降雨および連続干天に伴う干拓農地の水ストレスのリスク予測

阿南光政¹・濱田耕佑²・弓削こずえ³Risk Prediction of Water Stress by Rainfall and Continuous Drought
Weather in Reclaimed Crop FieldMitsumasa Anan¹, Kosuke Hamada² and Kozue Yuge³

Abstract: Central polder in Isahaya Bay in south-west Japan was reclaimed in 1997. Farming was started in 2008 after improvement of soil salinity and hydraulic conductivity conditions. Although the present soil conditions in the root zone are favorable and agricultural productivity has been increased, the crop stress due to wetness and drought is still concerned. The aim of this study is to predict risk of the water stress on crop due to wetness and drought. Annual changes of the soil moisture condition and soil water balance in the crop field were simulated with SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) model. In the simulation scenario, potatoes were grown from 20 February to 30 June and from 10 August to 20 December. Simulation results indicated that the soil moisture condition varied with the precipitation and the stress due to wetness was concerned under frequent and heavy rainfall. However the effect of the wetness decreased relatively quickly because of prompt drainage of excess surface and subsurface water. Drought stress was remarkable during the continuous dry weather days. To reduce the stress due to the drought, a scenario analysis was performed assuming the intermittent irrigation. The simulated results indicated that proper irrigation and drainage management is necessary to prevent stress due to wetness and drought.

Keywords: Soil water transport; Evapotranspiration; Root extraction; Field drainage; Ground water; Irrigation regime

1 はじめに

我が国の70%以上は中山間地に分類されており、特に長崎県は急峻な地形が多く、効率的な営農に適した農地の確保が困難であった。有明海の一部である諫早湾に面した地域は特にこの傾向が顕著であり、さらには高潮や大雨による洪水の常襲地帯であった。そのため、この地域における防災と優良農地の確保を目指し、1952年に長崎大干拓構想が発案された。これを受けて諫早湾干拓事業が1989年に着工開始となり、1997年には全長7kmの潮受堤防が建造された。この事業では、中央干拓地および小江干拓地にそれぞれ約700haおよび約100haの農地が造成された。

干拓地に造成された農地は平坦で大規模であるため作業効率に優れている反面、地下水位が高く、透水性が低いため、大雨の際には湿害が生じやすい。さらには塩害のリスクも高く、世界各地で報告されている(Hulsbergen, 2006)が、特に連続干天が生じると、作物が乾燥ストレスを受けるとともに、土壌面からの蒸発や作物の吸水などを駆動力として土壌水分が上向きに移動し、塩分によるストレスも生じる可能性がある。以上より、干拓地において農業を行う際には、こうした湿潤および乾燥の両者によって生じる作物のストレスのリスク予測を行うことが重要である。

作物の水ストレスを評価する研究は古くから行われている。乾燥あるいは湿潤条件下において作物の水ポテンシャルや蒸散量を測定したり、作物の収量や生理特性を評価することによって、作物が受ける水ストレス状態が明らかにされてきた(例えば, Hirasawa *et al.*, 1994; 堀内ら, 2011; 新田見ら, 2013)。しかし、これらの手法は連続測定が困難であり、実際の作物圃場の栽培期を通じた水ストレスの予測は難しい側面がある。近年は異常気象による豪雨や連続干天も各地で頻発しているため、年間を通じて作物がストレスを受けるリスクが高まっている。作業効率の良い干拓農地における農地利用率を向上させて多品目の作物を生産し、持続可能な農業を発展させるには年間を通じた作物の水ストレスの予測を適切に行い、それに対する具体策を講じることが不可欠であるが、こうした調査や解析を行った事例はほとんどない。

本研究では干拓農地における降雨および連続干天に起因する水ストレスによって作物の生育が阻害されることをリスクと定義してこれを予測するための手法を確立することを目的とし、最終的には作物が湿潤や乾燥によって受けるストレスを軽減するような具体策を講じることを目指す。作物の湿潤および乾燥ストレスは、土壌水分状態、地下水位および圃場の排水性など多くの要因が複雑に影響して発生するが、これらを定量的に推定するためにSWAP(Soil Water Atmosphere Plant)モデルを導入した。このモデルは、排水不良で地下水位の高い干拓農地における土壌水分動態を予測するものであり、表面湛水の状況や暗渠排水量などの水収支項目の定量化について有効性が報告されている(Van Dam *et al.*, 2008)。このモデルを用い、作物の生育期間に十分な降雨と連続干天の両者が生じた年

