



# 畑地における作物根の分布と土壌面蒸発の変動を考慮した 土壌水分動態解析と消費水量の定量化

弓削こずえ<sup>1</sup>・阿南光政<sup>1</sup>

Evaluation of soil water movement and water consumption in crop fields  
based on the crop root distribution and daily soil evaporation

Kozue YUGE<sup>1</sup> and Mitsumasa ANAN<sup>1</sup>

**Abstract:** The aim of this study is to evaluate soil water movement and water consumption in crop fields based on the crop root distribution and daily soil evaporation. A numerical model based on HYDRUS-1D was introduced to simulate the soil water movement under different distributions of crop root. A concept of dual crop coefficient was used to separately quantify soil evaporation and transpiration for the boundary condition of the soil surface and the root extraction. Soil evaporation reduction coefficient was introduced to estimate the soil evaporation reduction with the decrease of soil water content. Field measurement was performed in a broccoli field to verify the model assumption. Simulated volumetric water contents near the surface assuming a uniform root distribution were quite different from observed data. Hence simulated and measured water consumptions according to the soil moisture depletion method did not agree well. When the root growth process and the soil evaporation reduction coefficient were taken in account in the soil water analysis, simulated volumetric water content and water consumption had good agreement with the measured ones.

**Key Words :** soil water depletion method, transpiration, root extraction, crop coefficient, irrigation facility

## 1. はじめに

農業水利施設を設計する際には、まず受益地のピーク消費水量を算定し、これを補うことができるような施設規模やレイアウトを計画することが一般的である。こうした計画の指針である土地改良事業計画設計基準「農業用水(畑)」(以後、計画基準)においては、畑地の消費水量の算定手法として、土壌水分減少法および Penman 法を援用した手法が提案されている(農林水産省構造改善局, 1997)。このうち、土壌水分減少法は比較的古くから用いられている手法であり、多くの畑地灌漑事業地区

で採用されてきた。

土壌水分減少法とは、複数の土層において体積含水率を連続測定し、測定期間における土壌水分の減少量を用いて消費水量を算定する手法である。しかし、長期にわたる連続測定には多くの労力とコストがかかるとともに、多品目の作物が栽培されているような地区においては作目ごとの調査が必要となり、実測が難しいことが多い。また、計画基準では土壌水分減少法の測定は深さ 70 cm まで行うことが推奨されている。しかし、これに深においても土壌水分の変動が生じるケースもあると考えられるが、土壌水のフラックスを実験的に求めることは極めて難しい。以上より、畑地における消費水量を土壌水分減少法で求める際に、土壌水分状態の連続測定によらず、土壌水分動態のシミュレーションを行うことが有効であると考えられる。畑地の土壌水分動態に大きな影響を及ぼす要因に、作物根の吸水が挙げられる。作物根の吸水は作物根群域の分布に大きな影響を受ける。計画基準においては普通畑における根群深さは 40 cm と規定されているが、生育期間における土壌水分動態を解析するには、作物根の生長を考慮する必要があると考えられる。

本研究は、従来は実測が基本である土壌水分減少法に適用する土壌水分状態を土壌水分動態解析によって求め、消費水量を定量化することを目的とするものである。また、作物根の生長や分布ならびに土壌面蒸発が土壌水分動態解析結果の精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2008) を援用し、畑地における作物根の分布を 2 パターンに設定して土壌水分動態解析を行った。土壌水分動態解析において、作物根の吸水速度を設定する際には蒸散速度を求める必要がある。既往の研究では、気象データを用いてポテンシャル蒸発散速度を求め、LAI (葉面積指数) や作物群落による土壌の被覆度を用いて蒸散速度と土壌面蒸発速度に分離定量化する手法が提案されている

<sup>1</sup>Faculty of Agriculture, Saga University I Honjo Saga, 8408502, Japan,  
Corresponding author: 弓削こずえ, 佐賀大学農学部.  
2016年5月9日受稿 2016年9月24日受理

(Norman and Campbell, 1983; Kroes et al., 2008). しかし, こうした作物群落の生育に関するデータを継続して得ることは難しい. そこで, FAO (Food and Agriculture Organization) が提案している Dual crop coefficient の概念 (Allen et al., 1998) を導入し, 土壌面蒸発速度および蒸散速度を簡易的に分離定量化して, それぞれを土壌面の境界条件および根の吸水速度として与え, 土壌水分動態解析への適用性について検証した. Dual crop coefficient を用いて蒸散速度と土壌面蒸発速度を分離し, HYDRUS の解析に用いた例は少ない. Ren et al. (2016) は黄河流域の比較的スケールの大きな畑作地区において同様の手法によって HYDRUS を用いた土壌水分および塩分動態の予測を行い, 灌漑施設の水利用実態と収量の状況を評価しているが, 土壌水分減少法への適用を目的とした解析に導入した例は見当たらない. 以上によって得た体積含水率の計算値と実測値を土壌水分減少法に適用して消費水量を計算し, 作物根の分布, 吸水速度および土壌面蒸発速度の設定の違いが消費水量の算定結果に及ぼす影響を評価した. 解析結果の精度を確認するために, ブロccoliが栽培されている圃場において土壌水分状態の測定を行った.

