大学構内から採取したもので、pHは6.1であった。施肥は1か月に1回液体肥料で行なった。ポット内の土壌面蒸発を防ぐため表面を発泡スチロールで覆い、供試体との間にもすきまがないよう注意した。

実験中の供試体の葉面積はII章で述べた方法で測定した。

実験を行なったファイトロンについては、九大農学部農業気象学研究室⁵⁶⁾及び杉ら^{67,68)}による詳しい報告があるが、この実験に直接関係ある要素の概要を表28に示す。

実験期間中各室の気温及び湿度記録の1例を図41のa-dに示す。

蒸散量の測定は、供試体を1株ずつ表28に示す各室に常時入れておき、重量法で行なった。測定は毎日6時30分と18時30分に行ない、この間のポット重量の減少量をその期間の蒸散量とした。

ファイトロン内の風速は熱線風速計を使用して測定したが、各室の供試ポット付近の平均風速は、15℃室

Tale 28. Environmental conditions in each room

	Air temper- ature (°C)	Mean wind velocity (cm/s)	Mean relative humidity (%)	Solar radiation
30°C-Room	30±0.5, all day	39		Natural sun- light through glass roof
25°C- "	25±0.5, "	34		
20°C- "	20±0.5, "	33	65±5	
15°C- "	15±0.5, "	74		

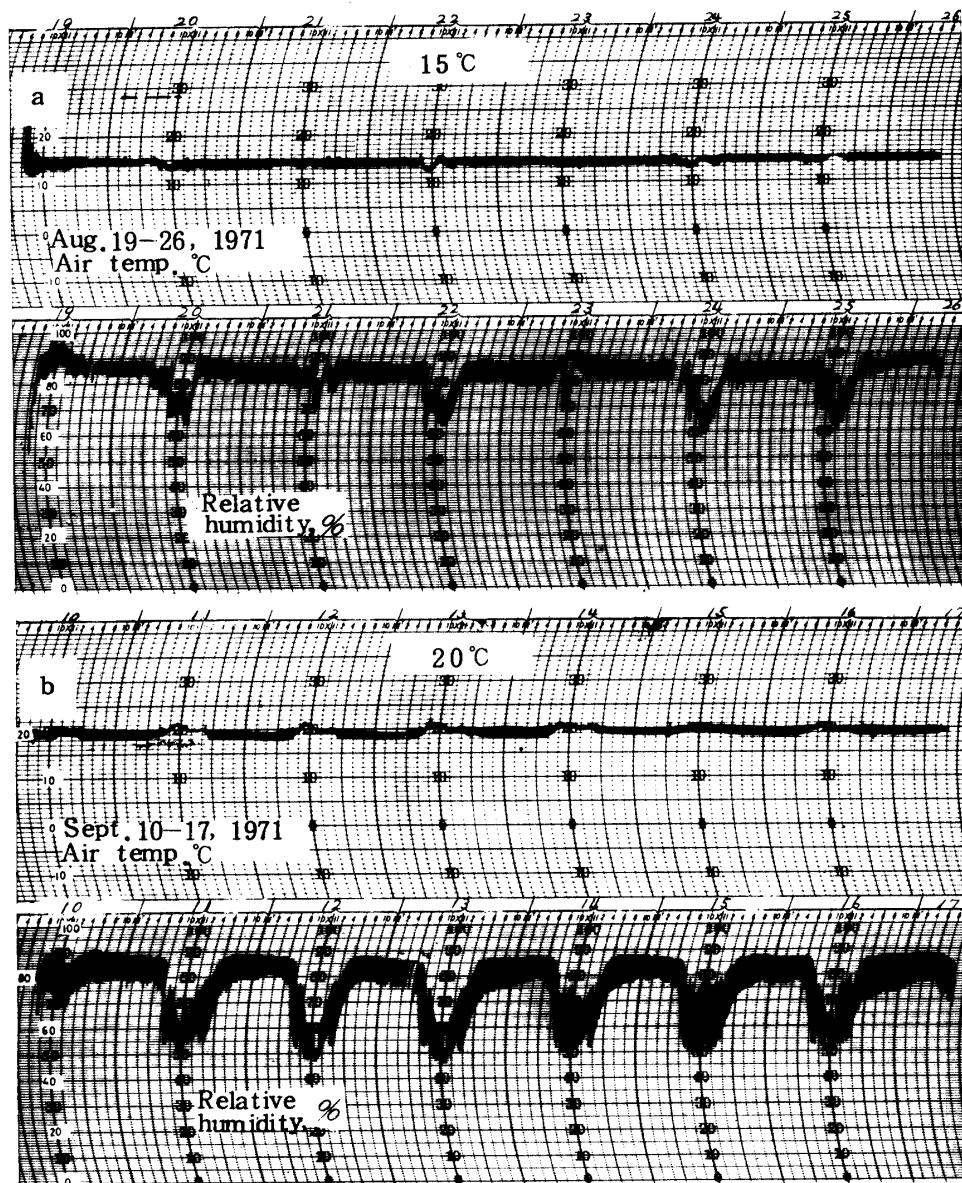


Fig. 41a-b. Examples of the record of air temperature and relative humidity in each room

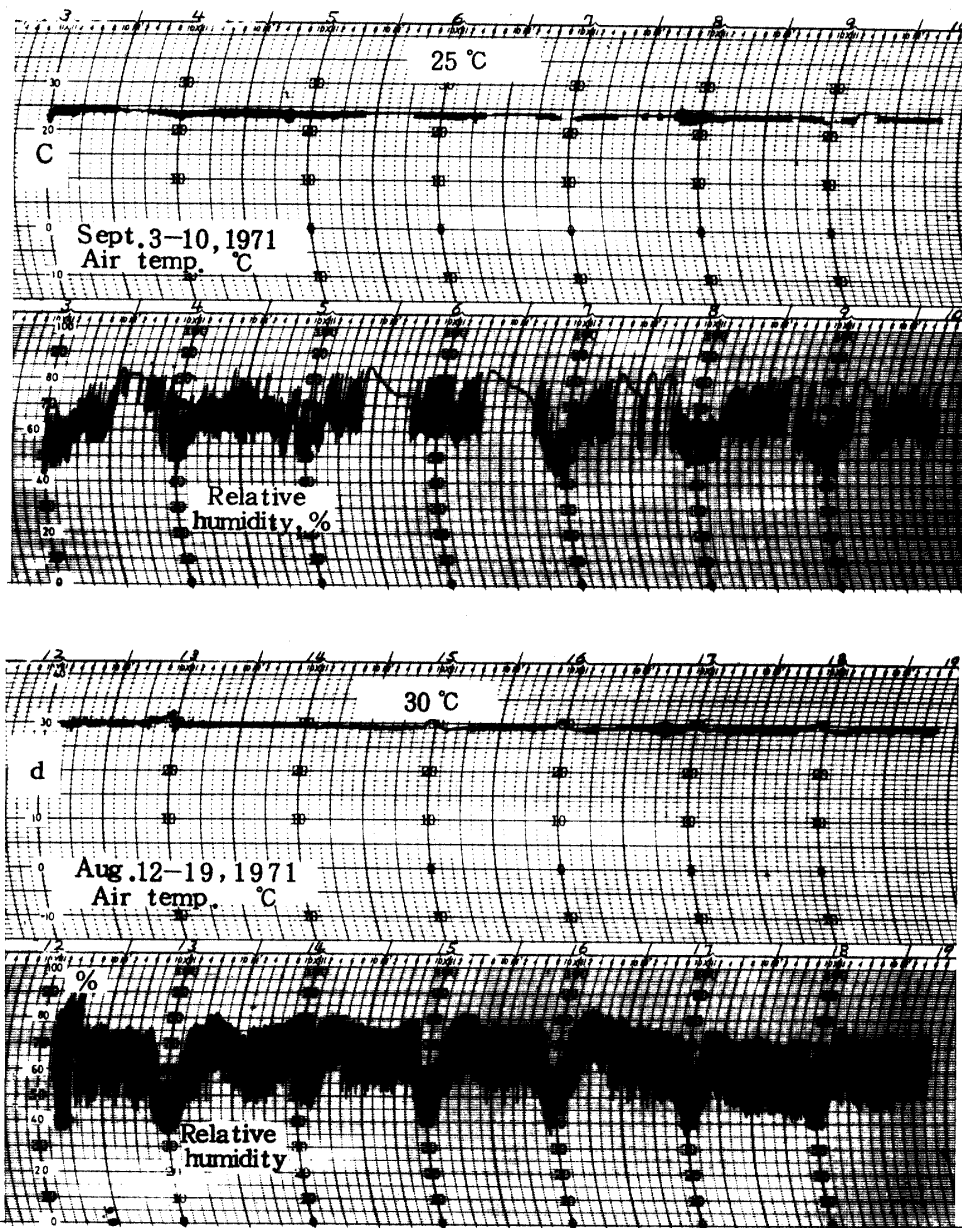


Fig. 41c-d Example of the record of air temperature and relative humidity in each room

74 cm/s, 20 °C室 33 cm/s, 25 °C室 34 cm/s, 及び 30 °C室 39 cm/sであった。

(2) 実験結果及び考察

i) 計器蒸発量, 及び夜間の蒸散量

図 42 には 30 °C 室の昼間の計器蒸発量と水平面日射量との関係を示す。測定値はかなり散らばりがあるが、両者間には傾向として 1 次式の関係が成り立つ。

図 43 には夜間蒸散量と、直前の昼間日射量との関係を示す。

図で横軸に平行な破線は全測定値の平均を示す。15 °C 室の平均値は気温が低い割に比較的大きく、20 °C 室

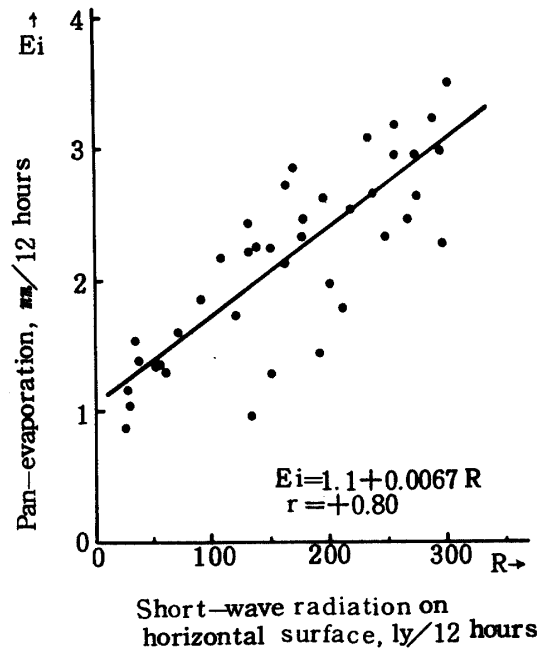


Fig. 42. Relationship between pan evaporation in daytime and short-wave radiation on horizontal surface

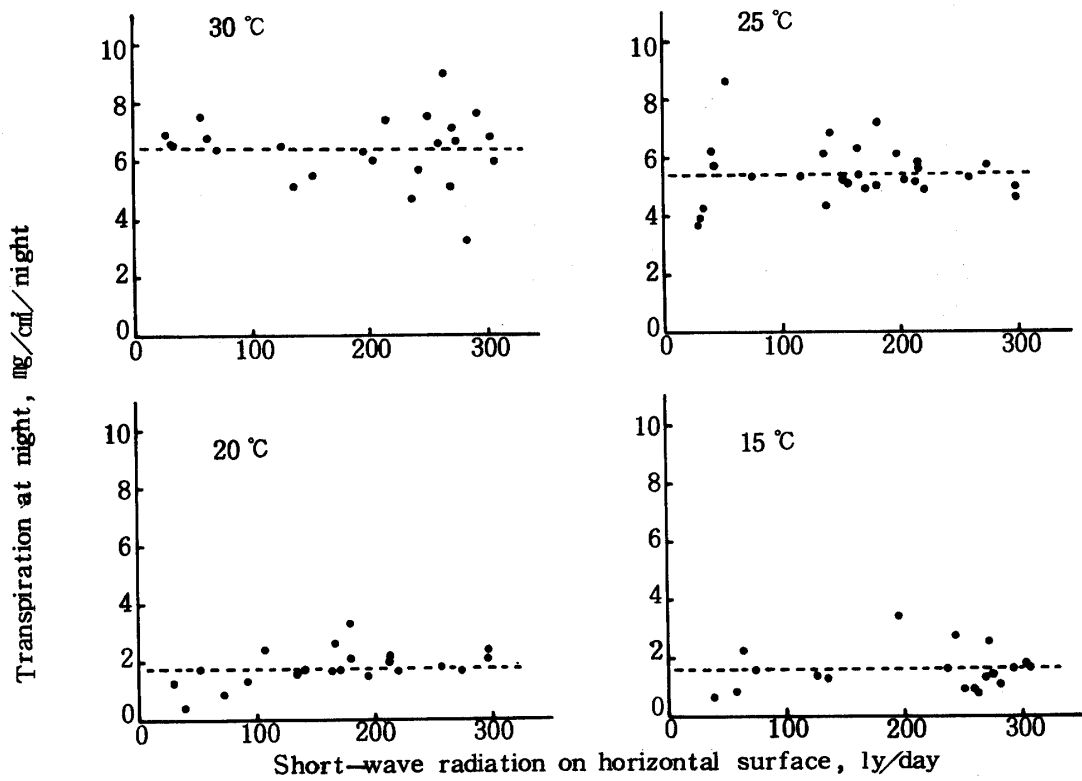


Fig. 43. Relationship between the transpiration at night in each room and short-wave radiation on horizontal surface in preceding daytime

の値とほとんど等しい。これは15℃室の風速が比較的大きかったためと考えられる。これらの図によると、夜間蒸散量と昼間の日射量の相関はないが、蒸散量は気温が高いほど大きい。

ii) 蒸散量の傾向

図44には各室における1日間蒸散量と日射量との関係を示す。

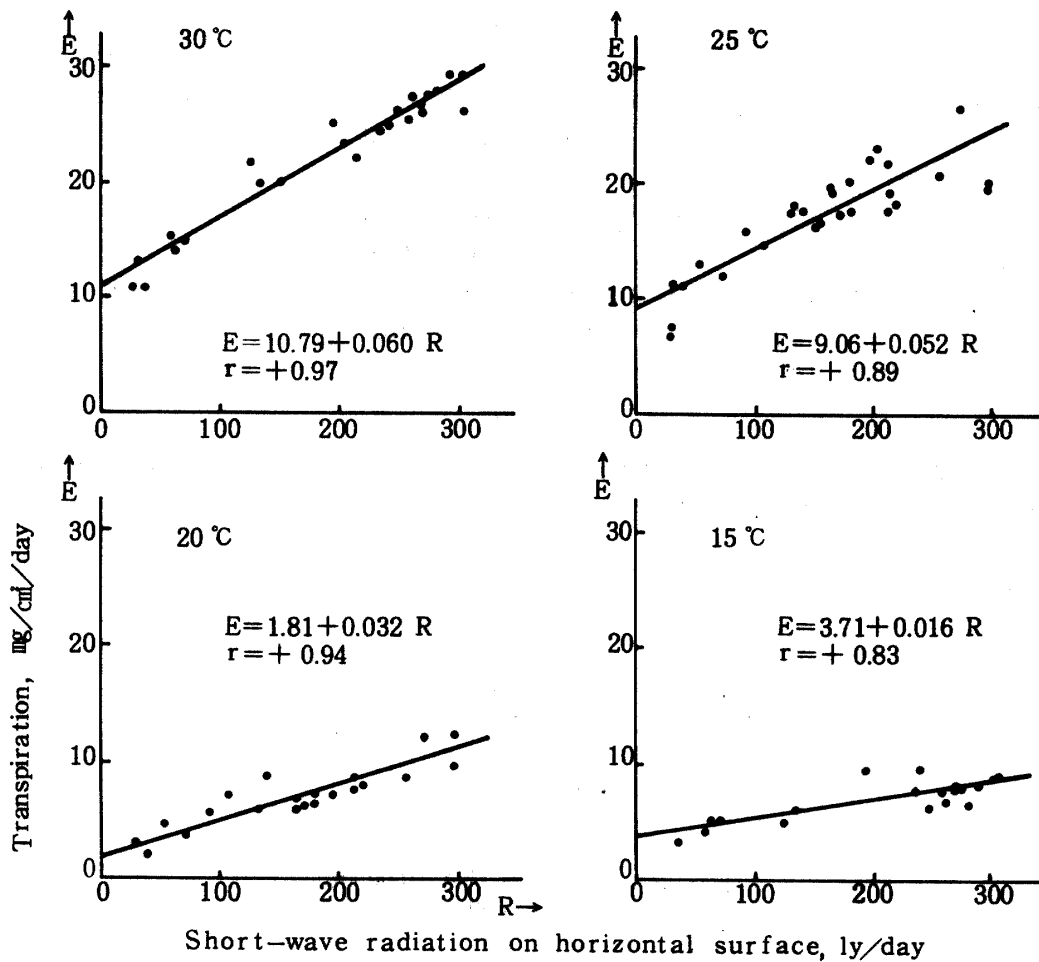


Fig. 44. Relationship between the transpiration in each room and short-wave radiation on horizontal surface

表29には異なる気温及び日射量に対する1日間蒸散量と、夜間蒸散量を示す。表中の値は図44の各回帰線上の値であるが、これらは日射量が500 ly/dayまで外挿できるものとして求めた。また、夜間蒸散量は測定値の平均である。15℃室の風速がいくらか大きかったので、表中気温15℃の値は後に述べる式(7)により補正してある。

図44によると蒸散量は日射量に比例し、両者の関係は図中の各回帰式で示されるように、次の式で表わし得る。

$$E = a + bR \quad (4)$$

ここで、Eは蒸散量、Rは水平面日射量、a及びbは常数である。

Table 29. Daily transpiration under different air temperature and short-wave radiation on horizontal surface, and nocturnal transpiration. Numerals in the table show the transpiration

Air temperature (°C)	Daily transpiration (mg/cm ² /day) for					Nocturnal transpiration (mg/cm ² /night)
	Short-wave radiation (ly/day):					
	100	200	300	400	500	
15	1.8	3.4	5.0	6.6	8.2	0.1
20	5.0	8.2	11.4	14.6	17.8	1.8
25	14.3	19.5	24.7	29.9	35.1	5.4
30	16.8	22.8	28.8	34.8	40.8	6.4

図44に示す回帰線のこう配が高温の室ほど大きいことに着目すると、式(4)の係数 b と各室の気温との関係には図45に示す傾向が見られる。

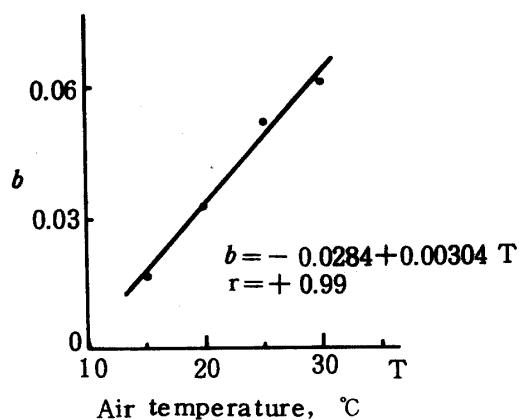


Fig. 45. Relationship between the coefficient b of the regression lines in Fig. 44 and air temperature

この図から b と気温の関係は次の式で表わし得る。

$$b = 0.00304T - 0.0284 \quad T: \text{気温 } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

したがって、式(4)は次のようになる。

$$E = a + (0.00304T - 0.0284)R \quad (6)$$

ここで、 E : 蒸散量 mg/cm²/day, R : 水平面日射量 ly/dayである。

一方、この式の常数項 a は、図 44 の各回帰線の Y 軸との交点の切片の長さに相当し、これは日射以外の影響による蒸散量に当たる。図に見られるとおり、 a は気温が高いほど大きい。各室の a の値と気温との関係を図上にプロットすると、図 46 A に示す圏点のようになる。

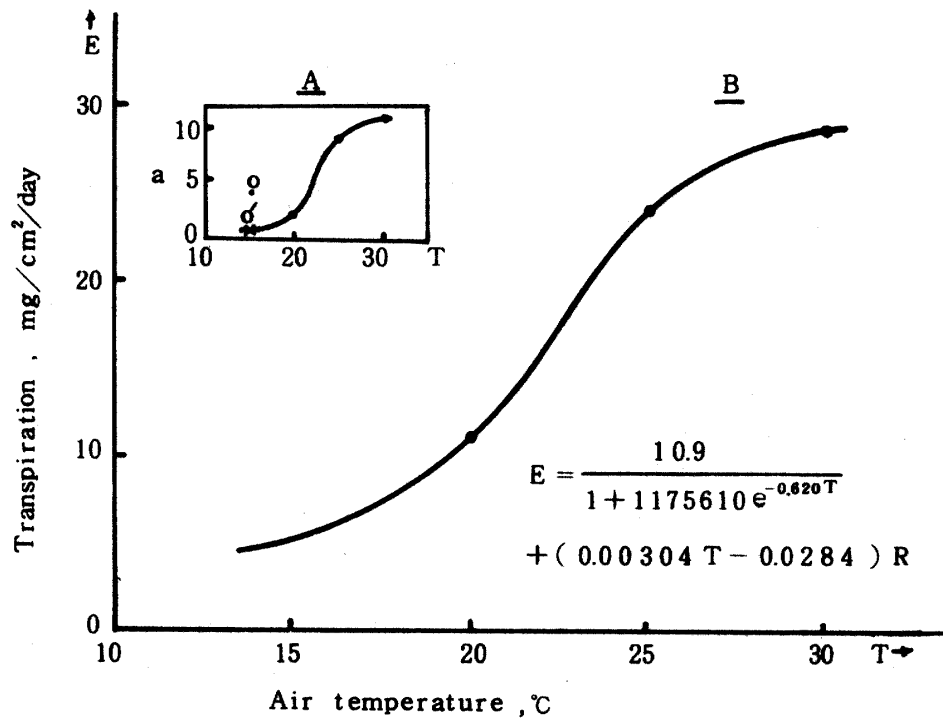


Fig. 46. Relationship between the transpiration and air temperature
 A: relationship when no solar radiation is expected in daytime
 B: relationship when short-wave radiation on horizontal surface R is 300 ly/day

15℃室の値(点O)を除き、これら各点は図のようにS字状の曲線で結び得る。この曲線は a と気温との関係を示すものであり、良い近似で次の実験式で表わすことができる。

$$a = \frac{10.9}{1 + 1175610 e^{-0.620T}} \quad (\text{mg/cm}^2/\text{day}) \quad (7)$$

先に示した図 43 中の破線の値は、 a の値のうちで夜間のみの分を示す。なお、図 46 A の点 O は 15℃室の風速が他室と等しいときの蒸散量を示すものと推定される。表 29 ではこの点 O を考慮に入れて修正してある。

式 (6) と式 (7) から、1 日間の全蒸散量は次の式で表わすことができる。

$$E = \frac{10.9}{1 + 1175610 e^{-0.620T}} + (0.00304T - 0.0284)R \quad (8)$$

この式の右辺第 1 項は日射以外の影響による蒸散量で、第 2 項以下は日射による蒸散量である。図 46B には 1 例として、上式で $R = 300 \text{ ly/day}$ のときの 1 日間の蒸散量と気温との関係を示す。このように、

