

気候からみた干ばつ危険度区分法に関する研究

著者	阿部 亥三, 中川 行夫, 上村 賢治, 岩崎 尚, 石橋 惇, 真木 太一, 久保 祐雄
雑誌名	防災科学技術総合研究報告
号	34
ページ	105-124
発行年	1974-03-30
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002709/

気候からみた干ばつ危険度区分法に関する研究

阿部亥三^{*}・中川行夫⁺・上村賢治^{*}・岩崎 尚⁺
石橋 惇⁺・真木太一^{*}・久保祐雄^{*}

^{*} 農林省農業技術研究所

⁺ 農林省園芸試験場

^{*} 農林省草地試験場

Studies on the Classification of the Grades of Danger Caused by Drought From the Climatological Viewpoint

By

Izo Abe^{*}, Yukio Nakagawa⁺, Kenji Uemura^{*},
Takashi Iwasaki⁺, Atsushi Ishibashi⁺,
Taichi Maki^{*} and Sachio Kubo^{*}

^{*}: National Institute of Agricultural Sciences, Tokyo

⁺: Horticultural Research Station, Hiratsuka

^{*}: National Grassland Research Institute, Tochigi Prefecture

Abstract

Results obtained by the present studies can be summarized as follows:

1) By the multiple correlation analysis the relations between the amount of evaporation and other meteorological elements are made clear, and the possibility of a new formula for presumption of evaporation amount is suggested.

2) Using the above result, a practical formula for presuming the evaporation amount in Japan:

$E_p = a T_{max} + b \log (P + 1) + c$
was obtained.

3) For the ten prefectures of West Japan, the constants in the above formula of presumption were determined, and the applicable ranges of these constants were made clear.

4) From the climatological viewpoint, the number of days necessary for the apparent amount of soil moisture to become zero was calculated, and a map showing the areas of various relative grades of danger caused by drought was prepared.

目

次

1. 緒 言	105	2) 実用蒸発量推定式の作成	112
2. 研究方法	106	3) 実用蒸発量推定式の定数の適用範囲	114
1) 干ばつ危険度について	106	4) 干ばつ危険度の推定	115
2) 研究の手順	107	5) 干ばつ危険度区分図の作成	117
3. 研究結果と考察	107	4. 結 語	117
1) 蒸発量推定方法の検討	107	参考文献	118

1. 緒 言

わが国における気象災害の種類は非常に多いが、その中でも、農業生産に甚大な影響をおよぼす気象災害として、西日本における干ばつならびに風水害、および北日本における冷害ならびに寒雪害があげられる。

風水害の発生は、西日本でも、台風の主要通路にあたる九州南部と四国南部、さらには紀伊半島に多く、瀬戸内海沿岸は周辺を山脈でかこまれて

いるという立地条件の影響をうけて、前記の地域より降雨量が少なく、台風による被害の程度も軽い反面、干ばつによる被害の程度は非常に重いという特徴をもっている。

既往の気候の面から行なわれた干ばつに関する研究は、降水量と作物の要水量との比較検討、あるいは無降水継続日数の統計値の検討などを主としたものであった。しかるに、瀬戸内海沿岸地域における干ばつの発生状況をみると、降水量や気

温などの気象条件ではほとんど差がない場合でも、その被害様相はいちじるしく異なっている場合が多くみられる。その原因としては、土質や地形などの環境条件のほか、農家が灌水作業を行なうかどうかというような経営方針をも含んだ、広い意味での栽培条件などの差が考えられる。現に乾燥のいちじるしい砂丘地において、灌漑によって顕著な増収をあげている事実があり、また、畑地灌漑試験の成果でも、干ばつ状態を呈する気象条件（高温・多照・乾燥）は、水分補給により、干害による減収を解消するばかりでなく、作物の生育環境を良好にし、生産量の増加ならびに生産物の品質の良化をもたらすことが実証されている。

一般に、20日以上もの長期間にわたって雨のない日が続くと、干ばつといわれ、農作物にも干害の兆しが見られる。「干ばつ」は、日照りが続くことであり、「干害」は、その結果なんらかの被害が発生することである。ところが、「干ばつに不作なし」といわれるように、干ばつと干害とは同意義的に用いられる場合が多いにもかかわらず、同意語ではなく、事実、山一つへだてて一方では干害に泣き、他方では豊作を祝うという事例がしばしば見受けられる。このように、農作物の干害は、自然現象としてのみならず、社会現象としても重要な意味をもつので、気象要素を用いて干害を直接的に表現することができるならば、それにこしたことはない。干害は、被害を受ける側の状態によりさまざまな現われ方をするから、気候からみて、干害を一義的に表現することは不可能である。しかし、干害の前提条件として、干ばつという気候的表現の可能性をもった自然状態が存在することに着目し、その表現方法を考えることにした。

農業の立場から「干ばつ」を考えると、それは「作物に利用される土壤中の水分の欠乏状態」である。土壤中の水分は、直接的には長期にわたって日照りが続き、降水による水の補給がないために、欠乏状態になる。しかし、その欠乏状態はその土壌の種類、その上の植生の状態、地下水の水位などによって異なってくる。したがって、仮りに土壌水分を直接測定したとしても、広い地域全体の水分欠乏状態を正確に知ることはできない。実際問題として、土壌水分の測定には、測定法自体に難点があり、また、土壌のヘテロジニアスな性質から考えても、測定値は正確な土壌水分を表

示しているというより、実測地点を中心とする植被ならびに土壌の種類が等しい比較的狭い面積の土壌水分と非常に相関が高いという程度に解釈することができる。そうすると、気候データのみから推定した土壌水分量と、実測により得られた土壌水分量を比較し、それらの値がどのような条件下で一致するかを検討するより、むしろ、気候データを利用して土壌水分の変動を調べ、土壌水分の欠乏の程度を表示する方法を考えればよいことになる。そこで、気候データから推定した土壌水分の欠乏の程度を「干ばつ危険度」と呼ぶことにした。

この研究では、気候からみた「干ばつ危険度」を実際に算出する方法を検討するとともに、その結果を用いて地域区分を行なうことを目的としている。

2. 研究方法

1) 干ばつ危険度について

気候から干ばつ危険度を考える場合、当然、降水量、日照時数、蒸発量、気温、風速などを考慮すべきであろう。しかし、これらの気象要素は、その地域の気候的特性を把握するのに役立つのであって、干ばつ危険度の問題は、降水量と蒸発散量とのバランスの問題、すなわち、水収支の問題に帰着するのである。

水収支式は、一般につきのように表わされる：

$$\text{降水量} + \text{灌がい水量} = \text{土壌水分変動量} + \text{蒸発散量} + \text{浸透量} + \text{表面流出量}$$

降水量については、地域的に相当高い密度で実測値が存在するが、その他の項についてはほとんど実測値が存在しない。このため、水収支に関係するさまざまな指数が考案されている。

- (1) 有効降水量
有効降水量 = 降水量 - 蒸発量 (mm)
- (2) 有効降水比
有効降水比 = 降水量 / 蒸発量 (mm/mm)
- (3) 乾燥指数
乾燥指数 = 降水量 / (気温 + 10) (mm/°C)
気温としては、通常、年平均気温を用いている。
- (4) 乾燥限界指数
乾燥指数の分母の10のかわりに、0, 7, 14などを入れたもの。

(5) 湿度係数

乾燥指数の分母を $(1.07 \times \text{気温})$ としたものの。

(6) 降水効果指数 $((P-E) \text{ Index})$ とする

$$(P-E) \text{ Index} = \sum_{i=1}^{12} 11.5 (P/T - 10)^{10/9}$$

P と T は、それぞれ月平均の降水量および気温である。

これらの指数は、大体、年平均値を用いて計算されるものであって、計算のインターバルが長い。しかるに、干ばつは20日程度の日照り続きから発生するのであるから、これらの指数を用いることは無意味である。

久保祐雄ら(1969)は、一定期間中の有効降水量の総和からその期間の総蒸発量を差引いた値が負になるとき、水分不足状態にあったと考え、そのような水分不足状態の発現頻度をもって「干害の危険度」とした。この場合の有効降水量は、日降水量が40mmを越えた場合は、40mmまでとし、その前日に40mmを越すような降水があった場合は5mmまでとした。この考え方に基づいて計算された結果を用いて作製した危険度区分図は、比較的実情に合致していて、気候の面から干ばつを考える方法として認められてよいが、実際の手法としては検討の余地も多々あった。そのような検討されるべき点として、一定期間の水分不足量で危険度を表わすという点や、水分不足が負数の形で表現されるという点があげられる。この点については、有効降水量という考え方を導入したのと同様に、無効蒸発量という考え方もありうる。