## 2. シミュレーションモデルの構築

畑地において, より精緻な土壌水分動態解析を行うには, 三次元的な取り扱いが必要である. 作物根が列状に栽培され, マイクロ灌漑が行われるような場合には, 列方向の土壌水分移動は無視することができ, 二次元場として取り扱うことができる. さらに, 作物が十分に生長し, スプリンクラーなどで土壌面に一様に灌漑が行われているような圃場では, 土壌水分の移動は鉛直一次元方向に生じる.

本研究では, 散水灌漑もしくは降雨によって水分補給が空間的に一様に行われている畑地を想定して HYDRUS-1D を援用し, 作物根群域の設定が土壌水分動態の予測に及ぼす影響を評価した.

HYDRUS-1D では, 土壌中の水分動態は次式で表現される.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(h) \quad (1)$$

ここで,  $\theta$ : 体積含水率 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $t$ : 時間 (d),  $K(h)$ : 不飽和透水係数 ( $\text{cm d}^{-1}$ ),  $h$ : 圧力水頭 (cm),  $z$ : 深さ (cm),  $S_a(h)$ : 作物根の吸水速度 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ ) である.

本研究では, 根の吸水速度は Feddes モデルを用い, 水ストレスおよび根群深さを考慮して次の式で求める.

$$S_a(h) = \alpha S_p \quad (2)$$

$$S_p = \frac{1}{L_R} T_p \quad (3)$$

ここで,  $\alpha$ : 水ストレスによる吸水減少係数,  $S_p$ : ポテンシャル吸水速度 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ ),  $T_p$ : ポテンシャル蒸散速度 ( $\text{cm d}^{-1}$ ),  $L_R$ : 根群深さ (cm) である.  $\alpha$  は作物の種類によって定められている定数であり, Fig. 1 に示した通り, 圧力水頭  $h$  の値や蒸散量  $T$  の大きさに応じて設定する. この図に示した圧力水頭や蒸散量の値については, 既往の研究で作物ごとに値が定められている (Feddes et al., 1978).

本研究で構築したモデルの模式図を Fig. 2 に示す. この図に示した作物根の吸水速度は, 式 (2) および式 (3) に示した通り, 蒸散速度から求めることができる. 土壌面の境界条件については, 気象データを用いてポテンシヤ

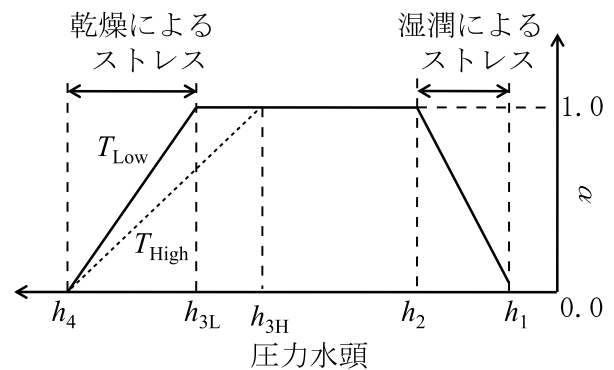


Fig. 1 作物根の吸水減少係数の模式図.  
Schematic view of root water extraction reduction factor.

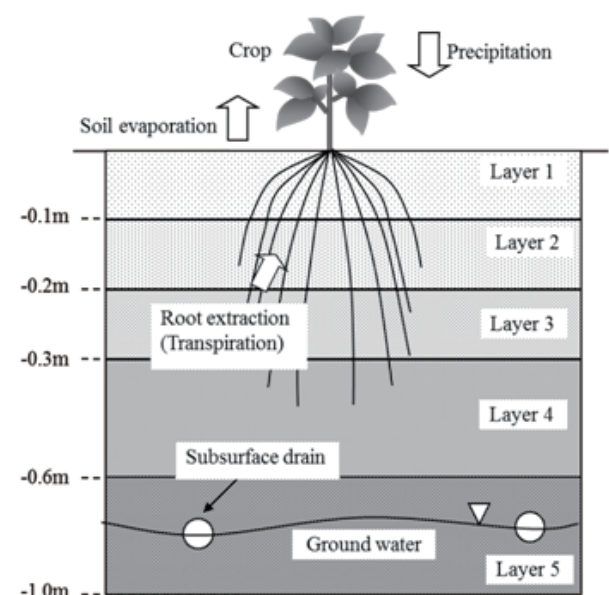


Fig. 2 土壌水分動態解析モデルと境界条件.  
Schematic view of numerical model of soil moisture movement and boundary conditions.