パイナップルの蒸散量は、湿度と風速が一定ならば気温と日射量の関数として表わすことができる。

蒸散量が気温の影響を受ける原因には次の3点が挙げられる。

- a. 湿度が等しい飽差は気温が高いほど大きい。したがって、気温が高いほど蒸散量は大きくなる。
- b. 葉面から失なわれる顕熱は、葉温より気温が高いほど減少する。したがって、この減少量は蒸散量を増加させるために使われる。
- c. 根の吸水力などの生理的要因が気温の高低により差がある。Bode²⁸⁾は、ヒマワリの根の吸水抵抗が10℃～30℃では温度の上昇に対してほぼ直線的に減少することを示している。このような吸水力に関連して、更に、植物体内における水分拡散抵抗も温度による差があり、これも蒸散量に影響を及ぼすと思われる。

図46Bによると、気温が約20℃までは蒸散量は小さいが約20℃を超すと急に増加し、25℃を超すと増加が緩やかになる。坪井ら⁷²⁾のイネの実験でも、蒸散量はS字状のカーブを描いて増加することが報告されている。一方、Went⁷⁹⁾のトマトの実験では、気温10℃～30℃ではほぼ直線的に増加している。パイナップルがS字状のカーブとなるのは、熱帯及び亜熱帯の作物であるため約20℃以下では気温が低く、生理作用が不活発になるためであると考えられる。また、気温25℃以上で蒸散量増加が鈍ることから見て、蒸散量最大の気温には限界があると考えられる。

この実験はポット栽培の個体株によるものである。受光量及び風通しの差を考えると、群落をなしているときの蒸散量はこの実験におけるより小さいと思われる。

(3) 実験結果の応用

i) 緯度による透明大気日射量の差と蒸散量の差との関係

地球上の緯度の差は、透明大気の水平面日射量に地域差を生ぜしめ、これは蒸散量に影響を及ぼすと考えられる。この影響の程度を知るため各緯度の湿度、風速及び土壌含水量を与えて推定を行なってみた。用いた計算式は先に挙げた式(8)で、この式の水平面日射量RはPenmanの次の式により求めた⁴⁴⁾。

$$R = R_A \left(0.18 + 0.55 \frac{n}{N} \right) \quad (9)$$

ここで、R：地表に達する水平面日射量 ly/day, R_A ：Angot value ly/day; n, N：それぞれ日照時間と可照時間である。

図47はそれぞれ8月と2月についての計算結果である。この図では各緯度で日照率を一定とした。

図47のaによると、各緯度で気温が等しいならば8月には緯度による蒸散量の差は非常に小さい。次に図のbによると、2月は8月よりも緯度による差はわずかに大きい。しかし、気温25℃とした場合でも、北緯20度と40度の蒸散量の差は約20%程度である。このように、Angot valueの緯度による差が蒸散量の差に及ぼす影響は大きくない。式(8)、式(9)及び図47から見ると、実際に蒸散量の地域差を大きくする要素は地域差の大きい日照率と気温である。

ii) 九州及び南西諸島各地の蒸散量の推定

九州及び南西諸島各地でパイナップルが栽培されると仮定して、各地の平均気温と日照率を使い、式(8)により各地の蒸散量を推定した。結果を表30に示す。

気温10℃以下では蒸散量は非常に小さくなるので、月平均気温10℃未満の月は無視してある。この表に見られるように、気温や日照率に各地固有な値を使うと、蒸散量は季節や緯度でかなりの差が生ずる。

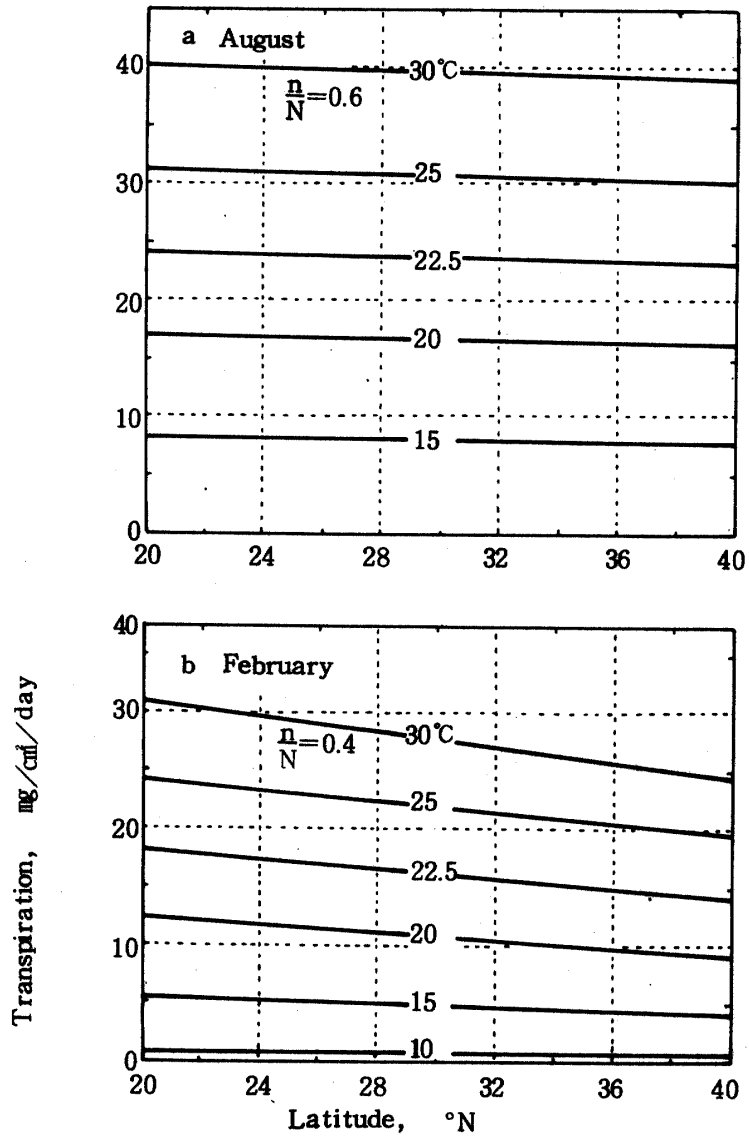


Fig. 47. Example of relationship among the tranpiration, air temperature and latitudes ; calculated using formula (8)

Table 30. Transpiration at each location calculated using formula (8)

	(mg/cm ² /day)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Ishigaki	6.1	8.1	11.4	20.1	29.5	35.9	41.2	38.2	34.9	24.8	15.6	7.8
Naha	4.7	6.2	8.6	15.3	22.8	31.3	40.0	36.2	33.5	22.9	12.4	6.2
Naze	2.7	3.5	5.9	11.4	17.3	26.7	35.9	33.3	28.0	17.0	7.8	3.8
Yakushima	0.9	1.3	3.8	8.9	14.1	22.5	32.7	32.0	25.7	12.1	5.1	1.8
Makurazaki	—	—	2.2	7.7	12.3	18.5	31.5	34.5	26.9	10.8	4.5	0.6
Kagoshima	—	—	1.5	7.4	13.0	19.8	32.1	34.0	25.3	9.8	3.5	—
Miyazaki	—	—	1.8	8.4	13.1	21.2	32.5	33.6	24.4	9.1	3.4	—
Akune	—	—	1.3	7.2	12.6	19.1	31.4	33.8	25.2	10.0	4.0	—
Nagasaki	—	—	1.0	6.8	12.7	20.0	31.9	35.5	24.0	9.9	3.5	—
Oita	—	—	—	4.6	10.3	16.8	29.7	31.4	19.7	7.3	2.2	—
Hirado	—	—	—	5.3	10.3	15.5	25.9	31.1	20.0	8.8	3.0	—
Izuhara	—	—	—	4.7	10.6	15.9	26.4	30.0	18.2	7.7	2.4	—

2. 蒸発散量，及びそれと気象要素との関係⁶³⁾

1) 実験方法

蒸発散量の測定にはライシメーターを使い，水収支法により行なった。

(1) 実験場所，期間及び苗の植え付け時期

実験A

実験場所 : 沖縄県名護市我部祖河の私有のパインアップル畑，日当たりの良い広い畑地

期間 : 1971年9月—1973年8月

植え付け時期 : 1971年8月17日

実験B

実験場所 : 沖縄県那覇市首里，琉球大学構内，周囲は芝生地，近くに建物あり，日当たりは良い。

期間 : 1971年5月—1973年8月

植え付け時期 : 1971年4月30日

上の各植え付け時期は沖縄における夏植え及び春植えの時期に当たる。供試品種はスムースカイエン，苗はえい芽であった。ライシメーターの土壌はいわゆる国頭れき層の土壌で，土性はれきがわずかに混じった壤土であった。

(2) ライシメーターの構造

ライシメーターは面積が内のり165cm×150cmであり，栽培土壌の深さは40cmとした。パインアップルは浅根性の作物⁷⁷⁾であるのでこの深さで十分であると考えられる。図48にはライシメーターの構

造を示す。次に図 49 には苗の配列状況を示す。

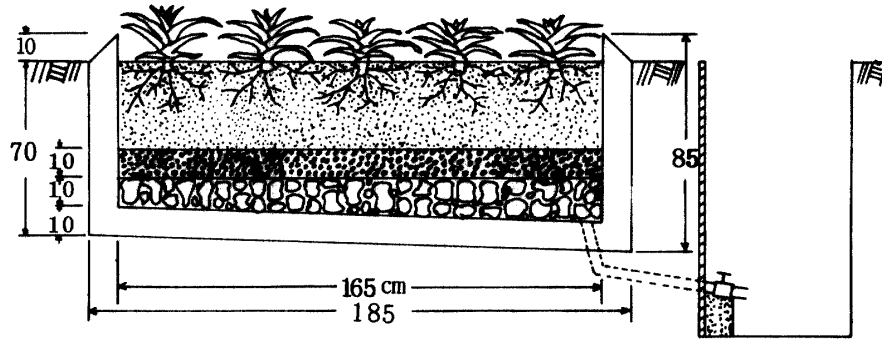


Fig. 48. Cross section of the lysimeter

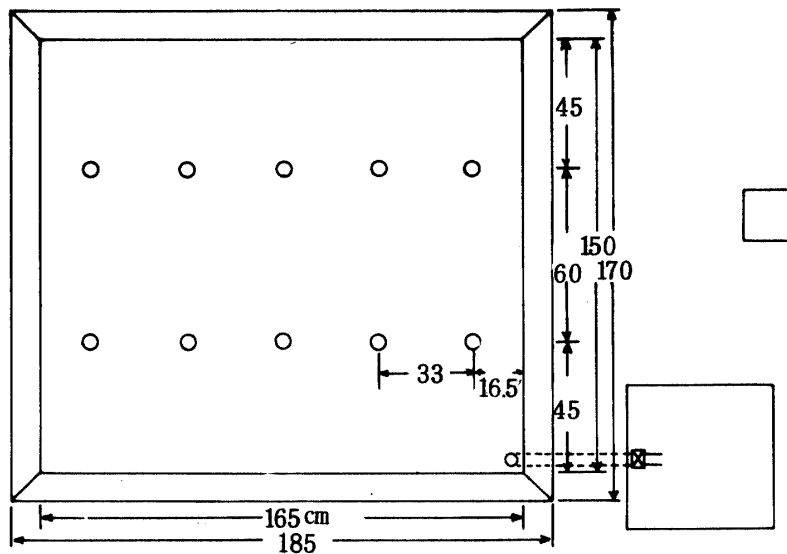


Fig. 49. Array of each plant in the lysimeter, circles showing the location of the stem

苗の栽培方法は沖縄の標準⁵⁵⁾に従い、畝幅 90 cm, 列間 60 cm, 株間 33 cm の 2 列植えにした。この密度は千鳥植えにすると 10 a 当たり 4,000 本になる。使用したライシメーターには 10 本の苗を植え付けることができた。

Photo. 4 は植物体がライシメーター内で生育中の状況を、実験 A を例にとって示す。

(3) かん水間隔及びかん水量

かん水は天気の許す限り毎月各旬の初めに行なった。各旬の基準かん水量は、かん水日までの直前の旬に降雨がなかったときは 50 mm を与えた。かん水日からさかのぼって 1 日目 - 5 日目の間に 10 mm 以



Photo. 4. Plants growing in and outside the lysimeter,
Experiment A

上の降雨があった場合は、その降水量だけ基準かん水量 50 mm から差し引いた。沖縄では計器蒸発量は多いときには 8 mm/day ~ 11 mm/day に達するので、その大まかな値として 10 mm/day 以上あるならば蒸発量を差し引いても土壌へ貯留される水分となると考えたためである。更に、過湿な土壌はパイナップルの生育に悪い影響を与える⁷⁸⁾ことも考慮して上のようなかん水方法を設定した。

(4) 蒸発散量の測定

蒸発散量は次の水収支式が成り立つとして求めた。すなわち、一つの旬について、

$$E = I - P_1 + P_2 - F - D \quad (10)$$

ここで、 I : 基準かん水量 50 mm, P_1 : かん水日からさかのぼって 1 日目 - 5 日目に 10 mm/day 以上の降雨があった日について、これらの日の日降水量の合計値, P_2 : P_1 以外のすべての降水量の合計値, F : 浸透水として排出された水の量, D : 大雨時の表面流出量である。旬間日数を N とするとき E/N をその旬の平均蒸発散量 (mm/day) とした。上の水収支式では土壌中の水分変化量は小さいと仮定して無視している。

(5) 気象要素観測、葉面積測定及び肥培管理

気象要素の観測は二つの実験場所で次のとおり行なった。

実験A : 毎日 9 時の気温とライシメーター内の深さ 10 cm の地温及び前 24 時間降水量の観測

実験B : 実験A と同様な観測に加えて、パイメタル自記温度計による気温連続記録及びロビッチ日射計による水平面日射量連続観測

葉面積の測定は原則として 1 か月に 1 回行ない、一部は 2 か月に 1 回行なった。施肥は元肥のほか 2 か月半に 1 回液体肥料をかん水として与えた。

2) 実験結果

図 50a 及び図 50b には二つの実験の測定結果を示す。

供試体の各株の生育段階を LAI, 花芽分化期, 出蕾期及び結実期を考慮して大まかに分け, 各生育段階ごとの蒸発散量を見ると次のとおりである。

(1) 実験 A

i) 生育初期 (1971年8月-1972年4月, 植え付け時から LAI 約 1.5 まで): 一つのかん水間隔内平均蒸発散量は $1.0 \text{ mm/day} \sim 3.4 \text{ mm/day}$ で植え付け直後は特に大きく, これは植物体が十分に生長した夏の値よりむしろ大きい。その理由は, パインアップルの蒸散量はかなり小さく, 最大値はせいぜい 1 mm/day であるのに比べて, 土壌含水量が十分な裸地の蒸発量は計器蒸発量の約 0.8 倍¹⁶⁾ に達する大きい値になるためである。

ii) 生育中期 (1972年5月-9月, LAI 約 1.5-約 4.0): 葉面積は増大し気温も高くなる割には蒸発散量はそれほど大きくならず, $1.4 \text{ mm/day} \sim 3.1 \text{ mm/day}$ である。LAI の増大による蒸散量増加は多少あっても, それが植被の増大による土壌面蒸発減少量を補うほどではなかったことが注目される。

iii) 生育末期 (1972年10月-1973年2月, LAI 約 4.0-約 5.0): 植物体は十分に生長しているが, 秋から冬にかけて気温は低く日射量も小さくなる。このため蒸発散量は各生育段階のうち最小の $0.3 \text{ mm/day} \sim 2.3 \text{ mm/day}$ であった。

iv) 開花結実期 (1973年3月-8月, LAI 約 4.2-約 5.7): 蒸発散量は $0.4 \text{ mm/day} \sim 2.6 \text{ mm/day}$ で小さいほうである。この生育段階では気温はかなり上昇してくるにもかかわらず蒸発散量は比較的小さい。これは一つには5月-6月が沖縄の雨期に当たり湿度が高いためである。

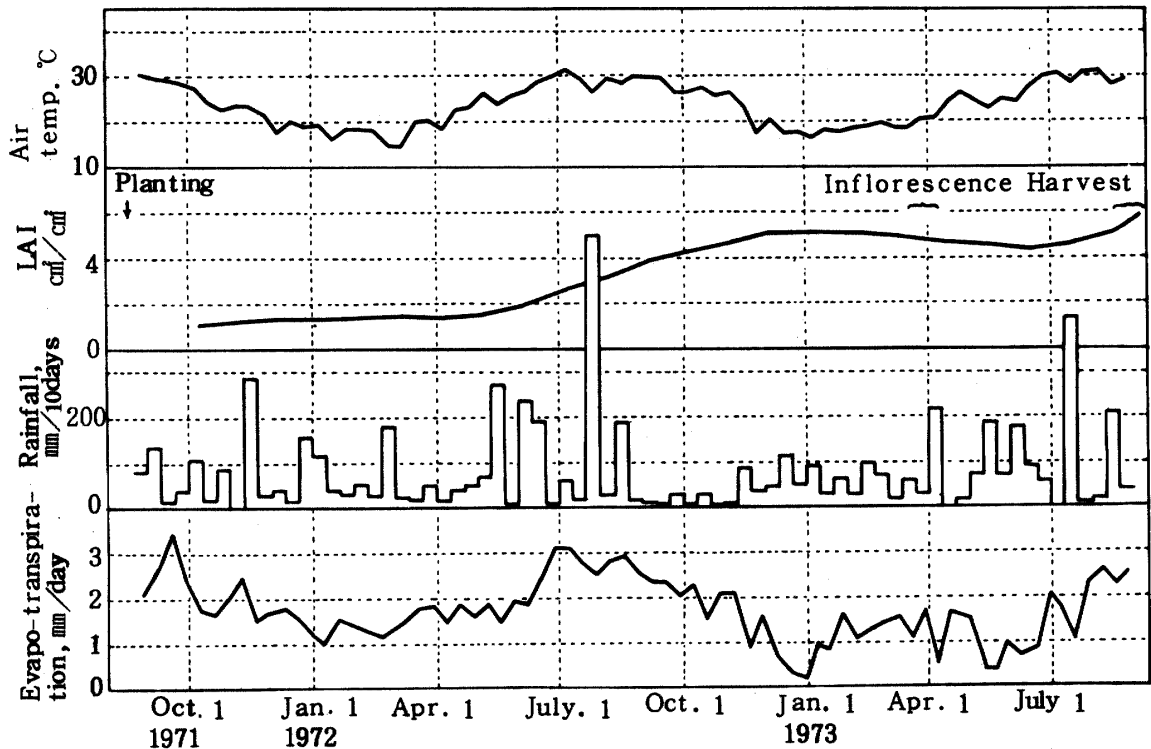


Fig. 50a. Month to month march of the evapotranspiration, leaf area index and meteorological elements; Experiment A, Nago

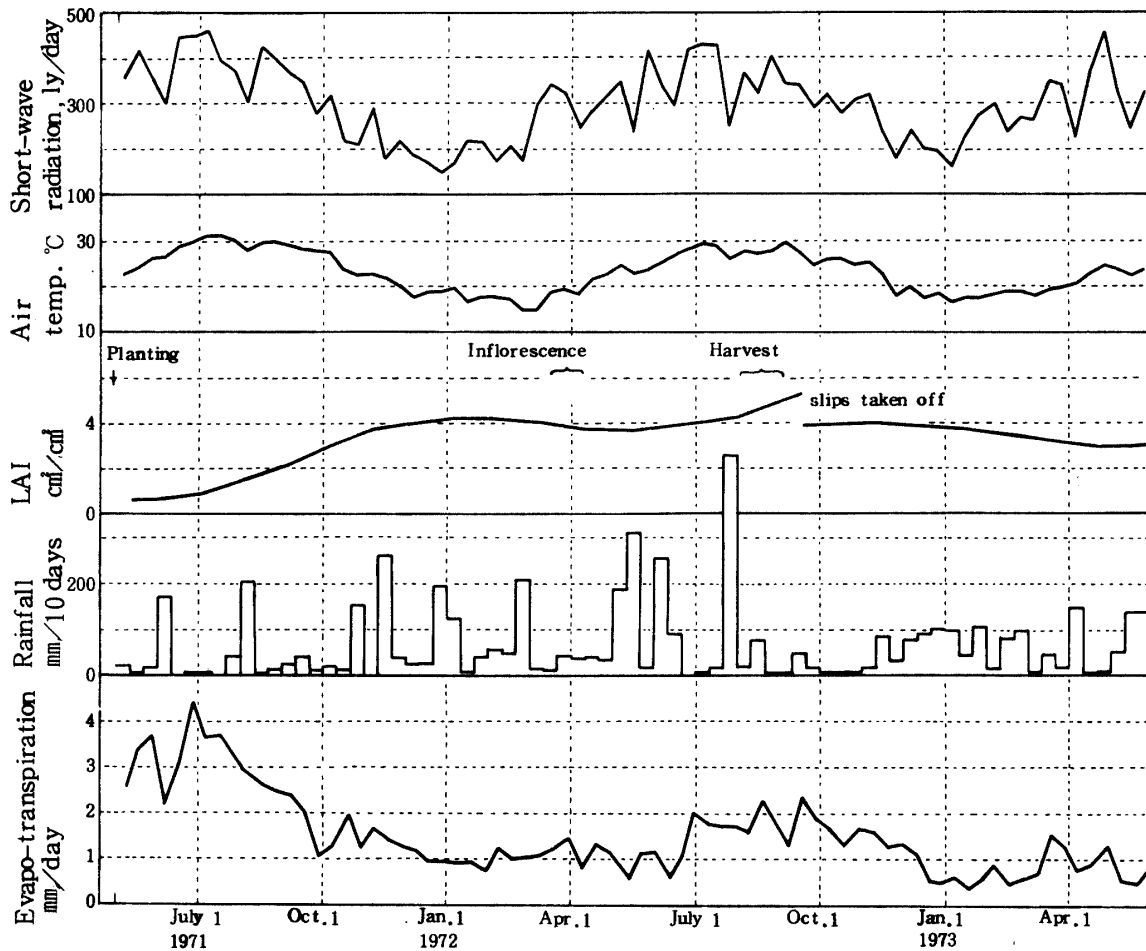


Fig. 50b. Month to month March of the evapotranspiration, leaf area index and meteorological elements; Experiment B, Naha

(2) 実験 B

i) 生育初期 (1971年5月-7月, 植え付け時からLAI約1.5まで): 蒸発散量 2.2mm/day ~ 4.4mm/day。

ii) 生育中期 (1971年8月-1972年1月, LAI約1.5-約4.0): 蒸発散量 0.7mm/day ~ 2.9mm/day。

iii) 生育末期 (1972年2月-3月, LAI約4.0): 蒸発散量 0.7mm/day ~ 1.4mm/day。

iv) 開花結実期 (1972年4月-8月, LAI約3.8-約4.8): 蒸発散量 0.5mm/day ~ 2.3mm/day。

実験AとBとは実験場所や苗の植え付け時期などに相違があったが, 植物体の生育段階や季節から見た蒸発散量の推移は両実験で互いに良く似ている。

表31a及び表31bには, それぞれ実験AとBの蒸発散量平均値と各気象要素を示す。

Table 31 a. Evapotranspiration and meteorological elements,
Experiment A, Nago

The plants were planted in Aug. 1971.