そこで、「干ばつ危険度」として土壌中の水分貯留量が0となった日数を定義することとした。実際には、日降水量と蒸発散量との差から土壌中の水分貯留量を日量として計算し、その値が0となった日数の合計、ならびにそれらの日数の連続・不連続の状態から危険度を分級することとした。

2) 研究の手順

第1段階：気象データの集収

西日本10県(福岡、佐賀、熊本、大分、山口、広島、岡山、兵庫、愛媛、香川)において集められている過去の気象観測値を集収する。

気象庁における予備調査の結果、降水量については入手可能な地点全部の日降水量を集め、それら全地点の最高温度の旬平均値を集めることとし

た。また、測候所以上の気象官署における日最高温度、日最低温度、日平均気温、日平均湿度、日平均雲量、日平均風速のそれぞれ旬平均値、ならびに日降水量、日照時数、日蒸発計蒸発量の旬平均値を集めることとした。

第2段階：蒸発量推定方法の検討と推定式の作成

既存の蒸発量推定式を検討し、日本のような湿潤な温帯気候に適した蒸発量の推定式を求める。

ここでは、各県あたり2～3地点で直径20cmの蒸発計による蒸発量の観測値が存在することを利用し、これを目的変数とし、8気象要素を説明変数とする重回帰分析を行ない、蒸発量推定のための重回帰式を導く。

第3段階：蒸発量推定式の適用範囲の決定

このようにして得られた蒸発量推定のための重回帰式は、地点ごとに異なった定数をもつことになる。そこで隣接する地点の定数の差による推定蒸発量の差に検討を加えるとともに、それぞれの地点を中心とした気候区に分割する。

第4段階：蒸発量推定値の計算

降水量と気温の観測が行なわれている各地点についてその地点における蒸発量の推定値を算出する。

第5段階：蒸発量推定値と蒸発散量との関係

一般に、蒸発量と蒸発散量とは、植被の状態や周囲の環境条件などによって異なる。したがって、蒸発量の推定値を実際の蒸発散量により近似することの可能性について検討を加える。

第6段階：土壌中の水分貯留量の計算

各地点における日降水量と蒸発散量の推定値を用い、水収支式を適当に変形し、土壌中の水分貯留量を算出する。

第7段階：干ばつ危険度にもとづく地域区分

土壌中の水分貯留量が0となった日数の合計およびその連続・不連続の状態から干ばつ危険度に分級し、それにもとづいて地域区分を行なう。

以上述べたような7段階の作業手順により、この研究を遂行することとした。

3. 研究結果と考察

1) 蒸発量推定方法の検討

気候的側面から干ばつを問題とする場合、降水量と蒸発散量とが第一義的に重要な要素である。

降水量については、気象庁の定めた測器と方法

で毎日観測された値が蓄積されていて、ほとんど問題はない。

蒸発散量については、長期間継続的に測定した例がなく、また測定方法や対象植被も異なっていて、得られた結果を気候値として利用することはおろか、それらを比較検討することすら困難である。間接的に蒸発散量を推定する方法としては、水収支法、熱収支法、空気力学的方法、複合法などが提案されている。これらの推定法を適用するためには、精密な表面流去量、浸透量、土壌水分量などの測定や、純放射量、少なくとも2高度の気温、湿度、風速などの測定が必要であって、測定技術をはじめ、得られた観測値の解析にも高度の学問的知識を必要とする場合が多い。比較的簡単で、気象官署の観測値を用いて蒸発散量を推定する方法も二、三あるが、実際にそれらの式を使用してみると、種々の難点が現われる。例えば、つぎのような例があげられる。

(例) ソーンズウェイトの式

$$e = 1.6 \left(\frac{10t_i}{I} \right)^a \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 e : 月蒸発散量 (mm/month)

t_i : 月平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)

a : 式を適用する場所によりきまる定数

I : 熱指数の年合計値

$$I = \sum_{i=1}^{12} (T_i / 5)^{1.514}$$

T_i : 平均気温の年平値

この式は、一般に蒸発散位もしくは蒸発散能などと呼ばれ、気象官署においても実際に計算されている。しかし、定数の決定に難点があり、夏期に高温多湿となる日本の気候条件では、実際の蒸発散量より大きな値を示すのが普通であるから、この式の検討は見あわせた。

PENMAN(1948)によると、蒸発散量は植被の種類や状態により異なるが、平均的にみると、水面蒸発量と直線的な比例関係にあって、つぎのような式で表わすことができる：

$$E_T = f \cdot E_0 \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 E_T : 蒸発散量 E_0 : 水面蒸発量

f : 変換係数

この式の検討は、後節にゆずるとしても、この

式を使用すれば、水面蒸発量から蒸発散量に変換することが可能であるから、水面蒸発量の検討に移った。

(例) ペンマンの式

$$E = \left(\frac{d}{r} H_0 + E_a \right) \left(\frac{d}{r} + 1 \right)$$

$$H_0 = 0.95 R_A (0.18 + 0.55 \frac{n}{N})$$

$$- \sigma T_a^4 (0.56 - 0.092 \sqrt{e_d}) (0.90 + 0.90 \frac{n}{N})$$

$$E_a = 0.35 (0.5 + 0.01 u_2) (e_a - e_d) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 u_2 : 地上2mの高さの風速

(miles · day⁻¹)

T_a : 気温 ($^{\circ}\text{K}$)

e_a : T_a の飽和水蒸気圧 (mm Hg)

e_d : 実際の水蒸気圧 (mm Hg)

R_A : 可能最大日射量

(mm · cm⁻² · day⁻¹)

N : 可照時数 (hr)

n : 日照時数 (hr)

d : $\left(= \frac{de_a}{dT_a} \right)$ 飽和蒸気圧曲線の勾配
(mm Hg · $^{\circ}\text{K}^{-1}$)

r : 乾湿計の定数 ($^{\circ}\text{F} \cdot \text{mm Hg}^{-1}$)

σ : ステファン・ボルツマンの定数

E_a : 最大可能蒸発量 (mm · day⁻¹)

この式には、地上2mの高さの風速の項が含まれている。日本の気象官署では、地上10mの高さで風速を測定しているので、そのようなデータを使用する場合には、風速についての補正が必要となる。地上付近における風速の垂直分布には、対数法則が成り立つと一般にいられているので、高さ z mにおける風速 u_z と高さ2mにおける風速 u_2 との間にはつぎの関係が成り立つ：

$$\frac{u_z}{u_2} = \frac{\ell_n \left(\frac{z}{z_0} \right)}{\ell_n \left(\frac{2}{z_0} \right)}$$

ただし、 z_0 は粗度長を表わし、 z はその気象官署において通常風速を観測している高さを表わす。

図1は、福岡と日田における蒸発計蒸発量の観測値と、粗度長を0.1mとして計算したペンマン法による蒸発量の推定値とを比較した一例であ

る。図から判るように、観測された蒸発量は、ペンマン法により計算された蒸発量より30~50%多いが、大体直線関係にあるとみてさしつかえない。この例に示したデータの相関係数は、福岡および日田のいずれの場合も非常に高く、0.93という値を示している。また、回帰直線の勾配は、福岡では1.3であり、日田では1.5であった。

表1に他の地点や月について、蒸発計蒸発量とペンマンの式によって計算した推定蒸発量との相関係数を示した。この表から判るように、広島を除けば、他の地点においても、蒸発計蒸発量とペンマンの式による推定蒸発量との相関は非常に高く、0.8以上の値を示している。回帰直線の勾配は1.1~1.5の範囲にある。表1の場合は、 z_0 として0.01mを代入して計算した値であるが、 z_0 として0.1mという値を代入しても、ほとんど同じ結果が得られている。

したがって、ペンマンの式による推定蒸発量 E_s と蒸発計蒸発量 E_p との間には、非常に高い相関度をもって、つぎの式で表わされる直線関係が成り立っている：

$$E_p = a(E_s - b) \dots\dots\dots (4)$$

この式の勾配 a は、1.1~1.5の値をとるが、 b は z_0 のとり方によって変化する。

以上の結果から、ペンマンの式は、自由水面からの蒸発を前提としているが、蒸発計蒸発量の推定に使用する場合でも、適当な定数を用いれば、0.8以上の相関度で推定が可能であるといえよう。ただし、定数の選定が不適当な場合は、それが誤差の直接原因となることが明らかである。

表1 蒸発計蒸発量とペンマンの式によって計算した推定蒸発量との相関係数

地点	月	5	6	7	8	9
福岡		0.93	0.89	0.93	0.90	0.90
佐賀		0.86	0.90	0.93	0.93	0.84
熊本		0.88	0.93	0.93	0.80	0.87
日田		0.93	0.89	0.90	0.81	0.91
大分		0.92	0.94	0.92	0.87	0.76
下関		0.86	0.90	0.89	0.84	0.86
防府		0.91	0.89	0.93	0.92	0.83
広島		0.68	0.84	0.80	0.63	0.69
松永		0.93	0.95	0.97	0.93	0.98
呉		0.80	0.86	0.92	0.84	0.78
松山		0.89	0.90	0.87	0.88	0.89
宇和島		0.84	0.94	0.95	0.80	0.88