ル蒸発散速度を求め、これを土壌面蒸発速度と蒸散速度に分離定量化して、蒸発速度を与えた。ポテンシャル蒸発散速度は蒸発散位とも呼ばれ、この推定には様々な手法があるが、FAOの基準書ではPenman-Monteith法またはFAO Penman-Monteith法が提案されている(Allen et al., 1998)。一方、我が国の現行基準では、日本の気象条件下で精度が確認されているPenman法(1948)が推奨されているため、本研究では次式のPenman法によってポテンシャル蒸発散速度を求め、境界条件を設定することとした。

$$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_{net}}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2) (e_{sa} - e_a) \quad (4)$$

ここで、 $ET_p$ :ポテンシャル蒸発散速度 ( $\text{mm d}^{-1}$ )、 $R_{net}$ :純放射量 ( $\text{MJ m}^{-2}$ )、 $l$ :水の蒸発潜熱 ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )、 $\Delta$ :飽和蒸気圧曲線の勾配 ( $\text{hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )、 $\gamma$ :乾湿計定数 ( $\text{hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )、 $e_a$ :水蒸気圧 ( $\text{hPa}$ )、 $e_{sa}$ :飽和水蒸気圧 ( $\text{hPa}$ )、 $f(u_2)$ :高度2mにおける風速 $u_2$ の関数 ( $\text{m s}^{-1}$ )である。

土壌面蒸発速度と蒸散速度を分離して求める手法として、式(4)で計算したポテンシャル蒸発散速度に作物係数を乗じ、LAIや土壌面の被覆度を用いるものがある。しかし、これらの作物の生育の連続データを実測することは困難であることが多い。そこで、本研究では、FAOが提案しているDual crop coefficientの概念(Allen et al., 1998)を導入し、次式のとおり作物係数の代わりに基準作物係数 $K_{cb}$ および蒸発係数 $K_e$ をそれぞれポテンシャル蒸発散速度に乗じることによって、蒸散速度 $T$ および土壌面蒸発速度 $E$ を求めた。

$$T = K_{cb}ET_p \quad (5)$$

$$E = K_eET_p = K_r(K_c - K_{cb})ET_p \quad (6)$$

ここで、 $K_c$ :作物係数、 $K_r$ :蒸発減少係数である。なお、 $K_{cb}$ は作物の種類や生育ステージごとに値が設定されている。水ストレス条件下において、蒸散速度の減少に伴う作物根の吸水能の低下は式(2)によって考慮することができる。これに対し、 $K_r$ は土壌が湿っている場合は1であるが、土壌水分状態、土性および蒸発速度の積算値を用いることによって表層部の土壌水分減少に伴う蒸発速度の低下を考慮することができる(Allen et al., 1998)。下端の境界条件については、本圃場には暗渠はなく、地下水は極めて深い位置にあるため、自由排水の条件を与えた。

水分特性値については、吸引法と遠心法で求めた水分特性曲線を次式によってフィッティングして、式(1)に入力した(van Genuchten, 1980)。

$$\theta = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res})(1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad (7)$$

ここで、 $\theta_{res}$ :残留体積含水率 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )、 $\theta_{sat}$ :飽和体積含水率 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )、 $\alpha$ :定数 ( $\text{cm}^{-1}$ )、 $n, m$ :定数 (-)である。パラメータ $m$ は、以下の式によって求めることができる。

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (8)$$

不飽和透水係数については、式(7)のフィッティングパラメータと室内試験で求めた飽和透水係数を用いて次式によって推定した。

$$K(h) = K_{sat} S_e^\lambda \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (9)$$

ここで、 $K_{sat}$ :飽和透水係数 ( $\text{cm d}^{-1}$ )、 $\lambda$ :定数 (-)である。 $S_e$ は次式によって表現される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (10)$$