Month	Monthly mean of evapo- transpi- ration (mm/day)	Monthly mean of air tem- perature at 09:00 (°C)	Monthly mean of soil tem- perature at depth 10cm at 09:00 (°C)	Monthly rainfall (mm)	Remarks
1971					
September	2.9	29.2	25.7	181	
October	1.8	25.0	22.7	204	
November	1.9	22.9	18.5	309	
December	1.5	19.0	15.4	209	
1972					
January	1.3	18.1	15.2	178	
February	1.2	17.1	15.5	252	
March	1.6	18.4	14.8	84	
April	1.6	21.5	18.7	95	
May	1.8	25.4	22.6	341	
June	2.5	28.4	25.7	436	
July	2.7	29.2	26.8	672	
August	2.8	29.4	26.3	224	
September	2.2	28.7	24.4	39	
October	1.9	26.5	21.1	29	
November	1.4	22.3	19.1	120	
December	0.4	18.5	16.2	201	
1973					
January	1.1	17.3	15.0	173	
February	1.2	19.0	16.2	184	
March	1.4	19.4	16.5	96	
April	1.1	24.0	21.1	228	Inflo- rescence
May	0.7	24.1	21.7	319	
June	1.0	27.3	24.6	314	
July	1.8	29.9	26.6	420	
August	2.5	29.7	26.4	257	Harvest

Table 31 b. Evapotranspiration and meteorological elements,
Experiment B, Naha
The plants were planted in Apr. 1971

Month	Monthly mean of evapotranspiration (mm/day)	Monthly mean of air temperature at 09:00 (°C)	Monthly mean of daily mean air temperature (°C)	Monthly mean of soil temperature at depth 10 cm at 09:00 (°C)	Monthly mean of incoming short-wave radiation on horizontal surface (ly/day)	Monthly rainfall (mm)	Remarks
1971							
May	3.2	24.0	23.2	—	374	33	
June	3.1	28.2	27.7	26.4	396	166	
July	3.4	30.5	29.2	27.5	406	40	
August	2.6	28.8	28.0	26.6	373	219	
September	1.9	28.1	27.2	25.9	328	76	
October	1.5	24.5	23.9	22.9	243	190	
November	1.5	21.2	20.7	19.1	226	292	
December	1.0	18.2	17.8	16.5	166	233	
1972							
January	0.9	17.9	17.7	16.1	202	163	
February	1.1	16.4	16.5	15.8	181	295	
March	1.2	17.6	17.2	15.3	319	59	Inflo-
April	1.0	20.6	20.0	18.6	279	100	rescence
May	0.8	23.7	23.3	22.0	333	506	
June	1.1	26.6	26.1	24.7	349	339	
July	1.7	27.7	27.2	26.0	363	495	
August	1.9	27.5	26.9	25.7	362	94	Harvest
September	1.8	27.0	25.9	24.9	321	68	
October	1.5	25.4	24.0	22.2	299	24	
November	1.4	21.8	21.0	19.9	244	133	
December	0.7	18.3	18.3	16.7	212	259	
1973							
January	0.5	16.9	16.7	15.3	221	235	
February	0.6	18.5	18.6	16.8	267	187	
March	1.0	18.5	18.4	16.8	317	61	
April	0.9	22.5	22.3	21.0	349	156	

3) 考察

式(10)から求めた蒸発散量には土壌貯留水分変化量を省いたことによる誤差が若干含まれている。特に植え付け後植物体が小さい間は、無降水日の多い旬の蒸発散量はやや過小評価されていると考えられる。

一方、1972年8月に晴天が続いたころ、植物体が十分に生長している段階でライシメーターの土壌含水量を測定した結果(実験B)、深さ10cmにおける値は、かん水後第1日目と9日目にそれぞれ間ゲキの飽和度46%と49%を示し、あまり差はなかった。また、図50a及び図50bに見られるように、冬季には蒸発散量が小さいので土壌含水量の変動は小さい。これらのことから、冬季の畑地と植物体が十分生長した状態にある畑地では土壌貯留水分変化量は大きくはなかったと思われる。

この実験で得られた結果を使って2, 3の考察を行なった。

(1) 各生育段階における蒸発散量の経過

図51は実験A及びBの各生育段階の蒸発散量経過を示す。

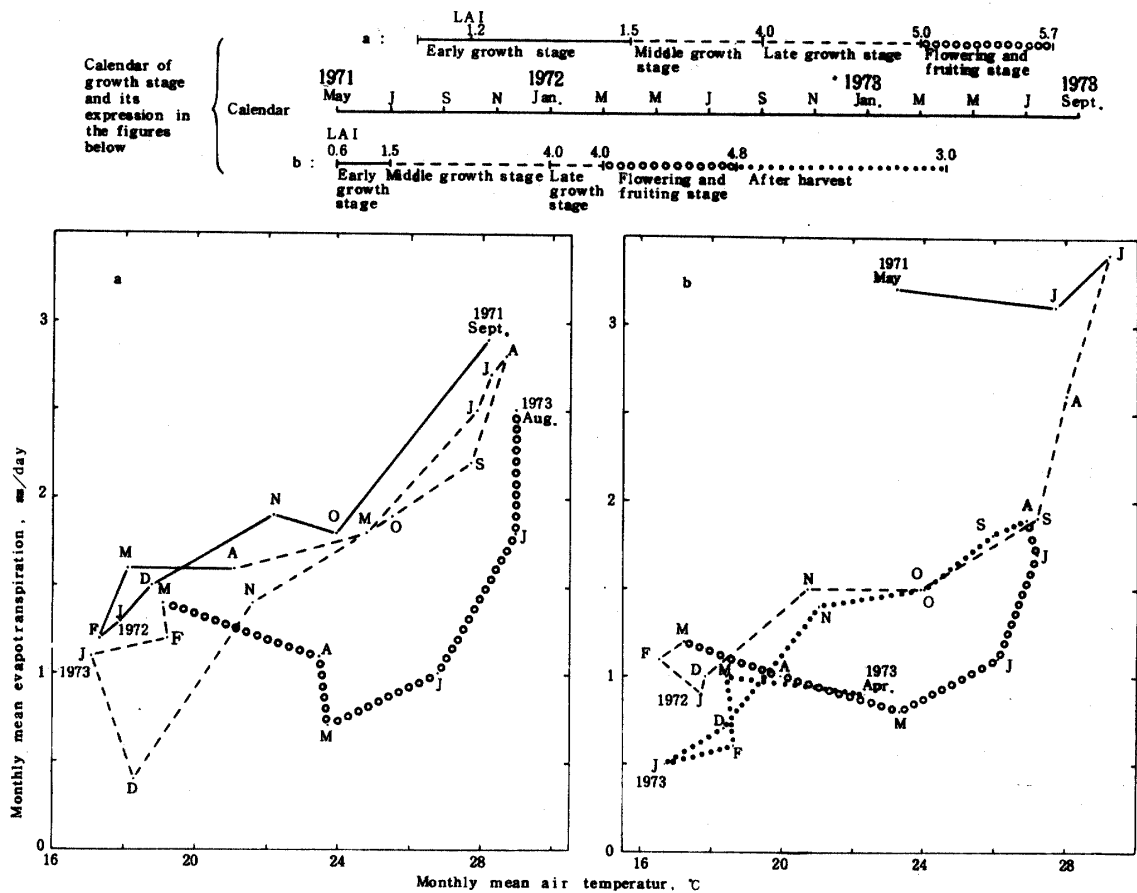


Fig. 51. Variation of the evapotranspiration with the change of growth stage and air temperature
 a: Experiment A, Nago; b: Experiment B, Naha

図によると生育初期の蒸発散量は比較的に大きい。このころは土壌面蒸発量が蒸発散量の大部分を占

めるためである。実験Bでは初期の蒸発散量が特に大きい。これは、長い渇水時期があって晴天が続いたためである。この渇水は生育初期を過ぎた同年8月に解消した。

生育中期と末期には、蒸発散量は気温の昇降に従って増減する傾向がある。これは主に、沖縄における大気中の飽差の気候的特性と、パインアップルの蒸発散量が気温の昇降に従って増減することの理由による。これについては後で述べる。

開花結実期の蒸発散量はかなり小さい。これは同時期の蒸散量測定結果と一致する。蒸散量最大値は、先に示したように生育中期に測定され月平均0.98mm/dayであったが、開花結実期最大値は0.69mm/dayであった。開花結実期に蒸発散量が小さいのは、恐らくパインアップルの植物体内における原因によると思われる。

果実収穫後の蒸発散量は実験Bにおいて測定されたが、この段階の蒸発散量もかなり小さい。この理由は収穫後の植物体は古い葉が枯れるものが多く、また、吸芽も翌年春まで生長が十分でないことと、収穫後間もなく秋から冬に向かい、気温及び日射量も減少する気候になるからと思われる。

二つの実験で1972年—1973年の冬は蒸発散量が特に小さい。実験Aでは、これより1年前の冬の生育初期では蒸発散量が比較的に大きかったため、これと比べて小さく見える。ただ、1972年12月に著しく小さいのは恐らく、測定上のミスと思われる。一方、実験Bでは、1972年—1973年冬の蒸発散量は収穫後最初の冬に当たるため小さかったものと考えられる。

(2) 蒸発散量と気象要素との関係

図51に見られるように、生育中期と末期には蒸発散量は気温の昇降に従って増減する傾向がある。この生育段階の蒸発散量と気温との直線回帰式と相関係数を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{実験A: } E_t &= 0.16T - 2.1, & r'_{ET} &= +0.94 \\ \text{実験B: } E_t &= 0.11T - 0.9, & r_{ET} &= +0.91 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 E_t ：月平均蒸発散量mm/day， T ：月平均気温 $^{\circ}\text{C}$ ， r'_{ET} 及び r_{ET} ：相関係数である。二つの実験で相関はかなり高い。二つの回帰式は気温 $20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ で蒸発散量0.3mm/day以内で一致するが、 15°C では0.5mm/dayの差がある。実験Aで測定に疑問のある1972年冬の値を除いた回帰式を使うと近似は更に良くなり、二つの回帰式は気温 $15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ で0.3mm/day以内で一致する。

日射量の観測が行なわれた実験Bについて、上と同じ生育段階の蒸発散量と水平面日射量の関係は次のようになる。

$$E_t = 0.0061R - 0.08, \quad r_{ER} = +0.82 \quad (12)$$

ここで、 E_t ， R 及び r_{ER} はそれぞれ月平均蒸発散量mm/day，水平面日射量ly/day，及び相関係数である。

次に、実験Bにおいて同じ生育段階の月平均気温と水平面日射量の相関係数 r_{TR} は+0.73である。

実験Bについての3つの相関係数 r_{ET} ， r_{ER} 及び r_{TR} を使って、蒸発散量と気温との偏相関係数を求めると+0.80である。帰無仮説を使い、有意水準を0.05とした統計的棄却検定を行なうと、この値は有意である。これら両者間に高い相関がある理由として次の事が考えられる。すなわち、気候資料によると沖縄では、大気中の飽差は秋、冬及び初春には気温の昇降に従って増減する傾向にあり、また、パインアップルの蒸散量は先に示したように気温 $15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ では気温が高いほど大きい。

気温に関する蒸発散量と水平面日射量との偏相関係数は+0.55であるが、この値では帰無仮説は採択される。これは、生育中期及び末期にあるパインアップル畑地では、これら両者の相関は高くないことを示す。Ekern⁸⁾も、ライシメーターにより植え付け後8か月のパインアップル株を使った実験で、昼間の蒸発散量の経時変動は日射量の経時変動に従わない例を示している。

(3) 蒸発散量とLAIの関係

図 52 は苗の植え付け直後から生育中期中ごろまでの蒸発散量と LAI との関係を示す。

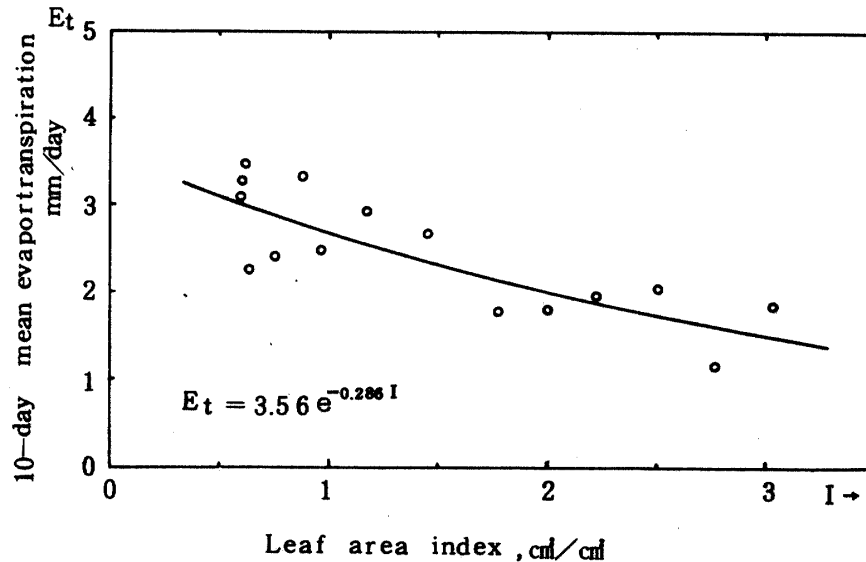


Fig. 52. Relationship between the evapotranspiration and leaf area index

図は気温と水平面日射量の観測資料のそろっている実験Bの状況を示す。実測の蒸発散量を基準気温及び水平面日射量の値に補正するには、先に求めた式(11)及び式(12)を使った。

図52によると、資料はやや散らばりがあるが、蒸発散量はLAIの増加とともに減少し、その関係は次の実験式で表わし得る。

$$E_t = A e^{-\alpha I} \quad (13)$$

ここで、 E_t ：蒸発散量mm/day， I ：LAI， A 及び α ：定数である。この実験では基準気温25.0℃，水平面日射量350ly/dayとしたとき、 $A = 3.56$ ， $\alpha = 0.286$ になっている。

上に述べた蒸発散量補正の方法には、そのほかに、Penmanの式⁴⁴⁾を利用するものが挙げられる。この方法で補正を行ない、式(13)の A 及び α を求めると、上の値とよく一致し、それぞれ360と0.286であった。

蒸発散量とLAI間に上記のような減少関数で表わし得る関係があるのは、土壌含水量が十分な畑地では蒸散量が土壌面蒸発量に比べて小さいためである。

(4) 他の測定例との比較

表32にはEkern⁷⁾によるワヒアワにおける蒸発散量測定例と実験Aの測定結果との比較を示す。表中でワヒアワの測定値は、Ekernの幾多の実験例の中で、実験Aと植え付け時期が似ており、測定期間が長く、また、マルチングをしてない畑地の測定例として入手できた唯一の資料である。Ekernの実験はライシメーターにより、通常のかんがい管理下にある状態で行なわれた。かんがいは通常1か月に1回であるが、自然降雨も考慮して行なわれているようである。

表33にはハワイ⁴⁷⁾と沖縄の気温と水平面日射量を示す。

この表中那覇の水平面日射量は、日照率の平年値を使って求めたもので表13中の値と同じである。

表32によると、ハワイ及び沖縄の蒸発散量を月平均値で比較するとき、最大値及び最小値は両地間

Table 32. Example of evapotranspiration measurement in Hawaii and that in Okinawa

		(mm/day)									
Location	Period of measurement	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.		
*Wahiawa, Hawaii	1960-'62			-	2.1	2.1	2.5	2.0	1.9		
**Nago, Okinawa	1971-'73	2.9	1.8	1.9	1.5	1.3	1.2	1.6	1.6		

May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	June	July	Aug.	Sept.	Oct.
1.6	1.1	1.8	1.5	1.2	1.1	-	-	-	1.3	1.2	0.9	0.6	0.6
1.8	2.5	2.7	2.8	2.2	1.9	1.4	0.4	1.0	1.8	2.5	end	

* Planted October 1960; ** Planted August 1971

Table 33. Monthly mean of air temperature and solar radiation in Hawaii and Okinawa

Monthly mean air temperature													(°C)
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Period
Honolulu, Hawaii	22.5	22.4	22.7	23.4	24.4	25.5	26.0	26.3	26.2	25.7	24.4	23.1	1931-'60
Naha, Okinawa	16.0	16.4	18.1	20.8	23.8	26.0	28.2	27.3	27.1	24.1	21.4	18.1	1941-'70

Monthly mean of short-wave radiation on horizontal surface													(ly/day)
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Period
Wahiawa, Hawaii	365	420	470	500	515	580	575	530	490	410	375	340	1957-'62
Naha, Okinawa	219	264	326	383	390	437	535	494	453	326	253	203	Calculated

に大きな差はない。月別蒸発散量の推移を見ると、沖縄では植え付け後最初の冬にはハワイの同期の値より小さい。ハワイでは2月に2.5mm/dayという大きい値が測定されている。両地で冬季にこのような差があるのは、表33に見られるような気候の差によるものと思われる。ハワイでは冬季の月平均気温は22℃以上であるが、沖縄では各月ともハワイより低く1月には16.0℃まで下がる。水平面日射量は各月ともハワイが大きい、春、秋及び冬には差が著しく、特に12月及び1月にはハワイの59%及び57%となっている。

次に苗を植え付けた翌年の夏の各月の蒸発散量は沖縄が大きい。その理由は、ハワイでは冬季高温なため生育が良く、それに続く夏にはLAIが沖縄におけるより大きくなるので、土壌面蒸発量が沖縄がハワイより多いため蒸発散量は大きくなると考えられる。表33によると夏季の気温は沖縄では約1℃～2℃高い。

苗の植え付け後最初12か月間の蒸発散量を両地で比較すると次のとおりである。ただ、表32中欠測の1960年11月のワヒアワの値は、最大値2.5mm/dayであったと仮定した。11月は苗を植え付けた翌月に当たるので蒸発散量はかなり大きかったと思われるからである。この推定値と表32中の値によると、ワヒアワにおける植え付け後12か月間の蒸発散量は649mmになる。実験A及びBの721mm及び684mmと比較すると、これら三つはワヒアワの11%以内で一致する。

(5) 植え付け期からの積算蒸発散量

図53には沖縄における二つの実験で植え付けから24か月ないし28か月後までの積算蒸発散量を示す。

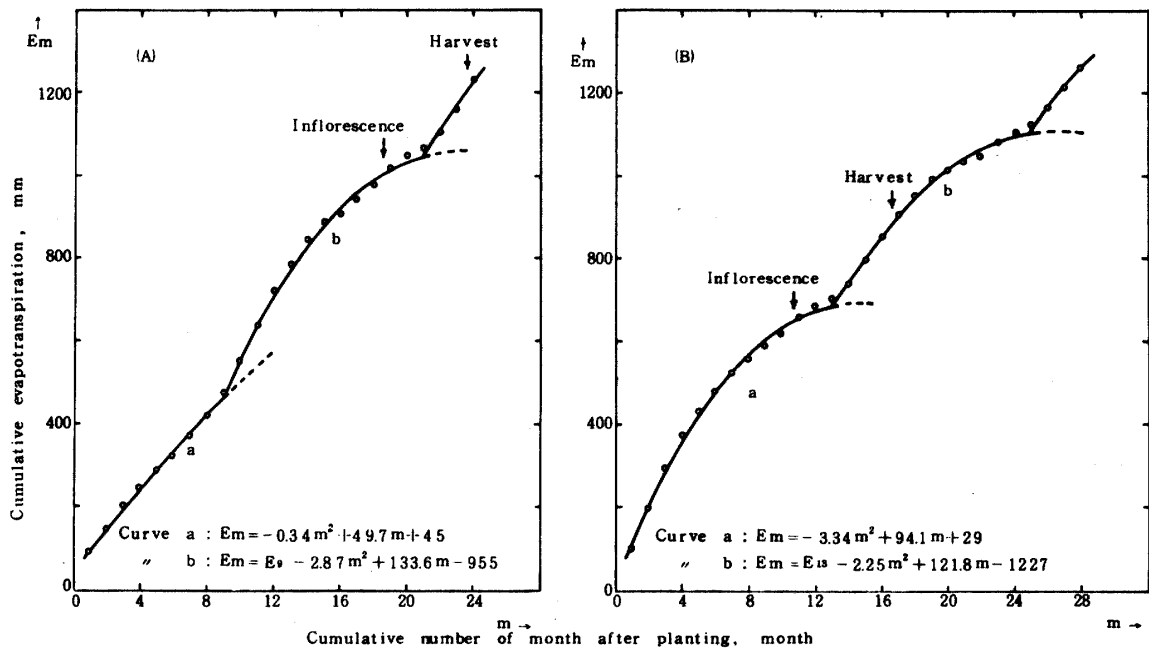


Fig. 53. Cumulative curve of the evapotranspiration

(A): Experiment A, Nago, planted Aug. 1971

(B): Experiment B, Naha, planted Apr. 1971

二つの実験によると、沖縄での積算値は、植え付け時に始まる2次曲線と、毎年5月に始まる各々の2次曲線として、近似的に表わすことができる。これは、蒸発散量が植え付け直後と夏に大きく、冬と春

に小さいためである。

沖縄における蒸発散量の総量を集計すると、実験Aでは植え付け後最初の24か月間で1,231mmになった。この期間は夏植え畑の植え付けから収穫までの期間にほぼ相当する。また、最初の12か月には24か月の蒸発散総量の59%に当たる721mmが測定された。

実験Bでは、植え付け当時の苗の大きさが標準より大きく、しかも春植えであったために、植え付け—収穫の期間は沖縄における標準より短く17か月であった。このため、収穫までの蒸発散量は906mmとかなり小さかった。しかし、植え付け後24か月間量は1,109mmで、実験Aにおける同期間の1,231mmに近い。また、実験Bでは最初の12か月間684mmで、これは24か月間量の62%に当たり、実験Aの59%に良く一致している。

上に示した各値はかんがいを実行可能な範囲で十分に行なったときの値である。一般の畑地ではこの実験のようにかんがいを十分に行なうことは難しい。沖縄ではパイナップル畑のかんがいはほとんど行なわれていないので、一般の畑地からの蒸発散量は上に示した値より小さいと思われる。

(6) 沖縄における水収支から見た蒸発散量

パイナップルの蒸発散量は表31bに示されるように、最大月においてさえ月平均3.4mm/dayである。この値は1971年の厳しい渇水時に、かん水を十分に行ったときの値である。したがって、これは沖縄でかんがいを十分に行なった畑地の蒸発散量最大値に近いと考えられる。この値は月間量にすれば105.4mmに相当する。沖縄島の降水量の平年値は、降水量の少ない冬でも100mm/monthを超える。一方、パイナップルの蒸発散量積算値は、厳しい渇水年にかんがいを十分に行なった場合においてさえ、1年間684mmないし721mmであった。これらは年間降水量平年値の約1/3である。したがって水分補給は、降雨が各月とも平年並の年は自然降雨だけで十分である。しかし、Ⅲ章で示されたように、沖縄では年により長期間または一時的な渇水になる。パイナップルは土壌含水量が不十分なときは栄養生長が遅れ、また、花芽分化期から出蕾期までの長期間の水分不足は出蕾時期を遅らせる上に果実も小さくなる(Ⅳ章)。したがって、このような渇水時にはかんがいはぜひ必要である。

(7) パイナップル畑地へのかんがい

パイナップル畑地へかんがいを行なう場合、1回のかん水量と間断日数を定めるためには、畑地土壌の物理的性質、作物の水分消費型、初期シオレ点などをはじめ多くの要素を測定する必要があるが、ここではかん水量と間断日数を次のように推定した。

パイナップルの根群は深さ40cmまでにはほとんど100%が分布している⁷⁾。また、パイナップルは微砂質壤土で栽培されるものが多いので1回のかん水量は38.1mmと推定される¹⁴⁾。この値と、夏植えの標準である植物体の蒸発散量測定値(表31a)から干天が続いたときの間断日数を推定すると表34のとおりである。

