

# 土壌水分欠損量を指標とした畑地灌漑スケジューリングモデル

サトウキビ圃場への適用

猪迫耕二\*・黒田正治\*\*・中野芳輔\*\*・吉田 勲\*

平成7年6月23日受付

## A Model for Irrigation Scheduling Utilizing Soil Moisture Deficit

— Application to a Sugar Cane Field —

Koji INOSAKO\*, Masaharu KURODA\*\*, Yoshisuke NAKANO\*\* and Isao YOSHIDA\*

It is important for upland field irrigation scheduling to determine the optimum amount and timing of irrigation. Soil moisture deficit (SMD) is an index which represents degrees of soil moisture condition. It was useful for irrigation scheduling. A prediction model of this index (a SMD model) has been reformed by the authors since 1990. In this study, the SMD model was applied to a sugar cane field in Miyako-island and its accuracy was tested. Moreover, the automatic determination of model parameters was attempted by using a mathematical optimization method. As a result, the cleared points are as follows:

(1) The SMD model has enough accuracy for practical use. In particular, the high accuracy, average relative error is 17.4 %, is gotten in successive dry days. (2) Standard Powell Method can be used to determine model parameters automatically. (3) This model can be used as an irrigation scheduling model.

### はじめに

畑地灌漑の目的は、各圃場において営農目標に掲げられた収量、品質を確保するために必要な水を必要な時期に土壌を介して作物に与えることにある。したがって、畑地灌漑スケジューリングでは、灌水量と灌水時期を最適に決定することが重要となる。

ところで、土壌の水分状態を定量的に表す指標の一つ

に土壌水分欠損量 (Soil Moisture Deficit, 以後略して SMDと表す) が挙げられる。SMDとは、ある土層中の土壌水分状態が作物にとって好適な状態からどの程度逸脱しているかを示すものであり、水深の単位で表される。土壌の乾燥状態を表す値がそのまま好適な状態まで復帰させるのに必要な水量を表していることとなる。圃場の SMDをモニタリングしておけば、灌水量と灌水時期を同時に決定することが可能となる。このことは SMDが畑地

\* 鳥取大学農学部農林総合科学科生存環境科学講座

\* *Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University*

\*\* 九州大学農学部農業工学科灌漑利水工学講座

\*\* *Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Kyushu University*

灌漑スケジューリングにとって有益な指標であることを意味している。

このSMDの日変化を推定する方法の一つにSMDモデルがある。SMDモデルは日単位の気象データと土壤水分特性曲線から日消費水量を推定し、それを用いてSMDを推定する経験的水収支モデルである。筆者らは前報<sup>1)</sup>においてSMDモデルを紹介し、本モデルが土壤物理的妥当性を内包していることを理論的に明らかにした。

本モデルを実際の畑地灌漑スケジューリングに適用するためには、実用に耐えうるだけの推定精度を有していることを実圃場において証明する必要がある。そこで本研究では、南西諸島の宮古島において1989年に行われたサトウキビの栽培実験データにSMDモデルを適用し、その推定精度の確認を行った。

### SMDモデルの概要

SMDモデルの構造、計算システムに関する詳細な説明は前報<sup>1)</sup>に譲り、ここではその概要を述べる。

#### 1. SMDの定義

SMDモデルでは、根が貫入している最大深さまでの土層、すなわち有効根群域をスケジューリングの対象土層とする。ある時間における土壤水分欠損量は有効根群域内の土壤が保持しうる全有効水分量 $H_0$ 、および、ある時間に有効根群域内の土壤中に存在する水分量 $H_t$ を用いて次式のように定義される。

$$SMD = H_0 - H_t \quad (1)$$

ここで、有効水分量は有効根群域内の圃場容水量からシオレ点までの土壤水分量とする。このSMDの日変化を推定するモデルがSMDモデルである。なお、有効根群域が過湿状態にあるときは $SMD < 0$ となる。