### 3. モデルの妥当性の検証

#### 3.1 圃場実験の概要

Fig. 1に示したモデルの妥当性を検証するために、九州大学内の真砂土を客土した試験圃場にブロッコリーの苗を列状に移植して実験を行った。列の間隔は50cmとし、列方向の移植間隔は35cmとした。なお、本圃場では畦立ては行っていない。本圃場では灌漑は行わず、水分補給は降雨のみとした。圃場の深さ5cm、15cm、25cm、35cm、50cmおよび70cmにTDR土壌水分計(CS-616, Campbell)を埋設し、10分ごとに体積含水率を測定した。なお、これらの深さは、土壌水分減少法によって消費水量を求める際の測定深度として、計画基準の中で推奨されているものである。Penman法に用いる気象データは福岡市のアメダスから収集した。なお、福岡市のアメダスは実験圃場から約6kmの距離に位置している。土壌水分計の埋設および苗の移植は2011年8月24日に実施し、実験期間は9月1日から10月31日の2か月間とした。

#### 3.2 モデルの入力条件

土壌水分計を設置した深さと同じ6深度において、100 $\text{cm}^3$ の採土円筒を用いて土壌をサンプリングし、水分特性曲線と飽和透水係数を求めた。なお、同一深度において3サンプル採取した。各土層で得られた水分特性曲線を用い、RETC(van Genuchten et al., 1991)によって式(7)の $\alpha$ および $n$ を得た(Table 1)。式(9)の不飽和透水係数は、得られた $\alpha$ と $n$ と実測した飽和透水係数

**Table 1** 各層における土壌水分特性パラメータ.  
Parameters of soil hydraulic functions.

層	深さ (cm)	飽和透水係数 (cm d <sup>-1</sup> )	$\theta_{\text{sat}}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_{\text{res}}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Van Genuchten モデルパラメータ		
					$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$\lambda$ (-)
1	0-10	403.1	0.388	0.088	0.070	1.597	0.5
2	10-20	554.0	0.412	0.094	0.089	1.537	0.5
3	20-30	826.4	0.369	0.109	0.085	1.500	0.5
4	30-40	807.0	0.346	0.052	0.100	1.650	0.5
5	40-60	725.0	0.309	0.039	0.059	2.106	0.5
6	60-80	301.0	0.307	0.03	0.073	1.870	0.5

を用いて求めた。λについては不飽和透水係数の測定値を用いた推定が必要であるが、今回は便宜的に Mualem (1976) の報告に従い、全ての層で 0.5 と設定した。また、HYDRUS-1D に入力する表面の最小圧力水頭の絶対値 (hCritA) には 10<sup>5</sup> cm を入力した。

作物根の吸水減少係数については、HYDRUS-1D のデータベースを用いて、Table 2 に示したブロッコリーの値を採用した。根群深さは、実験終了後に掘削し、深さ 40 cm 付近まで作物根が確認されたため、これを最終的な深度とした。ただし、その生長過程については確認できなかった。そこで、作物根の深度については、計算期間中一定 (40 cm) または初期深さ 5 cm から生長過程を考慮して設定し (Table 3)、各ケースの計算結果と実測結果を比較する。なお、作物根は、移植した後から生育期間 (60 日) の間に、深さ 5 cm から 40 cm まで毎日一律に約 0.4 cm 生長すると仮定した。

式 (5) および (6) に挙げた作物係数と基準作物係数については、作物の生育ステージごとに値が定められている。本研究では、生育ステージを Table 4 に示した通り設定し、それぞれにおける作物係数と基準作物係数を与え、これらの差引によって蒸発係数を求めた。また、蒸発減少係数については、Allen et al. (1998) が提案した手法によって生育期間中の毎日の値を求めた結果、0 ~ 1.0 の間で複雑に変動していた。そこで、農業水利施設計画の現場への適用性を考慮し、平均値 (0.5) を計算期間を通じて採用してケース 3 の計算条件に与え (Table 3)、実測値の再現性を確認することとした。

### 3.3 結果と考察

Fig. 3 は圃場実験で得られた実測値と Table 3 に示した 3 ケースで計算した結果の比較を示している。また、境界条件および根の吸水速度の設定に用いた Dual crop coefficient に基づく土壌面蒸発速度ならびに蒸散速度の日変化を Fig. 4 に示す。まず、ケース 1 においては、深さ 5 cm および 15 cm の初期段階で実測値との差が他のケースよりも大きく、土壌水分が残留含水率まで低下している。これは、作物根の深さを初期段階から 40 cm と