表34によると、干天が続いた場合に沖縄では、植え付け直後と、栄養生長中期を夏に迎える畑地に対しては約2週間に1回かん水し、1回のかん水量を約40mmとしてかんがいを行なうことが望ましい。

(8) フェイトロン内蒸散量測定結果と野外蒸散量及び畑地蒸発散量の関連性

表35はフェイトロン実験から得られた蒸散量計算式(8)を利用して求めた野外蒸散量計算値と実測値の比較を示す。表中実測値は表26に示す値である。

パイナップルの栄養生長期である春(3月)から秋(9月)までは計算値と実測値はよく一致している。両者間にはわずかの差があるが、これは湿度と風速がフェイトロン内と野外で異なることが主な原因と考えられる。12月は両者の差がかなり大きい、これは冬になって野外の湿度が低く季節風も強く、また、植物体は花芽分化期に入っているため測定条件が異なっているためと考えられる。

表36はフェイトロン実験を利用して求めた蒸発散量推定値と実測値の比較を示す。

推定値はフェイトロン実験から得られた蒸散量計算式による値に、土壌面蒸発量推定値を加えたも

Table 34. Estimated irrigation interval for pineapple field in Okinawa

	Growth stage		
	Right after planting	Middle of vegetative growth stage	End of vegetative growth stage
	Sept. 1971	Aug. 1972	Oct. 1972
Evapo-transpiration (mm/day)	2.9	2.8	1.9
Irrigation interval (day)	13	14	20

Table 35. Comparison of transpiration between calculated amount based on the measurement in the phytotron and that measured in the field

		1970 Mar.	June	Sept.	Dec.
Monthly mean of air temperature	(°C)	15.8	25.4	27.0	17.8
Monthly mean of incoming short-wave radiation on horizontal surface	(ly/day)	198	382	340	176
* Monthly mean of relative humidity	(%)	76	86	79	72
Leaf area	(cm ²)	3,490	5,358	9,883	12,548
Calculated transpiration	(mm/day)	0.06	0.60	1.13	0.25
Measured transpiration	(mm/day)	0.10	0.45	0.98	0.52

* value for normal year

Table 36. Comparison of evapotranspiration between estimated amount based on the transpiration measurement in the phytotron and that measured in a pineapple field

	1972 Mar.	June	Sept.	Dec.
Monthly mean of air temperature (°C)	17.2	26.1	25.9	18.3
Monthly mean of incoming short-wave radiation on horizontal surface (ly/day)	319	349	321	212
*Monthly mean of relative humidity (%)	76	86	79	72
Estimated rate of bare soil surface to whole surface (%)	50	40	20	15
Leaf area (cm ²)	3,490	5,358	9,883	12,548
Calculated evapotranspiration (mm/day)	1.6	2.2	1.9	0.8
Measured evapotranspiration (mm/day)	1.6	2.5	2.2	0.4

* value for normal year

のである。土壌面蒸発量は、裸地面では計器蒸発量の80%¹⁶⁾とし、全地表面に対する裸地面の面積が各月ごとに表に示す割合になっているとして推定した。実測値は、植物体の季節別の生育段階がファイトトロン実験のものと類似している畑地の実測値(表31a)である。

表36に見られるように、蒸発散量推定値と実測値はかなりよく一致している。両者間に差を生ぜしめる要因としては、土壌面蒸発量推定による誤差、ファイトトロン内と畑地との風速、湿度の差、及び個体と群落の日射の受け方の違いなどが考えられる。このような要因があるにもかかわらず、表36に見られるように両者がよく一致していることは、蒸発散量の近似値としてファイトトロン実験結果に基づく推定値を使っても信頼度が高いことを示すものである。

3. 蒸散量及び蒸発散量についての要約

1) パインアップルの蒸散量

パインアップルの蒸散量について、苗の植え付け後から収穫後までのほとんど全期間、琉球大学構内で野外測定実験を行ない、また栄養生長期中期に2か月間、九州大学ファイトトロンで行なった。これらの実験は、スムースカイエンの苗をポットに砂栽培した供試体により、土壌含水量を十分に保った状態で行なった。結果は次のとおりである。

(1) 沖縄の蒸散量最大値は生育中期の夏に測定され、3日平均で1.0mm/dayになっている。

(2) 栄養生長期の蒸散量は気温との相関が高く、両者の相関係数は+0.97になっている。蒸散量と水平面日射量との間の相関係数は+0.84であった。これらは統計的有意性が認められる。

(3) 出蕾期から収穫期以後までの蒸散量は著しく減少している。これは、植物体内における生理的原因によると推察される(図37, 図38)。

(4) 生育中期の蒸散量は、気温の上昇とともにS字状のカーブを描いて増加し、気温が約20℃を超すと蒸散量は急に増加し、25℃を超すと増加は緩やかになる(図46)。

(5) この実験のファイトトロンと同じ環境条件下では、生育中期の蒸散量E (mg/cm/day) と気温T (℃) 及び水平面日射量R (ly/day) との関係は、次の実験式で表わすことができる。

$$E = \frac{10.9}{1 + 1175610e^{-0.620T}} + (0.00304T - 0.0284)R$$

2) パインアップル畑の蒸発散量

パインアップル畑地からの蒸発散量を2年余にわたって植え付けから収穫までの各時期に測定した。主な結果は次のとおりである。

(1) 植え付け後12か月間の蒸発散量は二つの実験でそれぞれ721mm及び684mmであり、これらは植え付け後24か月間蒸発散量のそれぞれ59%及び62%に当たる。旬平均最大値は苗を植え付けた翌月に測定され、4.4mm/dayになっている。この値は土壌面蒸発量にほぼ等しい。

(2) 蒸発散量は植物体の葉面積指数の増加につれて減少する傾向が見られる。植物体の生育が盛んな5月から同年10月初めまでについて、両者の関係を求めた結果、式(13)の関係が得られた。

(3) 生育中期及び末期に、月平均蒸発散量と気温及び水平面日射量との間の相関を調べたところ、相関係数はそれぞれ+0.91及び+0.82であった。蒸発散量と気温及び水平面日射量との偏相関係数は、それぞれ+0.80及び+0.55である。蒸発散量と気温との間には統計的有意性が認められたが、蒸発散量と水平面日射量との相関は有意性が認められなかった。

(4) 沖縄では、月間降水量が平年並またはそれ以上あるときは、パインアップル畑への水分補給は自然降雨のみで十分であるが、渇水が続くときはかんがいは必要である。

付 録

栄養生長期のパインアップル蒸発散量は葉面積指数の増加につれて減少する傾向がある。これを見るためには実測蒸発散量に対して、生育途中の相異なる気温や日射量などの影響を補正しなければならない。補正の一つの方法としてPenmanの水面蒸発式⁴⁴⁾を利用する方法が考えられる。

1) Penmanの水面蒸発式

$$E_0 = \frac{H\Delta + rE_a}{\Delta + r}$$

$$E_a = 0.35(1 + 9.8 \times 10^{-3}U_2)(e_a - e_d)$$

ここで、 E_0 ：水面からの蒸発量， H ：純放射， Δ ： de_a/dT_a ， r ：定数， U_2 ：高さ2mの風速 mile/day， e_a ：気温 T_a のときの大気の水蒸気圧， e_d ：水蒸気圧である。

2) 補正の方法の根拠

(1) 任意の気温、日射量、湿度及び風速のときのパインアップル畑地の蒸発散量を E_t 、同じ条件下の水面蒸発量を E_0 とする。基準値として、気温25℃、水平面日射量350ly/day、湿度80%、高さ10mの風速が5m/sのときの蒸発散量を E_{ts} 、水面蒸発量を E_{0s} とする。このとき次の式が成り立つと仮定する。

$$E_{ts} = E_t \frac{E_{os}}{E_o}$$

この E_{ts} を補正された蒸発散量とする。

(2) アルベドは Ekern⁷⁾ 及び筆者の測定値によると、パインアップル植被下で 0.12 ~ 0.15, 湿润土壤面 0.10 ~ 0.12⁸⁾, 乾燥土壤面 0.15 ~ 0.18 である。これらは近似的に等しいとみて 0.15 とする。したがって葉面積増加による畑地のアルベド変動を無視してよい。

(3) この実験では湿度及び風速の観測を行なわなかったため、沖縄気象台(直線距離 3.5km)の値を使う。実験を行なった場所は風通しがよかった。

(4) 補正のための計算はすべて旬平均値で行なう。したがって湿度と風速に気象台の値を使っても誤差は小さい。

(5) U_2 は次の式により求める。

$$U_2 = U_{10} \frac{\log_{10} \frac{200-d}{Z_0}}{\log_{10} \frac{1000-d}{Z_0}}$$

ここで、 U_{10} は気象台の風速、 d 及び Z_0 はそれぞれ地面修正量と粗度の長さである。 d 及び Z_0 は、補正の対象となる期間中のパインアップル生育状況と、谷⁷⁾の値を考慮して、平均値として 30cm 及び 5cm とする。

(6) 夏から秋の初めまでは、沖縄の昼間有効放射は N 章に示されたように 30ly/daytime としてよい。

3) E_o の計算例

気温 21.3°C, 水平面日射量 331ly/day, 湿度 73%, U_{10} が 4.6m/s のとき,

$$H = \{ 331 \times (1 - 0.85) - 30 \} \div 590 \text{ cal/g} \times 10 \text{ mm/day} = 4.26 \text{ mm/day}$$

$$\Delta_{21.3^\circ\text{C}} = \{ (26.92 \text{ mb} - 25.32) + (25.32 - 23.81) \} \div 2 = 0.648 \text{ mm-Hg/}^\circ\text{F}$$

$$r = 0.27, \quad U_2 = 165.3 \text{ mile/day}, \quad e_a = 25.32 \text{ mb}, \quad e_d = 18.48 \text{ mb},$$

$$e_a - e_d = 5.13 \text{ mm-Hg}$$

以上の値を使うと $E_o = 4.39 \text{ mm/day}$ 。同様にして E_{os} は気象要素の基準値を使って求められる。

4) 補正の結果

図 54 にはこのように補正した蒸発散量と LAI の関係を示す。

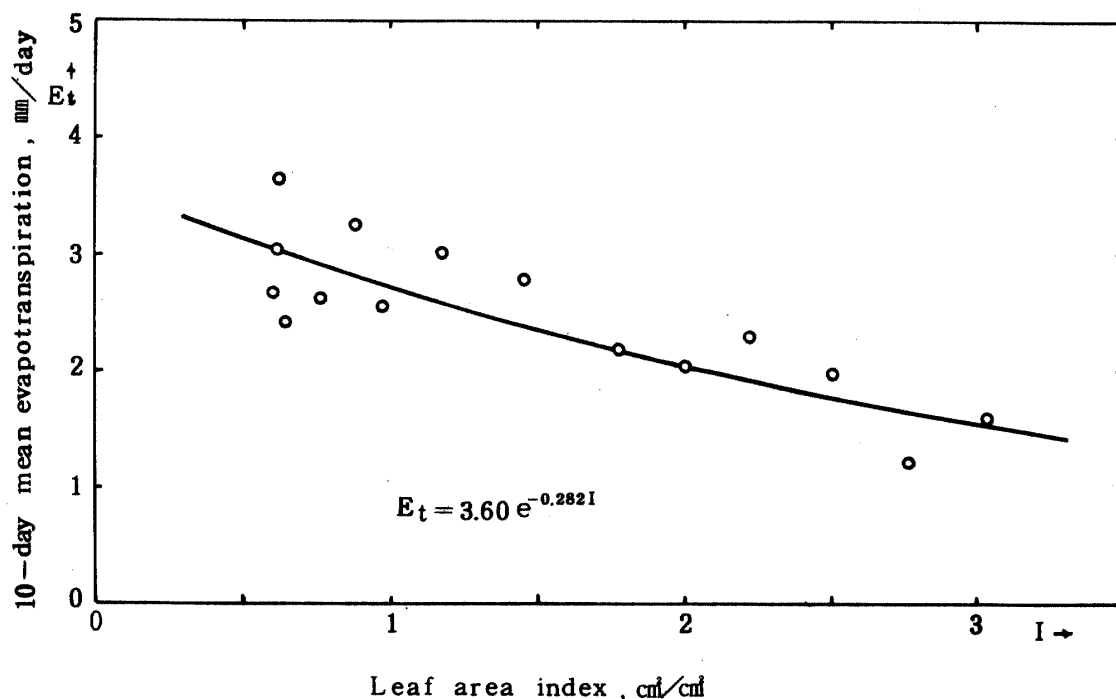


Fig. 54. Relationship between the evapotranspiration and leaf area index

Ⅵ 沖縄におけるパインアップル作と気象災害

沖縄では台風、干ばつ及び豪雨などの気象災害があり農作物に大きな被害を及ぼすので、これが農業の発達に大きな障害になっている。

沖縄における農作物に及ぼす気象災害についてはいくつかの研究があるが、主に個々の災害を取り扱ったものが多い。本村³²⁾は宮古島の干ばつに際して気象要素の平年値からの偏差に着目し、干ばつは強い干天の一時的継続よりも、長期間の少雨傾向が続くときに被害が大きくなることを指摘している。琉球中央農業研究指導所^{46,47)}ではサトウキビ品種について台風及び渇水に対する抵抗性の試験を行ない、強い品種を見いだした。北村ら²¹⁾は沖縄における畑作物の最低必要水分量を求めた。更に、干害が現れる雨量の最少限度を求めた。糸数¹⁵⁾は主要作物の収量と気象要素との相関を求めた。しかし、パインアップルの気象災害についての研究はほとんど行なわれていない。また、上に挙げた研究では、沖縄全体としての被害高の規模や各作物の災害に対する抵抗性の差などは、明らかにしていない。

筆者は、沖縄におけるパインアップル栽培の将来性を知る目的で、各種気象災害の被害程度を調べ、更に、パインアップルと他の主要作物の抵抗性も比較した。その結果、パインアップルは他の主要作物に比べて各種の気象災害に対する抵抗性が強いことが明らかになり、また、パインアップルを含む各主要作物の被害高の規模も知ることができた。

1. 資料及び調査の方法

研究に使用した資料は主に沖縄の本土復帰以前の旧琉球政府及び日本政府農林省^{26,54)}の資料である。調査の方法は、被害の大きさを便宜上被害金額で表わした。金額を円で表わすには復帰以前の1ドル

を305円として換算した。年ごとの物価変動は復帰以前沖縄における唯一の物価指数として認められた小売物価指数⁵²⁾により1970年を基準にして補正した。このように表示した被害高を使用して、被害高の規模、被害の現われ方及び抵抗性を調べた。

なお、パインアップルの低温被害調査は、被害額によらず、各収穫年期の果実収量で行なった。

被害高との比較のために、沖縄の主要作物生産高の規模を、1970年を例にとり示すと表37のとおりである。

Table 37. Amount of the yield of main crops of Okinawa in 1970

	Approximately	10,900	million yen
Sugar cane			
Sweet potato	"	2,600	"
Pineapple	"	1,300	"
Rice	"	800	"

これらの各作物の生産高は、災害資料のある1963年から1971年までは年により多少の変動があったが、各年の値はほぼ上に示す程度であり、したがって、各作物生産高の順位も変動はなかったと考えてよい。

2. パインアップル作に与える気象災害

1) 台風及び豪雨⁶²⁾

沖縄では台風襲来ひん度が大きく、平均して1年に1回ないし2回、台風に伴う最大平均風速24.5 m/s以上の強風を観測している。また、最大風速も非常に大きく、沖縄各地のリターンピリオドは平敷ら¹³⁾によると表38に示すとおりである。

Table 38. Return period of maximum mean wind velocity by typhoons¹³⁾

Return period (year)	Location		
	Naha	Ishigaki	Hirara
5	36.7	31.0	39.6
10	41.0	36.0	45.6
20	45.1	40.7	51.2
50	50.4	46.8	58.6
100	54.4	51.3	64.1
200	58.4	55.9	69.6

ここに示す台風の影響は、強風による機械的破壊作用、台風に伴う豪雨、高潮及び塩風などの被害を含むものである。

(1) 全農作物の台風被害額

表39には作物別に各年の台風被害額を示す。

Table 39. Amount of the damage of each crop by typhoons and its rate to the total, total of all Okinawa

(million yen)

	Sugar cane	Sweet potato	Rice	Pine- apple	Vege- tables	Fruits	Others	Total
1964	497	10	—	—	17	46	—	570
1965	359	35	5	10	102	45	—	556
1966	2,226	75	3	39	60	31	—	2,434
1967	81	47	131	—	57	14	2	332
1968	900	62	35	63	120	66	—	1,246
1969	1,198	73	64	255	431	103	—	2,124
1970	426	37	67	—	189	3	—	722
1971	117	8	4	48	23	5	—	205
Total	5,804	347	309	415	999	313	2	8,189
Rate	0.71	0.04	0.04	0.05	0.12	0.04	0.00	1.00

この表によると、沖縄では毎年のように農作物被害があり、多い年には約24億円、少ない年でも数億円に達する。サトウキビの被害は特に大きく、8か年間では全農作物被害額の71%を占めている。パインアップルの被害額はかなり小さく、他の作物にある程度被害があった年においても被害報告がない年がかなりある。

(2) 台風別の被害額の大きさ

表40には資料のある1964年以降の主な台風のうち大きい被害を与えたものを示す。

表によると沖縄における一つの台風による被害額の規模が推定できる。被害の最大は第2宮古島台風によるもので14億円を超えた。これは1967年7月の西九州豪雨による長崎県または佐賀県の農作物被害額⁵⁷⁾に匹敵する。被害額のほとんど全部が小さな島から成る宮古島地区と八重山(石垣)地区だけのものであり、台風被害の厳しさを示している。もし、宮古島台風クラスの大型台風が農業生産規模の大きい沖縄島付近を通過したならば、被害は更に大きくなったものと思われる。

(3) 最大風速と被害額との関係

図55には台風による最大平均風速と全農作物被害額との関係を示す。

この図ではかなりの散らばりがある。その理由は次のように考えられる。

Table 40. Amount of the damage of all crops by major typhoons, 1964-1971

Year	Name of typhoon	Amount of damage (million yen)	Highest mean wind velocity (m/s) and place of observation	Mainly damaged area
1964	No. 5	570	ENE 38.3, Miyakojima	Miyakojima
1966	No. 16	993	NE 36.3, Naha	Okinawa Group
"	No. 18, 2nd Miyakojima Ty.	1,442	NE 60.8, Miyakojima	Miyakojima and Yayeyama
1968	No. 16, 3rd Miyakojima Ty.	1,246	NE 54.3, Miyakojima	Miyakojima and Okinawa Group
1969	No. 9	1,013	ESE 34.8, Naha	Okinawa Group
"	No. 11	942	NE 32.8, Ishigakijima NE 41.0, Miyakojima	Yayeyama and Miyakojima
1970	No. 2	645	SW 29.2, Miyakojima	All Okinawa

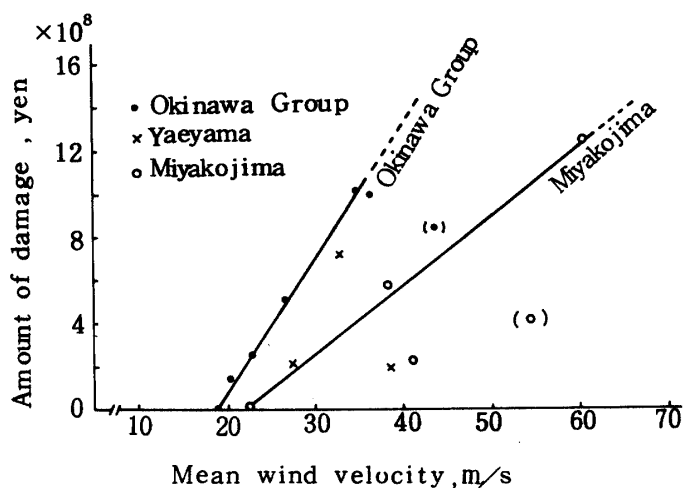


Fig. 55. Relationship between the amount of typhoon damage of all crops and maximum wind velocity

- i) 沖縄群島（沖縄島及び周辺離島），八重山及び宮古島の各地区では農作物生産高の規模が異なる。
- ii) 石垣島地方気象台の風速は地形の影響で北寄りの風は低めに観測される^{18,30)}。
- iii) 干ばつなどの被害が先行すると台風による被害は小さくなる。

IV) 強風の持続時間の長短，豪雨，塩風，または高潮の有無及び農作物の生育段階の差により被害は異なる。

V) 台風通過時に風向きが急変する（例えば台風が中心が通過する）と被害は大きくなる²⁸⁾。

しかし，図 55 から分かることは，最大風速 20 m/s 以下では農作物被害はあまり発生しない。また，宮古島地区では最大風速と被害額との関係はかなりバラついている。それぞれの台風の性格とサトウキビの生育状況により被害程度が異なる。例えば北野²⁸⁾は，第 3 宮古島台風通過時には風向の急変がなく，また，台風襲来の前後に降雨が順調で生育がよかったため，被害が少なかったとしている。図 55 中の 2 本の直線関係から見て，最大風速が等しいならば沖縄群島地区では宮古島地区のほぼ 2 倍ないし 2.5 倍の被害を受けると推定される。八重山地区はこの資料では最大風速と被害額との関係は明らかでない。

(4) 最大風速と被害率との関係

図 56 には台風による最大平均風速とサトウキビ被害率との関係を示す。

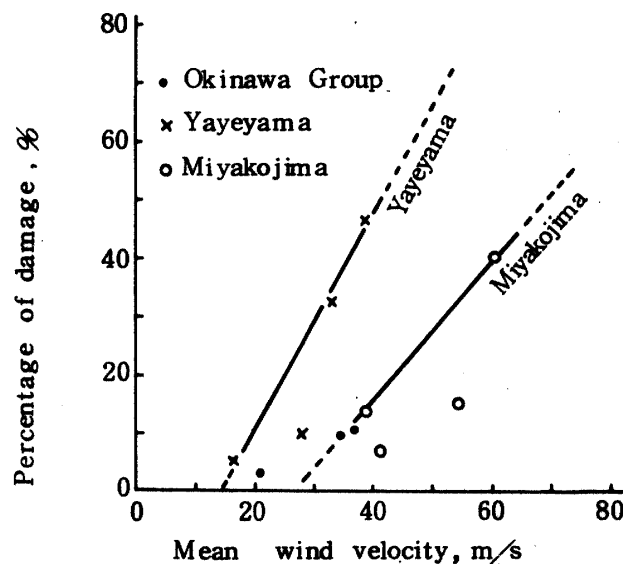


Fig. 56. Relationship between the rate of typhoon damage of sugar cane and maximum wind velocity

図によると，八重山地区と宮古島地区では，最大風速と被害率との関係はほぼ図上の二つの直線で表わし得る。この直線関係から，これら両地区では最大風速とサトウキビ被害率の関係はほぼ表 41 に示すようになると推定される。

サトウキビ以外の他の作物について，最大平均風速と被害率との関係は図 57 のようになる。

図上の点の散らばりが大きく，両者の関係を見いだすことは困難である。その理由は，これらの各作物の被害の受け方が生育段階によって異なるからであろう。被害率と風速との関係を知るには，長年にわたって各生育段階別資料を整える必要がある。

(5) 各農作物の台風被害の現われ方

沖縄の各主要作物においては，被害と最大風速との関係を決定する多くの要素があり，これらの要素が総合されて被害率が決まり，抵抗性も決まる。以下に冬農作物の被害の現われ方の特性を述べる。