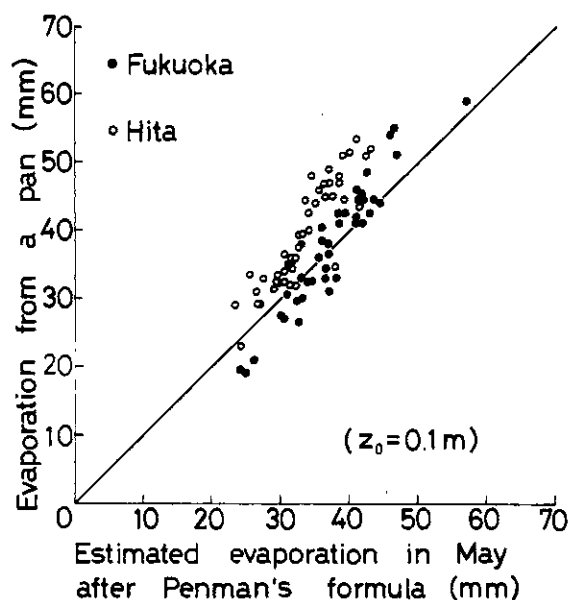


図1 ペンマン法による推定蒸発量と実測値との比較

そこで、著者らはペンマンの式を発展させることを考えた。まず当面した問題は、ペンマンの式には風速の項があるが、風速の観測点は、降水量の観測点にくらべて非常に少ないため、風速の項を他の項で置換することが許されるかどうかを検討することとした。

ペンマンの研究を、原点に立ち帰って検討すると、次式で表現することができる：

$$\text{蒸発量} = a(\text{熱収支項}) + b(\text{ダルトン項}) \cdots (5)$$

ここで、熱収支項は、蒸発面における短波長波を含めた放射エネルギーの収支であり、ダルトン項は、風を主体とする顕熱エネルギーの収支である。問題は、右辺の表現方法であって、学問的に高度な研究の場合には、通常の気象観測業務で得られている気象データより多くのしかも精度の高い測定値を用いることによって、実験的に使い易い形に変形することができる。しかし、一般的な気象観測値を使用すると、どうしても精度が低下するため、右辺の表現方法が複雑となる。これまでも、幾多の研究者が、蒸発量と特定の気象要素との相関関係を求めようと企てたが、ソーンズウェイトの式を除けば、実用化された式はない。それらの式がなぜ実用化されなかったかを検討するより、ここでは、このような式が満足すべき条件について考察してみよう。

- (1) 高い相関度を示すこと、推定式により得られた蒸発量と実際の蒸発量との相関関係を調べた場合、相関係数が少なくとも0.7以上でなければならない。数学的に有意であるより、実用的に有意な相関でなければならない。
 - (2) 推定式は簡単で、使用される気象データは、一般の気象官署で容易に入手できるものであり、しかもそれは熱収支項やダルトン項と密接な関係がなければならない。
 - (3) 推定式はある程度広い地域に適用されねばならない。いかに広い地域に適用されねばならないとはいっても、その地域内の数点で観測された明確な気温の差などが、推定値に反映しないのでは困る。
 - (4) 数学的な簡明さと相関度の高さを追求する結果、物理的に無意味な推定式ではいけない。
- 以上の4条件を考慮に入れた上で、蒸発計蒸発量を推定する方法を検討した。

検討に用いた基礎資料は、気象官署において、直径20 cmの小型蒸発計を使用して蒸発量を測定

した記録があるので、これを使用することとした。具体的には神戸、姫路、洲本、岡山、津山、松永、呉、広島、防府、下関、高松、多度津、松山、宇和島、福岡、佐賀、熊本、日田、大分の19気象官署において、昭和23年（一部は昭和26年）から昭和40年までの夏期（5月～9月）に観測された日蒸発量(Y)、日平均気温(X_1)、日最高温度(X_2)、日最低温度(X_3)、相対湿度(X_4)、平均風速(X_5)、平均雲量(X_6)、日照時数(X_7)、降水量(X_8)の9種類を使用した。

これらの気象要素を(5)式にあてはめて考えてみると、熱収支項には、 X_1, X_2, X_3, X_6, X_7 が入り、ダルトン項には、 X_5 が入り、 X_4 と X_8 は別の項を形成する。ところで、 X_6 と X_7 は相反する関係であり、 X_6 と X_8 はおそらくある程度関連があると思われる。これらの関連ある要素を適当な式で表現することは、この段階では困難であった。また、ペンマンの提唱する物理的に意味のある(5)式の関係では、日量として計算することを考えているが、この研究では、蒸発計蒸発量の測定時間が9時もしくは10時に行なわれていて、官署により1時間の差があることを考慮し、旬平均値で計算することとした。日蒸発量、日照時数、降水量の3種については、旬積算値を用いたが、旬の日数が11日の場合は、他の旬との比較を容易にするため $\frac{10}{11}$ を乗じた値を使用した。

これらの気象要素を用いて、どのように蒸発量推定式を導けばよいかという問題になったわけであるが、著者らは、つぎの3通りのアプローチを試みることにした：

- (1) ペンマンの提唱する形に従って、 $Y = aX_1 + bX_5$ という式を出発点として、 X_1 の代りに X_2, X_3, X_6, X_7 などを代入したり、式全体に変数を増加させて、重相関係数を調べる。
- (2) 集めた全要素を用いて一次の重回帰分析を行なう。
- (3) (2)の結果を検討して、変数の数を減少させることを目的に、変数選択を行なう。

第1のアプローチを試みたところ、 X_5 の係数は、 X_1 の係数の約 $\frac{1}{100}$ となり、風速が非常に大きい日を除き、一般に、蒸発量推定値に対し1 mm/day以下の影響しかなく、標準誤差を考えると、ほとんど意味がないことが判った。これはオーストラリアやアメリカなどのように相対湿度の低い地方では、風速に伴なう水蒸気の拡散係

数も大きくなり、蒸発量も増加することに原因があり、日本のように相対湿度が高い場合には、風速による蒸発量の増加はほとんど認められないためであると思われる。

そこで、大型の電子計算機を用いて、第2のアプローチを行なった。この重回帰分析に用いた重回帰式はつぎの形である：

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_6 X_6 + a_7 X_7 + a_8 X_8 \dots\dots\dots (6)$$

(6)式によって計算した各気象要素間の相関係数の一例を表2に示した。実際には、例示した30倍の量の相関行列表があるが、紙数の関係で印刷が不可能であるから、それらをすべて検討した結果得た結論に近い例をここに挙げたのであって、月と地点がたまたま偏ってしまったが、その点は意図的なものではない。ここで得られた結論を列挙するとつぎのとおりである：

(1) 風速との相関が非常に多湿であるためだと

表2 気象要素の相関行列の代表例

福岡 7月

	(気 温)			湿度	風 速	雲 量	日照時数	降水量	蒸発量
	平 均	最 高	最 低						
平均気温	1								
最高気温	0.77	1							
最低気温	0.92	0.69	1						
湿 度	-0.89	-0.69	-0.77	1					
風 速	-0.26	-0.26	-0.13	0.05	1				
雲 量	-0.63	-0.53	-0.33	0.56	0.42	1			
日照時数	0.67	0.57	0.39	-0.59	-0.40	-0.95	1		
降 水 量	-0.62	-0.57	-0.44	0.66	0.22	0.63	-0.70	1	
蒸 発 量	0.82	0.69	0.59	-0.81	-0.23	-0.86	0.88	-0.72	1

松山 7月

	(気 温)			湿度	風 速	雲 量	日照時数	降水量	蒸発量
	平 均	最 高	最 低						
平均気温	1								
最高気温	0.97	1							
最低気温	0.95	0.88	1						
湿 度	-0.82	-0.83	-0.67	1					
風 速	0.32	0.29	0.26	-0.38	1				
雲 量	-0.64	-0.74	-0.45	0.69	-0.21	1			
日照時数	0.67	0.75	0.49	-0.76	0.14	-0.87	1		
降 水 量	-0.67	-0.74	-0.55	0.71	-0.11	0.64	-0.68	1	
蒸 発 量	0.76	0.87	0.64	-0.81	0.20	-0.87	0.83	-0.77	1