設定したため、比較的浅い層において作物根による吸水を過剰に見積もったためであると考えられる。

ケース 2 およびケース 3 の条件で計算した体積含水率は、ケース 1 に比べると計算開始直後の 5 cm の実測値の傾向を捉えている。若干の誤差が生じているが、これは作物根の活着が遅れ、その結果として作物根の吸水速度の入力値が実際よりも大きかった可能性がある。また、9 月 18 日から 21 日にかけてまとまった降雨を記録しており、その後、約 10 日の連続干天が生じている。この期間においては、ケース 2 よりもケース 3 のほうが実測値

**Table 2** 根の吸水減少係数に係るパラメータ.  
Parameters for root water extraction reduction factor.

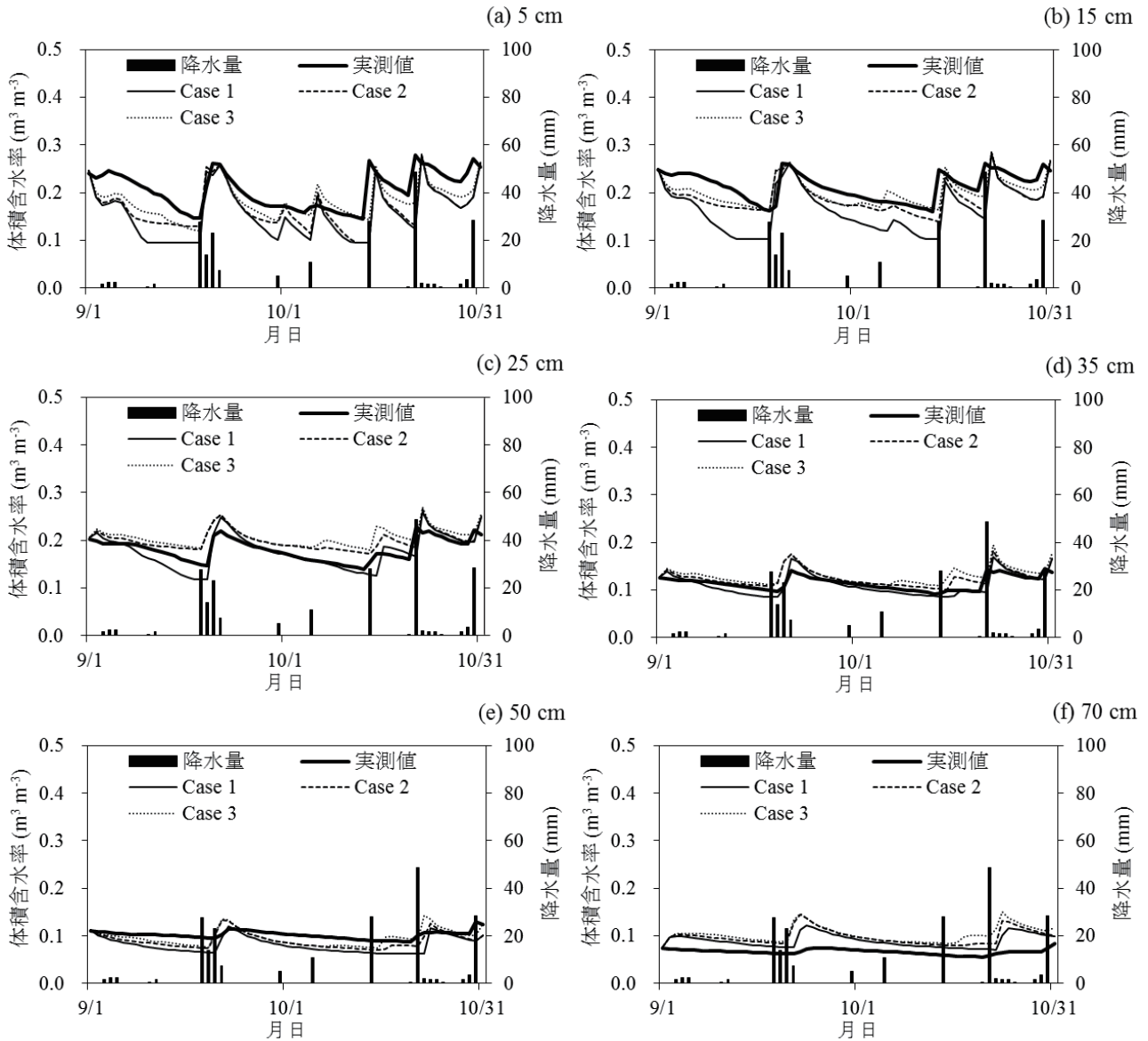
パラメータ	値
$h_1$	-10
$h_2$	-25
$h_{3H}$	-450
$h_{3L}$	-500
$h_4$	-8000