Table 41. Relationship between the rate of typhoon damage of sugar cane and maximum mean wind velocity

(%)

Area	Mean wind velocity (m/s)				
	25 less than 10	30 less than 10	40 16	50 28	60 40
Miyakojima					
Yayeyama	19	29	48	66	more than 80

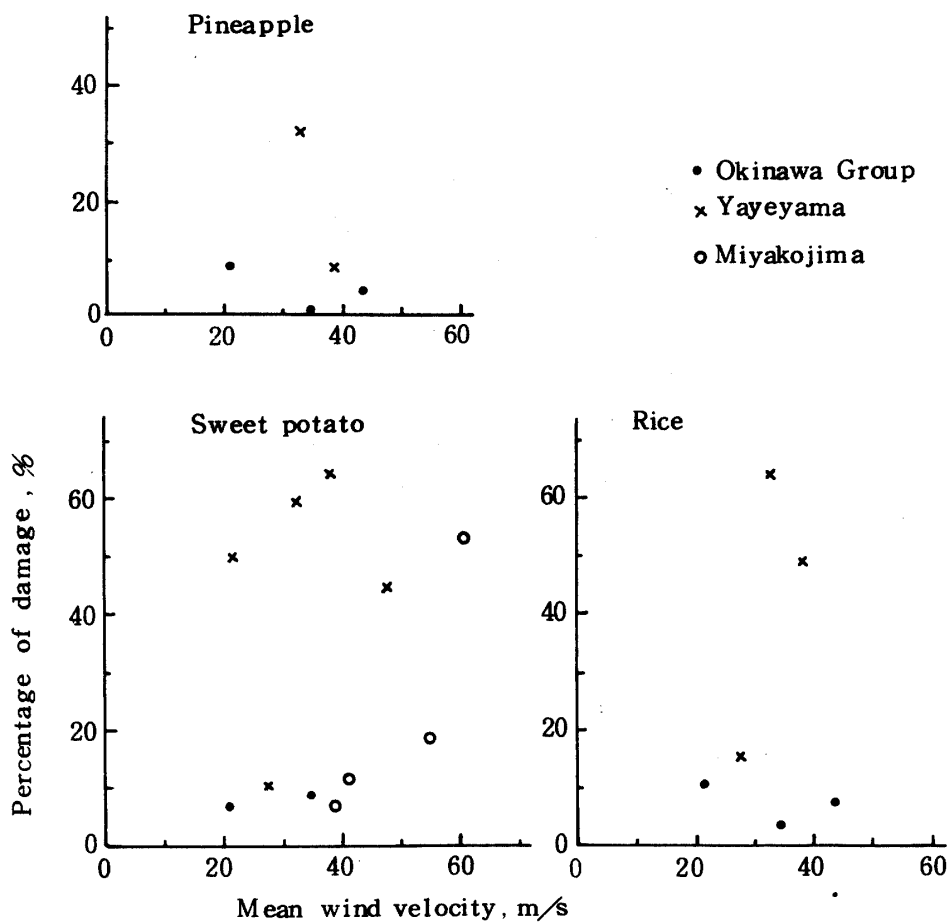


Fig. 57. Relationship between the rate of typhoon damage of some crops and maximum wind velocity

サトウキビ

- i) 草丈が高く倒伏しやすい。風向の急変により茎の折損を起しやすい。
- ii) 沖縄各地で栽培されているので毎年のようにどこかで台風の影響が現れる。
- iii) 収穫時期は冬-春であるので台風期は常に栄養生長期に当たる。
- iv) 植え付け後間もない苗は台風に伴う豪雨で埋没したり流失したりする。

パインアップル

- i) 草丈は低く、強じんなため強風に強い。
- ii) 果実は盛夏までかなりの量が収穫されるので台風を回避できる年が多い。
- iii) 山腹の傾斜地に栽培されるものが多く被害は地形の影響を受けやすい。
- iv) 栽培は酸性土壌の地域に限られるので年により台風の進路から外れることがある。
- v) 栄養生長期にある植物体は、しん部の生長点付近に土砂が入るとしん腐れ病を起こすことがある。また、植え付け後間もない苗は強風に飛ばされたり、豪雨で埋没流失したりする。

サツマイモ

- i) 畑地が冠水すると腐敗しやすくなる。
- ii) 潮風害を受けやすく、特に小さい離島では被害率は大きくなる。
- iii) 草丈が低いので強風そのものには強い。
- iv) 収穫される部分が地下にあるので被害の程度が判別しにくい。

水稻

- i) 高潮や豪雨の被害を受けやすい。
- ii) 生育段階により被害の大きさが著しく異なる。出穂期前後の被害は特に大きい。
- iii) 栽培地域は局地的であるので台風進路の差により被害の大きさが異なる。

上記により、沖縄の各農作物の台風被害高は最大風速だけではなく、多くの要因によって決まる。したがって図 57 に示したように、最大風速と被害率との関係は短期間の資料で表わすことは難しい。このため、これらの各作物の台風に対する抵抗性の差を明確に見分けることはできない。しかし、図 56 と図 57 を比較するとき、サトウキビとサツマイモは被害率 30% ないし 60% に達するものがあり、パインアップルは他の作物よりも台風に対する抵抗性が強いと見てよい。

(6) 豪雨による農作物の被害

沖縄では台風以外の影響による豪雨は、ほとんど 4 月 - 6 月の梅雨を含んだ雨期に起こっている。沖縄各地のこの季節の降雨強度を表 42 に示す。

表中の最大日降水量は、梅雨期としては本土各地の値⁷⁵⁾と比べて特に大きいとは言えない。一方、最大 1 時間降水量は、本土各地の値と比べると大きいほうに属する。これらの点から見ると、沖縄の豪雨は短時間の降り方ははげしいが長時間降り続けるものは多くない。

表 43 には資料の得られた過去 8 年間において、台風以外の原因による豪雨被害額を示す。

表によると豪雨の被害は大きいほうではない。8 か年の資料で被害の規模を知ることは難しいが、同じ年間の台風被害と比べると大きくない。その理由は次のとおりである。

- i) 河川は短く集水面積が小さい。
- ii) 地滑り、崩壊などを起こす軟弱地盤は局所的に存在するだけである。
- iii) 広大な海域に散在する多くの島から成るので、集中豪雨が仮にあってもこれを分散した形で受け止める。
- iv) 梅雨前線上の豪雨は、ほぼ周期的に前線を東進する波動性低気圧によるものが多く、また、前線も長時間停滞しない。
- v) 高い山がなく、地形的な上昇気流が顕著でない。

Table 42. Record of maximum rainfall until 1970

(mm)

		April	May	June	Number of years of statistics
Maximum daily rainfall	Naha	351.8	206.1	200.3	80
	Ishigaki	269.1	194.4	291.6	74
	Hirara	178.6	226.2	331.7	32
Maximum hourly rainfall	Naha	74.6	79.4	76.1	65
	Ishigaki	59.2	95.4	84.7	74
	Hirara	138.0	83.5	91.2	32

Table 43. Amount of the damage of crops by heavy rain, All Okinawa, 1964-1971

(million yen)

	Sugar cane	Sweet potato	Rice	Pine-apple	Vegetables	Fruits	Others	Total
1966	20.0	1.5	55.5	—	76.8	—	49.5	203.3
1970	0.2	0.2	—	—	16.0	—	—	16.4
Total	20.2	1.7	55.5	—	92.8	—	49.5	219.7

1964 Rice paddy flooded 2,380 a, rice paddy covered with mud 50 a, Sugar cane field flooded 2,011 a

1965 Rice paddy flooded 830 a, sugar cane field flooded 422 a, pineapple field washed away 10 a

1969 Nakijin-son: Leaf tobacco damaged 50%, water melon damaged 90%
Haneji-son: Rice plant lodging 145 a, pineapple field covered with mud 15 a, sugar cane field covered with mud and washed away 28 a

- Note 1. No damages by heavy rain accompanied by typhoons are included in the table.
2. No damages were found recorded in available data for 1964-'71 other than listed above.

パインアップルの豪雨被害は、表 43 に見られるように小さい。これは山腹や傾斜地に栽培されるものが多いためであって、被害は局地的な崩壊や苗の埋没流失などによるものであり、広域にわたる被害は少ない。このほか、パインアップルがその草姿の上から雨を株上に分散させ、土壌の流亡を少なくする。沖縄における豪雨被害には、また、土壌浸食による土壌流亡や、それによる海浜の汚染がある。

2) 干ばつ

沖縄では干ばつは台風と並んで大きな気象災害になっている。大きい干ばつの年には大型台風の3倍以上に達する被害を受ける。

(1) 沖縄における干ばつのひん度

琉球政府気象庁（現在沖縄気象台）の資料⁵⁸⁾によると、干ばつ記録は表 44 に示すとおりである。

Table 44. Record of drought in Okinawa⁵⁸⁾, 1900-1971

Year	Literature	Severeness	Area of major damage and period
1902	Ishigakijima kishosaigai Shiryō		Okinawa Group (Feb.-Apr.) Yayeyama and Miyakojima (Aug.-Oct.)
1903	" "		Miyakojima (May-Sept.)
1904	Ryukyu-Shi Jiten	Severe	Okinawa Group (Sept.-Dec.)
1910	Ishigakijima Kishosaigai Siryo		Yayeyama (May-July)
1911	" "		Okinawa Group, Yayeyama (Mar.-July)
1917-'18	" "		Okinawa Group (Nov.-Apr. next year)
1920	" "		Yayeyama and Miyakojima (Oct.-Dec.)
1923	" "		Okinawa Group (Jan.-May)
1929	" "		Yayeyama and Miyakojima (Feb.-Apr.)
1931-'32	" "		Okinawa Group (Dec.-Feb. next year)
1939	" "		Yayeyama (Jan.-Mar.)
1946	" "		Okinawa Group (Jan.-Apr.)
1948	" "		Okinawa Group (Jan.-May) Yayeyama and Miyakojima (Sept.-Nov.)
1950	" "		Yayeyama (June-Sept.)
1952	Ijo-Kisho Hokoku		Okinawa Group (Sept.-Oct.)
1958	" "		Yayeyama (Mar.-May)
1963	" "	Severe	Okinawa Group (Mar.-Sept.)
1967	" "		Southern part of Okinawa Isl. (Jan.-Mar.) Kumejima and Northern part of Okinawa Isl. (autumn-winter)
1971	" "	Severe	Okinawa Group (Feb.-Aug.) Yayeyama and Miyakojima (Mar.-Sept.)

表によると4か月以上も続く干ばつは20世紀に10回あり、これは平均して約7年1回に当たる。6か月以上続く干ばつは3回起こっており、これは平均約24年1回の割合になる。

(2) 干ばつによる農作物被害

表45には干ばつによる農作物被害額のうちで資料の入手できた1963年以降の分を示す。

次に1963年と1971年の二つの干ばつにおける各地の降水量とその平年比を表46に示す。

Table 45. Amount of the drought damage of each crop and its rate to the total, All Okinawa, 1963-1971 (million yen)

	Sugar cane	Sweet potato	Rice	Pine-apple	Vegetables	Fruits	Others	Total
1963	3,853	162	270	382	?	?	?	4,667
1967	351	1	57	-	-	-	-	409
1968	1	-	-	-	-	-	-	1
1971	3,499	140	74	224	112	13	82	4,144
Total	7,704	303	401	606	(112)	(13)	(82)	9,221
Rate	0.84	0.03	0.04	0.07	(0.01)	(0.00)	(0.01)	1.00

Table 46. Monthly rainfall in drought year and in normal year. Percentage to normal year is in parentheses (mm)

		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
1963	Naha	62 (50)	49 (42)	40 (26)	39 (27)	15 (06)	75 (23)	64 (37)	224 (89)	166 (109)	40 (27)	48 (32)	148 (106)	970 (46)
	Ishigaki	75 (60)	31 (29)	114 (89)	31 (22)	1 (00)	153 (59)	32 (20)	26 (14)	320 (145)	83 (49)	151 (74)	256 (151)	1273 (61)
	Hirara	59 (43)	51 (38)	55 (39)	8 (05)	5 (02)	266 (87)	19 (09)	60 (26)	337 (178)	31 (18)	84 (53)	324 (185)	1299 (58)
1971	Naha	87 (70)	23 (20)	28 (18)	81 (57)	41 (17)	180 (56)	38 (22)	158 (62)	72 (47)	210 (141)	367 (243)	207 (148)	1492 (70)
	Ishigaki	147 (118)	91 (86)	24 (19)	6 (04)	41 (18)	26 (10)	58 (37)	49 (26)	363 (165)	123 (73)	119 (59)	67 (39)	1114 (53)
	Hirara	126 (91)	132 (97)	41 (29)	24 (14)	16 (07)	14 (05)	42 (20)	55 (24)	212 (112)	171 (101)	273 (171)	220 (126)	1326 (59)
Normal year	Naha	124	116	154	142	244	320	174	253	152	149	151	140	2119
	Ishigaki	125	106	128	141	228	260	158	191	220	168	203	170	2098
	Hirara	138	136	141	166	226	305	210	233	189	169	160	175	2248

表45中の被害額を台風被害額(表40)と比べると、干ばつ被害は第2宮古島台風による最大の被害の3倍以上に達する。1963年の干ばつ被害額は、当時の琉球政府一般会計予算の約4分の1に当たる大きいものであった。

(3) 干ばつによる各農作物被害率の比較

表47a及び表47bには1963年及び1971年の干ばつ資料^{22,53)}による被害率を示す。

Table 47. Rate of the damage of crops in each area of Okinawa in the droughts of 1963 and 1971

a: Yayeyama area in the drought of 1963²²⁾ (%)

	Sugar cane	Pineapple			Rice	Sweet potato	Banana	Vege- tables
		(1)	(2)	(3)				
Ishigaki-Shi	56	25	20	20	60	77	94	96
Ohama-Cho	60	25	20	20	36	78	95	94
Taketomi-Cho	67	24	20	20	36	80	93	97

Note 1. Pineapple (1) : 1963-'64 harvest (2) : 1964-'65 harvest
(3) : 1965-'66 harvest

2. The rates in the table include the damage by Typhoon No. 14 that terminated the drought.

b: Each area of Okinawa in the drought of 1971⁵³⁾ (%)

	Sugar cane	Pine- apple	Rice	Leaf tobacco	Cucum- ber	Sweet potato	Peanuts	Vega- tables
Miyakojima	90.4	—	—	63.8	95.0	58.6	100.0	98.2
Yayeyama	78.1	33.7	24.6	55.2	—	30.0	—	94.6
Okinawa Group	29.3	13.6	70.0	—	13.0	26.1	100.0	71.2
All Okinawa	63.6	31.7	25.2	62.8	46.7	33.3	100.0	89.2

次に、図58には1971年の干ばつが与えた各市町村の被害と、同年3月-8月の総降水量との関係を示す。

これらの表及び図によると、サトウキビは渇水に弱く被害率が高い。リンナップル被害率の最大は1971年八重山の33.7%でサトウキビに比べると小さく、リンナップルは渇水に対して比較的強い。しかし、これは1971年の渇水期間中に花芽分化期-出蕾期にかなりの降雨があったためである。仮に、栄養生長最盛期から出蕾期まで強い渇水が引き続いて起こっていたとすれば、被害率は更に大きくなったであろう。

サツマイモや水稲は、渇水の年により、また、地域により被害率にかなりの差がある。その理由は地形による地下水位の高低や、作物の生育段階の相違により被害に差が出来ることが考えられるが、特に水稲はかんがい用水が得られるか否かによって大きな差が生ずる。

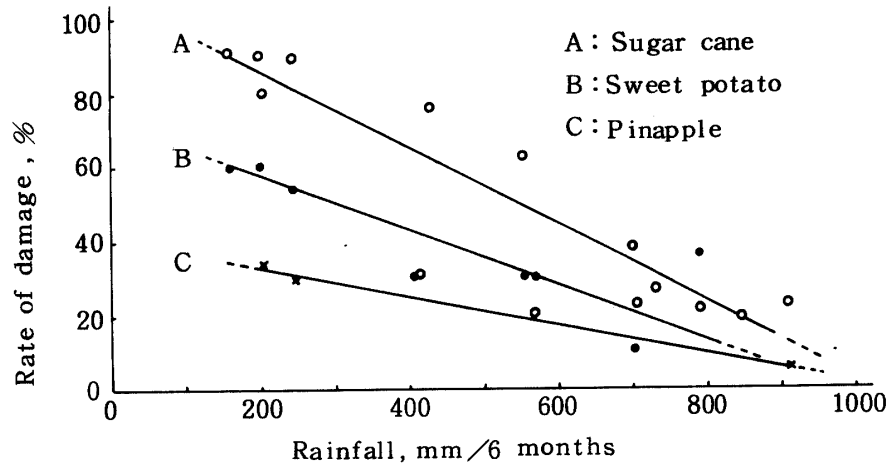


Fig. 58. Relationship between the rate of the damage of main crops and total rainfall in March through August in the drought of 1971

(4) 渇水がパイナップルの栄養生長、出蕾時期、収穫時期及び果実重量に及ぼす影響
パイナップルは渇水に強いほうであるが、強い渇水の際には被害は無視できない。

パイナップル畑地に対するかんがいの必要性を知るために、渇水が生育に及ぼす影響について二つの実験を行なった。一つは栄養生長期に比較的長期間無かん水状態下にある供試体の生長の遅れを見る実験と、他は、花芽分化期まで順調に生長させ、その後長期間無かん水状態にして、出蕾時期、収穫時期及び果実重量に現われる影響を見る実験とを行なった。

Photo. 5は実験に使用した簡易ハウスの状況を示す。

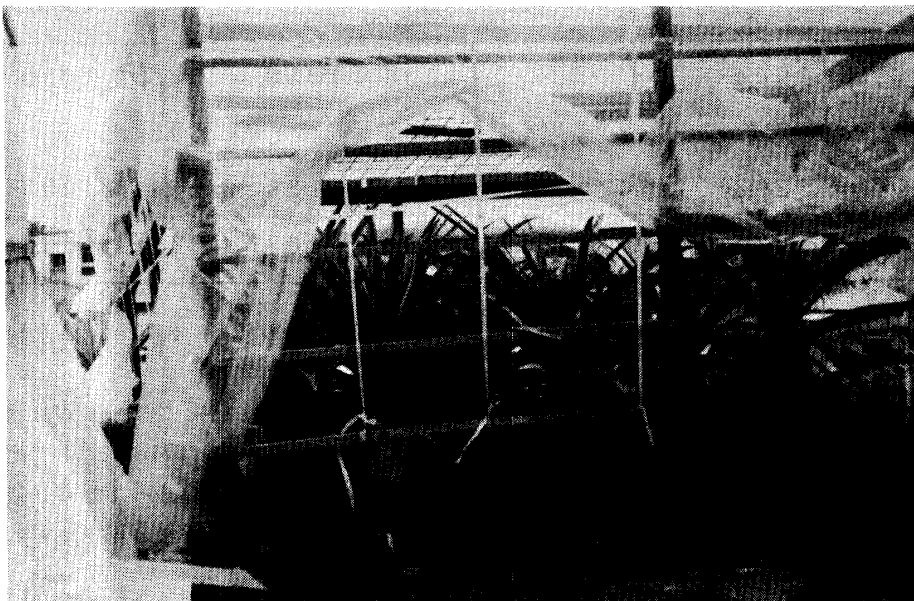


Photo. 5. Makeshift vinyl house for experiments to study the effect of the dearth of water

二つの実験は、上縁の直径 35.5 cm、底の直径 28.2 cm、深さ 26.8 cm のポリエチレン容器に栽培したスモースカイエンの供試体を使って行ない、栽培には川砂及び国頭れき層の壤土を使い、水分補給はすべてかん水だけにした。施肥はこれらの実験について以下に述べる i) 項ないし iii) 項に対し、次のとおり液体肥料で行なった。

- i) 及び ii) : 試験ポットは実験期間中はかん水時、他の期間は標準ポットとともに2か月に1回。
- iii) : すべてのポットに対し実験期間の直前まで2か月に1回、無かん水期間終了時に1回。

i) 長期間無かん水による栄養生長の遅れ

図 59 には砂栽培による実験結果を示す。

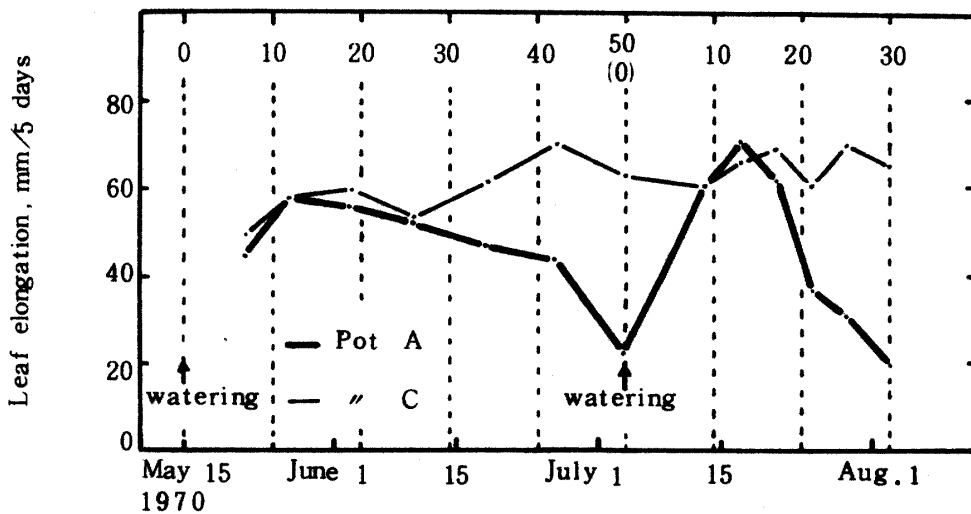


Fig. 59. Variation of the elongation of the 6th leaf due to the dearth of water. The plants were planted in Sept., 1969, sand culture

標準ポットCは3日に1回かん水した。図によると、標準ポットCでは第6葉の伸長量は5日間当たり50mmないし70mmあって安定した伸びを示している。5月-7月には伸長量の減少は初めのうち緩やかであったが、6月下旬から急になった。その後7月4日にかん水を行なったが、葉の伸長速度は再び回復して7月18日には最大になり、それ以後再び急速に低下した。7月4日かん水直前の伸長速度急減と7月後半の急減の理由は、梅雨明け後に気温が高くなり、日射量が増加し、土壌含水量が急速に減少したためである。

上の実験結果は砂栽培によるものであるが、壤土を使ったポットによる実験結果を図60に示す。

この図においてもかん水後10日ないし15日もたつと葉の伸長が鈍っている。9月末からは気温が下り始め日射量も減少したため、伸長量の変動が幾分複雑になっている。しかし、かん水後の期間が長くなるにつれて伸長速度は減少して行く。

以上、図59及び図60に示した結果はポット栽培によるものであるが、実際の畑地でも、干天が続くと栄養生長が遅れることは十分考えられる。特に丘陵や山腹などに栽培されている作物はその傾向が著しいと思われる。