¹(株)高崎総合コンサルタント, Takasaki Sogo Consultant, Co. Ltd., 3-7-5 Higashiikawa, Kurume, 839-0809, Japan

²九州大学大学院生物資源環境科学府, Graduate School of Biore-source and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan

³佐賀大学農学部准教授, Associate Professor, Faculty of Agriculture, Saga University, 1 Honjo Saga, 840-8502, Japan (Corresponding Author) E-mail:yuge@cc.saga-u.ac.jp

における作物圃場の土壌水分動態を予測し、圃場の水収支を明らかにする。この結果を用いて、湿潤および乾燥によって水ストレスが生じた場合の蒸散量と水ストレスがない場合の蒸散量を比較することにより、作物が受ける水ストレスのリスクを定量的に評価した。

2 対象地区の概要

本研究では、対象地区として長崎県諫早市の中央干拓地(32.86° N, 130.13° E)に位置する作物圃場を対象とした。対象圃場周辺の状況を図 1に示す。諫早湾干拓事業によって約7kmの防潮水門が建設され、1997年にこれを閉め切って乾陸化して中央干拓地が造成された。その後、様々な土層改良によって除塩や圃場の排水性が改善され、2008年から営農が開始された。長崎県農業振興公社を通じて農地の貸し付けが行われ、2010年時点で41経営体(法人16, 個人25)が入植している。中央干拓地の農地面積は約700haであり、標準区画は6haである。主要な作物(2009年)は、レタス、ニンジンおよびバレイショなどの野菜類であり、ソルガムなどの飼料作物の作付も高い割合を占めている。山野(2011)は、諫早干拓事業で造成された小江干拓地および中央干拓地における2009年の農地利用率は150%以上と報告している。このことから、大規模で平坦な農地を活用して効率的な営農が営まれ、年間を通じて多品目の作物栽培が盛んに行われているといえる。

3 シミュレーションモデルの概要

3.1 基礎方程式

本研究では、年間を通じて降雨や連続干天によって生じる作物のストレス状態を評価するために、圃場の土壌水分動態解析を行った。マイクロ灌漑が導入されていたり、土壌水分特性が場所ごとに著しく異なる圃場において土壌水分動態を解析する場合、土壌水分状態が水平方向に変化するため、二次元あるいは三次元的な取り扱いが望ましい。しかし、本研究で対象とした圃場においては、既往の研究によって水平方向の土壌水分特性に係わる透水性などはほとんど違いがないことが確認されている(庄野ら, 2008b)。また、作物圃場における水分補給は降雨が主であり、干天が続く場合は必要に応じてスプリンクラ灌漑が行われる。こうした場合は、水平方向の土壌水分状態には空間的な違いはほとんどなく、土壌水分の移動は水平方向よりも鉛直方向に卓越する。以上より、本研究では一次元の土壌水分動態解析を行うモデルであるSWAPモデルを導入した。本モデルでは、次式で表現されるRichards式によって土壌中の水分動態を推定する。

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

ここで、 θ :体積含水率($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)、 t :時間(d)、 $K(h)$:不飽和透水係数(cm d^{-1})、 h :土壌水の圧力水頭(cm)、 $S_a(h, z)$:作物根による吸水速度($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$)、 $S_d(h)$:暗渠排水速度($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$)である。

3.2 境界条件

土壌面の境界条件として蒸発散量および降雨を与える。蒸発散量を求める手法はPenman Monteith法(Monteith, 1965; 1981)やFAO Penman-Monteith法(Allen *et al.*, 1998)などが広く用いられているが、本研究では、我が国の畑地

図 1:対象地区の状況

の消費水量の推定に推奨されている次式のPenman法を採用した(農林水産省, 1997)。

$$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_{net}}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2)(e_{sa} - e_a) \quad (2)$$