#### 2. 計算システム

一般に、土壤の乾燥がある程度まで進行すると作物に水ストレスが発生し、蒸発散量の低下が生じる。この現象を作物側から見た場合、土壤の有効水分は大きく分けて、作物に容易に吸収できる水分領域(EAレンジ)と吸収が困難な水分領域(LAレンジ)の2つの水分領域から成っていると考えることができる。さらに、 $SMD < 0$ の過湿状態では重力水が存在し、これは作物に吸収されない水分領域(Nレンジ)に属する水分といえる。

これらのことを考慮に入れたSMDモデルの構造を第1図に示した。第1図において $H_1$ 、 $H_2$ はそれぞれEAレンジ、LAレンジに属する土壤水分の最大量(水深)であり、 $H_n$ はNレンジに属する土壤水分の最大量である。これらの値は次式より決定される。

$$H_1 = (\theta_{fc} - \theta_{tp})D \quad (2)$$

$$H_2 = (\theta_{tp} - \theta_{wp})D \quad (3)$$

$$H_n = (\theta_{mp} - \theta_{fc})D \quad (4)$$

ここで、 $D$ :有効根群域の厚さ、 $\theta_{mp}$ 、 $\theta_{fc}$ 、 $\theta_{tp}$ 、 $\theta_{wp}$ :実際に土壤が到達できる最も湿潤な状態での体積含水率、圃場容水量、水分領域の変曲点となる体積含水率、シオレ点、である。また、 $H_{11}$ 、 $H_{12}$ はある時間でのEA、LA両レンジに属している土壤水分量とすると、そのときのSMDは次式より求められる。

$$SMD = (H_1 - H_{11}) + (H_2 - H_{12}) - H_n \quad (5)$$

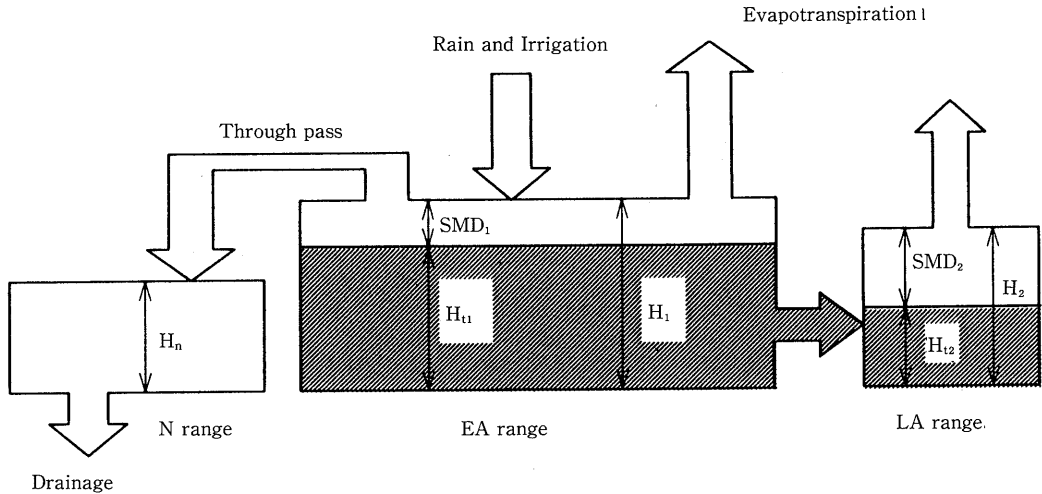
次に計算の手順について概説する。

まず、過剰な降雨が生じたと仮定する。本モデルでは、水分補給は降雨や灌水によって為されるが、この水分はEAレンジに補給される。EAレンジを満たしきった後にLAレンジに浸透すると仮定する。両レンジの最大水量の和(有効水分量)を越える過剰水はNレンジに供給される。3つのレンジを満たしきった以上の余剰水分は土壤には浸潤しないものとする。