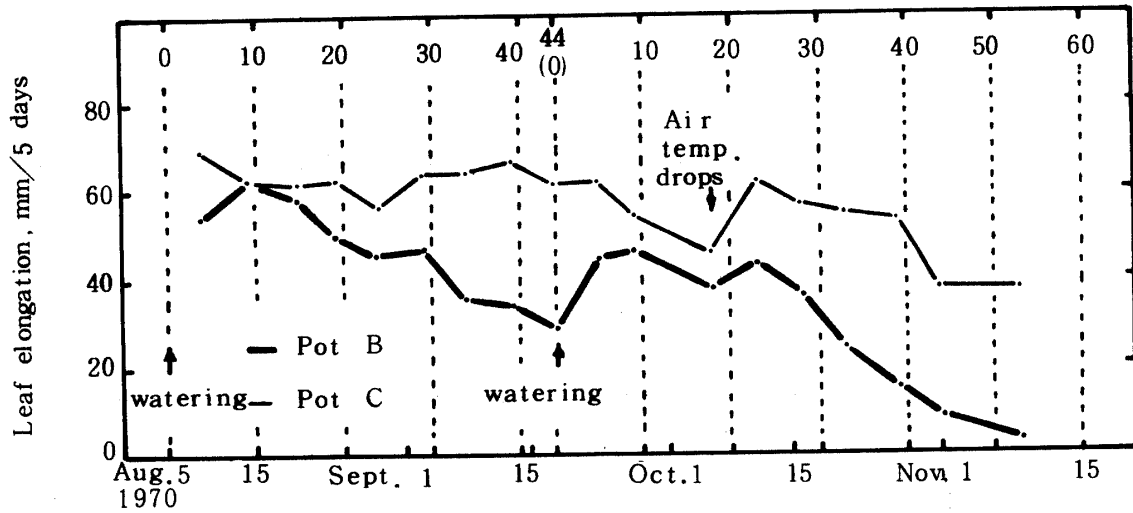


Fig. 60. Variation of the elongation of the 6th leaf due to the dearth of water. The plants were planted in Sept. 1969. Pot B was loamy soil cultured.

ii) 土壤含水量と栄養生長期の葉の伸長との関係

表48及び図61には壤土栽培による2個の試験ポットD, E及び標準ポットFについて, 土壤含水量の減少とそれに伴う第6葉伸長量減少の状況を示す。

Table 48. Decrease of the elongation of the 6th leaf in accordance with the decrease of soil moisture

Date of measurement, or period	Saturation percentage of soil (%)								Leaf elongation (mm)	
	1970 Sept. 26		Oct. 14		Oct. 24		Nov. 9		Oct. 13-23	Oct. Nov. 27-6
Depth of soil (cm)	10	15	10	15	10	15	10	15		
Reference pot	58.0	60.4	57.1	60.4	55.0	60.4	51.9	54.4	93	72
Test pot D	57.1	59.6	36.0	37.4	28.3	31.1	15.9	16.8	78	47
Test pot E	57.8	60.4	34.8	40.7	29.0	30.2	15.7	18.0	73	49
Mean by depth of test pot	57.5	60.0	35.4	39.1	28.7	30.7	15.8	17.4	76	48
Mean of whole layer of two test pots	58.8		37.3		29.7		16.6			

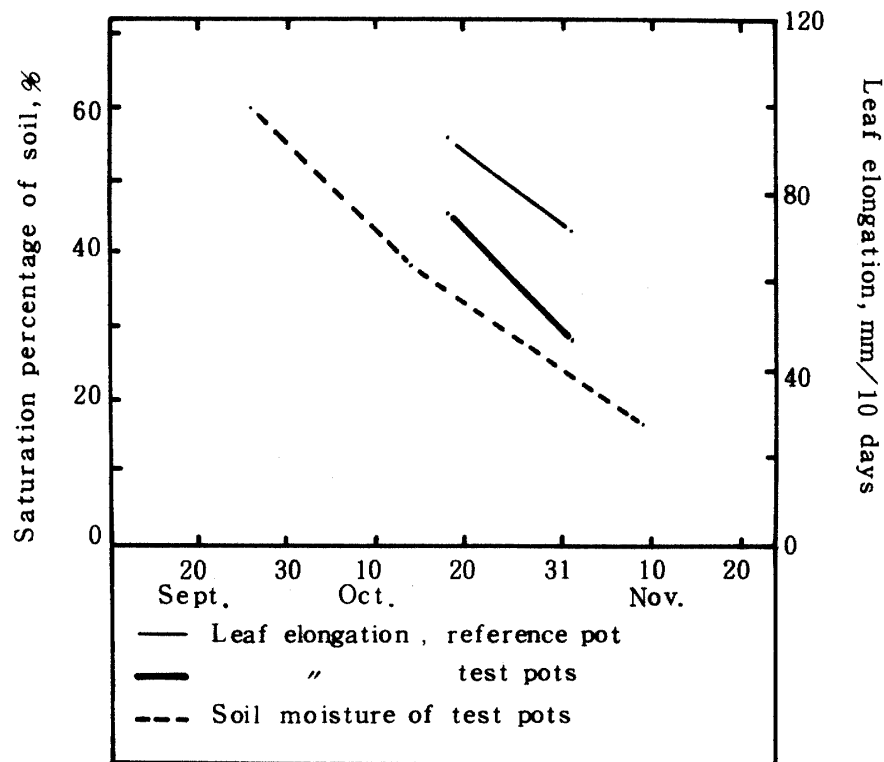


Fig. 61. Decrease of the elongation of the 6th leaf in accordance with the decrease of soil moisture

試験ポットでは土壌含水量が間ゲキの飽和度約20%であった10月末ごろでも10日当たり40mm～50mm程度の伸長を示している。しかし、試験ポットの伸長量が標準ポットより常に小さいことから見て、間ゲキの飽和度が20%程度になると生長が遅れることが明らかである。

表49には土壌含水量が著しく小さいときの第6葉の伸長測定結果を示す。

表49と図60によると、壤土では土壌含水量が間ゲキの飽和度10%くらいになると栄養生長がほとんど停止する。

Table 49. Elongation of the 6th leaf when soil moisture is low

Date of measurement	Nov. 12, 1972		
Depth (cm)	3	11	22
Saturation percentage of soil (%)	3.7	10.6	10.3
Elongation of the 6th leaf: 6 mm in the period Nov. 1-11			

iii) 花芽分化期以降の渇水が生育に及ぼす影響
花芽分化期以降出蕾期までの渇水状態がパインアップルの生育に及ぼす影響を見るために実験を行な

Table 50. Effect of the dearth of water in and after the flower bud differentiation stage on the growth

Pot number and statistics	Test plants				Reference plants			
	* Date of beginning of inflorescence	** Date of harvest	Duration from beginning of inflorescence to harvest (day)	Fresh weight of fruit (g)	* Date of beginning of inflorescence	** Date of harvest	Duration from beginning of inflorescence to harvest (day)	Fresh weight of fruit (g)
1	31	31	162	973	18	18	162	1,030
2	34	38	166	862	9	10	163	1,195
3	31	33	164	1,016	9	14	167	1,212
4	44	32	150	730	7	11	166	1,253
5	34	36	164	734	18	18	162	930
6	45	31	148	872	18	14	158	1,131
Mean	36.5	33.5	159.0	864.5	13.2	14.2	163.0	1,125.2
Sample standard deviation	6.35	2.88	7.87	118.24	5.35	3.37	3.22	123.24

* Number of days counted from January 21, 1974

** " " " " July 1, 1974

った。この実験で試験株に対しては、花芽分化期から出蕾期直前までの97日間無かん水にし、その他の各生育期間はかん水を常に十分に行なった。

表50はこれら2群の供試体について、出蕾時期、収穫日、出蕾から収穫までの日数及び収穫果実の重量の比較を示す。

表によると、試験株と標準株の間では生果の平均重量に著しい差が認められ、また、出蕾日や収穫日にも差がある。しかし、出蕾日-収穫日の日数には大きな差はない。

開花結実及び生果の平均重量の差(表50)についても検定により統計的有意性の有無を調べた結果、有意水準0.05で表51に示す有意性が認められた。

Table 51. Statistical significance of the dearth of water affecting the growth

Statistical significance	Date of beginning of inflorescence	Date of harvest	Number of days from beginning of inflorescence to harvest	Fresh weight of fruits
	Yes	Yes	No	Yes

すなわち、花芽分化期から出蕾期までの渇水状態は、リンアップルの出蕾時期及び収穫時期を遅らせ、更に、果実の重量も小さくする。ただ、出蕾から収穫までの日数にはほとんど影響を与えない。

沖縄ではこれまで、リンアップルの収穫時期が短期間に集中して、かん詰工場では搬入された果実の処理が円滑に行なわれなかったことがあり、その対策として収穫時期の調整が行なわれている。調整の方法は、苗の植え付け時期を変える方法と、ホルモンによる開花処理に際して処理時期を変える方法がとられている。ホルモン処理が行なわれている春から秋までの期間には、季節の傾向として処理以後に長期渇水になることがある。このような渇水は処理によって出来た果実を小さくするような影響を与えるばかりでなく、収穫時期を遅らせることが予想される。したがって開花処理はその後の降雨が順調であると予想されるときに行なうことが望ましい。

3) 低温障害

リンアップルは暖かい地域で栽培される作物であって沖縄も栽培にはかなり良い条件を備えている。しかし、毎年ではないが、特に低温の年には減収になる⁵⁰⁾。沖縄の気候から見て、低温による減収はリンアップル栽培に致命的打撃を与えるものではないが、収量の低下は免れないようである。減収の程度と低温の程度との数量的な関係はまだ見いだされていない。また、低温障害としてリンアップルの植物体や果実に直接現われる現象についての知見も確かでない。このため、筆者の実験結果及び過去の低温年における多くの観察や栽培記録に基づいて、沖縄における低温障害の解析を行なった。

(1) 各季の平均気温とリンアップル果実収量、品質、結実率及び出蕾率との関係

表52には沖縄における冬季平均気温、果実収量⁴²⁾、1級品割合⁴³⁾、結実率^{41,51)}、出蕾率⁴¹⁾及び強い台風や干ばつの状況を示す。

Table 52. Mean air temperature of winter, yield and quality of fruits, flowering and fruiting rate of pineapple in each area of Okinawa; and severe natural disasters

	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	Mean
Mean air temperature of winter (°C)														
*O. G. Yayeyama	18.1	16.7	16.5	15.3	17.5	16.8	18.1	16.9	15.5	18.4	16.5	16.4	17.9	17.0
O. G.	20.4	18.7	18.4	16.9	18.9	18.8	20.1	18.5	17.0	19.7	18.5	18.2	19.1	18.7
Yield of fruits (ton/10 a)														
*N. P. O. Yayeyama	1.99	2.16	1.71	1.67	2.17	2.22	2.47	2.46	2.01	2.45	2.03	2.39	2.71	2.19
O. G.	1.99	2.17	1.71	1.71	2.25	2.22	2.53	2.51	2.01	2.45	2.04	2.42	2.67	2.21
Yayeyama	2.05	2.67	2.49	2.39	1.97	2.87	2.81	2.23	2.29	3.14	2.08	2.58	1.90	2.42
Rate of 1st class quality fruits to all processed fruits (%)														
O. G.	84.1	—	31.4	57.6	70.7	49.4	53.8	45.1	25.9	40.2	32.1	35.6	38.5	47.0
Yayeyama	88.2	—	40.2	81.8	95.1	87.7	82.2	58.7	51.7	84.9	60.4	68.2	76.9	73.0
Rate of fruited plants to all plants (%)														
1st-harvest-year field	—	—	62.7	46.3	59.4	73.7	75.5	77.5	71.2	73.1	66.3	67.0	71.0	67.6
Yayeyama	—	—	78.8	74.4	60.0	76.3	80.0	75.6	76.4	79.4	65.8	66.0	50.0	71.2
all harvest field	—	—	52.1	47.1	58.0	56.7	62.7	63.8	58.0	59.4	53.9	56.0	58.0	56.9
N. P. O. Yayeyama	—	—	67.1	67.3	54.1	68.3	71.7	68.1	67.6	73.3	60.6	58.0	47.0	63.9
Rate of flowered plants by late spring (%)														
O. G.	—	—	—	—	—	—	71.5	58.0	52.0	55.7	39.9	52.2	66.9	56.6
N. P. O. Yayeyama	—	—	—	—	—	—	71.7	58.6	51.1	55.1	39.5	53.6	69.2	57.0
O. G.	—	—	—	—	—	—	88.4	72.8	73.6	82.1	45.4	55.5	17.4	62.2
N. P. O. Yayeyama	—	—	—	—	—	—	54.3	41.5	37.6	39.9	29.0	37.7	45.4	40.8
All harvest field	—	—	—	—	—	—	56.1	42.3	37.0	38.9	28.5	37.1	45.4	40.8
Yayeyama	—	—	—	—	—	—	—	58.5	57.6	64.5	29.3	45.1	12.9	44.7
Maximum mean wind velocity (m/s) by severe typhoons, and drought														
O. G.	—	40.0	—	drou- ght	—	—	—	—	—	—	—	drou- ght	—	—
Yayeyama	—	—	—	32.0 drou- ght	—	—	—	—	—	32.8	—	—	38.6 drou- ght	—

Note 1. Strong winds by typhoons in 1959: Okinawa Group 41.3 m/s and 45.2 m/s in Oct. and Nov., respectively;

2. *Okinawa Group, **Northern part of Okinawa Island
Yayeyama 32.8 m/s in July

表中各用語の解説は次のとおりである。

収穫年： 当年4月—翌年3月を当収穫年とする。

冬期の平均気温： 収穫年期の始まる直前の12月—3月の平均気温、沖縄群島は那覇市、八重山は石垣市における値

果実収量、1級品果実割合及び結実率： 収穫年期全期間内の値

出蕾率： 収穫年期内の4月下旬または5月上旬までの出蕾率

台風及び干ばつ： 台風による風速は、沖縄群島は那覇市で最大風速40.0m/s以上、八重山は石垣市で30.0m/s以上のもの

表52の地区の分け方及び地区別果実生産量平均値を表53に示す。

Table 53. Average rate and amount of yield by the area, 1963-1972

Area	Sub-area	Rate of yield, and Amount of yield
Okinawa Group	Northern part of Okinawa Isl.	50% 29,640 ton/year
	Middle part " "	4 2,087
	Kumejima	
Yayeyama	Ishigaki-Shi	46 27,026
	Taketomi-Cho	
Total:		100 58,753

表に見られるように、沖縄群島生産量の大部分は沖縄島北部が占める。

冬季の低温による影響を見るために、表52の資料を使って、冬季平均気温と果実収量、1級品果実割合、結実率及び出蕾率との間の各相関係数を求めた。表54には計算結果を示す。

この表で気温に関する相関係数の計算には、台風や干ばつ災害を受けた資料は除いた。また、気温以外の各項目相互間の相関係数も示す。表中アンダーラインの数字は、相関に関するt分布検定において有意水準0.05で有意性が認められるものである。

まず、冬季平均気温と収量との間では、沖縄群島及び八重山ともに相関が有意である。

冬季平均気温と1級品果実割合の相関係数は小さい、また、同じく平均気温と結実率及び出蕾率との各相関係数も統計的有意性が認められるほどではない。

表54中で気温以外の2、3の各項目間の相関を見ると、収量と結実率及び出蕾率との相関はかなり高い。これは一般に出蕾して結実する株が多いほど収量も多いため当然の事と思われる。一方、1級品果実割合と他の各項目との相関はいずれも低い。

(2) 冬季低温と果実減収量との関係

i) 冬季気温と果実収量との関係

上に述べたように果実収量は冬季平均気温との間に高い相関がある。両者の関係を図62に示す。

この図に示される両者の関係は近似的に次の式で表わすことができる。

Table 54. Correlation coefficients between each item of fruit development and other items. The upper numeral is for Okinawa Group and the lower for Yayeyama

	Mean air temp. of winter	Yield of fruits per 10a	Rate of 1st class quality fruits	Rate of fruited plants		Rate of flowered plants	
				1st-harvest-year field	All harvest fields	1st-harvest-year field	All harvest fields
Mean air temp. of winter	*	<u>+0.83</u>	+0.13	+0.62	+0.64	+0.63	+0.61
	*	<u>+0.75</u>	+0.39	+0.43	+0.48	+0.63	+0.42
Yield of fruits per 10a	<u>+0.83</u>	*	-0.11	<u>+0.70</u>	<u>+0.81</u>	<u>+0.78</u>	+0.68
	<u>+0.75</u>	*	+0.10	<u>+0.73</u>	<u>+0.76</u>	<u>+0.76</u>	+0.72
Rate of 1st class quality fruits	+0.13	-0.11	*	-0.34	+0.04	+0.73	<u>+0.79</u>
	+0.39	+0.10	*	-0.23	-0.13	+0.08	-0.14

$$\left. \begin{array}{l} \text{沖縄群島: } y = -1.81 + 0.242 T, \bar{y} = 2.26 \\ \text{八重山: } y = -1.27 + 0.210 T, \bar{y} = 2.61 \end{array} \right\} \quad (14)$$

ここで、 y : 10a 当たり収量 ton/10a, T : 冬季平均気温 $^{\circ}\text{C}$, \bar{y} : 平均収量 ton/10a である。なお、図中に示す各相関係数は表 54 に示すように、統計的有意性が認められる。

ii) 沖縄群島及び八重山の冬季低温のリターンピリオド

パインアップル栽培に影響を及ぼす沖縄の低温出現確率を知るため、異常低温のリターンピリオドを求めた。

リターンピリオドの求め方は、Jenkinson の方法^{10,17)}によった。すなわち、年最高気温(または年最低気温)の分布が $f(x)$ なる確率密度分布をするとき、 X の非超過確率 $F(x)$ は次の二重指数関数で表わすことができる。

$$F(x) = \exp(-e^{-y}) \quad (15)$$

ただし、 $y = \alpha(x - u)$

$$\alpha = 1/0.07797\sigma_x$$

$$u = E(x) - 0.450\sigma_x$$

σ_x : x についての母標準偏差

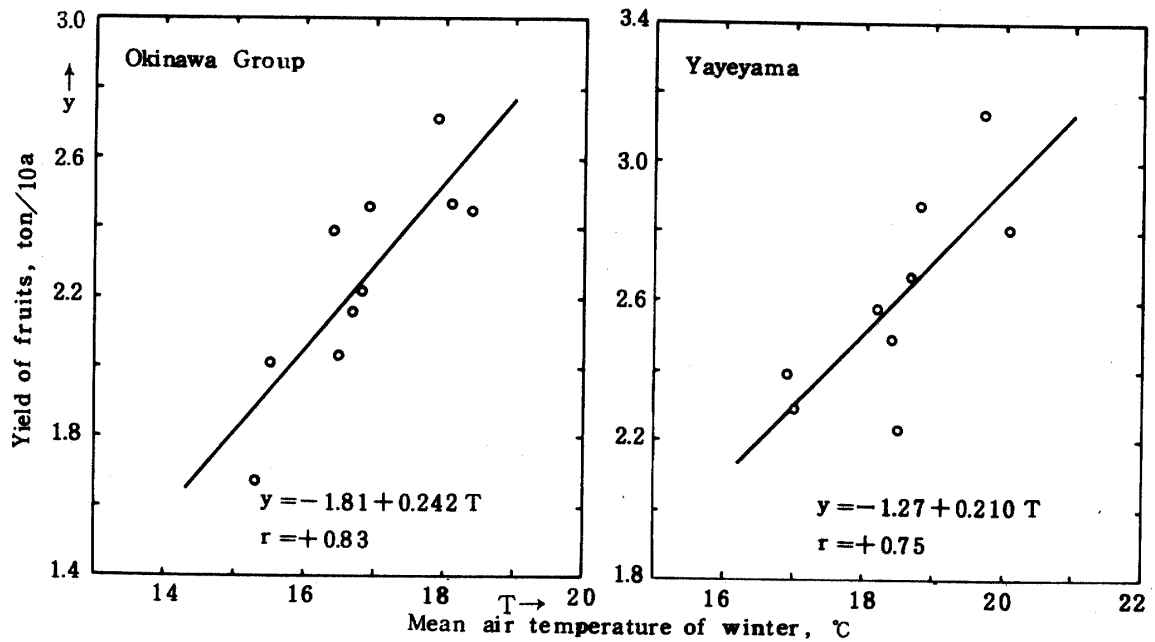


Fig. 62. Correlation between the yield and mean air temperature of winter

$E(x)$: x の母平均

ここで x と y とは次の関係で表わし得る。

$$x = a (1 - e^{-ky})$$

ただし, $2^k = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$

$$a = \sigma_1 \{ (2k) | - (k|)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

σ_1, σ_2 : それぞれ x の年最大値及び2年最大値の母標準偏差

いま $\xi_1 = E(x)$, x のリターンピリオドを T (年)とすると,

$$\frac{x - \xi_1}{\sigma_1} = \frac{k | - \{ \ln [T / (T - 1)] \}^k}{\pm \{ (2k) | - (k|)^2 \}^{\frac{1}{2}}} \tag{16}$$

$$T = \frac{1}{1 - \exp(-e^{-y})}$$

したがって、 σ_1, σ_2 及び ξ_1 が求められるならば、式(16)において T が与えられるとき、それに対する x が求まる。

実際の計算には、 σ_1, σ_2 及び ξ_1 の代りに n 年間の最大値 x_1, x_2, \dots, x_n から年最大値 x の標本標準偏差 s_1 , 2年最大値の標本標準偏差 s_2 及び標本平均 ξ_1' を求めてこれを使用する。 s_2 は次の式により求める。

$$s_2 = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{m=1}^n (2m-1)(x_m - \bar{x}')^2}$$

ただし, $\bar{x}' = \frac{1}{n^2} \sum_{m=1}^n (2m-1) x_m$

年最低気温のような最小値のリターンピリオドを求めるときは、式(16)の左辺を変形して、

$$\frac{\xi_1 - x}{\sigma_1} = \frac{k \{ 1 - \{ \ln [T / (T - 1)] \}^k}{\pm \{ (2k) \{ 1 - (k \{ 1 - \{ \ln [T / (T - 1)] \}^k) \}^{\frac{1}{2}} \}^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

を使う。

表55にはこの方法により求めた冬季(12月-3月)の低温のリターンピリオドを示す。

Table 55. Return period of the low values of mean air temperature of winter

	(°C)							Period of statistics
	Return period (year)							
	1.58	5	10	25	50	100	250	
Okinawa Group	17.4	16.5	16.0	15.6	15.4	15.1	14.9	1927-1973
Yayeyama	19.1	18.2	17.8	17.4	17.1	16.8	16.6	1898-1973

表に見られるように、同一のリターンピリオドに対して沖縄群島は八重山より1.7°Cないし1.8°C低く、両地区の差は無視できない。

Jenkinsonの方法により求めたリターンピリオドとHazenの方法で求めた平均気温-y値との関係は図63に示す程度の適合が見られる。

iii) 冬季低温と果実減収量との量的関係

先に求めた式(14)中のTの値として表55中の各値を代入すると、各低温のリターンピリオドに対する減収程度を知ることができる。表56はこうして求められた収量低下予想値を示す。

Table 56. Expected values of the decrease rate of the yield due to low temperature of winter, The rate to the yield in normal year is shown

	Return period (year)							Period of statistics
	Return period (year)							
	1.58	5	10	25	50	100	250	
Okinawa Group	-	4	9	13	16	19	21	
Yayeyama	-	2	5	9	11	14	15	

表中の数値は、平均収量と低温年収量との差を平均収量に対する百分率で表わしたものである。

表56によると、冬季の低温により沖縄群島では10年に1回平年作の9%減収、50年に1回16%減収を受け、八重山では10年に1回5%、50年に1回11%減収を受けることになる。このように、低温による減収は両地区とも小さい。したがって、冬季の低温は沖縄のピンアップル栽培に大きな打撃を与える要因にはならないと考えられる。