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

式(2)で求めた蒸発散位に作物係数 K_c を乗じて次式によって実蒸発散量を計算する。

$$ET = K_c ET_p \quad (3)$$

式(3)によって求めた ET を、次式によって作物群落による土壌面の被覆度を用いて土壌面蒸発量および蒸散量に分離し、土壌面蒸発量を表面の境界条件として設定した(Kroes *et al.*, 2008)。

$$E = ET(1 - SC) \quad (4)$$

$$T = ET - E \quad (5)$$

ここで、 E :土壌面蒸発量(mm d^{-1})、 SC :土壌面の被覆度(-)、 T :蒸散量(mm d^{-1})である。

また、下端の境界条件として、下層の土壌水の圧力水頭の実測値を与えた。

3.3 作物の水ストレスの評価

深さ z における作物根によるポテンシャルの吸水速度 $S_p(z)$ は、式(5)で求めた蒸散量と作物根の分布を考慮して、任意の深度ごとに次式によって求めることができる。

$$S_p(z) = \frac{l(z)}{\int_D l(z) dz} T \quad (6)$$

ここで、 D :根群域の深さ(mm)、 $l(z)$:深さ z における根群域の相対密度(-)である。Feddes *et al.* (1978)は、土壌水分状態によって作物根に湿潤あるいは乾燥のストレスが生じることを明らかにし、土壌水の圧力水頭をその指標として与えている。また、Maas and Hoffman (1977)は、根の吸水への塩分ストレスをECの値を用いて考慮する手法を確立している。Skaggs *et al.* (2006)はこれらの湿潤、乾燥および塩分ストレスが根の吸水速度を求める影響を複合的に考慮すべきであると主張している。これを踏まえ、SWAPモデルではさらに凍結ストレスを考慮して根の吸水速度を求めるために次式が用いられている。

$$S_a(h, z) = \alpha_d \alpha_w \alpha_s \alpha_f S_p(z) \quad (7)$$

ここで、 α_d , α_w , α_s , α_f : 湿潤, 乾燥, 塩分および凍結ストレスによる吸水減少係数(-)である。

本研究では、大雨および連続干天によって生じる湿潤および乾燥ストレスを評価するため、塩分および凍結によるストレスの評価は対象としない。そのため、次式によって根の吸水速度を求める。

$$S_a(h, z) = \alpha_d \alpha_w S_p(z) \quad (8)$$

式(8)に示した α_d および α_w の設定手法の模式図を図 2 に示す。この図に示した通り、深さごとの土壌水の圧力水頭に応じて乾燥あるいは湿潤ストレスの発生状況を判断し、その圧力水頭の値に応じて α_d および α_w を設定する。図 2 に示した圧力水頭 $h_1 \sim h_4$ には作物によって固有の値が設定されている(Kroes *et al.*, 2008)。

これを用いて式(8)によって深さごとの吸水速度を求めて積算することで、ストレス条件下の蒸散量を求める。これを式(5)で得られた値と比較することで湿潤および乾燥ストレスの度合いを評価する。

4 作物の水ストレス予測の計算条件

本研究で構築したモデルの概要を図3に示す。本研究では、土壌を3層に分割し、それぞれに水分特性値を与えた。現地圃場3か所3深度(5cm, 35cm, 70cm)で採取した土壌の水分特性曲線を求めて各深さで平均をとり、次式で示すVan Genuchtenモデル(1980)によってフィッティングして、式(1)に入力した。

$$\theta = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left(1 + |\alpha h|^n \right)^{-m} \quad (9)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

ここで、 θ_{res} : 残留体積含水率($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{sat} : 飽和体積含水率($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α : 定数(cm^{-1}), n, m : 定数(-)である。

フィッティングによって得られたパラメータ(α, n)を表 1 に示す。この表中の飽和透水係数、 θ_{res} および θ_{sat} は室内試験で求めた値を示している。不飽和透水係数については、これらのフィッティングパラメータと飽和透水係数(表 1)を用いて次式によって推定した。

$$K(h) = K_{sat} S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (10)$$

ここで、 K_{sat} : 飽和透水係数(cm d^{-1}), λ : 定数(-)である。 λ は間隙の連結などの影響を補正するためのパラメータであり、既往の研究(Mualem, 1976)で推奨されている0.5を用いた。 S_e は次式によって表現される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (11)$$