水分補給終了後、水分消費が始まる。過剰な降雨が生じた後では、まずNレンジの水が重力水として排除される。

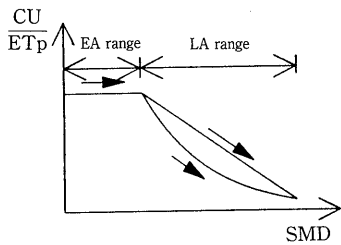
次に、作物にとって吸収しやすい水分領域であるEAレンジの水が消費され、最後にLAレンジに属する水が消費されていく。EA、LA両レンジにおける水分消費は蒸発散によってのみ生じる。1日の消費水量は $H_{11}$ ないしは $H_{12}$ から実蒸発散量を差し引けばよい。しかし、現実には下層から有効根群域へ上昇してくる毛管補給水が存在するため、実蒸発散量よりもやや小さな値を差し引かねばならない。すなわち、毛管補給水は見かけ上、蒸発散を抑制するといえる。この毛管補給水を定量的に把握することは極めて難しい。一方、実蒸発散量の推定については、Bowen比法などの精度の良い方法が確立されている。しかし、非常に多くの項目を測定しなければならず、実用的とはいえない。そこで、本モデルでは大気が要求する最大の蒸発散量として蒸発散位を求め、これにある関数を乗じて消費水量の推定を行う。この関数は見かけ上、蒸発散位を抑制するもので、ここでは抑制関数と呼ぶ。抑制関数には毛管補給水の影響だけでなく、土壤の乾燥に伴う蒸発散量の減衰の影響をも内包させる。その関数形として、直線型や指数型が考えられるが、EA、LAレンジでは作物による利用の難易度が異なるため、異なる抑制関数が必要になるとと思われる。このような抑制関数の概念を表したものが第2図である。

水分消費がLAレンジに及んだ後に適度な降雨が生じた

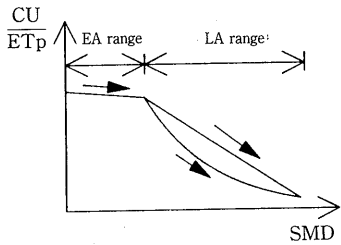


$H_1$  : Maximum water depth of the EA range  
 $H_{1i}$  : Instantaneous water depth of the EA range  
 $H_2$  : Maximum water depth of the LA range  
 $H_{12}$  : Instantaneous water depth of LA range  
 $H_0$  : Total available moisture ( $=H_1+H_2$ )  
 $SMD=SMD_1+SMD_2$

第1図 SMDモデルの構造



(a) No stress in the EA



(b) Some stress in the EA range

第2図 抑制関数の概念

場合、この補給水は前述の通りEAレンジに供給される。降雨終了後、水分消費はEAレンジより始まると仮定する。EAレンジが空になった後に再びLAレンジの水分消費が開始されるが、このときのLAレンジの水深は降雨が発生する直前の水深に等しいとする。ただし、土壌の種類によってはEAレンジの水分消費が継続している状態で、EAレンジの水分の一部がLAレンジに移行する場合もありうる。

以上の計算システムに従い、第  $i+1$  日目の土壌水分欠損量  $SMD_{i+1}$  は、第  $i$  日目の土壌水分欠損量  $SMD_i$ 、消費水量  $E_i$ 、降水量  $R_i$ 、灌水量  $Irr_i$  および重力排水量  $G_i$  を用いて次式より求められる。

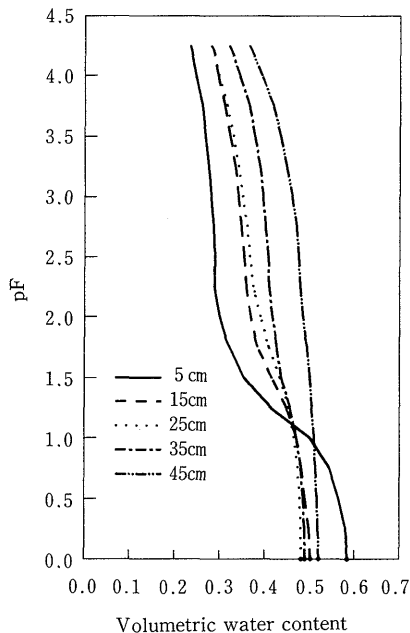
$$SMD_{i+1} = SMD_i + E_i - R_i - Irr_i + G_i \quad (6)$$