松山 8月

	(気 温)			湿度	風 速	雲 量	日照時数	降水量	蒸発量
	平 均	最 高	最 低						
平均気温	1								
最高気温	0.83	1							
最低気温	0.83	0.55	1						
湿 度	-0.60	-0.70	-0.20	1					
風 速	0.26	0.14	0.11	-0.48	1				
雲 量	-0.37	-0.58	0.02	0.57	-0.05	1			
日照時数	0.51	0.70	0.11	-0.63	0.10	-0.88	1		
降 水 量	-0.17	-0.29	0.06	0.35	0.20	0.48	-0.50	1	
蒸 発 量	0.63	0.75	0.29	-0.68	0.08	-0.73	0.86	-0.46	1

解される。

- (2) 蒸発量と高い相関を示す気象要素は、日最高温度、平均気温、日照時数、平均雲量、相対湿度、降水量であって、中でも日照時数との相関が一番高い。
- (3) 日最低温度は、温度の中で一番相関度が低く、平均気温と日最高温度では、地点と月によって異なるが、一般に日最高温度の方が高い相関を示している。
- (4) 日照時数は、日最高気温と相関が高く、平均雲量とも高い負の相関をもっている。
- (5) 日最高温度は、相対湿度や平均雲量と高い負の相関を示している。
- (6) 降水量は、日照時数や相対湿度とある程度高い相関を示しているが、他の気象要素との相関では特に目だつものはない。しかし、相関がないわけではなく、平均的にすべての気象要素と0.6程度の相関はある。
- (7) 蒸発量と高い相関を示す気象要素は、それぞれの間でもお互いに高い相関を示している。

以上述べたようなことが、相関行列表を検討して判ったのであるが、非常に意外だったことは、風速との相関が見られなかったことである。そこで、第1表に対応するものとして、表3に各地点各月における蒸発計蒸発量との重相関係数を示した。

表3 各地点各月における蒸発計蒸発量との重相関係数

地点 \ 月	5	6	7	8	9
福岡	0.96	0.95	0.96	0.92	0.94
熊本	0.92	0.96	0.94	0.85	0.86
大分	0.94	0.96	0.94	0.88	0.80
下関	0.88	0.93	0.93	0.87	0.91
防府	0.96	0.93	0.95	0.92	0.86
広島	0.80	0.90	0.83	0.68	0.81
松永	0.98	0.96	0.98	0.95	0.95
呉	0.89	0.93	0.96	0.91	0.90
松山	0.91	0.94	0.95	0.90	0.92
宇和島	0.89	0.97	0.96	0.92	0.95

表1と比較すればよく判るが、ペンマンの式により推定した蒸発量との相関係数より全般的に幾分高い結果が出ている。広島の8月を除けば、0.80～0.97という非常に高い相関係数であるから、(6)式を用いることによって、蒸発計蒸発量を

推定することが可能だといえる。ところで、表2を検討した結論から相関度の低い変数も含まれているので、変数の選択という第3のアプローチを試みた。

変数選択は、逐次増減法により統計的行なった。変数選択の基準となるF値は、データの数や危険率を考慮して4.0を与えた。

計算結果によると、例えば福岡の5月の場合、日最高温度、相対湿度、日照時数の3変数が選択されていて、その重相関係数は0.95となる。表3は全8変数を用いた場合の重相関係数であるから、その時の福岡の値は0.96であって、変数の数が減っても重相関係数に対する寄与率はほとんど変化していないことになる。他の地点の場合でも、たとえば、大分においても、福岡と同じく日最高温度、相対湿度、日照時数の3変数が選択され、重相関係数は0.93である。全8変数の場合が0.94であるから、これまたほとんど変化していない。このように、選択される変数の数は2～3が多く、日照時数が10地点中で9地点、日最高温度が10地点中8地点、相対湿度が10地点中6地点で選ばれている。しかし、これらの3変数を同時に選択しているのは4地点のみであって、お互いの間の相関の高い変数は、互いに他の変数を代表する傾向が認められる。そこで、他の変数とあまり相関関係のない風速と降水量が、このやり方では選択されているようである。5・6月に比べ、7・8・9月の場合、風速を選択している地点が半数近くに達している。このように説明変数が少なくなると風速を変数の一つとして選択してくるということは、物理的に重要な意味をもっていて、ペンマンをはじめ多くの研究でも指摘されている。したがって、日本における蒸発量の推定式を作る場合、つぎの形の式が最も相関度も高く、物理的にも意味のある式といえる：

$$\begin{aligned} \text{蒸発量} = & A(\text{日最高温度}) + B(\text{相対湿度}) \\ & + C(\text{日照時数}) + D(\text{風速}) + E \\ & \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

ただし、 A, B, C, D, E は定数

2) 実用蒸発量推定式の作成

前節での検討で得た(7)式も、ペンマンの式同様に風速の項を含んでおり、そのほか日照時数、相対湿度、日最高温度などのデータが必要である。そうすると、気象官署所在地以外の場所においてこの式を適用しようとするならば、何らかの方法

で、それらの気象要素を推定しなければならない。たとえば、等値線図などを描いて、その図上の特定点の気象要素を読みとることになる。そのような場合、気温はかなりの範囲にわたってほぼ等しいが、日照時数、風速などは狭い範囲で変化している。したがって、そのような読みとりを行なうことは、蒸発量自体の等値線図を描いて読みとる誤差より小さいという保証はまったくない。

一方、区内観測所における観測要素は、温度と降水量のみであるから、ペンマンの式はもとより、前節で述べた(7)式も、そのまま適用することはできない。ところで、前節ですでに検討したように、日照時数および相対湿度は降水量と高い相関を示しているから、この二つを降水量で置換することを考えた。降水量はそのままの値では変動が大きく取り扱いに不便であることから、降水量を平方根、立方根、対数変換して蒸発量との相関を調べた。たとえば、福岡の6月の例では、つぎのとおりであった。

変換	P	$P^{\frac{1}{2}}$	$P^{\frac{1}{3}}$	$\log(P+1)$	$\log(P+10)$
蒸発量との相関	-0.32	-0.41	-0.44	-0.47	-0.47

ただし、 P ：降水量(mm)

変換法としては、対数変換の場合が相関は最も高く、立方根、平方根、生の降水量の順となっている。そこで、実用に供する蒸発量の推定式としてつぎの形をきめた：

$$E_p = aT_{\max} + b \log(P+1) + c \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 E_p ：推定蒸発量(mm/10・days)

$T_{\max}$ ：日最高温度の旬平均値(°C)

P ：降水量の旬積算値
(mm/10・days)

a, b, c ：各地点各月により異なる定数

この推定式を導くには、8変数間の偏相関をみて、降水量に置換したのであるが、風速との相関は少ないため、実際問題としては、検定が必要である。

表4 実用蒸発量推定式の重相関係数および標準誤差

地点	重 相 関 係 数					標 準 誤 差				
月	5	6	7	8	9	5	6	7	8	9
福岡	0.75	0.76	0.83	0.86	0.82	6.2	7.1	7.9	5.4	5.1
佐賀	0.79	0.75	0.92	0.89	0.75	5.6	6.5	5.4	5.0	4.9
熊本	0.82	0.77	0.94	0.77	0.65	5.4	7.3	5.3	6.8	7.3
日田	0.82	0.81	0.90	0.77	0.73	5.5	6.9	5.7	6.8	4.9
大分	0.76	0.71	0.89	0.80	0.61	6.5	8.7	7.3	6.9	5.8
下関	0.68	0.58	0.85	0.76	0.66	6.4	7.9	7.1	7.8	6.1
防府	0.80	0.68	0.89	0.83	0.68	6.8	9.1	7.8	6.4	7.1
広島	0.54	0.71	0.82	0.66	0.52	9.8	8.4	9.0	10.0	8.1
松永	0.82	0.82	0.95	0.88	0.83	4.1	5.1	4.9	5.4	4.6
呉	0.73	0.78	0.90	0.72	0.70	7.0	7.0	7.7	10.2	7.7
津山	0.74	0.60	0.90	0.83	0.61	5.6	6.8	4.8	5.8	
岡山	0.74	0.74	0.75	0.81	0.74	6.0	6.7	9.1	6.7	5.7
松山	0.71	0.77	0.92	0.82	0.78	6.9	8.0	6.1	6.6	6.7
宇和島	0.80	0.85	0.94	0.85	0.82	4.9	5.9	5.0	5.2	6.1
多度津	0.71	0.63	0.83	0.78	0.69	6.1	6.6	6.9	7.3	6.0
高松	0.84	0.60	0.76	0.80	0.78	4.8	7.5	7.3	5.4	4.9
姫路	0.67	0.76	0.93	0.79	0.72	6.2	5.8	4.6	6.9	5.4
洲本	0.79	0.69	0.83	0.80	0.76	6.0	7.6	7.9	5.9	5.8
神戸	0.71	0.70	0.86	0.53	0.71	6.8	7.9	7.9	9.7	7.3