本研究では、表面の境界条件を求めるために夏期から冬期にかけて降水量が極端に少なかった1994年の年間の気象データ(日射量, 気温, 湿度, 風速および降水量)を用いて土壌水分動態を予測し、作物に生じるストレスを評価した。気象要素は中央干拓地内で測定したものをを用いた。このデータを用いて式(2)によって蒸発散位を求めた。対象圃場の作付作物は中央干拓地の主要作物であるジャガイモであり、栽培暦を参考にして栽培期間を1994年2月20日-6月30日および8月10日-12月20日までの2期とした。ジャガイモの生育ステージごとの作物係数(農水省, 1997)を蒸発散位に乗じて蒸発散量を求めた。既往の研究(丸居ら, 2002)で調査されたジャガイモの土壌面被覆度を用いて、式(4)および(5)によって土壌面蒸発量と蒸散

図 2: 湿潤および乾燥による吸水減少係数の設定 (Feddes *et al.* (1978) を一部修正)

図 3: シミュレーションモデルの構成

表 1: 対象圃場の土壌水分特性のパラメータ

Layer No.	Saturated hydraulic conductivity (cm s^{-1})	θ_{sat} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{res} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Parameters of van Genuchten		
				$\alpha(\text{cm}^{-1})$	n (-)	λ (-)
1 (0 - 0.1 m)	1.15×10^{-3}	0.526	0.162	0.078	1.23	0.5
2 (0.1 - 0.4 m)	1.00×10^{-3}	0.529	0.032	0.070	1.13	0.5
3 (0.4 - 1.0 m)	7.54×10^{-4}	0.525	0.011	0.070	1.10	0.5

量に分離した。また、作物根の深度は現地調査の結果から最大で50cmとした。栽培開始日の作物根深度を0cmとして作物生育期に最大深度に達するように設定し、根の吸水分強度分布が作物の生育とともに変化するようにした。なお、中央干拓地では灌漑は行わないことが一般的であるため、表面からの水分補給は降雨のみであると設定して計算を行った。式(1)に示した暗渠排水量については、暗渠の設置深さ(80cm)および間隔(10m)を用いて、Hooghoudt (1940)の手法により算定した。

図 2に示した3層をさらに細かいコンパートメントに分割し、各コンパートメント中心の体積含水率を式(1)によって計算した。この値を土壌水の圧力水頭に換算して、図 2に示した手法によって式(8)の湿潤および乾燥ストレスによる吸水減少係数を既往の研究(Kroes *et al.*, 2008)を参考に決定し、実際の蒸散量とポテンシャルの蒸散量を比較した。

5 結果と考察

図 4は降水量の年間の経日変化を示している。この図より、冬から春にかけては断続的な降雨があり、平年並みの条件であった。このことから、ジャガイモ第一期作においては、降雨による十分な水分補給が期待できる条件であったと判断できる。6月下旬から8月下旬の2か月間はまとまった降雨がほとんどなかったことが明らかである。ジャガイモ第二期作の期間である8月から12月に着目すると、平年に比べて降水量が極端に少ない条件であった。この図に示した降水量と蒸発散量を境界条件とし、図 3のモデルを用いて推定した土壌水分の経日変化を図 5に示す。ここでは、表層付近(5cm)、根群域(40cm)および根群域より下層(60cm)の3深度の計算結果を示している。60cmよりも深い層では土壌水分の変動はほとんど生じなくなっていた。この図より、降雨によって表層付近の土壌水分は大きく上昇し、降雨後は徐々に体積含水率が減少していることが明らかである。一般に、干拓地は排水不良で降雨後の湿潤な状態が比較的長期に及ぶ傾向にあるが、中央干拓地では様々な土壌改良法によって透水性が改良され、暗渠の施工などによる排水性が改善されたためであると考えられる(庄野ら, 2008a)。図 6は地下水位の日変動を示したものであり、図 7は暗渠排水量および土壌面の湛水深を計算した結果である。図 6より、降雨によって地下水位が上昇している現象がみられるが、その後、速やかに低下しており、暗渠の埋設深度(80cm)で安定している。また、図 6より、降雨の際の暗渠による排水量が大きな値を示しており、排水性は確保されていることが示唆される。図 7に示したとおり、4月と6月のまとまった降雨の際には表面が湛水したことが窺えるが、湛水深は2cm以下であり、1日で解消している。