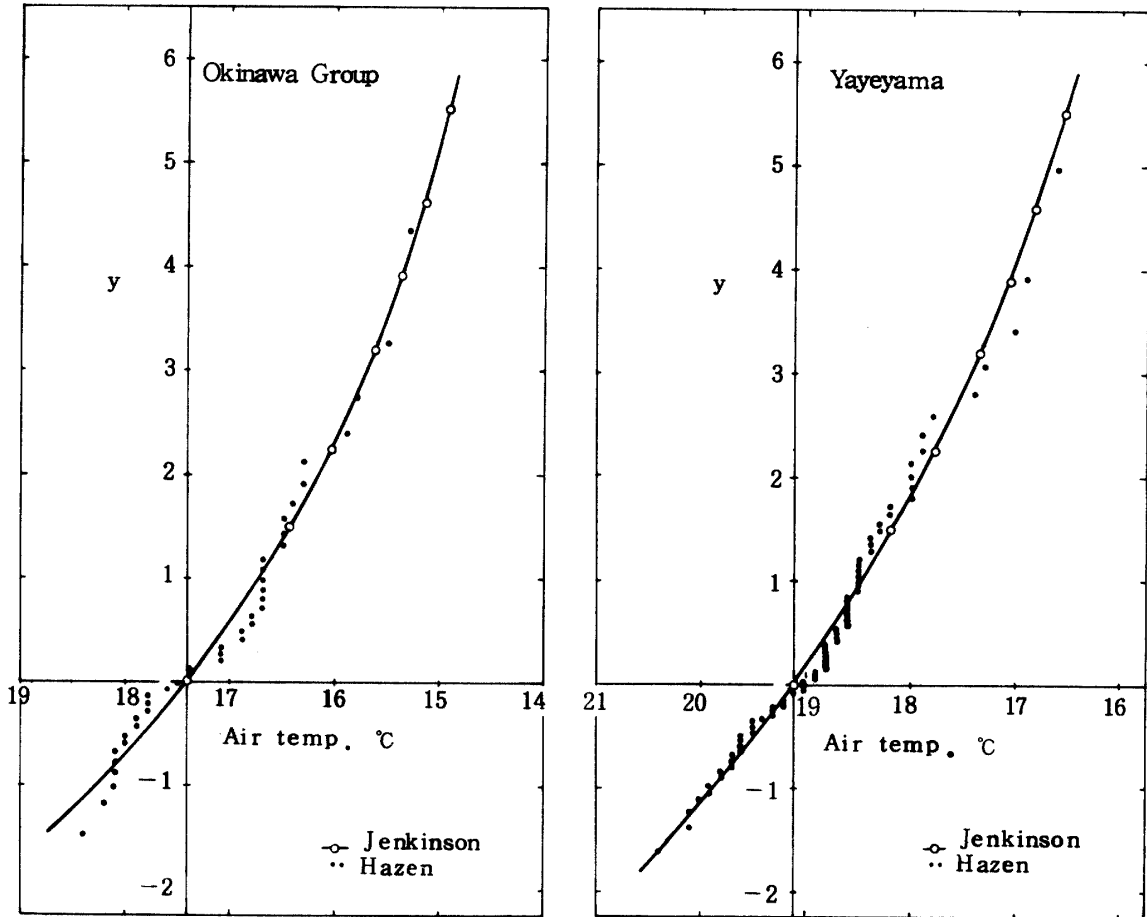


Fig. 63. Comparison of temperature-y value relations between Jenkinson's method and Hazen's

(3) パインアップルの植物体または果実に現われる低温障害

Platts⁴⁵⁾は、フロリダでは気温が7℃になるとほぼ成熟した果実の香気が損われるばかりでなく、果実内部にも黒心病 (Black heart) が起こる旨報告している。沖縄ではこのような障害はあまり報告されていないが、他の形の低温障害は比較的低温の年に観察されている。

i) 低温による奇形果の発生

Photo.6 は沖縄県農業試験場呉我山試験地の資料による奇形果の例⁴⁹⁾を示す。

筆者が冷凍用の低温発生ユニットを利用して、ポリエチレンフィルムの小型低温室を作り実験した結

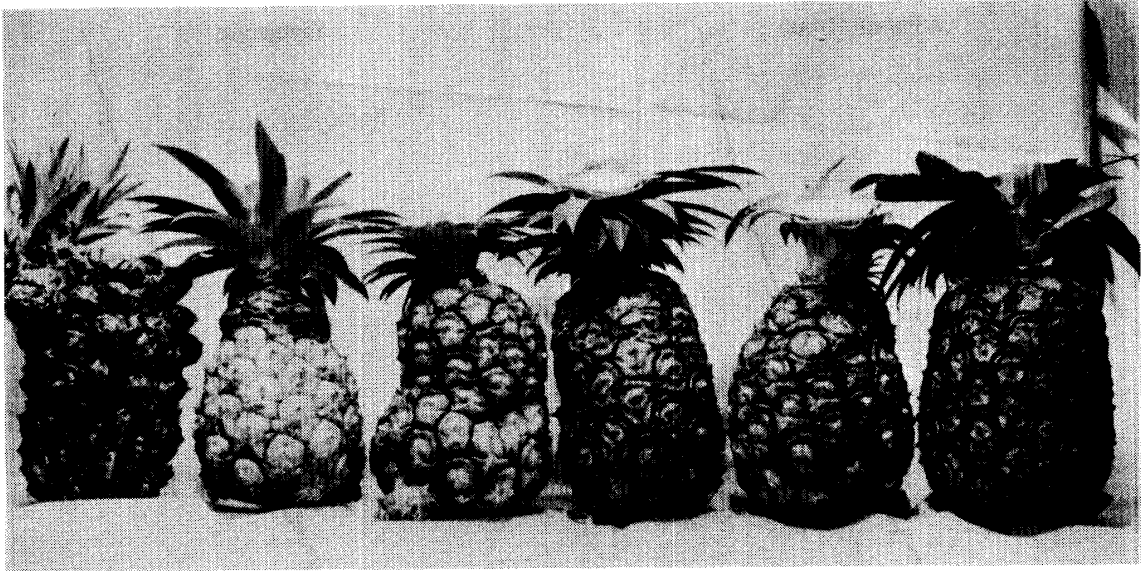


Photo. 6. Malformed fruits due to low temperature of winter;
courtesy of Gogayama Experiment Farm, Agricultural
Experiment Station, Okinawa Prefecture

果によると、出蕾約10日ないし20日以前に9本の供試株を5日間4℃～7℃の低温に置いても奇形果は出来なかった。しかし、出蕾後12日ないし14日たった6本の株は同じ低温下で5本の株に奇形果が出来た。これによると、奇形果は、1個の果実中のいくつかの小果が、果実形成中に低温障害を受けて出来ると考えられる。

図64には奇形果の発生が多かった1968年に、名護市沖縄県農業試験場名護支場における最低気温の推移⁴⁹⁾を示す。

図によると1968年2月末-3月前半の低温は著しく、これは既に蕾の出ている株に障害を与えたものと考えられる。

ii) 低温による裂果の発生

低温による裂果には二つの型がある。その一つは、果実の各小果の境に沿ってひび割れが生ずるものである。この型の裂果の出来る原因は次のように考えられる。すなわち、果実肥大生長期に低温が来ると肥大が停止する。このため果実の表面近くの部分が硬くなる。その後暖かくなると肥大生長が再開されて果実は膨張するので、硬くなっている表面にひび割れが生ずるものであろう。

裂果の他の一つの型は、1個または数個の小果があたかも破裂して無くなり、その部分がくぼみになったように見えるものである。この原因は、恐らく奇形果の場合と同様に、肥大がある程度進んだ果実においてその中の小果が低温障害を受けて枯死するためと考えられる。

iii) 低温による葉枯れ

沖縄では比較的低温が続くとパイナップルの葉の先端が枯れる。

このような葉枯れは、比較的低温の冬は沖縄島北部でかなりひんぱんに見られる。冷たい季節風がよ

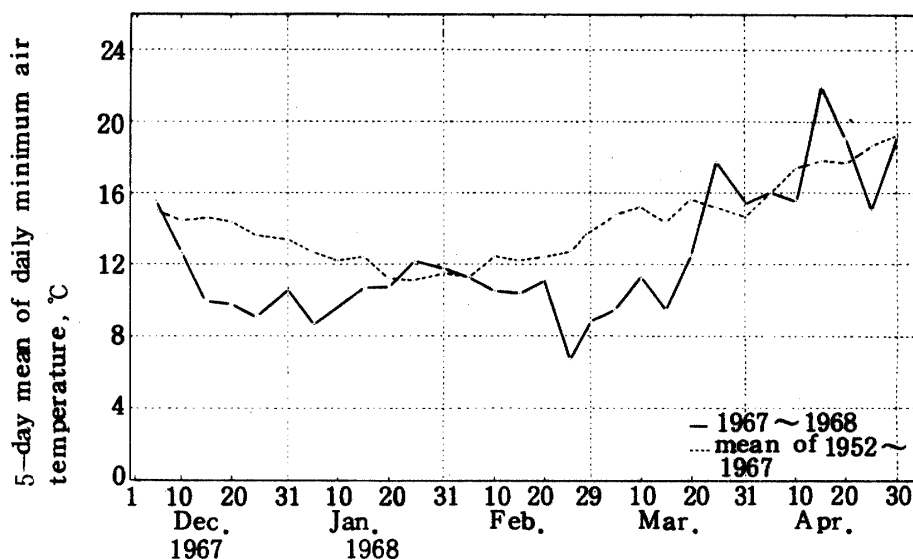


Fig. 64. Variation of 5-day mean of daily minimum air temperature in 1967-1968 winter, Nago

く当たる所では特に起こりやすいようである。一般に、夏に収穫されるいわゆる夏実は冬収穫の冬実より小さい。その一つの原因は上記の葉枯れにあると思われる。すなわち、果実の中には冬に葉枯れを起こした植物体上に、春に出蕾して肥大生長するものがかなりある。しかし、冬実は夏までに順調に栄養生長を終えた植物体上に、夏から秋にかけて肥大生長し、葉枯れの起こるところには既に収穫期に入っている。筆者の低温室における実験によると、 4°C ～ 7°C の低温に5日間置いた各株は葉の先端から中央部までも枯れるものが多かった。

IV) 低温による繁殖苗芽発生数の増加

山田⁸⁰⁾は、選抜した優良系統株の次代株から出る冠芽やえい芽の数が、母体より出るものより多くなる一つの原因として冬季の低温を挙げている。これは出た苗芽の形質に好ましくない影響を与えるようである。新品種を導入する場合などに、それが沖繩の気候に適するか否かは検討する必要がある。

3. 気象災害についての要約

沖繩における主要作物の気象災害の主なもの、台風、干ばつ及び豪雨である。その被害額の規模は、1970年の物価を基準にすると台風は1年間に約24億円、1個の台風で約14億円、干ばつは1回で約47億円、豪雨は1年間に約2億円程度である。

これらの災害に対して、パインアップルは他のいずれの主要作物より抵抗性が強い。その主な理由は、収穫が台風襲来時期以前に終る年があること、草丈が低いために強風に強いこと、傾斜地に栽培されるものが多いため豪雨による冠水、流失または埋没の被害が小さいことなどが挙げられる。また、干ばつに対しても他の主要作物に比べて強く、近年2回の大干ばつでも、被害率はサトウキビの90%に対して30%に止まった。

沖繩におけるパインアップル果実の生産高は、冬季の平均気温が低い年ほど減収になる傾向があるが、統計解析によると減収量は沖繩群島地区（沖繩島付近）で50年に1回16%減、八重山地区で11%減になる程度であって小さい。

これらの研究結果から見ると、パインアップルは各気象災害に対して比較的抵抗性が強く、気象災の立場から見ると、他の主要作物より有利である。以上の点から、パインアップル栽培は気象災害の多い沖縄で特に重要な意味を持つ。

なお、パインアップルは干ばつに対して比較的抵抗性が強いが、渇水時のかんがいは収量、品質の向上に著しい効果を及ぼす。

Ⅶ 研究の要約と総括的考察

沖縄は、わが国においてパインアップルが主要作物として栽培される唯一の地域である。しかし、果実生産量から見ると1960年代の半ばごろから栽培は軌道に乗ったと言える。沖縄は亜熱帯の中でパインアップルの栽培北限に近い所であって冬季の気温は必ずしも十分でなく、また、台風、干ばつ及び豪雨などの気象災害がある。このような気象環境下でパインアップルが安定した作物になり得るか否かを研究することは、栽培の将来性を見るために重要である。

この研究は、沖縄におけるパインアップル作の適地性を農業気象学的に研究し、更に、栽培技術改善の基礎となる情報の提供を目的としたもので、研究結果の要約を各章ごとに示すと次のとおりである。

1) 沖縄におけるパインアップル作と気温及び地温

品種スムースカイエン (Smooth Cayenne) の苗を使用し、ポット栽培の供試体により出葉数と気温との関係を研究した。月間出葉数と気温との間に密接な関係があり、これは次の実験式で表わすことができる。

$$N = 18.13 \times \log_{10} \frac{T}{11.67}$$

ここで、N: 月間出葉数, T: 月平均気温 $^{\circ}\text{C}$ である。

この式を使用して各地の月平均気温から年間出葉数を計算し、これによって気温から見た適地性を沖縄、台湾及びハワイの間で比較した(表2, 図6)。それによると、気温環境は沖縄島付近は台湾中部に匹敵し、八重山は台湾中部よりよい。しかし、沖縄各地ともハワイには及ばない。台湾では南部を除き時には霜が降りるが、沖縄は無霜地帯にあり、この点では沖縄は台湾より有利である。

地温についての適地性を見るために、渡辺⁷⁷⁾とPlatts⁴⁵⁾の実験及び栽培結果に基づき、根の生長に必要な地温を 21°C 以上として、各地で地表面近くの地温が 21°C 未満の期間を求めた(表9, 図11)。この期間はハワイで1月上旬-中旬に11日間、台湾南部では全くなく、台湾中部で12月中旬-3月上旬に83日間、八重山で12月上旬-3月中旬に105日間、沖縄島で11月中旬-4月上旬に148日間になっている。この期間は苗の植え付けに適せず、また、既に生育中の植物体の根の生長も緩慢になる。

2) 沖縄におけるパインアップル作と降水量

降水量の月別分布を各地の間で比較すると、沖縄は各月とも100mmを超えて著しい偏りがない。これに対して台湾中部及び南西部では秋から冬にかけて著しく少ない。ハワイでは地形の影響で地域差が大きく、その中でパインアップル栽培地域では夏季の降水が著しく少なく、かんがいにより補っている所が多い。パインアップルは長期間の渇水により生育が遅れる(Ⅵ章)ので、降水量に関する限り、沖縄は台湾やハワイより好条件となっている。

パインアップルに対する適正かんがいの資料とするため、沖縄の渇水時降水量について統計解析を行った。

(1) 渇水ひん度は10月-11月が最も大きく、6月-8月と4月がこれに次ぐ。2月-3月はひん度が最も小さい。

(2) 任意の連続30日間、45日間、60日間及び90日間降水量のリターンピリオドを季節別に求

めると表11に示すようになる。

(3) 日降水量5mm未満の日を干天日と定義して連続干天日数のリターンピリオドを求めると表12のとおりである。

沖縄の降水量は平均値から見ると季節的分布にも平面的分布にも恵まれている。しかし、長期間続く渇水はかなりひんぱんに起こっており、その傾向は夏と秋に著しい。実験の結果(VI章)は、パインアップルは長期間の渇水により生育が遅れるので、一般に夏から秋の渇水時にはかんがいは必要である。

3) 沖縄におけるパインアップル作と日射量

水平面日射量平均値を累年の日照率平均値と平均雲量から推算した資料と、野瀬ら³⁸⁾が実験から得たパインアップルの光飽和点の資料とに基づいて解析した結果次の事が明らかになった。

(1) 沖縄の年間日射量推算値は130.5 k ly でわが国で最大であるが、春と冬の日射量は九州地方とほぼ同程度で緯度が低い割に小さい。春、梅雨期及び冬の各月の日射量は年による変動が大きく、毎年安定した量が得難い。

(2) 沖縄の日射量を世界の主なパインアップル栽培地における値と比較するとかなり小さい(表14)。

(3) 水平面日射量の全量Rとパインアップルの光飽和点に相当する日射強度まで積算した水平面日射量 R_p との間には、月合計では次の形で表わし得る関係が認められる。

$$R_p = a \log_{10} \frac{R}{b}$$

ここで、a、bは光飽和点で決まる実験常数である。

(4) 前項の式を利用して、沖縄、台湾及びハワイの各地についてパインアップルの光合成に直接利用可能とみなされる日射量の割合を求めると、沖縄は春と冬にこの割合が小さく台湾やハワイに及ばない(表18)。

上記の事から、沖縄では新品種の導入、育成及び栽培技術改善などによって日射量の不十分さを補う必要がある。

次に、沖縄におけるパインアップル畑の2、3の熱収支特性測定実験を行なった結果次の事が明らかになった。

(1) パインアップル植被上の日中のアルベドは0.15程度で、日の出及び日の入りのところを除いてほぼ一様である。

(2) 沖縄における夏季のパインアップル植被上の有効放射は、晴天時には昼間夜間ともに合計量はそれぞれ約40 lyになっている。

(3) 十分に生長したパインアップル植被下の地中伝熱量は昼間夜間ともに合計量はそれぞれ20 ly以下になっている。

4) 沖縄におけるパインアップル畑の蒸発散量

パインアップルの蒸散量について、苗の植え付け後から収穫後までのほとんど全期間にわたり野外測定実験を行ない、また栄養生長期中期を対象に、九州大学ファイトロンで測定を行なった。測定はスムースカイエンの苗をポットに砂栽培した供試体を使い、土壌含水量を十分に保った状態で行なった。その結果は次のとおりである。

(1) 蒸散量最大値は生育中期の夏に測定され、3日平均1.0 mm/dayになっている。

(2) 栄養生長期の蒸散量と気温及び水平面日射量との間の相関係数は、それぞれ+0.97及び+0.84になっており、これらは統計的に有意である。

(3) 出蕾期以後の蒸散量は著しく減少する。

(4) 生育中期の蒸散量は、気温が15℃～30℃の範囲では、気温の上昇とともにS字状のカーブを

描いて増加する。実験を行なった環境条件下では、蒸散量と気温及び水平面日射量との関係は次の実験式で表わすことができる。

$$E = \frac{10.9}{1+1175610 e^{-0.620T}} + (0.00304 T - 0.0284) R$$

ここで、E：単位葉面積当たりの蒸散量 mm/day ，T：気温 $^{\circ}\text{C}$ ，R：水平面日射量 ly/day である。次に、パインアップル畑地からの蒸発散量を苗の植え付けから収穫までにわたって測定した。実験は琉球大学構内と私有の畑地内で行なった。結果は次のとおりである。

(1) 植え付け後最初の12か月間蒸発散量は、2か所の実験でそれぞれ721mm及び684mmであり、これらは最初の24か月間量のそれぞれ59%及び62%に当たる。旬平均最大値は苗を植え付けた翌月に測定され、4.4 mm/day であった。

(2) 蒸発散量は植物体の葉面積が増加するにつれて減少する傾向が見られ、生長が盛んな期間での両者の関係は次の実験式で表わすことができる。

$$E_t = A e^{-\alpha I}$$

ここで、 E_t ：蒸発散量，I：葉面積指数，A， α ：定数である。

(3) 生育中期及び末期の蒸発散量と気温及び水平面日射量間の偏相関係数はそれぞれ+0.80及び+0.55になっている。統計的検定の結果、蒸発散量と気温の間には有意性のある相関が認められた。

(4) パインアップル畑の蒸発散量測定結果によると、沖縄では、月間降水量が各月とも平年並以上のときはかんがいの必要はないが、長期間渇水が続くときはかんがいが必要である。

5) 沖縄におけるパインアップル作と気象災害

沖縄の主な農業気象災害は台風、干ばつ及び豪雨である。これらの災害による農作物被害額の規模を1970年の物価を基準にして示すと、台風は1年間に約24億円、1個の台風で約14億円、干ばつは1回で約47億円、豪雨は1年間に約2億円程度である。

これらの災害に対して、パインアップルは他の主要作物より抵抗性が強い。干ばつ被害率も他の主要作物に比べると小さい。しかし、渇水期間が栄養生長最盛期から出蕾期にかけて引き続き起こるときは、被害は大きくなるおそれがある。

統計解析によると、低温年の果実減収量は沖縄群島地区（沖縄島付近）では10年に1回平年作の9%減、50年に1回は16%減、八重山地区では10年に1回は5%減、50年に1回11%減程度である。

上記の結果から見ると、パインアップルは気象災害に対して他のいずれの主要作物より有利であり、また、将来冬季の低温によって栽培が重大な打撃を受けるとは考えられない。

パインアップルの干害対策に供するために、実験によって、渇水が生育に及ぼす影響を研究した。それによると、渇水が長期にわたると栄養生長が遅れる（図59、図60）。更に、花芽分化期からの長期間渇水では、出蕾時期及び収穫時期が遅くなり、また、果実重量も小さくなる（表50）。したがって渇水時のかんがいは必要である。また、開花処理を行なうときは、その後の降雨が順調であると予想されるときに行なうことが望ましい。

6) 総括的考察

沖縄におけるパインアップル作の適地性を農業気象学的に見ると、全般的にハワイや台湾南部には及ばないが、台湾中部には匹敵する。気温については八重山では台湾中部よりむしろ条件はよく、沖縄各地とも霜が降りない点でも台湾中部に勝る。沖縄は降水量に恵まれている点ではハワイや台湾より有利である。低温による被害で多少減収になる年があるが、減収量は小さい。したがって、低温が沖縄のパインアップル作に重大な打撃を与えるとは考えられない。また、各種の気象災害があるが、パインアップル

プルは他の主要作物に比べて災害に対する抵抗性が強い。

沖縄におけるパインアップル作に関する気象条件が不十分な点として、まず、冬から春にかけて日射量が小さいことと、地温の低い期間が比較的に長いことが挙げられる。これらの点については栽培技術の改善などによってできる限り補われなければならない。

沖縄では渇水がしばしば起こり、干ばつによるパインアップルの被害は無視できないので、渇水時のかんがいは必要である。

パインアップルの低温障害による被害は沖縄では皆無ではなく、冬季の気温もハワイなどには及ばず、必ずしも十分ではない。したがって、将来は品種改良などにより、低温にも生育の遅れや収量低下のない品種が出来ることが期待される。

八重山西表島には未開の広大な可耕地があり、土壌もパインアップル栽培に適している⁶⁶⁾。八重山は気温の点で沖縄各地のうち条件が最もよい。

本研究で明らかにした沖縄の気象環境条件のうち、有利な条件は積極的に利用し、不十分な条件は栽培技術の向上により補えば、沖縄のパインアップル栽培は一層の発展が期待されるものと思われる。

謝 辞

本研究を行なうにあたっては、九州大学農学部坂上務教授より、よき指針によって研究の方向を示していただき、終始懇切なご指導をいただいたことに対し心から感謝の意を捧げる。

また研究の実施と論文のまとめにたえず懇切なご指導をいただいた九州大学農学部上本俊平教授、同元田雄四郎助教授に深く感謝の意を表するものである。

さらに本研究については、元九州大学農学部教授田辺邦美博士、琉球大学農学部宮里清松教授より実験に多大の便宜を与えていただきご激励を賜わり、元九州大学農学部教授伊藤健次博士、香川大学名誉教授渡辺正一博士、鳥取大学農学部野村安治教授、九州大学農学部島野至助教授に助言とご激励をいただき、沖縄開発庁沖縄総合事務局山田重信氏、沖縄県農業試験場名護支場小那覇安優氏、同八重山支場本永博美氏に助言と資料収集のご援助をいただき、琉球大学農学部野瀬昭博教官、九州大学農学部かんがい利水工学研究室舟越保氏より実験に多大の援助をいただいたことを記し、各位に対し深く感謝の意を表するものである。

引 用 文 献

1. Baker, K. F. and Collins, J. L. 1939 Note on the distribution and ecology of Ananas and Pseudananas in South America, Amer. Jour. Bot. 26: 697~702
2. Berger-Landefeldt, U., Kiendl, J. und Fanneberg, H. 1957 Betrachtungen zur Temp.-u. Dampfdruckruhe über Pflanzestanden, Met.Rundsch 10: 11~20 (in Geiger, R. 1966 The climate near the ground, p45~46, Harvard university Press, Cambridge, Massachusetts)
3. Berl'jand, T. G. 1960 "тепловой и водный режим земной поверхности", 14-22, ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, ЛЕНИНГРАД
〔内嶋善兵衛 1974 耕地の放射状態, 新編農業気象ハンドブック, p 76, 東京, 養賢堂〕
4. Blumenstock, D. I. and Price, S. 1961 Climate of the States, Hawaii, Climatology of the United States No. 60-51, p1~15 p18~26, ESSA. U. S. Dep't. of Commerce, Washington, D, C.