そこで、この推定式に各気象官署での観測値を代入し、重相関係数および標準誤差を計算した結果を表4に示した。この表から判るように7・8月についての重相関係数は大体0.7以上でほとんど問題はないが、他の月の場合には、特定の地点でのデータが悪く、重相関係数が0.6以下で標準誤差も蒸発量の15%程度になる。このような特異な地点にペンマンの式を用いて検討してもやはり標準誤差が15~18%に達することから、これらの特異地点は、他の推定式を用いても良い結果が得られないことが判った。したがって、この推定式では、7・8月の場合重相関係数は0.77以上、標準誤差は7.9mm以下で、平均値に対し12%以下の誤差であると考えてよい。他の月の場合、精密度が幾分劣るがそれでも平均値に対する誤差は15%以下であろうと思われる。この程度ならば十分とはいえないまでも、実用にはさしつかえないといえよう。

3) 実用蒸発量推定式の定数の適用範囲

前節において求めた蒸発量の実用的な推定式に含まれている定数a, b, cは、付表Iに示したように、地点および月によって異なった値となる。隣接する2地点における定数に、かなりの大きさの数値的な差が認められるが、これはその2地点の間に山や川などがあって、地形的な不連続性が気候データに影響しているためである。したがって、このような不連続に基づいて定数の適用範囲を決定すればよい。そのためには、2地点間に点在する区内観測所のデータから相似性を見出し、地形的な裏づけによって定数の適用範囲を定めればよい。実際には、つぎのような手順で行なった。

気候学的見地から、日本全体の気候区分を行なった代表的な研究として、福井(1933)や、関口(1950)の業績があげられる。これら両氏の気候区分図を見ると、瀬戸内海沿岸と九州とは別の気候区を形成していることが判る。そこで、実用的な蒸発量推定式の定数を求めた地点を瀬戸内海沿岸地域と北九州地域との2グループに分け、それぞれの地点における日平均気温、日最高温度、相対湿度の月平均値、ならびに日照時数、降水量の月合計値を調べた。ついで、それぞれのグループに属する全地点のデータによる平均値を計算し、その平均値に対する各地点の値の百分比を求め、月ごとに計算された百分比を平均して、それぞれの地点の特性値とした。

この特性値を検討した結果、瀬戸内海沿岸地域の場合は、北九州地域の場合より複雑であって、およそつぎのとおりであった：日平均気温については、特性値は96~103(津山が96であり、宇和島、松山、神戸、徳島が103)であって、変動が少なく、日最高温度も同じく変動が少なく、96~104であるが、下関、防府が96、宇和島が104であるほかは、ほとんど100である。相対湿度については、92~104で変動が少し大きくなった程度である。降水量では、72~136となっていて変動巾が大きく、70代は松永、姫路、100代は広島、津山、110代は大分、下関、神戸、120代は宇和島、130代は防府というように大きく分れている。日照時数については、84~111で、80代は姫路、110代が多度津であったほかは100を中心として比較的集中していた。これらの結果と、気象学的地域区分とを参考にして、瀬戸内海沿岸地域をつぎの6型の気候区に分け、それぞれの型の気候区に所属する区内観測所に適用すべき定数として、付表IIのように適用定数の地点名を割り当てた：

- a. 瀬戸内型
- b. 瀬戸内西部型
- c. 瀬戸内中西部型
- d. 瀬戸内東部型
- e. 大阪湾型
- f. 山間部型

北九州地域の場合は、山地と平野部が適当に区切られているうへ、定数を求めた地点も少なかったもので、つぎのように分けた：

- a. 内陸型気候区：背振山脈以南の有明海に面した平野部の地域。佐賀および福岡県下は佐賀の定数を適用し、熊本県下は熊本の定数を適用する。
- b. 日本海型気候区：日本海に面した佐賀および福岡県下の、企救半島以西の地域。この地域には、福岡の定数を適用する。
- c. 瀬戸内型気候区：瀬戸内海に面した福岡および大分県下の平野部の地域。この地域には大分の定数を適用する。
- d. 山地型気候区：熊本・佐賀・福岡・大分の4県にまたがる山岳地域。ここは日田の定数を適用する。

以上のように実用蒸発量推定式の定数を適用するための地域を分け、各区内観測所の観測値を用いて蒸発量を計算した。

4) 干ばつ危険度の推定

前にも述べたように、水収支式はつぎのように表わされる：

$$\text{降水量} + \text{灌がい水量} = \text{土壌水分変動量} + \text{蒸発散量} + \text{浸透量} + \text{表面流去量}$$

上式のうち、灌がい水量と浸透量は、干ばつの実状を正しく把握するためには必要欠くべからざる項であろう。しかし、灌がいは人為的なものであって、気候からみた干ばつ危険度とは関係がない。また、浸透量は1日を単位に考える場合、深さ100cm前後の厚い土層の土壌水分と比較すると、土質の違いなどによる飽和水分量より小さいと考えられる。勿論、この点をも明確にし、土壌および気候の両面から、干ばつ危険度を推定することができれば、それにこしたことはない。この点の追求は、別の機会にゆずることにして、ここでは浸透量は一応無視した形をとることとした。そこで、干ばつ危険度を推定するための水収支近似式として、つぎの式を考えた：

$$W_i = W_{i-1} - E_i + P_i - K_i \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 W_i ：任意の日における気候からみた土壌水分のみかけ量

W_{i-1} ：その前日における気候からみた土壌水分のみかけ量

E_i ：その日の蒸発散量

P_i ：その日の降水量

K_i ：その日の表面流去量その他を含む量

この式の計算を行なうには初期土壌水分量(W_0)の値が必要となる。この値の実測値はないので、一定の値を仮定して計算をはじめることとした。

四国農業試験場が1966年善通寺市西方仁宅で行なったウンシュウの根の限界深と有効水分量の調査結果によると、安山岩を母材とする土壌の場合は、根の限界深の平均値が68.3cmで、その土層中に存在する有効水分量は127.6mmであり、花崗岩を母材とする土壌の場合は、それぞれの値が、79.8cmと119.0mmである。したがって、花崗岩系の土壌中では有効水分量は単位土層あたりでみると少ないが、根がそれだけ余計に發育するので土壌中に根が侵入している層全体の有効水分量としては大差がなくなっている。また、高谷(1962)によると大和田(埼玉県)における土壌水分観測から、地表より100cmまでの土層中の有効水分量

は約100mmと計算されている。このほか、日下部(1955, 1965, 1957)によっても同じような有効水分量が福岡について求められるといわれている。これらのデータに基づいて、果樹のような深根性植物に対する W_0 として、100mmを考え、そ菜のような浅根性植物の場合には50mmとして計算を進め、不合理な点を改善することとした。

E_i の値としては、ここでは前に求めた実用蒸発量推定式による推定蒸発量 E_p との関係によって求めることとした。PENMAN(1948)によると、水面蒸発量 E_0 と蒸発散量 E_T の間には、 f を定数(変換係数と呼んでいる)とするつぎのような直線関係があるという：

$$E_T = f \cdot E_0 \quad (f < 1.0) \quad \dots\dots\dots (10)$$

PENMANがイングランド東南部の草地で行なった観測結果では、 f は季節によって異なり、つぎのような値であった：

11月～2月	$f = 0.6$
3月～4月	$f = 0.7$
5月～8月	$f = 0.8$
9月～10月	$f = 0.7$
全 年	$f = 0.75$

この式は、多くの研究者に利用され、各地で定数が求められている。日本では、東海近畿農業試験場畑作物第1研究室において種々の作物の変換係数(ここでは蒸発散比と呼んでいる)が求められている。例えば、ガラス室内夏メロンの場合、蒸発散比は0.52～1.33で平均0.93という値になっている。水稻の場合は、密植で0.24～2.33(平均1.07)、普通植で0.26～1.61(平均0.97)、疎植で0.18～1.65(平均0.95)となっている。農業技術研究所気象科蒸発散グループ(1967)が水稻について求めた値は0.92となっている。この変換係数は、作物の種類およびその生育ステージによって大きく変わってくるもので、東海近畿農業試験場が求めた値も生育の初期および末期には低い値となるが、生育の盛んな時期には1.0よりはるかに大きな値を示している。これらの結果を考えると、干ばつ危険度の表示段階でこの問題を検討することとし、ここでは変換係数を1.0として計算することとした。

P_i と K_i については、 P_i に毎日の降水量を入れ、この値が W_0 より大きい場合は K_i を考えることにした。これは計算段階において、 P_i を代入して計算した値 W_i が W_0 より大きい場合、 W_i の代りに

そのつぎからの計算のためには W_0 を入れるという方法で K_i を一応考慮した。

これらの結果をまとめるとつぎの式で表わされる：

$$W_i = W_{i-1} - k \frac{E}{10} + P_i \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 E は実用蒸発量推定式により求めた蒸発量、 k は今回の計算では1.0と考えた。