サトウキビ圃場への適用

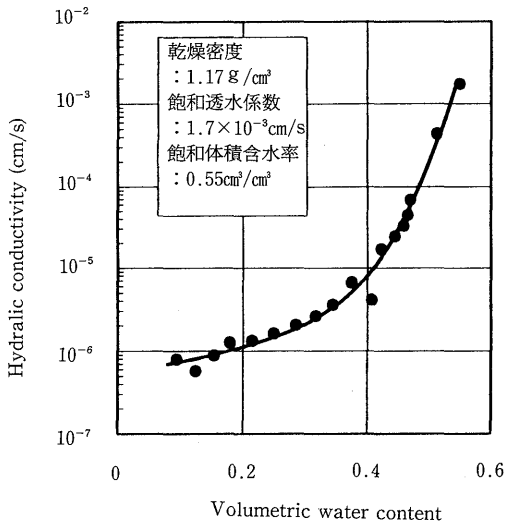
1. 対象地区

今回の解析は南西諸島の宮古島にあるサトウキビ圃場で1989年6月4日から10月31日までの150日間の測定によって得られたデータについて行った。

(1) 土壌特性



第3図 実験圃場の土壌水分特性曲線



第4図 実験圃場の不飽和透水係数

解析対象土壌は琉球石灰岩を母材とする弱アルカリ性の島尻マーヅである。その土壌水分特性曲線を第3図に示した。ここに示した土壌水分特性曲線は脱水過程のも

のであるが、ヒステリシスは顕著ではなかった。本圃場の土壌水分特性曲線は深さによってその形状がかなり異なっていた。第3図から表層部の保水力は大きい、深くなるに従い保水力は小さくなっていることがわかる。

SMDの実測値は土壌水分特性曲線をもとに、(1)式によって決められる。しかし、本圃場のように有効根群域内の土壌水分特性曲線が深さによって著しく異なる場合には次の手順で実測値を求める。

- ①有効根群域をいくつかの土層に分割する。
- ②各土層毎に(1)式を適用して、各土層における実測値(SMD<sub>i</sub>)を求める。
- ③SMD<sub>i</sub>を合計してSMDの実測値を求める。

なお、今回は圃場用水量をpF1.5、シオレ点をpF4.0として実測SMDを求めた。

また、深さ15cmにおける土壌から調整試料を作成し、Bruce and Klute法によって不飽和透水係数を求めた。その結果を第4図に示した。高水分域では体積含水率が0.1小さくなると不飽和透水係数は2オーダー小さくなる。一方、低水分域では体積含水率の変化量に対する不飽和透水係数の変化量は小さい。

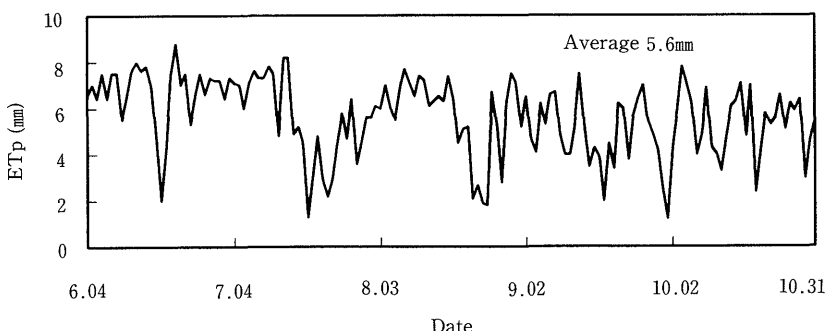
なお、圃場における土壌の水分子状態は水銀テンシオメータで毎日午前9:00に測定されている。