**Table 3** 作物根群域および蒸発損失係数の設定.  
Root distribution and soil evaporation reduction coefficient.

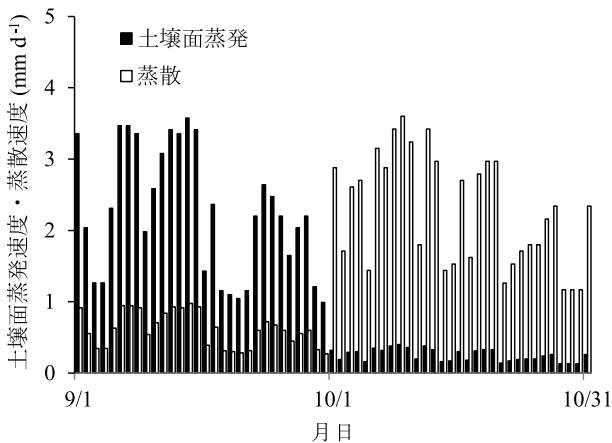
ケース No.	作物根の初期深度 (cm)	作物根の最終深度 (cm)	$K_r$
1	40	40	非考慮
2	5	40	非考慮
3	5	40	考慮 (0.5)

**Table 4** 作物の生育ステージおよび作物係数の設定.  
Crop growth stages and crop coefficients.

生育ステージ	初期	生育期
期間	9/1 ~ 9/20	9/21 ~ 10/31
$K_{cb}$	0.15	0.9
$K_c$	0.7	1.0



**Fig. 3** 各層における体積含水率の計算値と実測値の比較.  
Comparison of the simulated and measured soil moisture conditions in each layer.



**Fig. 4** Dual crop coefficient を用いた蒸発散速度および土壌面蒸発速度の経日変化.  
Daily changes of transpiration and soil evaporation rates based on the dual crop coefficient.

とよく合っている。連続干天が続き、土壌水分が低下するにつれて土壌面蒸発速度が減少すると考えられるが、蒸発減少係数によってこの現象を捉えることができたためであると考えられる。深さ 15 cm においても、ケース 1 よりもケース 2 およびケース 3 の計算結果のほうが実測値の変動傾向を捉えている。この層においても、ケース 3 のほうが特に再現性が高いことが明らかである。

深さ 25 cm においては、ケース 1 で計算開始後から 20 日程度の期間、土壌水分の計算値は実測値よりも大きく低下しているのに対し、ケース 2 およびケース 3 の結果は実測値と概ね合っている。しかし、9 月下旬以降は、ケース 2 およびケース 3 は実測値よりも大きな値を取っており、ケース 1 のほうが再現性は高いといえる。これは、ケース 2 およびケース 3 で設定した作物根の生長速

度が実際より遅く、9月下旬から10月下旬における吸水量を小さく見積もったため、この層の土壌水分状態が高く計算されたと考えられる。なお、ケース2とケース3の計算結果には、深さ15 cmまでの結果に表れていたような差はほとんど見られない。深さ15 cm付近までの層は蒸発による影響が大きく土壌水分の変動が顕著である一方、深さ25 cmでは蒸発による影響が小さくなると判断することができる。

深さ35 cm、50 cmおよび70 cmにおいては、いずれのケースでも計算結果に大きな差はなく、35 cmおよび50 cmの計算値は実測値の変動傾向を概ね捉えている。深さ70 cmにおいては、土壌水分の実測値はほぼ一定であるのに対し、計算値は過大評価する傾向にあり、変動幅が比較的大きい。本圃場では、深さ60 cm以深の層が極めて固く、締まった状態であった。土壌サンプリングと土壌水分センサーの設置が完了した後に、なるべく現状に埋め戻すように努めたが、当初の状態のように締め固められた状況に回復できなかった可能性がある。このことが誤差の一因になったと考えられる。計画基準においては、土壌水分減少法の計算に用いる最深の測定地点は70 cmが推奨されているが、実測値ではほとんど変動が生じていないことが明らかになった。深部への土壌水分の移動の有無を実測によって把握することは極めて難しいが、土壌水分動態解析を行うことによってその評価を行うことができ、消費水量の算定領域を適切に決定することが可能であることが示された。

全ケースの計算値と実測値のRMSE（2乗平均平方根誤差）を算定した結果をFig. 5に示している。この図によると、深さ5 cmおよび15 cmについては、ケース3の誤差が他のケースに比較して小さいことが明らかであ