この式を用いて、昭和28年から昭和40年までの13年間のうち、毎年5月1日から9月30日までの W_i の値をつぎのように計算した：

$$5月1日(第1日) \quad W_1 = W_0 - \frac{E_1}{10} + P_1$$

$$5月2日(第2日) \quad W_2 = W_1 - \frac{E_1}{10} + P_2$$

⋮

$$5月10日(第10日) \quad W_{10} = W_9 - \frac{E_1}{10} + P_{10}$$

$$5月11日(第11日) \quad W_{11} = W_{10} - \frac{E_2}{10} + P_{11}$$

⋮

$$\bigcirc月\bigcirc日(第n日) \quad W_n = W_{n-1} - \frac{E_i}{10} + P_n$$

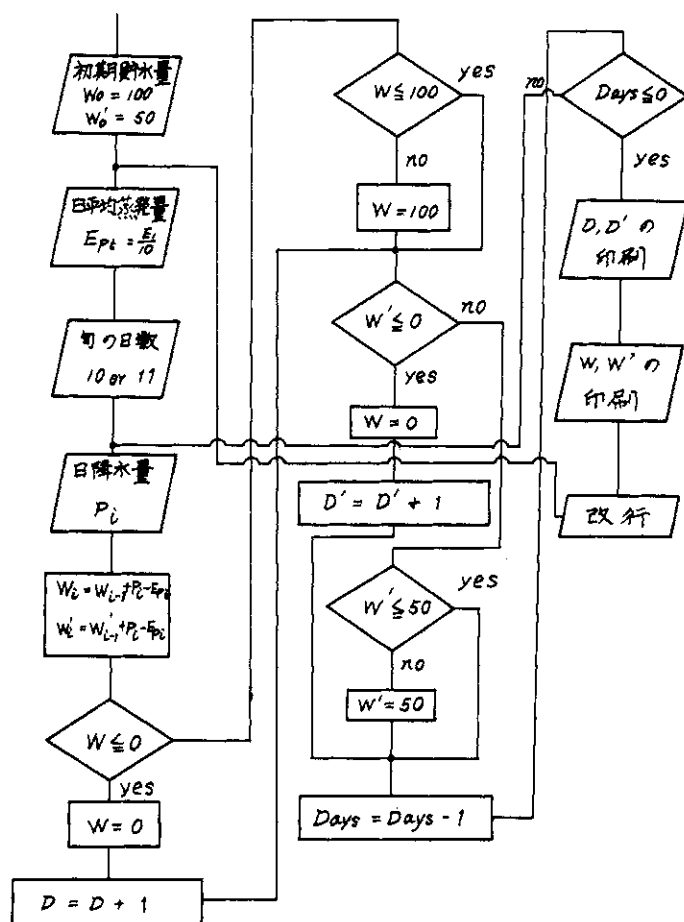


図2 干ばつ危険度計算のためのフローチャート

計算の途中で W_n の値が W_0 より大きくなった時は、 W_n の値の代りに W_0 を代入して計算し、また W_n の値が0または負になったときは、すべて0としてその日数 D を数える。図2にこの計算のフローチャートを示した。

5) 干ばつ危険度区分図の作成

前節の手法により、気候データからみて土壤中に存在すると考えられるみかけの水分量が0となる日数を数えた。この日数が多いほど干ばつの危険度が高いことを意味する。

図3に、気候からみた干ばつ危険度の代表的な図を示した。この図は、初期貯留量50mmの場合の図であって、13年間1989日中、気候データからみて有効土壌水分が0となった日数によって区分してある。したがって危険度が最も高いと解される地域は、約2000日中500日以上、つまり平均してみると4日に1日の割合で有効土壌水分が0となったということである。実際には、有効土壌水分が0となった日は連続して起り、その連続した日数と実際の干ばつとはより密接な関係があるのであろうが、ここでは、相対的な危険度を表示するにとどめた。したがって、初期貯留量ならびに有効水分量を100mmとした場合についても、区分すべき限界値を適当に定めると図3とはほとんど同一の図が描かれるので、ここでは省略することとした。

一応の目安としては、図3の黒塗りの部分は、最も干ばつ危険度の高い地帯であって、灌がい施設なしでは、作物の栽培に適さない地帯であると

いえよう。その他の地帯では干ばつ危険度は相対的に低くなっていくが、瀬戸内海沿岸は干ばつ危険度が高く、北九州山地はやや低いといえる。

4. 結 語

今回の研究では、気候からみた干ばつ危険度を干害の発生頻度と具体的に関連づける段階まで進むことができなかったため、“干ばつ危険度”の区分は、干ばつに対する地域間の相対的な危険度を区分したにとどまっている。したがって、図3をみて、ある特定の村とその隣村とが同じ危険度であれば、大体同じ程度の灌がい施設が必要となるし、現在、灌がい施設がない地域で、危険度の大きい地域は、灌がい対策を実施すべきであろう。その場合、この図が灌がい施設を充実させて行くべき順序を考える補助手段として利用できるであろう。

終りに、この研究を通して感じた問題点を列挙し、今後の発展的研究のための資料としたい：

(a) 実用蒸発量推定式について

今回のように、できるだけ多くの地点で長期にわたって観測された気象要素を必要とする場合は最高温度、最低温度、降水量の3種のみがその対象となる。この3種の気象データのみで蒸発量を推定する場合は、この研究で求めた推定式が最良であると確信するが、地点や月によっては、重相関係数が0.6台となり、標準誤差も15%程度になることがある。

また、隣接する2地点間の定数が近似的な値で

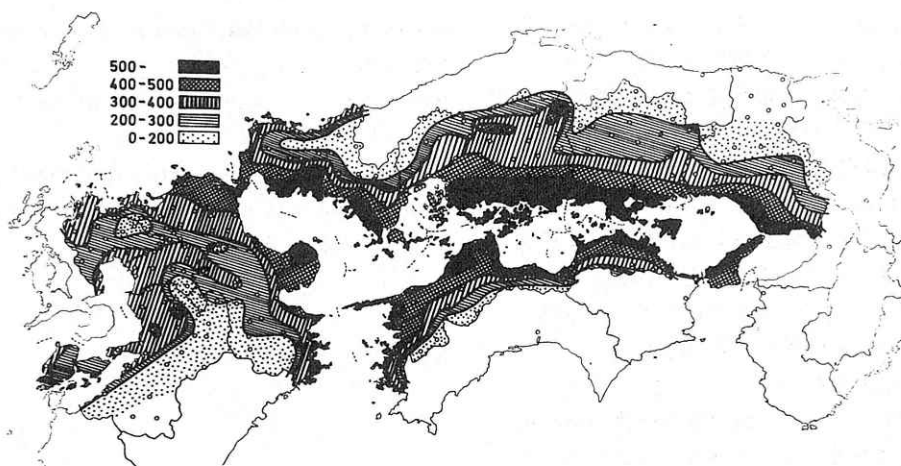


図3 瀬戸内周辺の干ばつ危険度区分図

ないため、その両地点の中間においてどちらの点の定数を用いて蒸発量を推定すべきかという問題が生じる。瀬戸内海沿岸地域のように隣接する両地点が気候的に似た地域の場合、どちらの定数を用いても同じ程度の推定値となるべきであるが、実際上はそのような場合の地点の選び方で、最大12%の標準誤差を生じていることが、我々の試算で判明している。

(b) 蒸発量を蒸発散量に変換する定数について
今回の研究では、蒸発量を蒸発散量に変換する定数を一応1.0と考えた。この定数を瀬戸内海沿岸で実測した値はあまりないが、いずれも季節変化と時間変化を含んでいる上、特殊な作物を測定対象としている。したがって、変換係数を正確に求めるためには、季節のパラメーターと作付面積の重みをつけた作物種類別パラメーターを含んだ変換係数とすべきである。しかし、このような操作を変換係数にほどこしたとしても、蒸発量推定式の含む標準誤差と比較すると変換係数の誤差のほうがはるかに小さいといえる。

(c) 表面流去量および浸透量について
今回の研究では、初期貯留量を一定にし、それを越す量についてのみ表面流去量としての処理を行なったが、今後は、河川流去量や広域水収支からある程度の流去量補正を考えるべきであろう。そのためには、陸水学、河川工学など他の専門分野の研究者との共同研究が必要となろう。

(d) 欠測値の補てんについて
今回使用した気象データは、丙種までの区内観測所以上の気象庁観測網により集積されたデータである。区内観測所のデータは、委託を受けた側の私的都合などによって欠測を生じている場合が多い。このような場合、降水量は、地形的に複雑な場合を除きティーセン法により補てんした。気温の場合は盆地以外は隣接地点の傾向に合わせて内挿した。実際には、このような欠測データの補てんは困難であるとか、不適当であるため、委託して気象観測を行なっていると考えられるような区内観測所もあり、上記のような補てんにより得られた蒸発量をさらに修正した場合もある。