#### (2) 気象特性

宮古島地区は年平均気温23.1°C、年平均湿度80%、年平均降水量2300mmの高温多湿な亜熱帯海洋性気候区に属している。年降水量は大きい季節的な偏りがあり、慢性的な干害地域といえる。ただし、実験が行われた1989年は比較的安定して降雨が発生していた。

上述したように、SMDモデルでは日単位気象データから蒸発散位を推定し、それをもとにSMDの推定を行う。したがって蒸発散位をどのようにして決定するかが精度向上のために重要なポイントとなる。蒸発散位の推定には様々な方法が提案されているが、ここでは実用性を考慮し、計算が簡便でかつ精度の良いPenman法を採用した。Penman法による蒸発散位ET<sub>p</sub>(mm)の推定は三浦ら<sup>2)</sup>の方法に従った。なお、その際にサトウキビ群落のアルベドが必要となるが、これはMonteithら<sup>3)</sup>を参考にし0.15とした。実験圃場では気象データとして降水量と気温しか測定されていなかったため、今回は気象台で得られたデータを使用した。計算結果は第5図に示している。これによると蒸発散位の日変動は激しく、晴天日では6~9mmとかなり大きい。適度な降雨日、曇天日もあったため、全期間平均は5.6mmであった。

#### (3) 栽培作物



第5図 測定期間中の蒸発散位

対象作物はサトウキビであるが、これは1988年に作付けされたものであり、解析対象期間においては十分に生長した同一の生育ステージにあると思われる。測定期間の平均葉面積指数は4.27であった。

作物の有効根群域はその種類だけでなく、気象条件、土壌条件の影響を強く受けて定まってくる。例えば、FAO<sup>4)</sup>によるとサトウキビの根は本来、土壌深くまで貫入し、地下5mに達することもあるという。しかし、南西諸島の島尻マージが分布する圃場では一般に作土層が薄く、サトウキビが貫入しうる深さは40~50cmに過ぎないという報告もある<sup>5)</sup>。このように地域差が著しい作物の有効根群域の有効な推定法は現在のところ存在しない。したがって、SMDモデル解析による有効根群域は根群調査に基づいて決定せざるをえない。今回の調査では本圃場における有効根群域は50cmであった。

## 2. モデルパラメータ

SMDモデルにおいて同定すべきパラメータとして

①重力水の排除に関するパラメータ、②各レンジの最大水深を決定するパラメータ③抑制関数に関するパラメータが挙げられる。①および③に関しては採用した関数形によって、さらに幾つかのパラメータが必要となることがある。今回の解析では、重力排水を(7)式で求め、抑制関数はEA、LAレンジともに指数型を選択し、(8)、(9)式とした。

$$G = H_n^g \quad (7)$$

$$f_{EA}(SMD) = \exp(-k_1 \cdot SMD) \quad (8)$$

$$f_{LA}(SMD) = \exp(-k_2 \cdot SMD) \quad (9)$$

したがって、同定パラメータは $g, k_1, k_2, \theta_{mp}, \theta_{fc}, \theta_{tp}$ の6つとなる。厳密に言えば $\theta_{wp}$ をも同定すべきであるが、ほ場がシオレ点まで乾燥することはなかったため、今回はpF4.0に相当する各深さの体積含水率の算術平均0.315を

用いた。

## 3. 同定方法

### (1) 数学的最適化手法

SMDモデルではパラメータ数がそれほど多くはないので、経験的な試行法によって実測SMDに合うようにパラメータを決定することも可能である。しかし、この方法では、推定を行うオペレータの熟練度によって推定精度が左右される。そこで、数学的最適化手法をSMDモデルに導入し、モデルパラメータを自動的に決定することとした。今回の解析では、流出解析におけるタンクモデルのパラメータ同定によく用いられる基準化Powell法を採用した。基準化Powell法の基本的なアルゴリズムは角屋ら<sup>6)</sup>を参考とした。実測値SMD<sub>o</sub>と計算値SMD<sub>e</sub>の食い違いの程度を表す評価関数Jには次式で表される $\chi^2$ 基準を用いた。