図 8は、図 5に示した土壌水分状態を指標として吸水減少係数を決定し、式(8)によってストレスによる蒸散量の減少量を定量化した結果を示している。この図より、計算開始から4月上旬までは、湿潤および乾燥によるストレスはほとんど生じていない。この期間は断続的に降雨が生じたために乾燥によるストレスは生じず、また1日当たりの降水量も比較的小さかったことから湿潤ストレスも生じなかったと考えられる。4月上旬以降になると、湿潤によるストレスが頻繁に生じている。これは、この時期に比較的多量の雨が

図 4: 降水量の経日変化

図 5: 体積含水率の日変動の予測

図 6: 地下水位のシミュレーション結果

図 7: 表面湛水深および暗渠排水量の推定値

頻繁に降ったため、図 7に示した通り表面湛水が生じており、暗渠排水量も増加していることから、圃場内に余剰な水が存在して作物の吸水を阻害する要因になったと考え

られる。その後、6月下旬までまとまった降雨と連続干天が交互に生じているが、それぞれの期間において湿潤および乾燥によって作物にストレスが生じていることが明らかである。一方、図 4によると6月下旬から8月下旬までほとんど降雨がないが、この期間はジャガイモの作付期間ではないため、ストレスは生じない結果となった。ジャガイモの二期目の作付は8月中旬に開始された後、9月上旬にまとまった雨が降っているが、湿潤ストレスはほとんど生じていない。これは、長期間の連続干天が続く、圃場の土壌水分が極めて低かったため、湿潤ストレスを与えるような土壌水分環境に至らなかったことを示唆している。9月中旬から11月中旬にかけてほとんど雨が降っておらず、図 8に示した通り、顕著な乾燥ストレスが生じていることが明らかである。したがって、この期間は作物の生育に支障が生じる恐れがあるため、適切な灌漑を行ってストレスを軽減するなどの対策が必要であるといえる。

そこで、乾燥ストレスが生じ始めた9月18日から、比較的まとまった降雨が生じた11月14日までの期間において、作物に乾燥ストレスが生じないような手法を検討した。既往の研究では、中央干拓地のジャガイモ圃場のTRAMは15mmと試算されている(丸居ら, 2002)。この値を用いて4日間断で15mm d⁻¹の灌漑を行うシナリオの下で作物が受けるストレスの予測を行った。その結果を図 9に示す。このシナリオでは、9月18日から11月12日までの期間において、12回の灌漑を行っている。この図に示した通り、図 8と比較すると乾燥によるストレスを大きく抑制できることが明らかである。

図8: 年間を通した作物の水ストレス状態の評価

図 9: 灌漑条件下における作物の水ストレス状態の評価

6 おわりに

本研究では、干拓農地における降雨と連続干天が作物の生育に及ぼす影響を定量的に評価するため、SWAPモデルを用いて作物圃場の土壌水分動態を推定するモデルを構築した。土壌面の境界条件として、土壌面蒸発量および降水量を与えて土壌水分の変動を予測し、地下水位、土壌面の湛水深および暗渠排水量などの水収支項目を定量化した。また、これらの値を用いて、湿潤および乾燥ストレスによる作物根の吸水への影響を考慮し、ストレス条件下における蒸散量の低下量を定量化した。その結果、降雨の頻度および量によって湿潤ストレスが生じることが明らかになったが、速やかな表面湛水の解消、地下水位の低下および暗渠からの排水によって湿潤ストレスは比較的早く低減することが明らかになった。一方、連続干天の条件下では乾燥ストレスが深刻であり、これを解消するには適切な灌漑が必要になることが示唆された。そこで、中央干拓地で試算されたTRAMに相当する用水を4日間断で灌漑するシナリオの下で作物の水ストレス状態を評価したところ、この灌漑スケジュールで乾燥ストレスを低減することが可能であるという結果が得られた。

本研究で導入した手法により、作物の水ストレスに影響を及ぼす土壌水分動態や圃場の排水性に関わる水収支項目を定量化することができ、湿潤および乾燥によって作物が受けるストレスを定量的に予測することが可能である。また、この結果を用いて水ストレスを回避するための地下水位の制御などの排水性の改善や適切な水分補給など、具体策を講じることもできる。