(e) 干ばつ危険度について
今回の研究では、干ばつ危険度と干害の発生頻度とを具体的に関連づける作業を行なわなかったが、この作業は、将来、機会を求めて行ないたいと考えている。干ばつ危険度の考え方そのものも

まだ検討の余地があり、さらに良い表現方法も見出すことが可能であろうと推察される。

終りに、本研究の遂行にあたり種々の御援助と御助言を頂いた国立防災科学技術センターの小沢行雄部長および西川泰博士に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- FITZPATRICK, E. A. and STERN, W. R. (1966): Estimates of potential evaporation using alternative data in Penman's formula, *Agr. Met.*, **3**, 225 ~ 239
- 福井英一郎(1933): 日本の気候区(第2報), 地理学評論, **9**, 109, 195, 271
- 久保祐雄・中川行夫・小沢行雄(1969): 気候からみた干害危険度について 長崎県の場合 防災科学技術総合研究報告, 第20号, 31 ~ 35
- 日下部正雄(1961): 史料からみた西日本の気象災害, IV干ばつ, 農業気象, **16** (3), 119 ~ 120
- LINACRE, E. T., HICKS, B. B., SAINTY, G. R., and GRAUZE, G., (1970): The evaporation from a swamp, *Agr. Met.*, **7**, 375 ~ 386
- 長田英二(1967): 佐賀県の干ばつ, 天気, **14** (10) 372 ~ 378
- 根本順吉(1967): 1967年夏~秋の西日本干ばつ, 天気, **14** (12), 437 ~ 443
- 関口武(1950): 日本の気候区分, 資源調査会プリント
- 高谷悟(1962): 果樹園の干ばつ推定の試み, 研究時報, **14** (1), 33 ~ 38
- VAN BAVEL, C. H. M., NEWMAN, J. E., and HILGEMAN, R. H., (1967): Climate and estimated water use by orange orchard, *Agr. Met.*, **4**, 27 ~ 37
- WMO(1966): Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration, *Technical Report No. 83*, 1 ~ 121

付表 I 蒸発量推定式の係数と標準誤差

(5 月)

	a	b	c	サンプル サイズ	重相関係数	F 値	標準誤差
大 分	2.920	-8.289	-11.744	54	0.758	34.404	6.5
日 田	3.151	-10.166	-18.031	45	0.815	41.538	5.5
熊 本	3.242	-10.845	-21.095	54	0.818	51.575	5.4
佐 賀	2.423	-11.864	-0.468	54	0.785	40.962	5.6
福 岡	3.146	-10.559	-17.34	42	0.748	24.809	6.2
宇 和 島	3.23	-8.56	-23.1	45	0.797	36.5	4.9
松 山	2.10	-13.71	12.82	54	0.71	25.32	6.9
多 度 津	1.974	-10.480	5.054	54	0.713	26.295	6.1
高 松	2.906	-10.654	-8.644	54	0.843	62.586	4.8
下 関	(2.878)	-10.276	-8.655	54	0.846	64.442	4.8
	2.35	-11.43	5.99	54	0.68	21.58	6.4
防 府	3.39	-13.98	-4.00	45	0.80	36.36	6.8
広 島	0.60	-15.71	52.18	54	0.54	10.32	9.8
呉	1.70	-16.0	25.49	54	0.73	21.72	7.0
松 永	1.75	-10.21	11.98	33	0.82	30.39	4.1
津 山	2.856	-6.178	-18.381	45	0.736	24.886	5.6
岡 山	3.059	-7.015	-20.252	54	0.742	31.327	6.0
姫 路	2.264	-10.028	1.583	45	0.672	17.250	6.2
洲 本	4.155	-6.085	-46.935	54	0.787	41.440	6.0
神 戸	2.598	-13.746	6.183	54	0.709	25.703	6.8

(6 月)

	a	b	c	サンプル サイズ	重相関係数	F 値	標準誤差
大 分	1.922	-15.146	18.615	54	0.710	25.938	8.7
日 田	3.384	-13.719	-22.77	45	0.810	40.09	6.9
熊 本	2.830	-13.275	-10.748	54	0.772	37.671	7.3
佐 賀	2.882	-8.105	-23.039	54	0.748	32.408	6.5
福 岡	3.410	-9.405	-32.684	45	0.758	28.33	7.1
宇 和 島	2.60	-13.3	-6.48	45	0.846	52.7	5.9
松 山	2.46	-15.82	4.37	54	0.77	37.29	8.0
多 度 津	1.816	-9.286	3.382	54	0.632	17.006	6.6
高 松	2.242	-8.810	0.003	54	0.599	14.233	7.5
下 関	(2.404)	-8.916	-4.004	54	0.638	17.493	7.2
	1.00	-10.1	29.83	54	0.577	12.29	7.9
防 府	1.74	-14.42	28.86	45	0.68	16.90	9.1
広 島	2.86	-14.88	-6.29	54	0.71	26.23	8.4
呉	1.87	-15.52	17.30	42	0.78	29.51	7.0
松 永	2.32	-15.60	4.16	33	0.82	31.09	5.1
津 山	1.937	-7.156	-2.347	45	0.600	11.803	6.8
岡 山	2.400	-12.273	-1.478	54	0.743	31.359	6.7
姫 路	2.200	-13.431	3.969	45	0.762	29.019	5.8
洲 本	2.336	-12.136	-1.982	54	0.692	23.516	7.6
神 戸	1.783	-15.339	21.535	54	0.700	24.565	7.9

(7 月)

	a	b	c	サンプル サイズ	重相関係数	F 値	標準誤差
大 分	4.024	-9.221	-56.074	54	0.885	91.963	7.3
日 田	5.094	-1.601	-103.55	45	0.900	89.45	5.7
熊 本	5.493	-1.743	-118.457	54	0.935	175.923	5.3
佐 賀	4.174	-4.549	-74.913	54	0.920	139.650	5.4
福 岡	2.434	-10.292	-8.627	45	0.832	47.145	7.9
宇 和 島	5.68	-1.97	-122	44	0.940	155	5.0
松 山	4.36	-8.80	-69.72	54	0.92	136.39	6.1
多 度 津	3.907	-3.854	-67.868	54	0.828	55.59	6.9
高 松	4.204	-1.422	-72.637	54	0.757	34.211	7.3
下 関	(4.133 2.19)	-1.694 -8.93	-70.110 -7.59	54 54	0.759 0.85	34.733 68.74	7.3 7.1
防 府	3.01	-10.95	-17.58	45	0.89	75.99	7.8
広 島	3.50	-7.79	-43.84	54	0.82	51.11	9.0
呉	4.34	-7.41	-73.19	42	0.90	85.80	7.7
松 永	5.44	-1.99	-113.96	33	0.95	128.97	4.9
津 山	3.428	-2.796	-58.778	45	0.903	93.136	4.8
岡 山	1.278	-12.375	28.910	54	0.751	33.055	9.1
姫 路	4.789	-3.355	-92.798	45	0.933	141.132	4.6
洲 本	4.983	-3.238	-96.655	54	0.828	55.797	7.9
神 戸	5.177	-4.762	-94.843	54	0.864	74.991	7.9

(8 月)

	a	b	c	サンプル サイズ	重相関係数	F 値	標準誤差
大 分	4.747	-5.067	-86.497	54	0.796	43.958	6.9
日 田	4.050	-4.481	-69.17	45	0.773	31.20	6.8
熊 本	4.299	-3.482	-78.816	54	0.769	36.811	6.8
佐 賀	5.343	-2.122	-117.266	54	0.888	94.720	5.0
福 岡	4.864	-4.541	-93.27	45	0.863	61.45	5.4
宇 和 島	6.00	-2.48	-135	45	0.853	55.9	5.2
松 山	4.98	-5.87	-94.68	54	0.820	51.05	6.6
多 度 津	5.26	-5.399	-106.588	54	0.782	40.154	7.3
高 松	5.521	-0.272	-116.635	54	0.805	46.925	5.4
下 関	(5.511 4.25)	-0.405 -5.01	-116.153 -73.20	54 54	0.809 0.76	48.199 35.31	5.3 7.8
防 府	5.75	-4.66	-108.49	45	0.83	44.90	6.4
広 島	4.90	-3.62	-93.88	54	0.66	19.87	10.0
呉	5.55	0.90	-121.67	42	0.72	21.16	10.2
松 永	5.44	-2.69	-116.95	33	0.88	53.87	5.4
津 山	3.965	-4.502	-71.792	45	0.828	45.719	5.8
岡 山	4.664	-3.676	-86.791	54	0.805	46.864	6.7
姫 路	4.580	-7.064	-81.697	45	0.794	35.76	6.9
洲 本	5.425	-1.767	-116.411	54	0.802	45.913	5.9
神 戸	1.551	-6.532	21.539	54	0.529	0.906	9.7