る。他の層では、ケース間の誤差の違いは比較的小さい。

#### 4. 土壌水分減少法による消費水量の定量化

Fig. 3の体積含水率の計算および実測結果を用い、土壌水分減少法によって算定した消費水量をFig. 6に示す。計算は、5 mm以上のまとまった降雨から1日後を計算開始日とし、次の降雨が生じる前日までを計算期間とした。Fig. 6より、ケース1においては他のケースと比較すると、実測値によって求めた消費水量と計算結果は大きな差が生じていることが明らかである。特に、9月6日から9日の消費水量の誤差は非常に大きい。これは、Fig. 3に示した通り、比較的浅い層における土壌水

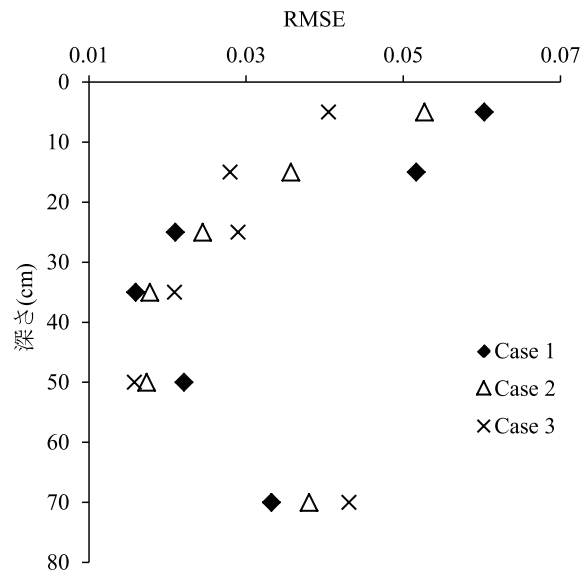


Fig. 5 各深度における体積含水率の実測値と計算値の誤差。  
RMSE between simulated and measured volumetric soil water contents in each layer.

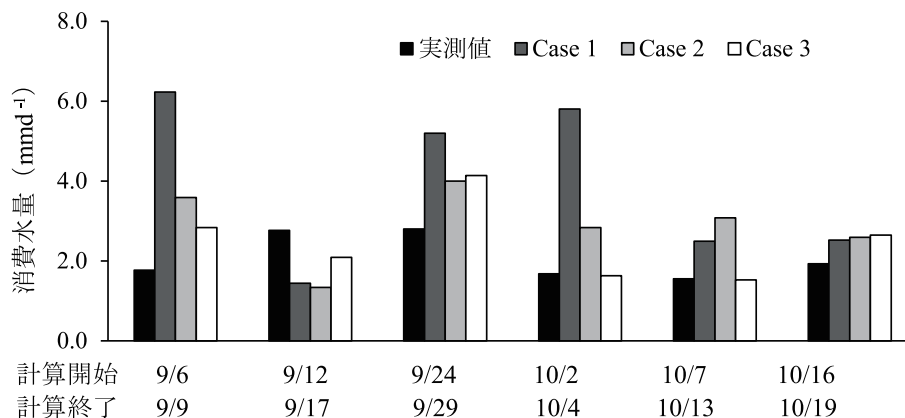


Fig. 6 消費水量の計算値と実測値の比較。  
Comparison of the simulated and measured water consumption.

分の減少を過剰に見積もったため、消費水量の定量化の際に誤差の要因になったと考えられる。一般に、農業水利施設を計画する際には、ピーク時の消費水量を考慮して施設規模を決定するが、この結果を用いた場合は施設規模が過大になる恐れがあるといえる。

ケース2およびケース3を比較すると、ケース3の計算値を用いた消費水量のほうが実測によって求めた値とよく合っており、ケース2では誤差が生じる結果となった。これは、Fig. 3およびFig. 5に示した通り、蒸発減少係数を境界条件に適用することによって、比較的土壌水分の変動の大きい表層付近における体積含水率を精度よく再現することができたためであると考えられる。この結果を用いることにより、畑地灌漑事業における農業水利施設の適切な計画が可能になると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、畑地における消費水量を定量化するために、HYDRUS-1Dを援用して土壌水分動態を解析し、作物根の分布、吸水速度および土壌面蒸発速度の設定による精度の違いを比較した。まず、作物根の生長を複数ケースに設定し、Dual crop coefficientを用いて蒸発散速度を土壌面蒸発速度および蒸散速度に簡易的に分離定量化した。それぞれを土壌面における境界条件および作物根の吸水速度として与え、土壌水分動態解析を行った。計算結果の妥当性を検証するために、圃場実験を実施して、体積含水率を連続測定した。生育期間を通して作物根の深さを一定にしたケースでは、特に生育初期における体積含水率の実測値と計算値の誤差が大きいことが示された。このことより、計画基準においては作物根の深度は40 cmとされているが、土壌水分動態解析を行う際には作物根深さがこの深度に至るまでの生長を考慮する必要があるといえる。また、作物根の生長を考慮したケースにおいては、各層における土壌水分状態の計算値は実測値と若干差異が生じていた。特に、比較的浅い層における誤差が大きかったことから、境界条件にを入力する土壌面蒸発速度を過剰に見積もっていたと考えられる。土壌水分の減少に伴う蒸発の低下を考慮するため、土壌減少係数を導入し、境界条件を補正した。その結果、土壌水分状態の再現性は非常に高くなり、体積含水率の計算値を用いて求めた消費水量と実測による値は良く合っていた。