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(SMD_{e_i} - SMD_{o_i})^2}{|SMD_{o_i}|} \quad (10)$$

ここで、N：データ数である。

各パラメータはJが最小となるように決定される。パラメータが物理的に不都合な値を採用した場合にはペナルティ関数を評価関数に加算し、同定をやりなおす。そのときの判定基準として

- ①モデルパラメータは非負である
- ②同定期間における水収支がバランスしている
- ③ $\theta_{sat} > \theta_{mp} > \theta_{fc} > \theta_{tp} > \theta_{wp}$ である
- ④ $g \leq 1$ である
- ⑤ $k_1 < k_2$ となる

ことを採用した。なお、 $\theta_{sat}$ は飽和水分点であり、ここでは、各深さの平均値である0.511を採用した。

### (2) パラメータの同定期間

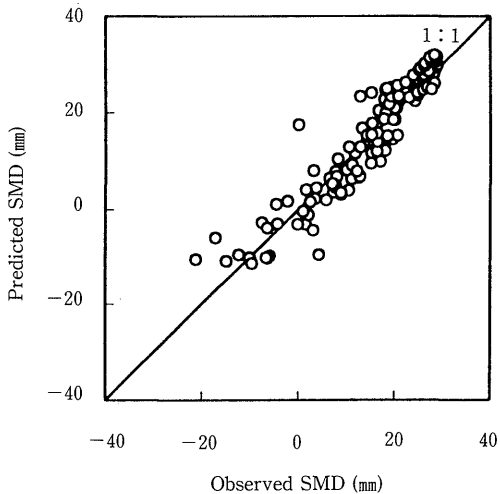
実測値に適合するようにパラメータを決定するモデル

第1表 同定結果

相対誤差	$g$	$\theta_{mp}$	$\theta_{fc}$	$\theta_p$	$k_1$	$k_2$
20.5%	0.99	0.458	0.427	0.382	0.007	0.087

第2表 連続干天状態での相対誤差

	連続干天期間	相対誤差 (%)
I	8/1 ~ 8/18	18.0
II	8/27 ~ 9/8	16.0
III	9/21 ~ 10/1	16.6
IV	10/2 ~ 10/31	18.8
	平均	17.4



第6図 SMDモデルの推定精度

では、パラメータの決定に用いたデータとは別の独立したデータでモデルの検証を行うのが一般的である。しかし、今回は1年分のデータしか得られなかった。そこで、測定期間150日のうち最初の45日間のみでパラメータを同定し、残りの105日間で推定精度の確認を行うこととした。

4. 同定結果

同定結果を第1表に示す。第1表に示した相対誤差は同定に用いられた45日間のデータに関するものであり、次式で求められる。

$$J_{RE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{SMD_{ei} - SMD_{oi}}{SMD_{ei}} \right| \quad (11)$$

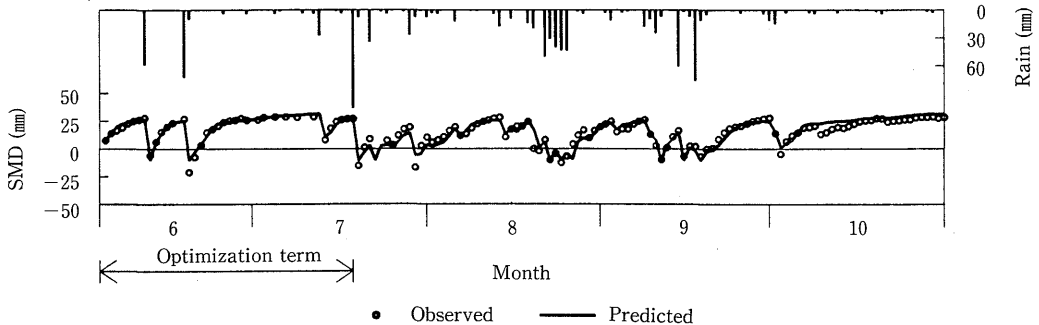
SMDモデルによる相対誤差は20.5%であった。EAレンジに属する水分量の最大値は(2)式より22.5mm, LAレンジは33.5mm, Nレンジの水分は15.5mmとなった。全有効水分量は56mmとなる。また、本圃場ではEAレンジでも水分消費に若干の抑制がかかり、消費水量は蒸発散位より少なくなる。