(9 月)

	a	b	c	サンプル サイ ズ	重相関係数	F 値	標準誤差
大 分	1. 476	-3. 953	3. 638	54	0. 609	15. 046	5. 8
日 田	2. 081	-3. 348	-15. 15	45	0. 732	24. 22	4. 9
熊 本	2. 474	-3. 261	-24. 684	53	0. 647	17. 983	7. 3
佐 賀	2. 307	-4. 143	-21. 518	54	0. 751	33. 030	4. 9
福 岡	2. 718	-8. 847	-22. 975	44	0. 817	41. 04	5. 1
宇 和 島	3. 33	-1. 74	-52. 8	45	0. 820	43. 3	6. 1
松 山	2. 46	-8. 18	-16. 45	54	0. 78	38. 43	6. 7
多 度 津	2. 013	-4. 435	-13. 851	54	0. 691	23. 291	6. 0
高 松	2. 023	-5. 771	-9. 064	54	0. 775	38. 464	4. 9
下 関	(2. 036 1. 88	-5. 747 -6. 55	-9. 452 -3. 41	54 54	0. 777 0. 66	38. 960 20. 14	4. 9 6. 1
防 府	2. 65	-9. 03	-13. 93	45	0. 68	18. 47	7. 1
広 島	2. 14	-3. 38	-16. 68	54	0. 52	9. 46	8. 1
呉	2. 05	-9. 58	-2. 69	42	0. 70	18. 67	7. 7
松 永	2. 58	-1. 76	-33. 89	29	0. 83	29. 58	4. 6
津 山	1. 410	-6. 077	4. 481	45	0. 608	12. 321	6. 5
岡 山	2. 397	-3. 646	-23. 122	54	0. 743	31. 415	5. 7
姫 路	1. 984	-3. 852	-13. 271	45	0. 719	22. 439	5. 4
洲 本	2. 328	-3. 986	-24. 518	54	0. 758	34. 502	5. 8
神 戸	2. 112	-5. 513	-5. 765	54	0. 705	25. 181	7. 3

付表Ⅱ 実用蒸発量推定式の定数適用地点表

兵 庫 県			
地 点	区 分	適用地点	
神 戸	大 阪 湾	神 戸	
明 石	瀬 戸 内 東	姫 路	
西 宮	大 阪 湾	神 戸	
六 甲 山	山 間 部	津 山	
三 木	瀬 戸 内 東	姫 路	
高 砂	"	"	
家 島 Iejima	"	"	
竜 野	"	"	
上 郡	山 間 部	津 山	
山 崎	"	"	
一 の 宮	"	"	
田 原 (神崎) Tahara	"	"	
西 脇	瀬 戸 内 東	姫 路	
柏 原 Kaibara	山 間 部	津 山	
篠 山	"	"	
佐 治 (青垣) Saji	"	"	
市 (三原) Ichi	瀬 戸 内	高 松	
洲 本	大 阪 湾	洲 本	
	瀬 戸 内	高 松	
	大 阪 湾	洲 本	
	瀬 戸 内	高 松	
岩 屋 (淡路) Iwaya	大 阪 湾	洲 本	
姫 路	瀬 戸 内 東	姫 路	
末 野 (三田)	山 間 部	津 山	

岡 山 県			
地 点	区 分	適用地点	
岡 山	瀬 戸 内	岡 山	
西 大 寺	"	"	
和 気	瀬 戸 内 東	姫 路	
三 石	"	"	
長 島	瀬 戸 内	岡 山	
牛 窓	"	"	
Higashinozaki	"	"	
味 野	"	岡 山	
玉 島	"	"	
笠 岡	"	松 永	
北 木 島 (笠岡)	"	"	
矢 掛 Yakage	"	岡 山	
倉 敷	"	"	
高 梁 Takahashi	山 間 部	津 山	
宇 治	"	"	
豊 野	"	"	

地 点	区 分	適用地点
福 渡	山 間 部	津 山
(吉井) Susai	"	"
林 野 (美作)	"	"
津 山	"	"
(旭) Haga	"	"
(北房) Shimoazabe	"	"
新 見	"	"
矢 神 (哲西)	"	"
千 屋	"	"
山 奥	"	"
久 世	"	"
湯 本	"	"
上 長 田 (八束)	"	"
奥 津	"	"
小 中 原 (加茂)	"	"
行 方 (奈義)	"	"
古 町 (大原)	"	"
倉 見 川 (倉見)	"	"
恩 原	"	"
玉 野	瀬 戸 内	岡 山

広 島 県			
地 点	区 分	適用地点	
広 島	瀬 戸 内 中 西 部	広 島	
草 津 (広島) Kusatsu	"	"	
類 野 (滝野川) Seno	"	"	
江 田 島	"	呉	
倉 橋	"	"	
廿 日 市	"	広 島	
大 竹	"	"	
佐 伯	山 間 部	津 山	
吉 和	"	"	
Minochi	(")	"	
吉和花原 Yoshiwahanabara	"	"	
加 計	"	"	
八 幡 (芸北)	"	"	
大 朝	"	"	
千 代 田	"	"	
(上殿河内) Tsutsuga	"	"	
可 部	瀬 戸 内 中 西 部	広 島	
呉	"	呉	
黒 瀬	"	"	
西 条	"	"	
竹 原	"	"	

地 点	区 分	適用地点
豊 栄 Toyosaka	山 間 部	津 山
河 内 Kochi	瀬戸内中西部	呉
豊	瀬戸内	松 山
久 比	"	"
美 土里	山 間 部	津 山
吉 田	"	"
井 原	"	"
布 野	"	"
三 次 Miyoshi	"	"
吉 舎 Kisa	"	"
甲 山	"	"
世 羅 西	"	"
大 和 Daiwa	"	"
三 原	瀬戸内	松 永
因 島	"	"
御 調 Mitsugi	山 間 部	津 山
高 野 Takano	"	"
比 和	"	"
	Tono (")	"
八 鋒 (西城)	"	津 山
帝 釈 (東城)	"	"
庄 原	"	"
	Nanatsuka	"
上 下	"	"
油 木 Yuki	"	"
	Shinichi	"
府 中	瀬戸内	松 永
松 永	"	"
福 山	"	"
神 辺 Kannabe	"	"

山 口 県

地 点	区 分	適用地点
下 関	瀬戸内西部	下 関
宇 部	"	"
防 府	"	防 府
徳 山	"	"
下 松	"	"
平 生	"	"
船 木 (楠)	"	下 関
御 堀 (山口)	"	防 府
山 口	"	"
岩 国	瀬戸内中西部	広 島
安 下 庄	"	"
	Utsui	"

地 点	区 分	適用地点
西 市 (豊田)	山 間 部	津 山
伊 佐 (美称)	"	"
堀 (徳地)	"	"
鹿 野 Kano	"	"
	Hirose	"
玖 珂 Knga	瀬戸内中西部	広 島
篠 生 (阿東)	山間部(域外)	津 山
徳 佐 (阿東)	" (")	"
佐 々 並	" (")	"
	(美東) Ōta	"

愛 媛 県

地 点	区 分	適用地点
三 島	瀬戸内	多度津
新 立 (新宮)	山間部(域外)	津 山
西 条	瀬戸内	松 山
新 居 浜	"	"
瀬 戸 崎 (上浦)	"	松 永
鈍 川 Nibukawa	山 間 部	津 山
菊 間	瀬戸内	松 山
波 止 浜	"	"
川 上 (川内)	"	"
中 山	山 間 部	津 山
松 山	瀬戸内	松 山
大 洲	瀬戸内西部	宇和島
長 浜	"	"
美 川	山間部(域外)	津 山
小 田 町	" "	"
伊 方 町	瀬戸内西部	宇和島
宇 和 町	"	"
野 村	山 間 部	津 山
下 鍵 山 (日吉)	" (域外)	"
松 野	" (")	"
宇 和 島	瀬戸内西部	宇和島
大 保 木 (西条)	瀬戸内	松 山
八 幡 浜	瀬戸内西部	宇和島
久 万 入 野	山間部(域外)	津 山

香 川 県

地 点	区 分	適用地点
高 松	瀬戸内	高 松
多 度 津	"	多度津
引 田 Hikeda	"	高 松
	Gonyo	"

地 点	区 分	適用地点
塩 江	山 間 部	津 山
美 合 Miyai	"	"
滝 宮 (綾南) Takimiya	瀬 戸 内	多度津
豊 浜	"	"
土 庄 Tonoshō	"	高 松

地 点	区 分	適用地点
大 角 鼻 (内海)	瀬 戸 内	高 松
大 橋 (白鳥)	"	"
戸 川 (財田)	"	多度津
長 尾	"	"