以上より、本研究で導入した手法を用いれば、現場の土壌水分特性、初期の土壌水分状態および基礎的な気

象データを得ることにより、土壌水分を長期に観測しなくても土壌水分動態を予測することができ、土壌水分減少法による消費水量の定量化が可能であるといえる。また、境界条件設定の際には、LAIや作物群落による土壌面の被覆度を用いて土壌面蒸発速度と蒸散速度を分離定量化することが一般的であった。しかし、本研究で用いたDual crop coefficientを導入すれば、こうした作物の生育に関する連続データがなくても比較的容易に土壌面蒸発速度と蒸散速度を分離して求めることが可能である。さらに、土壌水分の減少に伴う蒸発速度の低下を考慮するための蒸発減少係数を導入することにより、計算の精度が上がることを示された。蒸発減少係数は、毎日の土壌水分状態や蒸発速度の積算値を用いて毎日異なる値を適用することが提案されているが、本研究の結果によれば、計算期間を通じて求めた値の平均値を一様に適用しても計算の精度が比較的良いことが示された。

本研究で導入した手法により、農業水利施設の新規計画や更新事業の際に必要な消費水量を精度よく求めることができると考えられる。

## 謝辞

本研究の遂行に当たり、九州農政局および(株)高崎総合コンサルタントの関係各位に多大なるご支援を頂いた。記して謝意を表す。

## 引用文献

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, D.R.M. (1998): Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements, pp. 135–158. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny, H. (1978): Simulation of field water use and crop yield, Simulation Monographs, pp. 1–189. Pudoc. Wageningen.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C. Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. and Jacobs, C.M.J. (2008): SWAP version 3.2. Theory description and user manual, p. 61. Alterra report 1649, Wageningen University and Research centre, Wageningen.
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water resources research, 12(3): 513–522.
- Norman, J.M. and Campbell, G. (1983): Application of a plant-environment model to problems in irrigation. Advances in Irrigation, 2: 155–188.
- 農林水産省構造改善局 (1997): 土地改良事業計画設計基準計画「農地用水(畑)」基準書・技術書, pp. 173–191. 農業土木学会, 東京.

- Penman, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 193 (1032): 120–145.
- Ren, D., Xu, X., Hao, Y. and Huang, G. (2016): Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River basin: Application to maize, sunflower and watermelon. Journal of Hydrology, 532: 122–139.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th. and Šejna, M. (2008): Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. Vadose Zone Journal, 7(2): 587–600.
- van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44: 892–898.
- van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Yates, S.R. (1991): The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Available at [http:// www.pc-progress.com/Documents/programs/retc.pdf](http://www.pc-progress.com/Documents/programs/retc.pdf) (2016.7.30)

## 要 旨

本研究は、作物根の分布および土壌面蒸発の変動を考慮して土壌水分動態解析を行い、消費水量を定量化することを目的とするものである。HYDRUS-1Dを援用して土壌水分動態を解析し、作物根の分布、吸水速度および土壌面蒸発速度の設定による精度の違いを検証した。作物根の生長を複数ケースに設定し、Dual crop coefficientを用いて蒸発散速度を土壌面蒸発速度および蒸散速度に分離定量化した。それぞれを土壌面の境界条件および作物根の吸水速度として与え、土壌水分動態解析を行った。計算結果の妥当性を検証するために、圃場実験を実施した。生育期間を通して作物根の深さを一定にしたケースでは、体積含水率の実測値と計算値の誤差が大きいことが示され、消費水量にも違いが生じていた。作物根の生長と土壌水分の減少に伴う蒸発の低下を考慮したケースでは、土壌水分状態の再現性は高くなり、体積含水率の計算値を用いて求めた消費水量と実測値は良く合っていた。

キーワード：土壌水分減少法，蒸散，作物根の吸水，作物係数，農業水利施設