5. Chang, Jen-hu 1961 Microclimate of sugar cane, The Hawaiian Planters' Record, **56**: 195~225
6. Collins, J. L. 1960 The pineapple, p63~138, Leonard Hill (Book) Limited, London
7. Ekern, P. C. 1964 The evapotranspiration of pineapple in Hawaii, pineapple Research Institute of Hawaii, Research Rep't., No. **109**: 1~36
8. Ekern, P. C. 1965 Evapotranspiration of pineapple in Hawaii, Plant Physiol., **40**: 736~739
9. Groszmann, H. M. 1948 Pineapple culture in Queensland, Qld. Agric. J., **67**(2): 78~100 [in Green, C. G. 1963 The pineapple plant, W. M. O. Technical Note No. **53**: 136~180]
10. Gumbel, E. J. 1941 The return period of flood flows, Ann. Math. Stat., **12**: 163~190
11. 原田哲治 1963 鹿児島県の農業と気象, 農業気象, **19**: 77~80
12. Haurwitz, B. and Austin, J. M. 1944 Climatology, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, pp410
13. 平敷兼義, 下地利長, 仲大底安英, 与那嶺実 1972 沖縄各地の年最大風速の順位と出現確率について, 琉球気象調査報告, **26**: 235~238, 那覇, 琉球政府気象庁
14. 石橋 豊, 林 弘宣, 太田更一, 吉良芳夫, 内藤利貞, 田辺邦美, 田中宏平 1967 農業水文学, 第2版 p 94, 東京, 朝倉書店
15. 糸数昌丈 1967 農作物の収量と気象との関係について, 琉球気象調査報告, **21**: 39~49, 那覇, 琉球政府気象庁
16. 岩切 敏 1968 南九州における裸地面蒸発について, 農業気象, **23**: 151~158
17. Jenkinson, A. F. 1955 The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements, Quart. Journ. Roy. Met. Soc., **81**: 158~171
18. Joshi, M. C., Boyer, J. S. and Kramer, P. J. 1965 Growth, carbon dioxide exchange, transpiration, and transpiration ratio of pineapple, Botan. Gaz., **126**: 174~179
19. 徐 森雄 1970 屏東雨量与雨日的研究, 農専学報, **11**: 225~248
20. Kerns, K. R., Collins, J. L. and Kim, H. 1936 Developmental studies of the pineapple *Ananas comosus* (L.) Merr. I. Origin and growth of leaves and inflorescence, New Phytologists, **35**: 305~317
21. 北村伸治, 平良 進 1959 作物の最低必要降水量と干ばつ指数としての降水量, 琉球気象台創立70周年記念論文集, p 122~128, 那覇, 琉球気象台
22. 北村伸治 1973 1971年石垣島の大干ばつ, 沖縄産業気象調査報告, **5**: 153~170
23. 北野成彦, 新城定吉 1970 第2, 第3宮古島台風による甘蔗の被害について, プリント, 宮古郡下地町, 沖縄製糖(株)宮古工場
24. 郡場 寛 1967 植物生理生態 第11版, p 98~99, 東京, 養賢堂
25. Krauss, B. H. 1949 Anatomy of the vegetative organs of the pineapple, *Ananas comosus* (L.) Merr. II. Botan. Gaz., **110**: 333~404
26. 倉嶋 厚, 落合盛夫, 青木宣治, 土屋 巖, 有賀 淳, 1964 アジアの気候, p 27, p 35~36,

- p 256~260, p 300~306, 東京, 古今書院
27. Landsberg, H. E. (Ed) 1971-1975 World survey of climatology, Vol.10 - Vol. 13, Elsevier Publishing Co., Amsterdam - London - New York
 28. ルンデゴルド 1964 植物実験生態学, (門司ら訳) p 143, 東京, 岩波書店
 29. 正務 章, 待井一男 1956 本邦各地の無降水継続日数の Return period について, 気象庁研究時報, 8: 400~408
 30. 松島 寛 1964 石垣島の最大風速と最大瞬間風速について, 石垣島測候所調査報告 高層観測施設落成記念号, p 4~7, 石垣, 石垣島測候所
 31. Monteith, J. L. 1959 The reflection of short-wave radiation by vegetation, Quart. Journ. Roy. Met. Soc., 85: 386~392
 32. 本村隆俊 1955 宮古島の干ばつについて, 琉球気象調査報告, 4: 29~33
 33. Murata, Y., Iyama, J. and Homma, T. 1965 Studies on the photosynthesis of forage crops. IV. Influence of air-temperature upon the photosynthesis and respiration of alfalfa and several southern type forage crops, Proc. Crop. Sci. Japan, 34: 154~158
 34. Neals, T. F. 1973 Effect of night temperature on the assimilation of carbon dioxide by mature pineapple plants, *Ananas comosus* (L) Merr., Aust. J. biol. Sci., 26: 539~546
 35. Noffsinger, T. L. 1961 Leaf and air temperature under Hawaiian conditions, Pacific Sci., 15: 304~306
 36. 農林省農林経済局 1970 沖縄における異常災害 1964-1969, 東京, 農林省農林経済局, pp 419
 37. 農林省振興局 1967 農業気象ハンドブック 第5版, p 47, p 63~88, 東京, 養賢堂
 38. 野瀬昭博, 城間理夫, 宮里清松, 村山盛一 1976 パイナップルの物質生産に関する研究, 第1報, 明期間の光量の違いがパイナップルの地上部の CO₂ 交換に及ぼす影響, 日作紀, 45, 別号 2: 169~170
 39. 小田桂三郎・田中市郎・宇田川武俊・棟方 研 1971 耕地の生態学, 初版, p 33, 東京, 築地書店
 40. 大島一志 1963 畑地かんがいの計画と設計, 初版, p 136~137, 東京, 畑地農業研究会
 41. 沖縄県農林水産部 1965-1972 パイナップル出蓄調査集計表, 農林水産部農産課資料, 那覇, 沖縄県農林水産部
 42. _____ 1973 パイナップル関係資料 昭和46/47年期, _____, _____
 43. 沖縄県パイナップル缶詰工業組合 1973 パイナップルかん詰年報 第1号, 昭和47~48年期, 那覇, 沖縄県パイナップル缶詰工業組合
 44. Penman H. L. 1948 Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc. London, A 193: 120~145
 45. Platts, K. P. 1956 Pineapple ABC's, Dep't. of Agriculture Bulletin No.125, p 9~17, State of Florida Dep't. of Agriculture, Tallahassee, Florida
 46. 琉球中央農業研究指導所 1957 甘蔗品種に対する台風及び干ばつの抵抗性について, 業務功程 1957 p 126~132, 那覇, 琉球中央農業研究指導所
 47. _____ 1958 甘蔗品種別の台風に対する抵抗性に関する試験, 業務功程 甘蔗・

- 甜菜 1958, p 122~128, _____, _____
48. 琉球農業試験場 1965 パインアップル試験研究に関する資料, 農試資料 第2号, 那覇, 琉球農業試験場, pp 236
 49. 琉球農業試験場呉我山試験地 1968 パインアップル夏実の奇形果と小果実の発生の原因について, 農林局提出資料, 今帰仁, 琉球農業試験場名護支場呉我山試験地
 50. 琉球政府企画局統計庁 1969 パインアップル園の収穫回数別結果率の推移, 琉球統計月報 No. 174, 那覇, 琉球政府企画局統計庁
 51. _____ 1970, 1971 パインアップル実態調査報告 1969/70 年期, 1970/71 年期, _____, _____
 52. 琉球政府企画局 1972 第15回沖縄統計年鑑 1970, _____, _____
 53. 琉球政府気象庁 1971 1971年異常気象報告(通巻 No. 63), 那覇, 琉球政府気象庁
 54. 琉球政府農林局 1966-1970 農業災害に関する書類, 那覇, 琉球政府農林局
 55. _____ 1971 パインアップル栽培法, _____, _____
 56. 坂上 務, 松田昭美, 鈴木義則, 岸田恭允, 田中 甫 1962 ファイトトロン気象環境, 九大農学部農業気象学研究室資料 I
 57. 坂上 務 1970 豪雨と水害の研究(1967年7月西九州豪雨災害), 農業気象, 25:257~265
 58. 関原 疆, 鈴木 正 1967 日射と日照の相関関係およびロビッチ日射計の観測値について, 気象庁研究時報, 19:608~613
 59. 城間理夫 1970 沖縄における干ばつの要因としての少雨量について, 琉球大学農学部学術報告, 第17号, p 443~457
 60. _____ 1972 パインアップルの蒸散量に及ぼす気温の影響について, 熱帯農業, 16:91~96
 61. _____ 1972 沖縄における気温とパインアップルの生育について, 琉球大学農学部学術報告, 第19号 p 363~377
 62. _____ 1973 沖縄における農作物の気象災害について, 文部省自然災害特別研究(昭和47年度), 沖縄の自然災害の調査報告書, p 14~17
 63. _____ 1974 沖縄におけるパインアップル畑の蒸発散量について, 農業気象, 30:91~100
 64. _____ 1977 沖縄におけるパインアップル栽培と日射量について, 農業気象, 33:1~6
 65. Sideris, C. P. and Young, H. Y. 1950 Growth of *Ananas comosus* (L.) Merr. at different levels of mineral nutrition under greenhouse and field conditions, *Plant Physiol.*, 25:594~616
 66. 総理府特別地域連絡局 1960 西表島農業調査報告書(詳説) p 36~38, p 123~359, 東京, 総理府特別地域連絡局
 67. 杉 二郎, 井上祐雄, 田中純生, 野口勝一, 高倉 直, 小穴敬喜 1963 九州大学環境制御実験室における環境条件について, (I), 生物環境調節 1(1):25~32
 68. 同上, 1964, (II), 生物環境調節 1(2):32~37
 69. Suomi, V. E. 1957 Double psychrometer lift apparatus [in Tanner, C. B. 1960 Energy balance approach to evapotranspiration from crops, *Soil Sci. Amer. Proc.*, 24(1):1~9]
 70. 多田文男, 関口 武 1951 日本各地の月別日平均日射量の推算とその地理的分布, 灌漑水温上昇施設委員会環境報告(其ノ一), 東京, 資源科学研究所, pp 32
 71. 谷 信輝 1963 耕地風に関する研究, 農業技術研究所報告 A 10:1~99

72. 坪井八十二・久保祐雄 1961 水稻の風害に対する研究 (1) 風その他の気象条件と水稻の蒸散量 (予報), 農業気象, 17 (2): 67 ~ 70
73. 内嶋善兵衛 1959 水温の熱収支気候学的研究, 農業技術研究所報告, A7: 131 ~ 181
74. _____ 1965 技術者のための農業気象学講座 (V), 農業技術, 19(6): 290 ~ 295
75. 和達清夫 1966 日本の気候 第3刷, p 454 ~ 460, 東京, 東京堂出版
76. 渡辺正一 1932 鳳梨根の生長と温度との関係, 台湾農事報, 305: 76 ~ 87
77. _____ 1935 鳳梨根組織の研究, _____, 339: 30 ~ 43, 340: 29 ~ 48, 341: 43 ~ 67
78. _____ 1961 パインアップルの栽培と加工, p 22 ~ 23, p 94 ~ 100, p 177 ~ 179, p 233 ~ 243, 那覇, 琉球輸出パインアップル缶詰組合
79. Went, F.W. 1957 植物の生長と環境 (輪田ら訳), p 251, 東京, 朝倉書店
80. 山田重信 1970 パインアップル優良系統選抜試験, 業務年報 1969年度, p 225 ~ 228, 那覇, 琉球農業試験場

Summary

Okinawa is the only area of Japan where the pineapple is grown as one of main crops. Judging from the yield of fruits, pineapple culture in Okinawa seems to have been fairly under way since the middle of 1960's, and cultural history is relatively short. Okinawa is close to the north-end of pineapple culture, and temperature in winter is not necessarily sufficient. There are also natural disasters such as typhoons, droughts, and heavy rains occasionally hitting the area.

It is important to study whether the pineapple will be a stable crop of Okinawa in the future under such environmental conditions mentioned above. The present studies were done in an attempt to find the adaptability of the pineapple to Okinawa's environmental conditions in view of agro-meteorological aspects, and also in the hope that the results of these studies will offer basic data in the field of agricultural meteorology for the improvement of pineapple culture in Okinawa. The outline of the results obtained is as follows:

1. Air temperature and soil temperature

According to experiments in the field carried out using potted materials of the Smooth Cayenne cultivar, the relationship between leaf emergence and air temperature is expressed by an empirical formula,

$$N = 18.13 \log_{10} \frac{T}{11.67}$$

where, N: mean number of leaves emerging in one month, T: monthly mean air temperature (°C).

The number of leaves emerging in one year in pineapple growing areas of Okinawa, Taiwan, and Hawaii was calculated using the above formula and climatological data for the areas (Table 2, and Fig. 6). The results suggest that air temperature for the growth of the pineapple in Okinawa is as favorable as in the middle part of Taiwan. It is even more favorable in Yayeyama district than in the middle part of Taiwan. All the area of Okinawa, however, is second to Hawaii as far as air temperature is concerned.

Okinawa is in a frost-free region whereas it frosts at times in Taiwan except for the southern part. Okinawa has in this aspect another favorable point for pineapple culture.

Adopting the soil temperature of 21°C, which may be taken for from Watanabe's experiments⁷⁶⁾ and Platts' report⁴⁵⁾, as the lowest temperature suitable for the growth of the pineapple root, the author has estimated from climatological data the period when temperature on the soil surface falls below 21°C for several locations in the vicinity of some pineapple growing areas (Table 9, and Fig. 11). The period is 11 days in January in Hawaii, none in the southern part of Taiwan, 83 days in December-March in the middle part of Taiwan, 105 days in December-March in Ishigaki district, Okinawa, and 148 days in November-April on Okinawa Island. The period may be regarded as not suitable for planting the seedling, and the growth of the root of already growing plants is slowed down in the period.

2. Rainfall

In comparison of monthly rainfall for each pineapple growing areas of Okinawa, Taiwan, and Hawaii, it is found that the monthly rainfall is fairly even all the year round in Okinawa. On the other hand, it is considerably small in autumn and winter in the southwestern part of Taiwan. Rainfall in Hawaii distributes unevenly from place to place due to the terrain, and rainfall in summer is considerably small in many pineapple growing districts, where irrigation is necessary to supply water deficiency.

From statistical analyses of Okinawa's small rainfall following results have been obtained:

1) The frequency of small rainfall is largest in the October-November period. The frequency of the June-August period comes next to it. The frequency for the February-March period is least.

2) The return period of small rainfall in Okinawa for arbitrary consecutive 30 days, 45 days, 60 days, and 90 days are shown by the season in Table 11.

3) The return period of the number of days continued dry, rainfall less than 5mm/day, is shown in Table 12.

The above results suggest that the time and space distribution of rainfall in Okinawa is fairly even and that as far as rainfall is concerned Okinawa is more favorable for pineapple culture than Taiwan and Hawaii.

Although the pineapple has fairly strong tolerance to water deficiency, its vegetative growth and fruit development are slowed down by long day dearth of water (Chapter VI). Consequently, irrigation to the pineapple field is necessary in Okinawa when dry days continue long.

3. Solar radiation

Based on the estimated incoming short-wave radiation on horizontal surface calculated from the mean of possible sunshine percentage and cloud amount data and from the light saturation point of 30 klux to 50 klux for the Smooth Cayenne obtained by Nose et al.³⁸⁾, analyses of solar radiation availability for pineapple culture in Okinawa were attempted. The results are as follows:

1) Although Okinawa's annual incoming short-wave radiation on horizontal surface is estimated at 130.5 k ly/year, one of the largest amounts in Japan, the radiation in spring and winter is as small as in Kyushu, despite Okinawa is in lower latitudes.

2) The radiation calculated from cloud amount data indicates that Okinawa ranks among the small radiation areas of major pineapple growing areas in the world (Table 14).

3) Relationship between incoming short-wave radiation on horizontal surface R (k ly/month) and the radiation R_p (k ly/month) integrated up to the radiation intensity equivalent to the illumination of a light saturation point has been obtained from radiation data for Naha, Okinawa,

$$R_p = a \log_{10} \frac{R}{b}$$

where, a and b are empirical constants depending on light saturation point.

4) Assuming that the above formula applies for other pineapple growing areas of Taiwan and

Hawaii and that R_p is regarded as photosynthetically useful radiation, the rate of the useful radiation available in Okinawa, Taiwan, and Hawaii has been calculated (Table 18) using the estimated radiation data in Table 13.

It may be concluded from these studies that solar radiation in Okinawa, where the Smooth Cayenne is grown most, is not necessarily sufficient for the culture of this cultivar.

From the measurements of some heat balance terms of a pineapple field in Okinawa, results have been obtained as follows:

1) The albedo of sufficiently grown pineapple field has been 0.15, a constant value with time except for that in sunrise and sunset hours.

2) Effective long-wave radiation of a sufficiently grown pineapple field in summer in Okinawa has been about 40 ly per daytime as well as per night.

3) Heat conduction into soil of a sufficiently grown pineapple field has been less than minus and plus 20 ly per daytime and per night, respectively.

4. Transpiration and evapotranspiration of the pineapple and water availability

The transpiration of the Smooth Cayenne was measured over the period from right after planting through harvest at Naha, Okinawa, and it was also measured in the middle of vegetative growth stage in a phytotron, Kyushu University, Fukuoka.

The results are as follows:

1) The maximum of transpiration 1.0 mm/day in 3-day average was measured in the middle of vegetative growth stage in summer.

2) Correlation between the transpiration and air temperature and that between transpiration and short-wave radiation on horizontal surface have been +0.97 and +0.84, respectively, both statistically significant with the significance level 0.05.

3) Under environmental conditions similar to those of the phytotron used for these experiments, the transpiration in the vegetative growth stage may be expressed by an empirical formula,

$$E = \frac{10.9}{1 + 1175610e^{-0.620T}} + (0.00304T - 0.0284)R$$

where, E: daily transpiration per unit of leaf area (mg/cm²/day), T: air temperature (°C), and R: short-wave radiation on horizontal surface (ly/day).

The evapotranspiration of pineapple fields was measured for the period from planting through harvest with water balance method using 10 plants of the Smooth Cayenne planted on lysimeter with planting density of 4,000 plants/10 a. The soil moisture was kept sufficient through the experiments. The results are as follows:

1) Evapotranspiration for the first 12 months after planting was 721 mm in a commercial pineapple field and 684 mm in the experiment field on the campus of the University of the Ryukyus, Naha. These values are 59% and 62%, respectively, of the value in the first 24 months after planting.

2) It was observed that evapotranspiration in the vegetative growth stage decreases as leaf area

index of the crop increases. This relationship can be expressed by an empirical formula,

$$E_t = A e^{-\alpha I}$$

where, E_t is evapotranspiration, I is leaf area index, and A and α are empirical constants.

3) Partial correlation coefficient between evapotranspiration and air temperature and that between evapotranspiration and short-wave radiation on horizontal surface were calculated using three correlation coefficients, which were obtained from each two of evapotranspiration, air temperature, and shortwave radiation on horizontal surface all in monthly average in the middle and late growth stages. Partial correlation coefficient between evapotranspiration and air temperature was +0.80, showing from a statistical test that fairly high correlation may exist between the two parameters. Partial correlation coefficient between evapotranspiration and short-wave radiation on horizontal surface was +0.55, showing that high correlation may not exist between the two parameters in the pineapple field where the crop is in the middle and late growth stages.

4) Water supply to the pineapple field in Okinawa is sufficient with rainfall only as long as the monthly rainfall in each month is not smaller than in normal year. Irrigation, however, is necessary in the months when dry days continue long.

5. Natural disasters

Natural disasters to agriculture in Okinawa are mainly brought about by typhoons, droughts, and heavy rains. The approximate amount of the damage of crops in the worst year has been 2.4 billion yen/year by typhoons, 1.4 billion yen by one typhoon, 4.7 billion yen/year by droughts, and 0.2 billion yen/year by heavy rains, all on the 1970 price basis.

According to the statistics of the damage of main crops of Okinawa, the pineapple is more tolerant to these disasters than any other main crops.

Statistical analyses have shown that the yield of pineapple fruits decreases due to low temperature in winter by 9% of the yield in normal year once in 10 years and 16% once in 50 years in Okinawa Group (Okinawa Island and near-by small islands); and by 5% once in 10 years and 11% once in 50 years in Yayeyama district.

From the results mentioned above, it is regarded that the pineapple is more advantageous in Okinawa against natural disasters than any other main crops, and it is not likely that the pineapple will suffer in the future a serious damage from low temperature in winter.

Experiments carried out to find the effect of the dearth of water have shown that the vegetative growth of the pineapple is slowed down by long day dearth of water. The time of flower-budding and harvest are also delayed by long day dearth of water beginning in the flower differentiation stage, causing the fruit size small at harvest (Table 50). Consequently, irrigation to the pineapple field is necessary in Okinawa when dearth of water continues long days. It is also desirable that hormone treatment for flowering be done when favorable rainfalls are expected afterwards.

6. Conclusions

In general view of agro-meteorological aspects the adaptability of the pineapple to Okinawa is

behind that to Hawaii and the southern part of Taiwan, but it almost equals to that in the middle part of Taiwan.

Although the yield of pineapple fruits may at times suffer a slight decrease due to low temperature in winter, it is not likely that the low temperature will be a serious factor for pineapple culture in Okinawa.

The pineapple is more tolerant to natural disasters in Okinawa than any other main crops.

The facts that solar radiation in Okinawa is small in spring and winter and that soil temperature is not high enough in late autumn through early spring are not satisfactory points for pineapple culture.

Although the decrease in the yield of pineapple fruits due to low temperature is not serious in Okinawa, it is desirable that new varieties whose yield and growth are not affected by low temperature in Okinawa be developed or introduced in the future.