近年、中央干拓地では、比較的水ストレスに影響を受けやすい葉菜類の栽培や、干天が生じやすい夏期の農業生産も増加している。さらには、大規模な施設栽培も増加しており、ハウス内では乾燥による水ストレスが生じやすい。以上より、今後は、本研究で提案した乾燥ストレスを軽減するための灌漑スケジュールが実際の圃場で効果を発揮するかどうかを実証したい。湿害を回避するための手法についても検討して有効性を確認し、より効果の高い水ストレスのリスク回避手法に発展させる予定である。

さらには、1994年の渇水の際には農業用水の使用も厳しく制限されたことから、渇水年では本研究で採用した標準的な灌漑の実施が難しい恐れもある。今後は、土壌水分状態、蒸発散量および地下水位などの水収支項目などを包括的に考慮して、渇水時の限られた用水の範囲内で作物生育に支障を与えないような適切な灌漑スケジュールを決定する手法を確立したい。

謝辞

本研究では九州農政局、長崎県庁および長崎県農林技術開発センターの関係各位に多大なるご協力を賜りました。記して謝意を表します。

引用文献

- [1] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and drainage paper*, 56, pp.290.
- [2] Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and Zaradny, H. (1978): *Simulation of field water use and crop yield*, Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen, p.189.
- [3] Hirasawa, T., Tanaka, K., Miyamoto, D., Takei, M., and

- Ishihara, K. (1994): Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under drought conditions during grain filling, *Jpn. J. Crop Sci.*, 63(4), pp.721-730.
- [4] Hooghoudt, S.B. (1940): *Algemene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel lopende drains, greppels, sloten en kanalen*, Versl. Landbouwk. Onderz., 46-B, pp.193.
- [5] 堀内尚美・亀有直子・車敬愛・鈴木栄・平沢正・萩原勲 (2011): 乾燥ストレス下におけるブルーベリー葉の水ポテンシャルおよび光合成特性, *園芸学研究*, 10(4), pp.485-490.
- [6] Hulsbergen, R. (2006): *Predicting Ulva growth in a saline Volkerak- Zoomlake*, Delft hydraulics, TU Delf, pp.60.
- [7] 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*, Alterra report 1649, Wageningen University and Research centre, Wageningen, pp. 262.
- [8] Maas, E.V., and Hoffman, G.J. (1977): Crop salt tolerance-current assessment, *J. Irrig. and Drainage Div., ASCE*, 103, pp.115-134.
- [9] 丸居篤・原口智和・坂元智彦・弓削こずえ・中野芳輔・舟越保 (2002): 新規干拓地における畑地利用と灌漑スケジューリング, *九大農学芸誌*, 57(1), pp.125-133.
- [10] Monteith, J.L. (1965): Evaporation and the Environment. In: G.E. Fogg (ed.), *The state and movement of water in living organisms*. Cambridge University Press, pp. 205-234.
- [11] Monteith, J.L. (1981): Evaporation and surface temperature, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 107, pp.1-27.
- [12] Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12(3), pp. 513-522.
- [13] 新田見浩由・佐藤朋和・松波寿典・伊藤亮一・池田武 (2013): 開花期の水ストレスが異なる伸育型ダイズの収量および収量構成要素に及ぼす影響, *日本作物学会紀事*, 82 (2), pp. 141-149.
- [14] 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「農業用水 (畑)」基準書・技術書, 農業土木学会, pp.180-181.
- [15] Skaggs, T.H., Van Genuchten, M.Th., Shouse, P.J., and Poss, J.A. (2006): Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agric. Water Man.*, 86, pp.140-149.
- [16] 庄野寿規・弓削こずえ・阿南光政・中野芳輔 (2008a): 新規干拓地における土層改良と透水性の関係, *畑地農業*, 590, pp.9-16.
- [17] 庄野寿規・弓削こずえ・阿南光政・中野芳輔 (2008b): 新規干拓地における透水性の空間分布特性の評価, *畑地農業*, 592, pp.10-22.
- [18] Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., and Kroes, J.G. (2008): Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP, *Vadose Zone J.* 7, pp. 640-653.
- [19] Van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, pp.892-898.
- [20] 山野明男 (2011): 長崎県諫早湾干拓地における営農展開II (2009 年~2010 年), 愛知学院大学教養部紀要, 58(4), pp.51-71.

この論文の公開の質疑または討議は2016年6月30日まで受け付けます。