5. SMDモデルの推定精度

次に、第1表に示したパラメータを用いて、残りの105日間におけるSMDの日変化を推定した。第6図はその推定精度を表している。これによるとSMDが小さいとき(土壌は湿潤)は1:1直線の下側にある点が多く、SMDが大きい(土壌は乾燥)とき上側にある点が多い。このことは土壌が湿潤のときSMDモデルはやや小さく、乾燥している場合はやや大きく推定していることを意味している。しかし、全体的にみて(実測値:推定値)は(1:1)の直線上に集まっており、良好な推定精度であるといえる。

また、適合状況を詳細にみるためにSMDの実測値と推定値の経日変化を表したものが第7図である。

これによるとSMDが負から正になる付近で実測値と推



第7図 SMDの実測値と推定値の経日変化

定値のパラメータが目立つ。これは同じ降水量でも降雨発生時からテンシオメータの測定時までの時間差によって重力水の排水量が異なってくるためと思われる。この点はSMDモデルの弱点であり、さらに改良する必要がある。しかし、モデルで利用する気象データが日単位であることを考慮するとやむをえない誤差といえる。

SMDモデルの利用目的からすると精度よく推定すべき土壌水分状態はむしろ乾燥状態であり、この状態での推定精度を重視すべきであろう。そこで、SMDモデルの検証期間中に発生している4回の連続干天時での適合度をみるために連続干天期間中の相対誤差を求めた。結果は第2表にまとめている。これによると相対誤差は16~19%であり適合度は非常に良い。第7図より土壌が乾燥状態にあるときは、若干の降雨や灌水によるSMDの低下もよく再現している。これらのことから本モデルが実用上十分な推定精度を有しているといえる。このことは圃場の乾燥がどの程度進んでいるかが問題となる畑地灌漑にとって本モデルが非常に有効であることを意味している。

#### ま と め

本報告では、SMDモデルを実圃場で得られたデータに適用し、その推定精度の確認を行った。また、その際、モデルに数学的最適化手法を導入し、諸パラメータを自動的に決定する方法について検討を行った。その結果、同一の生育ステージにおいては基準化Powell法を用いてパラメータの同定を行うことができること、および本モ

デルが実用に耐えうるだけの推定精度を有していることが明らかとなった。これらのことからSMDモデルが畑地灌漑スケジューリングにとって有効なものであることが明らかとなった。

なお、本研究の一部は1993年度文部省科学研究費・奨励研究Aの補助を受けて行った。記して謝意を表す。

#### 引用文献

- 1) 猪迫耕二・中野芳輔・黒田正治：畑地における土壌水分欠損状況の推定モデル。農土論集, 165, 55-64 (1993)
- 2) 三浦健志・奥野林太郎：ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細。農土論集, 164, 157-163 (1993)
- 3) Monteith, J.L. and M.H. Unsworth : *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London (1990) p. 80
- 4) Doorenbos, J. and A.H. Kassam : FAO灌漑排水技術資料 No.33 水による生産反応。北海道開発局農業水産部監訳, 北海道土地改良設計技術協会, 北海道 (1992) p. 134
- 5) 山城三郎：沖縄におけるサトウキビのカンガイ用水量決定に関係ある2, 3の要素に関する研究。琉球大学農学部学術報告, 30, 367-487 (1983)
- 6) 角屋睦・永井明博：流出解析手法(その12)一タンクモデルとS P法による最適同定。農土誌, 48(12), 51-59 (1980)